



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Análise Numérica do Comportamento de
Dispositivo de Conversão de Energia das
Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante
Onshore com Diferentes Geometrias da
Câmara

Dissertação de:
Angélica Konradt Güths

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

Coorientador:
Prof. Dr. Eric Didier

agosto de 2021

“Análise numérica do comportamento de dispositivos de conversão de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante *onshore* com diferentes geometrias da câmara”

Angélica Konradt Güths

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de:

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica



Prof. Dr. Lércio André Isoldi
Coordenador do PPGEÓ/FURG

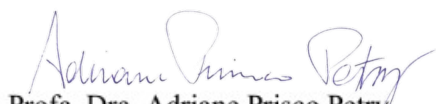
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira
Orientador – PPGEÓ/FURG



Dr. Eric Lionel Didier
Coorientador – DHA/LNEC



Profa. Dra. Adriane Prisco Petry
Membro Externo – UFRGS



Prof. Dr. Lércio André Isoldi
Membro Interno – PPGEÓ/FURG



Prof. Dr. Cristófer Hood Marques
Membro Interno – PPGEÓ/FURG

N471m Güths, Angélica Konradt.

Análise numérica do comportamento de dispositivos de conversão de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante *onshore* com diferentes geometrias da câmara / Angélica Konradt Güths – 2021.
62 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. Eric Didier.

1. coluna de água oscilante 2. energia das ondas 3. energia renovável 4. simulação numérica.

I. Teixeira, Paulo Roberto de Freitas II Didier, Eric III **Título**.

CDU **620.91**

Catálogo na Fonte: **Bibliotecário João da Silva CRB 12/3456**

Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta.

CARL SAGAN

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Dr. Paulo Teixeira, por aceitar minha orientação e dedicação em conduzir este trabalho dando todo suporte para concretização do mesmo.

Ao Dr. Eric Didier pela coorientação e colaboração no trabalho.

À FURG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica pela oferta do curso.

Aos meus pais Gilson Renato e Dirce Helena, à minha irmã Renata pelo apoio e incentivo para conclusão dessa etapa da minha vida acadêmica.

Enfim a todos amigos e familiares, que acompanharam e torceram por mim nessa caminhada.

Resumo

Angélica Konradt Güths

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE ONSHORE COM DIFERENTES GEOMETRIAS DA CÂMARA

Atualmente, a maior parte da energia utilizada mundialmente vem de fontes não renováveis, causando sérios problemas ambientais. Uma alternativa de fonte renovável de energia são as ondas do mar, que possuem grande potencial energético. O dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) é um dos mais estudados; porém, seu uso ainda não está consolidado. O objetivo desse trabalho é o de propor uma nova geometria da câmara de um dispositivo CAO *onshore*, analisar numericamente a sua performance e comparar o seu comportamento hidropneumático com CAO's de câmaras com diferentes inclinações da parede frontal. As simulações são realizadas em um canal numérico usando o software FLUENT, considerando as equações de Navier-Stokes na média de Reynolds (*Reynolds-averaged Navier-Stokes* – RANS) para um escoamento 2D sendo o água incompressível e o ar compressível considerado como gás ideal, o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e o método *Volume of Fluid* (VOF) para tratar um escoamento com superfície livre. No dispositivo é simulada a turbina Wells com relação característica igual a 100 Pa.s/m^3 e as dimensões das câmaras tem a mesma ordem de grandeza das dimensões da planta da ilha Pico (Açores, Portugal). São comparados dois casos: CAO padrão com diferentes inclinações da parede frontal (casos A) e os da nova proposta (casos B), em que é inserida uma parede frontal externa inclinada no sentido oposto à propagação da onda incidente. Os dispositivos são analisados para diferentes períodos de ondas incidentes (6 a 12 s) e altura de 1,5 m, incluindo o comportamento do escoamento na região da câmara, os efeitos de *run up/down* na parede frontal, *sloshing* dentro da câmara e a análise do balanço de energia na região do dispositivo. A configuração dos casos B contribui para a diminuição de possibilidade de galgamento (menor *run up/down*) e de entrada de ar dentro da câmara. De maneira geral, os casos B apresentam coeficientes de reflexão menores do que aqueles dos casos A para uma mesma inclinação da parte interna da parede frontal. Quanto à eficiência dos casos, definida pela energia extraída, os casos B apresentam maiores valores do que os casos A e os melhores desempenhos são alcançados pela inclinação da parede frontal externa de 40° e da parede frontal de 40° e 52° . A solução única ótima depende das características do estado do mar da região em que o dispositivo CAO será instalado.

