



José Luís Cordeiro Fachadas

Aluno Finalista do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

**Análise de Vários Modelos Numéricos de
Captura de Superfície Livre e Aplicação a
um Dispositivo Conversor de Energia do
Tipo Coluna de Água Oscilante**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Eric Didier, Professor Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: José Conde, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Dias
Vogais: Prof. Doutor Luís Gil
Prof. Doutor Eric Didier
Prof. Doutor José Conde



José Luís Cordeiro Fachadas

Aluno Finalista do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

**Análise de Vários Modelos Numéricos de
Captura de Superfície Livre e Aplicação a
um Dispositivo Conversor de Energia do
Tipo Coluna de Água Oscilante**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Eric Didier, Professor Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: José Conde, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Dias
Vogais: Prof. Doutor Luís Gil
Prof. Doutor Eric Didier
Prof. Doutor José Conde



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro de 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

Copyright ©2011 de José Luís Cordeiro Fachadas, FCT/UNL.

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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Quero expressar o meu profundo agradecimento ao Professor Eric Didier, orientador desta dissertação, por me proporcionar a oportunidade de realizar este trabalho, por toda a orientação prestada, pelos conhecimentos científicos que me transmitiu e pela disponibilidade e apoio demonstrados ao longo destes meses.

Ao Professor José Conde, pela co-orientação e auxílio na revisão do documento.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo de todo o meu percurso académico.

Por fim, um agradecimento muito especial ao meu pai José da Silva Fachadas, à minha mãe Rosária Maria Lima Cordeiro Fachadas e ao meu irmão Jorge Manuel Cordeiro Fachadas, por terem possibilitado toda a minha formação, pelo carinho, paciência e compreensão que sempre demonstraram e por tudo o que fizeram por mim.

Resumo

No presente trabalho investiga-se o desempenho de vários esquemas numéricos e a sua capacidade de modelação de escoamentos com superfície livre, com recurso à formulação VoF do código FLUENT (versão 6.3.26). Para a análise dos modelos e esquemas utilizados, é tomada em consideração a redução da difusão da fracção de volume e a precisão dos resultados na propagação de uma onda num canal de fundo horizontal.

Este estudo terá como base o modelo de referência utilizado na secção de mecânica dos fluidos do DEMI da FCT-UNL, que permite modelar com precisão a propagação das ondas e a sua interacção com estruturas. No entanto, este modelo apresenta falhas ao nível da modelação da rebentação, o que faz com que seja necessário estudar a viabilidade de novos modelos, tendo em conta a difusão do escalar de fracção de volume, para que seja exequível a sua utilização em casos mais complexos na interacção entre a onda e uma estrutura.

Posteriormente, o modelo que melhores resultados obteve na simulação da propagação e rebentação é aplicado numa estrutura costeira, mais concretamente num dispositivo conversor de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante, onde são analisados os fenómenos que resultam da interacção entre a onda e a estrutura e comparados vários parâmetros como o factor de amplificação, a fase angular ou a potência pneumática. O desempenho do dispositivo é avaliado tendo em conta a variação da altura de onda incidente.

Palavras-chave: Energia das ondas, Coluna de Água Oscilante (CAO), Dinâmica de fluidos computacional (CFD), Simulação numérica, Modelo de turbina.

Abstract

In the present study, the performance of several numerical schemes are investigated, as well as their ability to modeling free surface flows, using the VoF formulation of the commercial code FLUENT (version 3.2.26). In order to analyze the models and schemes, the reduction of the volume fraction diffusion and the accuracy of the results in the propagation of a wave in a channel with a variable bottom, are taken into account.

This study will be based on the reference model used in the fluid mechanics section of the DEMI FCT-UNL, which allows to accurately modeling wave propagation and its interaction with structures. However, this model fails for modeling wave breaking, which makes it necessary to study the practicality of new models, taking into account the diffusion of the volume fraction scalar.

Subsequently, the best model that allows to obtain the best results in the simulation of propagation and wave breaking is applied to a wave energy converter, specifically the Oscillating Water Column device, where the phenomena that result from the interaction between wave and structure are analyzed. Various parameters are compared such as the amplification factor, phase angle or the pneumatic power. The device performance is evaluated taking into account the variation of the incident wave height.

Keywords: *Wave energy, Oscillating Water Column (OWC), Numerical simulation, Computational Fluid Dynamics (CFD), Turbine model.*

Índice

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3 Organização da dissertação	3
Capítulo 2 - Estudo bibliográfico.....	5
2.1 Estado da arte	5
2.2. Dispositivo de Coluna de Água Oscilante.....	7
2.3. Teoria linear das ondas.....	9
Capítulo 3 - Modelo numérico.....	17
3.1. Modelo CFD.....	17
3.2. Equações RANS.....	18
3.2.1. Modelo de turbulência k- ϵ standard	20
3.3. Método VoF	21
3.4. Esquemas numéricos	22
3.4.1. Esquemas VoF.....	22
3.4.2. Esquemas de acoplamento entre velocidade e pressão.....	22
3.4.3. Esquemas de reconstrução.....	23
3.4.4. Esquemas de discretização	23
3.5. Geração da malha	23
Capítulo 4 - Validação do modelo numérico.....	25
4.1. Modelação bidimensional da rebentação numa estrutura costeira	25
4.1.1. Geometria e condições de onda.....	25
4.1.2. Análise dos esquemas numéricos e resultados	26
4.2. Modelação bidimensional da propagação de uma onda em fundo horizontal.....	30
4.2.1. Estudo da elevação da superfície livre	30
4.3. Resultados e escolha do modelo numérico.....	33
Capítulo 5 - Caso de estudo e aplicação ao conversor de energia	35
5.1. Geometria da CAO e condições de onda.....	35
5.1.1. Geração da malha	37

5.2. Modelação numérica de um dispositivo CAO.....	38
5.2.1. Modelo de turbina	40
5.2.2. Parâmetros de análise	41
5.3. Análise de resultados em CAO aberta.....	42
5.4. Análise de resultados em CAO fechada com conduta.....	44
5.5. Análise de resultados em CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	48
5.5.1. Variação do período de onda incidente	55
5.6. Análise comparativa das diferentes configurações.....	56
5.7. Optimização do modelo de turbina.....	60
Capítulo 6 - Conclusões.....	65
Referências Bibliográficas	67

Índice de figuras

Figura 2.1 – Principais sistemas de conversão de energia das ondas (Falcão, 2009).....	7
Figura 2.2 – Sistema de Coluna de Água Oscilante (Phelps, 2011).....	8
Figura 2.3 – Condições de fronteira (Dean e Dalrymple, 1991)	10
Figura 2.4 – Deslocamento das partículas de água numa onda progressiva (Demirbilek e Vincent, 2008).....	14
Figura 4.1 – Geometria do canal e condições de fronteira	25
Figura 4.2 – Malha gerada no programa GAMBIT (versão 2.2.30).....	26
Figura 4.3 – Fracção de volume para o caso2000	28
Figura 4.4 - Fracção de volume para o caso2160.....	28
Figura 4.5 - Fracção de volume para o caso2180.....	28
Figura 4.6 - Fracção de volume para o caso2112	29
Figura 4.7 - Fracção de volume para o caso2113	29
Figura 4.8 - Geometria do canal de fundo horizontal com sondas de elevação de superfície livre.....	30
Figura 4.9 – Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 1.....	31
Figura 4.10 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 2	31
Figura 4.11 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 3	31
Figura 4.12 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 4	32
Figura 4.13 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 5	32
Figura 5.1 – Perfil de secção da central CAO de Mutriku (Enciso et al. 2009)	35
Figura 5.2 – Carta de batimetria da baía de Biscaia	36
Figura 5.3 – Geometria do dispositivo CAO e posição das sondas.....	37
Figura 5.4 – Malha gerada para o domínio de cálculo na região da CAO para a amplitude 0,6m.....	38
Figura 5.5 – Esquema ilustrativo da configuração de CAO aberta	39

Figura 5.6 – Esquema ilustrativo da configuração de CAO fechada com conduta	40
Figura 5.7 – Esquema ilustrativo da configuração de CAO fechada com conduta e modelo de turbina	40
Figura 5.8 – Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A), fase (B) e sloshing (C), em função da amplitude de onda incidente para CAO aberta.....	42
Figura 5.9 – Série temporal de elevação de superfície livre para CAO aberta.....	43
Figura 5.10 - Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A) e fase (B), em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta	44
Figura 5.11 – Variação do sloshing em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta	45
Figura 5.12 - Série temporal de elevação de superfície livre para CAO fechada com conduta	46
Figura 5.13 - Série temporal de pressão para CAO fechada com conduta	46
Figura 5.14 - Série temporal de caudal para CAO fechada com conduta	46
Figura 5.15 - Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A), fase (B) e sloshing (C), em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	48
Figura 5.16 - Variação da potência pneumática, em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta e modelo de turbina	49
Figura 5.17 – Comparação entre a série temporal de elevação de superfície livre e a de pressão para CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	50
Figura 5.18 - Série temporal de elevação de superfície livre para CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	50
Figura 5.19 - Série temporal de pressão para CAO fechada com conduta e modelo de turbina	51
Figura 5.20 - Série temporal de caudal para CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	51
Figura 5.21 - Série temporal de potência pneumática para CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	51
Figura 5.22 – Linhas de corrente e intensidade da velocidade em escape para $a = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina	53
Figura 5.23 – Fracção de volume em escape para $a = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	53

Figura 5.24 - Linhas de corrente e intensidade da velocidade em admissão para $a = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina	54
Figura 5.25 – Fração de volume em admissão para $a = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	54
Figura 5.26 - Variação do factor de amplificação (H/H0) (A), fase (B), sloshing (C) e da potência pneumática em função do período de onda incidente para CAO fechada com conduta e modelo de turbina.....	55
Figura 5.27 - Variação do factor de amplificação (H/H0) (A), fase (B) e sloshing (C), em função da amplitude de onda incidente para CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina	57
Figura 5.28 - Série de temporal de elevação de superfície livre para CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($Ksi = 50Pa. s/m3$), para $a = 1.0m$..	59
Figura 5.29 - Série de temporal de velocidade para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($Ksi = 50Pa. s/m3$), para $a = 1.0m$	59
Figura 5.30 - Série de temporal de pressão para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($Ksi = 50Pa. s/m3$), para $a = 1.0m$	59
Figura 5.31 - Série de temporal de caudal para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($Ksi = 50Pa. s/m3$), para $a = 1.0m$	60
Figura 5.32 – Série temporal de elevação de superfície livre para característica de turbina $Ksi = 50Pa. s/m3$, $Ksi = 200Pa. s/m3$ e $Ksi = 400Pa. s/m3$	60
Figura 5.33 - Série temporal de pressão para característica de turbina $Ksi = 50Pa. s/m3$, $Ksi = 200Pa. s/m3$ e $Ksi = 400Pa. s/m3$	61
Figura 5.34 - Série temporal de caudal para característica de turbina $Ksi = 50Pa. s/m3$, $Ksi = 200Pa. s/m3$ e $Ksi = 400Pa. s/m3$	61
Figura 5.35 - Série temporal de potência pneumática para característica de turbina $Ksi = 50Pa. s/m3$, $Ksi = 200Pa. s/m3$ e $Ksi = 400Pa. s/m3$	61
Figura 5.36 – Variação do factor de amplificação H/H0 (A) e da potência pneumática (B), em função da característica da turbina (Ksi).....	63

Índice de tabelas

Tabela 4.1 - Esquemas numéricos testados	27
Tabela 4.2 – Erros associados à elevação da superfície livre	33
Tabela 5.1 – Número de elementos das malhas em função da amplitude de onda.....	38
Tabela 5.2 – Comprimentos de onda (L) em função do período (T)	55

Simbologia e notações

a	amplitude de onda
g	aceleração gravítica
h	profundidade
k	número de onda
t	tempo
u	componente da velocidade segundo x
w	componente da velocidade segundo z
C	celeridade da onda
H	altura de onda
I	Intervalo médio
L	comprimento de onda
P	pressão
T	período de onda
V	campo de velocidade
V_n	componente normal da velocidade
ζ	deslocamento na direcção x
η	elevação da superfície livre
θ	fase
ξ	deslocamento na direcção z
ρ	densidade volúmica do fluido
ω	frequência angular
∇	gradiente
Φ	função potencial de velocidade

Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AWS	Archimedes Wave Swing
CAO	Coluna de Agua Oscilante
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional (do inglês <i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CFL	<i>Courant–Friedrich-Lewy</i>
CICSAM	(do inglês <i>Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes</i>)
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
HRIC	(do inglês <i>High Resolution Interface Capturing</i>)
MUSCL	(do inglês <i>Monotonic Upstream Scheme for Conservation Laws</i>)
PISO	(do inglês <i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>)
RANS	Equações médias de Navier-Stokes (do inglês <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>)
SIMPLEC	(do inglês <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent</i>)
UDF	(do inglês <i>User Defined Function</i>)
UNL	Universidade Nova de Lisboa
VoF	Volume do Fluido (do inglês <i>Volume of Fluid</i>)

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

Estima-se que o consumo mundial de energia cresça consideravelmente nas próximas décadas. Surgem constantes avisos de que os métodos tradicionais de produção de energia estão a contribuir para sérios problemas ambientais. O sector da energia, confrontado com a exigência de encontrar uma alternativa real e fiável às formas convencionais de produção de energia eléctrica, foi forçado a iniciar um processo regenerativo que encara com abertura as energias renováveis. Os oceanos, contendo o maior de todos os recursos naturais, albergam um potencial energético enorme, que pode contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia a nível global (Clément *et al.*, 2002).

Na evolução dinâmica da indústria da energia renovável, a energia das ondas está a emergir. Embora a tecnologia seja relativamente nova e pouco competitiva economicamente em relação a outras tecnologias mais desenvolvidas, como por exemplo a energia eólica, o interesse dos governos e da indústria está a aumentar. Uma característica importante das ondas marítimas é a sua grande densidade energética, que é a maior entre as outras fontes de energia renovável (Clément *et al.*, 2002).

A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que origina diferentes classificações. As mais relevantes são sem dúvida a energia das marés, fruto da interacção dos campos gravíticos da lua com o sol; a energia térmica dos oceanos, consequência directa da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na acção das marés e, por fim, a energia das ondas que provem do efeito do vento na superfície do oceano. Esta transferência de energia fornece uma concentração natural de energia do vento na água, junto à superfície livre. Uma vez geradas, as ondas podem propagar-se por milhares de quilómetros com perdas mínimas de energia. Os fluxos de energia que ocorrem nas ondas do mar em águas muito profundas podem ser muito grandes. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período (Cruz e Sarmiento, 2004). Perto da costa, a intensidade energética média de uma onda diminui, devido à interacção com o fundo do mar. No entanto, esta dissipação é compensada naturalmente pelos fenómenos de refacção e reflexão, que originam zonas de concentração energética denominadas *hotspots* (Ramalhais e Didier, 2010).

A investigação e o desenvolvimento na energia das ondas estão em grande desenvolvimento em vários países, tais como Portugal, Noruega, Reino Unido, Estados Unidos, China, Índia e Japão. O envolvimento na utilização deste tipo de energia depende fortemente dos recursos disponíveis de ondas. Em países com grandes recursos, a energia das ondas podia abranger uma parte bastante significativa das exigências energéticas no país. Os países com recursos moderados, poderiam utilizar a energia das ondas como fonte complementar a outras fontes de energia renováveis e/ou convencionais disponíveis (Cruz e Sarmiento, 2004).

Nos últimos anos, a energia das ondas tem passado por vários processos, não só de investigação e desenvolvimento, como também de exploração comercial. Os esforços persistentes na investigação e desenvolvimento e toda a experiência acumulada, têm melhorado gradualmente o desempenho das técnicas de conversão de energia das ondas, colocando-a mais perto da exploração comercial.

Diferentes esquemas de coluna de água oscilante, corpos flutuantes e galgamento, provaram a sua aplicabilidade em larga escala sob duras condições operacionais e várias centrais comerciais estão a ser construídas em vários países (figura 2.1), enquanto outros dispositivos estão na fase final de investigação com perspectivas de implementação de sucesso. Não obstante, é requerido trabalho de investigação e desenvolvimento constante, para que haja crescimento e melhorias estáveis na performance destas tecnologias, para estabelecer a sua competitividade no mercado global de energia (Clément *et al.*, 2002).

As vantagens da energia das ondas são óbvias. Estimativas concluem que o recurso energético ligado ao mar (as correntes marítimas, as marés e as ondas) é aproximadamente 5 TW, o que corresponde a uma ordem de grandeza semelhante ao consumo mundial. Em Portugal, estima-se que os recursos disponíveis sejam de 21 GW, distribuídos entre 15 GW para o continente e 6 GW para as Regiões Autónomas, constituindo uma mais valia que se encontra ainda por explorar (Cruz e Sarmento, 2004).

1.2. Objectivos

Neste trabalho pretende-se contribuir para o desenvolvimento de dispositivos de Coluna de Água Oscilante situados perto da costa. A complexidade dos efeitos da rebentação de uma onda e sua influência na extracção de energia constitui um desafio no sentido de entender o comportamento deste tipo de dispositivos quando a profundidade se torna cada vez menor, como é o caso da central de Mutriku no País Basco, Espanha (Enciso *et al.*, 2009).

Nesse sentido, o primeiro objectivo desta dissertação prende-se com a análise do desempenho dos modelos de captura de superfície livre que simulem não só a propagação como também a rebentação das ondas, tendo em conta a redução da difusão do escalar de fracção de volume. A análise tem como base o modelo de referência utilizado na secção de mecânica dos fluidos do DEMI da FCT-UNL por Barreiro (2009) e Ramalhais (2011), que permite modelar com precisão a propagação das ondas, mas que por divergência do solver, não possibilita a modelação da rebentação. Por conseguinte, serão simulados casos de estudo que correspondem a alterações ao caso de referência, onde vão ser analisados de uma forma qualitativa e quantitativa, procedendo-se à escolha do modelo que melhor simule a superfície livre no escoamento de onda com rebentação. Para a análise do desempenho dos modelos, irá ser criada uma geometria que represente as condições em ambiente costeiro.

Num segundo objectivo, pretende-se aplicar o modelo que permite modelar não só a propagação das ondas como também a rebentação, num dispositivo conversor de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante. A análise irá ser efectuada num canal de geometria fixa, considerando um dispositivo cuja estrutura se baseia na central de Mutriku (Enciso *et al.*, 2009), variando-se as características de onda incidente, e terá em consideração as interacções que ocorrem entre a onda e a estrutura e entre a onda incidente e a onda reflectida. Irá ser também considerado o movimento da superfície livre e o escoamento de ar na câmara pneumática da CAO.

As configurações de CAO que vão ser modeladas dividem-se em três configurações: CAO aberta, onde o topo da câmara se encontra totalmente aberto e à pressão atmosférica; CAO fechada com introdução de uma conduta de circulação de ar; e finalmente a CAO fechada na qual é modelada na conduta uma turbina do tipo *Wells*. Serão estudados nestas configurações alguns parâmetros de análise, nomeadamente o factor de amplificação, a fase angular, o *sloshing*, a elevação de superfície livre na CAO, a pressão na câmara e o caudal na conduta. Por fim, apresenta-se uma aplicação na qual se determina a característica de turbina que permite obter a potência pneumática máxima do dispositivo.

Este estudo é realizado recorrendo a simulações numéricas em 2D, efectuadas com o código FLUENT (versão 6.3.26). Este programa resolve as equações de Navier-Stokes em valor médio (equações de Reynolds) através de uma técnica de volumes finitos, utilizando o método VoF (Volume of Fluid) na identificação da superfície livre. A malha é gerada no programa GAMBIT (versão 2.2.30), que permite a discretização do domínio de cálculo.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos: Introdução, Estudo Bibliográfico, Modelo Numérico, Validação do Modelo Numérico, Caso de Estudo e Aplicação ao Conversor de Energia e Conclusões.

No capítulo 2, Estudo Bibliográfico, aborda-se de forma resumida o estado da arte, apresentando uma revisão das tecnologias existentes para extracção da energia das ondas e em particular do dispositivo de CAO. É efectuada também uma descrição matemática das equações da teoria linear das ondas.

No capítulo 3, Modelo Numérico, apresenta-se o modelo CFD e descrevem-se as equações *Reynolds-Averaged Navier Stokes* (RANS) e o método *Volume of Fluid* (VoF). É feito um resumo dos esquemas numéricos utilizados, bem como das formas de geração da malha nos domínios de cálculo.

No capítulo 4, Validação do Modelo Numérico, são apresentados os resultados da modelação bidimensional da rebentação das ondas numa estrutura costeira e da propagação de uma onda num canal de fundo horizontal para subsequente escolha do modelo numérico que permite modelar simultaneamente a propagação e a rebentação das ondas, minimizando a difusão numérica.

No capítulo 5, Caso de Estudo e Aplicação ao Conversor de Energia, apresentam-se os resultados para as diferentes configurações do dispositivo e para os diferentes tipos de turbina.

No capítulo 6, são apresentadas as Conclusões e perspectivas de futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Estudo bibliográfico

2.1 Estado da arte

É desde a antiguidade que é reconhecido o potencial energético das ondas, remontando ao século XVIII as primeiras propostas para o seu aproveitamento. Apesar de nem sempre ser associado ao conceito de energia útil, foi a partir de meados de 1960 que o comandante japonês Yoshio Masuda iniciou no seu país, o desenvolvimento de bóias de sinalização marítima alimentadas por energia das ondas. Mais tarde em 1976, a investigação passou das bóias para o Kaimei, um navio de demonstração que integrava 13 câmaras pneumáticas acopladas a geradores eléctricos, sendo o princípio de operação o da CAO- Coluna de Água Oscilante (Cruz e Sarmento, 2004).

Na Europa, a investigação e o desenvolvimento intensivo da conversão de energia das ondas só começou quando despontou a crise no mercado petrolífero que deu origem à subida dramática do preço do petróleo em 1973. Vários países europeus com recursos marítimos exploráveis, consideraram a energia das ondas como uma possível fonte energética e introduziram programas e medidas de apoio, dando assim início a vários projectos de investigação com apoios públicos e privados em vários países, tendo em vista o desenvolvimento da exploração industrial de tecnologias de conversão de energia das ondas a médio e a longo prazo (Clément *et al.*, 2002).

Em Portugal, as actividades de desenvolvimento e demonstração da tecnologia incluem a central piloto do tipo CAO na ilha do Pico nos Açores concluída em 1999 com 400 KW; a central piloto do tipo AWS instalada em 2004 ao largo da Póvoa do Varzim (2 MW) e o parque de ondas da Aguçadoura, constituído por três geradores Pelamis em 2008 (2.25 MW) (Cruz e Sarmento, 2004).

É importante ter em conta as dificuldades que se enfrentam no desenvolvimento da energia das ondas. As principais barreiras provêm do portador da energia em si, ou seja, o mar e entre as quais Clément *et al.* (2002) destacam as seguintes:

- Irregularidade da amplitude, fase e direcção das ondas, em que a maximização da captura de energia numa banda de frequências da onda incidente se torna num desafio acrescido;
- A carga estrutural a que os dispositivos estão sujeitos em caso de condições meteorológicas extremas, que podem atingir esforços cem vezes superiores às médias;
- O próprio mecanismo inerente aos geradores eléctricos, que exigem uma frequência muito superior à onda incidente.

Por outro lado, as vantagens da energia das ondas são óbvias, cujo desenvolvimento é sustentável, pois combina factores cruciais, tais como os aspectos económicos, ambientais, éticos e sociais. O recurso abundante e os altos fluxos de energia no mar, estabelecem na concepção adequada dos dispositivos, uma produção de energia economicamente viável. As vantagens específicas da energia das ondas, são (Clément *et al.*, 2002):

- O facto de serem uma fonte de energia inesgotável e não poluente, causando impactos ambientais quase nulos;

- A sua fiabilidade;
- A sua variabilidade sazonal natural que segue a procura de electricidade em climas temperados;
- O facto de se poder prever de uma forma correcta e antecipada os regimes de onda nas zonas onde se localizam os dispositivos, ao contrário de outros modos de conversão de energia, designadamente a eólica, onde é muito mais difícil obter uma previsão correcta.

Não obstante, existem actualmente diferentes soluções capazes de responder aos desafios tecnológicos. Para ser competitivo, o modelo de um conversor de energia das ondas tem de lidar de forma eficiente com estas dificuldades, e nessa perspectiva, existe uma ampla variedade de tecnologias que resultam das diferentes maneiras em que a energia pode ser extraída das ondas, bem como da profundidade a que se encontram os dispositivos. Tendo em conta a distância à costa, Cruz e Sarmiento (2004) classificam os dispositivos como:

- Dispositivos costeiros (na nomenclatura inglesa: *shoreline*) – Estes dispositivos estão fixos ou são construídos de raiz na orla costeira, o que lhes dá vantagens ao nível da facilidade de instalação e manutenção.
- Dispositivos próximos da costa (*near-shore*) – São instalados normalmente em profundidades moderadas, inferiores a 20m e assentes no fundo do mar. Os dispositivos CAO instalados em quebra-mares podem ser englobados nesta categoria, uma vez que um quebra-mar ou um molhe não constitui uma linha de costa natural. A central CAO de Mutriku (Enciso *et al.*, 2009) é um exemplo desta classe de dispositivos que será aprofundada na secção 5.1.
- Dispositivos afastados da costa (*offshore*) – Esta categoria de dispositivos exploram os regimes de onda mais energéticos, característicos de zonas de elevada profundidade.

Outro critério de nomenclatura que poderá ser utilizado é o modo como é feita a conversão de energia das ondas em energia eléctrica, ou seja, o tipo de dispositivo, que poderá ser classificado como:

- Coluna de água oscilante, CAO (OWC – *Oscilating Water Column*);
- Corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*);
- Galgamento (*Overtopping devices*).

O dispositivo de CAO irá ser mais aprofundado, uma vez que se trata do objecto de estudo neste trabalho. A descrição dos restantes modelos poderá ser analisada em pormenor em Cruz e Sarmiento (2004), Clément *et al.* (2002) e Falcão (2009).

A figura 2.1 apresenta as diferentes tecnologias tendo em conta os modos de conversão.

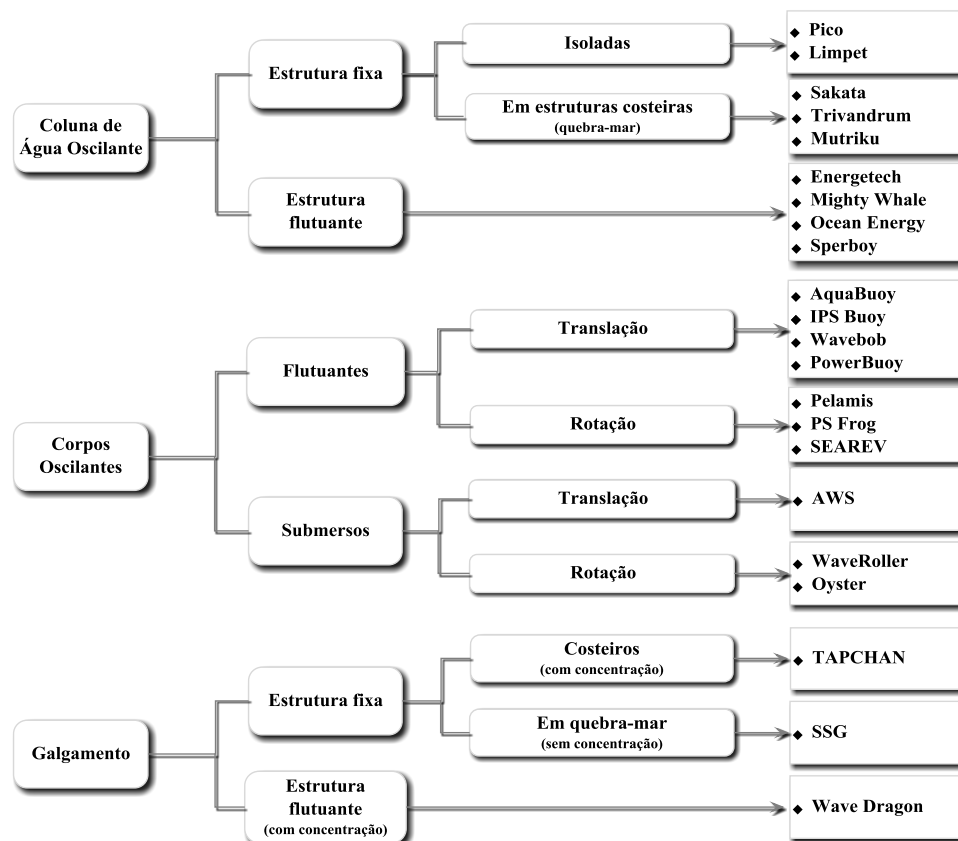


Figura 2.1 – Principais sistemas de conversão de energia das ondas (Falcão, 2009)

2.2. Dispositivo de Coluna de Água Oscilante

O sistema de Coluna de Água Oscilante é considerado o tipo de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do oceano tecnicamente mais conhecido, em virtude do grande esforço de investigação a que foi sujeito nos últimos anos, tendo sido construídas várias centrais a nível mundial (Conde *et al.*, 2009). Tipicamente a CAO é um sistema costeiro (embora também possa ser instalada ao largo) que é particularmente adequado para a integração em estruturas de protecção costeira (Cruz e Sarmiento, 2004).

