

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO E DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DE
DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA
OSCILANTE

por

Lucas Amaral Gaspar

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, abril, 2018

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO E DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DE
DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA
OSCILANTE

Por

Lucas Amaral Gaspar
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Marítima

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Eric Didier

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Liércio André Isoldi	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Jeferson Avila Souza	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Ivoni Carlos Acunha Júnior	IFRS

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 4 de abril de 2018

AGRADECIMENTOS

- à FURG, sem a qual este trabalho não seria possível;
- ao PPGEO, pela oferta do curso à nível de mestrado na área de engenharia oceânica;
- à CAPES, pelo fornecimento de bolsa demanda social;
- ao meu orientador, Dr. Paulo Teixeira, por aceitar minha orientação e possibilitar esta oportunidade de aprendizado e crescimento;
- ao meu coorientador, Dr. Eric Didier pelo apoio indispensável neste trabalho, elaborando as UDFs utilizadas nas simulações deste trabalho
- aos meus pais, que sempre estimularam e deram apoio na busca e conquista de desafios;
- aos meus avós, pela agradável estadia na cidade de Rio Grande;
- e aos meus colegas de laboratório, pelos momentos de descontração e o auxílio que me prestaram durante a elaboração desta dissertação.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma análise numérica do comportamento e dos balanços energéticos dos escoamentos envolvidos na conversão de energia das ondas de três dispositivos de conversão do tipo coluna de água oscilante (CAO) *onshore* de geometrias diferentes. O caso A é baseado na geometria da planta de Pico (Açores, Portugal); o caso B tem suas paredes com uma inclinação constante e igual a da planta do LIMPET (Isley, Escócia); o caso C tem geometria similar a do LIMPET, no qual a parte submersa de sua parede frontal tem inclinação com ângulo diferente da parte emersa. Os dispositivos têm tanto o comprimento quanto a largura de 10 m e estão colocados no final de um canal numérico bidimensional de 10 m de profundidade. Nas câmaras, são considerados os efeitos da turbina do tipo Wells, com uma relação característica de 50 Pa s m^{-3} . São simulados casos com diferentes ondas incidentes de períodos de 6 a 12 s e alturas de 1.0 a 2.5 m, através do modelo FLUENT, que aplica a técnica dos volumes finitos nas equações de Navier-Stokes. O método *Volume of Fluid (VOF)* é usado para levar em conta o escoamento multifásico. São analisados comportamentos gerais do escoamento ao redor do CAO, incluindo *run up/down* na parede frontal e *sloshing* dentro da câmara. Pela lei da conservação de energia, a energia de onda incidente é dividida em energia aproveitada (energia pneumática) ou rejeitada (energia refletida, perdas viscosas, perdas por turbulência) nas saídas (turbina, perdas). O caso A apresentou uma eficiência mais homogênea ao longo do período de onda, ao contrário dos casos B e C, sendo muito superior no período de 6 s (em média 1.8 vezes mais eficiente que o segundo colocado, caso C). Nos períodos de 9 e 12 s, os casos B e C foram superiores, o caso B apresentou a melhor eficiência, média de 54%, enquanto que os casos A e C apresentaram 43% e 51%, respectivamente. A eficiência máxima ocorreu para o caso B de 66% em 9 s. Foi observada em todos os casos a existência de um balanço entre as perdas energéticas e a reflexão de energia relativa à energia incidente, sendo as perdas energéticas maiores no período de 6 s e a reflexão de energia maior no período de 12 s. Os níveis máximos de *run up/down* e de elevação de superfície dentro da câmara são significativamente maiores nos casos B e C, exigindo uma maior submersão da parede frontal e um maior cuidado com a proteção do sistema da turbina da câmara em relação ao caso A. De forma geral, este tipo de análise se mostrou eficaz para identificar o comportamento das diferentes geometrias e promover melhorias de projeto nos dispositivos CAO.

Palavras-chaves: CAO, cadeia energética, geometria, Pico, LIMPET.

ABSTRACT

In this work, a numerical analysis of the flow and energetic balances involved in the conversion of three onshore oscillating water column (OWC) wave energy conversion devices of different geometries are presented. Case A is based on the geometry of the Pico plant (Azores, Portugal); Case B has its walls inclined with an even angle equal to the main slope of the LIMPET plant (Isley, Scotland); Case C has similar geometry to that of LIMPET, in which the submerged part of its front wall has different inclination from the emerged part. The devices have both length and width of 10 m and are placed at the end of a two-dimensional numeric tank 10 m deep. The effects of the Wells type turbine with a characteristic ratio of 50 Pa s m^{-3} are considered in the chambers. Simulations are conducted with different incident waves from periods of 6 to 12 s and wave heights of 1.0 to 2.5 m, using the FLUENT model, which applies the finite volume technique in the Navier-Stokes equations. The Volume of Fluid (*VOF*) method is used to take into account biphasic flow. General behavior of the flow around the OWC is analyzed, including run up/down on the front wall and sloshing inside the chamber. By energy conservation law, the incident wave energy is divided into useful energy (pneumatic energy) or rejected (reflected energy, viscous losses, turbulent losses) at the outputs (turbine, losses). Case A showed a more uniform efficiency over the wave period, in contradiction to cases B and C, reaching much higher values over the other cases in the 6 s period (on average 1.8 times more efficient than case C, placed second). For wave periods of 9 and 12 s, case B presented the highest efficiency, average of 54%, whilst cases A and C presented 43% and 51%, respectively. The maximum efficiency occurs for case B of 66%, on 9 s. It was observed for all cases the existence of a balance between the lost and the reflected energy relative to the incident energy, where the lost energy was greater in the 6 s wave period while the reflected energy was greater in the 12 s wave period. The maximum levels of run up/down and surface elevation inside the chamber are significantly higher in cases B and C, which demands a deeper submersion of the front wall and greater caution in regards of turbine protection systems when compared with case A. In general terms, the applied methodology is an effective approach for identifying the hydrodynamic behavior of the different geometries and helps promote design improvements on the OWC design.

Keywords: OWC, energy balance, geometry, Pico, LIMPET

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Atividade humana e meio ambiente	1
1.2. Incidência da energia das ondas	5
1.3. Objetivos.....	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1. Mecânica das Ondas	12
2.1.1. Energia de uma onda.....	20
2.1.2. Reflexão de Ondas	20
2.1.3. Separação de um espectro de ondas.....	22
2.2. Dispositivos de conversão de energia das ondas	23
2.2.1. Dispositivo de coluna de água oscilante (CAO).....	24
2.2.2. Sistema de Corpos Oscilantes.....	26
2.2.3. Dispositivos de Galgamento	26
2.3. Estado da Arte	27
2.4. Aplicação de <i>RANS-VOF</i> à simulação de ondas	35
3. METODOLOGIA	38
3.1. Modelo Numérico.....	39
3.2. Procedimentos gerais de aquisição de dados e avaliação da cadeia energética.....	41
3.3. Aplicação de <i>User Defined Functions</i> no modelo numérico.....	45
3.4. Discretização	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1. Comportamento Hidrodinâmico para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.....	51
4.2. Interações onda-estrutura externas à câmara	57
4.2.1. Reflexão da onda	57
4.2.2. Run up e Run down	61
4.3. Interações onda-estrutura dentro da câmara	64
4.3.1. Hidrodinâmica	64
4.3.2. Aerodinâmica.....	71
4.4. Cadeia de energia dos dispositivos CAO	76
4.4.1. E_R (Energia refletida).....	76
4.4.2. E_L (Energia perdida)	77

4.4.3.	E_P (Energia pneumática).....	78
4.4.4.	Reflexão de energia relativa (E_R/E_I)	79
4.4.5.	Eficiência geral (E_P/E_I).....	80
4.4.6.	Perda energética relativa (E_I/E_I).....	81
4.5.	Discussão Final.....	82
5.	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A.....	99
	APÊNDICE B.....	100
	APÊNDICE C.....	101
	APÊNDICE D.....	102
	APÊNDICE E.....	103
	APÊNDICE F.....	104
	APÊNDICE G.....	105
	APÊNDICE H.....	106
	APÊNDICE I.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz energética global em energia primária no ano 2008 (total de 492 EJ). Fonte: Adaptado de Edenhofer et al., 2012.	4
Figura 1.2 - Matriz energética global de produção elétrica em energia primária no ano 2008. Fonte: Adaptado de Edenhofer et al., 2012.	4
Figura 1.3 - Estimativas anuais da potência média anual de onda em kW/m (dados do arquivo do modelo WAM do ECMWF, calibrados e corrigidos pelo Fugro OCEANOR contra uma base de dados global de boias e do satélite altímetro Topex). Fonte: Barstow & Mørk, apud Cruz, 2008.	8
Figura 1.4 - a) Relação entre o mínimo das estimativas mensais de energia das ondas e a média anual (dados do arquivo do modelo WAM do ECMWF. b) Mapa da razão da altura da onda significativa em 100 anos sobre a altura média. Dados do arquivo do modelo WAM do ECMWF, calibrado e corrigido por Fugro OCEANOR contra um banco de dados global de boias e satélite altimétrico Topex. Fonte: Barstow & Mørk, apud Cruz, 2008.	9
Figura 2.1 – (a) Visualização esquemática de uma onda com algumas notações, adaptado de McCormick, 1973. (b) Movimento orbital das partículas de água em uma onda progressiva. Adaptado de Garrison, 2009.	13
Figura 2.2 - Tipos de ondas de acordo com a força geradora, restauradora e período. Fonte: Garrison, 2009 apud Lisboa, 2016 (tradução).....	14
Figura 2.3 - Problema de valor de contorno que descreve uma onda se propagando pela água. Fonte: Dean & Dalrymple, 1984 apud Lisboa, 2016 (tradução).	15
Figura 2.4 - Envelope formado pelos pontos de maior amplitude durante um regime de onda quase estacionário. Adaptado de Dean & Dalrymple, 1984.	21
Figura 2.5 - Classificação de WECs baseada no princípio de conversão. Adaptado de: Falcão, 2010.	24
Figura 2.6 - Exemplos de CAO. a) LIMPET (QUB, 2002). b) Pico (FALCÃO, 2000). c) Esquema do tubo curvado para trás, tecnologia desenvolvida por Yoshio Masuda (FALCÃO, 2010).	25
Figura 2.7 - a) Dispositivo de galgamento Wave Dragon. Fonte: Falcão (2009) apud Torres, 2015. b) Esquema da planta Tapchan (Falcão, 2010, tradução).	27
Figura 2.8 - Diagrama da cadeia energética segundo Tseng et al. (2000).	31

Figura 2.9 - Diagrama da cadeia energética no volume de controle segundo Folley e Whittaker (2002).	31
Figura 2.10 - Cadeia energética de um CAO onshore, adaptado de Elhanafi et al. (2016).	33
Figura 2.11 - Cadeia energética para um dispositivo CAO, adaptado de Fleming et al. (2012). Linhas tracejadas representam relações em que se espera menor conteúdo de energia.	33
Figura 2.12 – Cadeia energética de um CAO onshore conforme utilizada na metodologia aplicada.	34
Figura 3.1 - Dispositivos do tipo CAO. a) caso A: forma do Pico, b) caso B: forma simplificada do LIMPET, c) caso C: forma do LIMPET.	39
Figura 3.2 - Esquema das condições de contorno do domínio computacional.	40
Figura 3.3 – Sondas utilizadas na câmara dos dispositivos para obtenção de dados de run up/down, sloshing e pressão. a) Caso A. b) Caso B. c) Caso C, sondas de run up/down e pressão.	43
Figura 3.4 - Sondas usadas no cômputo do sloshing, caso C.	43
Figura 3.5 – Esquema de posicionamento das sondas de medição da elevação da SL para cálculo do CR e uso interno na absorção ativa das ondas refletidas.	45
Figura 3.6 – Construção da malha de volumes finitos. Exemplo: Caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	48
Figura 3.7 – Detalhe da malha de volumes finitos do caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	48
Figura 3.8 – Discretização da malha para o caso B. Observa-se a transição suave da inclinação das linhas verticais no início do canal e à 40° na parede frontal do CAO.	49
Figura 3.9 – Detalhe da discretização usada no caso B.	49
Figura 3.10 - Discretização da malha para o caso C. Observa-se a transição da inclinação das linhas da esquerda à direita dentro da câmara do CAO.	50
Figura 4.1 – Campo de módulos de velocidade e linhas de corrente sobre o CAO do caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.	52
Figura 4.2 – Campo de módulos de velocidade e linhas de corrente sobre o CAO do caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.	53
Figura 4.3 - Campo de módulos de velocidade e linhas de corrente sobre o CAO do caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.	55
Figura 4.4 – Sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, para o caso A, em $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	57
Figura 4.5 – Transformada de Fourier dos sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	58
Figura 4.6 – Reconstrução do sinal da sonda WP1, caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	58
Figura 4.7 - Sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, para o caso B, em $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	59

Figura 4.8 - Transformada de Fourier dos sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	59
Figura 4.9 - Reconstrução do sinal da sonda WP1, caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	59
Figura 4.10 - Sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, para o caso C, em $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	60
Figura 4.11 - Transformada de Fourier dos sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	60
Figura 4.12 - Reconstrução do sinal da sonda WP1, caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	60
Figura 4.13 – Elevação da SL sobre a parede frontal dos equipamentos, casos A, B e C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	61
Figura 4.14 - Run up e run down ao longo da altura de onda incidente, caso a caso para $T = 6$ s.	62
Figura 4.15 - Run up e run down ao longo da altura de onda incidente, caso a caso para $T = 9$ s.	62
Figura 4.16 - Run up e run down ao longo da altura de onda incidente, caso a caso para $T = 12$ s.	63
Figura 4.17 - Run up e run down ao longo do período da onda incidente, caso a caso para $H = 1.0$ m.	63
Figura 4.18 - Run up e run down ao longo do período da onda incidente, caso a caso para $H = 2.5$ m.	64
Figura 4.19 – Série temporal da elevação média da coluna de água da câmara dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	65
Figura 4.20 – Distribuição da altura média H_C pela altura H e período T das ondas incidentes, para os casos A, B e C. Valores de H_C em m.	66
Figura 4.21 - Sinal temporal das elevações da SL dentro da câmara nas sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD. Caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	67
Figura 4.22 - Sinal temporal das elevações da SL dentro da câmara nas sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD. Caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	68
Figura 4.23 - Sinal temporal das elevações da SL dentro da câmara nas sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD. Caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	68
Figura 4.24 - Diferença entre a elevação da SL nos extremos da câmara, SCAOPD e SCAOPE, caso A, $H = 1.5$ m, $T = 9$ s.	68
Figura 4.25 – Distribuição do parâmetro de sloshing em relação à altura e ao período da onda incidente para o caso A.	69
Figura 4.26 - Distribuição do parâmetro de sloshing em relação à altura e ao período da onda incidente para o caso B.	70
Figura 4.27 - Distribuição do parâmetro de sloshing em relação à altura e ao período da onda incidente para o caso C.	71

Figura 4.28 - Vazão através da turbina dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.	72
Figura 4.29 – Pressão manométrica da câmara dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.....	73
Figura 4.30 – Série temporal da potência pneumática desenvolvida na câmara dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.....	74
Figura 4.31 - Variação da energia refletida ER em relação a H, para $T = 6, 9$ e 12 s.	76
Figura 4.32 - Variação da energia refletida ER em relação ao período da onda incidente para $H = 1$ e 2.5 m.....	77
Figura 4.33 - Variação das perdas energéticas em relação à H, para $T = 6, 9$ e 12 s.....	78
Figura 4.34 - Variação das perdas energéticas em relação ao período da onda incidente para $H = 1$ e 2.5 m.....	78
Figura 4.35 - Variação da energia pneumática em relação a H, para $T = 6, 9$ e 12 s.	79
Figura 4.36 - Variação da energia pneumática ao longo do período para $H = 1.0$ m e $H = 2.5$ m.	79
Figura 4.37 - Variação da reflexão de energia relativa em relação a H, para $T = 6, 9$ e 12 s.	80
Figura 4.38 - Variação da Reflexão de energia relativa ao longo do período para $H = 1.0$ m e $H = 2.5$ m	80
Figura 4.39 - Eficiência geral dos CAO casos A, B e C em relação à H nos períodos $T = 6, 9$ e 12 s.	81
Figura 4.40 - Eficiência geral dos CAO casos A, B e C em relação ao período para $H = 1.0$ e 2.5 m.	81
Figura 4.41 - Perdas energéticas relativas dos CAO casos A, B e C em relação à H nos períodos $T = 6, 9$ e 12 s.....	82
Figura 4.42 - Perda energética dos CAO casos A, B e C em relação ao período para $H = 1.0$ e 2.5 m.	82
Figura 4.43 - Distribuição de eficiência (a), perdas energéticas relativas (b) e reflexão de energia relativa (c), EP/EI, EL/EI e ER/EI, para todas as variações de H e T do caso A.....	84
Figura 4.44 - Distribuição de eficiência (a), perdas energéticas relativas (b) e reflexão de energia relativa (c), EP/EI, EL/EI e ER/EI, para todas as variações de H e T do caso B.....	85
Figura 4.45 - Distribuição de eficiência (a), perdas energéticas relativas (b) e reflexão de energia relativa (c), EP/EI, EL/EI e ER/EI, para todas as variações de H e T do caso C.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Potencial energético técnico teórico de Recursos renováveis em fluxos anuais de energia. Fontes: Rogner et al., 2000; IEA ,2010, Pollack et al., 1993; Smeets et al., 2007 apud Edenhofer et al., 2012	3
Tabela 1.2-Potencial teórico de energia das ondas. Fonte: Adaptado de Mørk et al. (2010), convertido para TWh/ano baseado em regime de operação integral e 100% de potência operacional.	10
Tabela 3.1 – Coeficientes de relaxamento de solução do sistema de equações governantes	40

Lista de Símbolos

Alfabeto Romano

a	Amplitude da onda [m]
C	Celeridade da onda [m/s]
C_R	Coefficiente de reflexão
E_A	Energia da onda absorvida pelo CAO [kJ/m]
E_I	Energia incidente da onda [kJ/m]
E_L	Parcela de Energia perdida [kJ/m]
E_P	Parcela de Energia pneumática [kJ/m]
E_R	Parcela de Energia refletida [kJ/m]
f	Frequência [s^{-1}]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
h	Profundidade [m]
H	Altura da onda [m]
H_C	Altura média da coluna de água da câmara [m]
H_S	Altura de uma onda estacionária [m]
k	Número de onda [m^{-1}]
k_t	Relação característica da turbina [$Pa.s/m^3$]
K_R	Coefficiente de reflexão de energia
l	Largura da câmara na direção da frente de onda [m]
L	Comprimento de onda [m]
L_0	Comprimento de onda, águas profundas [m]
p	Pressão [Pa]
Δp	Diferença de pressão entre a câmara do CAO e atmosfera [Pa]
P	Potência [kW]
t	Tempo [s]
T	Período de onda [s]
u	Componente de velocidade na direção x [m/s]
v	Componente de velocidade na direção y [m/s]
w	Componente de velocidade na direção z [m/s]
x	Direção de propagação da onda [-]
y	Direção da frente de onda [-]
z	Direção de profundidade [-]

Símbolos Gregos

α	Fração volumétrica de fase [-]
ε	Taxa de dissipação turbulenta [$J/kg.s$]
$\eta(x,t)$	Elevação da SL da água [m]
η_R	Elevação da SL refletida [m]
κ	Energia cinética turbulenta [J/kg]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
μ_t	Viscosidade turbulenta [Pa.s]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m^3]
σ	Relação de dispersão da onda [s^{-1}]
$\phi(x,z,t)$	Função potencial de velocidade bidimensional [m^2/s]

LISTA DE ABREVIATURAS

CAO.....	Coluna de água oscilante
CC.....	Condição de contorno
EU.....	União Europeia
IPCC.....	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LIMPET.....	<i>Land Installed Marine Power Plant</i>
NRA.....	Nível de repouso da água
ONU.....	Organização das Nações Unidas
OPEP.....	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
QUB.....	<i>Queen's University of Belfast</i>
SL.....	superfície livre
SRREN.....	<i>Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation</i>
WAM.....	<i>Wave Model</i>
WMO.....	<i>World Meteorological Organization</i>

1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos pré-históricos o desenvolvimento da civilização humana já dependia da utilização e disponibilidade de energia. O ancestral do homem moderno já utilizava o fogo para se abrigar do frio e da escuridão da noite, se proteger dos predadores e preparar seus alimentos. A combustão foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas, primeiramente da biomassa, e em um segundo momento a utilização de combustíveis fósseis, como o carvão mineral.

Com o gradual crescimento e desenvolvimento da civilização, o homem passou a manipular a energia de maneira mais engenhosa, foram criadas as primeiras máquinas, ampliando o horizonte humano. Eventualmente, com o advento das máquinas a vapor, a manufatura de produtos e manipulação de energia atingiram níveis muito elevados. Surgiram as linhas férreas e locomotivas que transformaram o mundo. Posteriormente, além do carvão passou-se a utilizar outras fontes fósseis de energia. O petróleo gerou uma infinidade de derivados utilizados na geração de energia, calor e no transporte. Surgiu o automóvel. A eletricidade se difundiu. Ocorreu um salto no desenvolvimento das economias e das cidades.

Entretanto, apesar de muitos avanços, retirar energia da natureza de maneira renovável, eficiente e rentável ainda prova ser um desafio para a civilização humana. O desenvolvimento humano até os dias atuais promove um impacto negativo no meio ambiente (SILVA, 2003). A utilização de combustíveis fósseis e o crescimento sem controle e sem discernimento nas cidades geraram graves problemas sanitários e de poluição do ar e dos cursos de água.

1.1 Atividade humana e meio ambiente

A poluição local não é o único problema causado pelo homem. O efeito da emissão de gás carbônico e outros gases no efeito estufa e consequente aumento da temperatura média da atmosfera podem causar alterações climáticas que põem em cheque as condições de habitação humana e ameaça biomas e a biodiversidade do planeta. Segundo o resumo técnico do quinto relatório de avaliação, AR5 (FIELD et al., 2014), promovido pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), a maior parte dos impactos de alteração climática são atribuídos ao aquecimento global e mudança nos padrões de precipitação. Os impactos recentes de extremos climáticos, como ondas de calor, secas, inundações, ciclones e incêndios florestais, revelam uma vulnerabilidade significativa e a exposição de muitos sistemas humanos à atual variabilidade climática. Os impactos de tais extremos relacionados ao clima incluem a alteração de ecossistemas, a interrupção da produção de alimentos e abastecimento de água, danos à infraestrutura e assentamentos, mortalidade e impacto negativo na saúde mental e bem-estar humano.

Em muitas regiões a mudança de precipitação ou o derretimento da neve e do gelo estão alterando os sistemas hidrológicos, afetando os recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade. Glaciares continuam a diminuir quase em todo o mundo devido a mudanças climáticas afetando o escoamento e os recursos hídricos a jusante. Com base em muitos estudos que abrangem uma ampla gama de regiões e culturas, os impactos negativos da mudança climática sobre os rendimentos das plantações têm sido mais comuns do que os impactos positivos (FIELD et al., 2014).

A preocupação com o futuro e estabilidade das nações a respeito do impacto ambiental das atividades humanas resultou na criação do IPCC, criado em 1988 associado à ONU (Organização das Nações Unidas) e WMO (*World Meteorological Organization*). O IPCC é uma organização intergovernamental com base científica que fornece avaliações de cenário e riscos a respeito de alterações climáticas, promove a conscientização global dos impactos ambientais e levanta dados que possibilitam a formação de estratégias governamentais e políticas futuras para reduzir o impacto da ambiental e gerar desenvolvimento sustentável (WMO, 2013; IPCC, 2017).

Além dos problemas ambientais, a dependência de combustíveis fósseis para obtenção de energia por meio de fontes finitas e cada vez mais escassas e controladas por poucos apresentam um grande risco, como ficou demonstrado com a crise do petróleo de 1970, causada pelo embargo da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo).

Baseado nos impactos negativos causados pelas alterações climáticas descritas anteriormente e as desvantagens de utilizar uma matriz energética dependente dos combustíveis fósseis, sujeita a crises e escassez do recurso se conclui que a melhor estratégia para suprir a necessidade energética das sociedades é investir em uma matriz energética diversificada, com boa participação de geração de energia proveniente de fontes alternativas e renováveis, amortecendo a falta de um dos recursos com a produção dos outros.

Segundo o *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (SRREN), outra coleta de dados de pesquisadores promovida pelo IPCC, existe mais energia renovável disponível no planeta que o atual consumo por todas as economias globais. O desafio é captar esta energia de maneira eficiente e rentável. Os dados coletados são apresentados pela Tab. 1.1 (MOOMAW et al., 2011).

A Figura 1.1 mostra a matriz energética primária global de 2008 (inclui transportes), enquanto que na Fig. 1.2 observa-se a energia elétrica produzida em 2008 pelo mesmo método. A energia primária é definida como o calor liberado pela queima de um combustível na atmosfera. Para fontes de energia renovável que não podem ser queimadas são utilizados alguns métodos de equivalência, sendo um deles o método de equivalência direta, onde a energia ou calor final fornecido pelo

recurso renovável em uma unidade secundária, como kWh de eletricidade ou calor é tomado como a medida primária de energia (MOOMAW et al., 2011).

Tabela 1.1 – Potencial energético técnico teórico de Recursos renováveis em fluxos anuais de energia. Fontes: Rogner et al., 2000; IEA ,2010, Pollack et al., 1993; Smeets et al., 2007 apud Edenhofer et al., 2012

Recurso Renovável	Fluxo Anual (EJ/ano)	Razão (Fluxo energia anual / suprimento energia primária em 2008)	Reserva Total
Bio-energia	1 548	3.1	--
Energia Solar	3 900 000	7 900	--
Energia Geotérmica	1 400	2.8	--
Energia Hídrica	147	0.30	--
Energia Oceânica	7 400	15	--
Energia Eólica	6 000	12	--
Fonte de Energia Primária Anual	Uso Anual (EJ/ano)	Vida das reservas comprovadas (anos)	Reserva Total (EJ)
Fóssil Total	418	112	46 700
Urânio Total	10	100-350	1 000-3 500
Total Renovável	64	--	--
Suprimento Energia Primária	492	--	--

Pela análise dos gráficos das Figuras 1.1 e 1.2 é possível observar que a maior contribuição geral das fontes de energia renovável é a biomassa, empregada no aquecimento de residências e cocção de alimentos (EDENHOFER et al., 2012) e possivelmente no setor de transportes, enquanto que na geração elétrica, entre as energias renováveis o maior contribuinte é a energia hídrica. A energia gerada pelos oceanos ainda tem um longo caminho a percorrer, correspondendo a apenas 0.005% do total da matriz elétrica global de 2008, contra 1.1% da energia eólica, e 0.06% de placas fotovoltaicas.

O principal motivo desta inexpressividade é a inexistência de aplicações em nível comercial de geração de energia dos mares, ao contrário da energia eólica e das placas fotovoltaicas, a tecnologia de geração ainda não amadureceu a ponto da aplicação comercial.

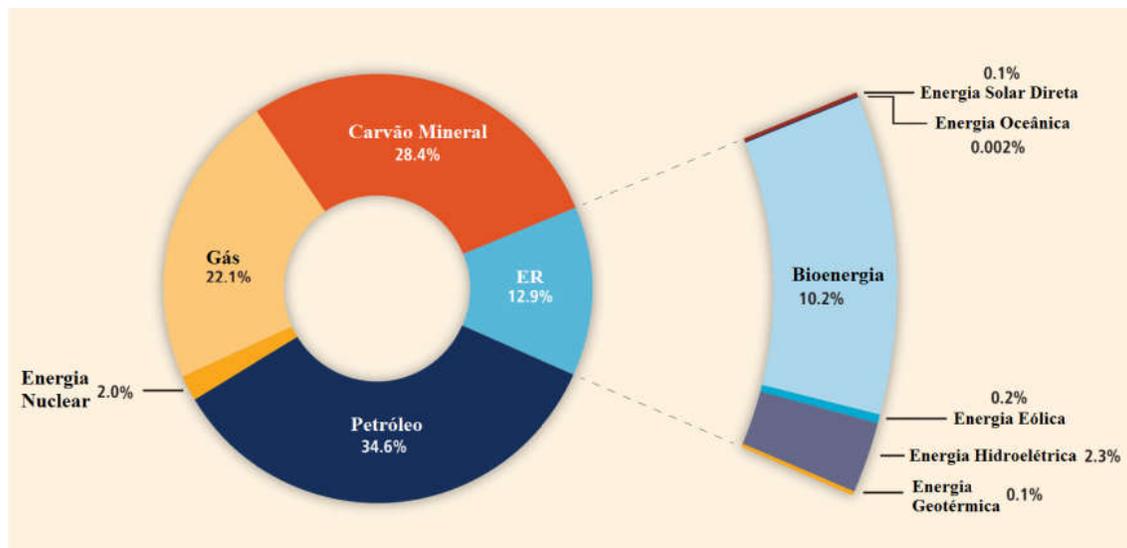


Figura 1.1 - Matriz energética global em energia primária no ano 2008 (total de 492 EJ). Fonte: Adaptado de Edenhofer et al., 2012.

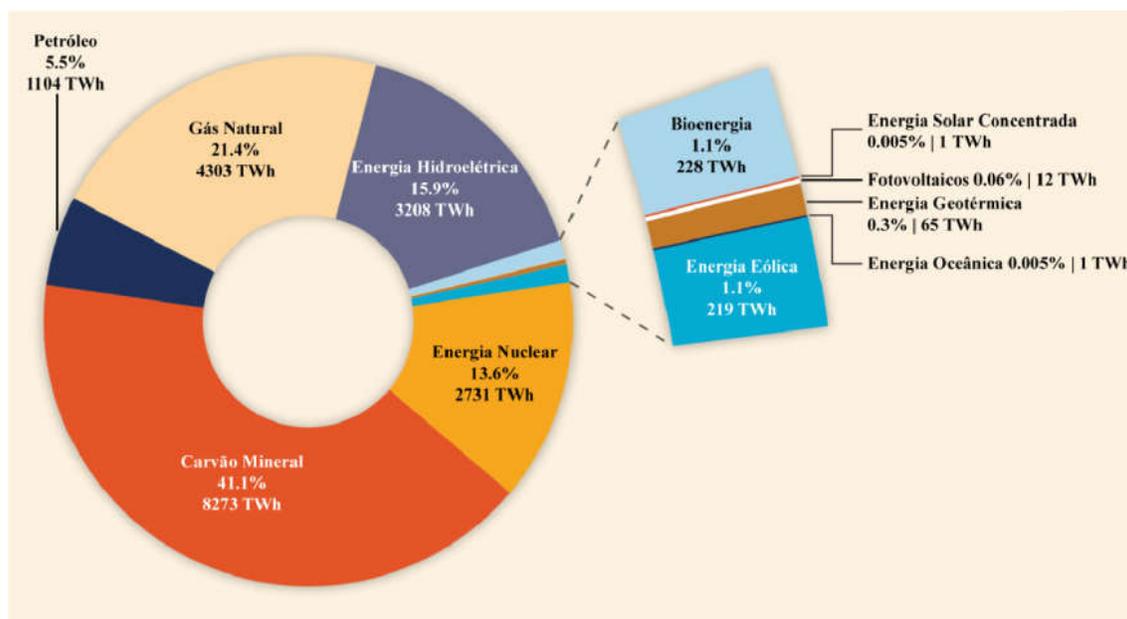


Figura 1.2 - Matriz energética global de produção elétrica em energia primária no ano 2008. Fonte: Adaptado de Edenhofer et al., 2012.

Existem diversos princípios de conversão diferentes e não se sabe qual tecnologia irá se consolidar, ao passo que para energia eólica e solar, os modelos de conversão com turbinas eólicas e placas fotovoltaicas já se comprovaram como os melhores entre os existentes até então, e tem condições de serem rentáveis no mercado. Isto se deve principalmente ao fato de que a energia do oceano é de difícil acesso, localiza-se em ambiente extremamente hostil, e apresenta-se em intensidade muito diversificada, o que encarece a construção e se prova um desafio para os engenheiros projetistas.

Entretanto, segundo Barstow et al. (2003, apud CRUZ, 2008), o recurso de energia das ondas disponível em escala mundial é da mesma ordem de grandeza que o consumo de energia elétrica mundial, que é de cerca de 2 TW. Ainda que apenas de 10 a 25% desse recurso seja tecnicamente explorável, o recurso promete uma contribuição considerável da matriz energética global.

Vencer estes desafios e conquistar a geração de energia pelos oceanos pode implicar em um impacto considerável em favor da geração de energia renovável na matriz energética global, promovendo menor impacto ambiental e uma existência mais equilibrada com o planeta. Neste âmbito, este trabalho objetiva analisar numericamente três geometrias diferentes de dispositivos de conversão de energia das ondas, chamados de dispositivo de coluna de água oscilante (CAO), no intuito de aprimorar o conhecimento dos princípios que regem a conversão de energia dentro do dispositivo, e determinar quais parâmetros que determinam melhorias no desempenho deste tipo de dispositivo.

1.2 Incidência da energia das ondas

A energia oceânica é aquela derivada de tecnologias que usam a água do mar como sua força motriz ou aproveitem seu potencial químico ou térmico. O recurso se apresenta basicamente em seis formas: ondas, variação das marés, corrente das marés, correntes oceânicas, energia térmica oceânica e gradientes de salinidade, cada forma exigindo uma tecnologia de conversão diferente. O potencial teórico para as tecnologias energéticas oceânicas foi estimado em 7400 EJ/ano, bem acima das necessidades energéticas humanas atuais e futuras.

Uma avaliação (KREWITT et al., 2009 apud LEWIS et al., 2011) coloca o potencial técnico global ¹para 2050 em 331 EJ/ano, dominado pela energia térmica oceânica (300 EJ/ano) e energia das ondas (20 EJ/ano), enquanto que no outro extremo do espectro, outro levantamento (SIMS et al., 2007) avaliou o recurso energético explorável disponível em apenas 7 EJ/ano. A conclusão que se tira destes dados é que a energia oceânica oferece potencial para redução de emissões de carbono a longo prazo, mas é pouco provável que fará uma contribuição a curto prazo devido ao estágio inicial de desenvolvimento das tecnologias.

Todo esta energia tem como origem o Sol. Os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície da Terra, sendo, de certa forma, os maiores painéis fotovoltaicos do planeta. A energia solar é convertida nos diferenciais de temperatura que movem as massas de ar e água, gerando ventos, ondas e correntes marinhas. Teoricamente a energia solar absorvida por 60 milhões de quilômetros

¹ Potencial técnico é a quantidade de energia renovável produzida obtida pela implementação completa das tecnologias demonstradas ou outras práticas (LEWIS et al., 2011).

quadrados de mares tropicais equivalem a 250 bilhões de barris de petróleo por dia (GHOSH & PRELAS, 2011).

Esta energia se encontra distribuída de forma pouco uniforme pelo mundo, sendo a energia termal concentrada ao redor da linha do equador (0 a 35° de latitude), enquanto que a energia das ondas se concentra nas médias latitudes entre 30 e 60° (LEWIS et al., 2011). Com base no âmbito deste trabalho, se concentrou na energia disponível na forma de ondas.

A energia das ondas é criada a partir da interação do vento com o oceano, como subproduto da dispersão da energia solar pela atmosfera. A taxa de transferência de energia do vento para as ondas varia de 0.01 a 0.1 W/m², que é muito pequena comparada à energia solar incidente bruta que é em média 350 W/m² (BARSTOW et al., 2003, apud CRUZ, 2008). O tamanho e o período das ondas geradas dependem da quantidade de energia transmitida, que por sua vez é uma função da velocidade e duração da ação do vento sobre uma pista no oceano (chamada de *fetch*), bem como o tamanho desta pista (LEWIS et al., 2011).

Uma das vantagens da energia das ondas é que ocorre em uma forma de alta qualidade, a energia mecânica da oscilação, e consegue percorrer grandes distâncias com pouca perda de energia (devido ao movimento circular quase livre de atrito, Garrison, 2009), aumentando sua densidade de energia ao longo dos oceanos, chegando em média a 100 kW/m (kilowatt por metro de largura de frente de onda). Por conta da origem nos ventos, os mares a oeste dos continentes nas regiões temperadas são os que apresentam a maior média de energia (BARSTOW E MØRK et al., 2003, apud CRUZ, 2008).

Baseado em 10 anos de dados de ondas e ventos globais coletados a cada 6 horas, em 10 mil pontos offshore em uma rede de 0.5°, disponível através do projeto da União Europeia (UE), *World Waves*, Barstow & Mørk et al. (2008), construíram os mapas globais de distribuição de energia das ondas que serão discutidos a seguir. Estes mapas são de grande importância na seleção de localidades para instalação de protótipos e plantas piloto.

Os mapas foram construídos utilizando dados de modelos de ondas globais disponíveis, altimetria global de satélites e dados de boias, integrando-se ao projeto *World Waves*. Os satélites de altimetria foram utilizados para validar dados da altura significativa das ondas e velocidade do vento mundialmente, obtidos pelo Topex para o modelo WAM (*WAve Model*). Estes dados foram confirmados pela comparação com dados de longo prazo da rede de boias NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce*). As alturas significativas de ondas do modelo WAM, foram primeiro comparadas a 13 boias da NOAA e então com dados de altimetria de satélites da área ao redor das boias. A partir desta distribuição de dados, várias outras estatísticas foram calculadas. Os resultados se mostraram pouco dependentes da escolha de boias ou

satélites para a avaliação. Assim demonstrou-se a confiabilidade dos dados do Topex. O projeto *World Waves* usou dados do Topex calibrados por boias para validar e calibrar a base de dados do modelo do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

O mapa das médias anuais de potência de onda da Fig. 1.3 mostra claramente a distribuição maior de energia a oeste das encostas e entre as latitudes entre 30 e 60°, correspondente às zonas temperadas de tempestade de ambos os hemisférios.

Pode-se observar que no hemisfério norte as ilhas britânicas, Islândia e Groenlândia são as localidades de mares mais energéticos, seguidos pela costa oeste de Estados Unidos e Canadá, enquanto que no hemisfério sul, as localidades com mar mais energético são a costa do sul do Chile, África do Sul, e as costas sul e oeste da Austrália e Nova Zelândia. Nas zonas equatoriais valores entre 15 e 20 kW/m são encontrados anualmente em todas as bacias oceânicas observadas.

O regime de ondas mais energético localiza-se a cerca de 1400 km a leste da Ilha Kerguelen, onde a média anual passa de 140 kW/m. Para o hemisfério norte, o regime mais energético é encontrado a 400 km oeste de Rockall com média de 90 kW/m. A variação dos estados de agitação do mar é bem ampla, por exemplo, a potência máxima por mês é praticamente a mesma nos dois hemisférios, de cerca de 200 kW/m, um tanto acima das máximas médias anuais.

No entanto, é necessário observar mais do que o nível energético das ondas do mar em certas localidades para selecionar os melhores locais para construir plantas de energia das ondas. Segundo Cruz (2008), as primeiras plantas serão construídas nas regiões de 50-60 m de profundidade, no limite da região de transição de zona próxima à costa para a mais atrativa afastada da costa, e todas as regiões exemplificadas anteriormente seriam pouco atrativas apenas pela grande distância da costa. Outros fatores a se considerar são proximidade de redes elétricas já implantadas, intensidade das tempestades, disponibilidade de recursos para a construção da planta e estabilidade da oferta de energia.

Neste último ponto, uma análise relativa ajuda a demonstrar a sazonalidade do recurso. O mapa da Fig. 1.4 (a), de Cruz et al. (2008), plota a relação entre a potência mínima mensal e a média anual, evidenciando a variação da energia das ondas ao redor do globo. A variação das condições dos oceanos entre o verão e o inverno para o hemisfério norte são muito maiores que as observadas no hemisfério sul.

Outro parâmetro importante é a variação entre os extremos e as médias na altura das ondas. A Figura 1.4 (b) plota a relação entre a máxima altura e a média da altura significativa das ondas. Quanto maior for esta relação, maior será a diferença entre os extremos das ondas mais energéticas e as menos energéticas, o que dificulta o projeto da planta e encarece a produção energética, reduzindo a viabilidade de um projeto de conversão de energia das ondas.

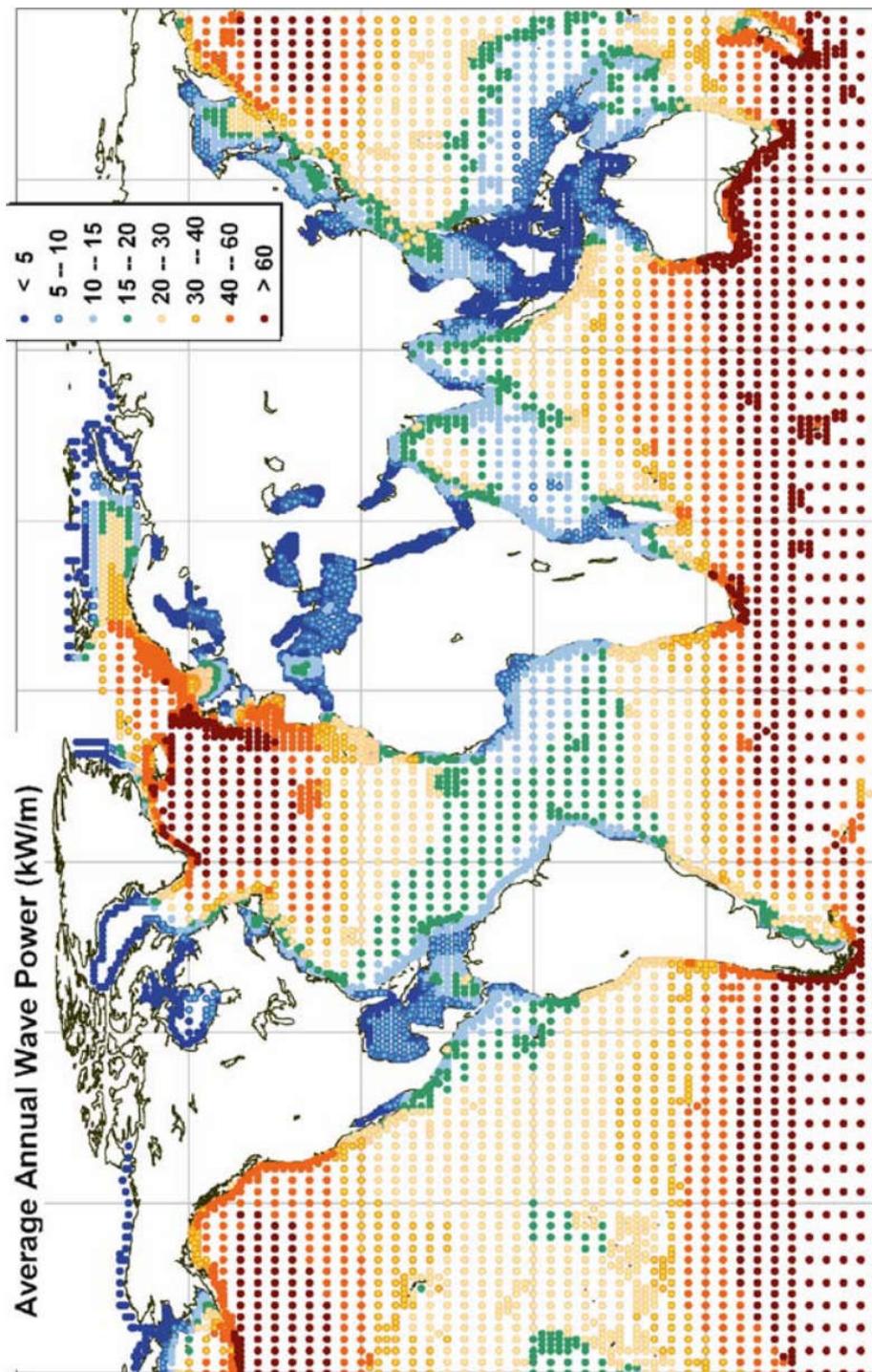


Figura 1.3 - Estimativas anuais da potência média anual de onda em kW/m (dados do arquivo do modelo WAM do ECMWF, calibrados e corrigidos pelo Fugro OCEANOR contra uma base de dados global de boias e do satélite altímetro Topex). Fonte: Barstow & Mørk, apud Cruz, 2008.