Palavras-chave: coluna de água oscilante; energia das ondas; energia renovável; simulação numérica.

Abstract

Angélica Konradt Güths

NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF ONSHORE OSCILLATING WATER COLUMN WAVE ENERGY CONVERTERS WITH DIFFERENT CHAMBER GEOMETRIES

Nowadays, most of the energy used comes from non-renewable sources, causing serious environmental problems. An alternative renewable source of energy is enable from ocean waves, which have great energy potential. The Oscillating Water Column (OWC) wave energy conversion device is one of the most studied; however, the conversion efficiency is not yet economically viable. The objective of this study is to propose a new geometry of the chamber of an onshore OWC device, numerically analyze its performance and compare its hydropneumatic behavior with OWC's of chambers with different inclinations of the front wall. The simulations are performed in a numerical channel by means of the FLUENT software, which is based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations for 2D flow, with incompressible water and compressible air considered as ideal gas, $k - \varepsilon$ the turbulence model and the Volume of Fluid method (VOF) to treat a free-surface flow. The Wells turbine is simulated in the device with a characteristic ratio equal $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ and the dimensions of the chambers have the same order of magnitude as the size of the plant on Pico Island (Azores, Portugal). Two cases are compared: Standard CAO (A cases) and those of the new proposal (B cases), in which an external front wall inclined in the opposite direction to the propagation of the incident wave is inserted. The devices are analyzed for different periods of incident waves (from $T = 6$ to 12 s) and height $H = 1,5 \text{ m}$, including the flow behavior in the chamber region, run up/down effects on the front wall, sloshing inside the chamber and analysis of the energy balance in the device region. The configuration of cases B contributes to the reduction of the possibility of overtopping (smaller run up/down) and of air entering the chamber. In general, cases B have lower reflection coefficients than those of cases A for the same inclination of the internal part of the front wall. The efficiency of the cases is defined by the energy extracted: the B cases have higher values than the A cases and the best performances are achieved by the 40° outer front wall and 40° and 52° front wall. The optimal single solution depends on the sea state characteristics of the region where the OWC device will be installed.

Keywords: oscillating water column; wave energy; renewable energy; numerical simulation.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	IX
Lista de Símbolos	XIII
Lista de Siglas	XIVV
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliografica	3
2.1 Mecânica das ondas	3
2.1.1 Teoria das ondas não lineares	7
2.1.2 Transformação das ondas	8
2.1.3 Energia das ondas	9
2.2 Dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante	9
2.3 Balanço de energia na CAO	11
2.4 Estado da arte	12
3 Metodologia	16
3.1 Estudo de caso	16
3.2 Equações governantes	17
3.3 Modelo numérico	20
3.4 Método para aquisição de dados	22
3.5 Discretização do domínio	23
4 Resultados e Discussões	25
4.1 Análise do comportamenot hidropnéumático da CAO	25
4.2 Análise do comportamento hidrodinâmico fora da câmara	27
4.3 Análise do comportamento hidrodinâmico dentro da câmara	31
4.4 Balanço de energia no dispositivo CAO	35
5 Conclusões	42
Referências	44