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), os dispositivos CAO consistem basicamente em estruturas ocas parcialmente submersas, que se encontram abertas para o mar abaixo da superfície livre da água do mar. O processo de geração de electricidade segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura, o nível de superfície livre aumenta, e o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina como consequência directa do aumento de pressão na câmara-de-ar. Quando o nível da superfície livre diminui, o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara-de-ar. Esta deve ser projectada para maximizar a quantidade de energia produzida considerando o período de onda dominante, altura e comprimento de onda, característicos do local onde o dispositivo será implantado. Quanto mais próximas forem as frequências das ondas da frequência natural do dispositivo de coluna de água, maior será a energia captada (Conde *et al.*, 2009).

Conde *et al.*, (2007) resumem a cadeia de conversão de energia num dispositivo conversor de energia das ondas do tipo CAO da seguinte forma:

- i. Conversão da energia das ondas para energia pneumática na câmara-de-ar da CAO;
- ii. Conversão de energia pneumática para energia mecânica ao veio da turbina;
- iii. Conversão para energia eléctrica no alternador.

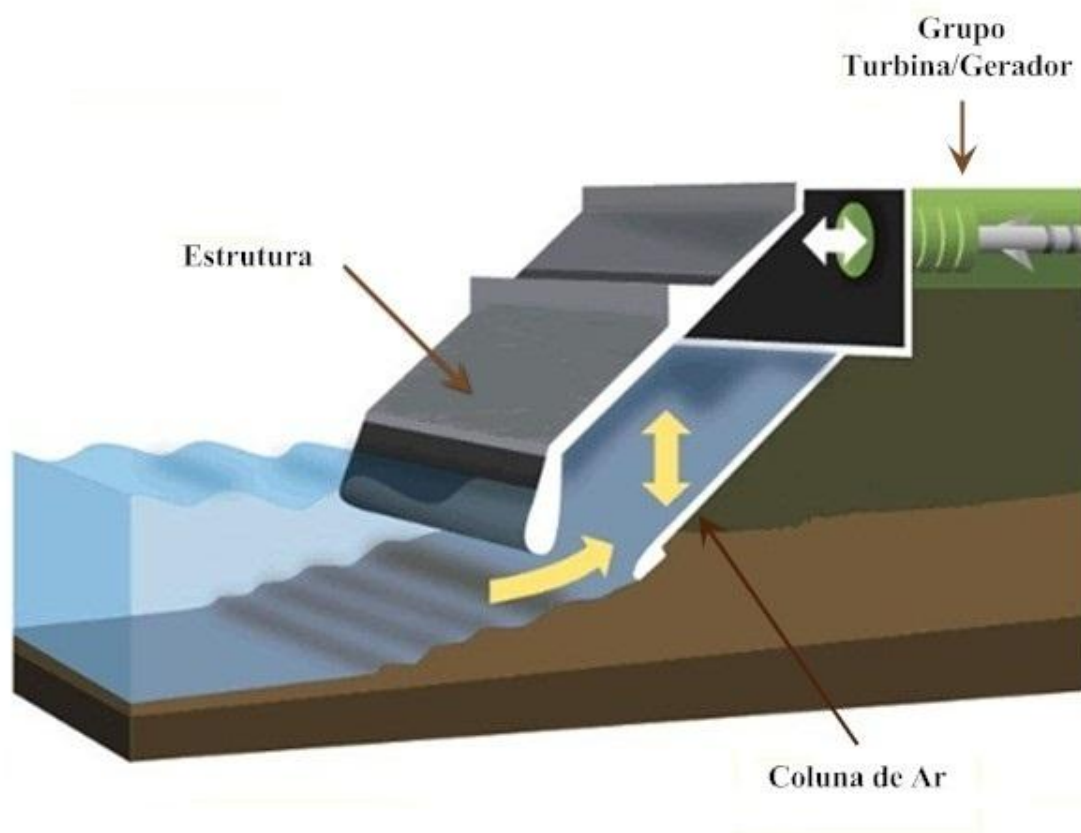


Figura 2.2 – Sistema de Coluna de Água Oscilante (Phelps, 2011)

Para aproveitar o escoamento do ar na conduta do dispositivo, induzido pelos movimentos oscilatórios de ar dentro da câmara, é normalmente utilizada a turbina *Wells*, que foi inventada em meados da década de 70, e que possui a propriedade de movimentar o veio do gerador eléctrico no mesmo sentido de rotação, independentemente do sentido do escoamento. A turbina está protegida por uma válvula de fecho rápido que evita que a água possa atravessar em situações de grande agitação dentro da câmara e protege a instalação quando a pressão interior é crítica para o dispositivo (Ramalhais e Didier, 2010).

Recentemente, a turbina axial auto-rectificadora de acção (Conde *et al.*, 2007) tem vindo a ser considerada como uma alternativa à turbina *Wells* para dispositivos CAO. As suas vantagens em relação à turbina *Wells* são o seu pequeno diâmetro e baixo ruído em consequência da baixa velocidade de rotação. Os estudos numéricos e experimentais existentes sobre turbinas auto-rectificadoras de acção apresentam baixos valores do rendimento, quando comparados com os valores observados em turbinas de acção convencionais, o que pode indiciar a existência de uma margem de progressão no que diz respeito à eficiência máxima deste tipo de turbinas para a aplicação em dispositivos CAO.

2.3. Teoria linear das ondas

O estudo analítico de problemas envolvendo ondas marítimas iniciou-se no final do século XVIII graças aos trabalhos de Euler (1707-1783) e de Laplace (1749-1827). Estes dois investigadores introduziram o formalismo matemático que possibilitou o estudo analítico deste fenómeno, mas as equações diferenciais a que chegaram não permitem uma solução geral para o mesmo (Barreiro, 2009).

Foi em 1845 que Airy (1801-1892) desenvolveu a Teoria Linear das Ondas. Esta teoria descreve de forma linearizada a propagação de ondas da gravidade na superfície de uma camada de fluido homogéneo, admitindo que tem profundidade média uniforme e que o escoamento é inviscido, incompressível e irrotacional. Neste modelo, os termos convectivos de inércia não lineares podem ser desprezados para ondas com amplitude e comprimento de onda pequenos em águas profundas, e por isso é também conhecido por “teoria das ondas de pequena amplitude” (Le Méhauté, 1976).

A descrição da teoria linear das ondas que se segue, é baseada nos pressupostos de que as ondas marítimas são bidimensionais, de pequena amplitude, sinusoidais e definíveis progressivamente pela sua altura e período em qualquer profundidade. Nesta representação, os seus movimentos e deslocamentos, a cinemática e a dinâmica serão apresentadas (Demirbilek e Vincent, 2008). Um estudo mais aprofundado desta matéria pode ser encontrado em Le Méhauté (1976) e Dean e Dalrymple (1991).

A hipótese de irrotacionalidade permite o uso de uma função matemática denominada potencial de velocidade Φ . Esta é uma função escalar cujo gradiente ∇ em qualquer parte do fluido é o vector velocidade. O gradiente é a variação do potencial de velocidade relativo às coordenadas em 2D onde x é a componente horizontal e z é a componente vertical

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2.2)$$

onde u e w corresponde à velocidade do fluido nas direcções x e z respectivamente.

A função potencial de velocidade tem de ser encontrada a partir das equações de continuidade, de momento e das condições de fronteira. A divergência de um gradiente leva à equação de continuidade, que deve permanecer em todo o fluido:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.3)$$

A equação de Bernoulli para um escoamento irrotacional é dada pela seguinte relação:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}V^2 + \frac{P}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.4)$$

onde $f(t)$ pode depender de t mas não depende das variáveis de espaço. Esta equação é não linear devido ao termo convectivo de inércia. Admitindo a hipótese de ondas de amplitude infinitesimal do ponto de vista matemático, o termo convectivo é desprezado e a equação de Bernoulli é escrita da seguinte forma:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.5)$$

A formulação de um problema de valor de fronteira consiste em estabelecer uma região de interesse e especificar uma equação diferencial que deve ser satisfeita dentro da região. Para escolher as soluções que são relevantes para o problema físico, são utilizadas as condições de fronteira. A figura 2.3 apresenta as condições de fronteira importantes.

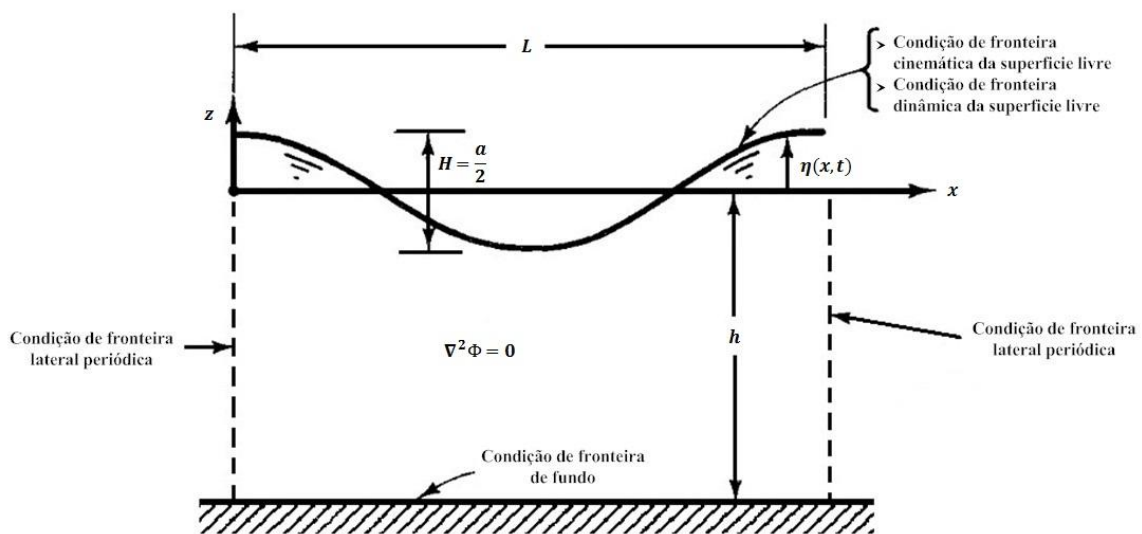


Figura 2.3 – Condições de fronteira (Dean e Dalrymple, 1991)

No geral, o limite inferior da região de fundo é descrito como $z = -h(x)$ para o caso bidimensional onde a origem está localizada no nível de águas paradas e h representa a profundidade. Como se trata de uma fronteira fixa, a velocidade do fluido é tangencial à fronteira, ou seja, a componente normal ao fundo Vn é nula. Para fundo impermeável e horizontal tem-se:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial z}\Big|_{z=-h} = 0 \quad (2.6)$$

Uma das dificuldades encontradas na determinação da natureza do movimento das ondas deve-se ao facto da superfície livre ser desconhecida, excepto no caso de movimento infinitamente pequeno no qual a superfície livre é no início assumida como sendo uma linha horizontal. Consequentemente, a incógnita $z = \eta$ aparece no problema. A superfície livre, no caso de movimento bidimensional é dada pela equação $z = \eta(x, t)$, então:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z}\Big|_{z=-\eta} = -\frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\Phi}{\partial x}\Big|_{z=-\eta} \frac{\partial\eta}{\partial x} \quad (2.7)$$

Esta equação é não linear e corresponde à condição cinemática na superfície livre.

A equação dinâmica é dada pela equação de Bernoulli, na qual a pressão P é considerada constante e igual à pressão atmosférica. Consequentemente, a condição dinâmica da superfície livre fica:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2\right] + g\eta = 0 \quad (2.8)$$

Esta equação pode ser diferente de zero e igual a uma determinada função $f(t)$ no caso de agitação criada na superfície livre.

Assim formuladas, a solução do sistema de equações apresentada ainda é difícil de determinar, devido à não linearidade das equações e porque a superfície livre é desconhecida e depende do tempo.

Se forem consideradas ondas de carácter infinitesimal do ponto de vista matemático obtém-se a seguinte condição dinâmica linearizada:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t}\Big|_{z=0} + g\eta = 0 \quad (2.9)$$

Este processo é chamado de linearização. Reteve-se apenas os termos que são lineares. A condição de fronteira dinâmica da superfície livre linear resultante relaciona o deslocamento instantâneo da superfície livre η com a variação do potencial de velocidade Φ em ordem ao tempo.

Novamente, mantendo apenas os termos que são lineares nos parâmetros de superfície livre η , e nas velocidades u e w , a condição cinemática linearizada da superfície livre resulta:

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (2.10)$$

Finalmente, para ondas que são periódicas no espaço e no tempo, são expressas as seguintes condições de periodicidade:

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x + L, z, T) \quad (2.11)$$

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x, z, t + T) \quad (2.12)$$

onde L é o comprimento de onda e T é o período.

O problema linearizado de valores de fronteira, considerando que a propagação se efectua segundo a direcção x , consiste na resolução da equação de Laplace aplicando as três condições de fronteira (cinemática, dinâmica e de fundo).

Aplicando o método de separação de variáveis e utilizando uma solução periódica, obtém-se o potencial de velocidade Φ :

$$\Phi(x, z, t) = -\frac{H g \cosh k(h+z)}{2 \omega \cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

onde H representa a altura de onda, k é o numero de onda ($k = 2\pi/L$), e ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi/T$).

A equação que descreve a superfície livre como função do tempo t e da distância horizontal x é:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

Esta expressão representa uma onda progressiva, periódica e sinusoidal que se propaga na direcção positiva de x .

Aplicando a solução de potencial de velocidade Φ na relação algébrica entre as equações (2.9) e (2.10), obtém-se a relação de dispersão:

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (2.15)$$

A velocidade com que uma onda se propaga é denominada de celeridade. Uma vez que a distância percorrida por uma onda durante um período de onda é igual a um comprimento de onda, a celeridade pode ser relacionada com o período T e o comprimento de onda L por:

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.16)$$

Substituindo a relação de dispersão na equação acima, tem-se:

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \quad (2.17)$$

Relacionando as equações (2.16) e (2.17), obtém-se o comprimento de onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh \quad (2.18)$$

As equações anteriores com a relação de dispersão descrevem a maneira com a qual um campo de ondas com diferentes frequências se irá dispersar sobre os oceanos, formando os grupos de ondas.

A componente horizontal u e a componente vertical w da velocidade são dadas pelas seguintes equações:

$$u = -\frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (2.19)$$

$$w = -\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.20)$$

Outro aspecto importante da teoria linear das ondas lida com o deslocamento de partículas de água dentro da onda. As partículas de água movem-se geralmente em trajetórias elípticas em baixas profundidades ou profundidades de transição, e em trajetórias circulares em águas profundas. Integrando as equações da velocidade no tempo, obtém-se as seguintes componentes do deslocamento:

$$\zeta = -\frac{H \cosh k(h+z)}{2 \sinh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.21)$$

$$\xi = \frac{H \sinh k(h+z)}{2 \sinh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (2.22)$$

onde ζ representa o deslocamento horizontal e ξ o deslocamento vertical.

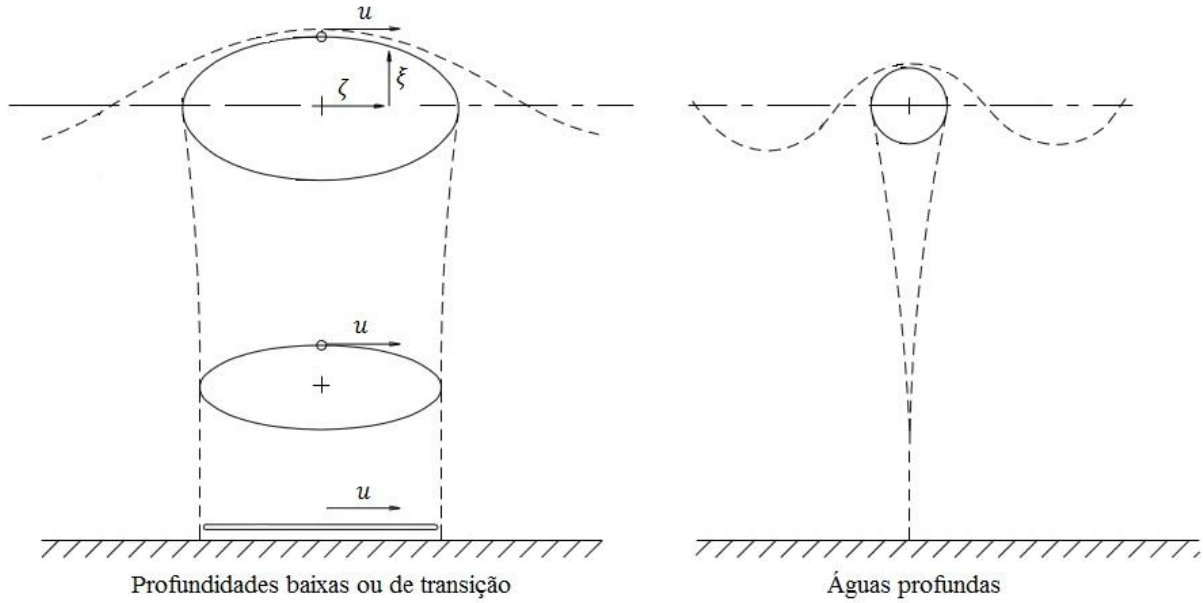


Figura 2.4 – Deslocamento das partículas de água numa onda progressiva (Demirbilek e Vincent, 2008)

O campo de pressão associado a uma onda progressiva é determinado pela equação de Bernoulli, desenvolvida para fluido invíscido por:

$$\left(\frac{P}{\rho} + gz - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_z = g\eta - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{\eta=0} \quad (2.23)$$

Esta expressão é obtida admitindo pressão nula na superfície livre e aplicada a um ponto a uma profundidade z . Relacionando a equação (2.9) e (2.13) com a equação acima, obtém-se:

$$P = -\rho gz + \rho g \frac{H \cosh k(h+z)}{2 \cosh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (2.24)$$

O primeiro termo desta equação é o termo hidrostático que existiria sem a presença de ondas. O segundo termo representa a componente dinâmica da pressão estática, que resulta da sobrecarga de pressão devido ao deslocamento da superfície livre.

Capítulo 3

Modelo numérico

3.1. Modelo CFD

A Dinâmica de Fluidos Computacional é a análise de sistemas que envolvem escoamentos por meio de simulação numérica em computador. Os aspectos físicos do escoamento de um fluido regem-se por três princípios fundamentais: a lei de conservação da massa (transporte de massa), a 2ª lei de Newton (quantidade de movimento) e a 1ª lei da termodinâmica (transporte de energia). Estes princípios físicos fundamentais podem ser expressados em forma de integrais ou derivadas parciais. O acto de substituir estas igualdades matemáticas em equações com formas algébricas discretas, que por sua vez são resolvidas para obter os valores do campo de fluxo em pontos distintos no tempo ou no espaço, é a característica que define o CFD.

Os métodos CFD englobam não só a solução de equações de movimento do fluido, mas também a interacção do fluido com corpos sólidos. Para tal, são formuladas as equações que regem a dinâmica de fluidos, nomeadamente as equações de Euler e as de Navier-Stokes que caracterizam o movimento de fluidos invíscidos e viscosos respectivamente. Entre os escoamentos com fluidos viscosos, podem ser considerados dois tipos de escoamentos, o laminar e o turbulento. A solução das equações de Navier-Stokes não suscita dificuldades no que diz respeito aos escoamentos laminares. No entanto, a simulação de escoamentos turbulentos apresenta maiores dificuldades, mas que podem ser modelados de uma forma relativamente simples através das equações RANS.

No que diz respeito aos códigos CFD, existem três elementos principais que permitem a introduzir os parâmetros dos problemas e analisar os resultados (Versteeg e Malalasekera, 1995): o *pré-processador*, o *solver* e o *pós-processador*.

O *pré-processador* consiste na introdução do problema num interface que permite a definição do domínio computacional e a subdivisão desse domínio através da geração de uma malha, tendo em conta a sua discretização e tipo de elementos. É feita a selecção dos fenómenos físicos que precisam ser modelados, bem como a especificação das condições iniciais e de fronteira. Neste trabalho foi utilizado o programa GAMBIT (versão 2.2.30).

O *solver* é representado neste estudo através do código FLUENT (versão 6.3.26), o qual utiliza o Método dos Volumes Finitos para resolver as equações RANS. As equações que regem o escoamento são integradas sobre todos os volumes de controlo do domínio e posteriormente convertidas num sistema de equações algébricas e resolvidas utilizando um método iterativo.

O *pós-processador* reúne os resultados obtidos pelo *solver* e submete-os a uma análise ao nível da visualização do domínio geométrico e das malhas, apresentando gráficos de vectores, perfis, contornos e superfícies, recorrendo ao código FLUENT (versão 6.3.26) e ao programa TECPLOT (versão 9.0).

3.2. Equações RANS

No presente estudo, as equações médias de Navier-Stokes são usadas para descrever os escoamentos turbulentos, no ar e na água. A metodologia consiste em escrever uma variável como a soma da sua média no tempo e da flutuação dessa variável em torno da sua média. Neste processo, a não linearidade das equações de Navier-Stokes origina termos que necessitam ser modelados. A complexidade da turbulência faz com que a capacidade de qualquer modelo de RANS representar todos os escoamentos turbulentos seja pouco provável, pelo que os modelos de turbulência devem ser considerados de preferência como aproximações de engenharia e baseados no conhecimento das propriedades da turbulência do escoamento (Ferziger e Peric, 2002).

No escoamento estacionário, cada variável pode ser escrita estatisticamente como a soma do valor médio e da oscilação em torno desse valor:

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i) + \phi(x_i, t) \quad (3.1)$$

onde:

$$\bar{\phi}(x_i) = \lim_{I \rightarrow \infty} \frac{1}{I} \int_0^I \phi(x_i, t) dt \quad (3.2)$$

Em que t é o tempo e I é o intervalo médio. Este intervalo deve ser grande comparado com a escala de tempo característica das oscilações, portanto interessa o limite de $I \rightarrow \infty$. Se I for grande, então $\bar{\phi}$ não depende do tempo onde o cálculo da média começou.

Se o escoamento é transitório, a média de tempo não pode ser usada, devendo ser substituída pelo cálculo da média do conjunto:

$$\bar{\phi}(x_i, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi(x_i, t) \quad (3.3)$$

onde N é o número de membros do conjunto, os quais devem ser grandes o suficiente para anular os efeitos das oscilações. Este tipo de cálculo da média pode ser aplicado a qualquer escoamento, desta forma, o termo Reynolds médio é usado para fazer referência a qualquer destes processos de cálculo da média, que aplicados às equações de Navier-Stokes, produzem as equações RANS.

Nestas condições, o cálculo da média de qualquer termo linear das equações de conservação resulta no termo idêntico para a quantidade média. A partir de uma expressão quadrática não linear, obtêm-se dois termos; o produto da média e a co-variância:

$$\overline{u_i \phi} = \overline{(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{\phi} + \phi')} = \bar{u}_i \bar{\phi} + \overline{u'_i \phi'} \quad (3.4)$$

O último termo é zero se as duas quantidades não são correlacionadas, o que raramente acontece no caso dos escoamentos turbulentos. Como consequência, as equações de conservação incluem termos como $\overline{\rho u'_i u'_j}$ (Tensão de Reynolds) e $\overline{\rho u'_i \phi'}$ (Fluxo Escalar Turbulento).

As equações médias de continuidade e momento para escoamentos incompressíveis sem forças aplicadas, podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.6)$$

onde $\bar{\tau}_{ij}$ é a média dos componentes do tensor de viscosidade turbulenta:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{u}_j)}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

Finalmente, a equação para a média de uma grandeza escalar pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho \bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\phi} + \overline{\rho u'_j \phi'}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \quad (3.8)$$

onde Γ é o termo de difusibilidade turbulenta.

Note-se também o aparecimento de um termo adicional $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$ ligado aos efeitos de turbulência e denominado de tensão de Reynolds. São necessários modelos de turbulência para o descrever, e assim “fechar” o sistema de equações.

Um método geralmente utilizado para relacionar os tensores de Reynolds com os gradientes de velocidade do escoamento consiste na hipótese de Boussinesq representada pela equação seguinte:

$$\left(-\overline{\rho u'_i u'_j}\right) = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}(\rho k)\delta_{ij} \quad (3.9)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ se $i = j$ e $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$) e k representa a energia cinética turbulenta.

A hipótese de Boussinesq é fundamental para o desenvolvimento dos modelos de turbulência, entre os quais o modelo *k-ε standard*, que vai ser utilizado no presente estudo.

3.2.1. Modelo de turbulência *k-ε standard*

O modelo de turbulência *k-ε standard* é um dos modelos de turbulência mais utilizados na engenharia para o cálculo de escoamentos de uma vasta gama de aplicações industriais, devido à sua robustez e precisão na simulação de escoamentos turbulentos. Este modelo de turbulência baseia-se num modelo de equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) que deriva das equações exactas, para a taxa de dissipação para um fluido incompressível (ε) que é obtido usando um raciocínio físico (Versteeg e Malalasekera, 1995).

As equações de transporte da energia cinética turbulenta (k) e a sua taxa de dissipação (ε) são expressas do seguinte modo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (3.11)$$

onde G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade, $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes, σ_k e σ_ε são números de *Prandtl* para k e ε respectivamente.

A viscosidade dinâmica turbulenta é calculada através da combinação de k e ε da seguinte forma:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

onde C_μ é a constante de proporcionalidade para a viscosidade dinâmica turbulenta.

A geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade, calcula-se através da equação exacta para o transporte de k e é definido por:

$$G_k = \left(-\overline{\rho u'_i u'_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.13)$$

As cinco constantes de ajuste do modelo *k-ε standard* tomam por defeito os seguintes valores:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (3.14)$$

Estes valores predefinidos foram determinados a partir de experiências realizadas com ar e água para escoamentos turbulentos.

3.3. Método VoF

O modelo VoF é uma técnica de cálculo de superfície aplicado a uma malha fixa. É projectado para dois ou mais fluidos (ou fases) imiscíveis, em que o objectivo é reconhecer a posição da interface entre os fluidos denominada de superfície livre. No modelo VoF, as equações de momento são reduzidas a um conjunto único e a fracção de volume de cada fluido em cada célula computacional é calculada em todo o domínio (Fluent Inc., 2006).