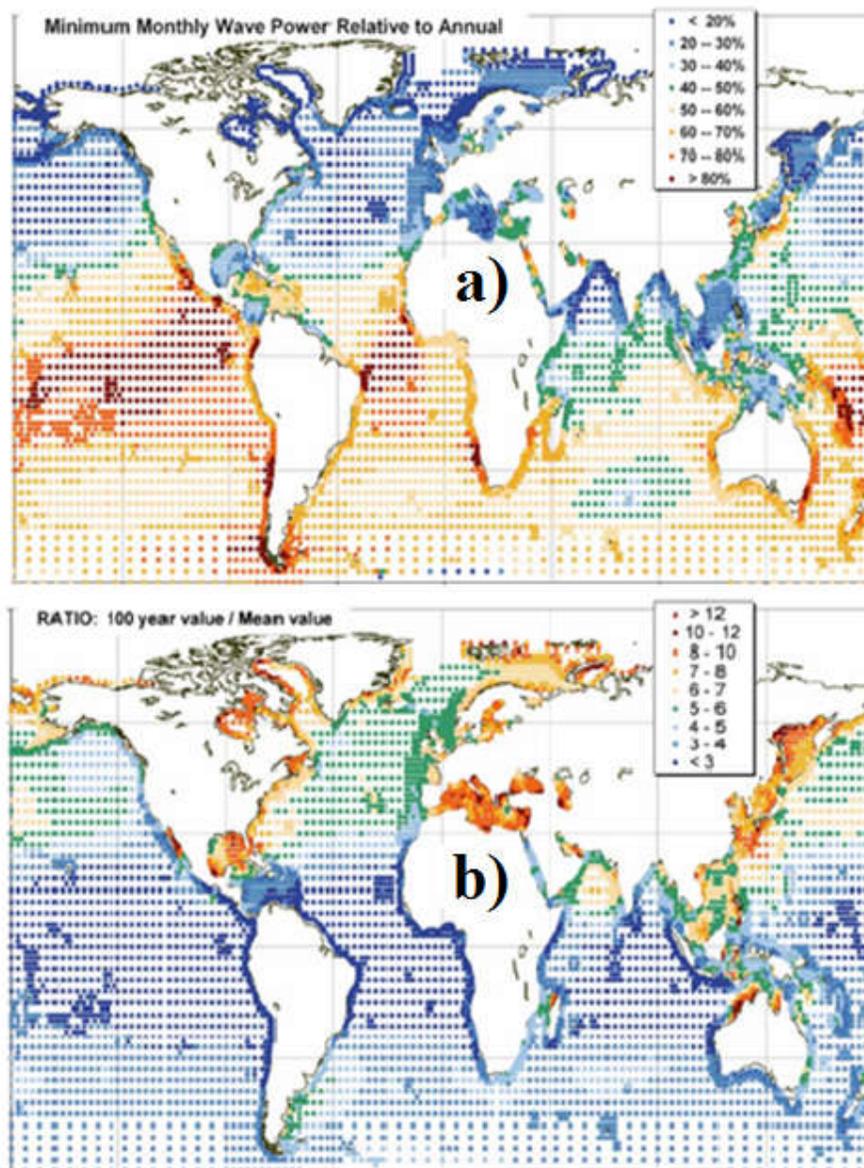


Figura 1.4 - a) Relação entre o mínimo das estimativas mensais de energia das ondas e a média anual (dados do arquivo do modelo WAM do ECMWF. b) Mapa da razão da altura da onda significativa em 100 anos sobre a altura média. Dados do arquivo do modelo WAM do ECMWF, calibrado e corrigido por Fugro OCEANOR contra um banco de dados global de boias e satélite altimétrico Topex. Fonte: Barstow & Mørk, apud Cruz, 2008.

A conclusão que se chega é que a escolha de um local para a instalação de uma planta de energia das ondas não depende só do estado energético do mar, mas da distância da costa, profundidade local, sazonalidade da oferta de energia e a possibilidade de ocorrência de estados de mar muito severos, principalmente por conta: do estado inicial de desenvolvimento das tecnologias de conversão de energia, do alto custo de instalação de cabos de transmissão em regiões distantes da costa, e do alto custo de operação e manutenção de maquinário em águas profundas e agitadas,

devido à dificuldade de resgatar as máquinas e transportá-las para um estaleiro. O desafio é conciliar todos estes fatores.

Para medir o potencial energético do recurso é melhor utilizar a energia em uma forma bruta ao invés de energia por metro de frente de onda, em TWh/ano ou EJ/ano ou em potência como GW, pela conveniência de comparação com o consumo de energia elétrica mundial. O potencial teórico total de energia das ondas (disponível) é estimado em 32000 TWh/ano (115 EJ/ano) segundo Mørk et al. (2010, apud LEWIS et al., 2011) o que é praticamente o dobro do abastecimento de energia mundial em 2008 (16800 TWh/ano ou 54 EJ/ano, LEWIS, 2011). A Tabela 1.2 de Mørk et al. (2010, apud LEWIS et al., 2011) é uma estimativa do potencial teórico total de energia das ondas incidentes na costa (sem restrições técnicas, geográficas e econômicas) separada em regiões. Esta considera apenas regiões com potência acima de 5 kW/m e a até 66.5° de latitude, e assim não considera cerca de 8% do total de energia, provavelmente pois a tecnologia atual não seria produtiva nestas condições.

Outra estimativa interessante feita por Sims et al. (2007, apud LEWIS, A., 2011), assumindo que os dispositivos de conversão de energia das ondas (WEC, do inglês Wave Energy Conversion) offshore tenham uma eficiência de 40% e sejam apenas instalados perto de encostas com clima de ondas de no mínimo 30 kW/m, seria obtida uma potência de 500 GW (4380 TWh/ano). Para efeito de comparação, a Tab. 1.2 também mostra as mesmas quantidades da em termos de potência (GW), conforme dados originais de Mørk (2010). Frente à análise de Sims et al. (2007), tem-se a perspectiva da quantidade de energia em que se poderia explorar com a capacidade técnica atual e o potencial total do recurso.

Tabela 1.2-Potencial teórico de energia das ondas. Fonte: Adaptado de Mørk et al. (2010), convertido para TWh/ano baseado em regime de operação integral e 100% de potência operacional.

Região	Energia das Ondas TWh/ano (EJ/ano)	Potência disponível das Ondas GW
Norte e Oeste Europeu Mar Mediterrâneo e Arquipélagos Atlânticos (Açores, Cabo Verde, Canárias)	2540.4 (10)	290
América do Norte e Groenlândia	2146.2 (14.4)	245
América Central	1497.96 (5.4)	171
América do Sul	4607.76 (16.6)	526
África	3696.72 (12.6)	422
Ásia	4791.72 (22.3)	547
Austrália, Nova Zelândia e Ilhas do Pacífico	5580.12 (20.2)	637
TOTAL	26157.36 (106.2)	2986

1.3 Objetivos

Analisar a influência de diferentes formas de câmaras no comportamento hidrodinâmico do dispositivo de coluna de água oscilante *onshore*, incluindo eficiência energética, usando métodos numéricos. As formas de referência para as análises foram formas idealizadas baseadas nas plantas de CAO instaladas nas ilhas de Pico, nos Açores, (Falcão, 2000) e Isley, na Escócia, mais conhecida pelo seu acrônimo, LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*, QUEEN'S UNIVERSITY OF BELFAST (QUB), 2002). O caso do LIMPET foi dividido em dois: um que considera uma forma simplificada, sem a mudança de ângulo da parede frontal submersa e outro em que a parede frontal submersa tem um ângulo diferente do resto da parede, que é o caso real a que foi construído.

Objetivos específicos:

- Analisar o comportamento hidrodinâmico das geometrias usando representações gráficas das linhas de corrente, campos de velocidades, turbulência, etc, determinando causalidade entre os diferentes comportamentos e o desempenho de cada caso;
- Comparar as potências pneumáticas obtidas nas três câmaras para as diversas condições de estado de mar testadas;
- Analisar o balanço de energia, quantificando as perdas envolvidas e a eficiência dos dispositivos para cada estado de mar proposto;
- Comparar o desempenho dos casos entre si, determinando qual a melhor geometria para cada estado de mar;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica divide-se quatro partes principais: uma descrição do comportamento de uma onda monocromática segundo a teoria linear das ondas, uma breve descrição dos principais dispositivos de conversão de energia das ondas, um estudo do estado da arte da pesquisa em CAO's e finalmente uma exposição básica do método numérico comumente utilizado nesta área.

2.1 Mecânica das Ondas

Para entender melhor o transporte de energia pelas ondas, e a posterior conversão desta energia nos dispositivos WEC, esta seção resume brevemente a teoria da mecânica das ondas, os fenômenos de transporte envolvidos, a dispersão, refração e transformação das ondas durante sua propagação e interação com o ambiente. Antes de discutir o modelo matemático que descreve as ondas, revisam-se alguns aspectos básicos de suas características físicas.

A teoria que descreve as ondas oceânicas é dita teoria das ondas de superfície. Se uma força altera o estado de equilíbrio de um corpo de água em repouso, como por exemplo, um objeto sendo derrubado na SL (superfície livre) do líquido, é criada uma perturbação na forma de ondas. Segundo McCormick (1973), as ondas existem por causa da característica de buscar o estado de equilíbrio presente na natureza. Os movimentos da SL se propagam devido à ação da gravidade forçando a superfície de volta à posição de repouso a água (NRA). A gravidade força a elevação da superfície para baixo, e a inércia da água faz com que a SL ultrapasse o NRA, criando uma cava (Garrison, 2009). Por esta razão, estas ondas também são chamadas de ondas de gravidade. No caso de uma onda oceânica, a principal força de perturbação da SL é ação dos ventos.

A Figura 2.1 (a) mostra as partes e propriedades básicas de uma onda necessárias para entender seu comportamento, mostrando uma onda propagando-se na direção positiva do eixo x , com uma velocidade da forma de onda c , ou celeridade, a certa profundidade na direção z , h , medida a partir da posição de repouso da água. A Altura da onda H é medida do seu ponto mais alto chamado de crista até seu ponto mais baixo, a cava, conforme Fig. 2.1 (b). Esta difere da amplitude a da onda, que é a medida da onda acima do NRA da SL. Níveis quaisquer da SL são determinados pela função $\eta(x,t)$, que também determina a forma da onda.

O comprimento de onda, L , é a distância horizontal entre duas cristas de onda. Já o período da onda, T , é o tempo necessário para que uma parte da onda percorra um comprimento de onda, ou seja, corresponde ao tempo necessário para que a crista da onda passe duas vezes em um ponto fixo

no espaço. A frequência da onda é a propriedade inversa do período, isto é, o número de cristas (ou outra parte da onda) que passam por um ponto no espaço em um segundo.

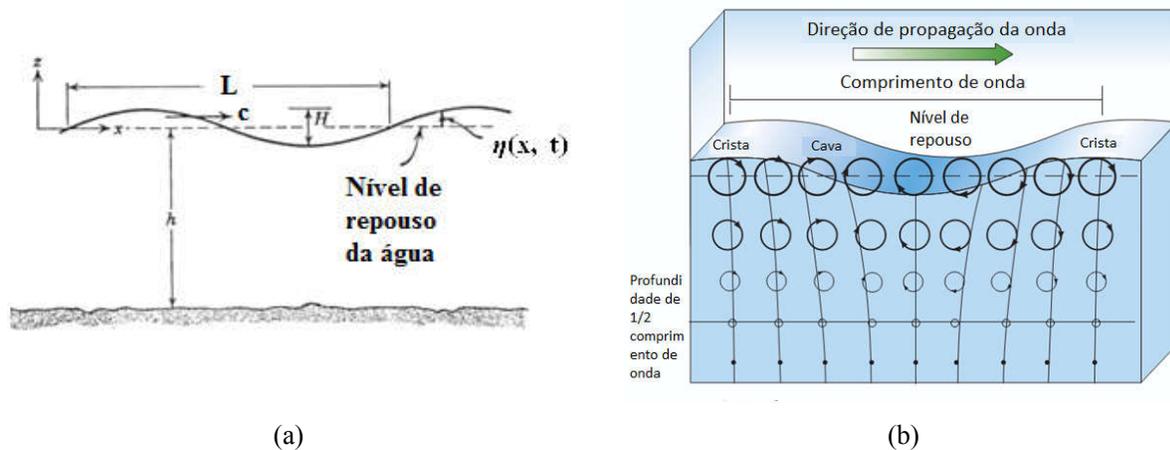


Figura 2.1 – (a) Visualização esquemática de uma onda com algumas notações, adaptado de McCormick, 1973. (b) Movimento orbital das partículas de água em uma onda progressiva. Adaptado de Garrison, 2009.

Apesar de poder passar a impressão a um observador que uma onda transporta um volume de líquido por onde passa, na verdade apenas a energia que causou a perturbação está viajando na velocidade da onda. A onda apresenta um campo de velocidades circular ou orbital, e se desconsiderar pequenos efeitos não lineares, as partículas de água voltam ao local de origem após a passagem da onda, sendo o movimento total resultante nulo. Apenas a forma de onda que se desloca sobre a superfície líquida. Esta é a descrição das ondas progressivas. As ondas estacionárias surgem da interferência construtiva e destrutiva intercalada que ocorre quando duas ondas viajando em sentidos opostos se cruzam (normalmente por causa de reflexão em uma barreira). Neste caso, a forma de onda não se desloca, apenas tem a sua altura somada com a outra onda, parecendo a um observador em terra que pontos da superfície sobem e descem sem mover-se horizontalmente.

O regime de velocidades orbitais das ondas progressivas tem raio máximo nas camadas superiores mais próximas à SL, equivalente à amplitude da onda (a , em m, equivalente a meia altura de onda ($H/2$)) (McCORMICK, 1973), e se reduz quanto maior for a profundidade. Este movimento torna-se desprezível em uma profundidade de meio comprimento de onda, onde o diâmetro dos círculos é de $1/23$ àquele da superfície (GARRISON, 2009).

As ondas também podem ser classificadas conforme sua força geradora, segundo Garrison (2009), as ondas são tipicamente formadas pela ação dos ventos (capilares e ondas de vento), frentes de tempestades e abalos sísmicos em portos e baías e mudanças bruscas de pressão atmosférica (seiches), deslizamentos de terra, erupções vulcânicas e falhas do fundo do oceano associadas a terremotos (ondas sísmicas ou tsunamis) e as mudanças de intensidade e direção das

forças gravitacionais entre Terra, Lua e Sol, juntamente com o movimento da Terra (marés). A Figura 2.2 esquematiza os tipos de onda conforme as forças geradoras e restauradoras, além de distribuí-las em ordem crescente de período, permitindo uma forma simples de classificar uma onda qualquer. A distribuição da quantidade de energia também presente na Fig. 2.2 indica que para extrair energia das ondas é melhor se concentrar em dispositivos que convertam a energia das ondas geradas pelos ventos, de período entre 1 e 10 segundos, e em dispositivos que convertam a energia das marés, já que a maior parte de energia encontra-se na forma de ondas geradas pelo vento e marés.

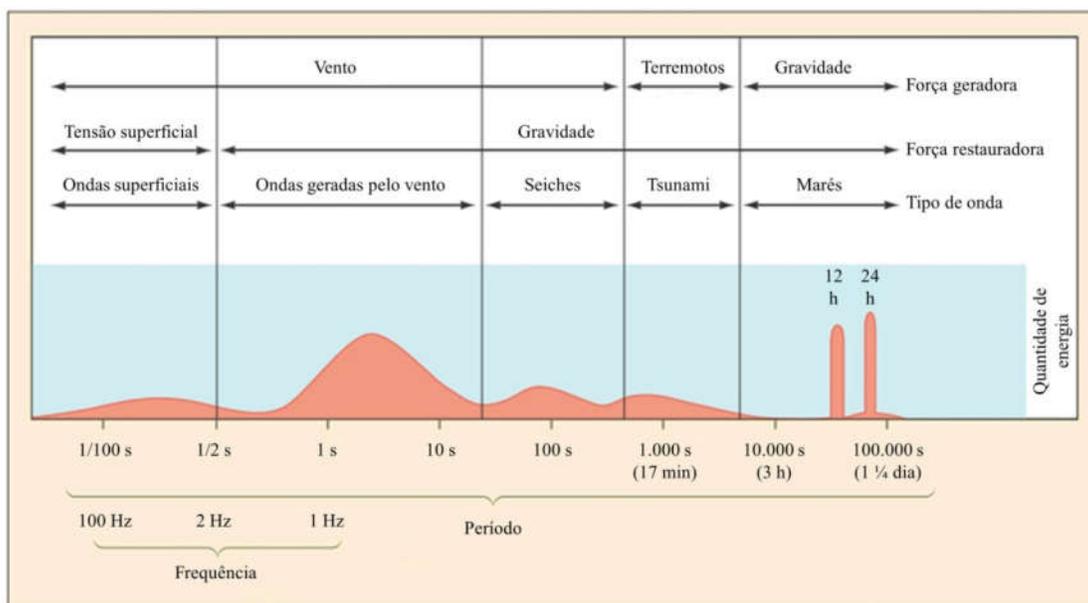


Figura 2.2 - Tipos de ondas de acordo com a força geradora, restauradora e período. Fonte: Garrison, 2009 apud Lisboa, 2016 (tradução).

Diversos fatores afetam a propagação das ondas, como por exemplo, a profundidade, inclinação e porosidade do fundo, ação do vento e correntes locais. Desta forma as ondas de gravidade encontradas na natureza são um fenômeno periódico e não linear, e portanto, não é completamente sinusoidal. Diversos autores tentaram desenvolver modelos que descrevessem o movimento não linear das ondas, mas todos os modelos acabam por utilizar alguma simplificação para obter uma solução (GHOSH & PRELAS, 2011). A teoria mais simples que descreve o movimento de uma onda de gravidade é a teoria linear de Airy (1845) que é a teoria básica utilizada por engenheiros oceânicos, que pode ser aplicada a ondas cuja declividade, H/L (chamada declividade da onda) é muito pequena. Normalmente o valor utilizado como o limite para a aplicação desta teoria é de $H/L \leq 1/50$, segundo McCormick (1973).

A modelagem da propagação de uma onda por um meio fluido, como todas ondas mecânicas ou eletromagnéticas, deve obedecer a uma forma da equação da onda. Além disso, é um problema

de valor de contorno (PVC), ou seja, é a expressão em termos matemáticos do fenômeno físico de uma forma em que exista apenas uma única solução para o problema. Consiste em uma equação diferencial que deve ser satisfeita em uma determinada região de interesse, limitada por condições de contorno que possibilitam encontrar apenas a solução relevante para o problema (uma equação diferencial pode ter infinitas soluções) (DEAN & DALRYMPLE, 1984). A Figura 2.3 demonstra como uma onda de gravidade é interpretada como um PVC.

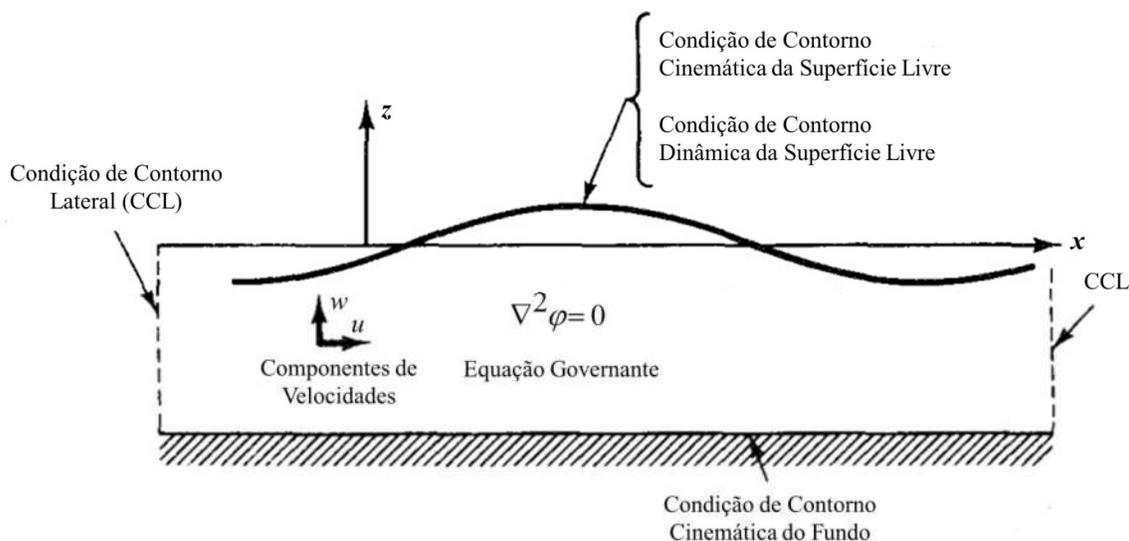


Figura 2.3 - Problema de valor de contorno que descreve uma onda se propagando pela água. Fonte: Dean & Dalrymple, 1984 apud Lisboa, 2016 (tradução).

Segundo Dean & Dalrymple (1984), apesar de ondas reais se propagarem em fluidos viscosos sobre fundos irregulares, na maioria dos casos os escoamentos apresentam maior parte do corpo fluido com movimento praticamente irrotacional. Isso ocorre por conta de que os efeitos viscosos se concentram na região da camada limite do fundo e na superfície. Somado ao fato de que a água pode ser considerada como um fluido incompressível, estas são pressuposições importantes para equacionar o movimento de uma onda, pois então a onda deve obedecer à forma linear especial da equação de Laplace, Eq. (2.1), possuindo uma função de corrente e potencial de velocidades (McCORMICK, 1973).

Esta equação pode ser ainda simplificada para o seu caso bidimensional, Eq. (2.2), considerando uma onda madura (swell) longe do seu ponto de geração, situação em que o deslocamento da frente de onda (transversal à linha da crista da onda) na direção x é praticamente igual ao longo do eixo y , como uma onda se propagando em um canal estreito, ou seja, as linhas de frente de onda são retas paralelas umas às outras, e não círculos concêntricos.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.2)$$

Além das condições espaciais de contorno, existem as condições temporais, que especificam a condição de uma variável em um determinado instante de tempo. Esta condição é dita condição inicial. No caso de ondas que se propagam sobre a superfície normalmente se estabelece que a onda se propaga na direção positiva do eixo x , tendo na origem no momento de partida, $t = 0$, a primeira crista em $x = 0$ (DEAN & DALRYMPLE, 1984).

As condições de contorno estabelecem uma série de premissas que permitem a obtenção de uma única solução da equação diferencial. Segundo McCormick (1973, 2010) e Dean & Dalrymple (1984), de forma breve estas são:

a. Condição de contorno Cinemática da superfície

A velocidade de uma partícula na SL deve ser igual à velocidade da SL em si, ou seja, a SL é formada sempre pelas mesmas partículas de água, assim assume-se que nenhuma partícula pode cruzar a SL. Logo, é possível escrever a Eq. (2.3).

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \text{ em } z = \eta \quad (2.3)$$

b. Condição de contorno Dinâmica da superfície

Esta condição determina que a distribuição de pressão na SL ao longo do comprimento da onda é uniforme, ou seja, a pressão manométrica ao longo da SL é zero. Esta imposição é necessária, pois diferentemente de sólidos, a SL de um líquido não é capaz de suportar variações de pressão sobre sua superfície sem sofrer uma variação significativa em sua forma, sendo a tensão superficial a única resistência a esta variação. Por conta das pressuposições feitas até agora, é possível aplicar a equação de Bernoulli ao fluxo para se obter a pressão em qualquer ponto. Primeiramente aplica-se para a condição de água parada, supondo uma onda de altura zero e comprimento infinito. Os dois primeiros termos da equação de Bernoulli são iguais a zero, pela ausência de movimento. Sendo a pressão na SL zero, e na SL $z = 0$, a parte em função do tempo da equação também deve ser zero. Sendo este um caso particular de onda com a função temporal nula, então a igualdade deve se estender para outras ondas.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p_n}{\rho} + gz = C(t) \text{ em } z = \eta \quad (2.4)$$

onde p_n é uma constante normalmente tomada como a pressão manométrica zero.

c. Condição de contorno Cinemática do fundo

Esta condição determina que nenhuma partícula de água pode cruzar o fundo. O fundo é considerado impermeável e sem atrito, portanto o regime de velocidades normal ao fundo é nulo. Isso significa que o fluxo próximo ao fundo é tangente ao fundo. Sendo o fundo descrito por $z = -h(x)$, por conta da origem no NRA da água, tem-se:

$$\frac{w}{u} = -\frac{dh}{dx} \quad (2.5)$$

Em um fundo plano e horizontal, esta relação pode ser simplificada para a Eq. (2.6).

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

d. Condição de contorno de Radiação das laterais

Como já foi estabelecido que a onda modelada se propaga em apenas uma direção, assumindo um regime bidimensional, com nenhum fluxo na direção y , esta condição se aplica aos limites apenas do eixo x . Estes limites, dependendo do problema proposto, podem ser o gerador de ondas e uma praia dissipativa.

Para um caso mais geral, se considera a periodicidade no tempo e no espaço como condições de contorno de uma onda longe da zona de geração e dissipação, considerando apenas a sua propagação (ou “radiação”, segundo Dean & Dalrymple, 1984), ou seja, que as ondas continuam a ocorrer ao infinito, e que não existem ondas retornando em sentido oposto, como expressa pelas condições de periodicidade das Eq. (2.7) e (2.8).

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t) \quad (2.7)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T) \quad (2.8)$$

Com as equações das condições de contorno e a equação diferencial parcial, é possível resolver o problema utilizando métodos de solução de equações diferenciais. Neste caso foi utilizado o método de separação de variáveis, seguindo o desenvolvimento de Dean & Dalrymple (1984). Neste método a solução é assumida como sendo uma expressão do produto de funções diferentes com variáveis independentes, neste caso, x , z e t , como mostra a Eq. (2.9).

$$\phi(x, z, t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot U(t) \quad (2.9)$$

Através da condição de contorno lateral de radiação sabe-se que ϕ deve ser periódico no tempo, assim sendo, especifica-se $U(t) = \text{sen}(\sigma t)$. A frequência angular σ pode ser calculada através da própria condição de contorno lateral,

$$\text{sen}(\sigma t) = \text{sen}(\sigma t + U) = \text{sen}(\sigma t) \cos(U) + \cos(\sigma t) \text{sen}(U)$$

Outras suposições para $U(t)$ também geram resultados válidos, mas como os resultados gerados são lineares e é possível utilizar a superposição dos resultados, esta análise pode ser feita no fim das deduções. Tem-se que:

$$\phi(x, z, t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot \text{sen}(\sigma t) \quad (2.10)$$

Substituindo a expressão da Eq. (2.10) na equação de Laplace (Eq. (2.2)), obtêm-se:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0 \quad (2.11)$$

Logo, a soma só pode ser verdadeira se:

$$\frac{d^2 X(x) / dx^2}{X(x)} = -K^2$$

$$\frac{d^2 Z(z) / dz^2}{Z(z)} = K^2$$

Dependendo dos valores assumidos por K (zero, real ou imaginário), é possível se obter soluções para equação de Laplace que descreve ondas com comportamentos diferentes, como ondas que crescem ao longo da propagação pela ação do vento, ou ondas mais simples, como o caso geral de uma onda se deslocando longe da zona de geração, com periodicidade no tempo e no espaço.

A solução para o caso de K assumir um valor real maior que zero qualquer (aplica-se ao caso específico descrito) é:

$$X(x) = A \cos(kx) + B \text{sen}(kx) \quad (2.12)$$

$$Z(z) = C e^{kz} + D e^{-kz} \quad (2.13)$$

onde A , B , C e D são constantes.

Logo,

$$\phi(x, z, t) = (A \cos(kx) + B \text{sen}(kx))(C e^{kz} + D e^{-kz}) \text{sen}(\sigma t) \quad (2.14)$$

Substituindo a condição de contorno lateral na Eq. (2.12) e analisando em $x = 0$, obtêm-se a relação para o número de onda,

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.15)$$

A condição de contorno de fundo horizontal retorna a função potencial de velocidades,

$$\phi = A D e^{kh} \cos(kx) \cosh(k(h+z)) \text{sen}(\sigma t)$$

A condição de contorno dinâmica da SL é expandida em série de Taylor, e então sofre um processo de linearização (conforme comentado anteriormente) desprezando os termos de grau superior a partir da suposição de ondas de pequena amplitude ($\eta \ll 1$, logo $\eta^2 \ll \eta$), possibilitando encontrar uma resposta simples com boa aproximação, resultando nas equações:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.16)$$

e

$$\phi = \frac{-Hg \cosh k(h+z)}{2\sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.17)$$

A expansão em série de Taylor truncando nos termos de 2ª ordem é utilizada novamente na condição de contorno de elevação desconhecida, $z = \eta(x,z,t)$ até $z = 0$, para a condição cinemática de contorno, que simplificando retorna a relação de dispersão entre σ e k :

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.18)$$

Esta equação pode ser reescrita como $\sigma^2 h / gkh = \tanh kh$, com ambos os termos plotados contra kh é possível observar que existe apenas um ponto de intersecção entre as funções do lado esquerdo e direito da equação, o que significa que só existe um valor de k que satisfaz a equação, característico a σ e h .

A partir da assertiva de que uma onda em propagação cobre uma distância igual ao seu comprimento L em um período de onda T e que $\sigma = 2\pi/T$ e $k = 2\pi/L$, obtém-se uma relação da velocidade de propagação da onda.

$$C^2 = \frac{\sigma^2}{k^2} = \frac{L^2}{T^2} = \frac{g}{k} \tanh(kh)$$

a partir da qual se obtém relações para o comprimento de onda:

$$L = L_0 \tanh(kh) \text{ e } C = \frac{L_0}{T} \tanh(kh)$$

onde $L_0 = gT^2/2\pi$, que corresponde ao comprimento de onda em águas profundas, onde kh assume valores altos e \tanh tende a 1. À medida que a onda se aproxima de regiões mais rasas, o valor de kh diminui e conseqüentemente o comprimento da onda diminui também. Várias simplificações das equações podem ser feitas ao analisar os valores extremos que a função tangente hiperbólica assume com os argumentos de valores extremos.

2.1.1 Energia de uma onda

As ondas carregam energia em duas formas: energia potencial, como se observa no movimento da SL e cinética como se observa no perfil de velocidades causadas pelo deslocamento de uma onda. Segundo a teoria linear das ondas a quantidade de energia disponível em uma onda na forma de energia cinética é igual à quantidade de energia disponível na forma potencial. A energia é dada por unidade de comprimento de frente de onda e integrada ao longo de um período de onda completo, sendo, portanto os valores da Eq. (2.19) dados em J/m^2 .

A velocidade de grupo é a velocidade com que um grupo de ondas que se propagam juntas possui quando se deslocam formando os trens de ondas. A energia se propaga pela superfície da água na velocidade de grupo, as ondas individuais aparentam aparecer e desaparecer ao longo do deslocamento (GARRISON, 2009). A Equação (2.19) mostra os fatores que influem nas quantidades de energia em uma onda:

$$E_p = E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad \therefore \quad E_M = E_p + E_c = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.19)$$

2.1.2 Reflexão de Ondas

Segundo McCormick (2010), a Eq. (2.2) de apresenta outra solução, descartada anteriormente, que pode ser obtida aplicando o princípio da superposição e resulta no potencial de velocidade do regime de uma onda estacionária. Considerando duas ondas de mesma amplitude e período, viajando sobre um fundo plano horizontal na mesma direção, mas em sentidos opostos, ou seja, uma viaja para a direita no plano xz enquanto a outra viaja para a esquerda, é possível aplicar o princípio da superposição nas equações de potencial de velocidade das duas ondas, obtendo uma nova equação que também é solução da equação de Laplace. A equação resultante desta operação descreve o potencial de velocidades de uma onda que não se desloca no espaço, ou seja, uma onda estacionária, o que é esperado já que ambas se deslocam com a mesma celeridade, mas em sentidos opostos. A soma dos potenciais de velocidade resulta na equação:

$$\Phi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{H_s g \cosh(k(z+h))}{2\sigma \cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\sigma t), \quad (2.20)$$

O mesmo vale para a equação da elevação da superfície livre. Durante o cruzamento das duas ondas, as formas das duas ondas se somam, anulando completamente a elevação da SL quando a crista de uma onda soma-se com a cava da outra onda e duplicando sua altura quando ambas as cristas sobrepõem-se, considerando duas ondas iguais seguindo a teoria linear. A Eq. (2.21) descreve a elevação da SL para o regime de ondas estacionárias.

$$\eta_s = \eta_1 + \eta_2 = H \cos(kx) \cos(\sigma t) = \frac{H_s}{2} \cos(kx) \cos(\sigma t) \quad (2.21)$$

onde H_S é altura da onda estacionária, equivalente ao dobro da altura das onda originais.

Nestas equações os termos temporais e espaciais são independentes, logo os pontos onde a elevação da SL é máxima (antinós) e os pontos onde a elevação é nula (nós) são fixos no espaço e determinados pelo comprimento da onda, sendo os nós localizados em $x = L/4, 3L/4, \dots$. Ondas estacionárias se formam com frequência em locais onde paredes verticais refletem completamente ondas incidentes do mar aberto.

Uma situação mais fiel às condições comuns na natureza seria a ocorrência de um regime intermediário, parcialmente estacionário, resultante da superposição de ondas incidentes e ondas parcialmente refletidas por obstáculos que absorvem parte da energia, como por exemplo, quebra-mares e praias (DEAN & DALRYMPLE, 1984). A superposição das ondas incidente e refletida é expressa pela Eq. (2.22) de elevação da SL, onde o termo ϵ é adicionado à equação da onda refletida, H_r , devido à defasagem relacionada ao processo de reflexão. Como a altura da onda refletida é diferente da altura da onda incidente, neste regime não existem nós verdadeiros no perfil da onda resultante.

$$\eta_t = \frac{H_i}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H_r}{2} \cos(kx + \sigma t + \epsilon) \quad (2.22)$$

Os valores máximos de η_t , para qualquer valor de x , formam um envelope de alturas de ondas, representados na Fig. 2.4 pela linha pontilhada, que consiste no máximo valor da elevação da SL para certo ponto x no espaço, registrado ao longo do tempo. As linhas traço-ponto (Fig. 2.4) representam a elevação da SL nestes instantes de tempo. A forma mais fácil de obter os valores de máximo e mínimo que formam o envelope é derivar a equação da elevação da SL para o regime quase estacionário e igualar a zero, que corresponde aos pontos de inflexão da curva. As posições onde ocorrem os mínimos são denominados quasi-nós, enquanto que a posição em que ocorrem os máximos são denominadas quasi-antinós.

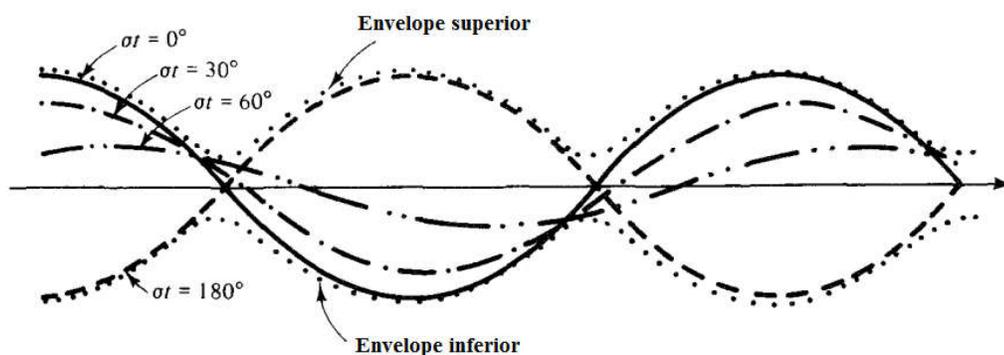


Figura 2.4 - Envelope formado pelos pontos de maior amplitude durante um regime de onda quase estacionário. Adaptado de Dean & Dalrymple, 1984.

2.1.3 Separação de um espectro de ondas

Como descrito anteriormente, quando uma onda atinge uma estrutura costeira ela reflete de volta, e causa um regime de ondas estacionárias ou parcialmente estacionárias, dependendo se a reflexão for total ou parcial. É possível então calcular a proporção com que uma determinada estrutura reflete as ondas de um estado de mar, estabelecendo um coeficiente de reflexão da estrutura. Isso se faz necessário para calcular a reflexão de energia de um sistema *onshore*, conforme explicada na seção 3.

Existem diversas técnicas desenvolvidas para divisão do espectro de onda em suas componentes incidente e refletida, a maioria baseada na transformada de Fourier. Segundo Mansard e Funke (1980) e Zhu (1999), uma das técnicas (aperfeiçoada por alguns autores como Thornton e Calhoun (1972) e Goda e Suzuki (1976)) utiliza 2 sondas posicionadas em linha paralela à direção de propagação da onda, em certo ponto do canal, coletando duas elevações da SL em pontos conhecidos e um ângulo de fase. De acordo com Mansard e Funke (1980) o método com duas sondas tem algumas limitações, tais:

- Espectro de frequências pequeno;
- Espaçamento das sondas crítico;

Para um espaçamento x e um comprimento de onda L , se $x/L = n/2$, para $n = 0,1,2,\dots$, os valores das reflexões passam a ser indeterminados devido a singularidades nas equações;

- Alta sensibilidade a erros de medição das ondas (interações não linearidades da onda e harmônicas devido à não linearidades);

Uma técnica melhor, de Mansard e Funke (1980), emprega 3 sondas na forma descrita anteriormente, em paralelo à propagação da onda e coletando elevação da SL e ângulos de fase, e utilizando o método de mínimos quadrados para minimizar erros na aquisição de dados da onda. Isaacson (1991), propõe ainda uma técnica que utiliza 3 sondas que coletam apenas as elevações da SL, dispensando as medições de ângulo de fase. O método empregado na metodologia deste trabalho, de autoria de Sousa et al. (2011) foi implementado com base no método de Mansard e Funke (1980), descrito a seguir.

O método divide o espectro de ondas incidente e refletido, para ondas irregulares assumindo 2 simplificações: a agitação irregular pode ser descrita como a sobreposição linear de um número infinito de componentes discretos, cada uma com sua fase, amplitude e frequência; estes componentes se propagam com velocidades de fase próprias, descritas pela relação de dispersão provinda da teoria linear das ondas (MANSARD E FUNKE, 1980; SOUSA et al., 2011).

Assim segundo Sousa et al. (2011), a elevação da SL nas 3 sondas podem ser descritas por:

$$\eta_m(t) = \sum_{j=1}^N B_j^m e^{-i\sigma_j t} \quad m=1, 2, 3 \quad (2.23)$$

onde B representa o coeficiente complexo da série de Fourier da função $\eta_m(t)$ correspondente à frequência angular σ , e N o número de coeficientes complexos. Estas elevações podem ser descritas como a soma de um número de ondas lineares incidentes e refletidas, com suas características próprias, como na equação,

$$\eta_m(x_m, t) = \sum_{j=1}^N (Z_I^j e^{ik_j x_m} + Z_R^j e^{-ik_j x_m}) e^{-i\sigma_j t} \quad m=1, 2, 3 \quad (2.24)$$

onde k é o número de onda à profundidade do canal e Z_I e Z_R são as amplitudes complexas das ondas incidentes e refletidas, respectivamente.

O erro desta operação, se não fossem efeitos não lineares e desvios de comportamento da teoria linear seria zero, como esta situação ideal não ocorre, Mansard e Funke (1980) utilizam o método de mínimos quadrados para minimizar a função erro:

$$\varepsilon_j^m = Z_I^j e^{ik_j x_m} + Z_R^j e^{-ik_j x_m} - B_j^m \quad m=1, 2, 3 \quad (2.25)$$

2.2 Dispositivos de conversão de energia das ondas

Diferentemente da energia eólica (que já pode ser considerada uma tecnologia estabelecida), existe uma variedade muito grande de tecnologias de conversão de energia das ondas, resultado das muitas formas que a energia (das ondas) pode ser absorvida, combinado à variedade de fatores locais (por vezes adversos) como profundidade, proximidade da costa, possibilidade de tempestades, etc, que diferenciam os dispositivos. O número de novos conceitos e tecnologias recentes ultrapassa o número de conceitos que estão sendo descontinuados (FALCÃO, 2010).

O processo básico de conversão de energia em um dispositivo de conversão de energia das ondas pode ser descrito de forma geral da seguinte maneira: a onda que carrega energia cinética e potencial, excita o sistema com uma força, causando movimento relativo entre um absorvedor e um ponto de reação, que pode agir diretamente ou através de um fluido de trabalho, movendo um gerador (BROOKE et al., 2003). Existem muitas formas de se classificar os dispositivos de conversão de energia das ondas, quanto à sua configuração espacial em relação à direção das ondas (absorvedores pontuais, dispositivos terminais e atenuadores), quanto ao local de instalação (costeiro, junta à costa, afastado da costa) ou princípio de funcionamento (coluna de água oscilante, dispositivos de galgamento, corpos oscilantes). A Figura 2.5 mostra alguns dispositivos dentro de uma classificação baseada sobretudo por princípio de funcionamento.