Lista de Figuras

Página

2 • Revisão Bibliográfica

Figura 2.1: Principais características de uma onda em movimento. Fonte: adaptado de Dean e Dalrymple (2000).	4
Figura 2.2: Principais características de uma onda em movimento. Fonte: adaptado de Dean e Dalrymple (2000) apud Lisboa (2016) (tradução).	5
Figura 2.3: Movimento da partícula de água. Fonte: Adaptado Dean e Dalrymple (2000).	6
Figura 2.4: Diagrama do campo de aplicação das teorias das ondas. Fonte: adaptado de Chakrabarti (2005).	7
Figura 2.5: Esquema de um dispositivo CAO.	10
Figura 2.6: Dispositivo CAO na ilha de PICO - Portugal. Fonte: (Falcão, 2010).	10
Figura 2.7: Dispositivo CAO, LIMPET - Escócia. Fonte: (Vicinanza et al., 2019).	10

3 • Metodologia

Figura 3.1: Vista lateral dos dispositivos do tipo CAO. (a) caso A; (b) caso B.	16
Figura 3.2: Fluxograma de todos os casos analisados	17
Figura 3.3: Domínio computacional e condições de contorno para o caso A com $\theta_2 = 40^\circ$.	21
Figura 3.4: Esquema de distribuição das sondas para obtenção de dados de <i>run up/ down</i> , <i>sloshing</i> e pressão. (a) caso A; (b) caso B.	22
Figura 3.5: Esquema do posicionamento das sondas para cálculo do coeficiente de reflexão.	23
Figura 3.6: Malha de volumes finitos. Exemplo caso B, inclinação parede frontal $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, $T = 6s$.	24
Figura 3.7: Detalhe da malha, começo da transição da parede inclinada. Exemplo caso B, inclinação da parede frontal, $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, $T = 6s$.	25

4 • Resultados e Discussões

Figura 4.1: Campos do módulo de velocidade e linhas de corrente nas proximidades da câmara da CAO do caso A para uma onda de $T = 9s$ e $H = 1,5m$ em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.	26
Figura 4.2: Campos do módulo de velocidade e linhas de corrente nas proximidades da câmara da CAO do caso B para uma onda de $T = 9s$ e $H = 1,5m$ em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.	27

Figura 4.3: Séries temporais da elevação da SL na superfície externa da parede frontal para os casos A e B (inclinações de paredes de 40°) e para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) ao longo de um período de onda. _____ 28

Figura 4.4: Alturas de *run-up/down* ao longo dos períodos de onda incidente ($H = 1,5$ m). (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (c) caso B ($\theta_1 = 65^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (d) caso B ($\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). _ 29

Figura 4.5: Séries temporais da elevação da SL nas sondas WP1, WP2 e WP3 para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ$). (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$) _____ 29

Figura 4.6: Séries temporais das elevações da SL da onda incidente e da onda refletida para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ$). (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$). _____ 30

Figura 4.7: Coeficiente de reflexão em relação ao período da onda incidente ao longo dos períodos de onda incidente ($H = 1,5$ m). (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (c) caso B ($\theta_1 = 65^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (d) caso B ($\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). _____ 31

Figura 4.8: Séries temporais da superfície livre de duas sondas dentro da câmara perto da parede frontal SPA1 (linha sólida) e perto da parede traseira SPA2 (linha tracejada) para o caso A e caso B, a onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) e (c) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) e (d) ao longo de um período de onda. ____ 32

Figura 4.9: *Sloshing* em relação ao longo dos períodos de onda incidente ($H = 1,5$ m). (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (c) caso B ($\theta_1 = 65^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (d) caso B ($\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). _____ 33

Figura 4.10: Séries temporais da pressão de ar dentro da câmara para os casos A e B (inclinações de paredes de 40°) e para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) ao longo de um período de onda. ____ 34

Figura 4.11: Séries temporais da potência pneumática para os casos A e B (inclinações de paredes de 40°) e para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) ao longo de um período de onda. _____ 35

Figura 4.12: Relação entre a energia das ondas versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede para o caso A. (a) energia extraída (EE/EI); (b) energia refletida (ER/EI); (c) perdas de energia (EL/EI). _____ 36