Para cada fase fluida, é introduzida a variável de fracção de volume da fase na célula computacional. Em cada volume de controlo, as fracções de volume de todas as fases somam à unidade. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores de volume médio, desde que a fracção de volume de cada fase seja conhecida em cada localização. Deste modo, as variáveis e propriedades em qualquer célula, ou são meramente representativas de uma das fases, ou de uma mistura entre elas, dependendo dos valores da fracção de volume. Assim, utilizando um escalar C para definir a fracção de volume, e para o caso de interesse do presente estudo onde as duas fases são compostas pelo ar e a água, tem-se:

$$C = 0 \text{ (para o ar)} \quad (3.15)$$

$$C = 1 \text{ (para a água)} \quad (3.16)$$

onde:

$$\rho = C\rho_{\text{água}} + (1 - C)\rho_{\text{ar}} \quad (3.17)$$

$$\mu = C\mu_{\text{água}} + (1 - C)\mu_{\text{ar}} \quad (3.18)$$

Os valores de C entre 0 e 1 correspondem à mistura entre o ar e a água. O valor pelo qual se interpreta a superfície livre, por definição, é 0.5.

3.4. Esquemas numéricos

Um dos objectivos da presente dissertação é o estudo da viabilidade de modelos numéricos que consigam modelar, não só a propagação, mas também a rebentação das ondas. Para tal, essa análise terá como base o modelo de referência utilizado na secção de mecânica de fluidos do DEMI da FCT-UNL (secção 4.1.2.) que permite modelar com precisão a propagação das ondas, e que foi validado em vários estudos de escoamento de superfície livre, nomeadamente por Conde *et al.*, (2009), Barreiro, (2009) e Ramalhaís, (2011).

No entanto, foi necessário proceder a alterações no modelo de referência, uma vez que este não permite a modelação da rebentação, que se traduz ao nível do solver, por uma divergência na resolução da pressão. Para esse efeito, foram feitas alterações ao nível da escolha dos parâmetros dos esquemas numéricos. Os conceitos inerentes aos esquemas numéricos utilizados serão desenvolvidos de seguida (Fluent Inc., 2006).

3.4.1. Esquemas VoF

Duas abordagens estão disponíveis no FLUENT para a integração no tempo da equação de transporte da fracção de volume.

Esquema Implícito: Quando o esquema implícito é utilizado para discretização do tempo, os esquemas de interpolação de diferença finita do FLUENT (esquemas *Second Order Upwind*, *First Order Upwind* e *Modified HRIC*) podem ser usados para obter os fluxos nas faces de uma célula. Neste esquema, a fracção de volume é obtida resolvendo um sistema linear, composto pelas equações de transporte escritas para cada célula. Nesta abordagem, o passo de tempo pode ser relativamente grande.

Esquema Explícito: Na abordagem explícita, os esquemas de interpolação de diferença finita do FLUENT são aplicados aos valores da fracção de volume calculados no passo de tempo anterior. A grande limitação desta abordagem reside no passo de tempo que é pequeno e depende da condição de estabilidade CFL (*Courant-Friedrich-Lewy*).

3.4.2. Esquemas de acoplamento entre velocidade e pressão

Neste estudo irão ser estudados dois tipos de algoritmos segregados que permitem o acoplamento entre a velocidade e a pressão.

Algoritmo SIMPLEC: No algoritmo SIMPLEC, as equações de momento são manipuladas de modo que as suas equações de correcção de velocidade omitam termos menos importantes do que nos algoritmos padrão.

Algoritmo PISO: O algoritmo PISO é um método utilizado para determinar a pressão e a velocidade e foi desenvolvido para o cálculo não iterativo de escoamentos compressíveis turbulentos, que foi sendo adaptado com êxito para soluções iterativas de problemas em regime estacionário.

3.4.3. Esquemas de reconstrução

Para simular a interface de reconstrução, o FLUENT aplica os seguintes esquemas:

Esquema Geo-Reconstruct: No *Geo-Reconstruct*, os esquemas de interpolação geralmente habituais no FLUENT são usados para obter os fluxos da face, sempre que a célula está preenchida na totalidade por uma fase ou outra. Quando a célula está próxima da interface entre as duas fases, é usado o esquema *Geo-Reconstruct*. Este esquema representa a interface entre fluidos utilizando uma abordagem linear por secção. No FLUENT, este esquema é o mais preciso e é aplicável para malhas não estruturadas, e parte do princípio de que a interface entre os dois fluidos tem um declive linear dentro de cada célula e utiliza essa configuração no cálculo da deslocação da massa de ar através da face da célula.

Esquema CICSAM: O CICSAM é um esquema de diferenciação de alta resolução, adequado para escoamentos com altos níveis de viscosidade entre as fases. Este esquema foi implementado no FLUENT como um esquema explícito e tem a vantagem de produzir uma interface que se assemelha ao esquema *Geo-Reconstruct* em termos de precisão.

3.4.4. Esquemas de discretização

Os esquemas de discretização espacial analisados neste trabalho são de primeira, segunda ou terceira ordem.

Esquema First-Order Upwind: Este esquema é aplicado quando se pretende uma precisão de primeira ordem. São determinadas quantidades nas faces da célula partindo do pressuposto de que os valores de qualquer variável de campo representem um valor médio e se mantenham por toda a célula, e tendo em conta que as quantidades da face são idênticas às quantidades da célula.

Esquema Second-Order Upwind: Este esquema é aplicado quando é pretendida uma precisão de segunda ordem. São calculadas quantidades nas faces da célula utilizando uma abordagem de reconstrução linear multidimensional. Nesta abordagem, é possível obter maior precisão nas faces da célula, através de uma expansão da série de Taylor na solução das células centradas, sobre o seu centroide.

Esquema Third-Order MUSCL: Este esquema foi concebido a partir do original MUSCL, combinando um esquema de diferenciação central e o esquema *Second-Order Upwind*. Tem o potencial para aperfeiçoar a precisão espacial para todos os tipos de malhas, reduzindo a difusão numérica.

Esquema Modified HRIC: De um modo geral, os esquemas *Upwind* são inadequados na monitorização da superfície livre para simulações em que é utilizado o modelo multifásico do VoF, devido à sua natureza excessivamente difusa. Este esquema é uma versão alterada do original HRIC e proporciona maior precisão no cálculo do VoF, quando comparado com esquemas de segunda ordem.

3.5. Geração da malha

A geração da malha é uma parte muito importante na modelação numérica, uma vez que a precisão e convergência dos resultados, está dependente do rigor da sua construção. Para o desenvolvimento da malha, é necessário ter em conta certos aspectos que irão influenciar a sua qualidade, entre os quais um adequado tamanho e número de elementos e uma boa uniformidade, para que o tempo de cálculo seja melhorado e a qualidade dos resultados seja mais precisa.

Numa tentativa de reproduzir a situação real para o modelo numérico, foi necessário recorrer ao programa de pré-processamento GAMBIT (versão 2.2.30) para a geração da malha bidimensional. Este programa dispõe dos métodos de malha do tipo estruturada e não estruturada pura.

O método de malha estruturada utiliza uma disposição de malha segundo um padrão regular, podendo este ser repetido em elementos iguais ou ordenados em rácios de crescimento. Este modelo de malha utiliza elementos quadriláteros em 2D e elementos hexaédricos em 3D, o que permite não só um bom controlo durante a geração da malha, como também um nível de precisão dos esquemas numéricos mais elevado do que para malha não estruturada.

O método da malha não estruturada aplica uma combinação aleatória de elementos que não tem um padrão fixo, de forma a completar o domínio de cálculo. Este modelo de malhas emprega triângulos e quadriláteros em 2D e tetraedros, hexaedros e prismas em 3D, permitindo assim a deformação dos elementos no intuito de atingir a adaptação ao domínio e permitir a geração de malhas em torno de geometrias complexas.

Neste trabalho foram modeladas duas configurações, tendo em conta a geometria do caso de estudo. A primeira configuração caracteriza-se por uma estrutura costeira que pretende reproduzir as condições físicas da rebentação e o seu modelo de malha pode ser consultado na secção 4.1.1. A segunda configuração pretende simular um modelo de CAO, cujas características da malha são expressas na secção 5.1.1.

Para ambas as configurações, foi necessário recorrer à utilização de elementos de geometria estruturada e não estruturada, devido à irregularidade geométrica do fundo que simula as condições de rebentação. A malha foi gerada considerando uma maior discretização dos elementos na superfície livre e na área onde ocorrerá a rebentação, visto serem estas as regiões do domínio onde se espera que ocorram maiores alterações no escoamento.

Capítulo 4

Validação do modelo numérico

4.1. Modelação bidimensional da rebentação numa estrutura costeira

4.1.1. Geometria e condições de onda

A geometria criada para a modelação numérica, pretende representar as condições em ambiente costeiro, simulando não só a propagação, mas também a rebentação de uma onda em 2D. Pretende-se estudar a viabilidade de modelos numéricos que consigam modelar simultaneamente a rebentação e a propagação das ondas. Para tal, esta análise terá como base o modelo de referência utilizado na secção de mecânica de fluidos do DEMI da FCT-UNL que permite modelar com precisão a propagação das ondas, mas que por divergência do solver não permite a modelação da rebentação. Dessa forma, é realizada uma análise qualitativa e quantitativa dos modelos a ensaiar, analisando a sua viabilidade na modelação da rebentação da onda e tendo em conta a difusão da fracção de volume.

O canal utilizado tem um comprimento 15,1m e a profundidade da água é de 1,15m e a onda gerada tem as seguintes características: período $T = 3,79s$, altura $H = 0,3m$, e comprimento $L = 12m$.

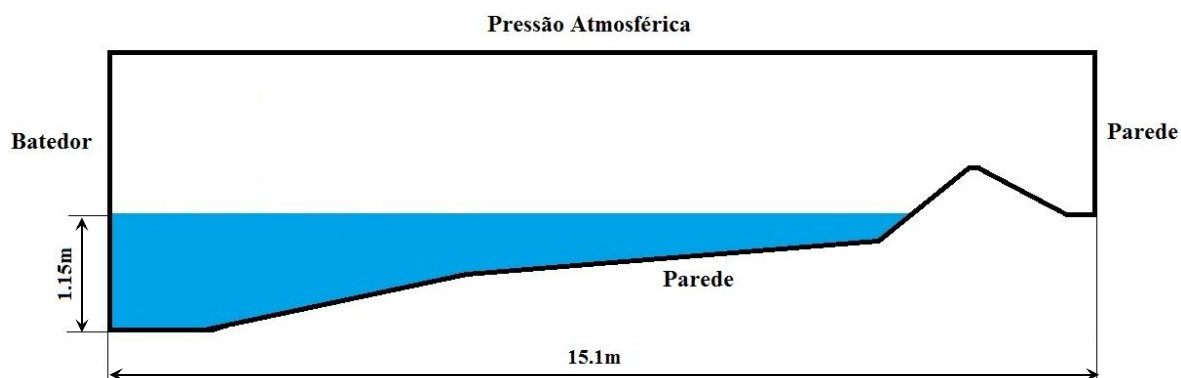


Figura 4.1 – Geometria do canal e condições de fronteira

A geração da onda é feita através de um batedor numérico (Didier *et al.*, 2007) que é definido por uma UDF (*User Defined Function*), que permite ao utilizador programar condições de fronteira, equações, etc. O batedor numérico consiste na imposição de uma condição de fronteira nas componentes horizontal e vertical de velocidade, $u(t)$ e $w(t)$ através das equações (2.1) e (2.2), e a correspondente amplitude da deformação da superfície livre, $\eta(t)$ (equação 2.14).

Em relação às condições de fronteira, foi imposta tanto no fundo como na extremidade direita uma condição de parede. No trecho superior é onde se encontra o ar, pelo que a condição definida foi a de pressão atmosférica constante. Na extremidade esquerda é onde se encontra o batedor que gera a onda a partir da deformação da superfície livre, aplicando o perfil de velocidades horizontal e vertical

calculados de acordo com a teoria linear das ondas, e onde foi estabelecida a condição de velocidade de entrada. O esquema da geometria do canal com as respectivas condições de fronteira pode ser observado na figura 4.1.

Na construção da malha foram utilizados elementos quadriláteros e triângulos devido à complexidade da geometria. Para assegurar a estabilidade numérica, foi aplicado o método de malha estruturada na zona de superfície livre e no intervalo entre a cava e a crista da onda, perfazendo um total de 49523 elementos.

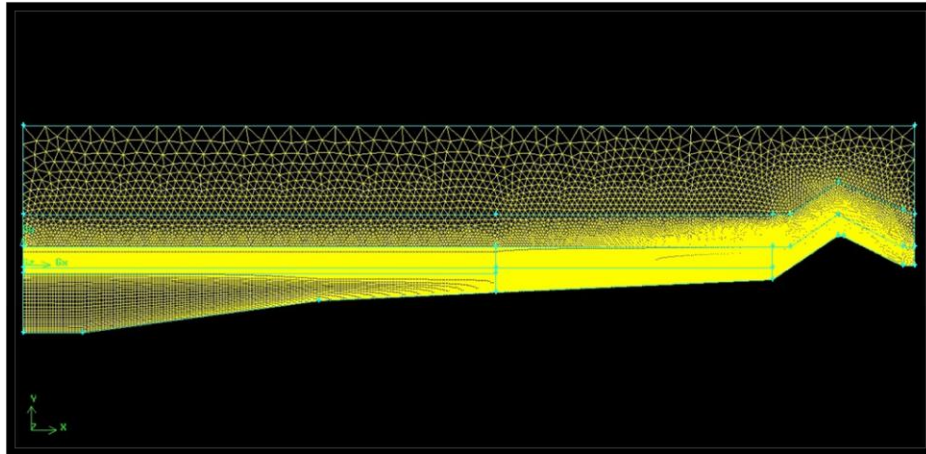


Figura 4.2 – Malha gerada no programa GAMBIT (versão 2.2.30)

4.1.2. Análise dos esquemas numéricos e resultados

Para a análise da viabilidade do modelo que permite evitar uma difusão excessiva da fracção de volume, foi necessário proceder a alterações nos parâmetros do modelo de referência, visto que este é inexecutável na modelação da rebentação. Foram corridos vários casos que correspondem a variações ao modelo de referência e que, numa primeira fase, se pretendia que suportassem o escoamento com rebentação de uma onda. Para esse efeito, foram feitas alterações ao nível da escolha dos parâmetros dos esquemas numéricos. Essas alterações podem ser analisadas em pormenor na tabela 4.1.

Em relação à discretização temporal, é necessário escolher o passo de tempo e o número de iterações não lineares adequados, pois estes influenciam a precisão dos resultados e o tempo de cálculo numa simulação numérica. O estudo levado a cabo por Barreiro (2009), permitiu definir um passo de tempo adequado para modelação de escoamentos transitórios com superfície livre utilizando o método VoF, para simulações da propagação de uma onda num canal bidimensional. Assim sendo, o passo de tempo fixo utilizado nas simulações do presente estudo é da ordem de $T/600$, com 8 iterações não lineares impostas por cada passo de tempo para resolver as não linearidades.

Casos Testados	Define - Models - Solver			Define - Models - Multiphase Vof	Pressure - Velocity Coupling	Solve - Controls - Solution				Resultados
	1st order implicit	2nd order implicit	Non-iterative time advanced			Momentum	Volume Fraction	k-eps	k-eps	
Caso 0000 (Caso de Referência)		x		Implicit	SIMPLEC	Third-Order MUSCL	Modified HRIC	2nd Order Upwind	erro	
Caso 1000		x	x	Implicit	PISO	Third-Order MUSCL	Modified HRIC	2nd Order Upwind	erro	
Caso 2000	x			Implicit	SIMPLEC	Third-Order MUSCL	Modified HRIC	2nd Order Upwind	Converge	
Caso 3000	x		x	Implicit	PISO	Third-Order MUSCL	Modified HRIC	2nd Order Upwind	erro	
Caso 3010	x		x	Implicit	PISO	Second Order Upwind	Modified HRIC	2nd Order Upwind	erro	
Caso 3020	x		x	Implicit	PISO	First Order Upwind	Modified HRIC	2nd Order Upwind	erro	
Caso 2130	x			Explicit	SIMPLEC	First Order Upwind	Geo-Reconstruct	First Order Upwind	erro	
Caso 2140	x			Explicit	SIMPLEC	Third-Order MUSCL	Geo-Reconstruct	First Order Upwind	erro	
Caso 3150	x		x	Explicit	PISO	First Order Upwind	Geo-Reconstruct	First Order Upwind	erro	
Caso 2160	x			Explicit	SIMPLEC	First Order Upwind	CICSAM	First Order Upwind	Converge	
Caso 3170	x		x	Explicit	PISO	First Order Upwind	CICSAM	First Order Upwind	erro	
Caso 2180	x			Explicit	SIMPLEC	First Order Upwind	Geo-Reconstruct	First Order Upwind	Converge	
Caso 3190	x		x	Explicit	PISO	First Order Upwind	Geo-Reconstruct	First Order Upwind	erro	
Caso 2010	x			Implicit	PISO	Third-Order MUSCL	Modified HRIC	2nd Order Upwind	erro	
Caso 3111	x		x	Explicit	PISO	First Order Upwind	CICSAM	First Order Upwind	erro	
Caso 2112	x			Explicit	SIMPLEC	Third-Order MUSCL	CICSAM	First Order Upwind	Converge	
Caso 2113	x			Explicit	SIMPLEC	Third-Order MUSCL	CICSAM	2nd Order Upwind	Converge	

Tabela 4.1 - Esquemas numéricos testados

Para este estudo, foram simulados 16 casos correspondentes a variações ao caso de referência (caso 0000), cujo objectivo consistia em verificar a convergência dos modelos. Para cinco modelos, verificou-se a convergência durante a simulação e foi analisada a difusão numérica da fracção de volume. Os resultados são apresentados na tabela 4.1. Nas figuras 4.3 a 4.7, a fracção de volume é apresentada para os casos onde se conseguiu obter resultados. É possível visualizar os respectivos contornos das fases, onde se pode analisar a difusão da fracção de volume conforme o modelo utilizado:

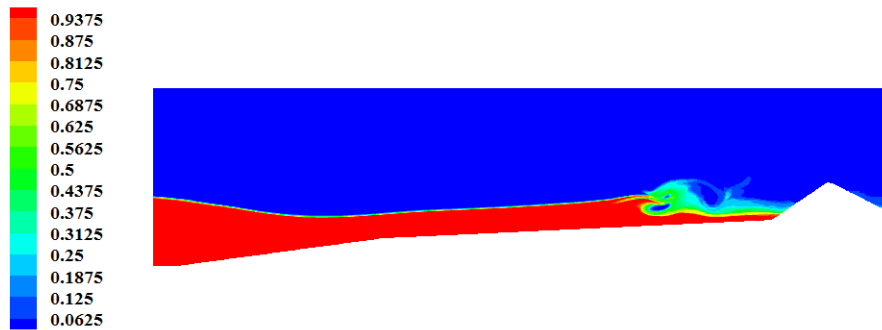


Figura 4.3 – Fracção de volume para o caso2000

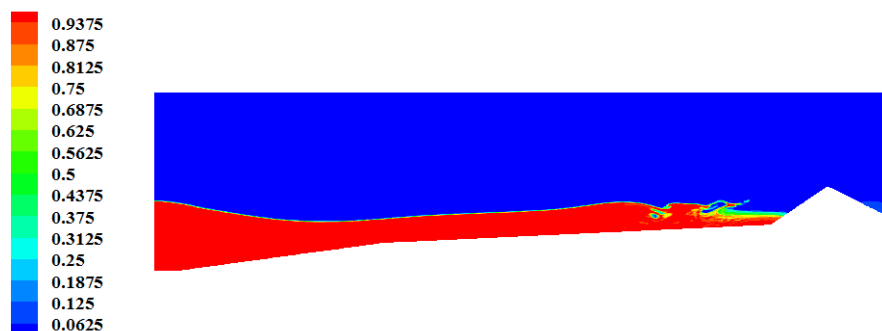


Figura 4.4 - Fracção de volume para o caso2160

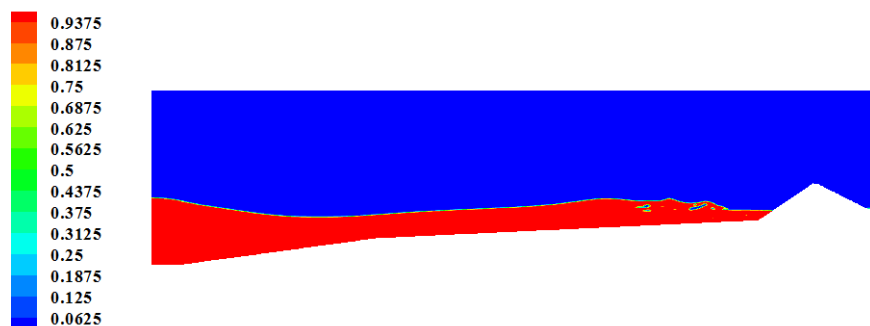


Figura 4.5 - Fracção de volume para o caso2180

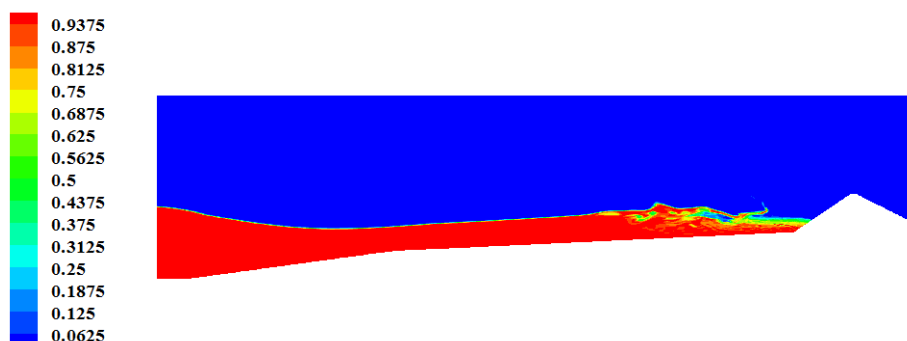


Figura 4.6 - Fração de volume para o caso2112

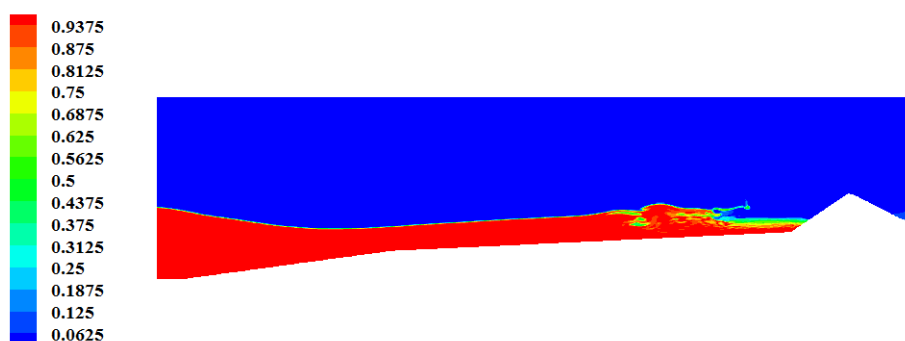


Figura 4.7 - Fração de volume para o caso2113

Fazendo uma análise qualitativa dos resultados apresentados nas figuras 4.3 a 4.7, pode-se desde já constatar que, de um modo geral, o modelo multifásico do VoF explícito obtém melhores resultados que o modelo implícito. Este facto pode ser verificado no caso 2000 que apresenta uma difusão da fracção de volume bastante significativa em comparação com os restantes casos, nos quais foi utilizado o modelo explícito.

Devido à sua alta precisão no cálculo linear por secção de fracção de volume, o esquema Geo-Reconstruct foi aplicado em vários dos modelos testados, não obtendo êxito utilizando o passo de tempo fixo. No entanto, para um passo de tempo variável, obteve-se com este esquema um resultado bastante favorável, revelando um nível de dispersão da interface água/ar muito reduzido, como se pode observar no caso 2180 da figura 4.5.

Os casos 2160, 2112 e 2113 não variam muito entre si, revelando uma difusão reduzida. Este facto deve-se à aplicação do esquema CICSAM que, com a sua capacidade de diferenciação de alta resolução, permitiu produzir um bom nível de precisão na posição da interface. De referir também que do caso 2160 para o caso 2112 foram feitas alterações ao nível da discretização do termo convectivo da equação de quantidade de movimento, modificando o esquema First-Order Upwind para o Third-Order MUSCL, bem como variações ao nível do modelo de turbulência $k-\epsilon$ de 1ª para 2ª ordem do

caso 2112 para o caso 2113. Estas alterações visavam o aperfeiçoamento da precisão e respectiva redução da difusão numérica, todavia sem grande variação.

4.2. Modelação bidimensional da propagação de uma onda em fundo horizontal

Tendo em conta os resultados obtidos na secção anterior, procedeu-se à aplicação dos modelos que convergiram, na propagação de uma onda regular num canal com um fundo horizontal. Estes modelos foram submetidos a uma análise quantitativa, onde se procedeu à estimativa do erro associado à elevação da superfície livre. Para esse efeito foram colocadas sondas de níveis de água no canal para observar as oscilações da altura da superfície livre, tendo como base de comparação o modelo de referência.

As condições de onda mantêm-se as mesmas que no caso anterior, assim como as condições de fronteira: período $T = 3,79s$, altura $H = 0,3m$, e comprimento $L = 12m$. A nova geometria tem uma profundidade de $1,15m$. Esta profundidade foi simulada em detrimento de águas mais profundas com o intuito de aproximar este estudo às condições de um dispositivo perto da costa. O canal tem um comprimento $96m$. Este acréscimo da extensão do canal (aproximadamente 8 comprimentos de onda) deve-se ao facto de poder haver uma propagação permanente da onda, sem que haja reflexão.

Para monitorizar a elevação da superfície livre recorreu-se à colocação de 5 sondas, distribuídas pelo canal conforme se indica na figura 4.8:

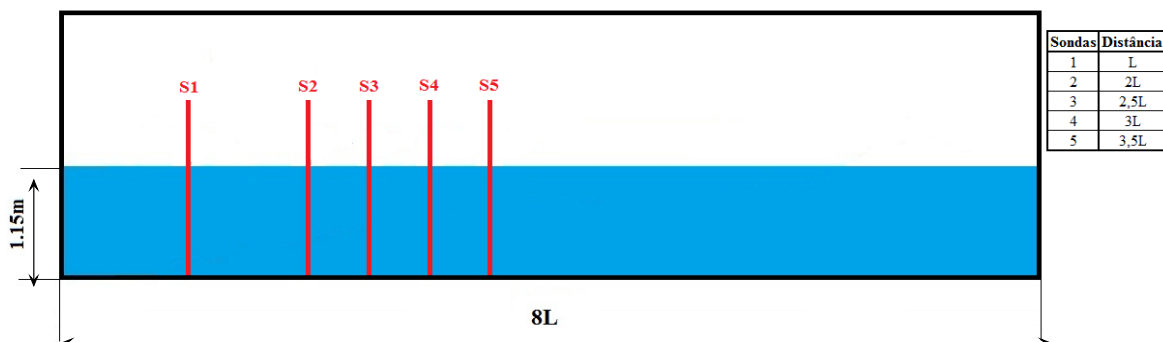


Figura 4.8 - Geometria do canal de fundo horizontal com sondas de elevação de superfície livre

4.2.1. Estudo da elevação da superfície livre

Depois de simulados os modelos em canal de fundo horizontal, foi necessário estimar a precisão na propagação, recorrendo à análise dos diagramas de elevação de superfície livre provenientes da monitorização efectuada pelas sondas distribuídas no canal.