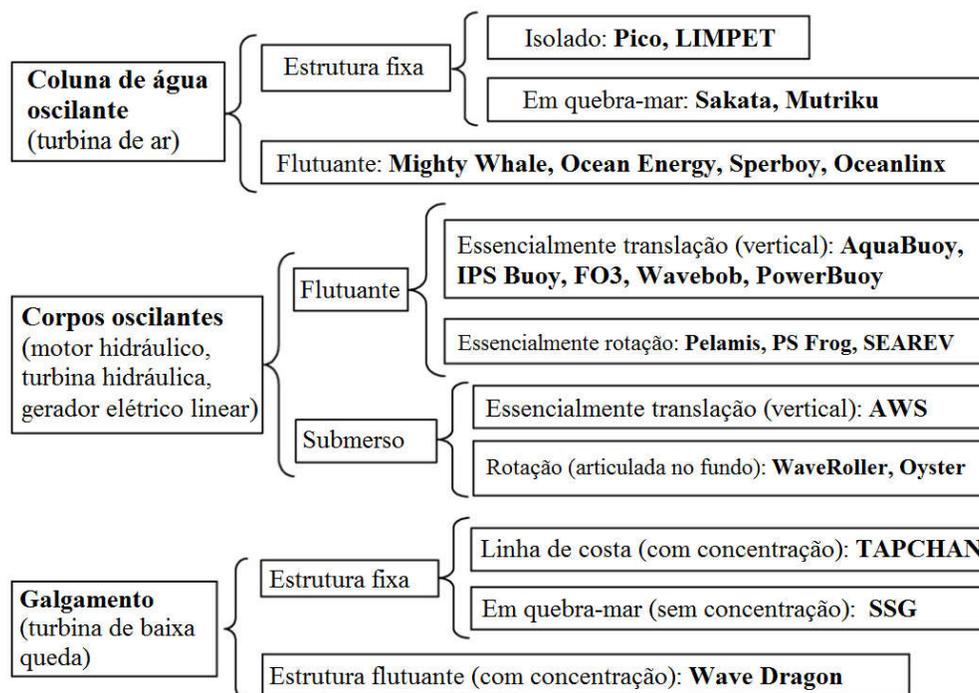


Figura 2.5 - Classificação de *WECs* baseada no princípio de conversão. Adaptado de: Falcão, 2010.

2.2.1 Dispositivo de coluna de água oscilante (CAO)

Segundo Falcão (2009), Yoshio Masuda pode ser considerado o pai da tecnologia moderna de energia de ondas, em função de seus estudos no Japão desde a década de 1940. Ele desenvolveu uma boia de navegação equipada com uma turbina de ar, alimentada por energia das ondas, que foi na verdade o que mais tarde foi nomeado como uma coluna de água oscilante (flutuante). O sucesso comercial da boia estimulou a construção em 1976, de uma plataforma flutuante, Kaimei, carregando vários CAOs com diferentes turbinas, com o propósito de ser uma unidade de testes. O projeto não foi um grande sucesso, devido ao estágio muito inicial do conhecimento técnico sobre a absorção de energia das ondas.

O dispositivo de coluna de água oscilante (CAO) compreende uma estrutura de concreto ou de aço parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície da água, dentro da qual o ar é aprisionado acima da SL de água (FALCÃO, 2010). A ação da onda faz com que o nível da coluna de água capturada suba e desça como um pistão que por sua vez comprime e descomprime a coluna de ar. Este ar aprisionado flui para e da atmosfera através de uma turbina fazendo com que ela gire e gere eletricidade através do uso de um gerador (GHOSH E PRELAS, 2011). A turbina Wells de fluxo axial, inventada em meados da década de 1970, tem a vantagem de não exigir válvulas de retificação, pois gira no mesmo sentido, independente da direção do fluxo de ar, assim o ar passa

pela turbina gerando eletricidade tanto na compressão quanto na sucção do ar. Ela tem sido usada na maioria dos protótipos (FALCÃO, 2010). A Figura 2.6 exemplifica estes WECs.

CAOs são mais comumente aplicados na linha da costa ou próximos (nearshore), sendo comum a aplicação em quebra-mares; já os tipos flutuantes e os instalados no fundo do mar são menos comuns. Falcão (2009) aponta ainda que a integração da estrutura de um CAO em um quebra-mar tem várias vantagens, a se destacar os custos de construção compartilhados e o acesso para a construção, operação e manutenção da usina de energia de ondas muito mais fácil. Alguns exemplos de protótipos em escala de aplicação são a planta de Pico (FALCÃO, 2000) em Porto Cachorro nos Açores, Portugal; a planta de LIMPET (QUB, 2002) na ilha de Isley, Reino Unido; e as plantas de Toftes, Noruega; Sakata, Japão; Vizhinjam, Índia; e a planta de OSPREY, Escócia, modelo fixo ao fundo que foi destruído pelo mar em 1995 (FALCÃO, 2010). Modelos flutuantes incluem: Mighty Whale, no Japão e os mais simples, Spar Buoy, e o Sloped Buoy, que consistem em tubos posicionados sobre a SL na vertical, ancorados com folga ao fundo do mar, ficando as boias livres para oscilar em relação à coluna de água (FALCÃO, 2010).

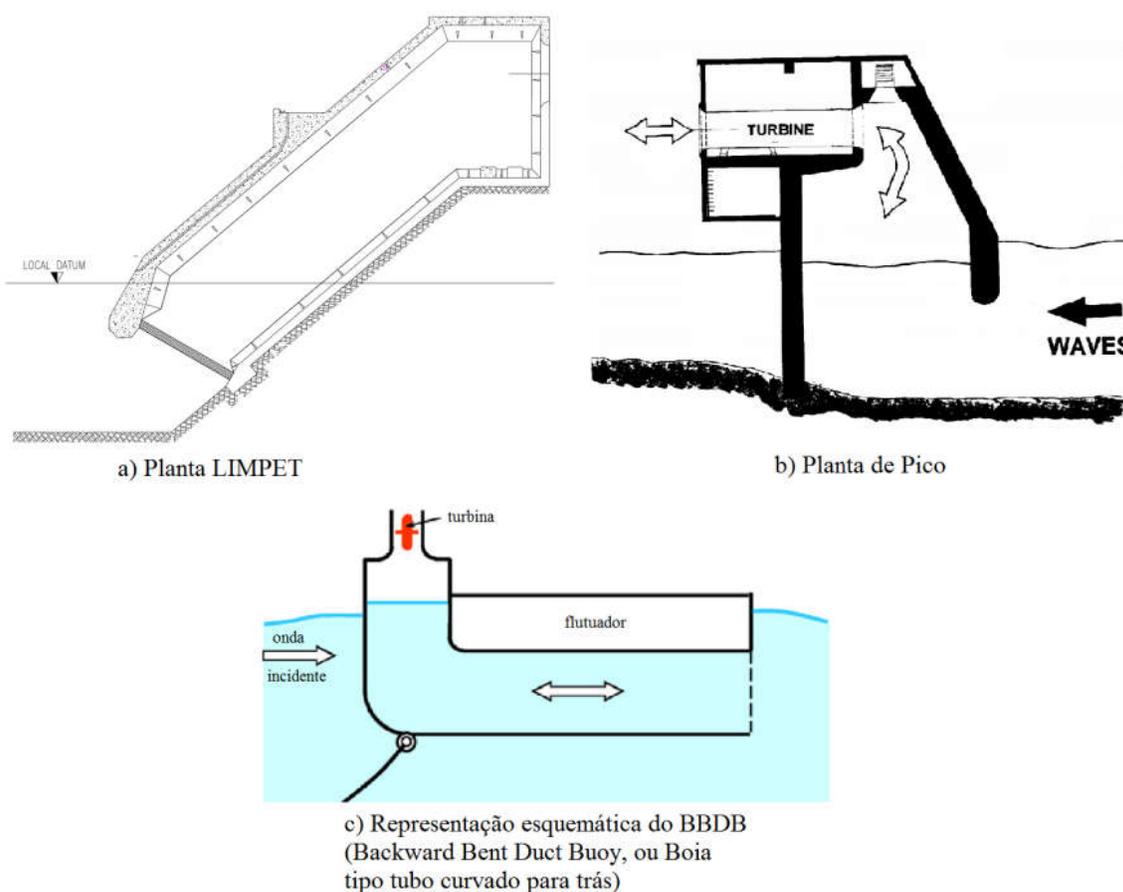


Figura 2.6 - Exemplos de CAO. a) LIMPET (QUB, 2002). b) Pico (FALCÃO, 2000). c) Esquema do tubo curvado para trás, tecnologia desenvolvida por Yoshio Masuda (FALCÃO, 2010).

2.2.2 Sistema de Corpos Oscilantes

São basicamente corpos oscilantes, flutuantes ou (mais raramente) totalmente submersos. Normalmente exploram os regimes de onda mais energéticos de águas profundas (tipicamente mais de 40 m de profundidade de água), apesar de que isso geralmente implica em maior grau de complexidade. Isto, juntamente com problemas adicionais associados à atracação, acesso para manutenção e necessidade de cabos elétricos submarinos longos, dificultou o seu desenvolvimento e só recentemente alguns sistemas atingiram ou aproximaram-se da fase de demonstração em grande escala (FALCÃO, 2010). Estes dispositivos convertem energia baseada no movimento relativo entre um corpo e um ponto de referência. Podem ser classificados em categorias conforme tipo de movimento, tipo de referência (fixa ou relativa) e submersão (ou flutuação). A divisão a seguir é a apresentada por Falcão (2009):

- Boias de oscilação de corpo único
- Boias de oscilação de corpo duplo
- Sistemas de oscilação totalmente submersos
- Dispositivos de arfagem
- Dispositivos articulados ao fundo

2.2.3 Dispositivos de Galgamento

Estes dispositivos convertem a energia das ondas através do armazenamento de uma porção de água da crista da onda em um reservatório, provocado por transbordamento da onda em um reservatório de nível pouco superior ao nível médio do mar circunvizinho. A energia potencial da água armazenada pode então ser utilizada para geração de energia elétrica por equipamentos bem próximos aos utilizados em plantas hidrelétricas tradicionais, mas empregando turbinas hidráulicas de baixa queda. A hidrodinâmica de dispositivos de galgamento é fortemente não linear, ao contrário da hidrodinâmica dos dispositivos anteriores (FALCÃO, 2010).

Os melhores exemplos de dispositivos deste princípio são o *Tapchan* (*Tapered Channel Wave Power Device*, ou dispositivo de energia da onda de canal cônico) e o *Wave Dragon*. O *Tapchan* consiste em um reservatório com coletor e conversor, construídos em uma encosta rochosa na Noruega. Durante o trajeto no canal progressivamente mais estreito as ondas tem a altura amplificada até ultrapassarem as paredes do canal (3 m de altura) e caírem dentro do reservatório em terra. O *Wave Dragon* é um dispositivo flutuante *offshore*, e diferente do *Tapchan*, a onda apenas galga em uma rampa, sem um canal cônico. O *Wave Dragon* usa dois refletores para concentrar as ondas para uma rampa onde as cristas são armazenadas em um reservatório acima do

nível do mar ao redor do dispositivo, passando então pela turbina de baixa queda (FALCÃO, 2010). Estes dispositivos podem ser observados na Fig. 2.7.

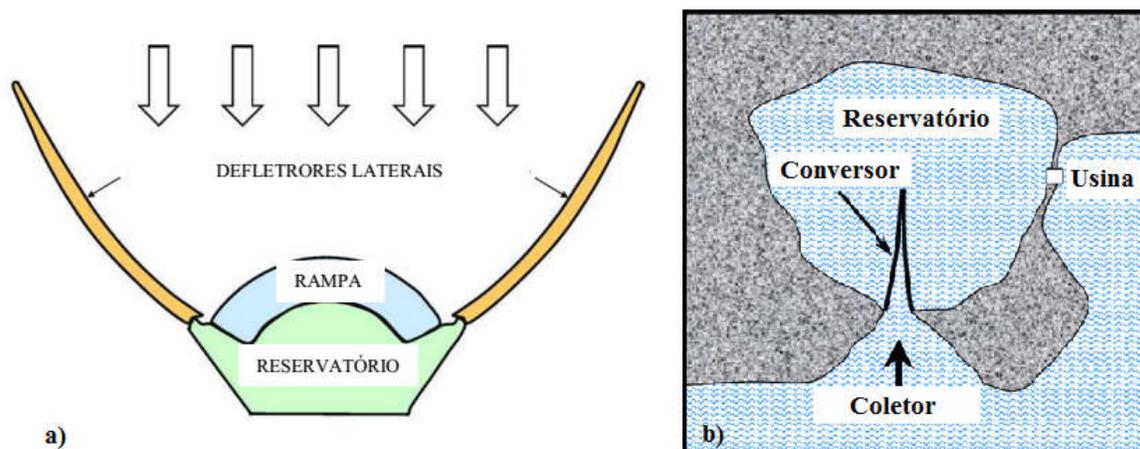


Figura 2.7 - a) Dispositivo de galgamento *Wave Dragon*. Fonte: Falcão (2009) apud Torres, 2015. b) Esquema da planta Tapchan (Falcão, 2010, tradução).

2.3 Estado da Arte

A pesquisa de dispositivos tipo CAO para geração de energia elétrica foi realizada amplamente por diversos autores desde 1940 com os estudos pioneiro de Yoshio Masuda, considerado pai da tecnologia por alguns autores, entre eles Falcão (2010). A princípio foram realizadas algumas modelagens analíticas, como McCormick (1976), que estudou a conversão de energia pneumática em conversores tipo flutuante, e Evans (1978) que elaborou um modelo para dispositivos fixos, considerando o movimento da água dentro da câmara como um pistão rígido e sem massa, aplicando a teoria de corpos oscilantes. Evans ignorou a variação espacial da elevação dentro da câmara ao considerar a dimensão estreita da câmara muito menor que o comprimento da onda. Falcão e Sarmiento (1980), Evans (1982) e Falnes e McIver (1985) melhoraram a abordagem de corpo rígido permitindo variação de pressão na SL e a possibilidade de variação espacial da elevação da SL. Estes modelos analíticos se baseiam no princípio de fluxo potencial e são limitados a ondas regulares e geometrias simplificadas. Assim, dentro da prerrogativa do fluxo potencial alguns autores utilizaram modelos numéricos usando o método de elementos de contorno para resolver geometrias mais complexas, como Delauré e Lewis (2003) e Josset e Clément (2007).

Mais recentemente, pesquisadores desenvolveram modelos computacionais que permitem calcular as fortes não linearidades envolvidas nas interações onda-estrutura baseados nas equações *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)* e equações de fase *Volume of Fluid (VOF)*. Estes modelos levam em consideração as forças viscosas, turbulência e formação de vórtices, podendo simular ondas de grande amplitude, rebentação e galgamento. Horko (2007) validou um modelo de

tanque de onda numérico 2D com o sistema CAO completo utilizando *software* comercial FLUENT®, investigando o efeito da forma da abertura da câmara na eficiência de conversão de energia. Liu et al. (2009) apresentou uma simulação numérica bifásica utilizando *VOF*, embutida com módulos de modelagem de orifício e de mídia porosa para investigar a elevação da onda, variação de pressão dentro da câmara e a velocidade do fluxo de ar no duto. Lopez et al. (2014) desenvolveu um modelo numérico 2D usando o código comercial CFD Star-CCM+ e validou seu modelo comparando com dados experimentais de pressão diferencial da câmara e vazão de ar para estudo sob ondas regulares e irregulares. Estudos em modelos 3D também foram realizados, como o de Iturrioz et al. (2015) que desenvolveu um modelo usando o código aberto IHFOAM para estudar a hidrodinâmica e pneumática em torno de um CAO após validar seu modelo com experimentos em tanques de ondas.

Uma grande parte da pesquisa em dispositivos CAO se dedica a estudar a influência de diversas características da geometria das câmaras dos dispositivos na hidrodinâmica e no desempenho da conversão de energia, como ângulo das paredes, largura da câmara, profundidade de imersão da parede frontal, espessura da parede frontal, formas complexas, etc. Hong et al. (2007) usou dados experimentais e um modelo de fluxo potencial 2D de um CAO para investigar a influência de diversos parâmetros de forma, como profundidade de imersão e espessura da parede frontal, largura da câmara, diâmetro de duto da turbina e ângulo do fundo da câmara, e verificou que o pico e a frequência de absorção mudam drasticamente com a variação dos parâmetros. Simonetti et al. (2017) realizou investigações similares utilizando um modelo 3D em OPENFOAM.

Diversos autores analisaram os efeitos da inclinação das paredes na conversão de energia dos CAO's, como Bouali e Larbi (2013), Iino et al. (2016), Chang et al. (2016) e Mahnamfar e Altunkaynak (2017), entre outros parâmetros geométricos. Bouali e Larbi (2013), utilizaram o pacote comercial ICEMCFD & CFX em simulação *RANS-VOF* 2D para investigar e otimizar um CAO, focando-se na geometria da parede frontal, principalmente na sua imersão, inclinação contra ou a favor à direção do fluxo, e sua forma, e concluíram que a melhor forma de parede testada foi a parede com uma quebra a 90° e também que profundidade de imersão da parede frontal é um dos fatores mais importantes no projeto da câmara do CAO.

Iino et al. (2016) estudou o efeito da variação da inclinação em um CAO cilíndrico utilizando um modelo de corpo-rígido e observou que o período de ressonância é aumentado conforme a inclinação diminui da vertical até ângulos menores. Mahnamfar e Altunkaynak (2017) utilizaram experimentos físicos e modelos numéricos (*RANS-VOF*) para testar a variação de largura, comprimento e ângulo da parede frontal de dispositivos CAO, bem como a adoção de uma versão com utilização de raios de arredondamento, que mostrou bons ganhos frente à versão original.

Geometrias diferentes também foram propostas em estudos como os de Ning et al. (2017), Boccotti (2007) e Vyzikas et al. (2017). Ning et al. (2017), utilizou um modelo 2D com método de elementos de contorno de alta ordem (HOBEM) para investigar os efeitos da variação de geometria em um CAO de câmara dupla, variando largura das câmaras e a profundidade de imersão e espessura das paredes. Boccotti et al. (2007) propôs o acréscimo de uma parede extra à frente da entrada da água no CAO, fixa ao fundo do dispositivo, desenho que chamou de U-CAO, e verificou ganhos em período de resposta e potência. Vyzikas et al. (2017), ampliou a análise de Boccotti et al. (2007) comparando não só a geometria tradicional do CAO com o U-CAO, mas acrescentando planos inclinados para direcionar o fluxo para a profundidade da entradas dos dispositivos de maneira mais suave, confirmando as conclusões do autor anterior e melhorando o desempenho do U-CAO através da alteração de geometria proposta.

A maioria dos autores analisa o desempenho dos diversos CAO's comparando diversos dados relacionados à conversão de energia, como a elevação da coluna de água na câmara dos dispositivos, a pressão desenvolvida, ou ainda a velocidade ou vazão do ar através dos dutos nas câmaras, nos trabalhos que usam orifícios para representar os amortecimentos provocados pelas turbinas. Alguns autores, como Tseng et al. (2000), Folley e Whittaker (2002), Fleming et al. (2012) e Elhanafi et al. (2016), discutidos a seguir, propõem uma análise energética, analisando as quantidades de energia que são transformadas nos dispositivos em diversas etapas e formas do escoamento, em uma cadeia de transformações. Esta análise oferece a vantagem de mostrar claramente os ganhos e perdas da cada geometria, se por reflexão ou turbulência/viscosidade, e evidenciando a quantidade de energia útil frente a total que poderia ser aproveitada.

A energia incidente em um CAO, proveniente das ondas, se encontra na forma de energia mecânica (cinética e potencial). Ao incidir sobre o aparelho é convertida em energia pneumática e em seguida em energia elétrica por conjunto turbina-gerador, que pode então ser ligada à rede de distribuição. Normalmente a turbina empregada nesta aplicação é do tipo Wells, pela propriedade que elas têm de girar no mesmo sentido independente do sentido do fluxo de ar, permitindo ao CAO economia de custo por dispensar um sistema mais complexo de válvulas.

Como a energia se encontra na forma oscilatória os fenômenos ondulatórios típicos estão envolvidos na cadeia de transformações energéticas, como refração, reflexão, difração e rebatimento além das perdas típicas de fluidos, como perdas por turbulência e viscosidade e a possibilidade de acoplamentos dinâmicos de fluido-estrutura como a influência do amortecimento imposto ao sistema pelas turbinas na conversão de energia onda-pneumática. Analisar a cadeia de transformações de energia que ocorrem no sistema (CAO e vizinhança direta) é de suma importância para se compreender como e onde as perdas energéticas ocorrem, e a partir destes

determinar a eficiência do sistema e propor alterações que promovam a melhora da eficiência energética do sistema. É possível realizar um balanço energético em um volume de controle ao redor do CAO, e propor uma cadeia de energia que descreva todas as transformações de energia envolvidas no processo de conversão do dispositivo.

Através desta análise (do balanço de energia através de um volume de controle), alguns autores propuseram prováveis cadeias energéticas, identificando os destinos e os mecanismos de armazenamento de energia do processo. Em um estudo, Tseng et al. (2000) identificou um mecanismo de armazenamento de energia na coluna de água oscilante, uma parcela de energia que não é extraída pela turbina, mas que pode ser facilmente observada, bem como três outras saídas de energia do sistema: energia perdida (maior parte em perdas viscosas), energia refletida, e energia pneumática, que o autor subdivide em energia efetiva e rejeitada (perdas da turbina), resultando na cadeia energética da Fig. 2.8.

Já Folley e Whittaker (2002), expressam a cadeia energética de forma mais concreta e direta (Fig. 2.9), identificando os fenômenos de perda, armazenamento e saída de energia, que podem ser observados nos testes em laboratório e plantas piloto já instaladas, como Pico e LIMPET. Estes fenômenos importantes são o escoamento subindo e descendo sobre a parede frontal do CAO, chamados neste trabalho apenas de *run up* e *run down*, a inclinação da SL da água dentro da coluna oscilante, aqui chamada pelo termo inglês *sloshing*, e a oscilação vertical da coluna de água dentro da câmara, chamada em inglês de *heave*. Todos estes fenômenos podem se enquadrar conforme a cadeia de Tseng et al. (2000), como perdas viscosas, energia refletida ou armazenada (ou uma combinação destes).

O modelo de Folley e Whittaker (2002) apresenta mais detalhes, sendo melhor em comparação ao modelo de Tseng et al. (2000) no aspecto de identificar com precisão os eventos que estão envolvidos direta ou indiretamente nas conversões de energia e relações entre si. Já a cadeia energética de Tseng et al. (2000) privilegia a observação das transformações da energia, sem identificar as causas dos fluxos energéticos e suas relações diretas/indiretas.

Uma visão mais rebuscada da cadeia proposta por Tseng et al. (2000) é a utilizada por Elhanafi et al. (2016) em sua análise numérica do balanço energético de um CAO *onshore*, na qual há uma melhor separação das quantidades de energia através da cadeia. Nela identifica-se, por exemplo, que a energia absorvida pelo CAO engloba as perdas energéticas, a energia pneumática e o armazenamento de energia potencial no movimento vertical da coluna de água dentro do CAO, ao passo que na cadeia utilizada por Tseng et al. (2000) a energia incidente é diretamente dividida em energia refletida, energia do CAO, energia pneumática e energia perdida, sem apreciar o encadeamento da forma que o outro autor faz.

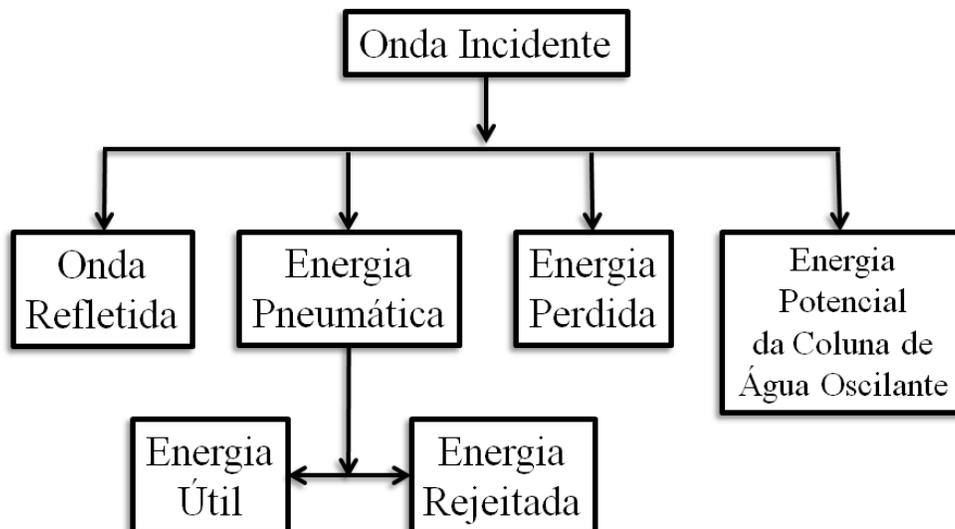


Figura 2.8 - Diagrama da cadeia energética segundo Tseng et al. (2000).

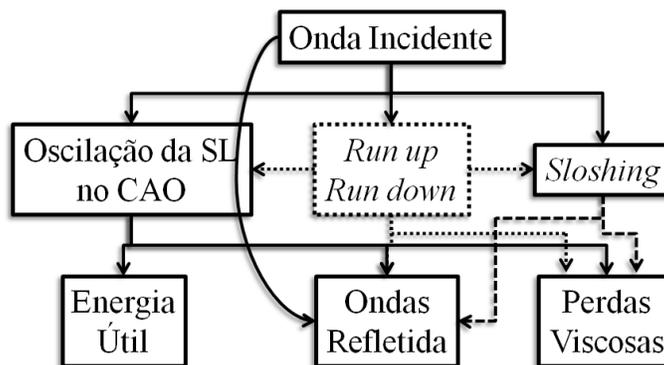


Figura 2.9 - Diagrama da cadeia energética no volume de controle segundo Folley e Whittaker (2002).

A Figura 2.10 mostra a cadeia conforme Elhanafi et al. (2016). Observa-se o emprego de coeficientes de eficiência para avaliar o desempenho de cada transformação de energia na cadeia, inclusive de coeficientes gerais ($C_{Overall}$ e $C_{Internal}$, ou conversão global e interna de energia, respectivamente) considerando ou não a energia refletida antes de entrar no sistema. Este tipo de apresentação simplifica a avaliação da eficiência de um dispositivo CAO, pois só apresenta o aspecto mais facilmente mensurável das trocas de energia no sistema, sem especificar todos os fenômenos ou os efeitos que ocorrem mais de uma vez em locais diferentes. Por outro lado, uma cadeia na forma como Folley e Whittaker (2002) apresentam prioriza os fenômenos físicos que ocasionam as trocas, logo, apesar de dificultar a análise, promove uma melhor visualização dos fenômenos que são benéficos, prejudiciais ou indiferentes ao processo de conversão de energia das ondas, sendo melhor sob um aspecto construtivo.

Uma versão mais completa de cadeia energética para um CAO, baseado na cadeia de Folley e Whittaker (2002), é apresentada por Fleming et al. (2012), Fig. 2.11. Em relação à cadeia original, esta apresenta uma etapa adicional entre a oscilação da coluna de água e a retirada de potência, a diferença de pressão, que permite acrescentar a relação de *slosh* da água à geração de diferença de pressão, e o acréscimo de vórtices como um mecanismo de armazenamento de energia. É importante esclarecer que as perdas energéticas descritas por Tseng et al. e Elhanafi et al. englobam as perdas viscosas, por turbulência e formação e transporte de vórtices. Segundo Fleming et al. (2012), o fato de que o CAO não é capaz de converter a energia do vórtice, nem indiretamente, é suficiente para considerar os vórtices como perda de energia nos sistemas dos CAOs.

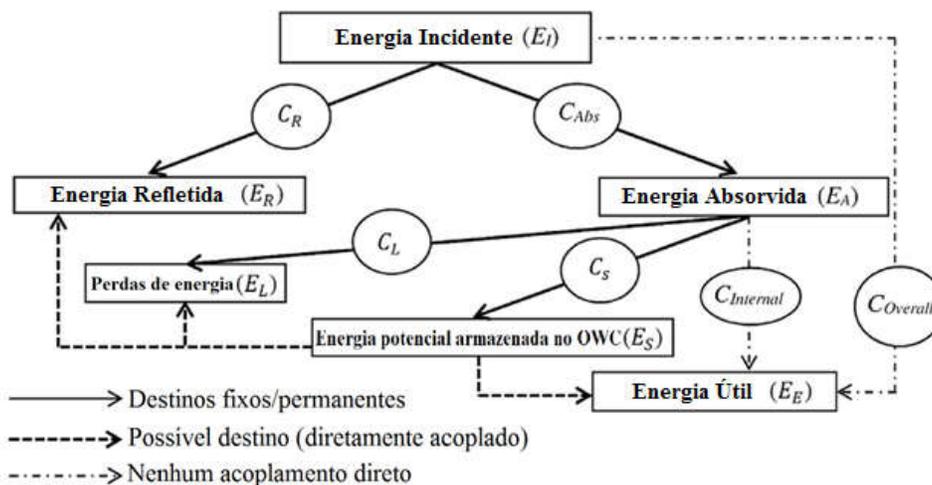


Figura 2.10 - Cadeia energética de um CAO onshore, adaptado de Elhanafi et al. (2016).

Baseado na cadeia de Elhanafi et al. (2016), Fig. 2.10 foi proposta uma cadeia energética mais simples para ser utilizada na metodologia deste trabalho, como mostra a Fig. 2.12. Esta cadeia procura eliminar a dificuldade de se trabalhar com parcelas de energia de entrada e saída no sistema e energias que se acumulam no sistema (armazenamento de energia potencial), já que foi observado que a parcela de energia potencial armazenada na oscilação de coluna de água não segue exatamente a cadeia energética proposta por Elhanafi et al. (2016), visto que ao se contabilizar esta parcela de energia muitos dos casos resultaram em parcelas de energia perdida impossíveis (negativas).

O conceito de energia potencial armazenada na oscilação da coluna de água oscilante não está incorreto, entretanto esta parcela de energia está constantemente recebendo e retransmitindo energia de diversas formas ao longo dos diversos fenômenos e ao longo do tempo, sendo na realidade uma parcela de energia interna ao sistema, e se incluída na contabilização de entradas e saídas de energia do sistema resulta em um total maior que as entradas de energia (onda incidente).

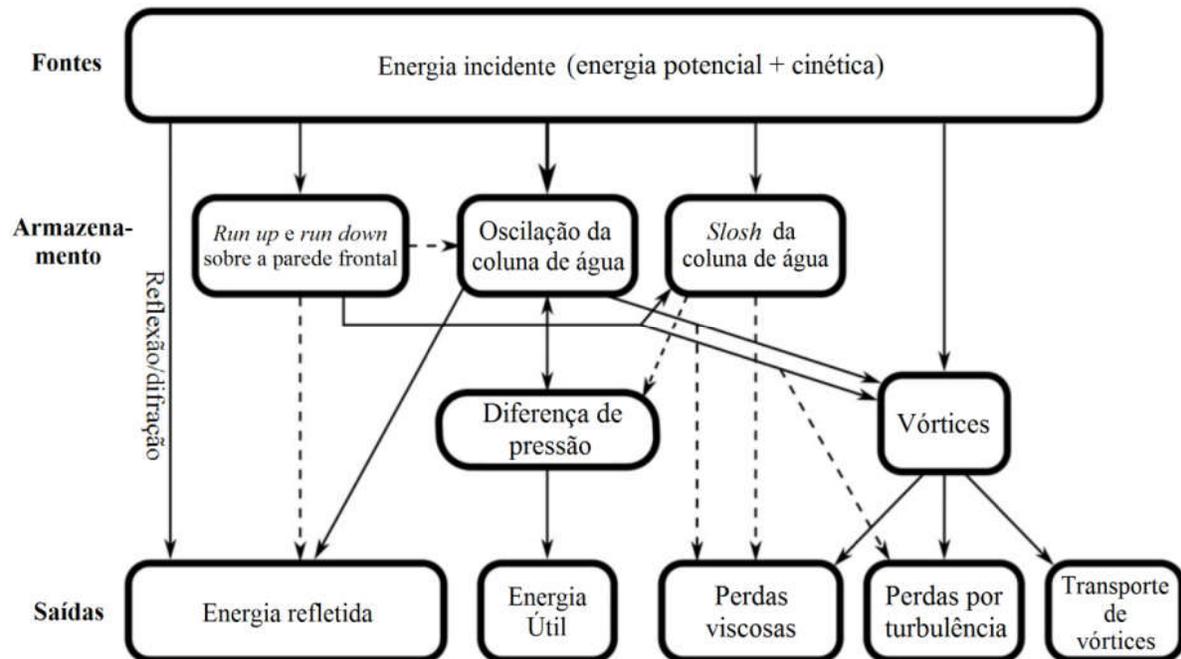


Figura 2.11 - Cadeia energética para um dispositivo CAO, adaptado de Fleming et al. (2012). Linhas tracejadas representam relações em que se espera menor conteúdo de energia.

Separar e quantificar corretamente estas parcelas de energia armazenadas no sistema é muito difícil, dada a grande variação de destinos para esta energia e a variação destas ao longo de um período completo de onda no dispositivo. É mais aconselhável contabilizar os fluxos de energia externamente (apenas entradas e saídas) sendo que a simplicidade do processo garante maior confiabilidade aos resultados. Os fenômenos de armazenamento podem ser contabilizados apenas em termos de amplitude e estudados à parte.

Na Figura 2.12, se observa que a cadeia identifica as parcelas utilizadas para avaliar os balanços de energia do sistema como energia incidente (E_I), energia pneumática (E_P) e energia perdida (E_L), que engloba perdas por viscosidade, turbulência e formação e transporte de vórtices. Para determinar a energia incidente, E_I , sobre o CAO se expressa a energia da onda incidente em termos do quadrado da altura da onda, H^2 , através da Eq. (2.26) em J/m, utilizando a teoria linear:

$$E_I = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \left[\frac{\text{J}}{\text{m}} \right] \quad (2.26)$$

onde ρ é a massa específica da água em kg/m^3 , g é a constante gravitacional em m/s^2 , H é a altura da onda e L é o comprimento da onda em m.

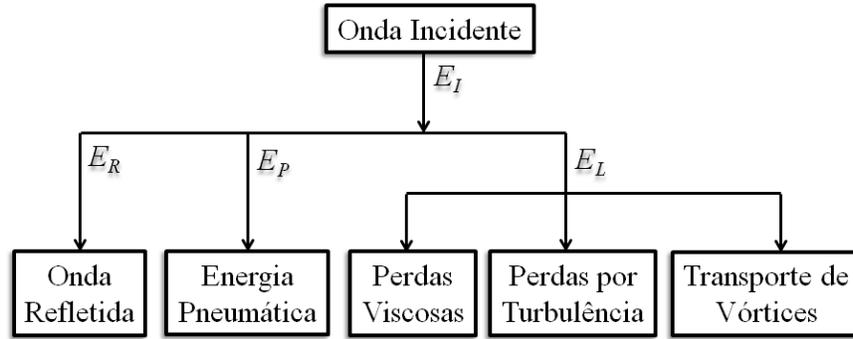


Figura 2.12 – Cadeia energética de um CAO *onshore* conforme utilizada na metodologia aplicada.

Por conta da reflexão da onda, parte da energia retorna ao mar, e segundo Elhanafi et al. (2016), a energia incidente no sistema pode ser escrita como a soma da energia refletida pelo sistema e a energia absorvida pelo sistema, conforme a Eq. (2.27), baseado no princípio da conservação da energia:

$$E_I = E_R + E_A \left[\frac{\text{J}}{\text{m}} \right] \quad (2.27)$$

onde E_R é a energia refletida pelo sistema, E_A é a energia absorvida pelo sistema.

Todas as energias (incidente, refletida e armazenada pelo sistema) ocorrem na forma de ondas com energia potencial e cinética proporcionais à altura da onda, o que possibilita trabalhar utilizando as relações entre as quantidades de energia com coeficientes proporcionais à altura da onda, como o coeficiente de reflexão, e o fator de amplificação. Desta forma, baseado na teoria linear das ondas (TSENG et al., 2000, ELHANAFI et al., 2016):

$$\frac{E_R}{E_I} = \frac{\frac{1}{8} \rho g H_R^2 L}{\frac{1}{8} \rho g H_I^2 L} = \left(\frac{H_R}{H_I} \right)^2 = C_R^2 = K_R \quad (2.28)$$

onde C_R é o coeficiente de reflexão da onda, K_R é o coeficiente de reflexão de energia. Assim a energia absorvida também pode ser expressa como:

$$E_A = E_I - E_R = E_I(1 - C_R^2) = E_I(1 - K_R) \left[\frac{\text{J}}{\text{m}} \right] \quad (2.29)$$

A energia absorvida pelo sistema engloba a energia pneumática extraída e as perdas energéticas. Expandindo E_A tem-se (Eq. (2.31)):

$$E_A = E_P + E_L \left[\frac{\text{J}}{\text{m}} \right] \quad (2.30)$$

$$E_I = E_R + E_P + E_L \left[\frac{\text{J}}{\text{m}} \right] \quad (2.31)$$

onde E_P é a energia pneumática e E_L é a energia perdida pelo sistema.

A energia pneumática extraída pela turbina na câmara pode ser determinada de algumas formas diferentes, com base nas propriedades da turbina utilizada e na metodologia de aquisição de dados. De maneira geral a potência desenvolvida pela turbina é determinada pelo produto da diferença de pressão instantânea entre o interior da câmara e a pressão atmosférica externa e a vazão volumétrica através da turbina. Como o interesse maior está no trabalho e não na potência da turbina, a fim de manter as unidades iguais, a energia instantânea pneumática pode ser calculada através da integral (ELHANAFI et al., 2016):

$$E_P = \frac{1}{l} \int_0^T \Delta P(t) Q(t) dt \left[\frac{J}{m} \right] \quad (2.32)$$

onde ΔP é a diferença de pressão do ar entre o interior da câmara e a atmosfera em Pa, Q é a vazão volumétrica de ar causada pelo deslocamento da SL dentro da câmara em m^3/s e l é a largura da parede frontal (paralelo à frente de onda).

Então reaplicando o princípio de conservação de energia aplicado pela Eq. (2.30) é possível calcular a energia perdida pelo sistema:

$$E_L = E_A - E_P \left[\frac{J}{m} \right] \quad (2.33)$$

Por fim, a eficiência energética geral, energia pneumática sobre a energia incidente é dada pela expressão:

$$Eficiência = \frac{E_P}{E_I} \quad (2.34)$$

2.4 Aplicação de *RANS-VOF* à simulação de ondas

Os testes são realizados por meio de um modelo numérico de método de volumes finitos através do programa dedicado FLUENT, baseado em um modelo matemático de escoamento de um fluido incompressível, contínuo e isotrópico descrito pelas equações diferenciais parciais de Navier-Stokes, que permite determinar os campos de velocidade e pressão do escoamento, explícito pelas equações (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995; DIDIER et al., 2016):

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2.36)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.37)$$

onde $i, j = 1, 2$ para um escoamento 2D, ρ é a massa específica do fluido, u são os componentes da velocidade, p é a pressão e μ é a viscosidade dinâmica e o termo τ_{ij} é chamado de tensor de tensão viscosa.

Para representar o escoamento dos dois fluidos, necessário para a simulação do escoamento de um tanque de ondas, é utilizado um modelo *VOF*, expresso pela Eq. (2.38). Este modelo pode ser utilizado quando as fases do escoamento não são interpenetrantes (imiscíveis). Para cada nova fase, uma nova variável é adicionada ao modelo, a fração de volume das fases para cada volume de controle do domínio. Neste modelo a fração volumétrica, representada por α , deve somar 1 para cada volume de controle, assumindo na metodologia descrita aqui o valor 0 para a fase do ar e 1 para a fase da água, e qualquer valor entre 0 e 1 representa uma proporção das duas fases naquele volume. O valor que localiza a posição da SL é $\alpha = 0.5$ (FLUENT, 2016). Com base no valor local de α , as propriedades e variáveis apropriadas são atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio (FLUENT, 2016).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (2.38)$$

Conjuntamente com este método se utilizou o esquema de cálculo de interface *geometric reconstruction* (reconstrução geométrica, ou *geo-reconstruct*) que assume que a interface entre as duas fases tem uma forma linear dentro de cada volume, calculando primeiramente a posição da interface linear em relação ao centro do volume cujo α tem valor entre 0 e 1, baseado neste valor e nas derivadas deste volume. Então as quantidades advectivas de fluido são calculadas através de cada face usando a representação linear da interface e a distribuição da velocidade normal e tangencial em cada face, e finalmente, recalcula-se a fração volumétrica em cada volume usando o balanço de fluxo calculado no passo anterior (FLUENT, 2016).

Em um escoamento turbulento, a velocidade pode ser expressa como a soma de um valor médio com um flutuante.

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.39)$$

onde os termos sob barra são os valores médios, os termos com apóstrofos são os valores flutuantes e os termos sem barras ou apóstrofos são os valores instantâneos. Assim, estas equações são aplicadas decompondo os campos de velocidade e pressão (entre outros escalares) em valores médios (temporal) mais um valor flutuante, sendo agora chamadas pelo termo inglês *Reynolds-Averaged Navier Stokes*, como a Eq. (2.40) (FLUENT, 2016):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij}] + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.40)$$

que deu origem a termos adicionais, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, associados à turbulência e chamados de Tensor de Reynolds (do inglês, *Reynolds stress*). Logo é necessário adicionar equações que modelem a turbulência do escoamento para que seja possível balancear os números de incógnitas e equações do sistema do modelo matemático, permitindo resolvê-lo. Este fato é comum e inerente ao processo de *averaging*. Um método comum aplicado para relacionar o tensor de Reynolds ao gradiente de velocidades é a hipótese de Boussinesq, Eq. (2.41), usada em diversos modelos de turbulência, entre eles o modelo utilizado durante os testes, o modelo κ - ε , que tem custo computacional relativamente baixo no que se refere ao cálculo do termo de viscosidade turbulenta, μ_t (FREIRE et al., 2002, FLUENT, 2016).

$$-\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}(\rho \kappa) \delta_{ij} \quad (2.41)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker e κ é o termo de energia cinética turbulenta.