Figura 4.13: Energia extraída relacionada à energia das ondas (EE/EI) versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede. (a) $\theta_2 = 40^\circ$; (b) $\theta_2 = 52^\circ$; (c) $\theta_2 = 65^\circ$; (d) $\theta_2 = 77^\circ$; (e) $\theta_2 = 90^\circ$. _____ 38

Figura 4.14: Energia refletida relacionada à energia das ondas (ER/EI) versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede. (a) $\theta_2 = 40^\circ$; (b) $\theta_2 = 52^\circ$; (c) $\theta_2 = 65^\circ$; (d) $\theta_2 = 77^\circ$; (e) $\theta_2 = 90^\circ$. _____ 39

Figura 4.15: Perdas de energia relacionada à energia das ondas (EL/EI) versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede. (a) $\theta_2 = 40^\circ$; (b) $\theta_2 = 52^\circ$; (c) $\theta_2 = 65^\circ$; (d) $\theta_2 = 77^\circ$; (e) $\theta_2 = 90^\circ$. _____ 40

Figura 4.16: Energia extraída relacionada à energia da onda (EE/EI) versus período da onda (a) para as câmaras do caso B com $\theta_1 = 40^\circ$ e (b) para os melhores resultados dos casos A e B. _____ 41

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

a	Amplitude da onda [m].
B	Coefficiente complexo a série de Fourier.
b	Largura da câmara [m].
c	Celeridade [m/s].
e	Energia específica.
E	Eficiência.
g	Aceleração da gravidade [m/s ²].
h	Profundidade [m].
H	Altura da onda [m].
K	Número de onda [m ⁻¹].
L	Largura da câmara [m].
L	Comprimento da onda [m].
R	Constante universal dos gases
p	Pressão [Pa].
P	Potência pneumática.
Δp	Diferença de pressão entre a câmara da CAO e a atmosfera [Pa].
Q	Vazão volumétrica na turbina [m ³ /s].
T	Período de onda [s].
τ_{ij}	Tensor de tensão viscosa [m].
u	Componente de velocidade na direção x [m/s].
u_i	Componentes de velocidade [m/s].
$\bar{u}$	Velocidade média [m/s].
$ u $	Modulo de velocidade.
v	Componente de velocidade na direção y [m/s].
w	Componente de velocidade na direção z [m/s].
x	Direção de propagação da onda [-].
γ	Direção da frente de onda [-].
z	Direção de profundidade [-].
.	Separador decimal figuras.

Símbolos Gregos

α	Massa específica [kg/m ³].
$\propto$	Permeabilidade [m ³].
ε	Eficiência.
ε	Taxa de dissipação turbulenta [J/kg.s].
$\eta(x, t)$	Elevação da SL da água [m].
κ	Energia cinética turbulenta [J/kg].
μ	Viscosidade dinâmica [Pa.s].
θ_1	Inclinação no sentido oposto da propagação da onda, da parede frontal externa.

θ_2	Inclinação da parede frontal e posterior da câmara.
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³].
δ	Espessura da zona porosa [m].
σ	Relação de dispersão da onda [s ⁻¹].
σ_ε	Número de Prandtl para ε .
σ_k	Número de Prandtl para k .
$\Phi(x, z, t)$	Função potencial de velocidade bidimensional [m ² /s].

Subscritos e Superscritos

C_R	Coeficiente de reflexão.
C_2	Fator de resistência inercial.
E_E	Energia extraída [Kj/m].
E_l	Energia perdida [Kj/m].
E_R	Energia refletida [Kj/m].
E_T	Energia total [Kj/m].
H_R	Altura da onda refletida [m].
H_l	Altura da onda incidente [m].
H_S	Altura da onda estacionaria [m].
K_R	Coeficiente de reflexão de energia.
K_t	Relação característica da turbina [Pa.s/m ³].
M_w	Massa molecular do gás [g/mol].
N	Número de coeficientes complexos
μ_t	Viscosidade turbulenta [Pa.s].
$-\rho \bar{u'_i} \bar{u'_j}$	Tensor de tensões de Reynolds.
δ_{ij}	Delta de Kronecker.
Z_I	Amplitude complexa onda incidente.
Z_R	Amplitude complexa da onda refletida.