Nas figuras 4.9 a 4.13, estão representadas as séries temporais de elevação da superfície livre para as cinco sondas, dos modelos onde se verificou convergência, tendo como base de comparação o modelo de referência (caso 0000):

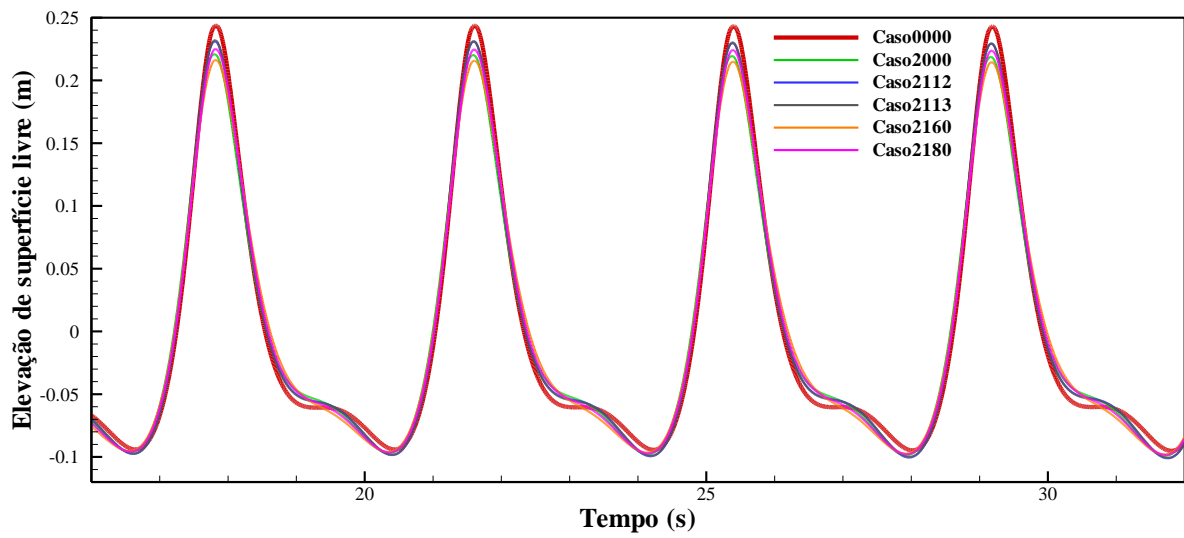


Figura 4.9 – Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 1

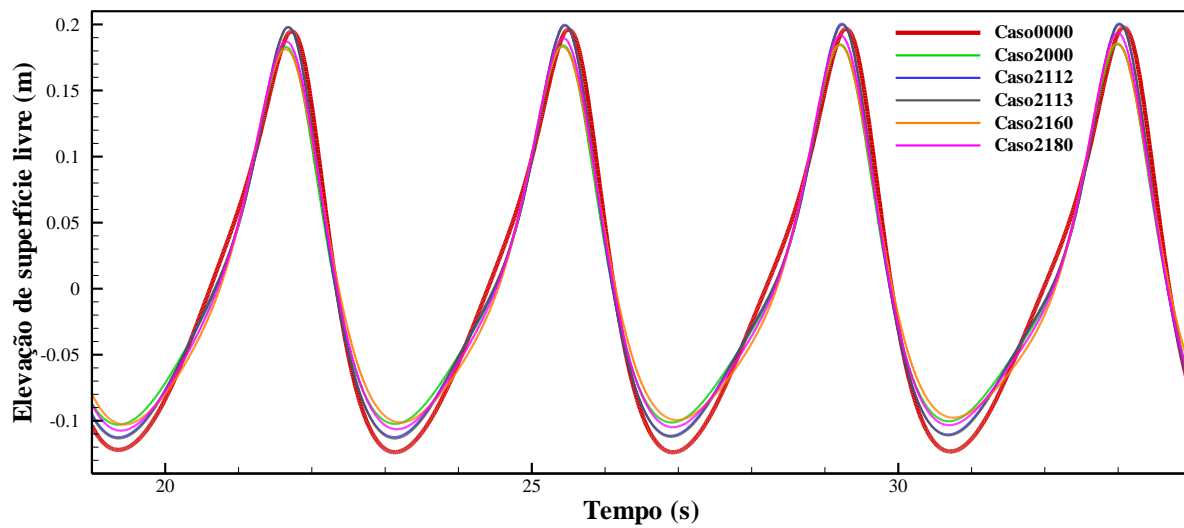


Figura 4.10 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 2

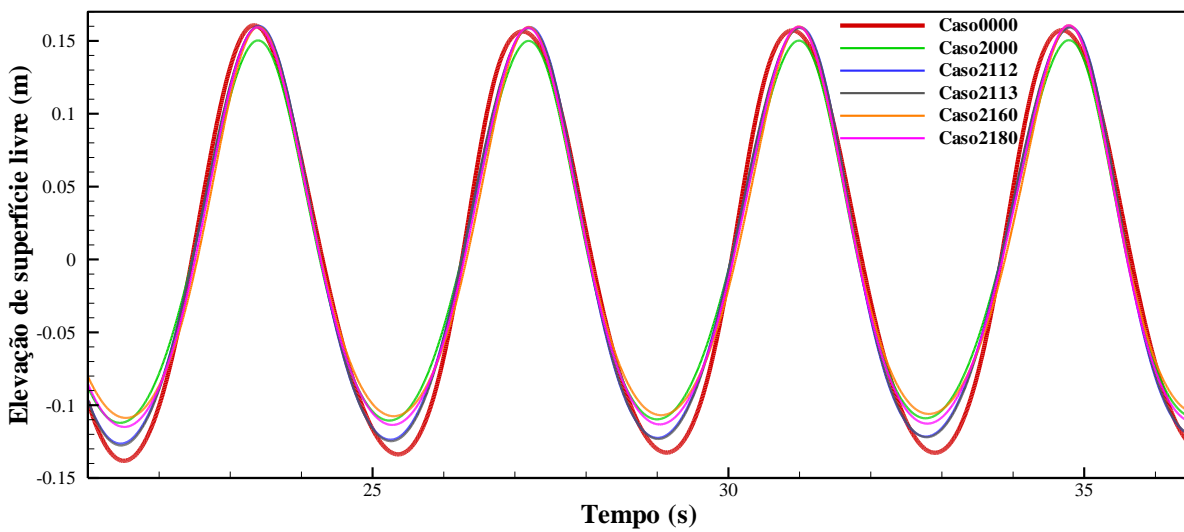


Figura 4.11 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 3

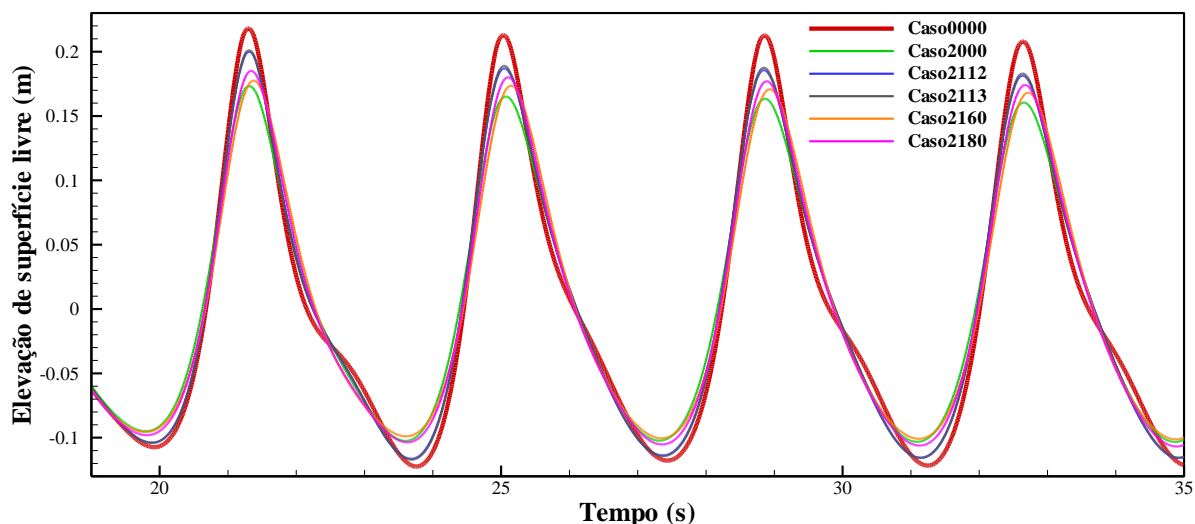


Figura 4.12 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 4

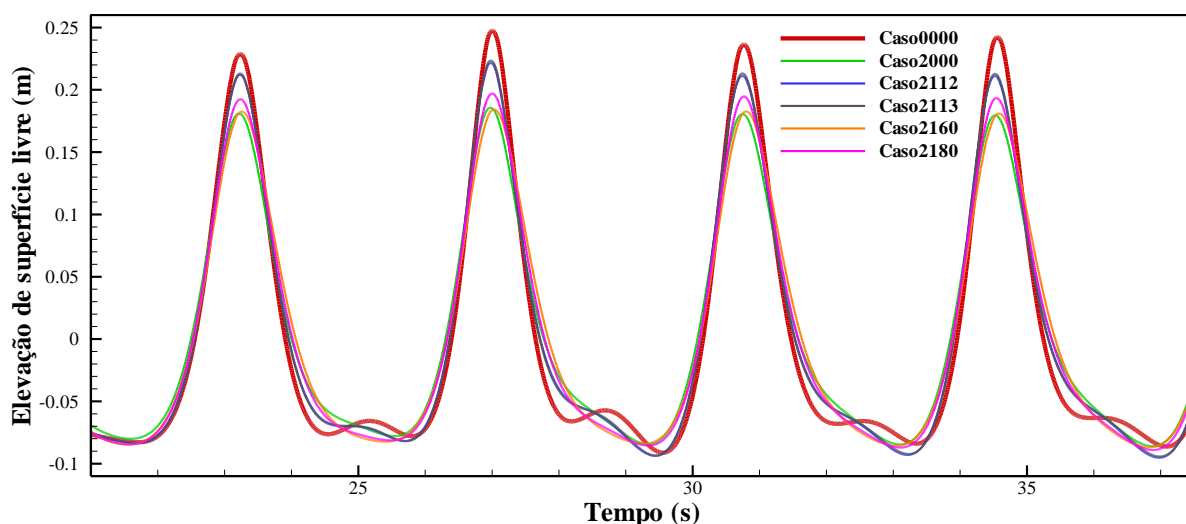


Figura 4.13 - Série temporal de elevação de superfície livre na sonda 5

Nas sondas 1, 2 e 3 é possível constatar uma diferença de elevação de superfície livre reduzida entre o caso de referência e os restantes no que diz respeito à crista, sendo que a sonda 3 apresenta maior uniformidade. À medida que as ondas se propagam pelas sondas 4 e 5, a diferença na crista acentua-se entre o caso 0000 e os demais, pelo que nestas 2 sondas a discrepância torna-se significativa.

Em relação às cavas a diferença é mais acentuada, nomeadamente nas sondas 2, 3 e 4 onde a altura do caso de referência é maior que a dos restantes. Na sonda 1 verifica-se que a altura da cava é muito semelhante em todos os casos. De referir que, de um modo geral, os casos 2112 e 2113 foram os que mais se aproximaram do caso de referência.

Para definir o modelo numérico que exprimisse quantitativamente a melhor opção na captura de superfície livre, foi calculada a média das cristas em cada sonda e calculou-se o erro associado, comparando com o caso de referência, para determinar o modelo que mais se aproximasse do mesmo. De salientar que o modelo utilizado no caso de referência foi validado com sucesso por Barreiro (2009). A tabela 4.2 apresenta os resultados do erro na estimativa das cristas.

	Caso0000	Caso2000		Caso2112		Caso2113		Caso2160		Caso2180	
Sondas	Altura (m)	Altura (m)	Erro (%)	Altura (m)	Erro (%)	Altura (m)	Erro (%)	Altura (m)	Erro (%)	Altura (m)	Erro (%)
1	0,243593	0,219834	9,75	0,230272	5,47	0,230793	5,25	0,215339	11,6	0,224401	7,88
2	0,196399	0,184297	6,16	0,199769	1,72	0,199181	1,42	0,183691	6,47	0,190503	3
3	0,157932	0,150251	4,86	0,15974	1,14	0,159135	0,76	0,159969	1,29	0,15967	1,1
4	0,212862	0,165553	22,23	0,188466	11,46	0,190163	10,66	0,172503	18,96	0,179103	15,86
5	0,238658	0,181606	23,91	0,214029	10,32	0,21566	9,64	0,182646	23,47	0,19445	18,52
Erro			13,38		6,02		5,55		12,36		9,27

Tabela 4.2 – Erros associados à elevação da superfície livre

Observando a tabela 4.2 é possível verificar que efectivamente as sondas 1, 2 e 3 são as que apresentam o erro mais reduzido em relação ao caso de referência, com especial evidência na sonda 3, onde à excepção do caso 2000, todos os modelos apresentam um erro de apenas 1%.

Nas sondas 4 e 5 a discrepância é superior, evidenciando uma diferença significativamente maior da elevação da superfície livre, nomeadamente nos casos 2000, 2160 e 2180 em que o erro se aproxima dos 20%.

4.3. Resultados e escolha do modelo numérico

Fazendo uma análise final aos modelos simulados, observa-se uma desigualdade substancial nos casos 2000, 2160 e 2180 com uma taxa de erro associado de 13,38%, 12,36% e 9,27% respectivamente. O caso 2112 apresenta uma média de erro razoável que ronda os 6%, no entanto o modelo 2113 é o que permite melhor precisão com uma diferença associada de 5,55%.

No que diz respeito à difusão da fracção de volume, o caso 2180 produz resultados bastante satisfatórios utilizando um passo de tempo variável. No entanto, utilizando um passo de tempo fixo, este modelo não obteve qualquer êxito. Assim sendo, o modelo que apresenta menor difusão da fracção de volume é o 2113. Este caso aplica o modelo multifásico do *VoF Explícito*, o algoritmo SIMPLEC e o esquema CICSAM de reconstrução.

Verifica-se que o caso 2113 é a melhor opção para simular a superfície livre no escoamento da propagação e rebentação de uma onda, em relação ao caso de referência.

Capítulo 5

Caso de estudo e aplicação ao conversor de energia

5.1. Geometria da CAO e condições de onda

Este capítulo inicia-se com a apresentação do dispositivo conversor de energia do tipo CAO, onde se indica as suas propriedades, formas e dimensões, seguindo-se um estudo numérico onde vai ser aplicado o modelo sugerido na secção 4.3 deste trabalho.

O modelo geométrico utilizado nesta dissertação foi baseado na estrutura da central de CAO na cidade de Mutriku em Espanha (figura 5.1). Esta central tem a particularidade de ser o primeiro projecto de exploração comercial de energia das ondas do tipo CAO, e consiste numa instalação multi-turbina com 16 câmaras que estão integradas num quebra-mar.

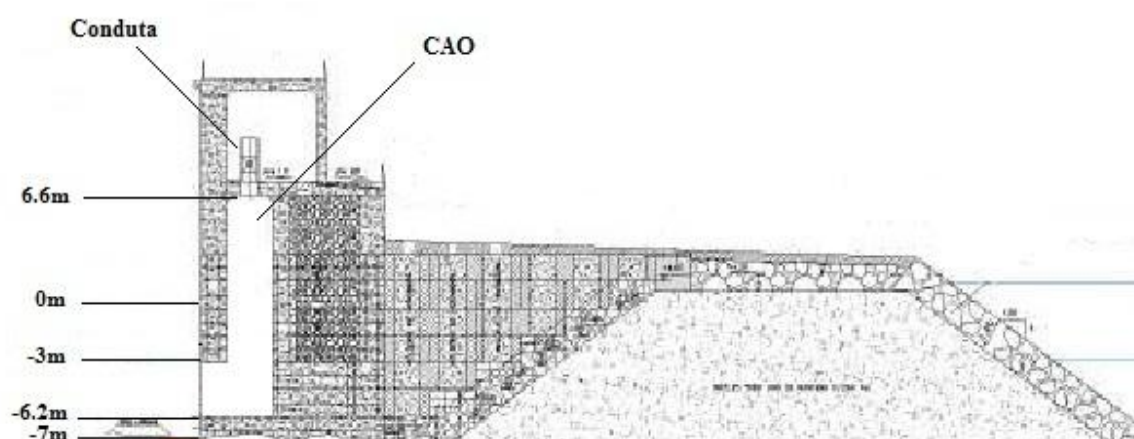


Figura 5.1 – Perfil de secção da central CAO de Mutriku (Enciso et al. 2009)

Para facilitar o processo de construção, foram projectadas colunas pré-fabricadas que, sobrepostas umas nas outras, criam uma coluna vertical que alberga a CAO. Como se pode ver na figura 5.1, a parede frontal encontra-se 3m submersa e tem uma espessura de 1,65m. A abertura que transmite as oscilações da massa de água para a coluna de ar tem 3,2m de altura. Uma análise mais pormenorizada sobre este dispositivo, pode ser consultada em Enciso *et al.* (2009). O comprimento da CAO é de 3,1m e a sua altura desde o fundo até ao topo é de 12,8m. No cimo da CAO encontra-se uma conduta com 3m de comprimento e uma abertura que representa um diâmetro de 0,75m e onde será instalado um modelo de turbina descrito na secção 5.2.1. Esta configuração será utilizada ao longo do restante trabalho, com excepção ao estudo efectuado na secção 5.3, onde a câmara se encontra aberta para a atmosfera.

Tal como o modelo geométrico do dispositivo, também a representação da geometria irregular do fundo e as condições de onda aplicadas neste trabalho se baseiam nas características batimétricas e marítimas de Mutriku. As propriedades das ondas alteram-se quando estas interagem com o fundo irregular na sua propagação até à costa, sofrendo efeitos de reflexão. Esta interação dá origem a uma distribuição irregular de energia perto da costa, com áreas de concentração de energia (*hotspots*) e por outro lado, áreas de relativamente pouca energia (*cold spots*). Através da carta de batimetria do Instituto Hidrográfico Espanhol que descreve a baía de Biscaia (figura 5.2), foi possível efectuar a caracterização da geometria irregular de fundo no presente estudo, representada na figura 5.3.

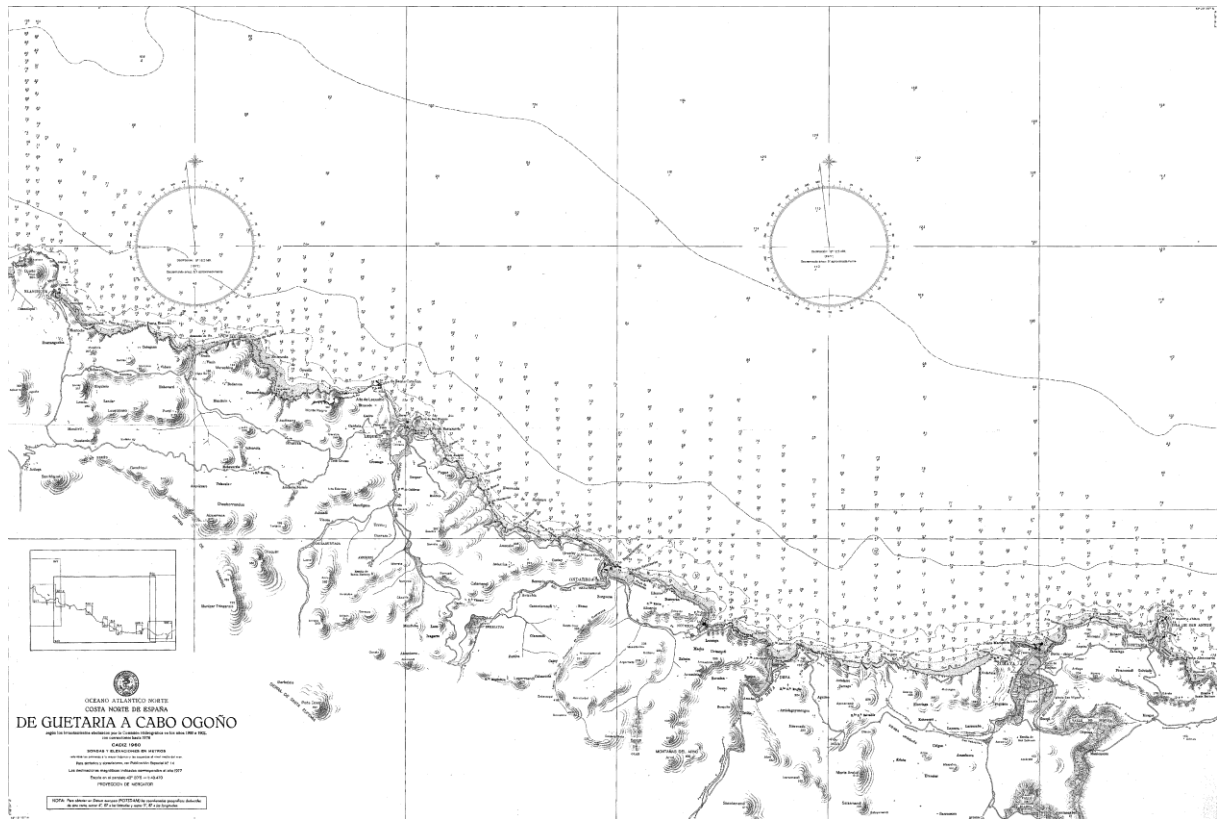


Figura 5.2 – Carta de batimetria da baía de Biscaia

Para determinar a localização de *hotspots* na baía de biscaia (onde se localiza Mutriku) foi efectuado um estudo por Iglesias e Carballo (2010) baseado num modelo computacional de cálculo de ondas perto da costa, aplicado a uma grelha cartesiana, para descobrir as áreas com maior concentração de energia. Com esse modelo foram representados 3 casos de estudo que simulam as condições de onda típicas da zona nos períodos de Primavera/Verão, Outono/Inverno e condições de tempestade. Para este trabalho irão ser recriadas as condições de onda semelhantes às simuladas por Iglesias e Carballo (2010) no período Primavera – Verão.

A presente dissertação consiste num estudo numérico 2D de um canal com 10m de profundidade de água e um comprimento de 408,75m que corresponde aproximadamente a 4.4 comprimentos de onda. As ondas simuladas têm um período $T = 10s$, o que equivale a um comprimento de onda $L = 92,4m$, fazendo-se variar a sua altura em função da amplitude para valores de 0,3m, 0,6m e 1,0m. A figura 5.3

representa a geometria do dispositivo, onde estão indicadas as sondas de superfície livre (SL), pressão (P) e caudal (C).

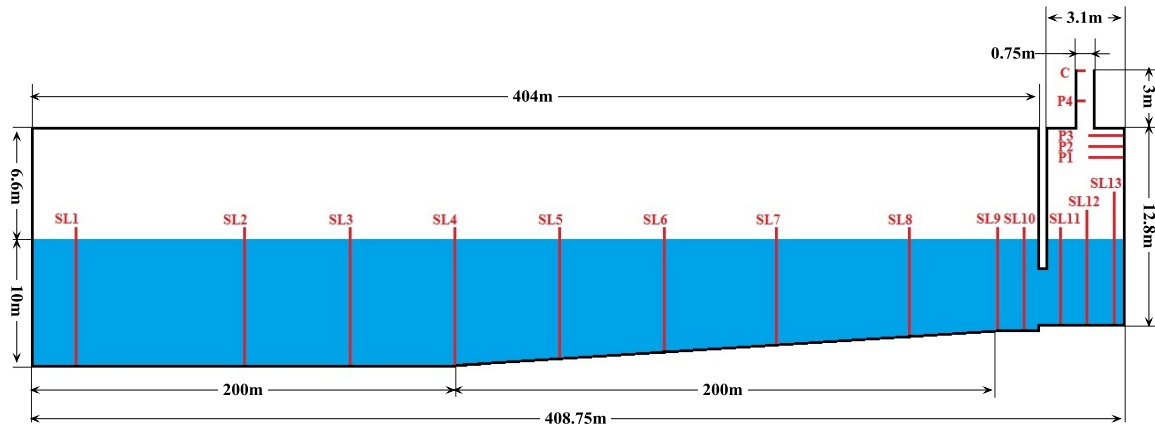


Figura 5.3 – Geometria do dispositivo CAO e posição das sondas

5.1.1. Geração da malha

Devido à complexidade da geometria do dispositivo, foi necessário recorrer a elementos quadriláteros e triângulos na construção da malha. Os elementos triangulares foram aplicados na área de transição entre o fundo e a entrada da CAO, devido ao ângulo obtuso que existe nessa zona, de forma a garantir uma continuidade na variação entre elementos triangulares e quadriláteros.

Na zona de transição entre o topo da CAO e a conduta, também foram utilizados elementos triangulares com a finalidade de suavizar a transição entre elementos e evitar instabilidades numéricas, uma vez que esta é uma região onde ocorre uma forte variação de pressões. No interior da CAO foi aplicada uma malha mais fina e uniformemente distribuída, particularmente na zona onde ocorre a variação da elevação da superfície livre e junto às paredes da CAO.

Na região da superfície livre foi necessário aplicar um refinamento mais acentuado de forma a assegurar uma transição entre a água e o ar mais precisa, diminuído assim a possibilidade de ocorrer difusão numérica na fracção de volume. Consequentemente, o estiramento foi feito de forma progressiva na direcção horizontal, pois a variação do escalar que descreve o VoF acontece na vertical.

Na zona de ar, foi usada uma malha mais grosseira. Porém, a continuidade na variação das dimensões dos elementos foi assegurada, para que não houvesse choque numérico e instabilidade na simulação. A figura 5.4 representa a malha gerada para o domínio de cálculo, com detalhe na região da CAO.

Tendo em conta a variação da altura de onda em função dos diferentes valores de amplitude, foram utilizadas 3 discretizações de malha diferentes, onde foi aplicada uma alternância do número de elementos na região da superfície livre, consoante a altura de onda utilizada. A tabela 5.1 apresenta o número de elementos das malhas para as diferentes amplitudes de onda simuladas.

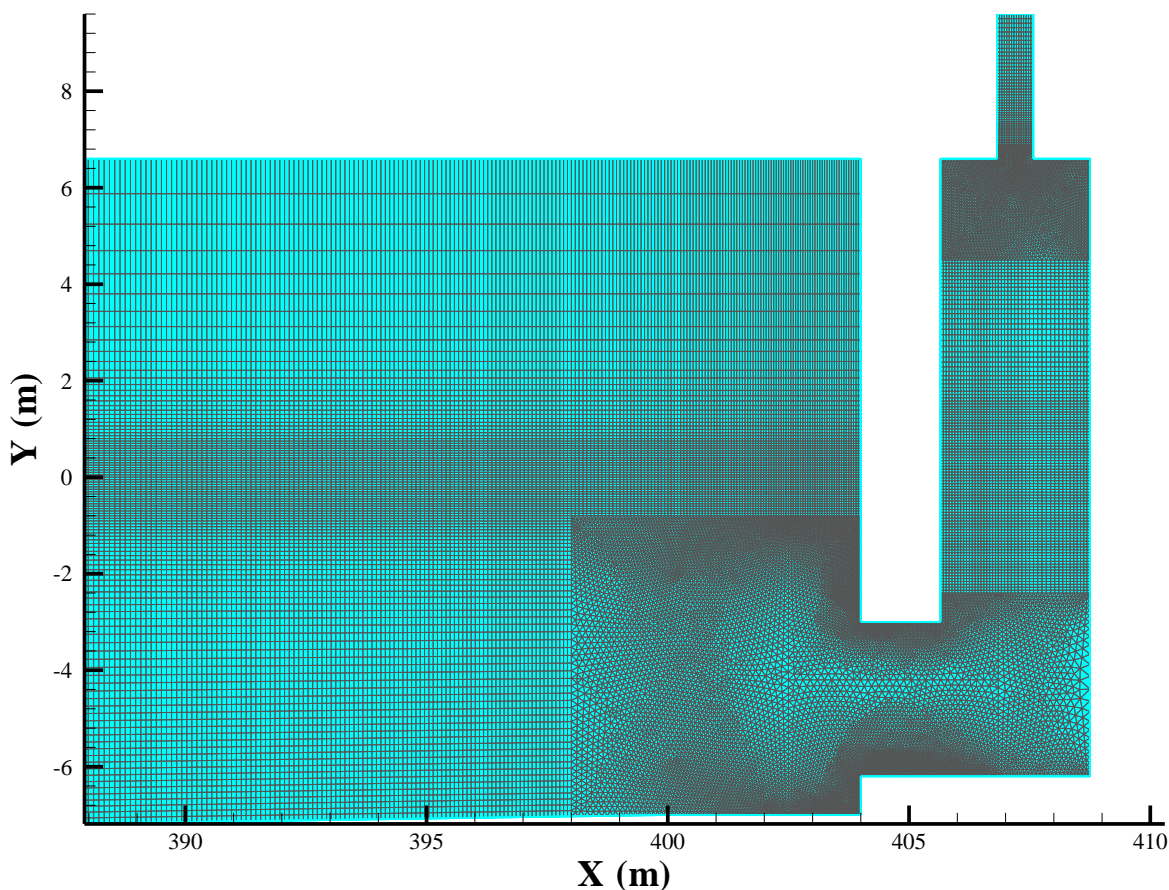


Figura 5.4 – Malha gerada para o domínio de cálculo na região da CAO para a amplitude 0,6m

Amplitude de onda (m)	Número de Elementos
0,3	125779
0,6	136205
1	141205

Tabela 5.1 – Número de elementos das malhas em função da amplitude de onda

5.2. Modelação numérica de um dispositivo CAO

Nesta dissertação, a complexidade da modelação numérica está inerente ao modelo geométrico utilizado na simulação. É necessário modelar numericamente tendo em conta os fenómenos físicos intrínsecos que incluem o escoamento entre 2 fluidos, neste caso o ar e a água, e avaliar o posicionamento da superfície livre ao longo do tempo. A influência das dimensões geométricas da estrutura é igualmente importante na modelação numérica, em particular na câmara de CAO, uma vez que determina o comportamento do movimento da superfície livre bem como os resultados a obter.