O modelo de turbulência κ - ε utiliza duas equações de transporte extras, uma para o termo de energia cinética da turbulência, κ , e outra para a taxa de dissipação da turbulência, ε , sendo μ_t calculado como função de κ e ε . Estas equações são (LISBOA, 2016; FLUENT, 2016):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \varepsilon + S_\kappa \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon G_\kappa}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (2.43)$$

onde G_κ representa a geração de energia cinética de turbulência causado pelos gradientes de velocidade médios, $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes de valor padrão (conforme utilizado) 1.44 e 1.92, respectivamente, determinados através de experimentação para escoamentos comuns como os de camada limite, mistura de camadas e escoamentos de jatos. σ_κ e σ_ε são os números de Prandtl de turbulência para κ e ε , respectivamente, com valores 1.0 e 1.3, respectivamente. Por este modelo, o termo de viscosidade turbulenta fica definido pela Eq. (2.44):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2.44)$$

onde C_μ é uma constante de valor 0.09.

3. METODOLOGIA

A metodologia apresentada neste capítulo organiza-se dividida em partes que descrevem os métodos utilizados conforme sua aplicação específica no cumprimento dos objetivos propostos na introdução.

O programa ANSYS FLUENT[®] foi usado para simular a ação de ondas em um canal 2D incidindo sobre diferentes dispositivos do tipo CAO, sendo os regimes de ondas implementados através de uma UDF (*user defined function*) de autoria de Didier (DIDIER et al., 2016).

As formas de referência para as análises foram idealizadas com base nas plantas de CAO de Pico, (Falcão, 2000) e LIMPET (QUEEN'S UNIVERSITY OF BELFAST (QUB), 2002), como mencionado anteriormente. O caso A, baseado na planta de Pico possui paredes verticais na câmara, enquanto que o caso B, baseado no LIMPET possui as paredes da frontal e posterior da câmara inclinadas em 40° com a horizontal, enquanto que o caso C ainda apresenta uma quebra adicional de angulação 60°, vide Fig. 3.1.

As geometrias propostas foram avaliadas por diversas combinações de ondas em altura e período, possibilitando avaliar a dependência de diversos efeitos com as características da onda, como reflexão, *run up*, *sloshing*, altura da oscilação da coluna de água na câmara hidropneumática, eficiência da conversão, perdas energéticas, etc. Foram testadas 4 alturas de onda, em intervalos de 0.5 m, de 1.0 m a 2.5 m, e períodos de onda em intervalos de 3 s, de 6 s a 12 s, totalizando 36 simulações. À profundidade simulada, 10 m, a onda de 6 s possui 48.4 m, a de 9 s possui 81.7 m e a de 12 s possui 113.3 m de comprimento.

Para manter um critério de comparação, as geometrias foram adaptadas de forma a manter o mesmo volume de ar dentro da câmara e profundidade da parede frontal (2.5 m). A largura e profundidade do canal de 10 m e a espessura da parede frontal também foram os mesmos em todos os casos. Todas as simulações foram executadas levando em consideração uma turbina Wells com amortecimento característico (k_t) de 50 Pa.s/m³.

Os resultados obtidos nas simulações bidimensionais são idealizados no âmbito tridimensional, ou seja, desconsidera-se o efeito da difração da onda ao longo da largura do equipamento (direção da largura de frente de onda). O desempenho de um dispositivo de 10 m de largura é simulado multiplicando-se o valor da vazão da largura unitária (bidimensional) pela largura de 10 m, resultando no valor tridimensional usado no cálculo da pressão imposta nas câmaras dos dispositivos.

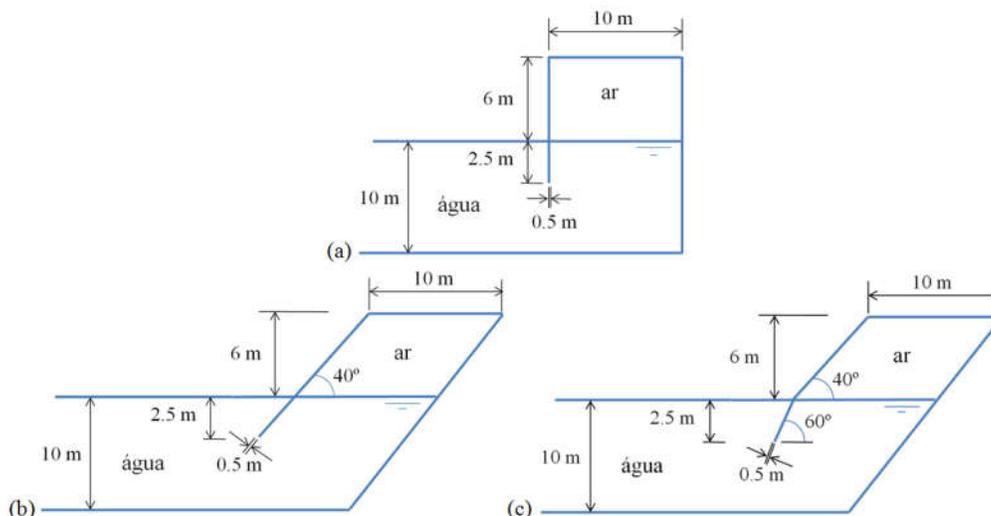


Figura 3.1 - Dispositivos do tipo CAO. a) caso A: forma do Pico, b) caso B: forma simplificada do LIMPET, c) caso C: forma do LIMPET.

Os dados de elevação, vazão e pressão na câmara de todos os casos foram coletados a fim de determinar características e comportamentos hidrodinâmicos gerais (*run up*, *sloshing*), reflexão das estruturas e desempenho energético (potência e cadeia energética), como melhor descrito na seção 3.2.

3.1 Modelo Numérico

A simulação foi realizada no FLUENT utilizando modelo bidimensional incompressível *VOF-RANS* (*Volume of Fluid - Reynolds Averaged Navier-Stokes*), descrito pelas Eqs. (2.35) e (2.36) e pelo modelo de turbulência κ - ϵ (Eqs. (2.42) e (2.43)), com solver *SIMPLEC* (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent*), discretização espacial da pressão *PRESTO!* (*PREssure STaggering Option*), esquema de interpolação de 3ª ordem *MUSCL* (*Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservations Laws*), e *geo-reconstruct*, com termos de relaxamento padrão do software, conforme a Tab. 3.1.

A Figura 3.2 esquematiza, de forma simplificada, as condições de contorno (CC) utilizadas nas simulações dos casos para resolução do sistema de equações do modelo de volumes finitos. As CC em um problema de volumes finitos são necessárias para se obter um número de equações e incógnitas iguais e possibilitar a resolução do sistema de equações de conservação. As condições de contorno utilizadas são todas do tipo variável prescrita.

Tabela 3.1 – Coeficientes de relaxamento de solução do sistema de equações governantes

Coeficientes de sub-relaxamento	
Pressão	0.3
Quantidade de movimento	0.7
Massa específica, forças de volume e viscosidade turbulenta	1
Energia cinética e taxa de dissipação de turbulência	0.8

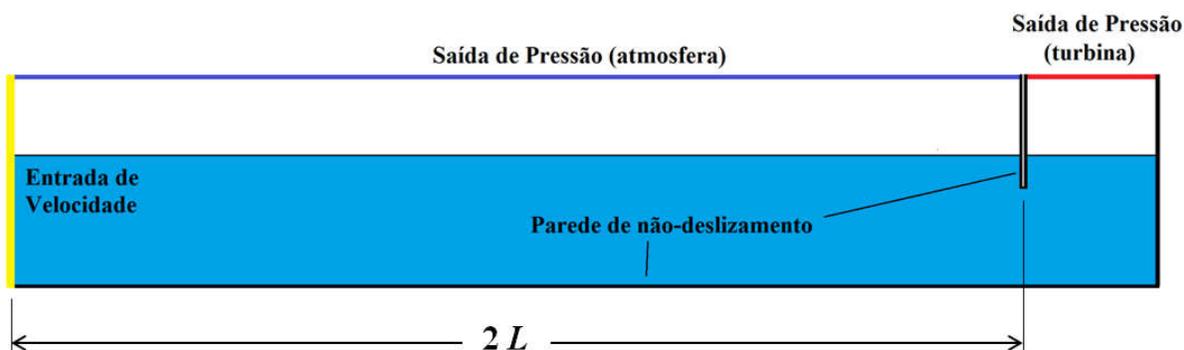


Figura 3.2 - Esquema das condições de contorno do domínio computacional.

A CC de saída de pressão (atmosfera) é uma condição de pressão imposta, de valor da pressão atmosférica, 101325 Pa. As CC de parede utilizadas são condições de que impedem transporte de massa, e foram utilizadas com condição de não deslizamento, o que significa que as velocidades paralelas às linhas das paredes são iguais a zero nestas fronteiras. As CC de entrada de velocidade à esquerda do canal e saída de pressão na câmara também são condições de imposição de variável, de velocidade e de pressão, respectivamente, controladas através de uma UDF, como é explicado no item 3.3.

A metodologia descrita nesta seção foi aplicada por diversos autores em estudos de dispositivos CAO e foi validada nas obras: Dias et al., 2015, Didier et al., 2011, Mendonça et al., 2017, Conde et al., 2011 e Teixeira et al., 2013.

3.2 Procedimentos gerais de aquisição de dados e avaliação da cadeia energética

Baseado nas metodologias utilizadas foi empregada uma estratégia de aquisição de dados padronizada para todos os casos, salvo as exceções ocorridas no caso C por conta da geometria diferente, necessitando de maior tratamento dos dados para comparar com os outros casos, como melhor esclarecido adiante.

Uma das vantagens dos métodos numéricos frente aos métodos experimentais é a facilidade da aquisição de dados. Através do FLUENT é possível coletar diversas informações dos campos

simulados (velocidade, pressão, fase,...) sobre pontos específicos, ao longo de linhas, ou dentro de uma região do domínio. Nas simulações realizadas neste trabalho a coleta de dados foi efetuada através de três tipos de monitores: monitores de integral de variável (elevação da SL), monitores de fluxo (vazão volumétrica) e monitores de volume (elevação média ao longo da câmara dos CAO dos casos A e B, caso C utilizou uma metodologia à parte).

Para medir o nível de elevação da SL da água em algum ponto do canal é utilizado um monitor de superfície de tipo integral reportando a variável de campo fase. O programa calcula a soma do produto entre a variável especificada e o comprimento do volume em questão (para uma variável ao longo de uma linha) em cada faceta, criando então um arquivo de saída com o resultado da medição tempo a tempo (FLUENT, 2016) assim neste caso específico são criadas linhas no domínio através de ferramenta do próprio programa, a qual é selecionada em um monitor de superfície do tipo integral de variável para a variável de fase.

Por exemplo, no caso de uma simulação utilizando *VOF* bifásica, sendo o domínio do tanque 16 m em y e 100 m em x , com água em repouso à profundidade de 10 m: se traçado uma linha abrangendo o domínio do tanque verticalmente, de -10 m a 6 m e com uma discretização de malha de 20 volumes de mesmo tamanho ($dy = 0.8$ m), o programa atribui o valor 1 a uma das fases (α , água) e à outra o valor zero (ar), sendo que o valor de fração volumétrica de 0.5 representa a posição da SL. Logo a soma de produtos do monitor de superfície do tipo integral seria dada conforme a Eq. (3.1) (FLUENT, 2016):

$$\eta = \sum_{i=1}^{20} \alpha_i \cdot dy_i = 1(0.8)12 + 0.4(0.8)1 + 0(0.8)7 = 10 \text{ m} \quad (3.1)$$

onde α é variável de fase do escoamento podendo assumir valores de zero a 1 e dy é o tamanho do volume na direção de medição, resultando em um sinal de 10 m. Após as simulações o sinal dos monitores de elevação da SL são subtraídos em 10 m para fornecer a elevação em torno de zero.

As elevações da SL sobre a parede frontal dos dispositivos, usadas para determinar o *run up/down* dos diversos casos foram realizadas desta maneira, sendo a linha de medição feita a meio metro de distância da parede frontal e sendo paralela à parede em si. O caso B conta com uma linha inclinada em 40° com a horizontal e o caso C conta com duas linhas inclinadas, uma a 40° e outra a 60° com a horizontal, cada uma sendo registrada separadamente em seu monitor. Estas sondas foram nomeadas conforme o caso, SPAREDE no caso A, SPAREDE40 no caso B e SPAREDE40 e SPAREDE60 no caso C, conforme Fig. 3.3.

Como estas linhas tem um ângulo diferente da vertical, registram valores maiores que a sonda vertical do caso A, já que o comprimento da linha de medição é maior que o da linha vertical

usada no caso A. Por esta razão os valores dos monitores usados para registrar o nível da SL sobre linhas inclinadas são posteriormente multiplicados pelo seno do ângulo formado pela linha inclinada com a horizontal, resultando no valor projetado na vertical. Este processo foi realizado tanto para os monitores de elevação da SL da parede frontal dos dispositivos (casos B e C) que mede o *run up* e *run down*, tanto para medir as elevações usadas para calcular o *sloshing* dentro das câmaras dos equipamentos.

Na Figura 3.3a e 3.3b são exibidas as sondas usadas para monitorar o *sloshing*, uma localizada exatamente no centro da câmara, duas juntas às paredes da câmara (interior) e mais duas entre a sonda do meio e a das extremidades, ou da esquerda para direita, SCAOPE (sonda CAO parede esquerda), SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD podem ser observadas. As mesmas sondas são apresentadas para o caso C na Fig. 3.4, observa-se que no caso C a forma da parede frontal força a utilização de duas sondas para a sonda posicionada internamente junto à parede frontal, SCAOPE40 e SCAOPE60. Os dados das duas sondas são unidos posteriormente por um algoritmo, e têm seu valor projetado para a vertical.

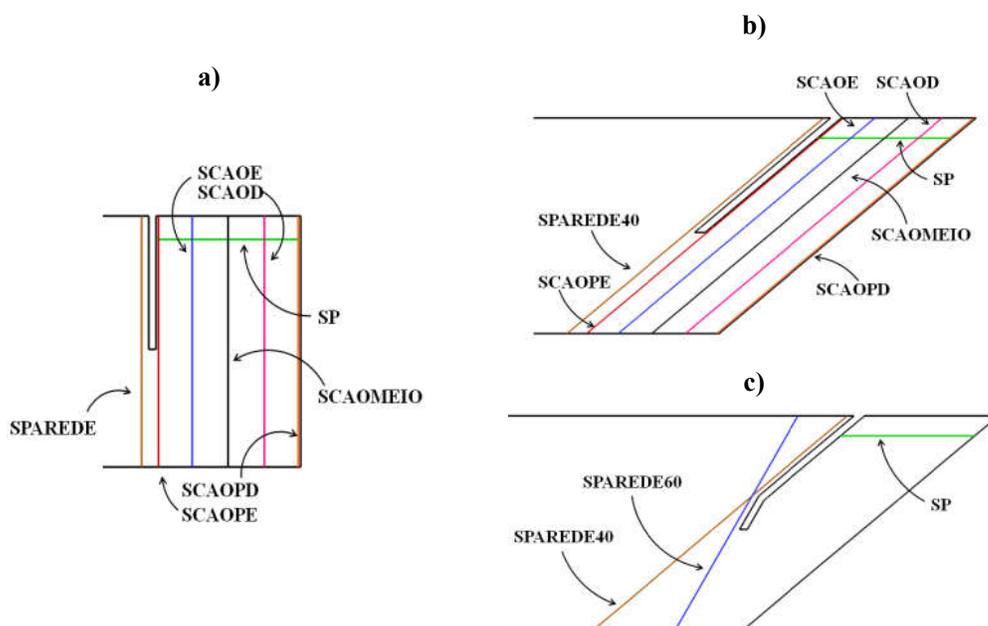


Figura 3.3 – Sondas utilizadas na câmara dos dispositivos para obtenção de dados de *run up/down*, *sloshing* e pressão. a) Caso A. b) Caso B. c) Caso C, sondas de *run up/down* e pressão.

As médias espaciais da elevação da SL dentro da câmara dos casos foram tomadas utilizando também os sinais das sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD posicionadas dentro da câmara hidropneumática simetricamente e em intervalos constantes, sendo a média dos valores apresentados pelas sondas e projeção dos valores das sondas inclinadas para a vertical realizada posteriormente através de tratamento dos dados com algoritmos.

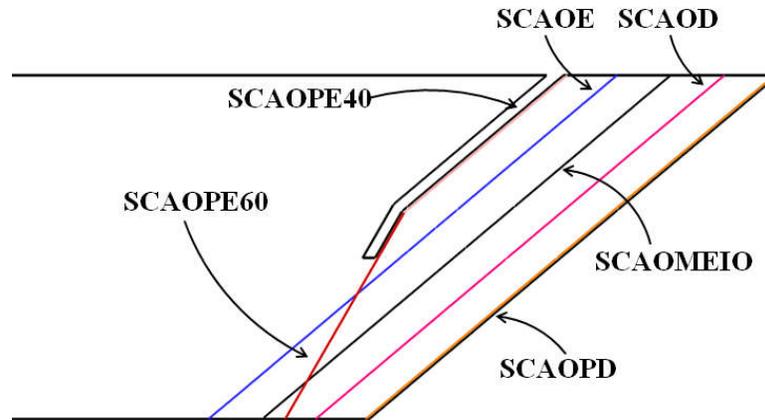


Figura 3.4 - Sondas usadas no cômputo do *sloshing*, caso C.

As medições de pressão dentro da câmara também foram realizadas utilizando um monitor de superfície do tipo integral de variável, executado ao longo de uma linha horizontal posicionada a 4.5 m de altura dentro da câmara, abrangendo toda a sua largura, chamada SP (sonda de pressão, Fig. 3.3). Este monitor reporta a variável de pressão estática ao longo desta linha, e como o valor ao longo de uma integral de linha é a soma do produto da variável com o comprimento dx dos volumes ao longo desta linha e a câmara tem 10 m de largura, o valor registrado no arquivo deste monitor é 10 vezes maior que o desejado, sendo então dividido por 10 posteriormente, já que o interesse não é o valor da soma, e sim o valor médio da pressão nesses pontos.

As medições de vazão realizadas no topo da câmara hidropneumática dos equipamentos foram feitas utilizando um monitor tipo integral de superfície de vazão volumétrica sobre a linha correspondente à CC de saída de pressão (turbina). Segundo o guia de usuário do FLUENT (2016) este dado é calculado somando o valor do vetor de área da faceta multiplicado pelo vetor velocidade da faceta, conforme Eq. (3.2). Como a simulação é bidimensional, a largura (direção paralela à frente de onda) não é contabilizada pelo programa no monitor, sendo então o valor do monitor multiplicado por 10 obtendo o valor para a câmara com 10 m de largura e 10 m de comprimento (na direção da largura da frente de onda).

$$Q = \sum_{i=1}^n \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (3.2)$$

É interessante observar que o sinal de vazão é registrado de maneira inversa à posição da SL, ou seja, os valores positivos da elevação provocam valores negativos da vazão para o mesmo tempo dentro de um ciclo de onda. Isto ocorre por conta da direção dos vetores que o programa determina para a área dos volumes usados no cálculo, sendo facilmente contornável multiplicando o sinal do monitor por -1.

Analisando as metodologias empregadas pelos autores, Elhanafi et al. (2016), Fleming et al. (2012), Tseng et al. (2000) e Folley e Whittaker (2002), foi constatada a necessidade de se aplicar uma metodologia que determine o coeficiente de reflexão da onda, a fim de determinar a quantidade de energia que entra no sistema, e através da análise da conservação de energia, determinar a eficiência e perdas do sistema.

O método aqui utilizado foi implementado por Sousa et al. (2011) em um algoritmo baseado no método de Mansard e Funke (1980). De acordo com o que foi exposto no item 2.1.3 este método utiliza 3 sondas medindo a elevação da SL no canal e, segundo concluiu Sousa et al. (2011), as posições das sondas tem grande importância para se evitar erros numéricos significativos. Em concordância com as indicações de Mansard e Funke (1980) para o método, Sousa et al. (2011) recomenda uma distância proporcional ao comprimento de onda, entre a primeira e a segunda sonda (WP1 e WP2) de $0.1 L$, e entre a primeira e a terceira sonda (WP1 e WP3) de $0.27 L$, que são utilizadas neste trabalho. Quanto à distância do grupo de sondas no canal à estrutura que reflete as ondas, Goda e Suzuki (1976 apud ELHANAFI et al., 2017) recomendam uma distância maior que $0.2 L$, que é respeitada pelo posicionamento do grupo de sondas (pelo seu centro), em exatamente meio canal de distância do limite esquerdo do domínio ($1 L$), conforme Fig. 3.5.

Calculado o coeficiente de reflexão de onda, C_R , e então a reflexão de energia, é possível calcular e determinar a cadeia energética do sistema CAO, já que a energia incidente pode ser calculada usando a Eq. (2.26), a energia pneumática através da Eq. (2.32) e as perdas energéticas através da Eq. (2.33).

Todas as operações de manipulação dos sinais adquiridos pelas sondas, as projeções dos sinais sobre sondas inclinadas para a vertical, o ajuste dos valores de pressão e vazão e fusão dos sinais das sondas SCAOPE40 e SCAOPE60 conforme descritas anteriormente foram realizadas após as simulações com a utilização de algoritmos de autoria própria.

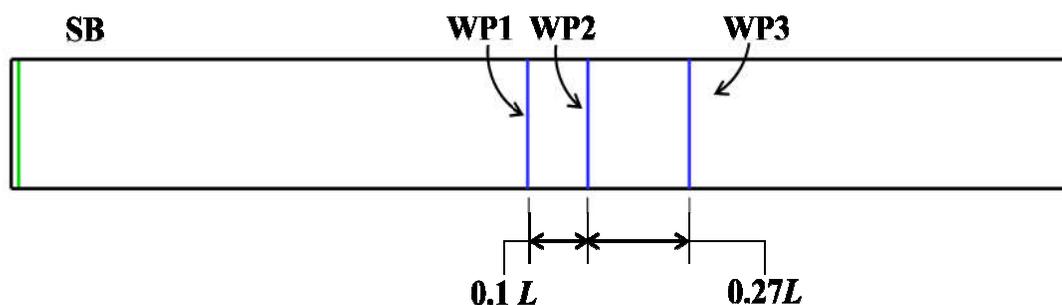


Figura 3.5 – Esquema de posicionamento das sondas de medição da elevação da SL para cálculo do C_R e uso interno na absorção ativa das ondas refletidas.

3.3 Aplicação de *User Defined Functions* no modelo numérico

Foi utilizada uma UDF (*User Defined Function*, do inglês, função definida pelo usuário) para gerar as ondas especificadas (lineares) para os casos simulados. Esta UDF, de autoria de Didier et al. (2016), serve três propósitos: gerar as ondas incidentes, absorver as ondas refletidas no retorno ao início do tanque numérico, e impor a pressão exercida na câmara hidropneumática de acordo com o amortecimento característico da turbina Wells modelada e a vazão através da turbina.

A UDF é aplicada ao modelo através de recurso de gerenciamento de funções do usuário através de uma biblioteca com linguagem própria do FLUENT, agindo sobre as condições do contorno do problema e impondo valores nas variáveis dos volumes (tais como velocidade, fração de volume, pressão) calculados internamente a partir das variáveis do modelo numérico no passo de tempo anterior, sendo impostas no passo de tempo seguinte, repetindo-se a cada passo de tempo.

A geração das ondas no tanque é realizada pela UDF impondo um perfil de velocidades componentes em função do tempo e da profundidade, equivalente ao perfil de velocidades da onda desejada, na posição da SL da CC de entrada de velocidade, definida pelo valor da fração de volume (0 para ar e 1 para água) como indicado na Fig. 3.2.

A função de absorção ativa foi feita usando a metodologia proposta por Shäffer e Klopman (2000), com base na teoria linear de águas rasas, e mostrou que funciona relativamente bem mesmo quando usada para ondas fora da zona de águas rasas. A UDF absorve numericamente as ondas refletidas pela estrutura no fim do canal corrigindo o perfil de velocidades na condição de contorno de entrada de velocidade, utilizando uma sonda que determina a elevação da SL resultante diretamente à frente da entrada de velocidades, evitando assim a re-reflexão que resultaria na divergência dos resultados.

A componente horizontal da velocidade na condição de contorno (CC) de entrada de velocidade é corrigida em tempo real estimando a série temporal da elevação da SL causada pela reflexão, η_R , que deve ser absorvida a partir de elevação alvo da SL imposta, η_{alvo} , com a medida nesta sonda, η_{medido} , sendo então a diferença entre a elevação da SL alvo e a elevação medida igual à elevação refletida, conforme a Eq. (3.3):

$$\eta_R = \eta_{alvo} - \eta_{medido} [m] \quad (3.3)$$

Para que a absorção ocorra é necessário alterar a componente da velocidade na direção de propagação da onda na geração de ondas, u_I , de modo a compensar a velocidade da onda refletida. A correção desta velocidade, u_{corr} , é dada pela Eq. (3.4):

$$u_{corr} = \eta_R \left(\frac{g}{h} \right)^{1/2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.4)$$

onde g é constante gravitacional e h é a profundidade da água em metros. A velocidade corrigida na CC de entrada de velocidades é obtida pela diferença entre velocidade alvo e a velocidade de correção (Eq. (3.5)):

$$u_1 = u_{alvo} - u_{corr} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.5)$$

A UDF também age sobre a CC do topo da câmara do CAO. Utilizando a relação entre vazão e pressão própria da turbina Wells, dada pela Eq. (3.8), também chamada de amortecimento característico da turbina ($kt = 50 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$), que é uma constante da turbina, a UDF impõe uma diferença de pressão a cada instante conforme a vazão volumétrica medida através da CC de saída de pressão na câmara do CAO na iteração anterior:

$$\Delta p = k_t Q \text{ [Pa]} \quad (3.6)$$

onde Q é a vazão volumétrica em m^3/s e Δp é a diferença de pressão entre a câmara e a atmosfera.

Segundo Torres (2015) a relação característica da turbina ou coeficiente de amortecimento de uma turbina Wells é dada por:

$$k_t = \frac{\Delta p}{Q} \left[\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^3} \right] \quad (3.7)$$

3.4 Discretização

O domínio das simulações de todos os casos tem comprimento igual a dois comprimentos de onda e 16 m de altura, sendo o espaço de -10 a 0 m correspondente à água e de 0 a 6 m ar, na condição inicial de água em repouso. Foi possível utilizar um domínio computacional pequeno devido à vantagem proporcionada pela absorção ativa na geração de ondas, uma vez que normalmente se utilizam canais mais compridos para poder simular por um tempo mais longo antes das primeiras ondas refletidas retornarem ao início do canal, e a simulação ter de ser finalizada, ou ainda implementando outras técnicas de absorção das ondas refletidas que exigem canais um pouco mais compridos.

Estudos anteriores mostraram que a propagação de onda é bem simulada usando 70 elementos por comprimento de onda na direção horizontal e 25 elementos na direção vertical na região da superfície livre, evitando a difusão numérica ao mesmo tempo em que mantém o número de volumes da malha reduzido. Consequentemente, a malha cartesiana é construída com essas características com um refinamento perto da CC de entrada de velocidade, da parede das estruturas costeiras e o fundo do canal (André, 2010, Horko, 2007, Park, 2004, Teixeira et al., 2013; Didier et al., 2016).

Aproximando-se da parede frontal, a discretização na horizontal é refinada novamente, reduzindo o tamanho dos volumes linearmente com tamanho de volume na parede frontal equivalente à 1/3 da espessura horizontal desta. A Figura 3.6 mostra a construção da malha de volumes finitos e ajuda a esclarecer o método usado para sua geração.

No entanto, neste trabalho foram utilizados 30 volumes ou mais na região mais refinada em torno da SL (vertical), enquanto o recomendado é de 20 a 25, de modo a possibilitar a simulação de duas alturas de onda utilizando a mesma malha (para o mesmo período), já que o tamanho do volume da malha para a altura de 1.5 m também respeita as condições para a malha de 1.0 m. O mesmo foi feito para as alturas de 2.5 m e 2 m. Isto se deve ao interesse em reduzir o número de malhas a serem geradas. É possível observar melhor a zona de maior refino da malha pela Fig. 3.7.

Assim a zona de refinamento padrão para esta região (zona com dobro da crista/cava da onda em torno da SL) é aumentada e o tamanho do volume é mantido próximo do recomendado. Entretanto, se verificou que com o movimento de subida da água sobre a parede inclinada dos casos B e C, a SL chegou à níveis muito superiores que a abrangência da região de refinamento dedicada à SL, sendo que muitos dos casos tiveram que ser refeitos com uma nova malha, com zonas na região da SL chegando aos 4.5 m. A região de refino em torno da SL dos casos B e C podem ser observadas nas Fig. 3.9 e 3.10.

O refinamento da discretização entre a região em torno da SL e o topo da malha segue uma distribuição linear, e a região entre o entorno da SL e o fundo segue uma distribuição bi-exponencial. A distribuição dos refinamentos da malha na horizontal seguem funções lineares entre a região de discretização constante ($L/70$). A sonda utilizada na absorção ativa de ondas refletidas localiza-se a 1 m da CC de entrada de velocidades, separada igualmente por 3 volumes. Estes refinamentos encontram-se indicados na Fig. 3.6.

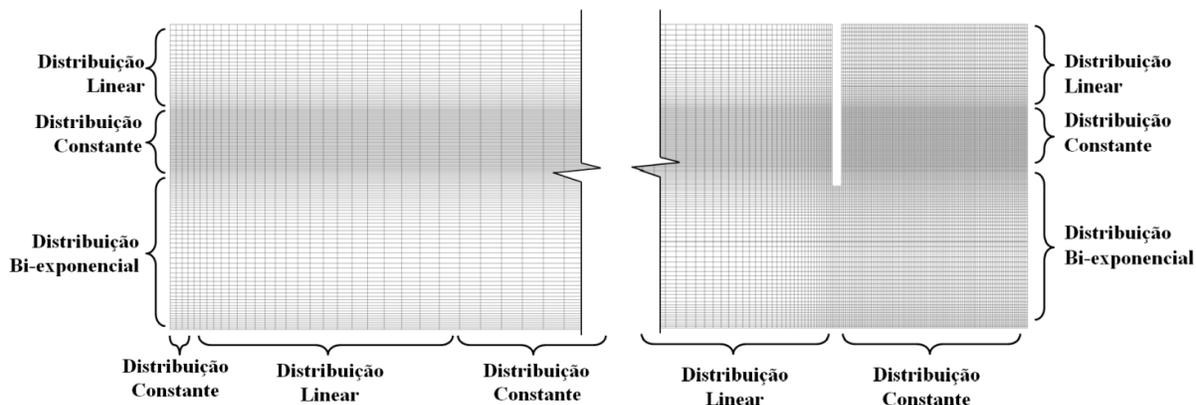


Figura 3.6 – Construção da malha de volumes finitos. Exemplo: Caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

Os parâmetros para a simulação do canal com o CAO baseado na geometria simplificada da planta de LIMPET são semelhantes ao caso A. A maior diferença fica no aspecto da discretização espacial, uma vez que a inclinação da parede frontal causa o fenômeno do *run up*, que pode fazer com que a onda ultrapasse a região de refinamento em torno da SL, o que força a utilização de uma zona de refino muito maior ao redor da SL e a necessidade de fazer a transição da inclinação da vertical para a inclinação da parede frontal do CAO, observe a Fig. 3.8. A discretização desta região considera o mesmo número de volumes nas arestas superiores e inferiores da malha, logo o tamanho das arestas horizontais dos volumes é diferente ao longo da vertical. Esta diferença é atenuada ao longo de x positivo do canal, forçando-se o tamanho do volume final ser igual para todas as alturas.

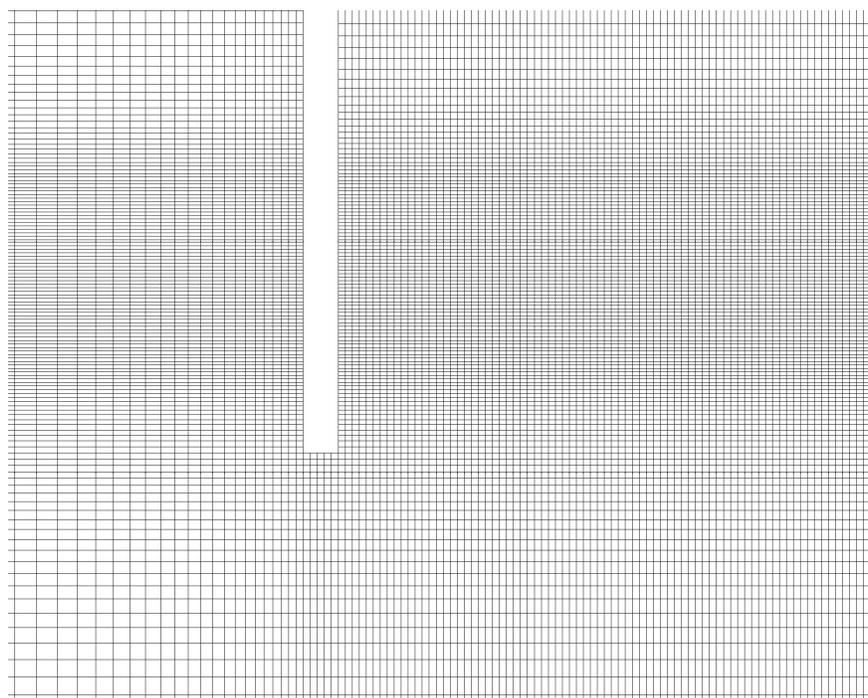


Figura 3.7 – Detalhe da malha de volumes finitos do caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

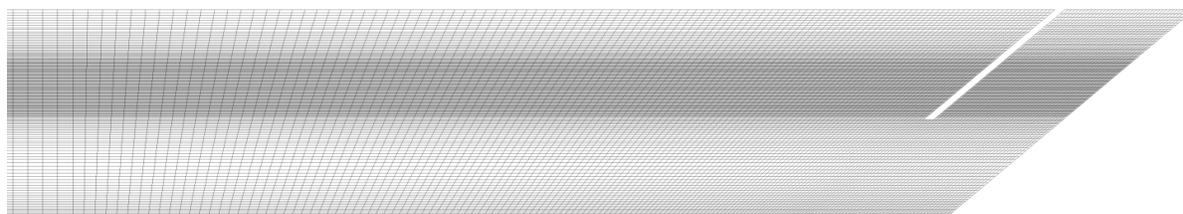


Figura 3.8 – Discretização da malha para o caso B. Observa-se a transição suave da inclinação das linhas verticais no início do canal e à 40° na parede frontal do CAO.

O caso C foi o mais difícil de efetuar uma malha, porque se deseja usar uma malha estruturada como nos outros casos. A variação de ângulo da parede frontal cria várias regiões onde é impossível haver uma transição suave de inclinação dos volumes ao longo da vertical do domínio. Dentro da câmara a inclinação em um lado tem 60° e o outro tem 40° , devendo ambas as faces de

esta região câmara possuir o mesmo número de volumes. A Figura 3.10 demonstra uma malha utilizada na simulação do caso C. Basicamente a mesma proposta de variação suave no ângulo das linhas da CC de entrada de velocidades do caso B foi aplicada ao caso C, embora no caso C, existam mais regiões com variações de ângulo (de cima para baixo, 40°, 60° e 40° novamente) e a discretização no entorno da SL seja mais trabalhosa.

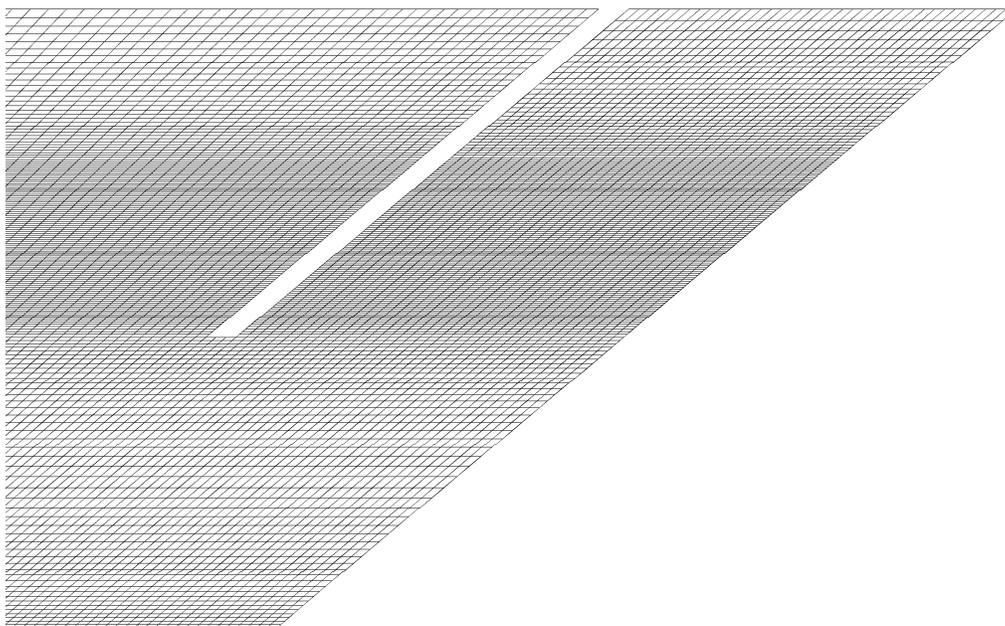


Figura 3.9 – Detalhe da discretização usada no caso B.

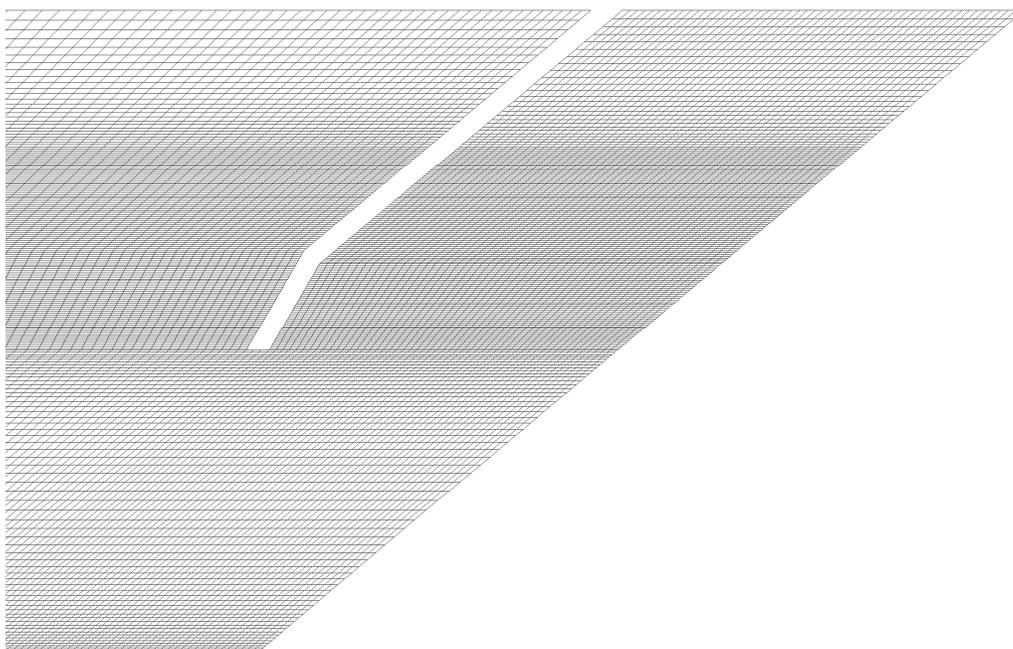


Figura 3.10 - Discretização da malha para o caso C. Observa-se a transição da inclinação das linhas da esquerda à direita dentro da câmara do CAO.

A discretização do tempo foi realizada através de formulação implícita de primeira ordem com incremento temporal equivalente a $T/640$, resultando em 0.009 s para período de 6 s, 0.014 s para o período de 9 segundos, e 0.018 s para período de 12 s, conforme praticado pelos autores André (2010), Teixeira et al. (2013) e Didier et al. (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta Seção reporta os resultados obtidos e discute os mesmos a partir dos dados coletados nas simulações como descrito na Seção 3, separada em itens conforme localização dos fenômenos observados, internos ou externos à câmara, começando por uma descrição geral do escoamento. As relações entre os fenômenos são discutidas no último item, 4.5.

4.1 Comportamento Hidrodinâmico para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram o escoamento ao longo de um período de onda incidente para uma onda de 1.5 m de altura e 9 s de período, para os casos A, B e C, respectivamente. O escoamento ao longo do tempo foi representado através de 9 imagens em instantes de tempo igualmente espaçados, sendo o primeiro quadro correspondente ao momento em que a SL cruza o NRA dentro da câmara dos dispositivos durante a subida da SL. Os quadros plotam a velocidade através da escala de cores representando o módulo de velocidade (m/s), além das linhas de corrente do escoamento para visualizar melhor o escoamento da água no equipamento, como o movimento da coluna de água e a formação de vórtices no escoamento.

Acompanhando o escoamento da Fig. 4.1, se observa a formação de vórtices ao redor da parede frontal do aparelho sempre que há uma inversão do sentido do escoamento, região onde o módulo de velocidade atinge os maiores valores do escoamento ao longo do tempo (máximo de 3.1 m/s). Na região ao fundo do canal e mais próximo à parede posterior do equipamento, os módulos de velocidade são sempre os mais baixos (próximos à zero).

No instante $t = 0$, a onda incidente se aproxima do aparelho, criando uma variação brusca de velocidade embaixo da parede frontal do aparelho (máximo de 2.9 m/s), onde ocorre uma divisão de fluxo (que entra na câmara ou permanece do lado de fora). No instante seguinte ($t = T/8$), o movimento do fluido preenchendo a câmara cria um pequeno vórtice de sentido anti-horário atrás da parede frontal. Em $t = 2T/8$ a câmara está no momento de inversão do sentido do escoamento, promovendo a geração de um vórtice de grandes dimensões no interior da coluna de água, aproximando-se do fundo do tanque numérico e prejudicando a conversão de energia pneumática do aparelho, uma vez que uma porção grande de água que poderia estar promovendo o movimento do ar através da turbina do equipamento está sendo desperdiçada em movimento rotacional. Entre $t = 2T/8$ e $t = 3T/8$, o nível da SL atinge seu ponto mais alto (1.07 m).

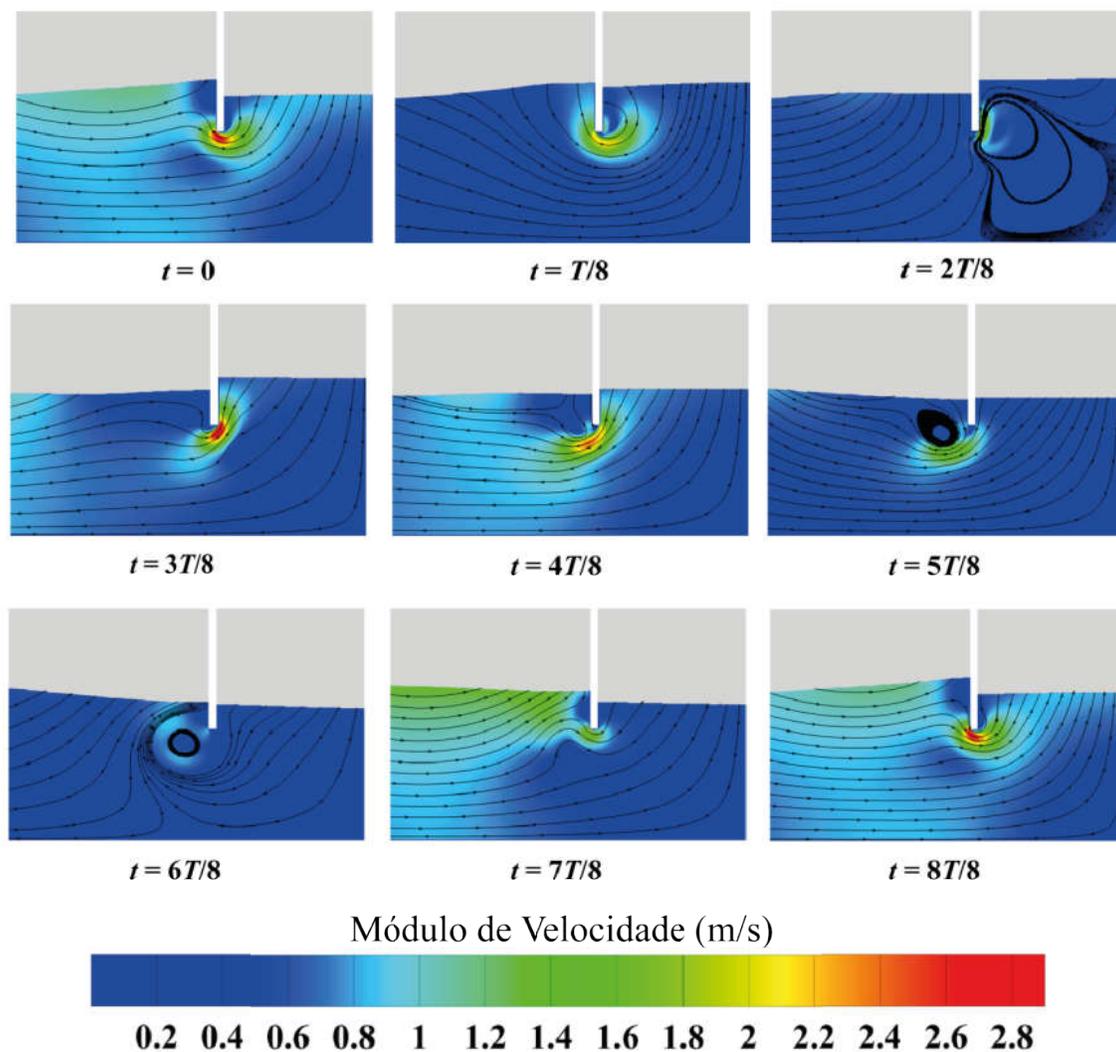


Figura 4.1 – Campo de módulos de velocidade e linhas de corrente sobre o CAO do caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.

No instante $t = 3T/8$ e $t = 4T/8$, o fluxo de saída da água da câmara provoca novamente grandes velocidades de escoamento debaixo da parede frontal do aparelho (máximos de 3.1 e 2.4 m/s, respectivamente), promovendo ainda a formação de um vórtice (horário) do lado externo da estrutura, presente em maior tamanho em $t = 5T/8$, momento em que o nível da SL dentro da câmara se encontra em seu ponto mínimo (-0.91 m). A aproximação da crista da onda incidente reorganiza o fluxo e começa a dissipar este vórtice em $t = 6T/8$, resultando em campo de velocidades mais baixo, praticamente eliminando-o em $t = 7T/8$.

É possível observar uma ligeira tendência do lado posterior da câmara em apresentar nível maior da SL, causado pela maior perda viscosa e variação brusca de direção do escoamento ao redor da parede frontal.

Para o caso B, Fig. 4.2, em $t = 0$, a onda incidente tem o escoamento facilitado na entrada em comparação com o caso A, exceto a parcela de água localizada diretamente acima da ponta da parede frontal inclinada, que deve fazer uma curva ainda mais acentuada que no caso A para eventualmente ser admitido dentro da câmara.

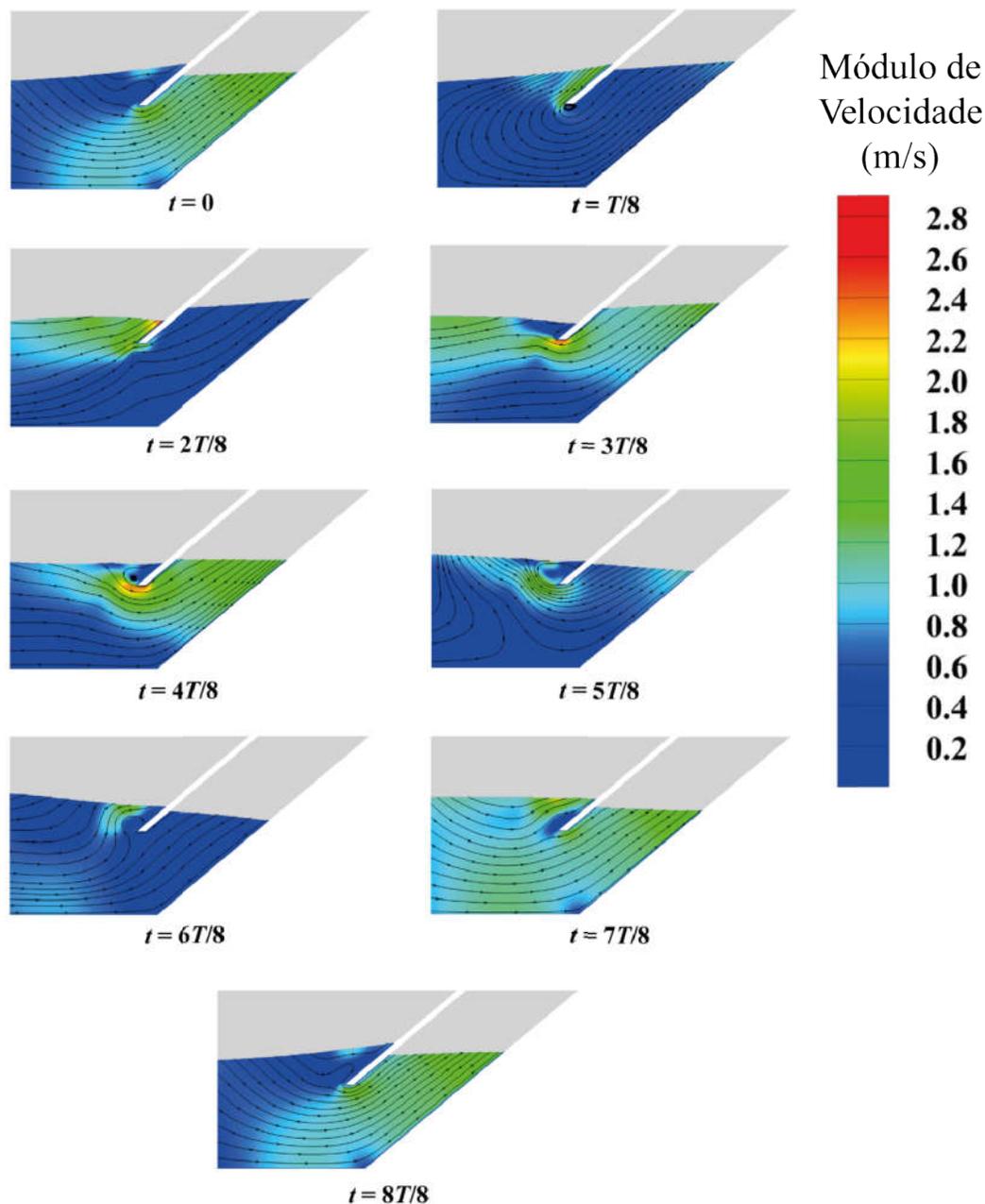


Figura 4.2 – Campo de módulos de velocidade e linhas de corrente sobre o CAO do caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.

O campo de velocidades apresenta melhor distribuição que o caso A em geral, como evidenciado na Fig. 4.2 pelas grandes regiões em verde no gráfico e menor ocorrência de regiões

em vermelho. Isso significa que existe uma melhor distribuição do escoamento pelo aparelho, evitando perdas viscosas pela ocorrência de concentrações de fluxo e grandes gradientes de velocidade no escoamento, sendo a velocidade máxima desenvolvida aproximadamente 2.5 m/s em $t = 2T/8$, sobre a parede frontal do CAO, 0.6 m/s a menos que o máximo do caso A.

Também se observa a tendência da onda incidente de subir pela parede frontal e se acumular do lado de fora da estrutura. Em $t = T/8$ as linhas de corrente mostram como o fluxo passa a uma direção mais vertical, e propicia um escoamento curvo ao redor da parede (como o de vasos comunicantes tipo tubo em “U”), o que inicialmente facilita o escoamento da água acumulada sobre a parede para dentro da câmara.

A SL dentro da câmara apresenta elevação maior sobre a parede posterior que a frontal (3.21 m e 1.47 m, respectivamente, frente a uma altura (diferença de máximo e mínimo) média de 2.24 m, correspondente a 1.18 de média máxima (ao longo do tempo) e -1.06 m de média mínima), devido à inclinação da parede posterior da câmara e à dificuldade do escoamento em torno da parede frontal da estrutura (raio de curvatura menor). Um pequeno vórtice se faz presente diretamente abaixo da extremidade da parede frontal da estrutura.

Analisando os instantes de tempo seguintes, de $2T/8$ até $4T/8$, observa-se que o fluxo de saída da água da câmara é mais organizado que o apresentado pelo caso A, pois as linhas de corrente não fazem curvas abruptas de 90° , causadas pela angulação da parede frontal. As velocidades geradas no entorno da extremidade da parede frontal são menores que as observadas no caso A, sendo a velocidade do fluxo melhor distribuída pelo escoamento, ainda que a região mais ao fundo apresente baixas velocidades de escoamento nestes instantes de tempo.

Ocorre formação de um vórtice (horário, a partir de $4T/8$) na saída da água da câmara próximo da parede frontal, que sobe para uma região onde o fluido tem velocidade mais baixa do lado externo do CAO, apesar da melhor organização do escoamento. A inclinação da SL interna do CAO se inverte, evidenciando a maior amplitude de movimento no lado posterior da câmara.

Para $t = 5T/8$, a crista incidente se aproxima, forçando o escoamento de saída do CAO para cima em direção à parte de fora da parede frontal do equipamento e que posteriormente forçando o fluxo de entrada mais próximo do fundo, como se observa em $6T/8$, sendo que o vórtice (horário) anterior permanece do lado externo e somente se reduz em diâmetro em $7T/8$.

Quando $t = 7T/8$, o fluxo se encontra muito bem organizado, todo orientado na mesma direção e com velocidade bem alta (acima de 1.2 m/s para a maior parte dos pontos), mas com uma porção considerável de fluido sendo desviado para cima da parede frontal, como evidenciado pelas linhas de corrente e escala de cores do módulo de velocidade. Apesar de já pequeno, o vórtice ainda

parece prejudicar o escoamento, prevenindo que uma parcela maior de água entre no CAO. Finalmente, em $8T/8$, o quadro é praticamente igual ao inicial, fechando o ciclo de uma onda.

Considerando agora o caso C na Fig. 4.3, no primeiro instante de tempo o escoamento é muito similar ao mesmo instante de tempo do caso B, com um escoamento bem organizado na entrada da onda no CAO, excetuando a porção de fluido que escoava de encontro à parede frontal do aparelho e sofre um desvio de direção.

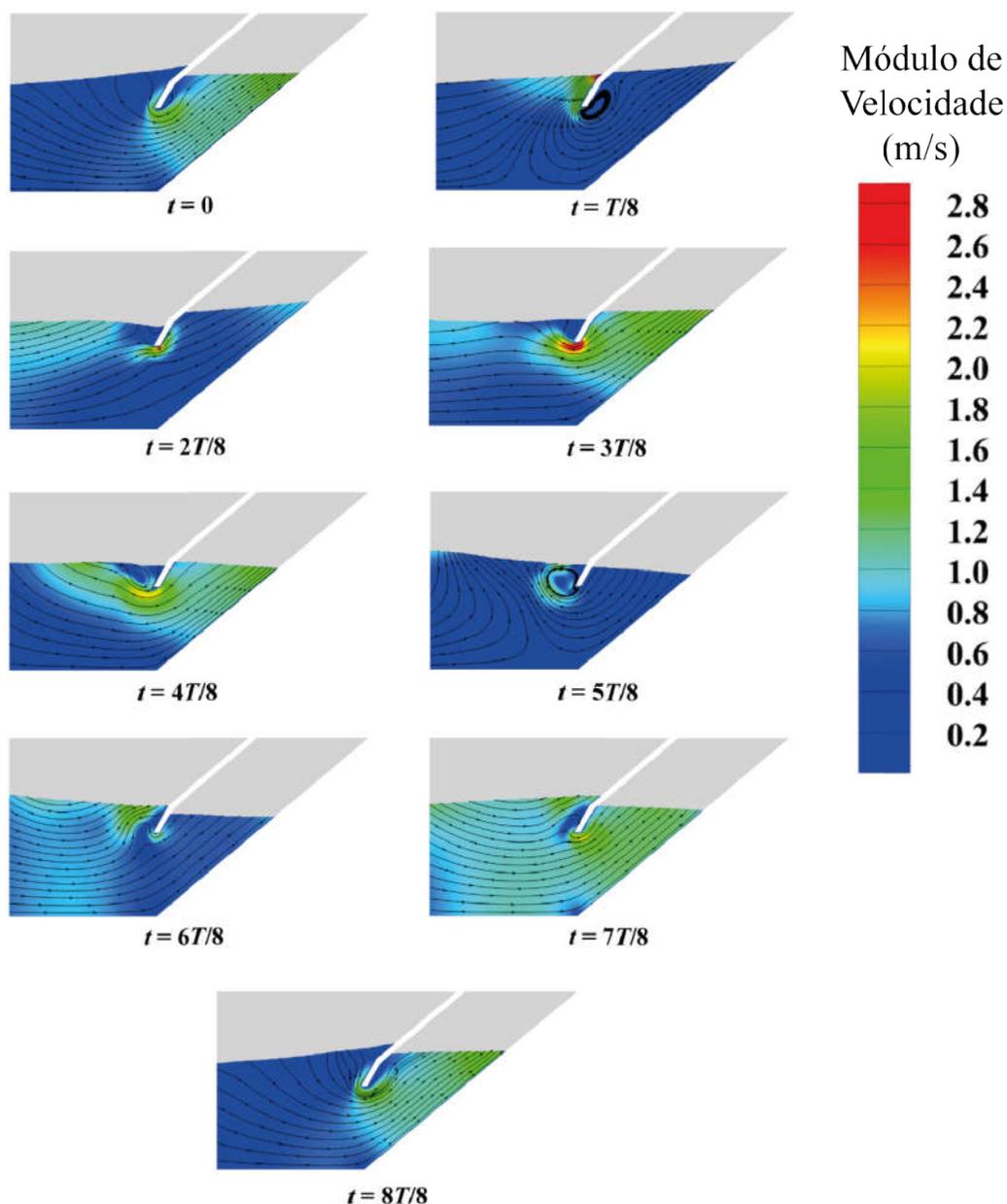


Figura 4.3 - Campo de módulos de velocidade e linhas de corrente sobre o CAO do caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.

A diferença fica por conta do ângulo mais vertical deste caso, que facilita o escoamento comparado ao caso B. O caso B apresenta ainda uma região de velocidades de valores de 0.8 até 1.0 m/s, um pouco maior que o caso C.

Em $t = 0$ e $t = T/8$ as linhas de corrente descrevem linhas em “U”, por conta da elevação da SL sobre a parede frontal e a entrada de água ao redor desta. As linhas de corrente mais próximas à borda da parede frontal mostram que há um vórtice maior que o presente no mesmo instante no caso B na região de baixa velocidade do escoamento atrás da parede frontal do dispositivo.

A mudança de ângulo da parede frontal do dispositivo acaba por diminuir a abertura do dispositivo às ondas incidentes, e o menor espaço também ocasiona maiores diferenças de velocidade no escoamento.

Analisando os instantes de tempo seguintes, de $2T/8$ até $4T/8$, observa-se que o fluxo de saída da água da câmara é muito semelhante ao apresentado pelo caso B, mas as velocidades (e seus gradientes) geradas no entorno da extremidade da parede frontal são maiores que as observadas no caso B (3.23 m/s ante a 2.42 m/s). Isso ocorre provavelmente por conta da menor área transversal para o escoamento e do sentido convergente que a mudança de ângulo da parede frontal provoca no escoamento, resultando em uma distribuição de velocidade do fluxo um pouco inferior ao caso B.

Semelhante ao caso B, ocorre formação de um vórtice (horário, a partir de $3T/8$ e de maior diâmetro em $5T/8$) a partir da parede frontal, subindo para a região onde o fluido tem velocidade mais baixa do lado externo do CAO.

A inclinação da SL interna do CAO se inverte, evidenciando a maior amplitude de movimento no lado posterior da câmara. A altura média da coluna de água neste caso foi de 2.15 m (1.13 e -1.02 m), ao passo que junto à parede posterior a altura média foi de 2.6 m (1.45 e -1.15 m) e junto à parede frontal a altura média foi de 1.48 m (0.69 e -0.79 m), consideravelmente menos desnível de elevação entre os extremos da câmara que o caso B para uma elevação média ligeiramente menor, observando que a diferença de elevação ocorre majoritariamente do lado posterior da câmara, 0.61 m menor, ao passo que o lado anterior as elevações são praticamente iguais (diferença irrisória).

A incidência da crista da onda em $5T/8$ força o escoamento para cima, mantendo o vórtice mencionado anteriormente, e interferindo com o escoamento de saída da água da câmara, forçando o fluido em direção ao vórtice, conforme o ocorrido para o caso B no mesmo instante de tempo. Em $7T/8$ este vórtice já se encontra bem reduzido e o escoamento de entrada de água no CAO se apresenta bem organizado e direcionado à entrada do CAO, com valores de velocidade de 0.8 m/s a 1.0 m/s em uma região extensa da janela de observação. Em $8T/8$ o escoamento se apresenta praticamente idêntico ao inicial, fechando o ciclo de uma onda de 9 s.

Analisando a variação da SL para ambos os casos B e C, pode-se observar um grau considerável de *sloshing*, enquanto que, no caso A, a SL se mantém mais horizontal durante a oscilação. A principal causa deste fenômeno é a inclinação da parede posterior dos CAO dos casos B e C, e pode ser observado claramente nos momentos de $2T/8$ até $6T/8$ que a velocidade do fluido é maior no lado posterior da câmara que no lado anterior ou próximo à parede frontal do aparelho, o que resulta na maior variação da SL no lado posterior que no anterior.

4.2 Interações onda-estrutura externas à câmara

Neste Item são discutidos os aspectos do escoamento e interação fluido-estrutura que afetam as parcelas de energia atuando externamente aos dispositivos.

4.2.1 Reflexão da onda

Os sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, Fig. 3.5, foram introduzidos no algoritmo de Sousa et al. (2011), bem como algumas informações adicionais necessárias, como profundidade local e faixa de frequência para determinar o coeficiente de reflexão dos casos. Adicionalmente, o programa fornece uma representação gráfica do espectro de frequências usando a transformada de Fourier e decompõe o sinal do canal em suas componentes, incidente e refletida.

A Figura 4.4 mostra os sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso A para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s, onde pode ser observado uma somatória de ondas de períodos diferentes nos sinais, como evidenciado pelos picos de elevação que correm em períodos menores que 9 s. Após aplicado o algoritmo de separação, obtém-se duas representações gráficas. A primeira, uma transformada de Fourier, Fig. 4.5, onde podem ser observadas as frequências (inverso do período) que compõem tanto da onda incidente quanto da refletida no canal; leia-se 0.1111 para o primeiro pico de cada sinal (incidente e refletido) e 0.2222 para o segundo pico, correspondendo a 9 s e 4.5 s, sendo, portanto, ondas harmônicas.

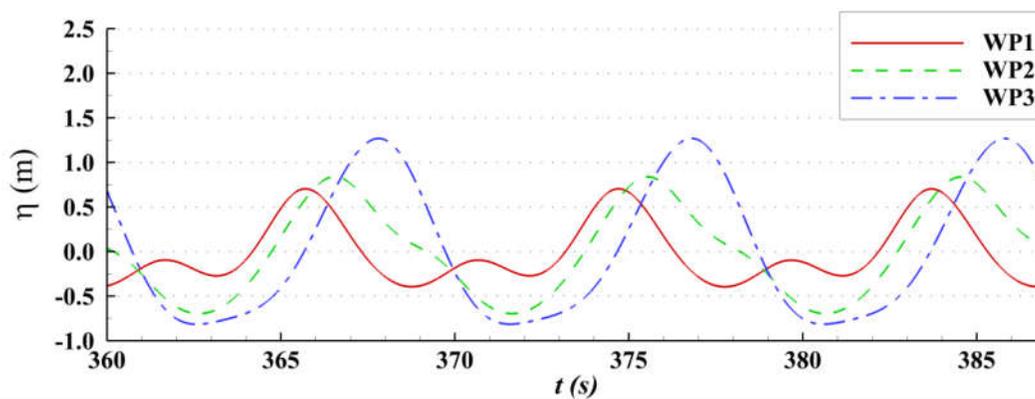


Figura 4.4 – Sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, para o caso A, em $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

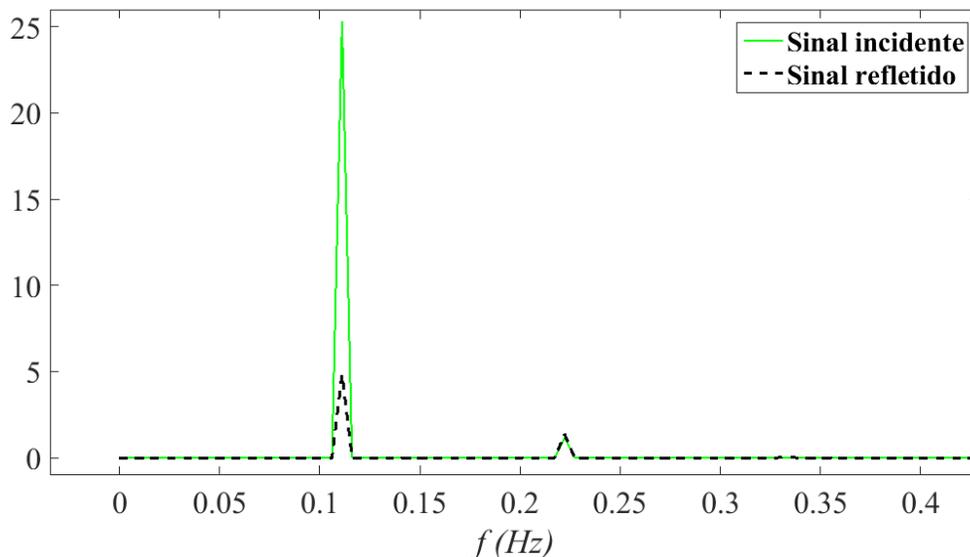


Figura 4.5 – Transformada de Fourier dos sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

A segunda representação gráfica, da Fig. 4.6, mostra a reconstrução do sinal no canal, na posição da sonda WP1, onde é possível observar que, conforme a Fig. 4.5, tanto o sinal incidente quanto o refletido possuem vários períodos sobrepostos, e que a forma do sinal resultante coincide com o sinal de WP1, exibido também na Fig. 4.4.

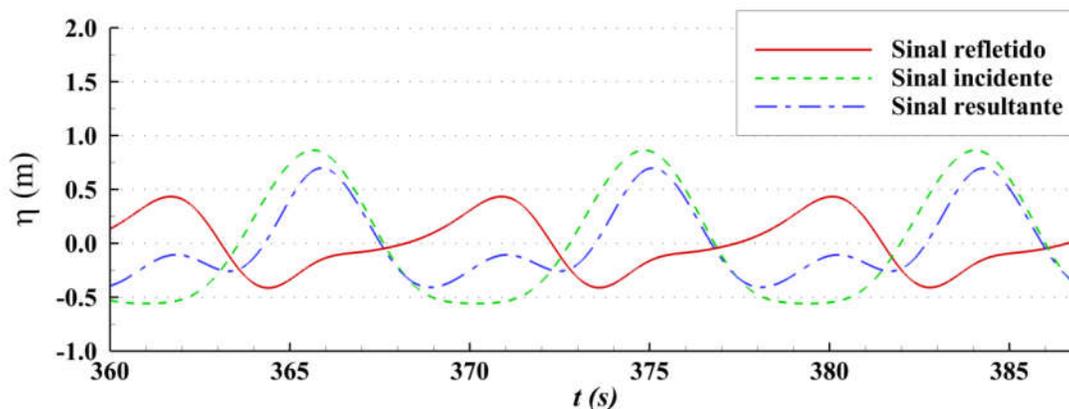


Figura 4.6 – Reconstrução do sinal da sonda WP1, caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

O C_R é fornecido pelo algoritmo após cálculo do espectro de energia dos sinais incidente e refletido, sendo determinado pela razão entre a altura significativa da onda refletida e a da incidente. O C_R encontrado foi de 0.49 para esta combinação de caso. A mesma lógica pode ser acompanhada nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, para o caso B e Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 para o caso C, que obtiveram ambos 0.41 de C_R .

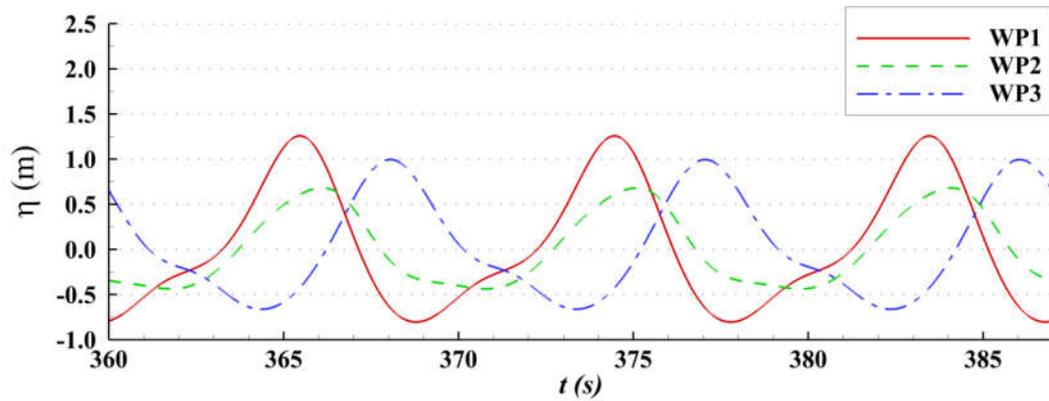


Figura 4.7 - Sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, para o caso B, em $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

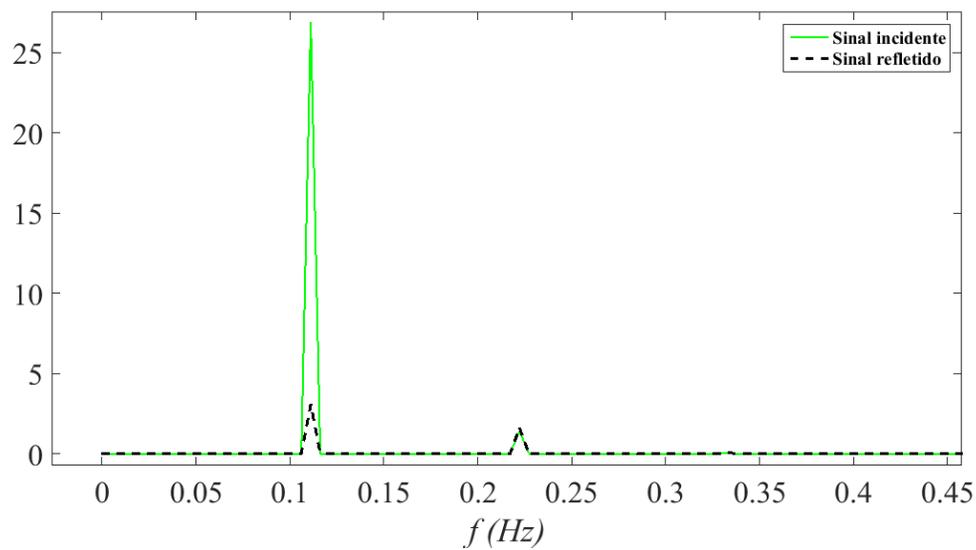


Figura 4.8 - Transformada de Fourier dos sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

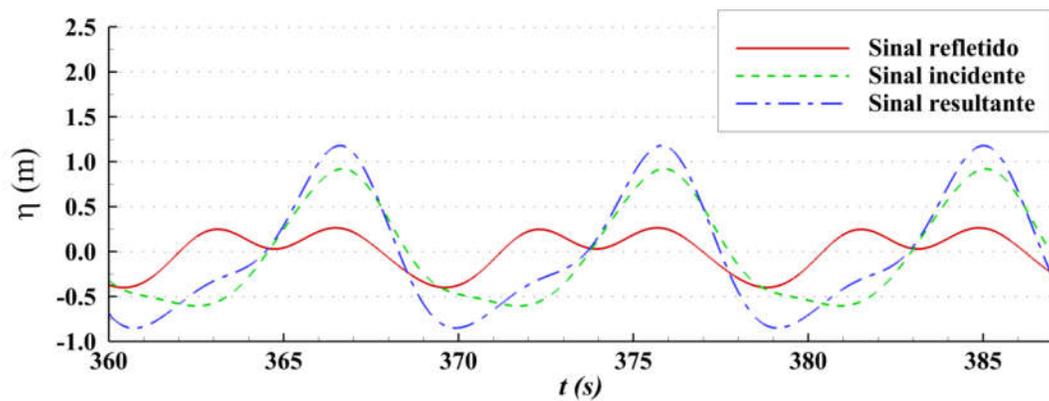


Figura 4.9 - Reconstrução do sinal da sonda WP1, caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

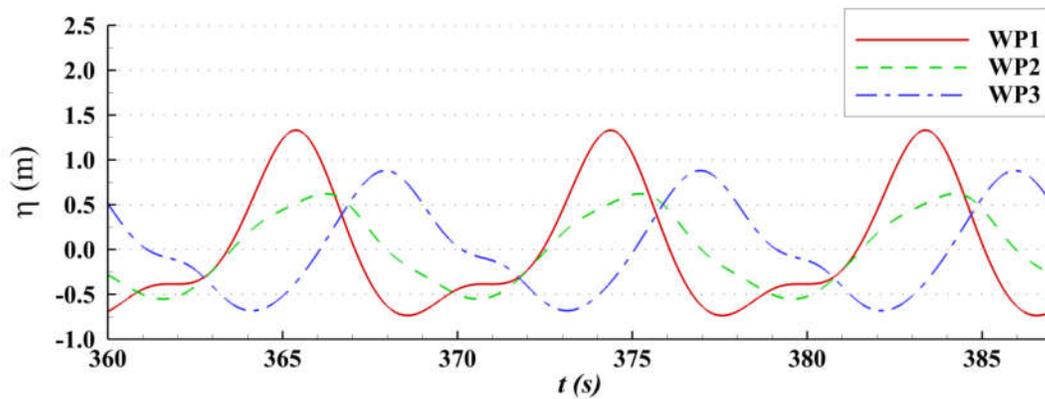


Figura 4.10 - Sinais das sondas WP1, WP2 e WP3, para o caso C, em $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

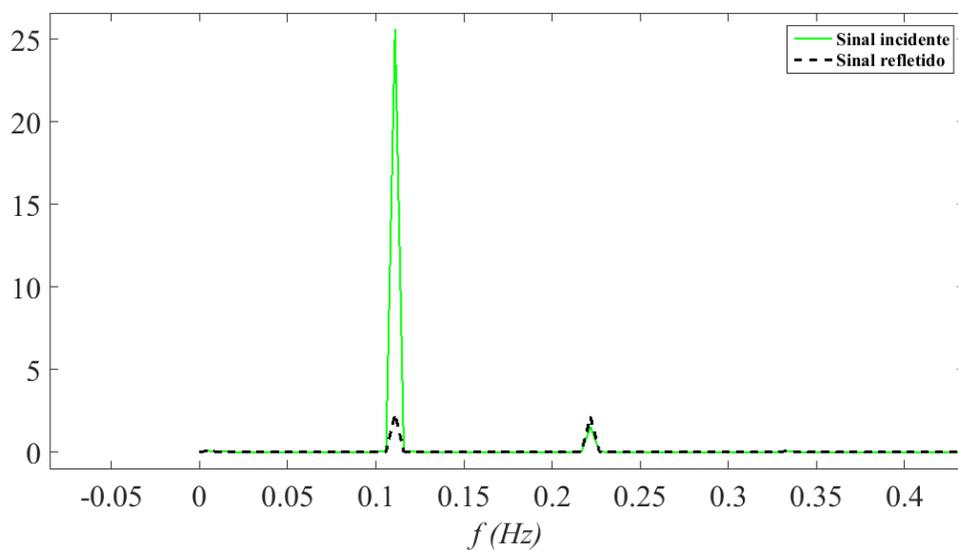


Figura 4.11 - Transformada de Fourier dos sinais de WP1, WP2 e WP3 do caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

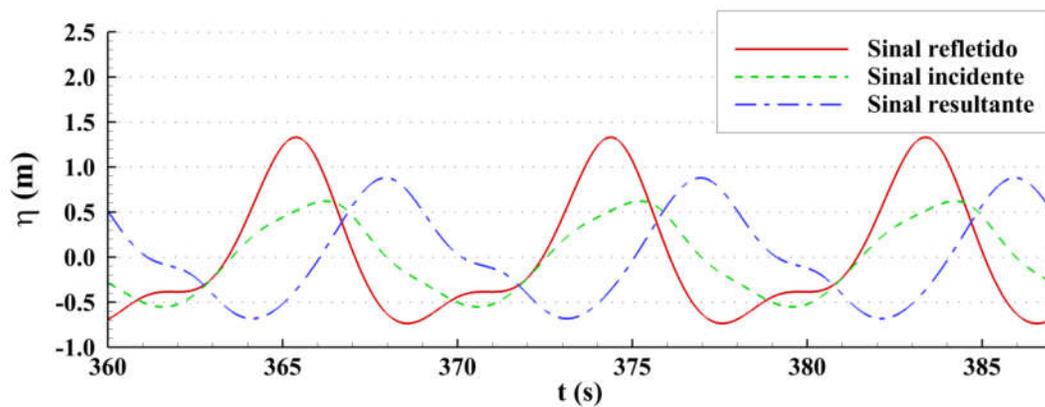


Figura 4.12 - Reconstrução do sinal da sonda WP1, caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

4.2.2 Run up e Run down

Para ilustrar o comportamento temporal do escoamento sobre a parede frontal dos CAOs, a Fig. 4.13 mostra a elevação desenvolvida para os três casos para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s. Os sinais mostram um período de onda após a estabilização dos sinais das simulações, adimensionalizado no tempo, representando um período inteiro de onda em 9 intervalos de tempo, como nas descrições do escoamento na seção 4.1.

Analisando a Fig. 4.13, observa-se claramente que a SL eleva-se mais no caso B que em C e em A, apresentando formas de curva bem diferentes entre o caso A e os demais. Os casos B e C tem forma semelhante para a elevação positiva, mas são consideravelmente diferentes na elevação negativa. Na incidência da crista da onda incidente, o caso A apresenta a ascensão mais rápida, atingido seu máximo no instante $t/T = 0.125$ (1.21 m), sendo que os casos B e C atingem seus máximos próximos de 0.250 (1.47 e 1.40 m, respectivamente). A SL, então, retorna à posição de repouso em 0.400 nos casos A e B, frente à 0.420 no caso C, sendo que a inclinação da curva é mais acentuada nos casos B e C que no caso A.

Deste ponto em diante, o comportamento da elevação na parede frontal é bem diferente no caso A dos casos B e C. O caso A permanece um tempo próximo à posição de repouso e, então, descende até seu ponto mínimo em $t/T = 0.800$ (-0.8 m); ponto na qual atinge valores mínimos de maior módulo que os casos B e C para o mesmo instante. Já os casos B e C apresentam comportamentos muito similares entre si, com pequenas diferenças na defasagem nos picos e no módulo das elevações atingidas. Ambos os casos B e C descendem a seus pontos de mínimo (0.480 para C e 0.530 para B) imediatamente após os pontos de máximo (-0.79 e -1.05 m para C e B, respectivamente), ao contrário do caso A. A geometria mais semelhante ao caso A para o ângulo de 60° do caso C, faz com que a forma das curvas se aproxime de 0.625 em diante, durante a descendência da onda.

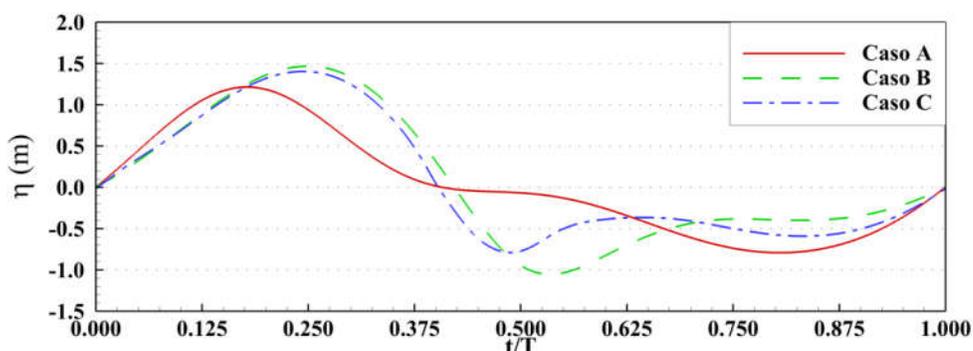


Figura 4.13 – Elevação da SL sobre a parede frontal dos equipamentos, casos A, B e C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

As Figuras 4.14 a 4.16 mostram as elevações máximas (*run up*) e mínimas (*run down*) da SL sobre a parede frontal dos casos A, B e C, cruzadas com a altura da onda incidente H , para os períodos 6, 9 e 12 s, respectivamente. As elevações apresentadas são valores médios dos máximos e mínimos tomados após a estabilização dos sinais de elevação, obtidos através dos sinais de elevação da SL provenientes das sondas SPAREDE.

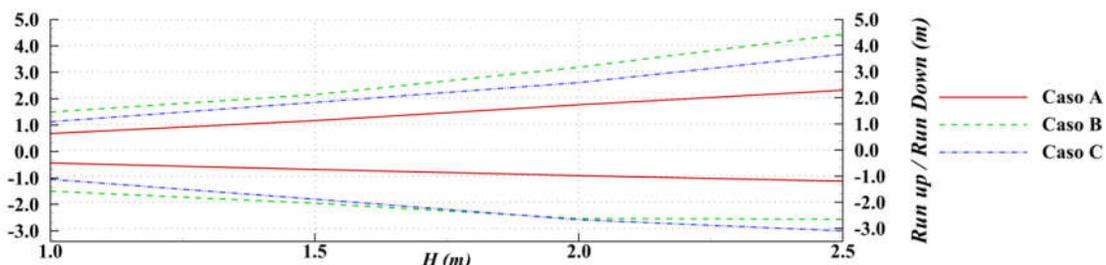


Figura 4.14 - *Run up* e *run down* ao longo da altura de onda incidente, caso a caso para $T = 6$ s.

Assim, nas Figuras 4.14 a 4.16, observa-se a tendência esperada de crescimento da amplitude das elevações com o crescimento da onda incidente sobre a parede dos equipamentos. Comparando os casos entre si e analisando as Figuras 4.14 a 4.16, observa-se que o caso A, de forma geral, apresenta significativamente menos *run up* e *run down* que os casos B e C, sendo as diferenças menores para alturas de onda incidente menores, e então, progressivamente maiores conforme crescimento da onda incidente. O caso B apresentou em média 51% mais *run up* do que caso A, e 85% mais *run down*.

Em $T = 6$ s as diferenças de elevações entre os casos A, B e C são as maiores e é também o período em que ocorrem as maiores elevações (*run up* e *run down*) nos casos B e C. Os casos B e C apresentam diferenças menores em *run up* e *run down* entre si (em média, B é maior em 12% no *run up* e 16% no *run down*). Para ondas de altura menor, o caso B apresenta *run up* e *run down* maiores que o caso C, enquanto que, nas ondas de maior altura, o caso B apresentou maior *run up*, mas menor *run down* que o caso C.

Para o período de 6 s, o caso B obteve elevações, em média, o dobro do caso A para *run up* e 2.7 vezes maior no *run down*.

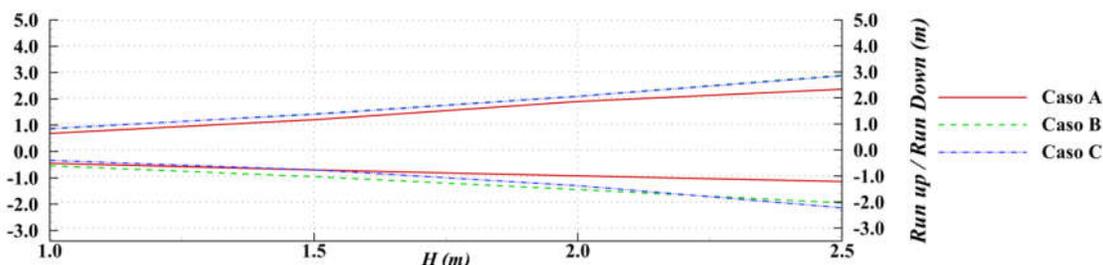


Figura 4.15 - *Run up* e *run down* ao longo da altura de onda incidente, caso a caso para $T = 9$ s.