Existem vários fenómenos que devem ser modelados e que ocorrem quando as ondas interagem com a estrutura da CAO e o fundo, entre as quais a propagação e rebentação da onda, a reflexão da onda que resulta do seu retorno quando entra em contacto com a parede frontal do dispositivo, a interação entre a onda incidente e a onda reflectida pela estrutura e a difracção causada pela interação entre a onda incidente e a superfície irregular do fundo. Dentro da câmara de CAO é importante modelar o movimento oscilatório da superfície livre que pode dar origem a *sloshing* que define a agitação na CAO e conseqüente escoamento de ar entre a câmara e a conduta.

É importante referir que o escoamento de ar da câmara da CAO para a conduta, é feita através do movimento ascendente e descendente da superfície livre que impele a circulação de ar por uma turbina que se localiza na conduta. O modelo de turbina utilizado neste trabalho irá ser descrito na secção 5.2.1.

Já foi referida a influência que a geometria da estrutura tem na modelação numérica. Na presente dissertação foram consideradas 3 configurações diferentes de CAO, as quais podem ser descritas do seguinte modo:

- CAO aberta (figura 5.5): esta configuração caracteriza-se pelo facto do topo da CAO se encontrar totalmente aberto, fazendo com que a câmara esteja à pressão atmosférica.
- CAO fechada com conduta (figura 5.6): o topo da CAO é fechado, contendo uma conduta de área inferior à da câmara que permite a circulação do ar entre o interior e o exterior da CAO. Esta desigualdade de dimensões origina uma diferença de pressão no escoamento.
- CAO fechada com conduta e modelo de turbina (figura 5.7): Tal como na configuração anterior, o topo da CAO é fechado, contendo uma conduta que permite a circulação de ar entre a câmara e o exterior. Porém, é modelada à saída da conduta uma turbina.

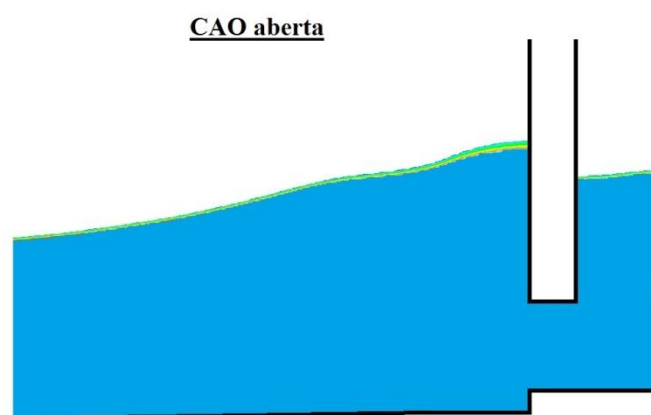


Figura 5.5 – Esquema ilustrativo da configuração de CAO aberta

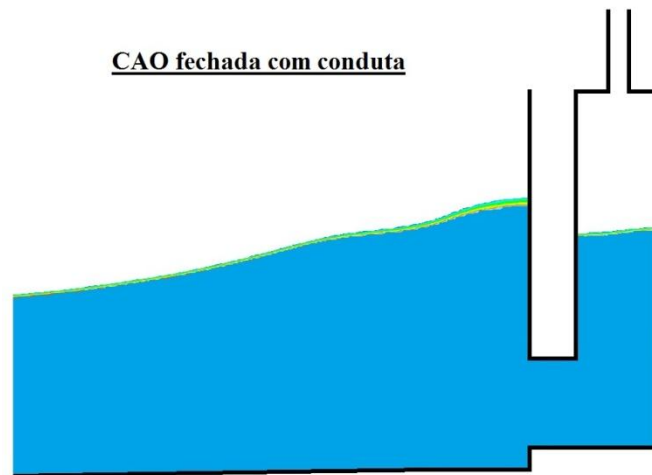


Figura 5.6 – Esquema ilustrativo da configuração de CAO fechada com conduta

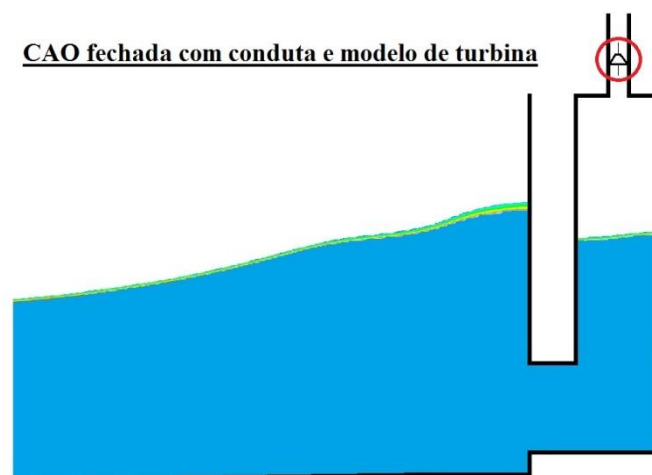


Figura 5.7 – Esquema ilustrativo da configuração de CAO fechada com conduta e modelo de turbina

5.2.1. Modelo de turbina

A turbina de ar é considerada o elemento mais crítico na cadeia de conversão de energia num dispositivo de CAO devido ao facto de estar sujeita a condições muito exigentes. Em virtude da sua capacidade de funcionar no mesmo sentido de rotação, independentemente do sentido do escoamento do ar, a turbina *Wells* é a solução que tem sido mais frequentemente adoptada na conversão de energia de dispositivos CAO (Conde *et al.*, 2007), e por consequência irá ser utilizada no presente estudo.

A turbina *Wells* é caracterizada por uma característica de turbina linear, ou seja, a perda de carga varia linearmente com o caudal do escoamento. Neste trabalho, a implementação do modelo de turbina consiste simplesmente na imposição de uma lei de perda de carga como condição de fronteira da

conduta, através de uma UDF. Esta metodologia foi aplicada com sucesso por Didier *et al.* (2011) e Ramalhaís (2011).

Numericamente, a UDF permite definir o caudal médio (Q_m) na secção da turbina de área S , e calcular a partir da intensidade da velocidade (u), a perda de carga resultante. A perda de carga (Δp) é imposta na secção de turbina como condição de fronteira. A UDF consiste assim em duas equações:

$$Q_m = \int_S u \, dS \quad (5.1)$$

$$\Delta p = K_{si} \cdot Q_m \quad (5.2)$$

Onde K_{si} ($Pa \cdot s/m^3$) é a característica da turbina.

5.2.2. Parâmetros de análise

O tratamento dos resultados tem como base uma análise comparativa entre os vários dados obtidos através das simulações efectuadas. No contexto deste estudo, importa assim identificar os parâmetros que vão ser analisados e que vão ser apresentados de seguida, bem como as respectivas formas de cálculo:

- Variação da superfície livre na CAO é determinada através do cálculo da média aritmética das sondas colocadas dentro da CAO;
- O factor de amplificação é definido normalizando a altura média de elevação da superfície livre na CAO pela altura de onda incidente (H/H_0);
- A fase angular é a diferença angular entre as ondas e é calculada a partir da série temporal de elevação de superfície livre da onda incidente imediatamente antes da parede frontal do dispositivo, e a série temporal de elevação média da superfície livre dentro da CAO;
- O *sloshing* é o parâmetro que mede a agitação da superfície livre dentro da CAO. É representado através do desvio padrão da elevação da superfície livre na CAO. Quanto maior for o desvio padrão, maiores são as diferenças entre a elevação da superfície livre e a sua posição média;
- A potência pneumática, que pode ser determinada na câmara e na conduta, é calculada a partir da pressão e do caudal que atravessa o ducto. É o parâmetro que traduz o desempenho do dispositivo de CAO em termos energéticos.

No decorrer deste trabalho irão também ser apresentadas as séries temporais de elevação de superfície livre, caudal, velocidade e pressão.

5.3. Análise de resultados em CAO aberta

Nesta secção é estudada a geometria de CAO aberta no seu topo, o que faz com que a câmara esteja à pressão atmosférica. As restantes características da estrutura mantêm-se iguais às apresentadas na secção 5.1.

A profundidade inicial do canal é de 10m e vai diminuindo gradualmente até uma profundidade de 6,2m quando atinge a zona de entrada da CAO. A parede frontal encontra-se 3m submersa e tem uma espessura de 1,65m. O comprimento do canal tem 409m, o que corresponde aproximadamente a 4,4 comprimentos de onda. A onda simulada tem um período $T = 10s$ e um comprimento $L = 92.4m$. A altura de onda (H) fazer-se-á variar em função da amplitude para valores de 0,3m, 0,6m e 1,0m.

Na figura 5.8 apresentam-se a variação do factor de amplificação (H/H_0), da fase angular e do sloshing, em função da amplitude de onda incidente.

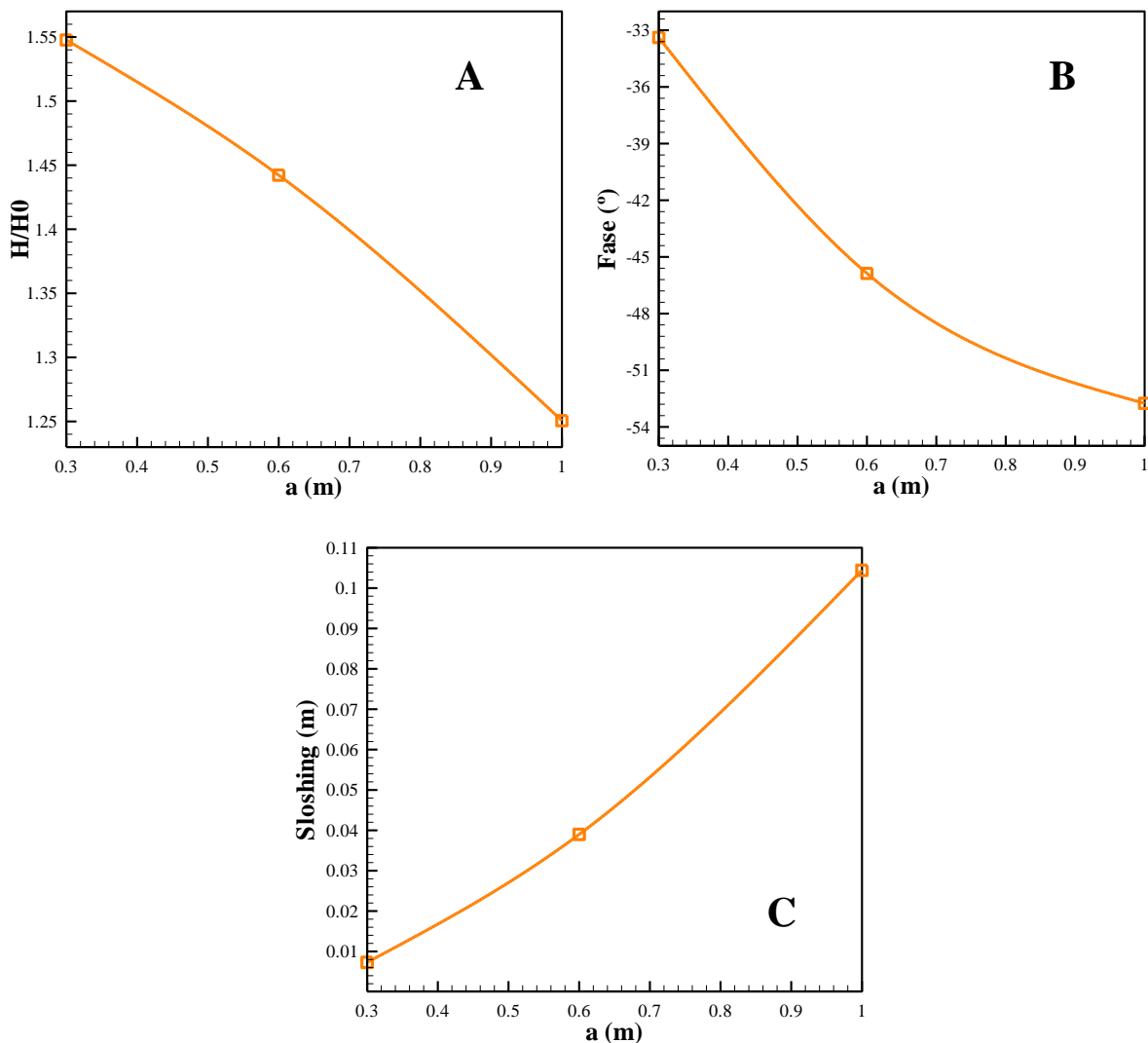


Figura 5.8 – Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A), fase (B) e sloshing (C), em função da amplitude de onda incidente para CAO aberta

Na figura 5.8 (A) é possível observar que o factor de amplificação apresenta um decréscimo à medida que aumenta a amplitude de onda. Pode constatar-se que o valor mais alto é de $H/H_0 \sim 1.55$ e se verifica para a amplitude de 0,3m. Observa-se também que o factor de amplificação para o intervalo entre a amplitude 0,3m e 0,6m é metade do que no intervalo entre a amplitude entre 0,6m e 1,0m, o que significa que quando se aumenta a altura de onda, a diferença de altura entre a onda incidente e a elevação média da superfície na CAO decresce duas vezes mais.

A fase angular é apresentada na figura 5.8 (B). Para a amplitude de 0,3m a diferença angular entre a onda incidente imediatamente antes da parede frontal, e a elevação média da superfície livre é da ordem dos 33° e observa-se um aumento para a amplitude de 0,6m, onde se verifica um ângulo de 46° . No intervalo entre as amplitudes 0,6m e 1,0m observa-se uma diminuição com tendência a estabilizar no regime de fase em torno de 53° .

A figura 5.8 (C) corresponde ao *sloshing* na CAO. Para a amplitude 0.3m o *sloshing* é quase inexistente, situando-se à volta dos 0,01m. Existe um pequeno aumento da agitação na CAO em cerca de 0,03m quando se simula uma amplitude de 0,6m, mas é para a amplitude de 1,0m que a diferença se torna mais significativa, com o valor do *sloshing* a chegar aos 0,1m. Este aumento indica um incremento da agitação na CAO à medida que a altura de onda se torna maior.

A figura 5.9 apresenta a série temporal de elevação de superfície livre para as três amplitudes (0,3m, 0,6m e 1,0m), com os valores obtidos através da média dos valores registados para as sondas localizadas dentro da CAO (SL11, SL12 e SL13).

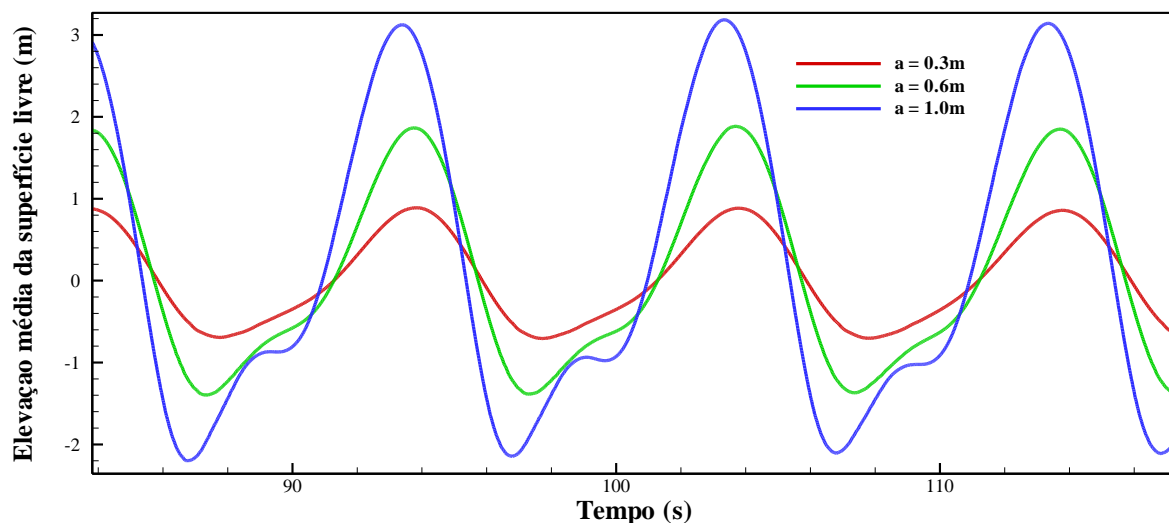


Figura 5.9 – Série temporal de elevação de superfície livre para CAO aberta

Em relação à elevação média da superfície livre dentro da CAO, existe um aumento da mesma à medida que a amplitude é maior. Observa-se também que, no geral, os valores em crista são maiores que os valores em cava. Pode-se constatar analogamente que os valores de elevação média da superfície livre na CAO em crista para as três amplitudes são três vezes maiores que os de elevação de onda incidente. O mesmo se verifica em cava, porém, os valores são duas vezes maiores. Segundo um estudo efectuado por Le Crom *et al.* (2009), as medições efectuadas à elevação de superfície livre na

CAO são geralmente maiores que as medições de onda incidente devido ao fenómeno de ressonância que ocorre na câmara.

Na figura 5.9 é possível igualmente verificar que, à medida que a amplitude da onda incidente aumenta, surge na cava um ligeiro intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre que é mais predominante para a amplitude 1.0m, onde quase se forma uma segunda frequência. Um estudo realizado por Wang *et al.* (2001) onde são investigados os efeitos do declive da superfície do fundo perto da costa na performance hidrodinâmica de um dispositivo CAO costeiro, revelam que a superfície de fundo perto da costa influencia o desempenho do dispositivo, quando a profundidade se torna cada vez menor. Pode inferir-se assim que o intervalo de estagnação da elevação de superfície livre na cava suceda, devido ao efeito de difracção da superfície do fundo.

5.4. Análise de resultados em CAO fechada com conduta

Nesta secção, o estudo irá incidir na estrutura do dispositivo cujo topo se encontra fechado e onde a circulação de ar entre o interior da CAO e o exterior acontece através de uma conduta com 3m de comprimento e um diâmetro de 0,75m.

Na figura 5.10 representam-se a variação do factor de amplificação (H/H_0) e da fase angular, em função da amplitude de onda incidente.

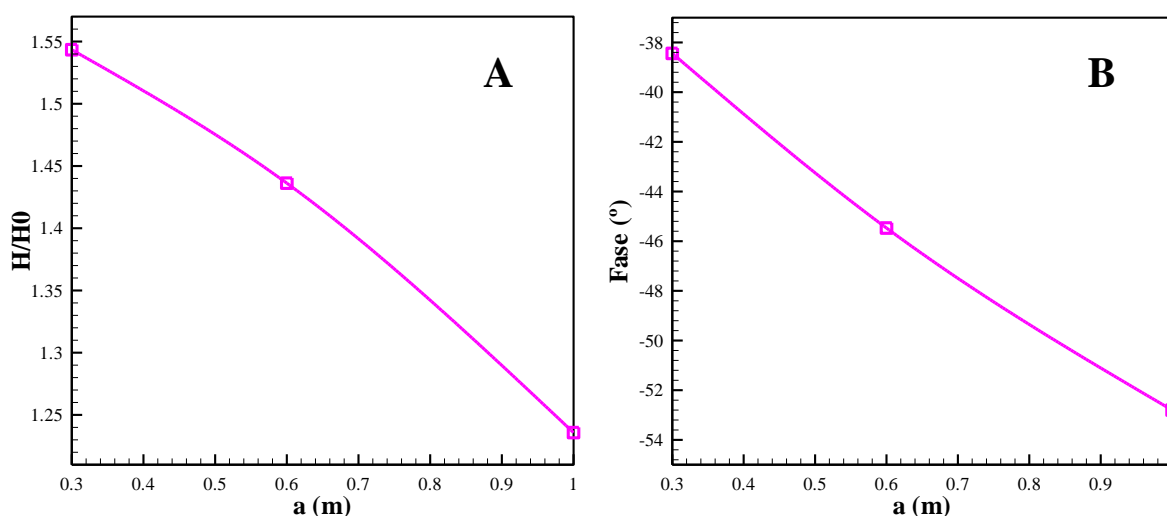


Figura 5.10 - Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A) e fase (B), em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta

Na figura 5.10 (A) é possível verificar um declínio do factor de amplificação com o aumento da amplitude de onda. Esta configuração apresenta um valor máximo de 1.54 para a amplitude de 0,3m e um valor mínimo de 1,2 para a amplitude de 1,0m. Verifica-se também que a diferença de altura entre a onda incidente e a elevação média da superfície na CAO decresce duas vezes mais, ou seja, o intervalo entre a amplitude 0,3m e 0,6m é metade do que o intervalo entre a amplitude entre 0,6m e 1,0m, o que demonstra uma diminuição constante do factor de amplificação para CAO fechada com conduta em relação ao caso de CAO aberta.

Em relação à fase angular apresentada na figura 5.10 (B), denota-se um valor mínimo para a amplitude de 0,3m em que a diferença angular se encontra em 39°, aumentando para 45° quando se simula uma onda com 0,6m de amplitude. Ao contrário do que acontece no caso de CAO aberta em que se manifesta uma diminuição com tendência a estabilizar o valor da fase para uma amplitude de onda de 1,0m, no caso de CAO fechada com conduta este decréscimo é contínuo e com tendência a acentuar-se.

Na figura 5.11 apresenta-se a variação do *sloshing*, em função da amplitude de onda incidente. Para a amplitude de 0,3m o valor de agitação na câmara de CAO é muito próximo de zero. À medida que aumenta a amplitude de onda incidente, observa-se um pequeno incremento no valor do *sloshing* com 0,04m para 0,6m de amplitude, chegando aos 0,08m para a amplitude 1,0m. Comparando com o caso de CAO aberta, apenas se verifica uma redução do *sloshing* para a amplitude 1,0m, o que demonstra que a sobrepressão resultante da existência da conduta confere uma redução da agitação dentro da câmara para a amplitude mais elevada.

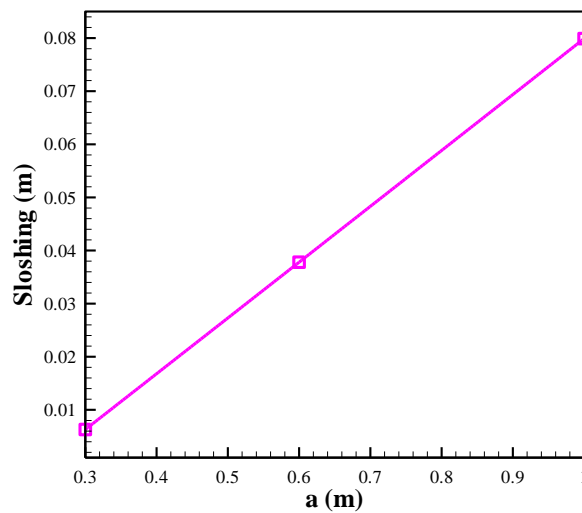


Figura 5.11 – Variação do sloshing em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta

Nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14, são apresentadas respectivamente as séries temporais de elevação de superfície livre, pressão média na CAO e caudal, para as três amplitudes (0,3m, 0,6m e 1,0m).

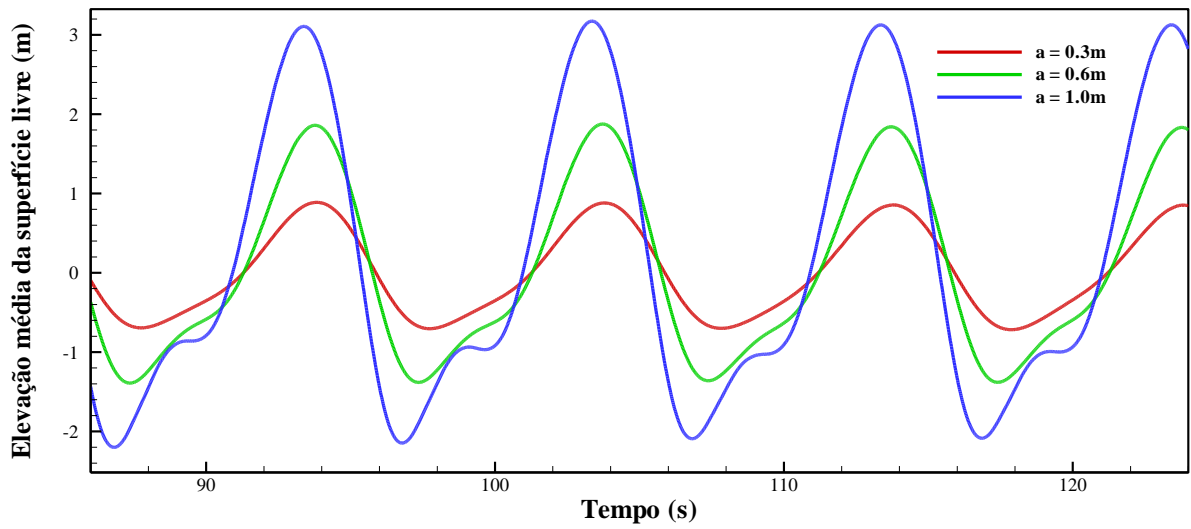


Figura 5.12 - Série temporal de elevação de superfície livre para CAO fechada com conduta

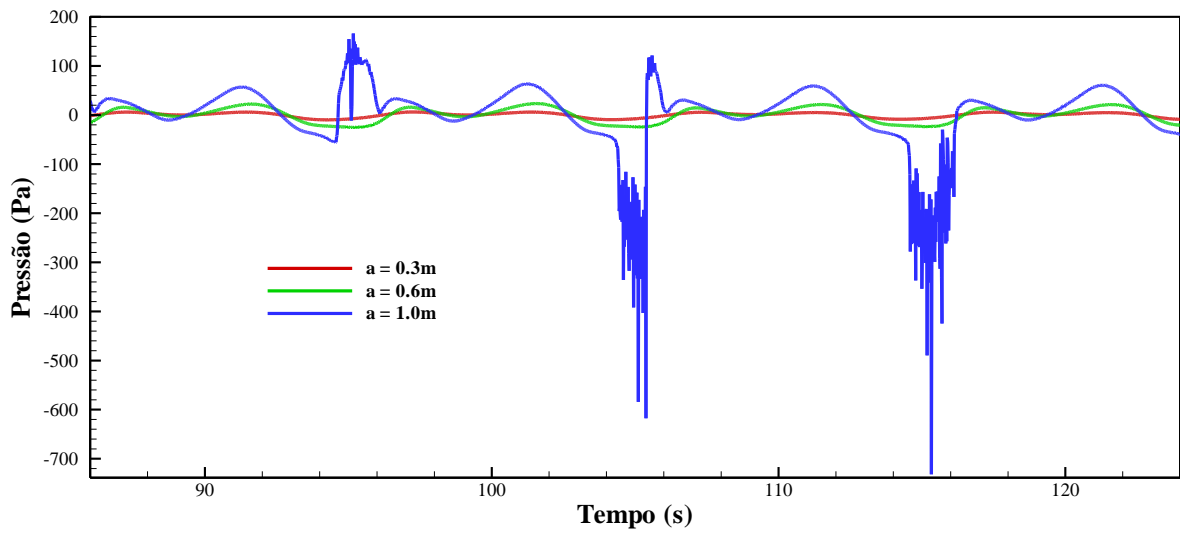


Figura 5.13 - Série temporal de pressão para CAO fechada com conduta

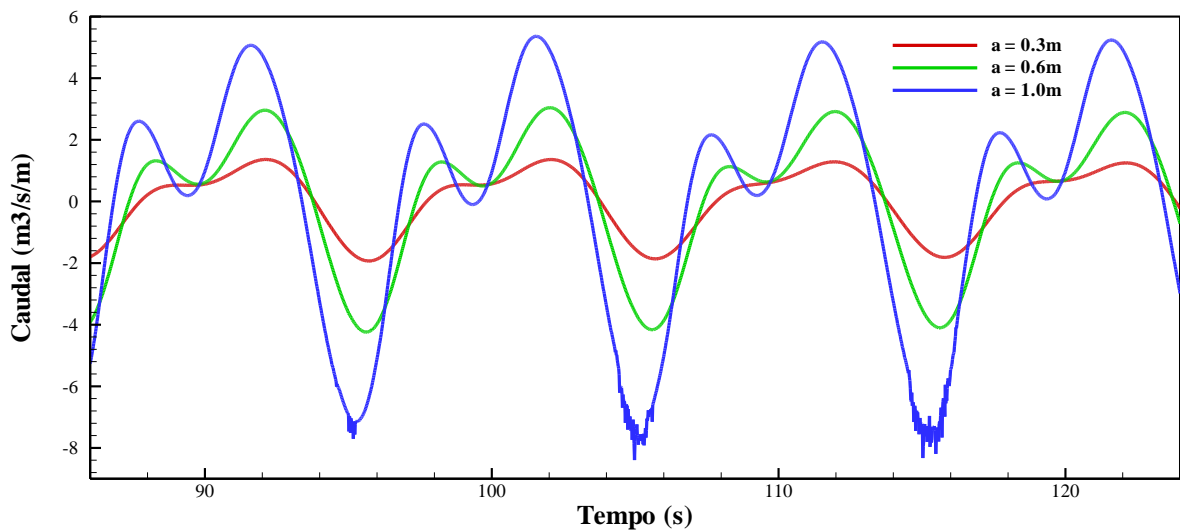


Figura 5.14 - Série temporal de caudal para CAO fechada com conduta

Na figura 5.12 é possível observar que existe um incremento da elevação da superfície livre à medida que aumenta a amplitude de onda incidente. Nota-se também que os valores em crista são maiores do que em cava, sendo que em crista rondam os 3,1m, 1,8m e 0,9m para as amplitudes de 1,0m, 0,6m e 0,3m respectivamente. É interessante notar que o fenómeno de intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre que acontece na cava em CAO aberta, também sucede em CAO fechada com conduta, o que demonstra que o efeito de difracção da superfície do fundo se manifesta, independentemente das restrições à saída do ar imposta pela conduta.