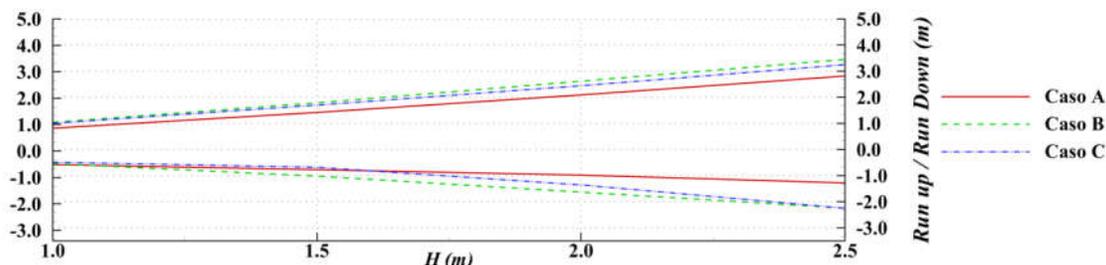


Figura 4.16 - Run up e run down ao longo da altura de onda incidente, caso a caso para $T = 12$ s.

A diferença de *run up* e *run down* entre B e C diminui nos períodos intermediários e maiores, como pode ser observado nas Fig. 4.15 e 4.16, ou ainda pelas Fig. 4.17 e 4.18 que plotam o *run up* e *run down* em relação ao período da onda incidente. Também fica claro, pelas Fig. 4.14 a 4.18, que o *run up* é maior que o *run down* para cada caso individualmente e que o período de 9 s apresenta os menores valores de *run up* e *run down* para os casos B e C. Em média, o *run up/down* do caso B foi 74% maior em $T = 6$ s que em $T = 9$ s, e o mesmo ocorre no caso C em 73%.

No caso A, o período de 6 s apresenta os menores valores de *run up/down*. O caso A apresenta os seus maiores valores de *run up/down* no período de 12 s (em média 16% maior que em $T = 6$ s).

As Figuras 4.17 e 4.18 reforçam a observação anterior sobre a maior elevação para as ondas de 6 s e mostram que não existem mudanças expressivas no avanço da SL sobre a parede frontal dos equipamentos em relação à altura da onda incidente, gerando apenas linhas com formas praticamente idênticas para uma onda incidente de 1 m ou 2.5 m.

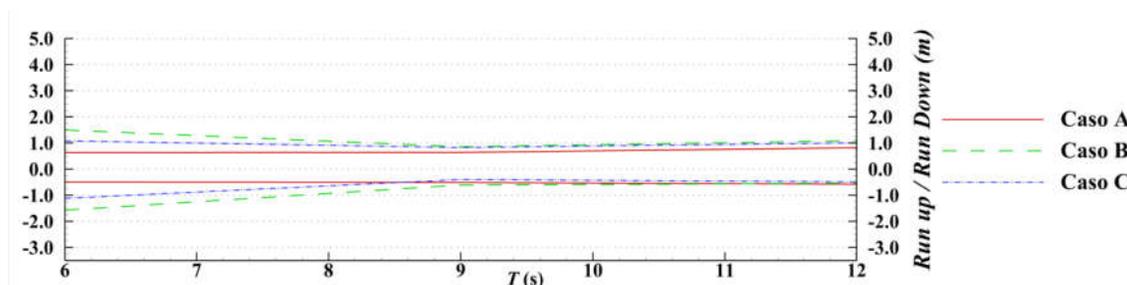


Figura 4.17 - Run up e run down ao longo do período da onda incidente, caso a caso para $H = 1.0$ m.

A avaliação do *run down* é interessante de se realizar, pois um dos parâmetros importantes de projeto de um dispositivo tipo CAO é a profundidade de imersão da parede frontal (*lip*), que, nestes estudos, foi mantida constante em 2.5 m. Foi observado, por Teixeira et al. (2013), que, quanto menor for esta medida, maior é a eficiência do dispositivo. Entretanto, profundidades baixas de imersão aumentam a probabilidade de uma onda de maior altura reduzir o nível da SL na passagem de sua cava, abaixo da parede frontal, implicando em uma forte dissipação de energia na região ou, até mesmo, um fluxo de ar para dentro ou fora da câmara sem passar pela turbina.

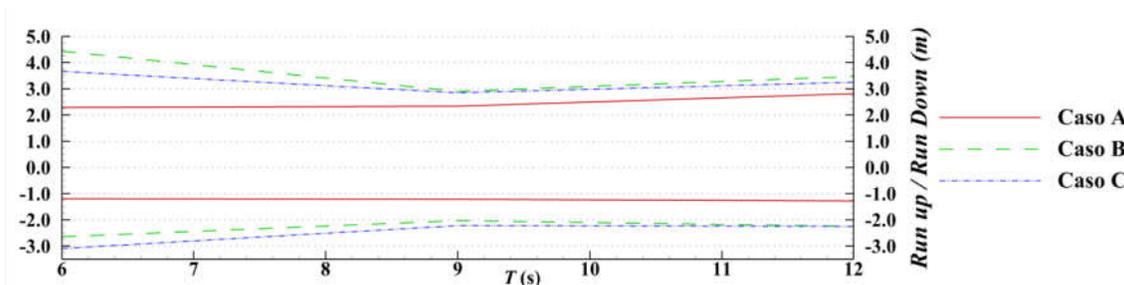


Figura 4.18 - *Run up* e *run down* ao longo do período da onda incidente, caso a caso para $H = 2.5$ m.

Estudar a frequência em que isso pode ocorrer, para certas combinações de onda e dimensões dos dispositivos ganha importância, uma vez que a interação fluido-estrutura da geometria dos planos inclinados ocasiona elevações bem diferentes das observadas para a parede vertical, como ficou demonstrado com os casos B e C apresentando maiores *run up/down* para períodos menores ($T = 6$ s). Portanto em uma ocasião de projeto em um mar de ondas mais curtas com este tipo de CAO os projetistas devem se precaver quanto à possibilidade de um estado de mar permitir o escape de ar por baixo da parede frontal.

O próprio LIMPET conta com a variação de ângulo da parede frontal como forma de mitigar esta possibilidade, gerando uma condição na qual o fluxo de saída da água impede que ar adentre a câmara sem interferir muito no fluxo de entrada (QUB, 2002). Outro fator relevante é a possibilidade de, durante uma tempestade, as ondas galgarem a estrutura completamente e atingirem os equipamentos de turbo-geração montados atrás do CAO. Por este motivo, o LIMPET foi projetado com um anteparo na parte superior de sua parede frontal inclinada (QUB, 2002).

4.3 Interações onda-estrutura dentro da câmara

4.3.1 Hidrodinâmica

Os resultados relacionados à câmara hidropneumática dos dispositivos, ditas a vazão através da turbina, a pressão gerada no escoamento e a potência desenvolvida, são apresentadas a seguir. Primeiramente são mostrados os resultados para os casos A, B e C em uma análise temporal mais específica para uma onda de $H = 1.5$ m e $T = 9$ s e, em seguida, os resultados gerais obtidos em todas as simulações.

Na Figura 4.19, a elevação média da coluna de água dentro da câmara pode ser observada para os três casos ($H = 1.5$ m e $T = 9$ s). O sinal foi obtido após a estabilização dos sinais no tempo e então, adimensionalizado sobre o período de uma onda para exibir a evolução da SL em termos de frações de tempo em um período de onda, partindo do zero ascendente de cada sinal. As frações de tempo são equivalentes aos apresentados no Item 4.1.

Nota-se o comportamento muito próximo dos casos B e C, mais distantes do caso A, que obteve uma altura média de elevação da SL dentro da câmara um pouco menor que os outros dois. O caso A obteve 1.08 m de elevação máxima média, e os casos B e C, 1.18 m e 1.13 m, respectivamente, enquanto a elevação mínima média foi de -0.91 m, -1.06 m e -1.03 m para A, B e C, respectivamente. É possível observar também uma ligeira diferença de fase nos picos do sinal entre o caso A e os outros, principalmente nos pontos de máxima, enquanto que, no ponto de mínimo, a diferença não é tão pronunciada.

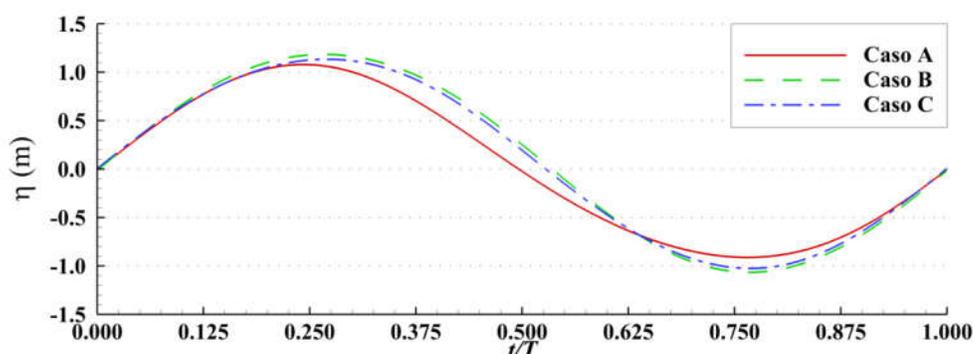


Figura 4.19 – Série temporal da elevação média da coluna de água da câmara dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

A média das alturas máximas desenvolvidas nas câmaras dos dispositivos, H_C , foi cruzada com a altura e o período das ondas incidentes em um *plot* 2D do tipo curvas de contorno, representando as alturas H_C em uma escala de cores, exposta na Fig. 4.20.

Observando a Fig. 4.20, percebe-se a distribuição desigual do H_C ao longo da altura e do período da onda incidente para todos os casos. Comum aos três casos é a tendência de experimentar valores máximos em direção ao período de 12 s e altura incidente de 2.5 m.

O caso A apresenta valores entre 0.87 m e 3.81 m, o caso B entre 0.42 m e 4.10 m e o caso C entre 0.61 m e 4.14 m, sendo os valores mínimos em $H = 1.0$ m e $T = 6$ s, e os valores máximos em $H = 2.5$ m e $T = 12$ s em todos os casos. Alguns destes valores estão abaixo do valor da altura da onda incidente o que indica um fator de amplificação com valores entre 0 e 1. O fator de amplificação é definido como a relação da amplitude da resposta do dispositivo CAO sobre a altura da onda monocromática incidente (TORRES, 2015).

O caso A apresentou um H_C consideravelmente maior que os casos B e C para o período de 6 s, sendo o caso B o pior neste período. As médias para este período em todos os casos foram 1.37 m, 0.70 m e 1.0 m para os casos A, B e C respectivamente. A diferença de H_C entre os casos também pode ser observada claramente pela maior ocorrência das cores azul e turquesa nos gráficos da Fig. 4.20, ou ainda pela maior área abaixo da isolinha de 1.0 m.

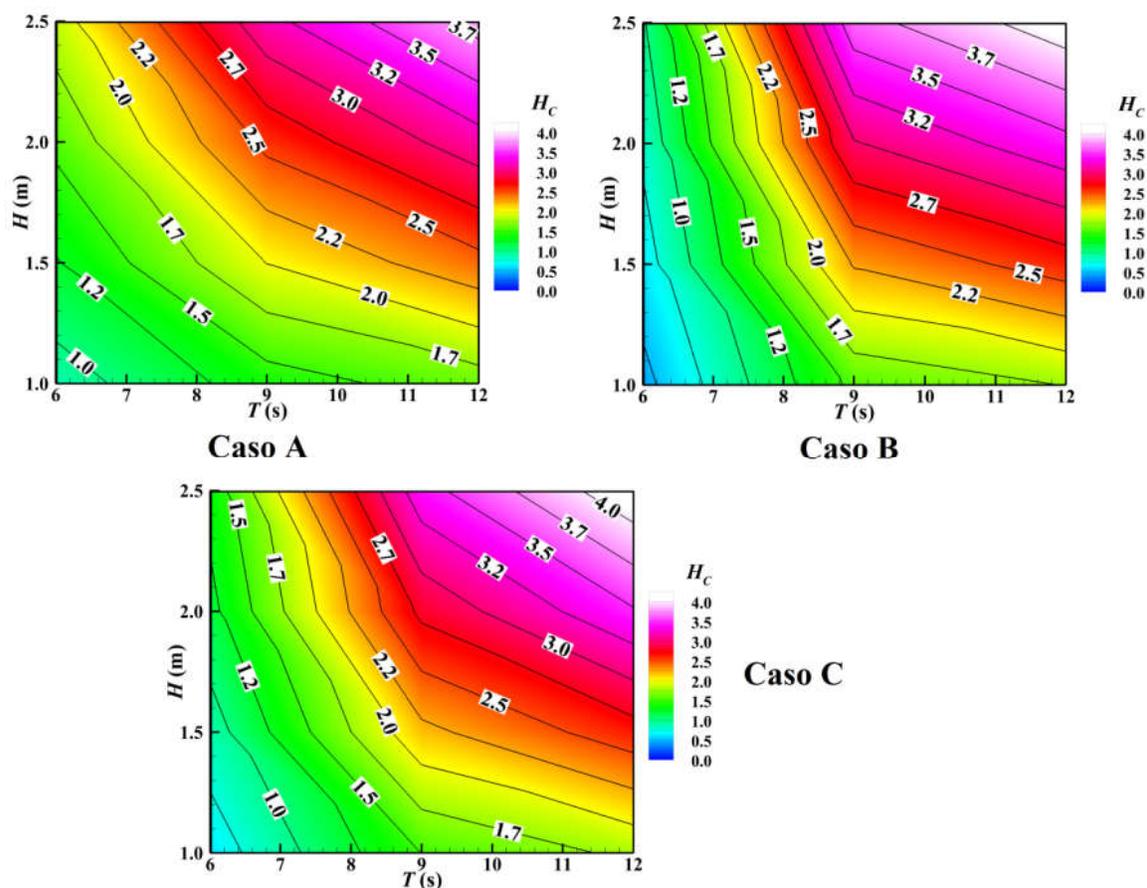


Figura 4.20 – Distribuição da altura média H_C pela altura H e período T das ondas incidentes, para os casos A, B e C. Valores de H_C em m.

Em 9 s, os casos B e C obtiveram maior altura H_C , como pode ser observado pela presença da isolinha de 2.5 m de H_C presente a partir de uma altura de onda incidente menor nos casos B e C que no caso A, Fig. 4.20. As médias para este período foram de 2.26, 2.59 e 2.45 m para os casos A, B e C, respectivamente. As diferenças entre os casos em 9 s são menores que em 6 s.

Em 12 s, as diferenças de altura entre os casos são ainda menores, sendo difícil visualizar através dos gráficos da Fig. 4.20. As médias foram de 2.73, 2.96 e 2.99 m, para os casos A, B e C, respectivamente. Os dados da altura média da coluna de água oscilante (H_C) podem ser encontrados nos Apêndices A, B e C.

Importante salientar que os valores médios da altura máxima de elevação dentro do CAO é um valor médio tanto no tempo quanto no espaço, ou seja, a elevação apresenta valores diferentes ao longo da largura do CAO, sendo o valor médio ao longo desta largura registrado como explicado no Item 3.2. O principal fator que afeta a elevação da SL ao longo da largura o CAO é o *sloshing*. As variações nos picos positivos e negativos dos valores de elevação geram valores de altura ligeiramente diferentes ao longo do tempo, que também são tomados em média, resultando no H_C .

Sloshing é o fenômeno que ocorre dentro dos aparelhos definido como o movimento da SL dentro da câmara de se inclinar para frente e para trás, distanciando-se do movimento idealizado de pistão vertical, onde toda a SL se move apenas verticalmente e na mesma proporção ao longo da largura da câmara.

Essa movimentação pode prejudicar a conversão de energia pneumática do CAO, pois promove apenas a recirculação do ar dentro da câmara, configurando em energia não aproveitada. Além disso, é causadora de movimentos que tendem a aumentar as perdas viscosas da água.

Para verificar o *sloshing*, o nível da SL dentro da câmara foi medido pelas sondas de *sloshing*, conforme as Fig. 3.3 e 3.4. As elevações obtidas foram trabalhadas para realizar comparações entre os casos A, B e C, de forma a se equivalerem a leituras realizadas com sondas verticais ao longo da profundidade do canal, especialmente o caso C, que necessita de sondas em duas inclinações diferentes para acompanhar a forma da parede frontal.

O sinal temporal das Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 mostram a sobreposição dos sinais destas sondas para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s, nos casos A, B e C, respectivamente. Notam-se claramente as maiores elevação das sondas SCAOPD, frente às outras em todos os casos, tornando-se progressivamente menores em direção à SCAOPE. É evidente também que a os casos B e C apresentam uma diferença de elevação entre SCAOPE e SCAOPD maior que a que ocorre no caso A, sendo a SL deste caso mais próxima do movimento ideal que a dos outros dois.

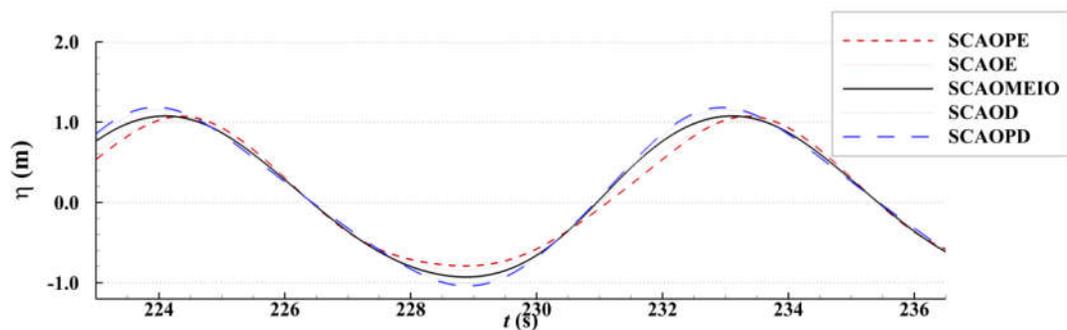


Figura 4.21 - Sinal temporal das elevações da SL dentro da câmara nas sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD. Caso A, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

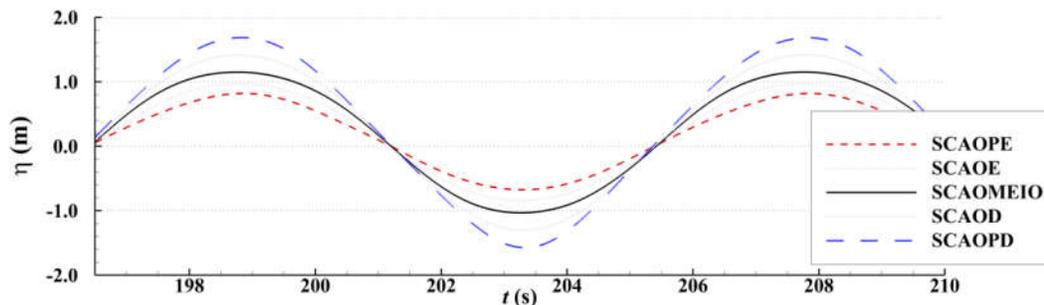


Figura 4.22 - Sinal temporal das elevações da SL dentro da câmara nas sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD. Caso B, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

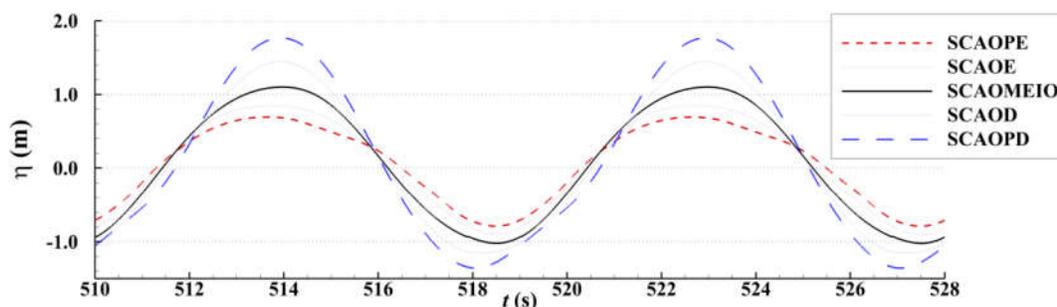


Figura 4.23 - Sinal temporal das elevações da SL dentro da câmara nas sondas SCAOPE, SCAOE, SCAOMEIO, SCAOD e SCAOPD. Caso C, $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

A diferença de elevação entre o lado posterior das câmaras, sonda SCAOPD, e o anterior, SCAOPE, foi realizada tempo a tempo, gerando um sinal temporal. A Figura 4.24 mostra esta diferença para o caso A. A média das alturas deste sinal são tomadas em seguida (diferença entre seus picos locais máximos e mínimos) convertidas em um parâmetro de altura aqui chamado de parâmetro de *sloshing*, em concordância com Teixeira et al. (2013).

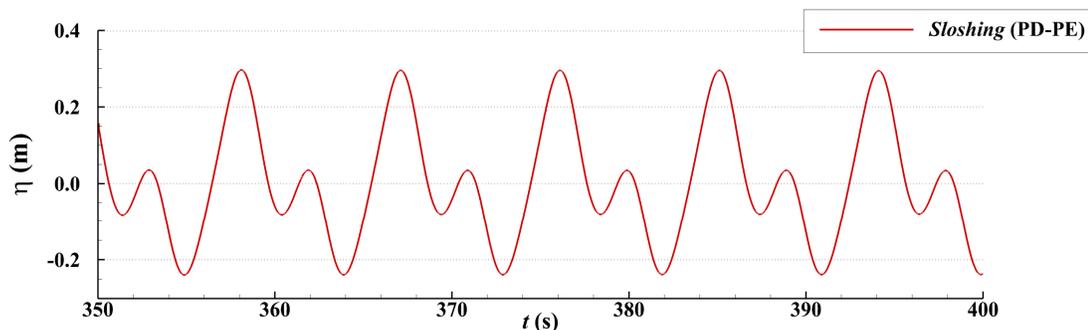


Figura 4.24 - Diferença entre a elevação da SL nos extremos da câmara, SCAOPD e SCAOPE, caso A, $H = 1.5$ m, $T = 9$ s.

As médias da altura destes sinais foram utilizados em todas as combinações de caso, altura e período de onda, para gerar um *plot* 2D, do tipo curvas de contorno, representando o parâmetro de *sloshing* em uma escala de cores, cruzando no eixo vertical a altura e no eixo horizontal o período

das ondas incidentes, como mostram as Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 para os casos A, B e C, respectivamente. Este tipo de gráfico permite analisar um número grande de informações ao mesmo tempo, mantendo a clareza das informações.

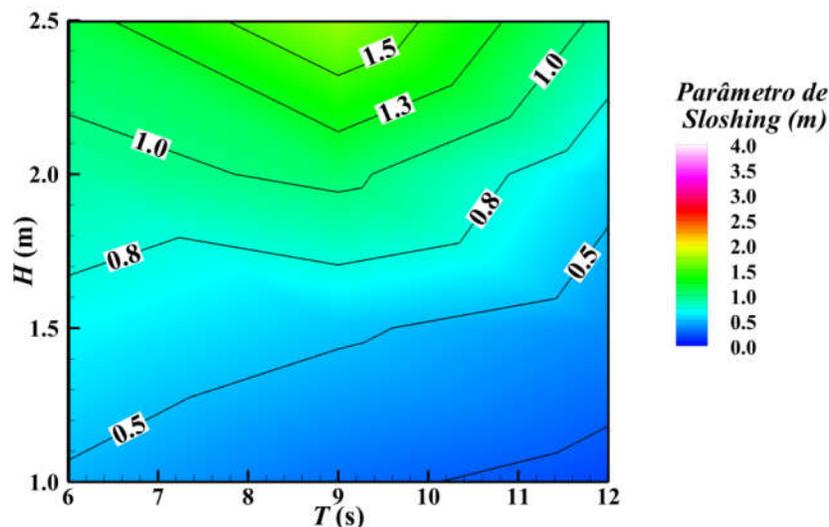


Figura 4.25 – Distribuição do *parâmetro de sloshing* em relação à altura e ao período da onda incidente para o caso A.

Pela Figura 4.25, observa-se que o *parâmetro de sloshing* tende a aumentar conforme o aumento da altura da onda incidente, independentemente do período analisado (ainda que com taxas diferentes), enquanto que, para variação do período, os valores tendem a subir e descer dependendo da altura de onda incidente. Para a altura de 1 m, por exemplo, a tendência com o aumento do período é a diminuição do *sloshing*, mas para alturas de 2 m ou acima, a tendência do *sloshing* com o aumento do período da onda incidente é primeiramente aumentar até atingir um pico perto de 9 s, e então voltar a cair em direção às ondas de 12 s, conforme fica bem evidente pelas isolinhas de *parâmetro de sloshing* se aproximando de parábolas na região de $H \approx 2$ m e $T \approx 9$ s.

Analisando a Fig. 4.26, com as curvas de contorno de *parâmetro de sloshing* para o caso B, observa-se que a altura da onda incidente influencia fortemente o *sloshing*, diferentemente do período.

O maior desvio deste comportamento ocorre para os períodos maiores, a partir de 9 s, onde se observa que uma altura constante de onda incidente passa a causar *sloshing* maior apenas com o crescimento do período, resultando nos valores máximos de *parâmetro de sloshing* para os maiores períodos e alturas de ondas testadas. Este comportamento fica evidente ao se observar que as isolinhas de *parâmetro de sloshing* são praticamente horizontais até atingirem o período de 9 s, onde passam a apresentar uma inclinação negativa.

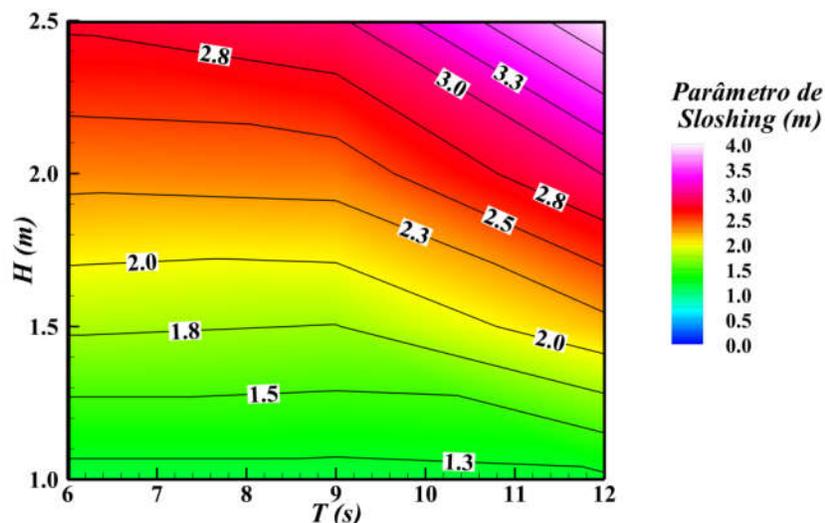


Figura 4.26 - Distribuição do *parâmetro de sloshing* em relação à altura e ao período da onda incidente para o caso B.

Na Figura 4.27, as curvas de contorno de *parâmetro de sloshing* para o caso C são representadas, evidenciando a tendência do crescimento maior do *sloshing* com a altura da onda incidente do que com o período.

Neste caso, o comportamento do *sloshing* sofre um desvio para os períodos menores (*sloshing* é maior para os períodos menores). Os períodos maiores apresentam um menor *parâmetro de sloshing* do que os períodos menores, e este comportamento se encontra igualmente distribuído ao longo da faixa de períodos testados, como evidenciado pelas isolinhas de *parâmetro de sloshing* com uma inclinação positiva suave desde 6 até 12 s.

Comparando os casos B e C, é possível observar que apresentam comportamentos opostos. O caso B apresenta uma inclinação maior, que começa a partir de 9 s aproximadamente; o caso C tem uma inclinação mais suave e ao longo de toda a faixa de períodos. No caso C, observa-se maior parâmetro de *sloshing* para períodos de 6 s e, no caso B, o *parâmetro de sloshing* é maior para $T = 12$ s. As diferenças entre os casos B e C nos períodos de 6 s e 12 s são maiores que em 9 s (em $T = 6$ s, o caso B tem em média 23% menos *sloshing*, e em 9 s 2% a menos, enquanto em $T = 12$ s o caso B apresenta 46% a mais).

Já o caso A apresenta um comportamento mais equilibrado, apresentando valores menores que os casos B e C, sendo mesmo em seu máximo ($T = 9$ s, no caso A e $T = 12$ s no caso B) 56% menor que o valor máximo de *sloshing* do caso B (na média geral o caso A apresenta 65% menor *sloshing*).

Em $T = 12$ s o caso B apresentou o maior *sloshing*, seguido pelo caso C (46% menor), maior que o caso A em aproximadamente 80% neste período.

Apesar disto, apresenta uma maior variação de comportamento, visto que diferentemente dos casos B e C que apresentam uma preferência clara por um período de onda, independente da altura da onda incidente, o caso A varia o período de maior *sloshing* também de acordo com a altura da onda incidente, como pode ser observado na Fig. 4.25.

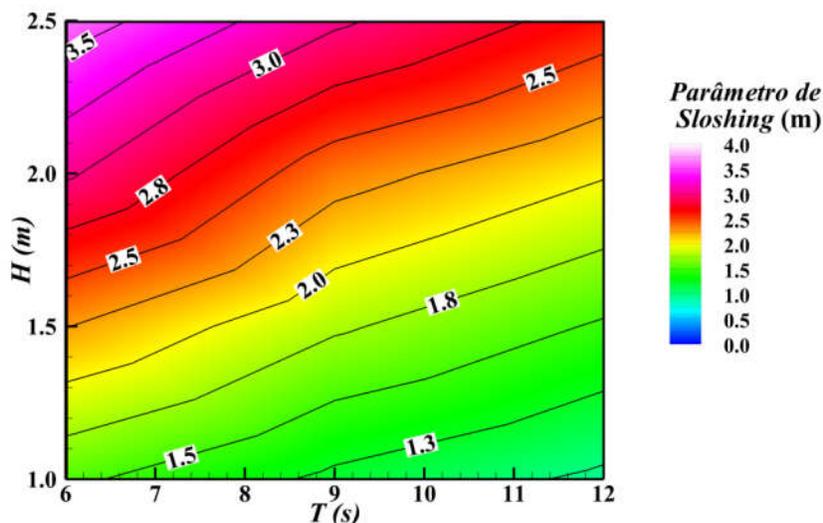


Figura 4.27 - Distribuição do *parâmetro de sloshing* em relação à altura e ao período da onda incidente para o caso C.

Uma observação interessante é que apesar de H_C ser máximo em $T = 12$ s e $H = 2.5$ m, o *sloshing* da câmara varia mais conforme o período e caso analisado, sendo maior em 9 s no caso A, 12 s no B e 6 s no caso C, apesar de ser outra elevação da SL da câmara.

Conforme explicado no Item 4.2.2, onde se discute o *run up/down*, o *sloshing* também deve ser considerado para o dimensionamento do CAO. Os valores do parâmetro de *sloshing* atingiram elevações muito próximas de 4 m de altura nos casos B e C, que para estas câmaras com 6 m de altura acima do nível da água já configura em um risco grande da água atingir as turbinas durante uma tempestade, o que provocaria sérios danos a elas, fora a quantidade de aerossol e partículas de água que são arrastadas para as turbinas e prejudicam a durabilidade do equipamento. Plantas já instaladas contam com mecanismos de proteção contra estas situações, como uso de válvulas (Falcão, 2000; QUB, 2002) e no caso do LIMPET um platô com blocos de amortecimento antes da entrada da turbina (QUB, 2002).

4.3.2 Aerodinâmica

Os sinais de vazão foram obtidos utilizando os mesmos intervalos de tempo usados para obtenção dos sinais da Fig. 4.19, de forma a manter fiel a comparação entre os sinais, já que em uma simulação que considera o ar incompressível espera-se que ocorra uma defasagem de 90° entre os sinais de elevação da SL dentro da câmara e a vazão, uma vez que a vazão é a velocidade

(derivada temporal da posição) da SL multiplicada pela área de seção transversal da câmara. Este efeito foi observado por outros autores, como Elhanafi et al. (2017) e se confirma com a comparação das Fig. 4.19 e 4.28.

Analisando a Fig. 4.28, observa-se que os pontos de máximo ocorrem na posição de zero ascendente da SL, momento em que a velocidade é máxima. Nos momentos de inversão da direção de movimento da SL a velocidade é zero. O caso A desenvolveu as vazões máximas de $75.49 \text{ m}^3/\text{s}$ no início do ciclo (saída de ar) e $-67.23 \text{ m}^3/\text{s}$ (10.9% menor em módulo) em $0.46 t/T$ (entrada de ar), o que evidencia um desvio do comportamento linear. Isso também se reflete na maior inclinação da curva durante a entrada de água na câmara do que na saída, de inclinação muito mais suave e na posição do pico de mínimo deslocado de $t/T = 0.5$.

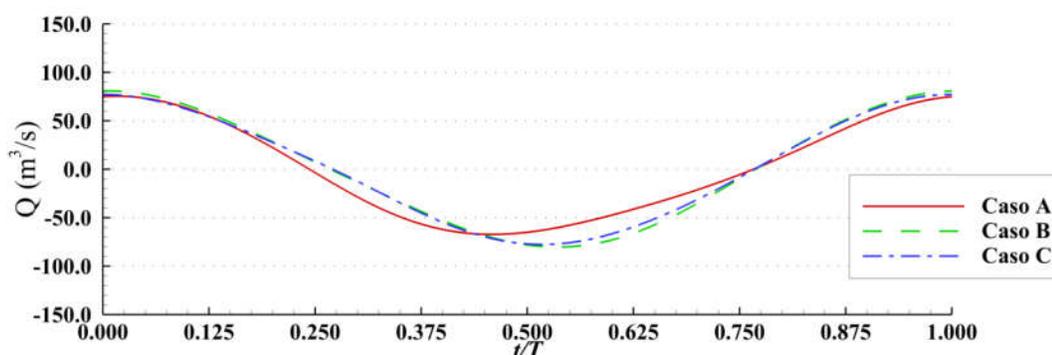


Figura 4.28 - Vazão através da turbina dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5 \text{ m}$ e $T = 9 \text{ s}$.

As curvas dos casos B e C são muito parecidas na forma e amplitude, chegando a ser coincidentes em alguns momentos. Ambos os casos obtiveram maiores picos de vazão que o caso A, com ligeira vantagem para o caso B, chegando às máximas de $80.9 \text{ m}^3/\text{s}$ e $77.18 \text{ m}^3/\text{s}$ para B e C, respectivamente, e $-80.3 \text{ m}^3/\text{s}$ e $-77.63 \text{ m}^3/\text{s}$ para as mínimas. Os pontos de mínima ocorrem em 0.54 e $0.51 t/T$ para B e C, respectivamente, sendo apenas ligeiramente defasados dos pontos esperados para um ciclo senoidal. Observa-se que os desvios das curvas em relação a senoidal ocorrem no sentido oposto do caso A. O caso B (caso de maior vazão) apresentou 6.7% maior vazão no pico de saída de ar que o caso A (caso de menor vazão) e 16.3% no pico de entrada de ar.

É evidente também a menor diferença entre máximo e mínimo ocasionada para o caso B (0.7%), e até mesmo o C (0.6%), em relação ao A. Esta diferença é importante, pois afeta a estabilidade de geração de energia elétrica, visto que esta diferença se acentua nas curvas de pressão e, conseqüentemente, na potência pneumática.

As séries temporais de pressão manométrica da câmara hidropneumática para $H = 1.5 \text{ m}$ e $T = 9 \text{ s}$ e para os casos A, B e C são apresentadas na Fig. 4.29. Observa-se que as formas das curvas

são quase idênticas às formas de curva da vazão. As pressões máximas são 3774 Pa, 4044 Pa e 3859 Pa, e as mínimas são -3362 Pa (em $t/T = 0.46$), -4082 Pa (em $t/T = 0.53$) e -3937 Pa (em $t/T = 0.51$), para A, B e C, respectivamente. A diferença percentual entre os módulos dos picos de pressão 10.9%, 0.9% e 2% para A, B e C, respectivamente. Os valores dos picos de pressão negativa são maiores que os picos de pressão positiva nos casos B e C nos períodos de 6 e 12 s, sendo praticamente igual no período de 9 s. No caso A a tendência é de que os picos de pressão negativa sejam maiores em módulo para o período de 12 s, enquanto que os picos de pressão positiva sejam maiores em 9 s. Em 6 s os valores são bem equilibrados.

A diferença de valor entre os picos de pressão máxima (saída de ar) e de mínima (entrada de ar), por conta de efeitos de interação fluido-estrutura, provocam diferentes resistências ao escoamento da água na incidência da onda e esvaziamento da câmara, fato observado por outros autores (FLEMING et al., 2012).

Logo, os dispositivos geram quantidades de energia diferentes quando enchendo do que quando esvaziando, o que é um ponto negativo para geração de energia, uma vez que se deseja entregar uma tensão elétrica constante à rede. Este efeito pode ser melhor observado na Fig. 4.30. Entretanto, existem meios de solucionar este problema, como uso de volantes mecânicos e reguladores elétricos que são eficientes nesta tarefa.

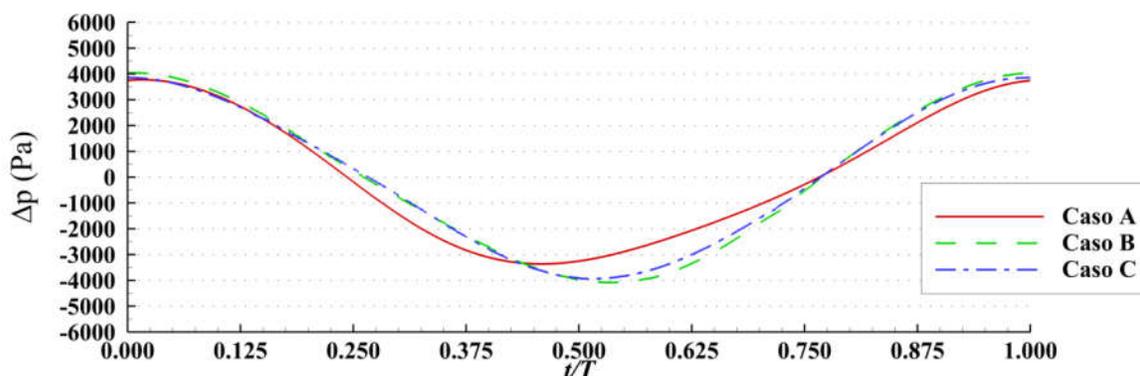


Figura 4.29 – Pressão manométrica da câmara dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

A Figura 4.30 mostra as séries temporais da potência pneumática para os mesmos casos. Observa-se que, conforme descrito anteriormente, as diferenças de módulo entre os valores máximos e mínimos de pressão são magnificadas para potência. Matematicamente isso é demonstrado através da relação entre pressão potência para turbinas Wells, onde o termo de pressão é elevado ao quadrado, conforme Eq. (4.2).

A potência pneumática pode ser definida como o produto da vazão pelo diferencial de pressão através da turbina, como descrito anteriormente,

$$P = \Delta p Q [W] \quad (4.1)$$

onde P é a potência pneumática, Δp é o diferencial de pressão da câmara e a atmosfera.

Logo é possível isolar a vazão Q na Eq. (3.2) e substituí-la na Eq. (3.1), chegando à expressão:

$$P = \frac{\Delta p^2}{k_t} \quad (4.2)$$

utilizada neste trabalho para obtenção das séries temporais de potência por ser mais simples de se trabalhar apenas com uma curva de pressão.

Ainda analisando a Fig. 4.30, o caso A, que apresentou maior pressão na entrada da água que no esvaziamento da câmara, é o único onde se observa valor de potência pneumática maior nas extremidades que no centro do ciclo do período de onda, gerando picos de potência de 280 kW na entrada da onda no dispositivo e 226 kW na saída da água. É possível se observar a influência de não linearidades importantes causando assimetria em torno dos picos do sinal.

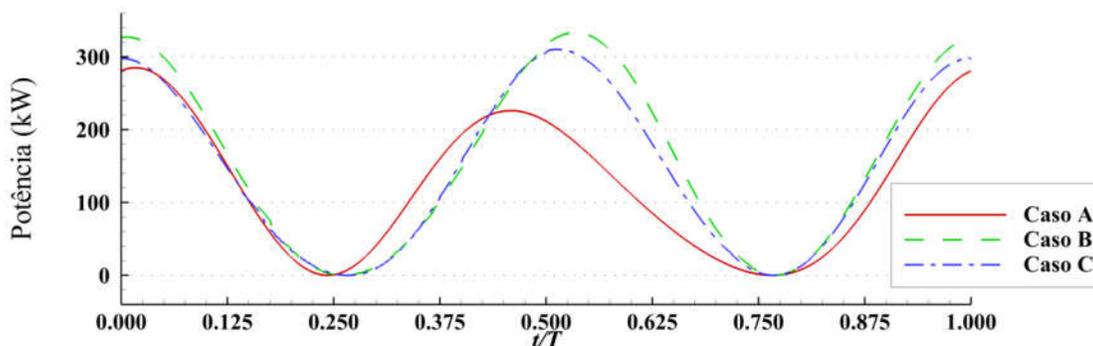


Figura 4.30 – Série temporal da potência pneumática desenvolvida na câmara dos dispositivos dos casos A, B e C, para $H = 1.5$ m e $T = 9$ s.

Os casos B e C, novamente muito similares, ainda que, por conta da pressão quadrática, as curvas de potência apresentem diferenças maiores que anteriormente. O caso B desenvolveu 326 kW durante o fluxo de entrada de água e 332 kW na saída da água do aparelho, enquanto que o caso C apresentou 298 kW e 309 kW respectivamente. As diferenças percentuais nos picos foram de 20.7% para o caso A, 1.8% para o caso B e 3.9% para o caso C. Observando as formas das curvas de B e C, nota-se menor efeito de não linearidades, contando com formas mais simétricas em torno dos picos, que o caso A.

O comportamento dos casos não segue, entretanto, um padrão, tendendo, por exemplo, a ocorrer mais picos de pressões ou vazões negativas ao longo de todas as combinações de ondas testadas. Os Apêndices D, E e F mostram os picos de elevação média da SL dentro da câmara, da pressão, da vazão e da potência pneumática para os três casos. Como se pode observar, para ondas

de períodos 6 s e 12 s, há uma tendência de que as vazões negativas sejam maiores em módulo para todos os casos, enquanto que, para 9 s, a tendência do caso A é de que vazões positivas tenham picos maiores, enquanto que os casos B e C as vazões positiva e negativa tenham valores próximos.

Já os valores de pressão seguem uma tendência similar, ou seja, para 6 e 12 s, as pressões negativas tendem a ser maiores em módulo para todos os casos, enquanto que, para 9 s, a tendência do caso A é de que as pressões positivas sejam maiores, e em B e C os valores sejam muito próximos.

Para ter uma ideia melhor do desempenho de cada geometria de dispositivo, foram abordados também os valores médios da altura da coluna de água, altura da vazão, altura da pressão e potência médios dentro da câmara hidropneumática. Estes dados são expostos nos Apêndices D, E e F.

Comparando-se os resultados dos valores médios, é perceptível a vantagem do caso A para todas as variáveis no período de 6 s, sendo, em média (considerando todos H e T), de 38.6% maior na elevação da coluna de água na câmara, 35.8% maior na vazão, 34.5% maior na pressão, 81.1% maior na potência média e 76.9% maior na potência média quadrática que o caso C (segundo melhor).

Em 9 s o melhor desempenho é o do caso B, ainda que com uma margem menor. No geral, média de 5.3% maior na elevação, 5.1% maior na vazão, 5.2% maior na pressão, 10.6% maior na potência média e 10.7% maior na potência média quadrática que o caso C.

Para ondas de 12 s de período, há uma tendência dos casos B e C se alternarem como melhor desempenho. Para a onda de menor altura, 1 m, o caso C apresentou maiores valores médios em todas as variáveis apresentadas nos Apêndices D, E e F, mas, a partir das ondas de altura 1.5 m e em diante, o caso B obteve melhor desempenho, com a exceção da altura média da elevação da SL dentro da câmara, onde B obteve em média valores 1.4% menores que C, o que reforça a noção da similaridade grande entre os casos B e C. Para $H = 1.5$ m até $H = 2.5$ m a vazão foi em média 1.2% maior em B, a pressão 1.4% maior, a potência média 2.8% maior e a potência média quadrática 4.9% maior em B que em C.

Outro ponto levantado por esta análise é o fato de que a altura da onda incidente pouco altera o comportamento aerodinâmico dos dispositivos. Por outro lado, o período da onda é o fator principal que determina o comportamento dos dispositivos, como fica evidenciado pelo fato de que praticamente não há alteração de colocação (em termos de qual caso é melhor comparativamente) ao longo da altura da onda incidente, mas é praticamente determinante quando se analisa a variação do período. De fato, quanto mais próximo o período da onda estiver da faixa de períodos de ressonância dos dispositivos, melhor o seu desempenho (Horko, 2007).

4.4 Cadeia de energia dos dispositivos CAO

Utilizando os dados obtidos nas simulações numéricas através das metodologias descritas na Seção 3, foram calculadas todas as parcelas de energia dos casos A, B e C, organizadas nos Apêndice G, Apêndice H e Apêndice I, discutidos na sequência.

A partir destes resultados foram realizadas algumas análises de tendência de alguns destes fatores em relação à altura da onda incidente e ao período da onda.

4.4.1 E_R (Energia refletida)

Comparando a energia refletida de cada caso em relação à altura da onda, observa-se uma tendência de crescimento com o aumento da altura da onda incidente. A Figura 4.31 permite visualizar as tendências de E_R ao longo de H com clareza para os períodos de 6, 9 e 12 s. Em relação às diferentes geometrias, o caso A tende a apresentar E_R muito menores que os casos B e C para o período de 6 s, cerca 3,2 vezes menor que o caso B em $H = 2$ m, pior caso. Neste período, as curvas dos casos B e C, além de serem muito maiores em valor, apresentam uma maior variação da curvatura, que primeiramente cresce acima do crescimento do caso A, mas, ao atingir a altura de 2 m, alcançam um patamar, tendendo a se estabilizar.

Nos períodos de 9 e 12 s, as curvas dos três casos se aproximam, com uma pequena desvantagem do caso A em relação aos casos B e C (de valores praticamente iguais), de cerca de 33% ($T = 9$ s).

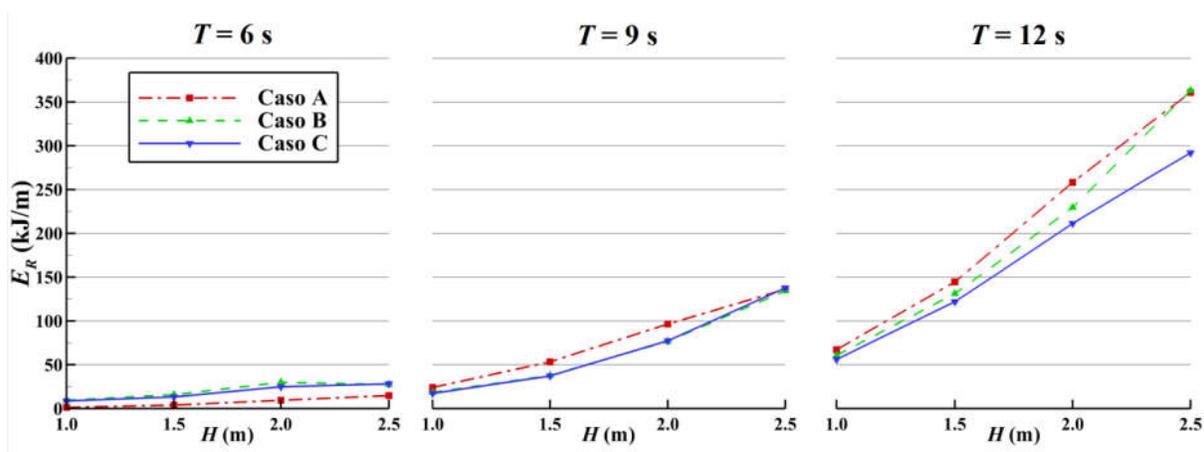


Figura 4.31 - Variação da energia refletida E_R em relação a H , para $T = 6, 9$ e 12 s.

Em relação ao crescimento do período da onda incidente, Fig. 4.32, o E_R apresenta um crescimento para os três casos. Para $H = 1$ m em $T = 6$ s, os casos B e C apresentam valores próximos e superiores ao caso A em cerca de 6 vezes. No entanto, em $T = 9$ s, o caso A ultrapassa os casos B e C e, em $T = 12$ s, o caso A já é 19% maior. Esta tendência de cruzamento das linhas se

repete para $H = 2.5$ m, mas as diferenças no período de 6 s são muito pequenas, e o caso B alcança o caso A tendendo (ambos) a refletir mais energia que o caso C em $T = 12$ s em média 14%.

De modo geral, o caso C é caso que tende a refletir menos energia para períodos de 9 a 12 s, enquanto que, em 6 s, o caso A é muito superior.

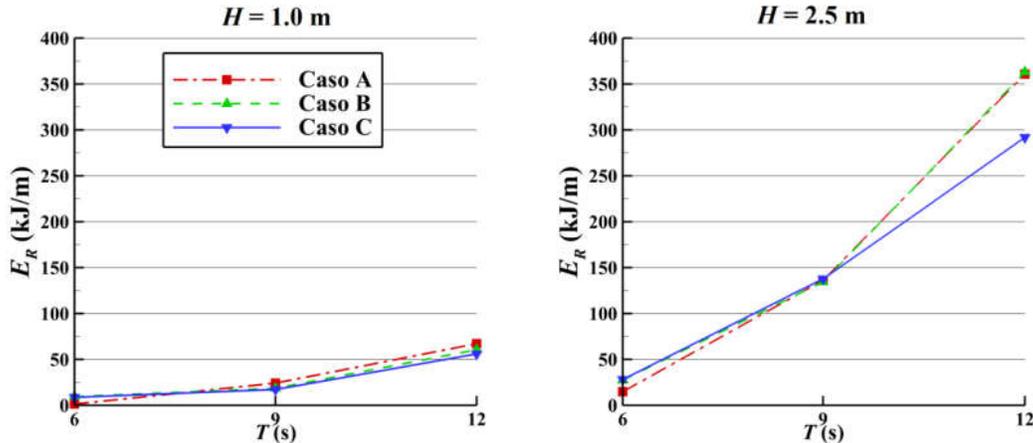


Figura 4.32 - Variação da energia refletida E_R em relação ao período da onda incidente para $H = 1$ e 2.5 m.

4.4.2 E_L (Energia perdida)

Ao se analisar as curvas de energia perdida E_L , Fig. 4.33, se observa um crescimento potencial com H , de menor inclinação conforme o aumento do período. Em relação ao período, como demonstra a Fig. 4.34, o caso A apresenta menores variações que os outros dois, sendo relativamente constante, mesmo considerando a onda de 2.5 m de altura, que apresenta as maiores variações para os três casos. Os casos B e C apresentam variações de E_L maiores com o período, mas tendem a se estabilizar a partir de períodos intermediários ($T = 9$ s). Fica evidente o desempenho inferior de todos os casos para $T = 6$ s, sendo o caso A o melhor neste período. Para uma onda pequena, a diferença de perdas entre os períodos mais altos e mais baixos fica atenuada.

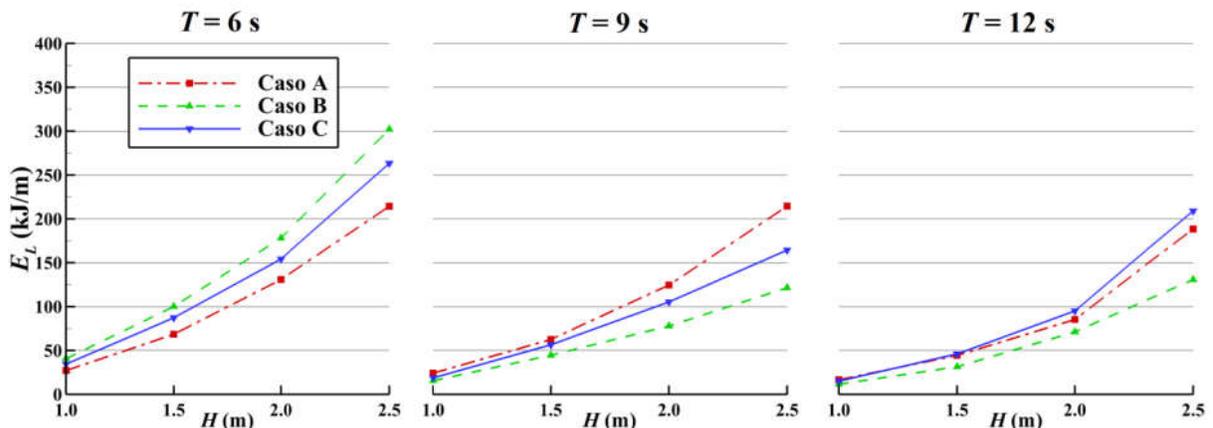


Figura 4.33 - Variação das perdas energéticas em relação à H , para $T = 6, 9$ e 12 s.

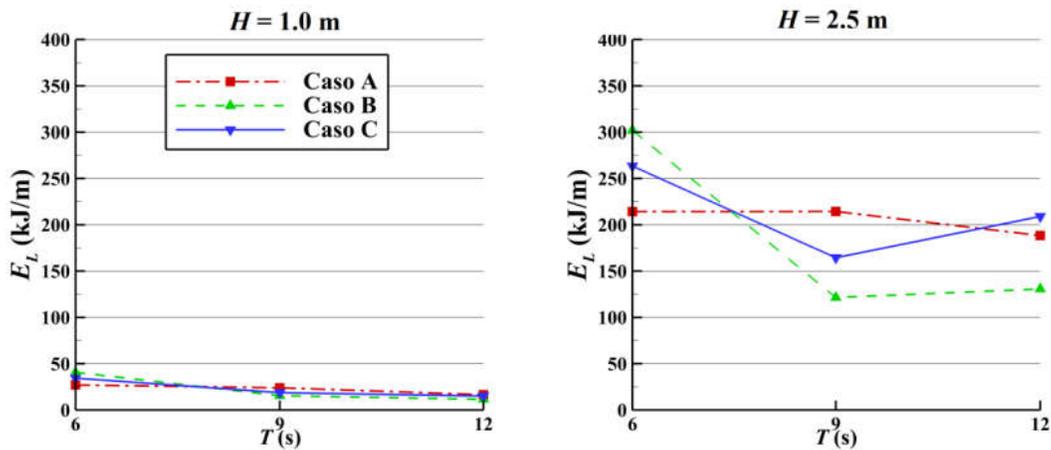


Figura 4.34 - Variação das perdas energéticas em relação ao período da onda incidente para $H = 1$ e 2.5 m.

4.4.3 E_P (Energia pneumática)

A energia pneumática desenvolvida nas câmaras segue uma tendência de potência com o crescimento de H , como previsto pela equação de energia das ondas definida pela teoria linear, onde a energia cresce com o quadrado da altura da onda, observado na Fig. 4.35, ainda que para os casos com ondas de período igual a 6 s, a tendência observada é quase linear com o aumento de H . A inclinação das curvas aumenta com o período, entretanto, esse comportamento fica limitado a partir de 9 s, melhor visualizado na Fig. 4.36. O caso A apresenta maior E_P no período de 6 s que os outros casos, mas a menor nos períodos de 9 e 12 s. O caso B apresenta a menor E_P em $T = 6$ s, mas a maior em 9 e 12 s. O caso C se coloca entre os casos B e A em todos períodos, sendo muito próximo do caso B para o período de 12 s. Observando as Figuras 4.33 a 4.36, percebe-se a maior inclinação das curvas de E_L do que E_P ao longo de H , conforme visto anteriormente, isso indica que há uma tendência de que as perdas energéticas aumentem mais do que a energia pneumática com o aumento da altura da onda, logo E_L/E_I deve aumentar com o aumento da altura da onda incidente.

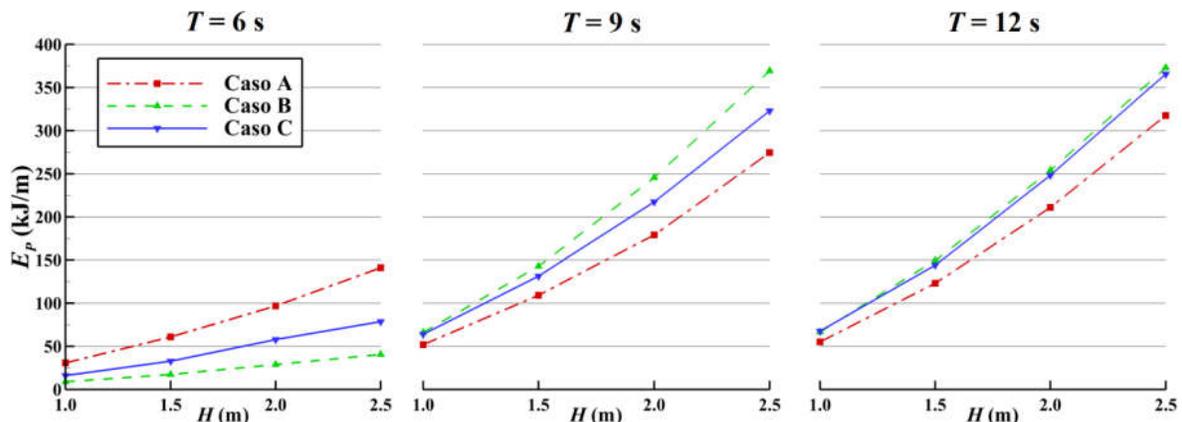


Figura 4.35 - Variação da energia pneumática em relação a H , para $T = 6, 9$ e 12 s.

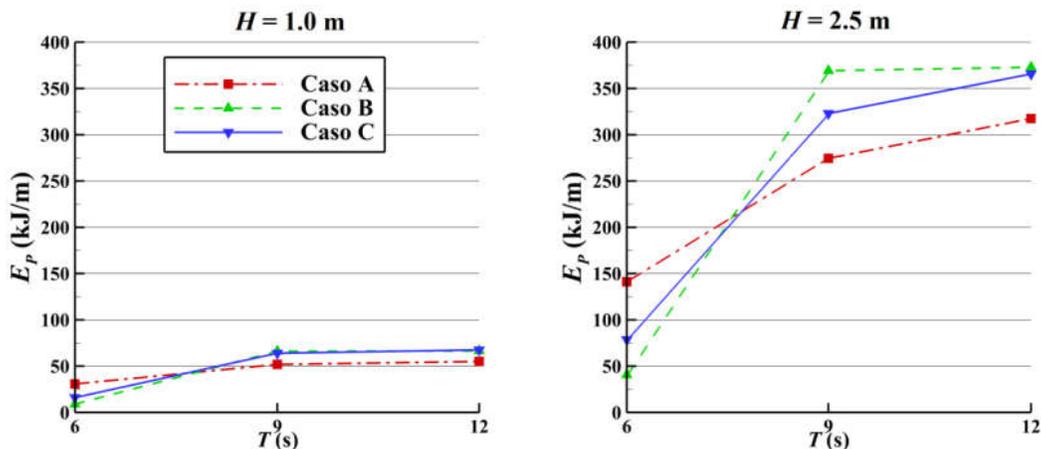


Figura 4.36 - Variação da energia pneumática ao longo do período para $H = 1.0$ m e $H = 2.5$ m.

4.4.4 Reflexão de energia relativa (E_R/E_I)

Comparando a energia refletida sobre a energia incidente de cada caso em relação à altura da onda incidente, na Fig. 4.37, é observada uma tendência de se manter relativamente inalterada com o aumento da altura da onda incidente. Em relação às diferentes geometrias, o caso A tende a apresentar E_R/E_I maiores, com a exceção das ondas de 6 s, na qual a tendência se inverte. Entre os casos B e C, o E_R/E_I atingido segue a mesma tendência com o aumento de H , independente do período da onda, sendo os valores para o caso B, levemente maiores que os de C.

Em relação ao período da onda incidente, o E_R/E_I apresenta um crescimento linear para o caso A, mas, para os casos B e C, esta tendência sofre certo desvio para os períodos menores, principalmente para alturas de onda menores, como fica claro no gráfico das Fig. 4.37 e 4.38.

Assim, para ondas de 6 s, as geometrias do caso B e C resultam em um E_R/E_I maior que o caso A, ao passo que, para 9 s e 12 s, a situação se inverte. A parede vertical propicia maior reflexão que a as paredes inclinadas de B e C nestes períodos.

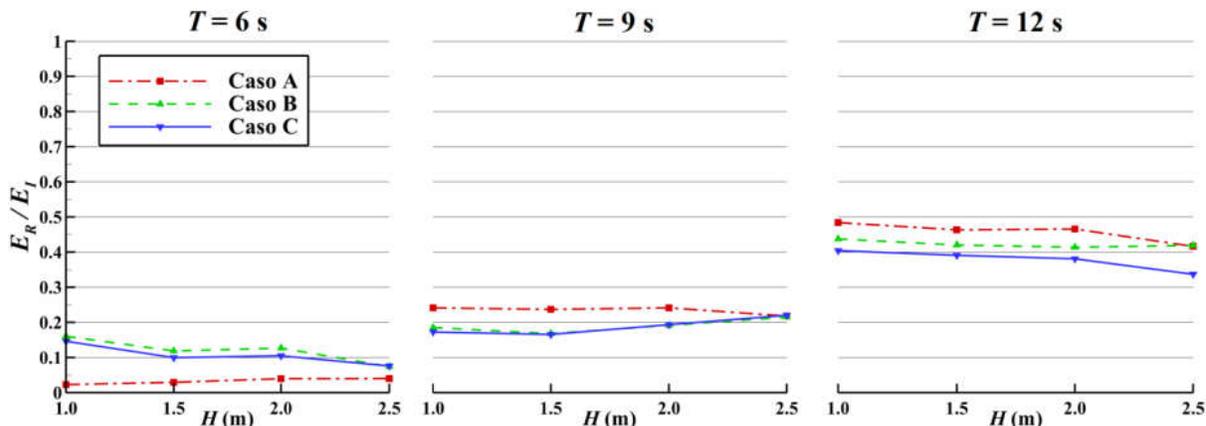


Figura 4.37 - Variação da reflexão de energia relativa em relação a H , para $T = 6, 9$ e 12 s.

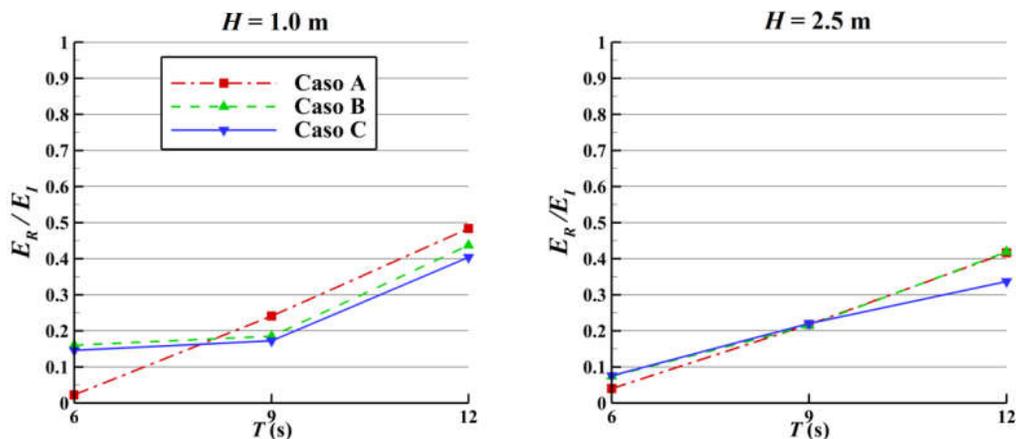


Figura 4.38 - Variação da Reflexão de energia relativa ao longo do período para $H = 1.0$ m e $H = 2.5$ m

4.4.5 Eficiência geral (E_p/E_I)

Analisando os gráficos das Fig. 4.39 e 4.40, se observa que a eficiência geral dos CAO's tem certa tendência a cair com aumento da altura da onda incidente. Em relação ao período, a eficiência foi melhor para as ondas intermediárias (9 s). Neste período o caso A obteve um máximo de 52%, o caso B 66% e o caso C 64%.

Para o período de 6 s, a eficiência das geometrias dos casos B e C foi consideravelmente inferiores àquela exibidas pelo caso A. Já em $T = 9$ s, os casos B e C obtiveram melhor eficiência que a do caso A, sendo que o caso C, que pode ser visto como uma geometria intermediária entre a B e a A, obteve uma eficiência intermediária entre A e B. Em $T = 12$ s os casos B e C apresentaram eficiência praticamente igual, e, no geral, um pouco inferior a das ondas de 9 s. É possível observar, também, uma tendência das eficiências dos três casos se aproximarem entre si com o crescimento do período da onda. De forma análoga, para o período de 6 s, os valores de eficiência para cada caso, A, B e C, tiveram maiores diferenças entre si.

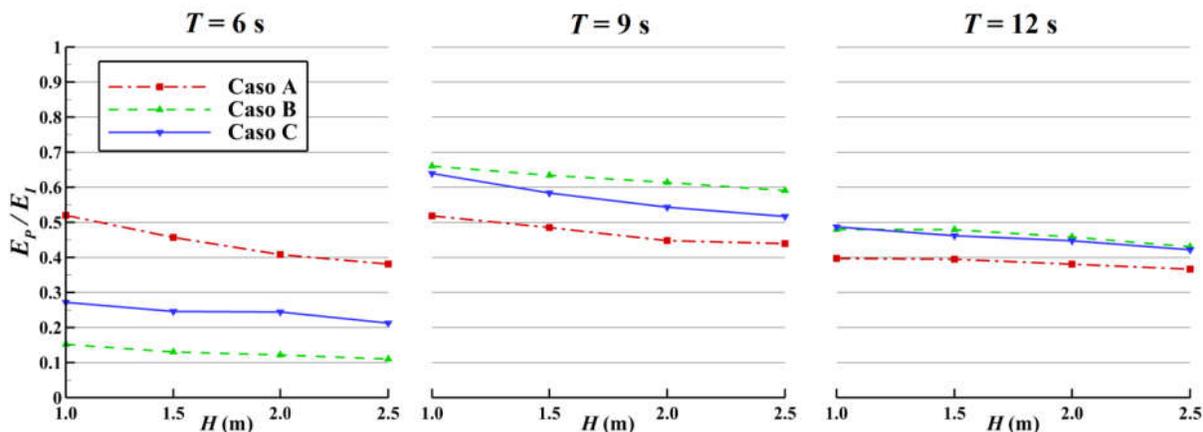


Figura 4.39 - Eficiência geral dos CAO casos A, B e C em relação à H nos períodos $T = 6, 9$ e 12 s.

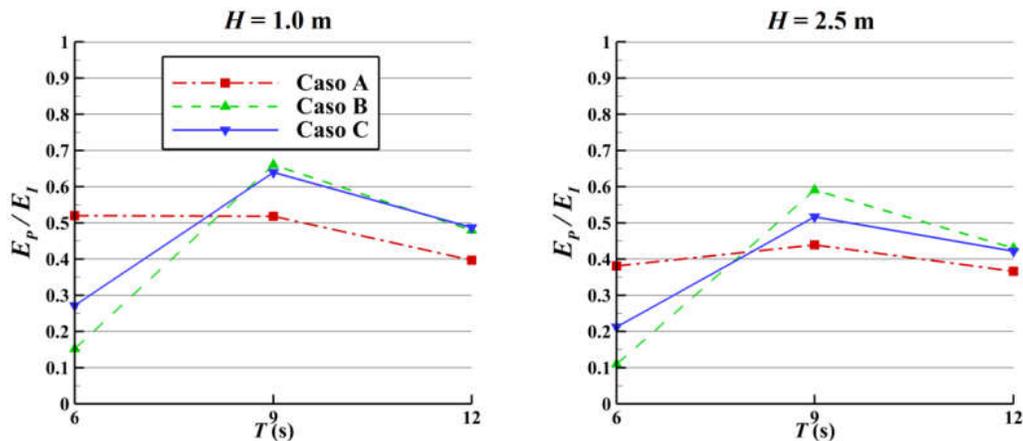


Figura 4.40 - Eficiência geral dos CAO casos A, B e C em relação ao período para $H = 1.0$ e 2.5 m.

4.4.6 Perda energética relativa (E_L/E_I)

Os gráficos da Fig. 4.41 confirmam as análises já discutidas anteriormente. O caso A apresenta as menores perdas energéticas para $T = 6$ s, mesmo quando considerando um valor normalizado em relação à energia incidente. Existe uma tendência de aumento de perda energética com o crescimento da altura da onda incidente. As diferenças de valores entre os casos são maiores para o períodos de onda de 6 s. Neste período o caso A apresenta as menores perdas. E por fim, a tendência de E_L/E_I em relação a T é o decrescimento potencial, Fig. 4.42.

As diferenças de E_L/E_I entre os casos decrescem conforme o aumento do período. Em $T = 9$ s, o caso A apresenta as maiores perdas e o caso B as menores, enquanto que, em $T = 12$ s, o caso C e o caso A apresentam os maiores valores, sendo todos muito próximos, tendo o caso C valores levemente maiores.

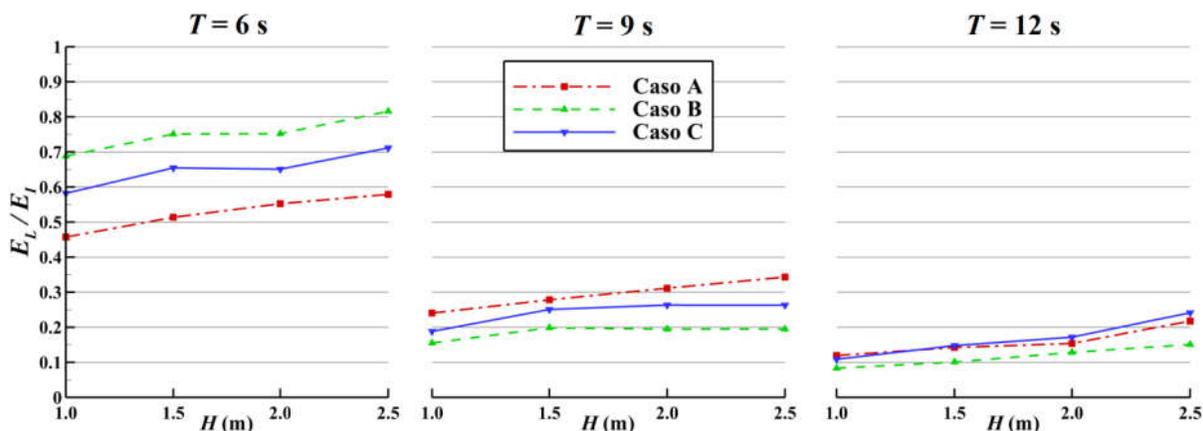


Figura 4.41 - Perdas energéticas relativas dos CAO casos A, B e C em relação à H nos períodos $T = 6, 9$ e 12 s.

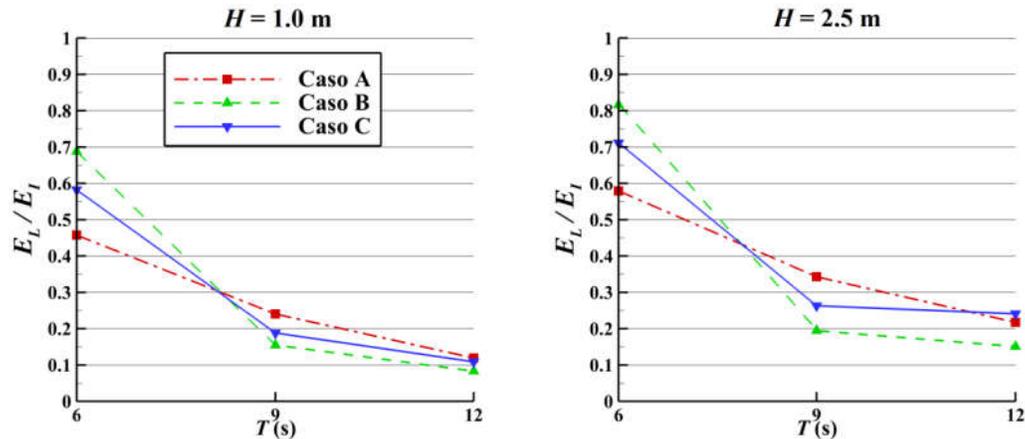


Figura 4.42 - Perda energética dos CAO casos A, B e C em relação ao período para $H = 1.0$ e 2.5 m.

4.5 Discussão Final

Como relatado nas observações anteriores, existem diversos fenômenos que afetam consideravelmente a eficiência de um dispositivo CAO. A diferença de forma entre os casos provoca diferentes comportamentos entre eles. As interações onda-estrutura são mais ou menos intensificadas conforme o período da onda, como mostra a grande diferença que o caso A apresentou em relação aos B e C para um período de onda de 6 s em diversos aspectos analisados. Por esta razão, é importante comparar o comportamento do escoamento de cada caso com as parcelas energéticas sob a variação das ondas incidentes em altura e período. Assim, podem-se investigar possíveis relações de causalidade entre as parcelas de energia apresentadas e os fenômenos observados no escoamento, e se possível, propor alterações na geometria do dispositivo para promover ganho de eficiência.

Para facilitar a interpretação dos dados de distribuição de energia, as parcelas de energia E_P/E_I , E_R/E_I e E_L/E_I foram plotadas em gráficos tipo curvas de nível para o caso A, Fig. 4.43, caso B, Fig. 4.44, e caso C, Fig. 4.45. Percebe-se que, de maneira geral, a altura da onda incidente causa pouca variação de comportamento de distribuição de energia. Assim, uma análise dos casos apenas período a período pode indicar algumas tendências comportamentais. Os valores comparativos tomados nas observações a seguir são feitos para a média das 4 alturas de onda incidente:

- Em $T = 6$ s, o caso A apresenta as maiores eficiências (média de 44%), sendo 82% maior que o caso C (24%, segundo maior); as menores perdas energéticas relativas (53%, ou 21% menor que o caso C, 65%); e menores parcelas de energia refletidas relativa entre os casos (cerca de 3%, ou 70% menor que o caso C).
- Em $T = 9$ s, os casos B e C obtiveram os melhores resultados, sendo muito similares entre si. A melhor eficiência ocorre no caso B, uma média de eficiência (63%) 34% maior que o caso

A (47%). O caso B apresentou uma média de 39% menos perdas energéticas relativas que o caso A (29%), cerca de 18%. Em relação à energia refletida relativa, as diferenças caem, tendo o caso B em média 14% menor energia refletida (19% ante a 24%).

- Em $T = 12$ s, o quadro $T = 9$ s se repete, com os casos B e C sendo muito similares entre si e obtendo os melhores resultados. A melhor eficiência ocorre no caso B, com uma média de eficiência (46%) 19% maior que o caso A (38%). O caso B apresentou uma média de 27% menos perdas energéticas relativas que o caso A (16%), cerca de 12%. Em relação à energia refletida relativa, as diferenças são bem pequenas, tendo o caso B em média 6% menor energia refletida (42% ante a 46% do caso A).

As eficiências médias, considerando todas as ondas, foram de 43% para o caso A, 40% para o caso B e 42% para o caso C. Observa-se que o caso A apresenta uma faixa de eficiência acima de 40% muito mais ampla que a dos casos B e C (item (a) das Figuras 4.43 a 4.45), em todas as combinações de altura e períodos simulados. Por outro lado, embora os casos B e C apresentem resultados muito pobres para períodos de 6 s (no máximo 27% de E_p/E_I em C), eles são muito superiores que os do caso A para 9 e 12 s, tanto para eficiência, quanto para perdas energéticas relativas (item (b) das Figuras 4.43 a 4.45). Nestes períodos (9 e 12 s), o caso B apresentou a melhor eficiência, média de 54%, enquanto que os casos A e C apresentaram 43% e 51%, respectivamente, com um atrativo pico máximo de eficiência para o caso B de 66%.

Pelo item (a) das Figuras 4.43 a 4.45, também se observa que a faixa de operação mais eficiente de cada caso segue a premissa de que o caso C, por se aproximar mais da forma do caso A, é resultado da combinação de comportamento dos casos A e B. O caso C apresenta uma faixa de eficiência estreita, mais parecida com a do caso B, mas um pouco mais ampla que este, conforme o caso A, que opera com eficiência razoável em uma faixa bem ampla de períodos.

A produção elétrica média de cada caso em um determinado local de instalação do equipamento dependerá das características do estado de mar da região, que apresentam variações em altura e período ao longo do tempo (sazonabilidade) e do espaço (locais de instalação). Assim, o caso A pode ser, de fato, uma melhor escolha que os casos B e C, caso o local tenha uma maior ocorrência de ondas mais curtas. Por outro lado, se o local de instalação apresentar ocorrência maior das ondas de 9 e 12 s, a escolha fica entre os casos B e C, sendo que há uma vantagem bem grande do caso B para ondas de 9 s (62% de eficiência contra 57%).

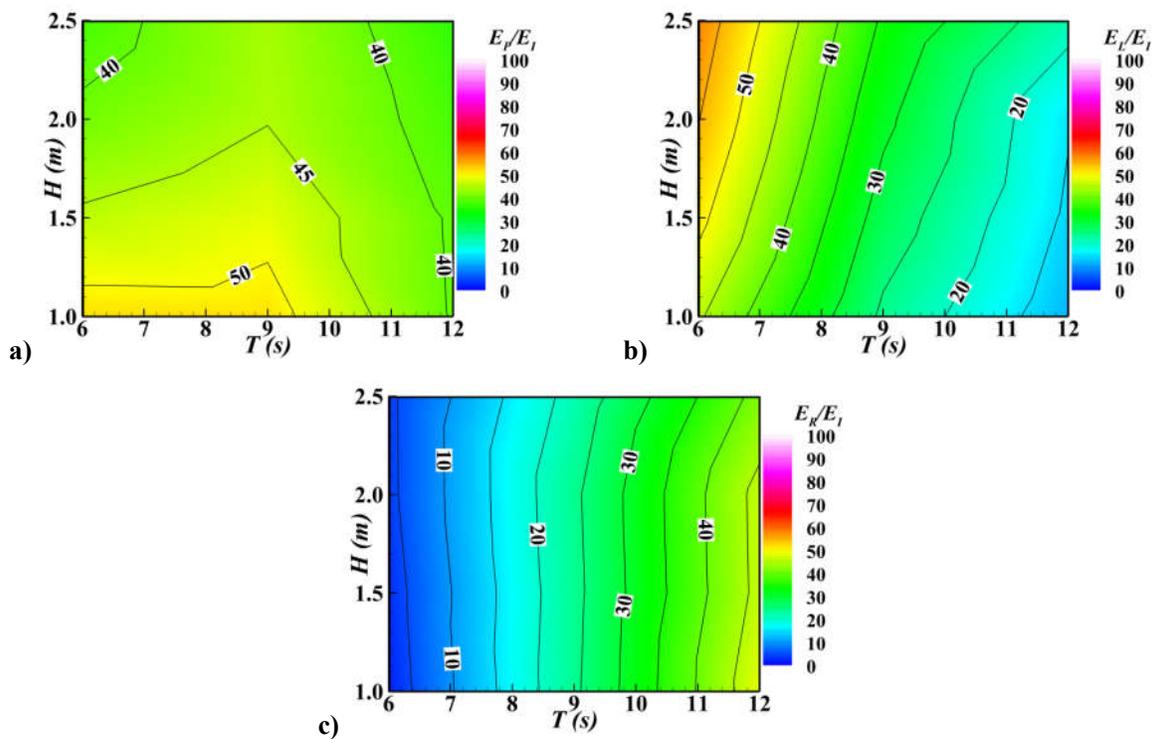


Figura 4.43 - Distribuição de eficiência (a), perdas energéticas relativas (b) e reflexão de energia relativa (c), E_p/E_I , E_L/E_I e E_R/E_I , para todas as variações de H e T do caso A.

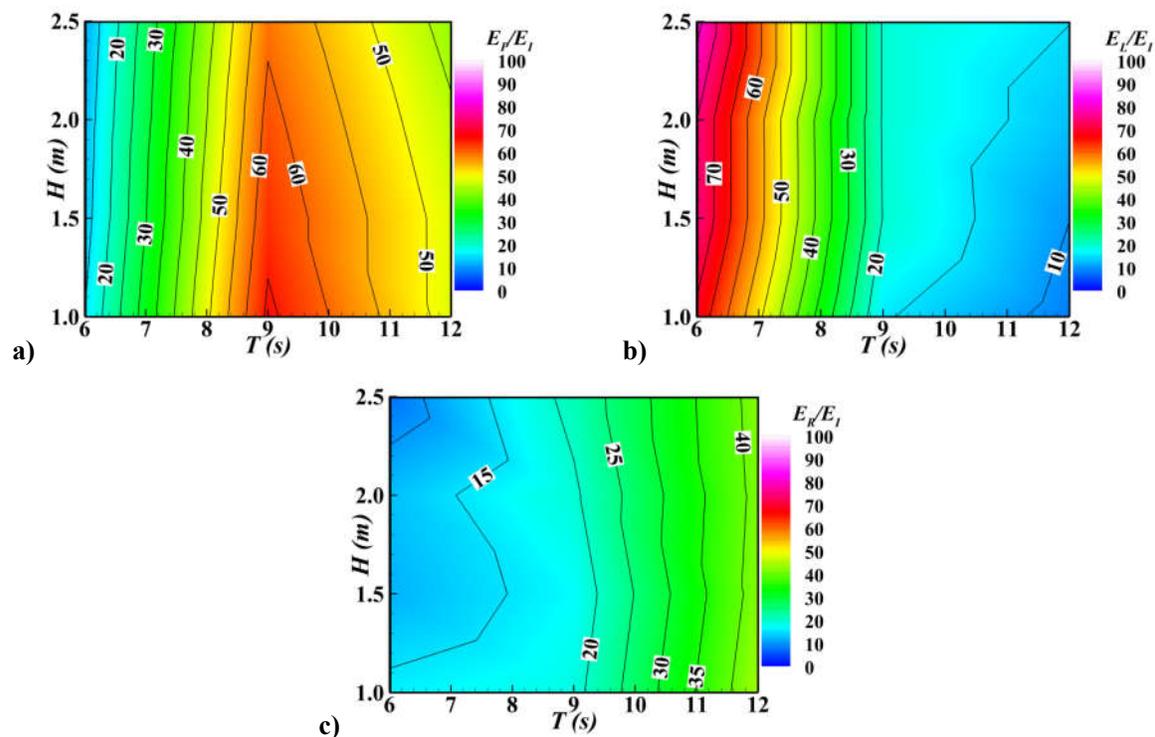


Figura 4.44 - Distribuição de eficiência (a), perdas energéticas relativas (b) e reflexão de energia relativa (c), E_p/E_I , E_L/E_I e E_R/E_I , para todas as variações de H e T do caso B.

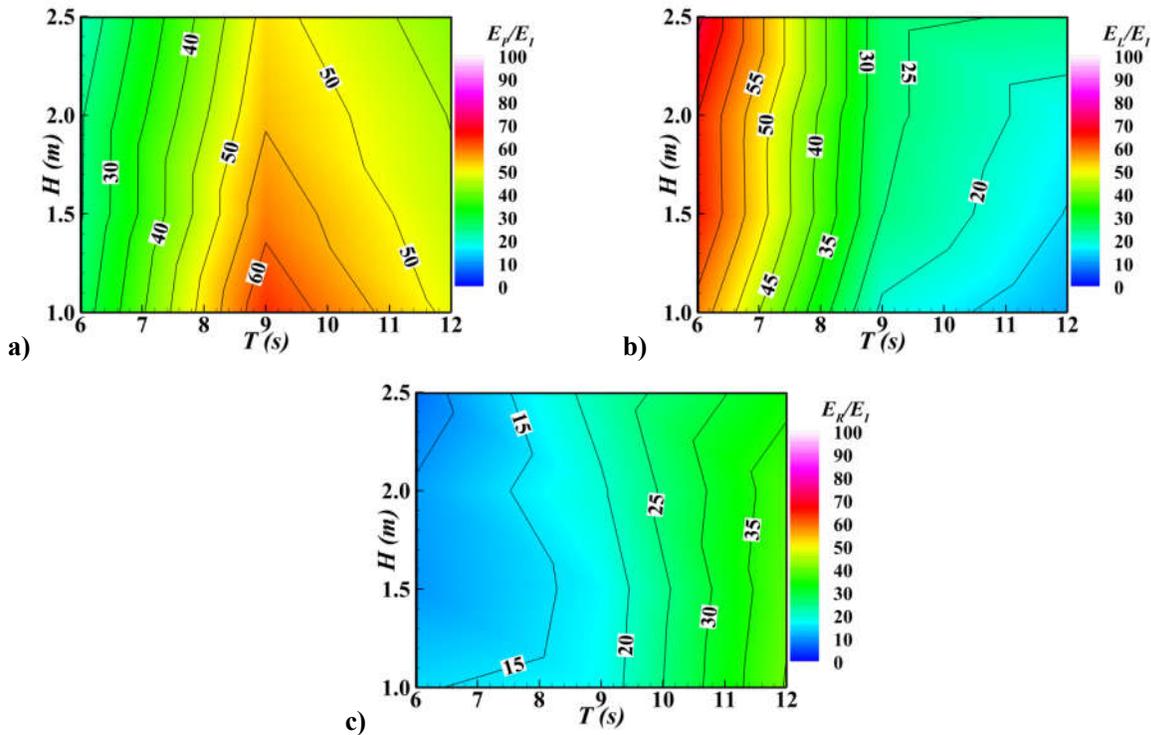


Figura 4.45 - Distribuição de eficiência (a), perdas energéticas relativas (b) e reflexão de energia relativa (c), E_p/E_l , E_l/E_l e E_r/E_l , para todas as variações de H e T do caso C.