Comparando os valores de elevação de superfície livre desta configuração com a de CAO aberta, verifica-se que os valores são muito semelhantes, podendo inferir-se deste resultado que as restrições à saída do ar imposta pela conduta não influenciem a elevação de superfície livre, embora estudos efectuados por Liu *et al.* (2009) e Hong *et al.* (2007) provem que a restrição de ar à saída da conduta através da variação do seu diâmetro, influencie a elevação de superfície livre dentro da CAO.

Na figura 5.13 é representada a série temporal da pressão média na CAO. É possível verificar que a variação dos valores para amplitude de 0,3m é muito pequena, situando-se em torno de $5Pa$. Para a amplitude 0,6m, os valores de pressão são maiores, situando-se á volta de $25Pa$, o que indica um acréscimo de pressão com o aumento da amplitude de onda. Para estas duas amplitudes os valores em expansão são semelhantes aos de compressão. O mesmo já não se pode dizer em relação aos valores de pressão para a amplitude 1,0m, onde os valores em expansão são maiores do que em compressão. Observa-se também uma grande diferença de valores de depressão para a amplitude de 1,0m, onde se denota uma instabilidade de pressão que se traduz numa alternância muito díspar no período de expansão, tendo ocorrido um caso semelhante num estudo efectuado por Le Crom *et al.* (2009). Esta situação deve-se a problemas de resolução numérica que interferem no escoamento de ar. Estes problemas de resolução numérica também produzem efeitos contrários ao que seria de esperar fisicamente, uma vez que em determinados instantes se verifica uma sobrepressão no modelo numérico, quando na realidade seria suposto ocorrer uma depressão em modelo físico. Esta situação pode ser observada no intervalo de tempo entre $t = 94s$ e $t = 96s$ na figura 5.13 para a amplitude 1,0m.

Quanto ao caudal representado na figura 5.14, pode constatar-se que existe um incremento no fluxo de ar que percorre a conduta à medida que aumenta a amplitude de onda incidente, em especial para a amplitude de 1,0m, onde este acréscimo é mais significativo. É curioso também observar que ocorre uma oscilação de caudal no intervalo de compressão. Este acontecimento surge devido ao efeito de difracção da superfície do fundo, e que provoca uma interrupção no movimento ascendente da superfície livre e, conseqüentemente, no fluxo de ar que passa pela conduta. De referir que a um valor máximo de caudal corresponde um valor máximo da pressão, pois ao existir um maior diferencial de pressão, maior vai ser o fluxo de ar que passa pela conduta.

5.5. Análise de resultados em CAO fechada com conduta e modelo de turbina

Nesta secção irá ser estudado um modelo mais consentâneo com a realidade, comparativamente às configurações anteriores. Para além da conduta que permite a circulação de ar entre a CAO e o exterior, é modelada uma turbina do tipo *Wells*, que é caracterizada por uma característica de turbina linear e se situa a saída do ducto, como se pode verificar na figura 5.7. A característica de turbina utilizada nesta secção é $K_{si} = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$. As condições de onda permanecem as mesmas, com um período $T = 10\text{s}$ e um comprimento $L = 92.4\text{m}$, fazendo-se variar a altura de onda em função da amplitude para valores de 0,3m, 0,6m e 1,0m.

Na figura 5.15 representam-se a variação do factor de amplificação (H/H_0), da fase angular e do *sloshing*, em função da amplitude de onda incidente.

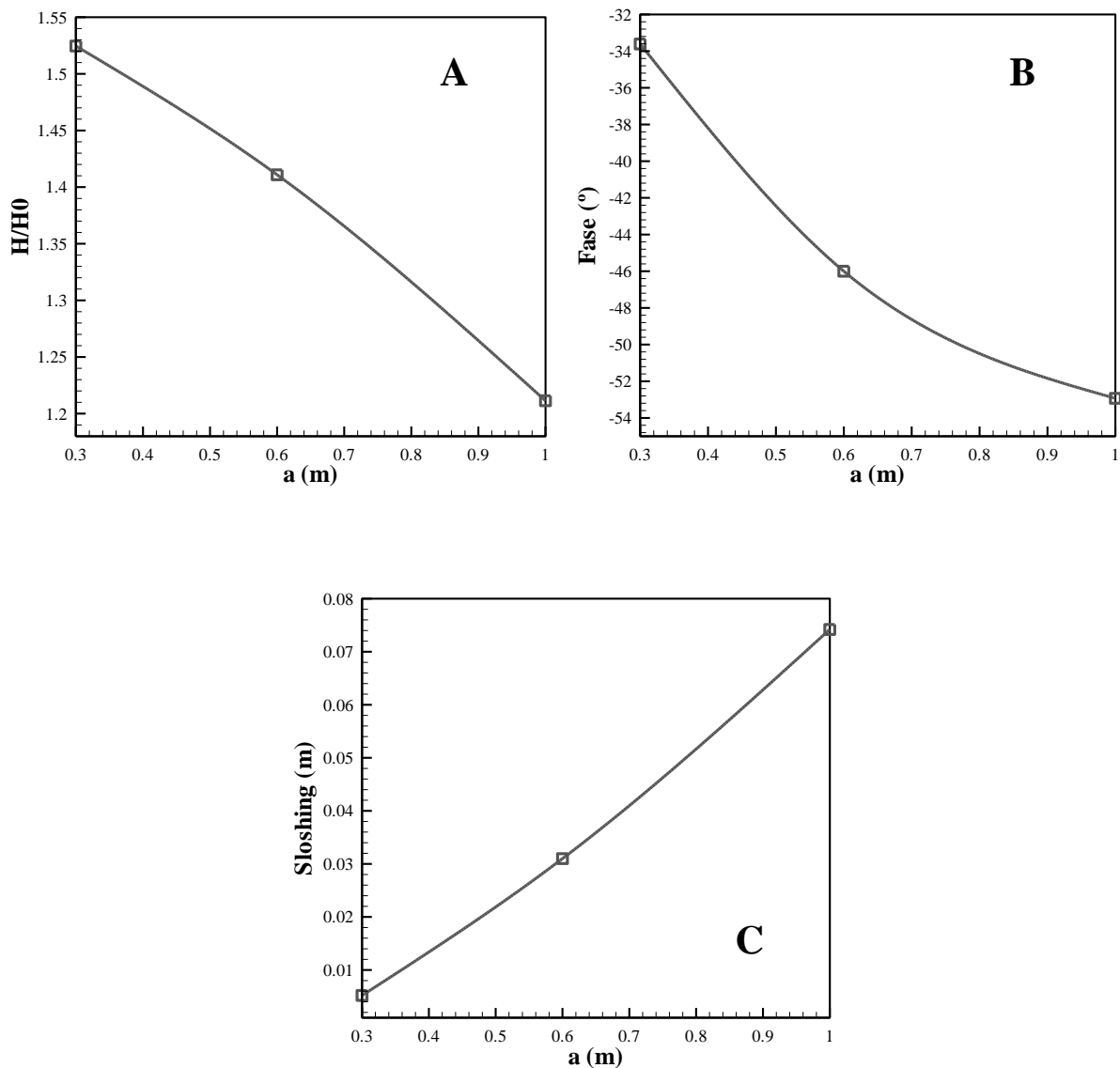


Figura 5.15 - Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A), fase (B) e sloshing (C), em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

Observando a figura 5.15 (A), pode-se constatar que existe um decréscimo do factor de amplificação com o aumento da amplitude de onda incidente. Este decréscimo apresenta a mesma proporção do que nos casos de CAO aberta e CAO fechada com conduta e uma descida nos valores duas vezes maior.

A fase angular é apresentada na figura 5.15 (B). Para a amplitude 0,3m a diferença angular entre a onda incidente imediatamente antes da parede frontal, e a elevação média da superfície livre é da ordem dos 34°, aumentando para 46° para a amplitude 0,6m. À semelhança do que acontece no caso de CAO aberta, observa-se uma diminuição com tendência a estabilizar no regime de fase em torno de 53°, no intervalo entre as amplitudes 0,6m e 1,0m.

A figura 5.15 (C) corresponde ao *sloshing* na CAO. Para a amplitude 0,3m o *sloshing* é praticamente inexistente. À medida que aumenta a amplitude de onda incidente, observa-se um pequeno aumento no valor do *sloshing* com 0,03m para 0,6m de amplitude, chegando aos 0,07m para a amplitude 1,0m. Comparando com o caso de CAO fechada com conduta, verifica-se que a introdução da perda de carga no ducto, pouco influencia a agitação da superfície livre na CAO.

A figura 5.16 apresenta a potência pneumática média na câmara e na conduta, em função da amplitude de onda incidente

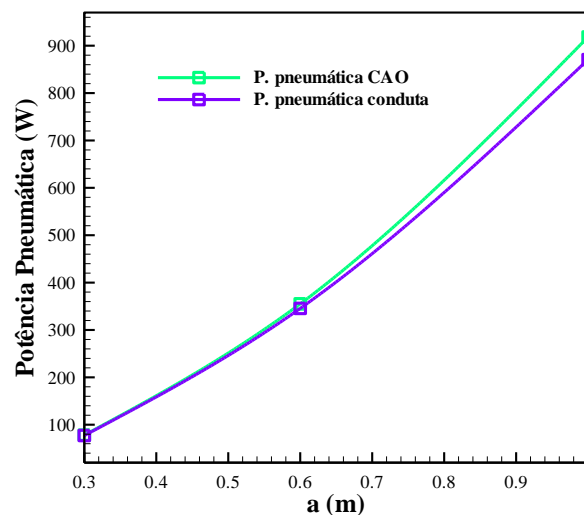


Figura 5.16 - Variação da potência pneumática, em função da amplitude de onda incidente para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

Analisando a figura 5.16 constata-se que a potência pneumática na CAO e na conduta atingem o seu valor mínimo para amplitude 0,3m, valor esse que é muito semelhante para os dois casos e que ronda os 78W. À medida que a amplitude da onda incidente aumenta, é possível observar um distanciamento nos valores entre as duas potências, existindo uma diferença de aproximadamente 50W entre as duas para a amplitude de 1,0m. Este facto deve-se ao efeito de contracção de secção entre a câmara da CAO e a conduta, que provoca uma diferença de pressão entre as duas localizações. Torna-se assim interessante verificar que a potência pneumática na CAO é superior à potência pneumática no ducto, embora a avaliação seja feita na conduta, uma vez que é nela que se encontra a turbina e onde se aproveita a potência disponível.

Na figura 5.17 está representada a evolução temporal de elevação da superfície livre e da pressão média na CAO para a amplitude de 0,3m. É possível observar que o valor máximo de sobrepressão vem sempre depois de uma cava e o valor máximo de depressão vem sempre depois de uma crista. É importante evidenciar também que aos valores máximos de sobrepressão e depressão, correspondem a uma cota nula da elevação de superfície livre, sendo que a pressão atinge o valor zero em cava e em crista.

Nas figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 são apresentadas respectivamente as séries temporais de elevação de superfície livre, pressão média na CAO, caudal e potência pneumática na conduta para as três amplitudes (0,3m, 0,6m e 1,0m).

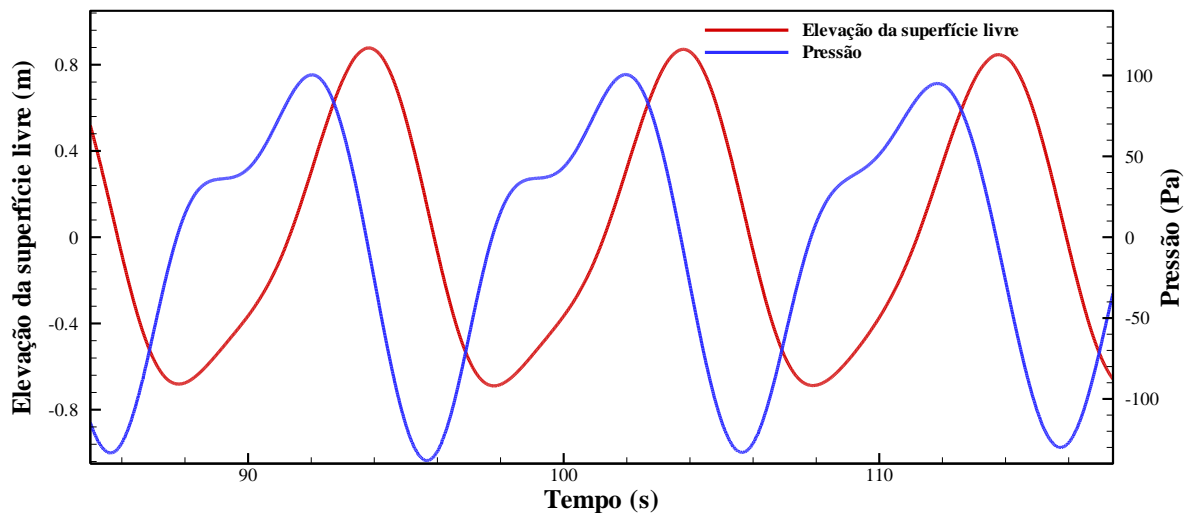


Figura 5.17 – Comparação entre a série temporal de elevação de superfície livre e a de pressão para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

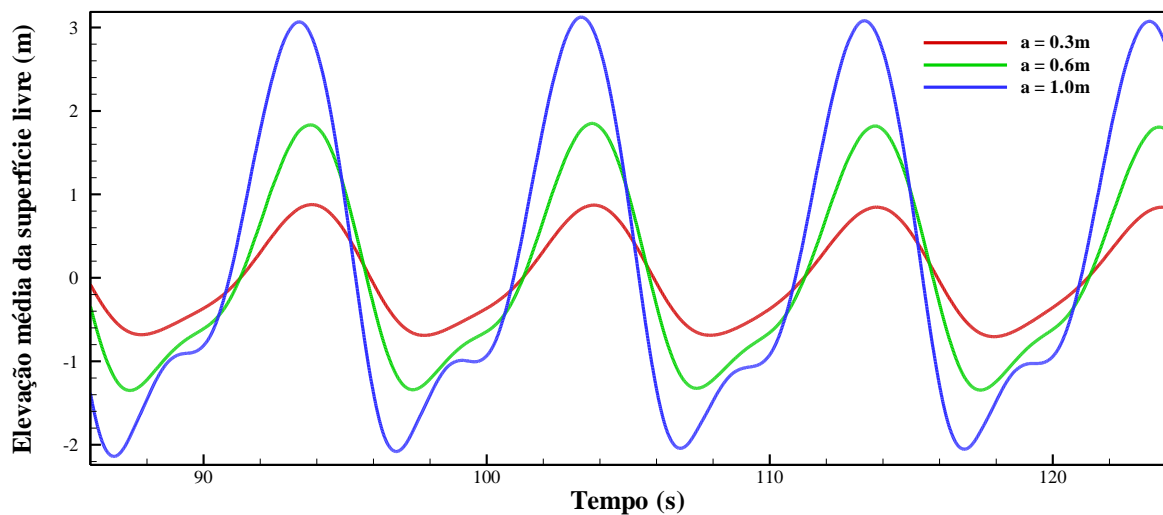


Figura 5.18 - Série temporal de elevação de superfície livre para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

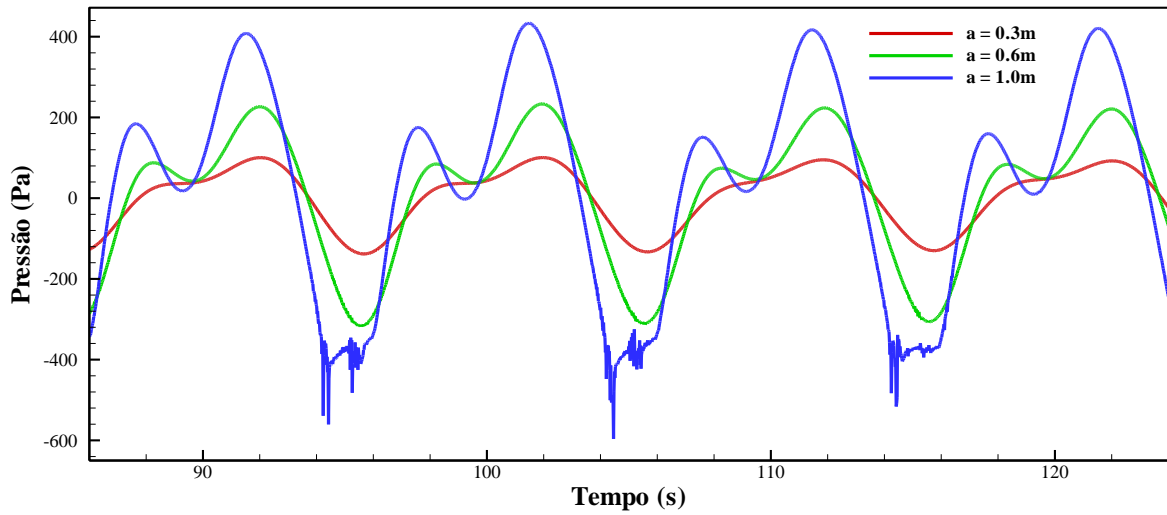


Figura 5.19 - Série temporal de pressão para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

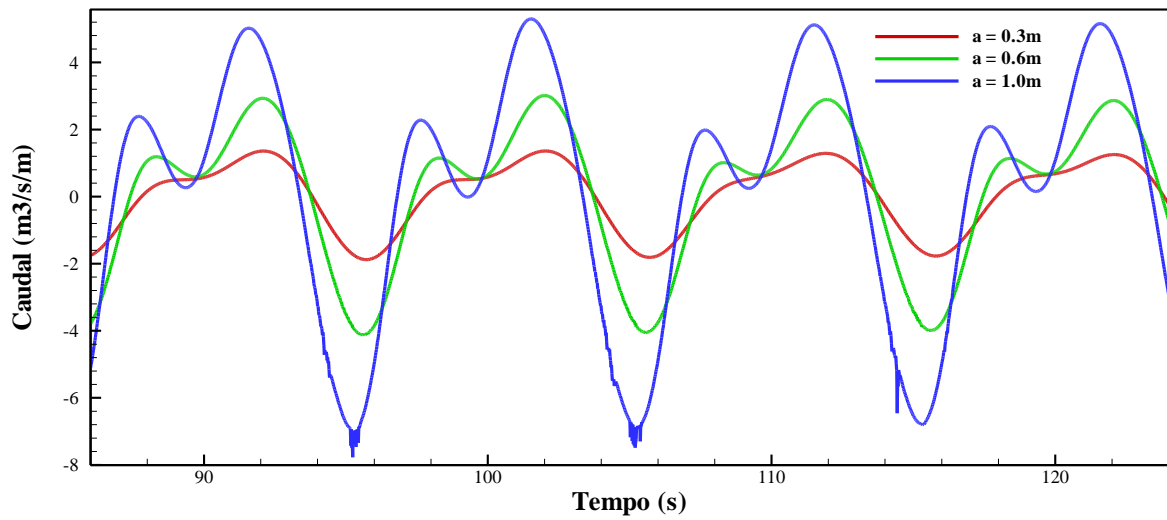


Figura 5.20 - Série temporal de caudal para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

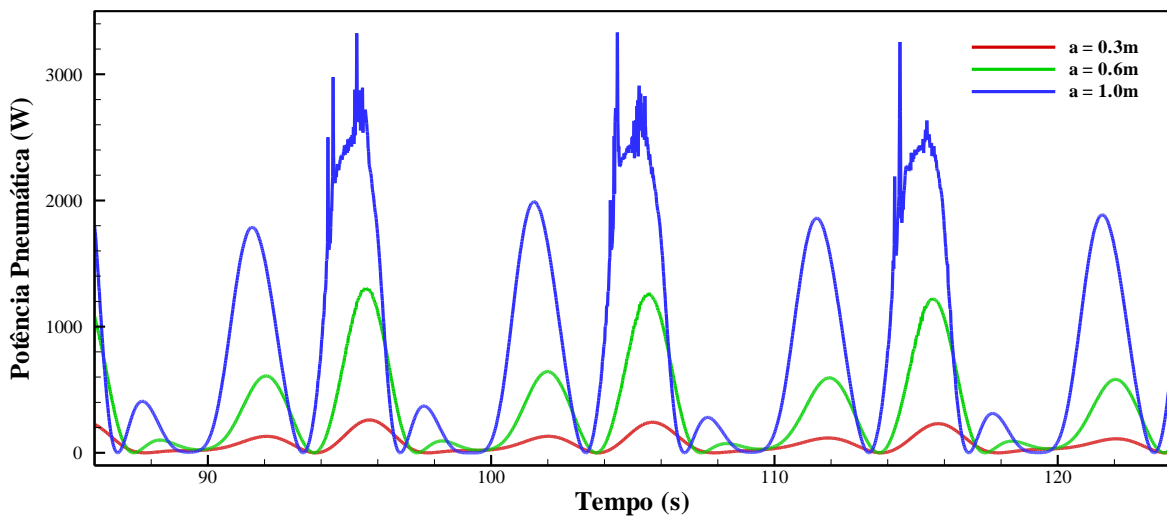


Figura 5.21 - Série temporal de potência pneumática para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

A figura 5.18 apresenta a elevação de superfície livre, que exhibe um comportamento semelhante ao das configurações estudadas anteriormente. Há um acréscimo com o aumento da amplitude incidente, sendo que os valores em crista são maiores do que em cava. Constata-se também, à semelhança das outras configurações, um intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre, fruto do efeito de difração da superfície do fundo.

A pressão e o caudal apresentam comportamentos muito idênticos, como se pode constatar nas figuras 5.19 e 5.20. Observam-se incrementos, tanto para um como para outro à medida que se aumenta a amplitude de onda incidente. Verifica-se também que os valores de pressão são maiores em depressão do que em sobrepressão, atingindo máximos de $590Pa$ e $433Pa$ respectivamente, para a amplitude de 1,0m. O mesmo acontece em relação ao caudal, onde os valores em admissão são superiores aos valores de escape, atingindo máximos de $7,6 m^3/s$ e $5,2 m^3/s$ respectivamente para a amplitude de 1,0m. É importante notar que ocorre uma oscilação, formando dois picos tanto de pressão como de caudal máximos, quando o dispositivo se encontra no intervalo de tempo de escape. Esta ocorrência deve-se ao intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre. De referir também que é possível observar na figura 5.19, uma alternância díspar nos valores máximos de depressão para a amplitude 1,0m resultantes dos problemas de resolução numérica, à semelhança do que aconteceu na configuração de CAO fechada com conduta, mas aqui com menos proeminência. Tal redução deve-se provavelmente à introdução do modelo de turbina que permite estabilizar a instabilidade de pressão, ao impedir a entrada de ar na câmara, diminuindo a depressão no seu interior

Ao analisar a figura 5.21 é possível verificar que há um acréscimo da potência pneumática com o aumento da amplitude de onda incidente, atingindo valores máximos na ordem dos $240W$, $1250W$ e $3320W$ para as amplitudes de 0,3m, 0,6m e 1,0m respectivamente, sendo que esta última atinge claramente os regimes de maior potência. Observa-se também que para todas as amplitudes existem três picos sucessivos e com ordem crescente de valores. Os dois primeiros coincidem com os dois picos, tanto de pressão como de caudal máximos, que sucedem quando o dispositivo se encontra em escape. O terceiro pico é o que reflecte a potência pneumática máxima e é concordante com a pressão e caudal máximos em módulo que ocorre quando o dispositivo se encontra em admissão. De referir também que a alternância um pouco díspar que se verifica no pico de potência pneumática máxima para a amplitude 1,0m, é um reflexo do efeito análogo que sucede na pressão máxima em módulo para a mesma amplitude.

As figuras 5.22 e 5.23 apresentam a intensidade da velocidade, as linhas de corrente e a fracção de volume indicando a posição da superfície livre no ciclo de escape para a amplitude de 1,0m, onde se pode observar que na água as linhas de corrente se comportam de uma forma contínua até à entrada do dispositivo. Constata-se a formação de um vórtice na secção junto ao vértice de entrada da parede esquerda do interior da CAO. Na câmara-de-ar, o fluxo também sucede de uma forma seguida e suave convergindo até à conduta, onde a velocidade atinge valores naturalmente mais elevados na ordem dos $8m/s$, devido à diminuição da área de escoamento entre a câmara pneumática e a conduta.

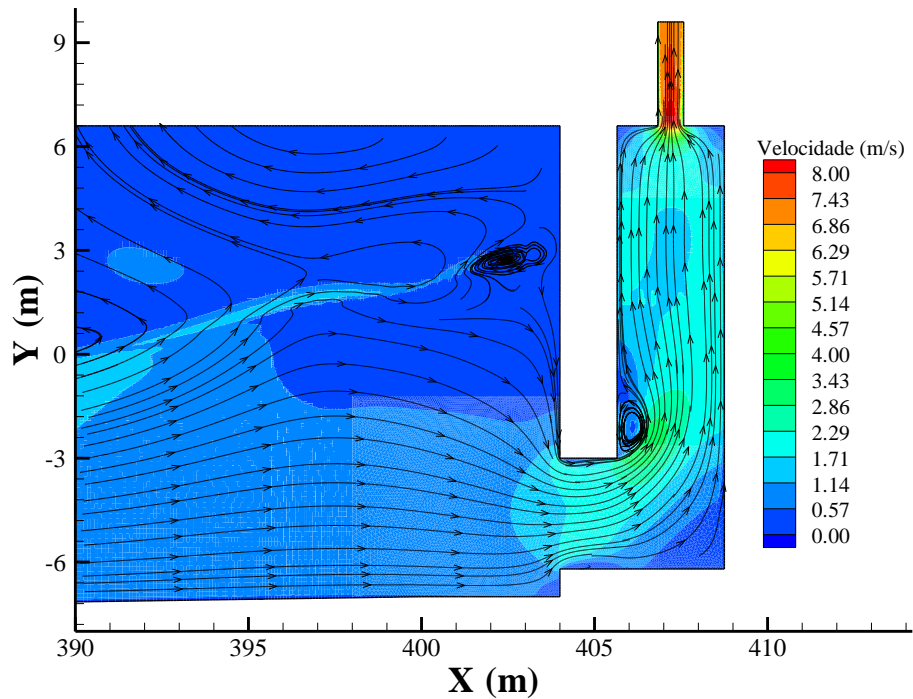


Figura 5.22 – Linhas de corrente e intensidade da velocidade em escape para $a = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina

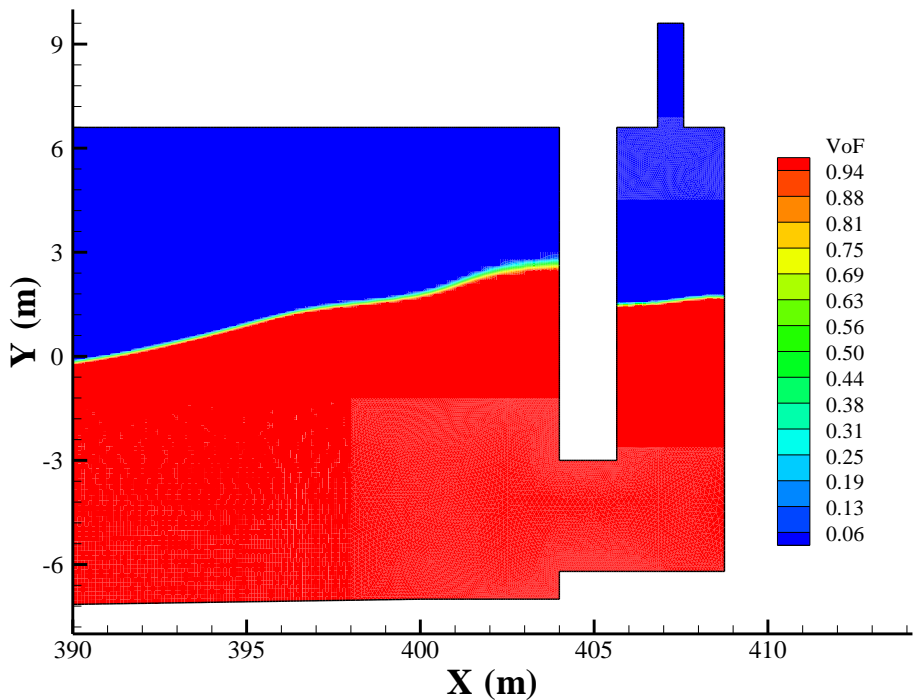


Figura 5.23 – Fracção de volume em escape para $a = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina

Nas figuras 5.24 e 5.25, apresenta-se a intensidade da velocidade, as linhas de corrente e a fracção de volume indicando a posição da superfície livre no período de admissão para a amplitude de 1,0m. É possível verificar um intenso fluxo de entrada de ar na CAO pela conduta, onde atinge o valor máximo de velocidade de aproximadamente $12m/s$ e que se prolonga até ao interior da câmara, formando dois

vórtices junto às paredes laterais superiores da CAO. Na água, o escoamento ocorre de forma contínua no sentido descendente, até formar dois vórtices. O primeiro junto à parede superior da área de entrada da CAO e o segundo próximo do vértice da parede frontal do dispositivo. A formação destes vórtices demonstra uma clara necessidade de arredondar a parede frontal na secção de entrada da CAO com o intuito de facilitar o escoamento, ou seja, eliminar a geração de vórtices.

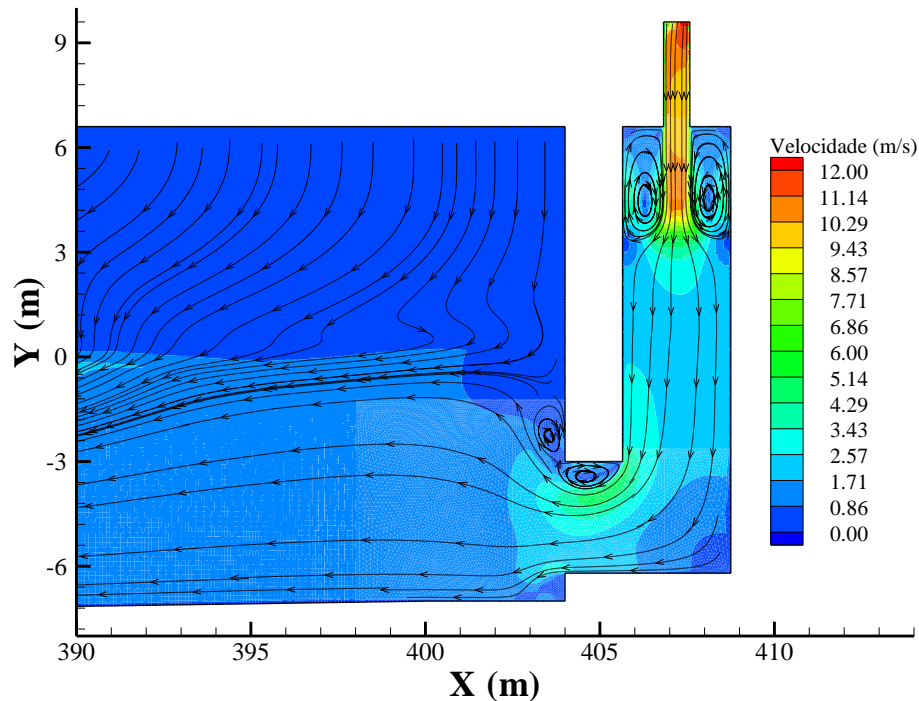


Figura 5.24 - Linhas de corrente e intensidade da velocidade em admissão para $\alpha = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina

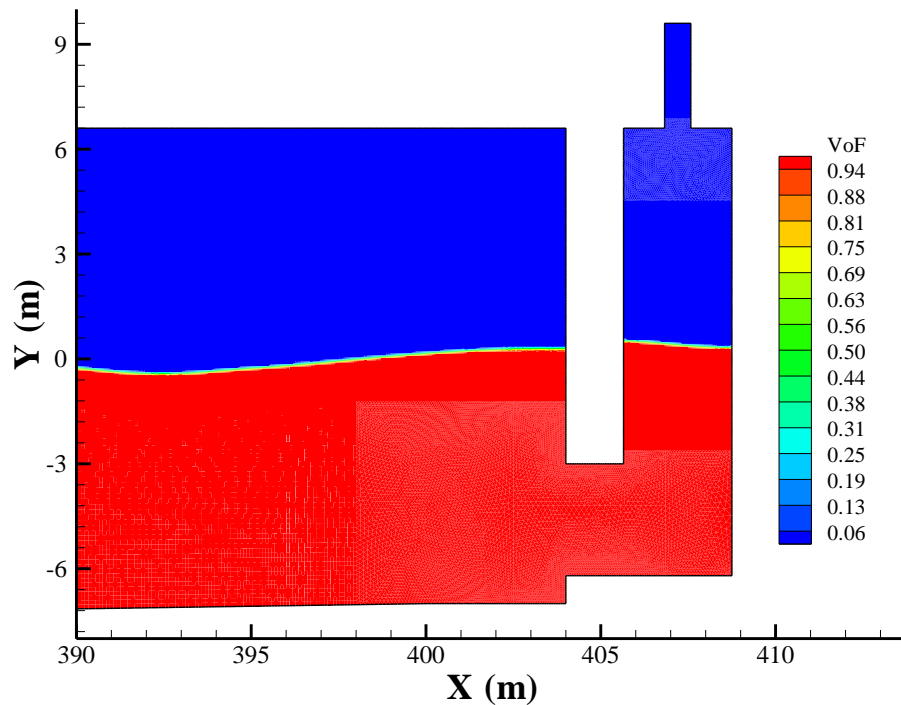


Figura 5.25 – Fração de volume em admissão para $\alpha = 1.0m$ em CAO fechada com conduta e modelo de turbina

5.5.1. Variação do período de onda incidente

Nas simulações seguintes fez-se variar o período de onda no intervalo de 5s a 13s para uma amplitude se onda de 1,0m, mantendo-se a característica de turbina em $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$. A tabela 5.2 apresenta os comprimentos de onda que correspondem aos períodos de onda simulados.

T (s)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L (m)	36,7	48,5	59,9	70,9	81,8	92,4	102,9	113,3	123,6

Tabela 5.2 – Comprimentos de onda (L) em função do período (T)

Na figura 5.26 representam-se a variação do factor de amplificação (H/H_0), da fase angular, do *sloshing* e da potência pneumática média na conduta, em função do período de onda incidente.

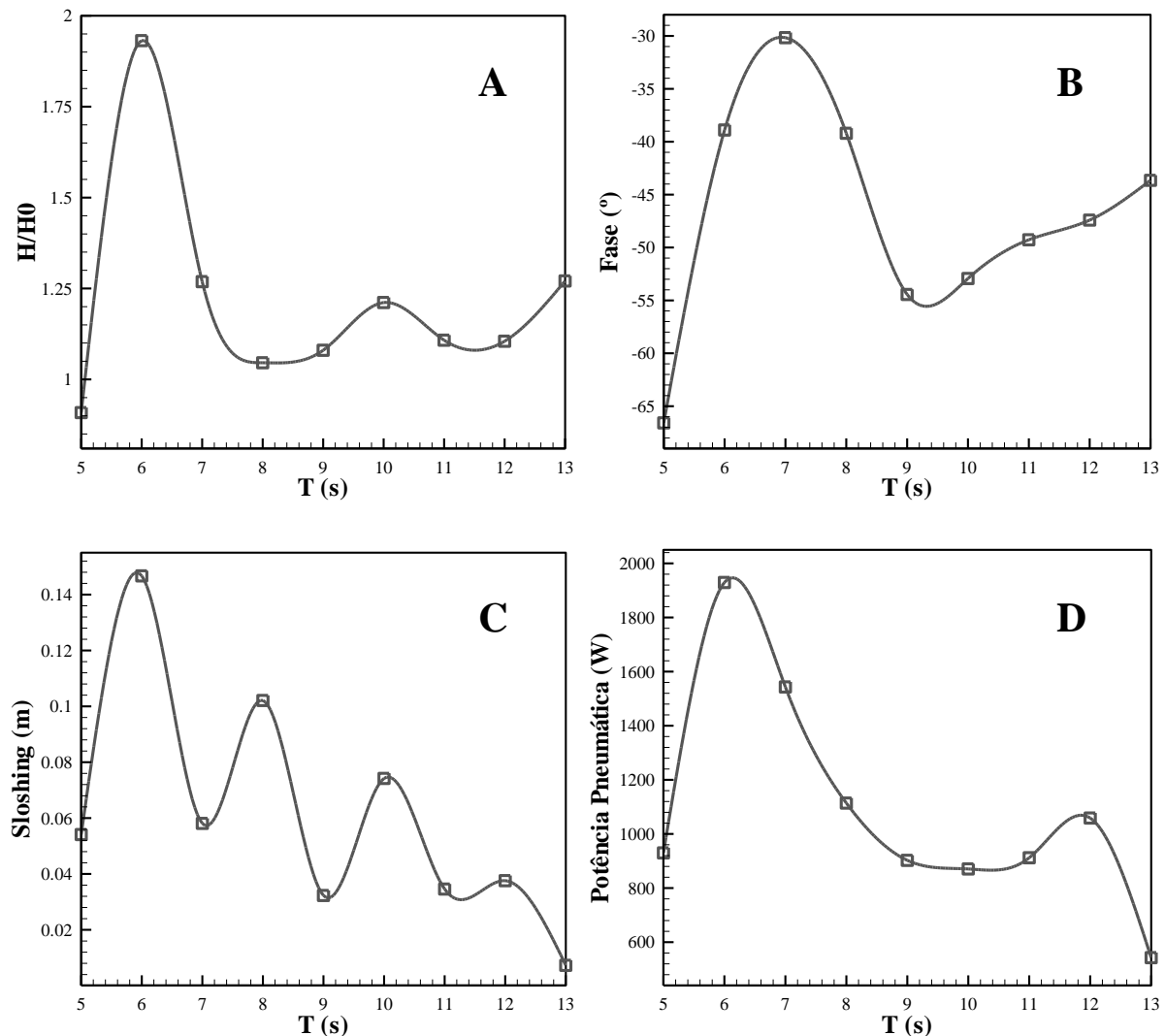


Figura 5.26 - Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A), fase (B), *sloshing* (C) e da potência pneumática em função do período de onda incidente para CAO fechada com conduta e modelo de turbina

A figura 5.26 (A) representa o comportamento do factor de amplificação em função do período de onda incidente. Verifica-se para o período $T = 5s$ um valor mínimo e inferior a 1 do factor de amplificação, o que demonstra que para este período, a altura média de elevação de superfície livre na CAO é inferior à altura de onda incidente. É possível observar também uma frequência de ressonância em torno do período $T = 6s$, onde se verifica o máximo do factor de amplificação, com um valor aproximado de 1,9. De seguida constata-se um decréscimo, atingindo um valor constante a partir do período $T = 8s$, com excepção nos períodos $T = 10s$ e $T = 13s$, onde se observam ligeiros incrementos no factor de amplificação.

A fase angular é apresentada na figura 5.26 (B). Um estudo efectuado em dispositivos *offshore* por Barreiro (2009), verificou que a fase está associada à ressonância. Desta forma, a ressonância manifesta-se quando a diferença angular entre a onda incidente e a elevação de superfície livre na CAO passa para anti-fase. No entanto, quando se observa a figura 5.24 (B) não se verifica mudança de fase, pelo que não se pode inferir quanto à ressonância ao analisar a fase angular.

O *sloshing* é caracterizado na figura 5.26 (C), onde se observa valores de agitação na CAO mais elevados para períodos de onda mais pequenos, o que poderá indicar uma influência do comprimento de onda no *sloshing*. Tal acontecimento foi verificado por Ramalhaís (2011) que reforça a ideia de que o nível de agitação na câmara é directamente proporcional à relação entre o comprimento de onda e a dimensão da CAO. Constata-se também que o valor máximo de *sloshing* se verifica quando ocorre a frequência de ressonância.

A potência pneumática média na conduta em função do período de onda incidente é representada na figura 5.26 (D). Observa-se que existe um pico de potência pneumática máxima para o período $T = 6s$, com um valor aproximado de 1930W. Este corresponde ao período onde o factor de amplificação é máximo. Existe assim uma forte relação entre o período que maximiza o factor de amplificação e a potência pneumática. Para períodos de onda superiores a $T = 6s$, a potência pneumática decresce, atingindo valores na ordem dos 900W no intervalo entre os períodos $T = 9s$ e $T = 11s$, seguindo-se uma ligeira subida em $T = 12s$ e novo decréscimo.

5.6. Análise comparativa das diferentes configurações

Nesta secção do trabalho irá ser feita uma análise comparativa entre as configurações de CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina, tendo em conta os estudos efectuados nas três secções anteriores.

A figura 5.27 apresenta a variação do factor de amplificação (H/H_0), da fase angular e do *sloshing*, em função da amplitude de onda incidente para CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina, com característica $K_{Si} = 50 Pa \cdot s/m^3$.

Analisando a figura 5.27 (A), é possível observar que o factor de amplificação para o modelo de dispositivo que mais se aproxima da realidade, CAO fechada com conduta e modelo de turbina, é um pouco menor do que nas restantes configurações e cerca de 2% inferior ao modelo de CAO aberta para as três amplitudes de onda incidente. Constata-se também que, para as três configurações, o intervalo do factor de amplificação entre a amplitude 0,3m e 0,6m é metade do que no intervalo de 0,6m e 1,0m, o que significa que quando aumenta a altura de onda, a diferença de altura entre a onda incidente e a elevação média da superfície livre na CAO decresce duas vezes mais. Verifica-se que o modelo numérico reproduz correctamente as tendências esperadas para a variação do factor de amplificação com a configuração do dispositivo, à semelhança do estudo realizado por Ramalhaís (2011), pois à

medida que a configuração do dispositivo induz uma perda de carga maior, a altura de elevação de superfície livre na CAO reduz-se, em relação à altura de onda incidente.

A diferença de fase entre a onda fora e dentro da CAO é representada na figura 5.27 (B) em função da amplitude de onda incidente. É possível verificar que os valores para as configurações de CAO aberta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina são praticamente iguais para todas as amplitudes. Verifica-se que no modelo de CAO fechada com conduta para amplitude 0,3m, a diferença de fase é maior do que nas demais configurações, e à medida que a amplitude aumenta, acentua-se essa diferença de forma contínua. Por seu lado, nas configurações de CAO aberta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina essa diferença também se acentua, no entanto tem tendência a estabilizar no regime de fase no intervalo de amplitudes 0,6m e 1,0m.

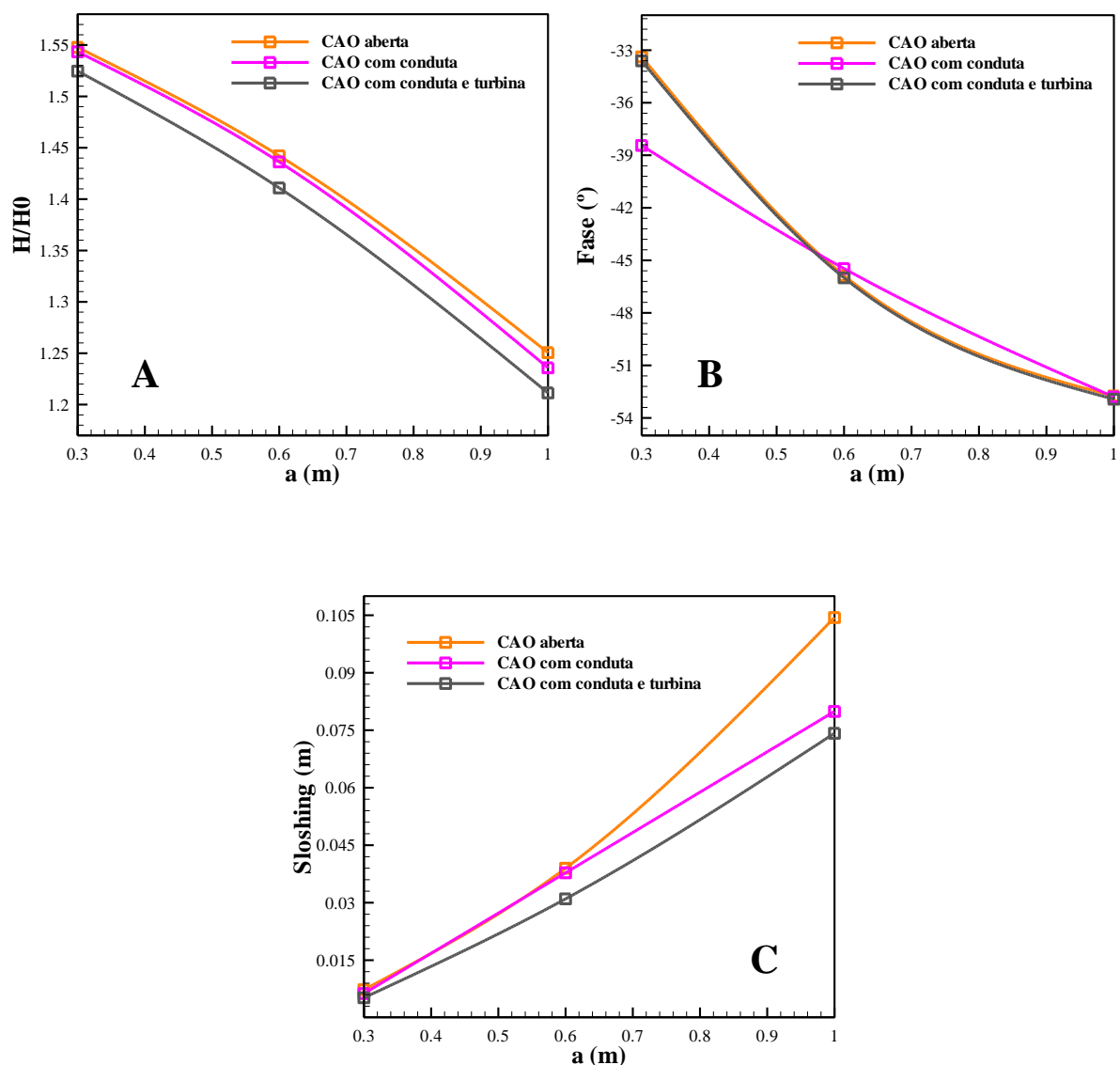


Figura 5.27 - Variação do factor de amplificação (H/H_0) (A), fase (B) e sloshing (C), em função da amplitude de onda incidente para CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina

Na figura 5.27 (C) é representado o *sloshing* na CAO. É possível constatar que, para as três configurações, a agitação na CAO é praticamente inexistente para uma amplitude de 0,3m. À medida que aumenta a amplitude de onda incidente, amplifica-se o valor do *sloshing* atingindo o seu nível máximo para CAO aberta. Verifica-se assim que as introduções de perda de carga associadas à configuração do dispositivo diminuem a agitação da superfície livre na CAO, devido à sobrepressão que se faz sentir na câmara e que provoca uma diminuição da velocidade ascendente da superfície livre.

A figura 5.28 apresenta a série de temporal de elevação média de superfície livre para CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina, com característica $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$ e amplitude de onda incidente $a = 1,0m$.

Analisando a figura 5.28, é possível constatar que não se verificam alterações na elevação da superfície livre. À medida que a configuração do dispositivo induz uma perda de carga maior, a elevação de superfície livre mantém-se tanto em crista como em cava. Verifica-se que em crista, os valores da altura são três vezes superiores aos valores de altura de onda incidente. O mesmo se verifica na cava, no entanto, os valores são duas vezes maiores. Na cava é possível observar um ligeiro intervalo de estagnação no movimento ascendente de elevação da superfície livre, onde quase se forma uma segunda frequência, que se deve ao efeito de difracção da superfície do fundo. Este efeito manifesta-se independentemente das restrições à saída do ar impostas pela conduta e pelo modelo de turbina.

As figuras 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam as séries de temporais de velocidade, pressão média na CAO e caudal respectivamente, para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina, com característica $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$ e amplitude de onda incidente $a = 1,0m$.

Examinando as figuras 5.29 e 5.31, verifica-se que a velocidade e o caudal têm comportamentos muito semelhantes, onde os valores são maiores em admissão do que em escape, e não sofrem alterações quando à configuração de CAO fechada com conduta se adiciona o modelo de turbina. Pode observar-se também a uma oscilação de velocidade e caudal no intervalo de compressão. Este acontecimento surge devido ao efeito de difracção da superfície do fundo, que provoca uma interrupção no movimento ascendente da superfície livre e conseqüentemente no fluxo de ar que passa pela conduta.

A figura 5.30 representa a série temporal da pressão média na CAO. Verifica-se que em sobrepressão os valores da pressão são maiores para a configuração de CAO fechada com conduta e modelo de turbina. Por outro lado, em depressão, os valores em módulo são maiores para a configuração de CAO fechada com conduta. Tal como verificado por Ramalhaís (2011), isto deve-se ao facto de, em escape, o modelo de turbina constituir um impedimento à saída de ar dentro da coluna de água, o que leva a um aumento de pressão no seu interior e por outro lado, em admissão, o mesmo modelo de turbina impede que entre ar dentro da CAO, o que resulta numa depressão menor no seu interior. É também possível observar os problemas de resolução numérica que produzem perturbações de pressão principalmente na configuração de CAO fechada com conduta. Com a introdução da perda de carga associada ao modelo de turbina é possível verificar uma diminuição das perturbações, permitindo estabilizar a pressão.