Entretanto, o caso C pode ser melhor em situações em que o estado de mar seja mais energético entre 6 e 12 s, por conta da maior eficiência do caso C em relação à do caso B em $T = 6$ s (12% e 24%, para caso B e C, respectivamente).

Uma proposta interessante é redimensionar os CAO's para que o período de ressonância seja mais próximo de 6 s e, então, comparar os resultados novamente, a fim de determinar se haveriam vantagens do fluxo com a inclinação do dispositivo vistas em 9 s, agora para 6 s.

Outra observação, baseada no item (c) das Figuras 4.43 a 4.45, é referente ao balanço entre as perdas energéticas relativas, E_l/E_l , e a energia refletida relativa, E_r/E_l . Quando os valores de energia refletida são mais baixos, o que ocorre de maneira geral no período de 6 s, os valores de perdas energéticas relativas são altos. Isso acaba por limitar a eficiência dos dispositivos nos períodos de onda a partir de 9 s.

Analisando a dinâmica do escoamento, representada pela variação das alturas das colunas de água, H_C (Fig. 4.20), o *sloshing* e o *run up/down* em todos os casos, observa-se que crescem com o aumento da altura da onda incidente. Da mesma forma, as perdas energéticas (E_L , Fig. 4.33) aumentam também com a altura de onda incidente, havendo boa relação com o que se espera de perdas energéticas, maiores conforme o aumento da velocidade do escoamento. O mesmo não ocorre com o crescimento do período da onda, onde o *sloshing*, o *run up/down* e H_C apresentam

comportamentos diferentes ao de E_L , variando bastante entre si, dependendo do período. Isso mostra que o fenômeno onda-estrutura é complexo, exigindo uma análise mais detalhada das parcelas que compõe o E_L , como por exemplo, utilizando medições de vorticidade e turbulência juntamente com as medições apresentadas, a fim de determinar o grau de influência de cada fenômeno na parcela de E_L .

Outra questão observada foi a ocorrência de maiores valores de *run up/down*, C_R e E_L dos casos B e C (culminando no desempenho pior em geral) comparados aos do caso A para $T = 6$ s. É muito difícil determinar/quantificar a influência do *run up/down* no C_R e E_L (não linearidades fortes). Uma hipótese é que, no período de 6 s, ocorre uma defasagem entre a incidência das ondas sobre o CAO e o escoamento de entrada/saída de água do CAO, já, que neste período, se está distante do período de ressonância dos casos (aproximadamente 9 s). Este escoamento desencontrado fica mais prejudicado nos casos B e C do que no caso A, por conta das não linearidades fortes envolvidas no escoamento sobre a parede frontal inclinada.

A defasagem entre o escoamento dentro da câmara e a incidência da onda na frente desta pode ocasionar, inclusive, condições de rebentação, como foi observado em alguns casos através de diagramas de fase dos CAO's com ondas de 6 s, provavelmente por conta da declividade maior da onda, causando maiores perdas por turbulência. Isso indica que, se for possível reduzir a reflexão das ondas sem interferir negativamente nas parcelas de energia perdida, através de alguma alteração de geometria mais favorável, por exemplo, é esperado uma pequena melhora em eficiência energética para $T = 6$ s.

O *run up/down* na parede frontal e a oscilação da superfície livre dentro da câmara limitam as dimensões da câmara, uma vez que pode ocorrer passagem de ar por baixo da parte submersa da parede frontal (*lip*) ou a água pode atingir os conjuntos turbina-gerador. Por essa razão, foram levantados, para os casos estudados, os valores máximos de elevação de superfície livre dentro da câmara e de *run up/down* e, assim, indicar limites dimensionais de cada caso.

O caso A apresentou uma elevação máxima da SL dentro da câmara de 2.36 m, o caso B, 3.61 m e o caso C, 3.00 m, todos em 12 s e $H = 2.5$ m, registrados pela sonda SCAOPD. Portanto, o caso A apresentou elevação máxima cerca de 35% menor que o caso B, evidenciando que, por conta do *sloshing*, deve-se tomar cuidado extra no posicionamento das turbinas na câmara para se evitar que a água alcance e danifique as turbinas. No LIMPET, o platô com blocos de amortecimento é posicionado a aproximadamente 5 m abaixo do nível do eixo das turbinas (QUB, 2002), acima do nível de referência da água em 9.8 m. Baseado nesta informação é recomendado que o caso B tenha a turbina posicionada em no mínimo 5 m acima da elevação máxima de 3.61 m.

Considerando a possibilidade da ultrapassagem da cava da onda do nível inferior da parede frontal do CAO, levando ao escape do ar para a atmosfera, uma condição de trabalho de mar com 2.5 m de altura também foi considerada. O *run down* atingiu -1.28 m no caso A ($T = 12$ s), -2.65 m no caso B ($T = 6$ s) e -3.10 m no caso C ($T = 6$ s). Observa-se que, momentaneamente, o nível da SL fora da câmara foi menor do lado de fora que do lado de dentro da câmara nos casos B e C, inclusive a partir de ondas de 2 m de altura (-2.63 m e -2.67 m, em $T = 6$ s, para os casos B e C, respectivamente). Observando animações das fases dos escoamentos, foi verificado que, conforme descrito por QUB (2002), a SL permanece em um nível abaixo da entrada da câmara por um tempo curto, enquanto a coluna de água dos CAO's está esvaziando, não permitindo nenhuma vazão de ar por baixo da parede. Além disso, foi identificada a ocorrência de rebentação sobre a parede frontal com certo grau de emulsão de ar na borda inferior dos dispositivos.

De acordo com QUB (2002), a principal função da mudança de ângulo da borda da parede frontal do LIMPET, no qual o caso C se baseou, é evitar a invasão/evasão de ar da atmosfera para a câmara quando o nível da SL cai para abaixo da extremidade da parede frontal. Este objetivo é atingido fazendo com que o escoamento de saída de água do CAO dure mais tempo. Entretanto não foi verificado que o caso C apresenta uma vantagem expressiva sobre o caso B neste respeito, já que não se observou nenhuma situação em que o ar escapa da câmara por baixo do *lip* da parede frontal em nenhum dos casos. Importante salientar que não foram testadas muitas condições de período e altura de onda, portanto esta possibilidade não é descartada.

Fora isso, se verificou que utilizar uma variação de ângulo na parede frontal de um CAO é uma questão de comprometimento entre eficiência de pico maior ou maior faixa de operação em período de ondas.

5. CONCLUSÕES

Após realizadas 36 simulações em 3 diferentes geometrias de dispositivos de coluna de água oscilante *onshore*, identificaram-se os principais comportamentos no escoamento, quantificando a altura média da SL no CAO, H_C , o *run up/run down* sobre a parede frontal dos dispositivos, o *sloshing* dentro da câmara do dispositivo e reflexão da onda. A distribuição de energia foi analisada e cruzada com estas informações.

Analisando as distribuições de energia dos casos, a primeira observação que se faz é a de que o comportamento dos diversos casos é fortemente determinado pelo período da onda incidente, sendo a altura da onda incidente um fator mais relacionando à intensidade das determinadas característica do escoamento.

Observou-se que existe vantagem em utilizar uma geometria inclinada, como a dos casos B e C, apresentando valores consideravelmente maiores de eficiência que o caso A nos períodos de 9 e 12 s. Os casos apresentaram diferentes distribuições de eficiência nos períodos, apesar dos valores médios no campo de medições serem muito próximos (eficiências médias variaram de 40 a 43% entre os casos) o caso A tem uma eficiência bem distribuída pelas ondas dos vários períodos e alturas testadas, enquanto que os casos B e C apresentaram boa eficiência apenas nos períodos de 9 e 12 s, sendo muito pobre para ondas de 6 s. As eficiências máximas ($T = 9$ s) e mínimas ($T = 6$ s) de cada caso foram 52% e 38%, 66% e 11% e 64% e 21% para os casos A, B e C, respectivamente.

Os testes mostraram ainda que, em períodos menores, as perdas energéticas relativas são mais significativas, enquanto que, nos períodos mais altos, a reflexão de energia se torna mais significativa. Alterações de geometria que reduzam as perdas energéticas para ondas de 6 s ou que reduzam a reflexão da onda de 12 s podem promover melhoras na eficiência do dispositivo.

As observações entre os casos B e C mostraram que a inclusão da mudança de ângulo na parede frontal sacrifica um pouco da eficiência de pico no período de ressonância da geometria B e aumenta um pouco a faixa de resposta. Pelo fato do caso B ter apresentado melhor desempenho, conclui-se que a presença da mudança de ângulo da parede frontal é devido à garantia de vedação da câmara durante a passagem das cavas das ondas maiores.

Este é outro aspecto importante observado nas simulações, o nível máximo a que as elevações da SL chegam durante as condições de ondas maiores, por dois fatores principais: determinar a profundidade do *lip* da parede frontal, buscando um comprometimento entre eficiência e garantia da vedação da câmara; e minimizar a possibilidade de que a água atinja a turbina e outros equipamentos sensíveis do CAO danificando estes equipamentos.

Notou-se que para as ondas de 2.5 m de altura, os maiores valores de *run down* atingiram -1.28 m no caso A ($T = 12$ s), -2.65 m no caso B ($T = 6$ s) e -3.10 m no caso C ($T = 6$ s), sendo inclusive mais baixos que a imersão da parede frontal dos casos (2.5 m de profundidade). Apesar disso não foi observado fluxo de ar por baixo da parede nestas ocasiões, por conta que nestes instantes de tempo os CAO's encontram-se na fase de saída de água da câmara, que evita a passagem do ar.

As máximas elevações dentro da câmara ocorreram por conta da combinação da altura H_C e do *sloshing* nas câmaras, caso A apresentou máxima de 2.36 m, o caso B, 3.61 m e o caso C, 3.00 m, todos em 12 s e $H = 2.5$ m. Observa-se que tanto na vedação da câmara quanto na proteção da turbina, os casos B e C, com parede frontal inclinada, mostraram valores mais críticos, sendo uma desvantagem destes em relação ao caso A. As instalações de plantas tipo CAO contam com mecanismos de proteção como válvulas e barreiras, além de posicionamento estratégico da turbina para solucionar este problema.

A partir das observações feitas, se propõe o estudo de algumas geometrias com o âmbito de aprimorar o desempenho dos dispositivos em diversas condições. A primeira sugestão é a de modificar a geometria da parede frontal dos casos B e C, a fim de instalar um dispositivo de galgamento de ondas na parede do CAO, redirecionando a água que sobe a parede no *run up* para um reservatório para geração com uma turbina hidráulica de baixa queda. Além disso, é possível que isso diminua o *run down* dos casos B e C, diminua a reflexão da onda e, conseqüentemente, aumente a faixa de períodos em que uma geometria de CAO com parede inclinada opere com eficiência de 40% ou acima. Como estes casos mostraram ineficiência para ondas de períodos de 6 s, podem se beneficiar com a diminuição do *run down* e com o ganho de energia gerada pelo dispositivo de galgamento, que compensaria a baixa eficiência pneumática neste período.

Outra experiência interessante seria combinar as geometrias dos casos A e B, propondo um CAO com a parede frontal vertical do caso A, que obteve melhores resultados no período de 6 s, e uma parede posterior inclinada como a do caso B, que obteve eficiências maiores nos períodos de 9 e 12 s. Essa ideia é incentivada pela observação dos quadros que descrevem o escoamento no início da Seção 4 (Fig. 4.1 a 4.3), onde foi identificada uma região de baixas velocidades junto ao fundo e parede posterior do CAO do caso A, que dificulta o fluxo, região em que o caso B apresenta um escoamento muito mais organizado.

Com estas considerações em mente sugere-se, para trabalhos futuros: repetir a análise aumentando a densidade de amostragem, principalmente no período das ondas incidentes e implementando mais metodologias de medição aplicadas à perdas viscosas, turbulência, rebentação, etc, que possibilitem descrever melhor como ocorrem as perdas energéticas, E_L .

Outra proposta interessante seria a de redimensionar as câmaras a fim de obterem períodos de ressonância mais baixos (próximos de 6 s). Assim, pode-se averiguar se, em um mar em que ondas de períodos menores têm mais ocorrência, as vantagens de eficiência maior no período de ressonância dos casos B e C iriam continuar presentes e sobrepor a eficiência mais abrangente do caso A. Este experimento se justifica, pelo fato de que o LIMPET possuir uma câmara de comprimento de 6 m e não de 10 m, considerado neste estudo e, desta forma, possivelmente tenha um período de ressonância diferente do apresentado pelas geometrias testadas neste trabalho.

E para finalizar, espera-se que este trabalho ajude a aumentar a compreensão das vantagens e desvantagens de cada princípio de construção de CAO, de modo a promover mais estudos na área, auxiliando e incentivando a instalação de mais plantas do tipo CAO pelas encostas ao redor do mundo, e por consequência ajudar a mudar a matriz energética global a obter uma participação de energias renováveis maior, e eventualmente reestabelecer uma relação do homem com a natureza mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, R.A.A., 2010. **Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas**. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- BARSTOW, S.F., MØRK, G., LØNSETH, L., SCHJØLBERG, P., MACHADO, U., ATHANASSOULIS, G., BELIBASSAKIS, K., GEROSTATHIS, T., STEFANAKOS, C.N., SPAAN, G. WorldWaves: Fusion of data from many sources in a user-friendly software package for timely calculation of wave statistics in global coastal waters. **Proc 13th ISOPE Conf**. Oahu, Hawaii, USA, 2003.
- BOCCOTTI, P. Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. **Ocean Engineering**, v. 34, p. 799-805, 2007.
- BOUALI, B.; LARBI, S. Contribution to the Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. In: TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment, **Energy Procedia**, v. 36, p. 565-573, 2013.
- BROOKE, J., BHATTACHARYYA, R., MCCORMICK, M.E. Wave Energy Conversion. Elsevier, **Ocean Engineering**, vol. 6, 2003.
- CHANG, C.Y.; CHOU, F.N.F.; CHEN, Y.Y.; HSIEH, Y.C.; CHANG, C.T. Analytical and experimental investigation of hydrodynamic performance and chamber optimization of oscillating water column system. **Energy**, v. 113, p. 597-614, 2016.
- CONDE, J.M.P., TEIXEIRA, P.R.F., DIDIER, E. Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter: comparison of two numerical codes, in: **Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference**, Maui, p. 688-674, 2011.
- CRUZ, J. The Wave Energy Resource. In BARSTOW, S., MØRK, G. & CRUZ, J., EDS, **Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives**, p. 93–132. Springer-Verlag, 2008.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. First Published in 1984 by Prentice Hall, Inc. World scientific publishing Co. Pte. Ltd., London, 2000.
- DELAURÉ, Y., LEWIS, A. 3D hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods. **Ocean Eng.**, v. 30, p. 309-30, 2003.
- DIAS, J., MENDONÇA, A., DIDIER, E., NEVES, M.G., CONDE, J.M.P., TEIXEIRA, P.R.F. Application of URANS-VOF models in hydrodynamics study of oscillating water column, in: **Proceedings of SCACR2015 - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research**, Florence, Italy, 2015.
- DIDIER, E., CONDE, J.M.P., TEIXEIRA, P.R.F. Numerical simulation of an \sim oscillation water column wave energy converter with and without damping, in: **Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Methods in Marine Engineering**, Lisbon, p. 206-217, 2011

- DIDIER, E., TEIXEIRA, P.R.F., NEVES, M.G. A 3D Numerical Wave Tank for Coastal Engineering Studies. **Defect and Diffusion Forum**, v. 372, p. 1-10, ISSN: 1662-9507. doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.372.1., 2016
- EDENHOFER, O., MADRUGA, R.P., SOKONA, Y., SEYBOTH, K., MATSCHOSS, P., KADNER, S., ZWICKEL, T., EICKEMEIER, P., HANSEN, G., SCHLÖMER, S., VON STECHOW, C. **In IPCC Special Report on Renewable Energy**, 2012. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ELHANAFI, A., FLEMING, A., MACFARLANE, G., LEONG, Z. Numerical energy balance analysis for an onshore oscillating water column wave energy converter. **Energy**, v. 116, p. 539-557, 2016.
- ELHANAFI, A., FLEMING, A., MACFARLANE, G., & LEONG, Z. Numerical hydrodynamic analysis of an offshore stationary-floating oscillating water column-wave energy converter using CFD. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 9, pp. 77–99, 2017.
- EVANS, D.V. The oscillating water column wave-energy device. **Journal Inst. Math. Appl.**, v. 22, p. 423-33, 1978.
- EVANS, D.V. Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions. **J. Fluid Mech.**, v. 114, p. 481-99, 1982.
- FALCÃO, A.F.O. The shoreline OWC wave power plant at the Azores. **Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference**, Aalborg, Denmark, December 2000.
- FALCÃO, A.F.O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier**, v. 14, p. 899-918, 2010.
- FALCÃO, A.F.O., SARMENTO, A.J.N.A. Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction, in: **15th international congress of theoretical and applied mechanics**, Toronto, 1980.
- FALNES, J., McIVER, P. Surface wave interactions with systems of oscillating bodies and pressure distributions. **Applied Ocean Res.**, v. 7, p. 225-34, 1985.
- FIELD, C.B., V.R. BARROS, K.J. MACH, M.D. MASTRANDREA, M. VAN AALST, W.N. ADGER, D.J. ARENT, J. BARNETT, R. BETTS, T.E. BILIR, J. BIRKMANN, J. CARMIN, D.D. CHADEE, A.J. CHALLINOR, M. CHATTERJEE, W. CRAMER, D.J. DAVIDSON, Y.O. ESTRADA, J.-P. GATTUSO, Y. HIJOKA, O. HOEGH-GULDBERG, H.Q. HUANG, G.E. INSAROV, R.N. JONES, R.S. KOVATS, P. ROMERO-LANKAO, J.N. LARSEN, I.J. LOSADA, J.A. MARENGO, R.F. MCLEAN, L.O. MEARNNS, R. MECHLER, J.F. MORTON, I. NIANG, T. OKI, J.M. OLWOCH, M. OPONDO, E.S. POLOCZANSKA, H.-O. PÖRTNER, M.H. REDSTEER, A. REISINGER, A. REVI, D.N. SCHMIDT, M.R. SHAW, W. SOLECKI, D.A. STONE, J.M.R. STONE, K.M. STRZEPEK, A.G. SUAREZ, P. TSCHAKERT, R. VALENTINI, S. VICUÑA, A. VILLAMIZAR, K.E. VINCENT, R. WARREN, L.L. WHITE, T.J. WILBANKS, P.P. WONG, AND G.W. YOHE, 2014: **Technical summary. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B.

- Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 35-94.
- FLEMING, A., PENESIS, I., MACFARLANE, G., BOSE, N., DENISS, T. Energy balance analysis for an oscillating water column wave energy converter. **Ocean Engineering**, v. 54, p. 26-33, 2012.
- FLUENT. **Version 16.2.3 – User’s Guide**, ANSYS Inc. 2016.
- FOLLEY, M., WHITTAKER, T. Identification of non-linear flow characteristics of the LIMPET shoreline OWC. **Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference**. Kitakyushu, Japan, May 26–31, 2002. ISBN 1-880653-58-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set).
- FREIRE, A.P.S., MENUT, P.P.M., SU, J. **Turbulência**. Vol. 1. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM, Rio de Janeiro, 2002.
- GARRISON, T. **Essentials of Oceanography**. Orange Coast College, University of Southern California, 5 ed, 2009.
- GHOSH, T.K., PRELAS, M.A. **Energy Resources and Systems. Volume 2: Renewable Resources**. Springer, 736 p, 2011.
- GODA, Y. & SUZUKI, Y. Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments. **Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference**, 1976.
- HONG, K., SHIN, S.H., HONG, D.C., CHOI, H.S., HONG, S.W. Effects of Shape Parameters of OWC Chamber in Wave Energy Absorption. In: **Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference**, Lisbon, Portugal, ISOPE, p. 428-433, 2007.
- HORKO, M. **CFD Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter**. University of Western Australia, 2007
- IINO, M.; MIYAZAKI, T.; SEGAWA, H.; IIDA, M. Effect of inclination on oscillation characteristics of an oscillating water column wave energy converter. **Ocean Engineering**, v.116, p. 226-235, 2016.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMET CHANGE. Organização. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>. Acesso em: 05 de jul. de 2017.
- ISAACSON, M. Measurement of regular wave reflection. **Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering**, v.117, p. 553-569, 1991.
- ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., LARA, J., VIDAL, C., LOSADA, I. Validation of OpenFOAM® for oscillating water column three-dimensional modeling. **Ocean Eng**, v. 107, p. 222-36, 2015.
- JOSSET, C., CLEMENT, A. A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants. **Renew. Energy**; v. 32, p. 1379-402, 2007.
- LEWIS, A., S. ESTEFEN, J. HUCKERBY, W. MUSIAL, T. PONTES, J. TORRES-MARTINEZ. **Ocean Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy: Sources and Climate Change Mitigation** [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge

- University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2011.
- LISBOA, R.C. **Avaliação Numérica da Potência das Ondas Absorvida por um Dispositivo de Coluna de Água Oscilante Instalado na Costa Sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 2016.
- LIU, Z., HYUN, B., HONG, K., LEE, Y. Investigation on integrated system of chamber and turbine for OWC wave energy convertor. **In: Proceedings of the nineteenth international Offshore and Polar engineering conference**, Osaka, 2009.
- LOPEZ, I., PEREIRAS, B., CASTRO, F., IGLESIAS, G. Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS-VOF numerical model. **Appl. Energy**, v. 127, p. 105-14, 2014.
- MAHNAMFAR, F.; ALTUNKAYNAK, A. Comparison of numerical and experimental analyses for optimizing the geometry of OWC systems. **Ocean Engineering**, v. 130, p.10-24, 2017.
- MANSARD, E.P.D., FUNKE, E.R. The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a least Squares Method. **Coastal engineering**, cap. 8, 1980.
- McCORMICK, M.E. *Ocean Engineering Wave Mechanics*. John Wiley & Sons, Brisbane, Toronto, 1973.
- MCCORMICK M.E. A modified linear analysis of a wave-energy conversion buoy. **Ocean Engineering**, v. 3, p.133-44, 1976.
- McCORMICK, M.E. *Ocean Engineering Mechanics with applications*. Cambridge University Press, 2010.
- MENDONÇA, A., DIAS, J., DIDIER, E., FORTES, C.J.E.M., NEVES, M.G., REIS, M.T., CONDE, J.M.P., P. POSEIRO, P.R.F., TEIXEIRA. An integrated tool for modelling OWC-WECs in vertical breakwaters: preliminary developments, **J. Hydro-environ. Res.** ISSN: 1570-6443, 2017.
- MOOMAW, W., F. YAMBA, M. KAMIMOTO, L. MAURICE, J. NYBOER, K. URAMA, T. WEIR: **Introduction. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation** [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C.von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.
- MØRK, G., Barstow, S., KABUTH, A., PONTES, M.T. Assessing the global wave energy potential. **Proceedings of OMAE 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Shanghai, China, June 6-11, 2010.
- NING, D.; WANG, R.; ZHANG, C. Numerical Simulation of a Dual-Chamber Oscillating Water Column Wave Energy Converter. **Sustainability**, v. 9, p. 1529-1541, 2017.
- PARK, J. C. Numerical reproduction of fully nonlinear multi-directional waves by a viscous 3D numerical wave tank. **Ocean Engineering** v. 31 pp. 1549 – 1565, 2004.

QUEEN' S UNIVERSITY OF BELFAST. **Islay LIMPET Wave Power Plant: Publishable Report**. 1º de Novembro de 1998 até 30 de Abril de 2002.

SCHÄFFER, H. A., & KLOPMAN, G. Review of multidirectional active wave absorption methods. **Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering**, v. 126, n. 2, p. 88–97, 2000.

SILVA, B.A. Contabilidade e Meio Ambiente – Considerações Práticas e Teóricas. Editora FAPESP, 2003. 162 p.

SIMONETTI, I., CAPPIETTI, L., ELSAFTI, H., OUMERACI, H. Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study. **Energy**, v. 139, p. 1197-1209, 2017.

SIMS, R.E.H., SCHOCK, R.N., ADEGBULULGBE, A., FENHANN, J., KONSTANTINAVICIUTE, I., MOOMAW, W., NIMIR, H.B., SCHLAMADINGER, B., TORRES-MARTÍNEZ, J., TURNER, C., UCHIYAMA, Y., VUORI, S.J.V., WAMUKONYA, N., ZHANG, X.: **Energy supply. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

SOUSA, G.A.C.F., NEVES, M.G., CAPITAO, R. Separação de agitação incidente e reflectida: testes comparativos. **In: 7ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN-PIANC**, 2011.

TEIXEIRA, P. R. F., DAVYT, D. P., DIDIER, E., RAMALHAIS, R. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations. **Energy**, v. 61, p. 513-530, 2013.

THORNTON, E.B., CALHOUN, R.J. Spectral Resolution of Breakwater Reflected Waves. **Journal ASCE Waterways Harbour and Coastal Engineering**, WW4, 1972

TORRES, F. R. **Método numérico simplificado para determinação das curvas de potência mecânica de turbina Wells instalada em dispositivo para captação da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante sob incidência de ondas monocromáticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2015.

TSENG, R.S., WU, R.H., HUANG, C.C. Model study of a shoreline wave-power system. **Ocean Engineering**, v. 27, p. 801–821, 2000.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. Editora Prentice Hall, 2007.

VYZIKAS, T.; DESHOULIERES, S.; BARTON, M.; GIROUX, O.; GREAVES, D.; SIMMONDS, D. Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices. **Renewable Energy**, v.104, p. 248-258, 2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **IPCC Factsheet: What is the IPCC?**, 2013 Disponível em: <http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf> acesso em 2 de junho de 2017.

ZHU, S., Separation of regular waves by a transfer function method. **Ocean Engineering**, v. 26, p. 1435–1446, 1999.

APÊNDICE A – Quadro geral dos valores médios das alturas da coluna de água, vazão, pressão e potência na câmara - Caso A

CASO A	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$	
H_c (m)	0.87	1.37	1.61	$H = 1.0$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	32.04	33.93	30.27	
Δp Méd. (Pa)	1602	1697	1514	
Potência Méd. (kW)	51	58	46	
Potência Méd. Quadrática (kW)	63	71	59	
H_c (m)	1.22	1.98	2.39	$H = 1.5$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	45.05	49.24	45.31	
Δp Méd. (Pa)	2253	2463	2266	
Potência Méd. (kW)	102	121	103	
Potência Méd. Quadrática (kW)	125	151	136	
H_c (m)	1.54	2.54	3.11	$H = 2.0$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	56.95	63.18	59.26	
Δp Méd. (Pa)	2848	3159	2963	
Potência Méd. (kW)	162	200	176	
Potência Méd. Quadrática (kW)	199	251	236	
H_c (m)	1.85	3.14	3.81	$H = 2.5$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	68.56	78.10	72.72	
Δp Méd. (Pa)	3428	3905	3636	
Potência Méd. (kW)	235	305	264	
Potência Méd. Quadrática (kW)	288	385	359	

APÊNDICE B – Quadro geral dos valores médios das alturas da coluna de água, vazão, pressão e potência na câmara - Caso B

CASO B	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$	
H_C (m)	0.42	1.54	1.74	$H = 1.0$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	15.92	38.21	32.67	
Δp Méd. (Pa)	808	1915	1664	
Potência Méd. (kW)	13	73	55	
Potência Méd. Quadrática (kW)	17	90	72	
H_C (m)	0.62	2.25	2.59	$H = 1.5$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	23.80	55.83	49.38	
Δp Méd. (Pa)	1202	2816	2496	
Potência Méd. (kW)	29	159	125	
Potência Méd. Quadrática (kW)	38	197	166	
H_C (m)	0.79	2.95	3.39	$H = 2.0$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	30.58	73.49	64.60	
Δp Méd. (Pa)	1544	3694	3252	
Potência Méd. (kW)	48	273	212	
Potência Méd. Quadrática (kW)	64	341	286	
H_C (m)	0.96	3.61	4.10	$H = 2.5$
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	36.46	90.32	78.30	
Δp Méd. (Pa)	1841	4543	3940	
Potência Méd. (kW)	68	413	310	
Potência Méd. Quadrática (kW)	89	519	425	

APÊNDICE C – Quadro geral dos valores médios das alturas da coluna de água, vazão, pressão e potência na câmara - Caso C

CASO C	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$	
H_C (m)	0.61	1.49	1.78	H = 1.0
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	22.89	36.95	33.07	
Δp Méd. (Pa)	1158	1862	1677	
Potência Méd. (kW)	27	69	56	
Potência Méd. Quadrática (kW)	33	86	71	
H_C (m)	0.87	2.16	2.61	H = 1.5
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	32.70	53.68	48.54	
Δp Méd. (Pa)	1651	2700	2445	
Potência Méd. (kW)	55	146	120	
Potência Méd. Quadrática (kW)	68	181	155	
H_C (m)	1.16	2.78	3.43	H = 2.0
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	43.66	69.33	63.95	
Δp Méd. (Pa)	2201	3481	3214	
Potência Méd. (kW)	97	242	207	
Potência Méd. Quadrática (kW)	122	302	272	
H_C (m)	1.32	3.37	4.14	H = 2.5
Q Méd. Quadrática (m^3/s)	50.83	84.36	77.69	
Δp Méd. (Pa)	2560	4230	3902	
Potência Méd. (kW)	131	358	305	
Potência Méd. Quadrática (kW)	169	450	413	

APÊNDICE D – Quadro geral da elevação, vazão, pressão e potência máximos e mínimos na câmara - Caso A

CASO A	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$	
η CAO Máx. (m)	0.45	0.72	0.89	H = 1.0
η CAO Mín. (m)	-0.41	-0.64	-0.72	
Q Máx. (m ³ /s)	44.77	50.02	40.12	
Q Mín. (m ³ /s)	-45.95	-47.24	-49.08	
Δp Máx. (Pa)	2238	2501	2006	
Δp Mín. (Pa)	-2298	-2362	-2454	
Potência Máx. (kW)	106	125	120	
Potência Mín. (kW)	100	112	80	
η CAO Máx. (m)	0.65	1.07	1.36	H = 1.5
η CAO Mín. (m)	-0.57	-0.91	-1.03	
Q Máx. (m ³ /s)	64.77	74.78	60.70	
Q Mín. (m ³ /s)	-62.95	-67.18	-77.10	
Δp Máx. (Pa)	3147	3740	3037	
Δp Mín. (Pa)	-3237	-3359	-3855	
Potência Máx. (kW)	210	280	298	
Potência Mín. (kW)	198	226	184	
η CAO Máx. (m)	0.83	1.38	1.81	H = 2.0
η CAO Mín. (m)	-0.71	-1.16	-1.30	
Q Máx. (m ³ /s)	79.30	100.07	80.63	
Q Mín. (m ³ /s)	-81.78	-83.23	-103.21	
Δp Máx. (Pa)	3965	5003	4032	
Δp Mín. (Pa)	-4089	-4162	-5161	
Potência Máx. (kW)	334	501	533	
Potência Mín. (kW)	314	346	325	
η CAO Máx. (m)	1.00	1.69	2.22	H = 2.5
η CAO Mín. (m)	-0.85	-1.45	-1.59	
Q Máx. (m ³ /s)	95.32	125.82	100.09	
Q Mín. (m ³ /s)	-98.42	-100.25	-128.27	
Δp Máx. (Pa)	4766	6296	5004	
Δp Mín. (Pa)	-4922	-5010	-6414	
Potência Máx. (kW)	484	793	823	
Potência Mín. (kW)	454	502	501	

APÊNDICE E – Quadro geral da elevação, vazão, pressão e potência máximos e mínimos na câmara - Caso B

CASO B	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$	
η CAO Máx. (m)	0.23	0.79	0.90	H = 1.0
η CAO Mín. (m)	-0.19	-0.75	-0.84	
Q Máx. (m ³ /s)	20.91	54.66	41.25	
Q Mín. (m ³ /s)	-25.22	-54.50	-54.51	
Δp Máx. (Pa)	1046	2733	2062	
Δp Mín. (Pa)	-1294	-2741	-2797	
Potência Máx. (kW)	33	150	139	
Potência Mín. (kW)	22	149	60	
η CAO Máx. (m)	0.35	1.18	1.38	H = 1.5
η CAO Mín. (m)	-0.28	-1.06	-1.22	
Q Máx. (m ³ /s)	32.05	80.68	62.78	
Q Mín. (m ³ /s)	-39.16	-80.19	-85.96	
Δp Máx. (Pa)	1603	4034	3139	
Δp Mín. (Pa)	-1987	-4072	-4370	
Potência Máx. (kW)	79	332	382	
Potência Mín. (kW)	51	326	197	
η CAO Máx. (m)	0.41	1.59	1.83	H = 2.0
η CAO Mín. (m)	-0.38	-1.36	-1.56	
Q Máx. (m ³ /s)	42.15	107.35	79.22	
Q Mín. (m ³ /s)	-51.59	-106.26	-116.28	
Δp Máx. (Pa)	2108	5368	3961	
Δp Mín. (Pa)	-2630	-5363	-5888	
Potência Máx. (kW)	138	576	693	
Potência Mín. (kW)	89	575	314	
η CAO Máx. (m)	0.48	1.99	2.20	H = 2.5
η CAO Mín. (m)	-0.48	-1.62	-1.90	
Q Máx. (m ³ /s)	53.48	133.12	93.43	
Q Mín. (m ³ /s)	-61.14	-130.85	-145.03	
Δp Máx. (Pa)	2674	6657	4672	
Δp Mín. (Pa)	-3119	-6645	-7349	
Potência Máx. (kW)	195	886	1080	
Potência Mín. (kW)	143	883	437	

APÊNDICE F – Quadro geral da elevação, vazão, pressão e potência máximos e mínimos na câmara - Caso C

CASO C	<i>T</i> = 6	<i>T</i> = 9	<i>T</i> = 12	
<i>η</i> CAO Máx. (m)	0.33	0.77	0.96	H = 1.0
<i>η</i> CAO Mín. (m)	-0.28	-0.72	-0.83	
<i>Q</i> Máx. (m ³ /s)	30.42	52.51	38.45	
<i>Q</i> Mín. (m ³ /s)	-34.28	-53.18	-54.82	
<i>Δp</i> Máx. (Pa)	1521	2625	1922	
<i>Δp</i> Mín. (Pa)	-1750	-2700	-2790	
Potência Máx. (kW)	61	146	156	
Potência Mín. (kW)	46	138	74	
<i>η</i> CAO Máx. (m)	0.51	1.13	1.42	H = 1.5
<i>η</i> CAO Mín. (m)	-0.36	-1.02	-1.19	
<i>Q</i> Máx. (m ³ /s)	42.88	77.15	55.24	
<i>Q</i> Mín. (m ³ /s)	-50.20	-77.64	-83.78	
<i>Δp</i> Máx. (Pa)	2144	3858	2762	
<i>Δp</i> Mín. (Pa)	-2547	-3933	-4238	
Potência Máx. (kW)	130	309	359	
Potência Mín. (kW)	92	298	153	
<i>η</i> CAO Máx. (m)	0.70	1.49	1.89	H = 2.0
<i>η</i> CAO Mín. (m)	-0.47	-1.28	-1.55	
<i>Q</i> Máx. (m ³ /s)	54.83	101.06	71.92	
<i>Q</i> Mín. (m ³ /s)	-68.73	-100.12	-114.21	
<i>Δp</i> Máx. (Pa)	2742	5053	3596	
<i>Δp</i> Mín. (Pa)	-3473	-5037	-5737	
Potência Máx. (kW)	241	511	658	
Potência Mín. (kW)	150	507	259	
<i>η</i> CAO Máx. (m)	0.74	1.85	2.28	H = 2.5
<i>η</i> CAO Mín. (m)	-0.58	-1.52	-1.86	
<i>Q</i> Máx. (m ³ /s)	64.36	124.67	83.89	
<i>Q</i> Mín. (m ³ /s)	-82.81	-121.90	-144.75	
<i>Δp</i> Máx. (Pa)	3218	6234	4195	
<i>Δp</i> Mín. (Pa)	-4186	-6129	-7261	
Potência Máx. (kW)	350	777	1055	
Potência Mín. (kW)	207	751	352	

APÊNDICE G – Parcelas de energia - Caso A

	CASO A	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$
$H = 1.0\text{ m}$	C_R	0.15	0.49	0.70
	E_I (J/m)	59239	100017	138655
	E_R (J/m)	1342	24119	67084
	E_A (J/m)	57897	75898	71571
	E_P (J/m)	30802	51840	55035
	E_L (J/m)	27095	24058	16536
	E_R/E_I	0.02	0.24	0.48
	E_P/E_I	0.52	0.52	0.40
	E_L/E_I	0.46	0.24	0.12
$H = 1.5\text{ m}$	C_R	0.17	0.49	0.68
	E_I (J/m)	133288	225039	311974
	E_R (J/m)	3916	53318	144525
	E_A (J/m)	129372	171721	167449
	E_P (J/m)	60910	109127	123095
	E_L (J/m)	68462	62594	44354
	E_R/E_I	0.03	0.24	0.46
	E_P/E_I	0.46	0.48	0.39
	E_L/E_I	0.51	0.28	0.14
$H = 2.0\text{ m}$	C_R	0.20	0.49	0.68
	E_I (J/m)	236957	400069	554620
	E_R (J/m)	9373	96462	258236
	E_A (J/m)	227584	303607	296384
	E_P (J/m)	96712	179068	211044
	E_L (J/m)	130872	124539	85340
	E_R/E_I	0.04	0.24	0.47
	E_P/E_I	0.41	0.45	0.38
	E_L/E_I	0.55	0.31	0.15
$H = 2.5\text{ m}$	C_R	0.20	0.47	0.65
	E_I (J/m)	370245	625108	866594
	E_R (J/m)	14826	136158	360794
	E_A (J/m)	355419	488950	505800
	E_P (J/m)	141064	274505	317372
	E_L (J/m)	214354	214445	188428
	E_R/E_I	0.04	0.22	0.42
	E_P/E_I	0.38	0.44	0.37
	E_L/E_I	0.58	0.34	0.22

APÊNDICE H – Parcelas de energia - Caso B

		CASO B	$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$
$H = 1.0\text{ m}$	C_R		0.40	0.43	0.66
	E_I (J/m)		59239	100017	138655
	E_R (J/m)		9489	18514	60623
	E_A (J/m)		49750	81503	78032
	E_P (J/m)		8989	66028	66499
	E_L (J/m)		40761	15475	11533
	E_R/E_I		0.16	0.19	0.44
	E_P/E_I		0.15	0.66	0.48
	E_I/E_I		0.69	0.15	0.08
$H = 1.5\text{ m}$	C_R		0.34	0.41	0.65
	E_I (J/m)		133288	225039	311974
	E_R (J/m)		15816	37741	131088
	E_A (J/m)		117473	187298	180886
	E_P (J/m)		17332	142687	149497
	E_L (J/m)		100141	44612	31388
	E_R/E_I		0.12	0.17	0.42
	E_P/E_I		0.13	0.63	0.48
	E_I/E_I		0.75	0.20	0.10
$H = 2.0\text{ m}$	C_R		0.36	0.44	0.64
	E_I (J/m)		236957	400069	554620
	E_R (J/m)		29967	76699	229503
	E_A (J/m)		206990	323370	325117
	E_P (J/m)		28852	245549	253972
	E_L (J/m)		178137	77821	71145
	E_R/E_I		0.13	0.19	0.41
	E_P/E_I		0.12	0.61	0.46
	E_I/E_I		0.75	0.19	0.13
$H = 2.5\text{ m}$	C_R		0.27	0.46	0.65
	E_I (J/m)		370245	625108	866594
	E_R (J/m)		27516	134350	363092
	E_A (J/m)		342729	490758	503502
	E_P (J/m)		40646	369196	372824
	E_L (J/m)		302082	121561	130678
	E_R/E_I		0.07	0.21	0.42
	E_P/E_I		0.11	0.59	0.43
	E_I/E_I		0.82	0.19	0.15

APÊNDICE I – Parcelas de energia - Caso C

CASO C		$T = 6$	$T = 9$	$T = 12$
$H = 1.0 \text{ m}$	C_R	0.38	0.42	0.64
	$E_I \text{ (J/m)}$	59239	100017	138655
	$E_R \text{ (J/m)}$	8654	17243	56018
	$E_A \text{ (J/m)}$	50585	82774	82637
	$E_P \text{ (J/m)}$	16095	63959	67538
	$E_L \text{ (J/m)}$	34490	18815	15099
	E_R/E_I	0.15	0.17	0.40
	E_P/E_I	0.27	0.64	0.49
	E_L/E_I	0.58	0.19	0.11
$H = 1.5 \text{ m}$	C_R	0.32	0.41	0.63
	$E_I \text{ (J/m)}$	133288	225039	311974
	$E_R \text{ (J/m)}$	13293	37295	121903
	$E_A \text{ (J/m)}$	119995	187744	190071
	$E_P \text{ (J/m)}$	32741	131326	144032
	$E_L \text{ (J/m)}$	87254	56418	46038
	E_R/E_I	0.10	0.17	0.39
	E_P/E_I	0.25	0.58	0.46
	E_L/E_I	0.65	0.25	0.15
$H = 2.0 \text{ m}$	C_R	0.32	0.44	0.62
	$E_I \text{ (J/m)}$	236957	400069	554620
	$E_R \text{ (J/m)}$	24862	77325	211260
	$E_A \text{ (J/m)}$	212094	322745	343360
	$E_P \text{ (J/m)}$	57869	217368	248196
	$E_L \text{ (J/m)}$	154225	105377	95164
	E_R/E_I	0.10	0.19	0.38
	E_P/E_I	0.24	0.54	0.45
	E_L/E_I	0.65	0.26	0.17
$H = 2.5 \text{ m}$	C_R	0.28	0.47	0.58
	$E_I \text{ (J/m)}$	370245	625108	866594
	$E_R \text{ (J/m)}$	28156	137703	291935
	$E_A \text{ (J/m)}$	342089	487406	574659
	$E_P \text{ (J/m)}$	78663	322970	365587
	$E_L \text{ (J/m)}$	263426	164436	209072
	E_R/E_I	0.08	0.22	0.34
	E_P/E_I	0.21	0.52	0.42
	E_L/E_I	0.71	0.26	0.24