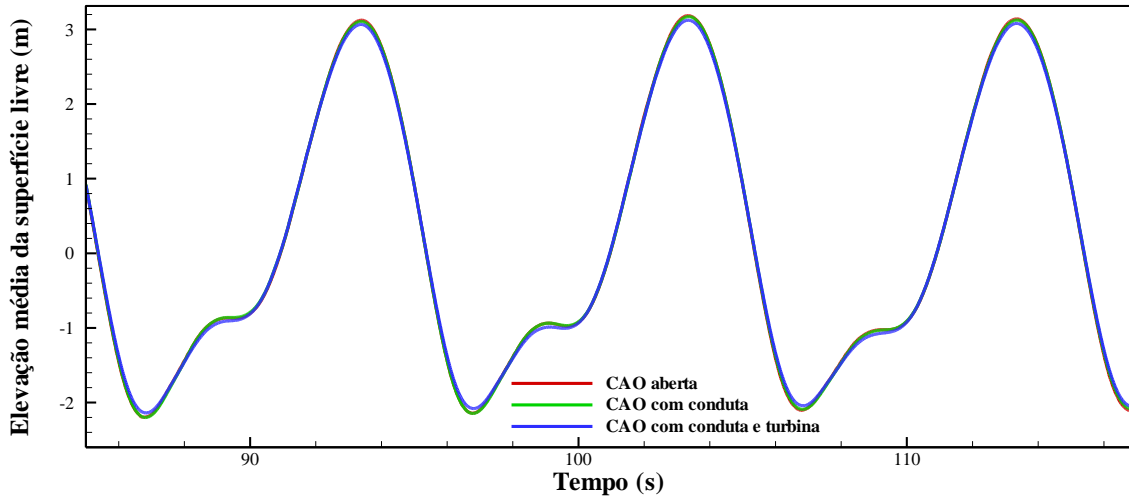


Figura 5.28 - Série de temporal de elevação de superfície livre para CAO aberta, CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$), para $a = 1.0m$

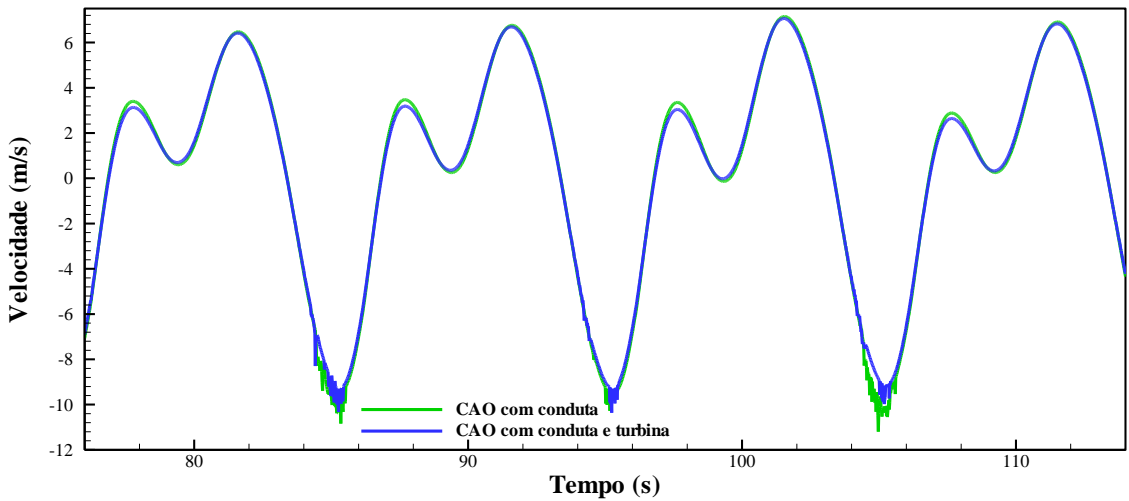


Figura 5.29 - Série de temporal de velocidade para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$), para $a = 1.0m$

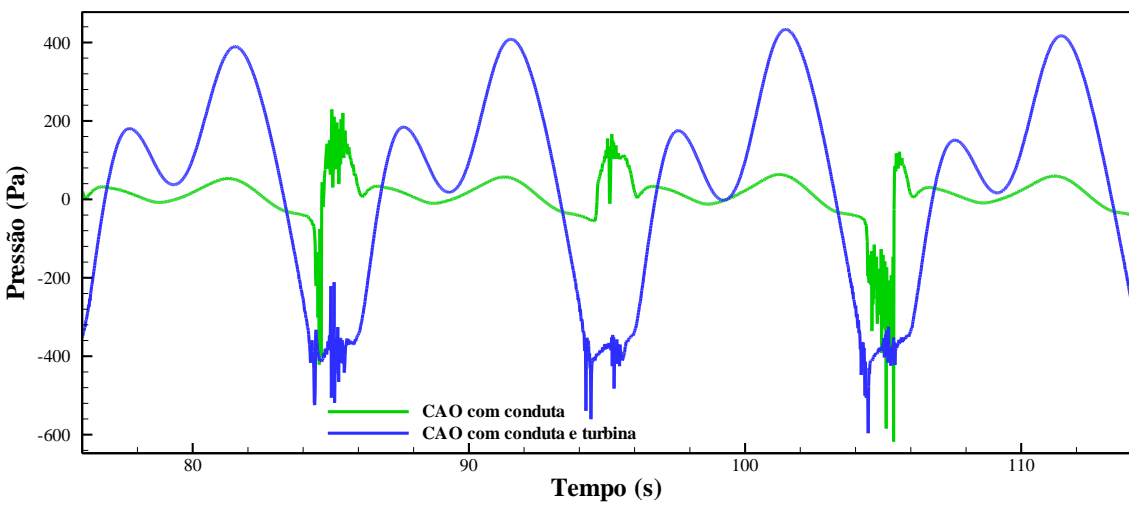


Figura 5.30 - Série de temporal de pressão para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$), para $a = 1.0m$

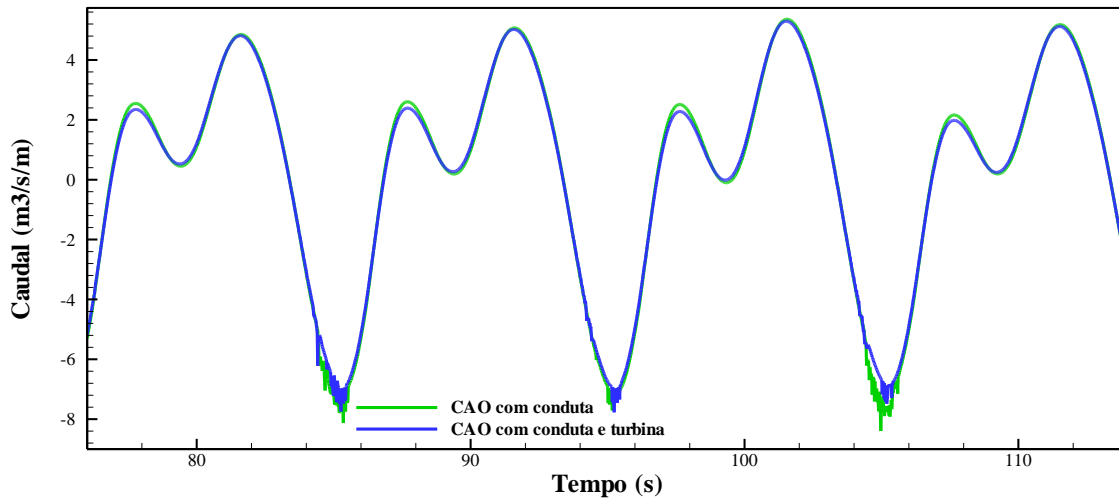


Figura 5.31 - Série de temporal de caudal para CAO fechada com conduta e CAO fechada com conduta e modelo de turbina ($K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$), para $a = 1.0m$

5.7. Otimização do modelo de turbina

Nesta secção irá ser apresentada uma aplicação concreta do modelo CFD desenvolvido, onde se pretende potencializar o dispositivo de aproveitamento das ondas, determinando as características da turbina que permitem obter a potência pneumática máxima para a configuração de CAO apresentada na figura 5.7. Deste modo, simular-se á uma onda com um período $T = 10s$, um comprimento $L = 92,4m$ e uma amplitude $a = 1,0m$, fazendo-se variar a característica de turbina para valores de $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$, $K_{si} = 200 Pa \cdot s/m^3$ e $K_{si} = 400 Pa \cdot s/m^3$.

As figuras 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam as séries de temporais de elevação média de superfície livre, pressão média na CAO, caudal e potência pneumática na conduta respectivamente, para as características de turbina $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$, $K_{si} = 200 Pa \cdot s/m^3$ e $K_{si} = 400 Pa \cdot s/m^3$.

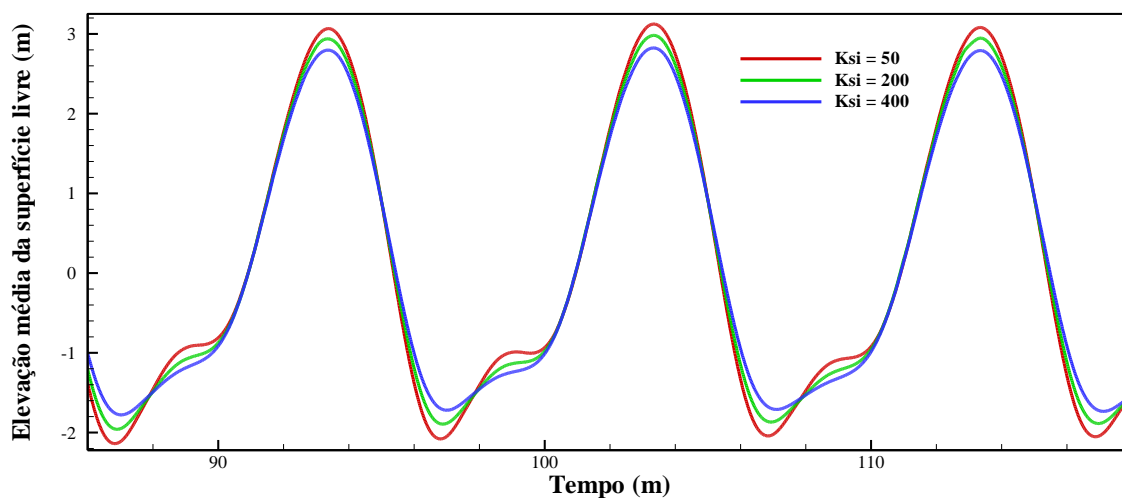


Figura 5.32 – Série temporal de elevação de superfície livre para característica de turbina $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$, $K_{si} = 200 Pa \cdot s/m^3$ e $K_{si} = 400 Pa \cdot s/m^3$

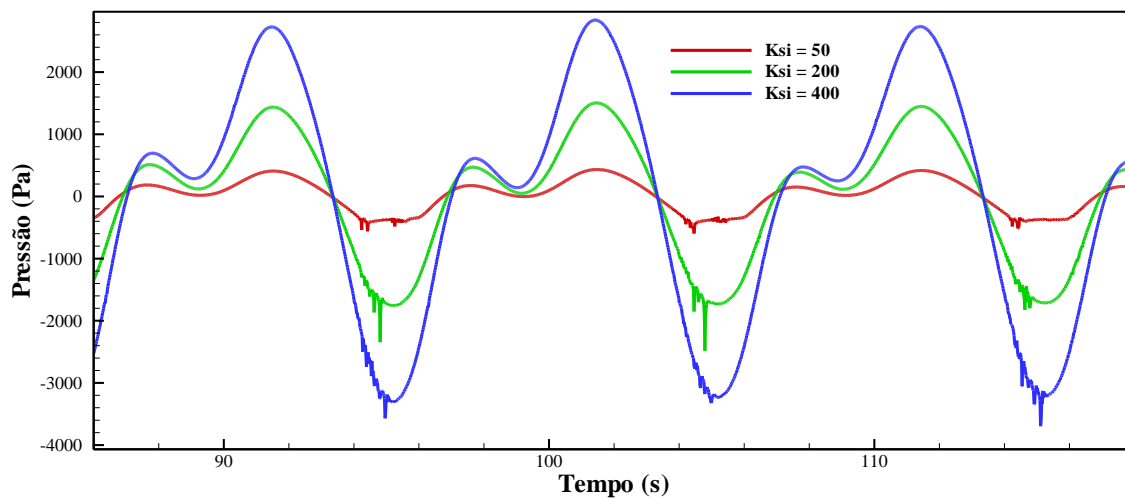


Figura 5.33 - Série temporal de pressão para característica de turbina $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$, $K_{si} = 200 Pa \cdot s/m^3$ e $K_{si} = 400 Pa \cdot s/m^3$

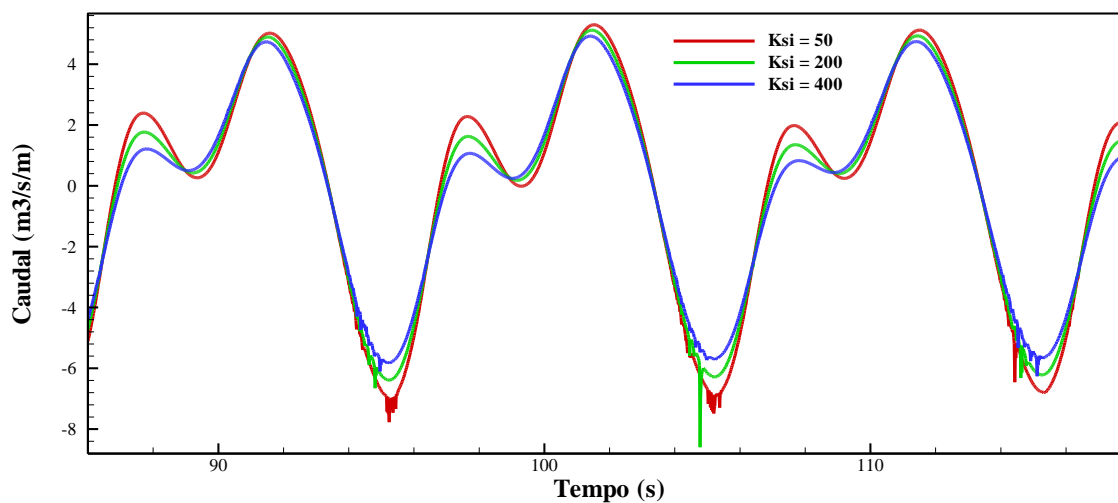


Figura 5.34 - Série temporal de caudal para característica de turbina $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$, $K_{si} = 200 Pa \cdot s/m^3$ e $K_{si} = 400 Pa \cdot s/m^3$

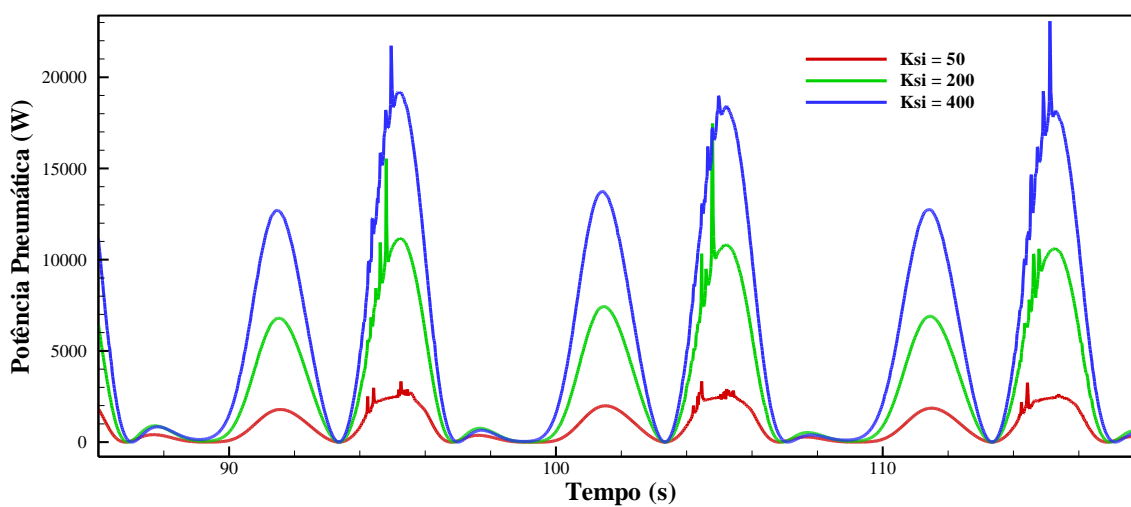


Figura 5.35 - Série temporal de potência pneumática para característica de turbina $K_{si} = 50 Pa \cdot s/m^3$, $K_{si} = 200 Pa \cdot s/m^3$ e $K_{si} = 400 Pa \cdot s/m^3$

Na figura 5.32, observa-se uma pequena redução da elevação da superfície livre à medida que aumenta a característica da turbina. Ao ampliar o valor de Ksi , aumenta a perda de carga que induz uma sobrepressão mais elevada na câmara e dificulta a saída de ar pela conduta, reflectindo-se numa diminuição da elevação da superfície livre. Consta-se que os valores em crista são maiores do que em cava. Verifica-se também o efeito de difracção da superfície do fundo na cava, que se revela, independentemente do aumento da característica da turbina e provoca um intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre.

A figura 5.33 apresenta a série temporal de pressão média na CAO. Observa-se um acréscimo da pressão consoante o aumento da característica da turbina. Verifica-se que em sobrepressão ocorre uma oscilação, formando dois picos de pressão que surgem devido ao intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre. Consta-se que os valores da pressão em módulo são maiores em depressão do que em sobrepressão.

Ao analisar a figura 5.34, verifica-se que o aumento da característica da turbina diminui ligeiramente o caudal escoado na conduta, como seria de esperar, devido aos constrangimentos no fluxo de ar provocados pelo aumento da perda de carga. Essa diminuição manifesta-se apenas no primeiro pico de escape e em admissão, sendo que no segundo pico de escape, o caudal é praticamente o mesmo para as três características de turbina. De salientar que existem dois picos de escape devido ao intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre, que provoca uma oscilação na libertação de ar para o exterior da CAO.

Na figura 5.35, é possível observar um acréscimo da potência pneumática com o aumento da característica da turbina, atingindo valores máximos na ordem dos 2430W, 10440W e 22680W para $Ksi = 50 Pa.s/m^3$, $Ksi = 200 Pa.s/m^3$ e $Ksi = 400 Pa.s/m^3$ respectivamente, sendo que esta última atinge claramente os regimes de maior potência. Observa-se também que para as três características de turbina, a potência varie entre três picos sucessivos com ordem crescente de valores. Os dois primeiros coincidem com os dois picos, tanto de pressão como de caudal máximos, que sucedem quando o dispositivo se encontra em escape. O terceiro pico é o que reflecte a potência pneumática máxima e é concordante com a pressão e caudal máximos em módulo, que ocorrem quando o dispositivo se encontra em admissão.

A figura 5.36 apresenta a variação do factor de amplificação ($H/H0$) e da potência pneumática média na conduta, em função da característica da turbina. A potência pneumática máxima é obtida para uma característica da turbina $Ksi = 400 Pa.s/m^3$, com um valor de 5747W. Verifica-se que para este valor de potência pneumática média máxima, o factor de amplificação é mínimo, tomando um valor de aproximadamente 1, o que mostra uma igualdade de alturas, tanto na CAO como de onda incidente, devido à forte sobrepressão que se faz sentir na câmara. Por outro lado, o valor de potência pneumática mínima corresponde ao factor de amplificação máximo, indicando que uma diminuição da potência pneumática e consequentemente da pressão, potencia o aumento do factor de amplificação. Verifica-se deste modo que, dentro dos valores de característica da turbina considerados, o que permite obter a maior potencia média é $Ksi = 400 Pa.s/m^3$.

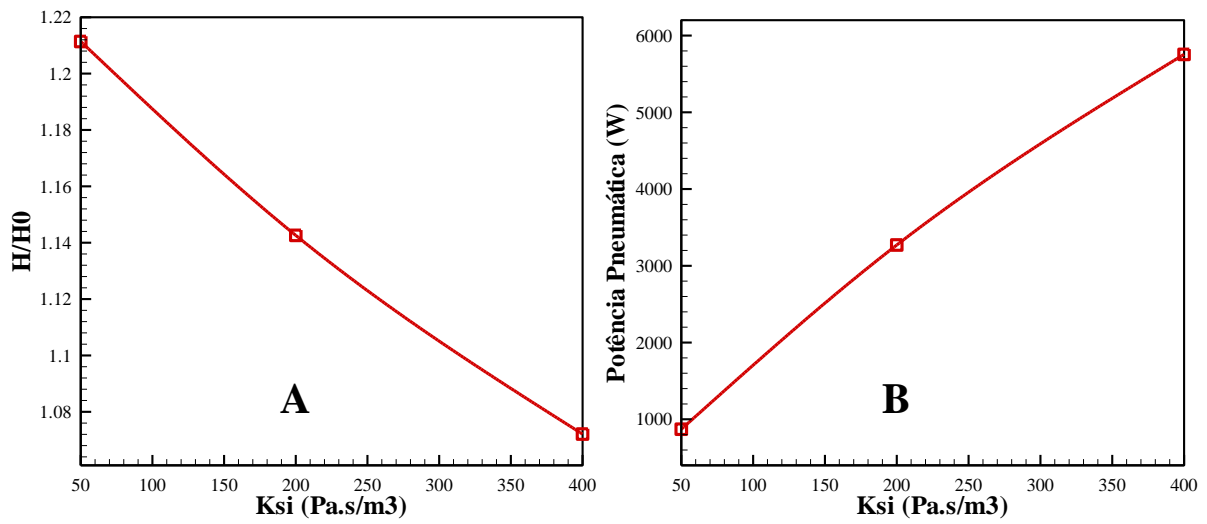


Figura 5.36 – Variação do factor de amplificação H/H_0 (A) e da potência pneumática (B), em função da característica da turbina (Ksi)

Capítulo 6

Conclusões

O estudo desenvolvido nesta dissertação centrou-se essencialmente na análise de vários modelos numéricos de captura de superfície livre. O modelo numérico que melhores resultados demonstrou na simulação do escoamento de uma onda em propagação e rebentação, foi posteriormente aplicado a um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante.

Numa fase preliminar, foi feita uma pesquisa bibliográfica na qual foi possível adquirir conhecimentos inerentes ao funcionamento do dispositivo CAO, bem como da Teoria Linear das Ondas.

Para a primeira fase de estudo foi considerada uma estrutura costeira, onde foi simulado não só a propagação como também a rebentação das ondas, de modo a encontrar o esquema adequado ao caso de estudo. Foi feita uma análise qualitativa e quantitativa da difusão numérica associada a vários modelos. A análise teve como base o modelo de referência utilizado na secção de mecânica dos fluidos do DEMI da FCT-UNL, que permite modelar com precisão a propagação das ondas, mas que por divergência do solver, não permite a modelação da rebentação.

Foram simulados dezasseis casos que correspondem a alterações ao modelo de referência ao nível dos esquemas VoF, integração no tempo e de acoplamento entre velocidade e pressão. Foi verificada a convergência da simulação em cinco modelos, onde se procedeu à análise da difusão numérica da fracção de volume. Ao realizar o estudo qualitativo, constatou-se que o modelo multifásico do VoF Explícito obtém melhores resultados que o modelo Implícito. O esquema *Geo-Reconstruct* não obteve êxito utilizando o passo de tempo fixo. No entanto, para um passo de tempo variável, obteve-se com este esquema um resultado bastante favorável, revelando um nível de dispersão da interface água/ar muito reduzida. O CICSAM, por beneficiar da capacidade de diferenciação de alta resolução, permitiu produzir um bom nível de precisão.

Procedeu-se à aplicação dos modelos que convergiram, na propagação de uma onda regular num canal com um fundo horizontal. Os modelos foram submetidos a uma análise quantitativa, onde se realizou a estimativa do erro associado à elevação de superfície livre, tendo como base de comparação o modelo de referência. Recorrendo à análise dos diagramas de elevação de superfície livre, e calculada a média das cristas, foi determinado o erro associado, verificando-se que o caso 2113 foi o que ofereceu melhor precisão, apresentando o menor erro em relação aos restantes casos. Este caso aplica o modelo multifásico do VoF Explícito, o algoritmo SIMPLEC no acoplamento entre velocidade e pressão, o esquema *Third-Order MUSCL* de discretização e o esquema CICSAM de reconstrução, sendo este o que melhor simula a superfície livre no escoamento da propagação e rebentação de uma onda, em relação ao caso de referência.

Numa fase posterior, o modelo numérico sugerido foi aplicado ao dispositivo CAO, tendo em conta os fenómenos associados à interacção das ondas com a estrutura e o fundo. Foi feito o estudo numérico 2D de um canal e geometria do dispositivo CAO fixa, onde se efectuou a análise comparativa entre os dados dos vários parâmetros obtidos nas simulações efectuadas, variando-se o estado do mar em função da amplitude de onda incidente para valores de 0,3m, 0,6m e 1,0m, com um período $T = 10s$ e

um comprimento $L = 92,4\text{m}$. Foi imposto um modelo de turbina linear, cujo valor da característica de turbina foi $K_{si} = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$.

Verificou-se que o aumento da amplitude de onda incidente estimula o decréscimo do factor de amplificação, ou seja, a elevação de superfície livre dentro da CAO diminui em relação à altura de onda incidente. Existe também um agravamento do *sloshing* com o aumento da amplitude, mas em contrapartida, o aumento da perda de carga associada à implementação da conduta e da introdução da turbina, diminuem a agitação na CAO.

Observa-se que à medida que a amplitude aumenta, surge na cava um ligeiro intervalo de estagnação no movimento ascendente da superfície livre, onde se forma quase uma segunda frequência, devido ao efeito de difracção proveniente da interacção entre a onda incidente e a superfície de fundo. Este efeito manifesta-se, independentemente das restrições impostas pela conduta e pela turbina.

O efeito de difracção induzido pelo fundo variável influencia também o comportamento da pressão e do caudal, uma vez que provoca picos de oscilação em sobrepressão e em escape, e que se reflecte consequentemente na potência pneumática, aumentando a formação de picos e diminuindo a potência. Observa-se também que existe uma forte relação entre o período que maximiza o factor de amplificação e a potência pneumática.

Ao proceder à variação da característica da turbina no sentido do seu crescimento para valores de $K_{si} = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$, $K_{si} = 200 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ e $K_{si} = 400 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$, verifica-se um aumento da pressão e um ligeiro decréscimo do caudal. Observa-se também que, ao alterar a característica da turbina, o valor máximo do factor de amplificação corresponde ao valor mínimo da potência pneumática, indicando que a potência pneumática é potenciada pela diminuição do factor de amplificação.

Foi possível observar ao longo do trabalho, alguns problemas de resolução numérica para a amplitude de onda de 1,0m que originam instabilidades de pressão. As causas de tais problemas não foram identificadas, mas poderão eventualmente advir de uma falta de resolução que resulta de um número insuficiente de iterações não lineares para a resolução correcta do escoamento do ar na câmara. Verificou-se também que a introdução de uma perda de carga associada ao modelo de turbina permite estabilizar as perturbações de pressão.

No que respeita a desenvolvimentos futuros propõe-se conduzir o estudo para uma modelação em 3D, de forma a garantir resultados com maior aproximação à realidade. Propõe-se também aumentar o número de iterações não lineares de forma a resolver os problemas de resolução numérica que originam instabilidades de pressão. Estes problemas também se manifestaram em simulações 3D efectuadas no âmbito desta dissertação, mas que não foram apresentadas neste documento por inabilidade na resolução da convergência.

Seria também interessante modificar a geometria do fundo da CAO, introduzindo um ângulo de inclinação da superfície, para poder avaliar a influência que produz na diminuição do efeito de difracção da superfície do fundo que se faz sentir no movimento ascendente da superfície livre na CAO. Outra sugestão que poderia ser efectuada, seria o melhoramento da geometria do dispositivo no que diz respeito à eliminação de vértices, através da introdução de raios de curvatura, não só à entrada da secção imersa da CAO, como também na união entre a câmara e a conduta, a fim de reduzir a formação de vórtices.

Referências Bibliográficas

- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics - The Basics with Applications*. McGraw-Hill, Inc.
- Barreiro, T. G. (2009). *Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia*. Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier.
- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., et al. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6. Elsevier Science Ltd.
- Conde, J. M., Teixeira, P. R., & Didier, E. (2009). Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos. *Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*. Las Palmas de Gran Canaria.
- Cruz, J. M., & Sarmiento, A. J. (2004). *Energia das Ondas: Introdução aos aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*. Lisboa: Instituto do Ambiente.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific Publishing Co.
- Demirbilek, Z., & Vincent, C. L. (2008). *Water wave mechanics*. United States Army Corps of Engineers.
- Didier, E., Conde, J. P., & Teixeira, P. R. (2011). Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter with and without damping. *Proc. MARINE 2011 - Computational Methods in Marine Engineering IV*. Lisboa.
- Didier, E., Neves, M. G., & Gil, L. (2007). Modelação numérica da interação entre uma onda e uma estrutura marginal costeira porosa. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Lisboa, Portugal.
- Enciso, Y. T., Ortubia, I., Aguilera, L. I., & Marqués, J. (2009). Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. *8th European Wave and Tidal Energy Conference*. Uppsala.
- Falcão, A. (2009). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14. Elsevier Ltd.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- Fluent Inc. (2006). *FLUENT 6.3 User's Guide*.
- Gil, L., Barreiro, T., Didier, E., & Alves, M. (2009). Estudo numérico não linear da interação onda cilindro. *Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Funchal - Madeira, Portugal.

- Hong, K., Shin, S., Hong, D., Choi, H., & Hong, S. (2007). Effects of shape parameters of OWC chamber in wave energy absorption. *7th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Lisboa.
- Iglesias, G., & Carballo, R. (2010). Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay. Elsevier Ltd.
- Le Crom, I., Brito-Melo, A., Neumann, F., & Sarmiento, A. (2009). Numerical estimation of incident wave parameters based on the air pressure measurements in Pico OWC plant. *8th European Wave and Tidal Energy Conference*. Uppsala.
- Le Méhauté, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer - Verlag.
- Liu, Z., Shi, H., & Hyun, B.-S. (2009). Preactical design and investigation of the breakwater OWC facility in China. *8th European Wave and Tidal Energy Conference*. Uppsala.
- Paixão Conde, J. M., Gato, L. M., & Gomes, R. P. (2007). Estudo numérico de uma turbina axial auto-rectificadora de acção para aplicação em centrais de energia das ondas. *8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*. Cusco.
- Phelps, J. (26 de Setembro de 2011). *Metaefficient, the guide to efficient living*. Obtido em 11 de Novembro de 2011, de Metaefficient: <http://www.metaefficient.com/news/worlds-first-wave-energy-power-plant-opens-in-spain.html>
- Ramalhaís, R. (2011). *Estudo numérico de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Ramalhais, R., & Didier, E. (2010). Modelação numérica de um dispositivo conversor de energia de onda de tipo Coluna de Água Oscilante. *Jornadas do Mar 2010*. Almada.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*. Longman Scientific & Technical.
- Wang, D. J., Katory, M., & Li, Y. S. (2001). Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performances of onshore wave-power devices. Elsevier Science Ltd.