Lista de Siglas

CAO	Coluna de Água Oscilante.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics.</i>
FURG	Universidade Federal do Rio Grande.
HOBEM	<i>Higher-order boundary element method.</i>
LIMPET	<i>Land Installed Marine Power Plant.</i>
MUSCL	<i>Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservations Laws.</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option.</i>
QUB	<i>Queen's University of Belfast</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier Stokes.</i>
SL	Superfície livre.
S	Sloshing.
SIMPLEC	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent</i>
UDF	<i>User Defined Function.</i>
VOF	<i>Volume of Fluid.</i>

1 | Introdução

A energia elétrica se tornou indispensável para diversas atividades humanas. O crescimento e o maior poder econômico da população, além do desenvolvimento da indústria, contribuem para uma maior demanda de energia elétrica. No Brasil estima-se um aumento da demanda energética em aproximadamente 200% nos próximos 30 anos (Costa *et al.*, 2017). Dessa maneira, o setor energético deve se preparar para suprir as necessidades energéticas futuras. A energia pode ser proveniente de fonte renovável ou de fonte não renovável. As fontes renováveis de energia podem contribuir em estimular o crescimento econômico de regiões costeiras e remotas, além de seus menores impactos negativos ao meio ambiente quando comparadas às fontes tradicionais de geração de energia (Magagna e Uihlein, 2015).

Dentre as fontes renováveis de energia, as que tem maior contribuição na matriz energética mundial atualmente são a hidroelétrica (15,9%), a eólica (1,1%) e a solar (0,06%) (Edenhofer *et al.*, 2012). Uma fonte renovável de energia com grande potencial para fornecimento de energia elétrica é a das ondas do mar, mas esta não tem contribuição expressiva na geração de energia. Estima-se que o potencial total teórico de energia das ondas seja de 32.000 TWh/ano (Mørk *et al.*, 2010). Este potencial é capaz de suprir a atual demanda mundial de energia, considerando os dados da Agência Internacional de Energia em 2017 em que o consumo global de energia elétrica foi de 21.372 TWh/ano. Portanto, com base no potencial da energia das ondas, é importante considerá-la como uma alternativa de fonte renovável de energia. No Brasil estima-se que seja possível disponibilizar em torno de 22 GW no litoral norte, 30 GW no sudeste e de 35 GW no sul (COPPE/UFRJ e Seahorse Wave Energy, 2013).

A energia transportada pelas ondas pode ser convertida em energia elétrica por meio de dispositivos conversores. De forma geral, a onda, que possui energia cinética e potencial, excita um sistema que, agindo diretamente ou através de um fluido de trabalho, move um gerador elétrico (Brooke *et al.*, 2003). Atualmente, nenhuma proposta de dispositivo conversor está consolidada. Dessa maneira, existem inúmeros estudos buscando desenvolver e aprimorar os dispositivos existentes, para aproveitar o grande potencial energético das ondas.

As tecnologias de conversão de energia das ondas podem ser classificadas quanto ao princípio de funcionamento dos dispositivos, sendo os três principais tipos: Coluna de Água Oscilante (CAO); Corpos Flutuantes de absorção pontual ou absorção progressiva; e Galgamento. Também são classificados quanto ao local de instalação, sendo dispositivos costeiros (*onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*) (Falcão, 2010).

Este trabalho é focado no dispositivo CAO *onshore*, embora que esses se localizem em regiões com menor potencial energético em comparadas a *offshore* e *nearshore*, apresenta vantagens por possuir menores custos de instalação e manutenção e ainda podem ser acoplados a estruturas de quebra mar (Lisboa, 2016).

O dispositivo de conversão do tipo CAO são câmaras de concreto ocas, parcialmente submersas, aberta para o mar abaixo da superfície da água que retém o

ar acima da superfície livre interna (Falcão e Henriques, 2016). Esse dispositivo funciona da seguinte maneira: o ar fica aprisionado na câmara hidropneumática e a oscilação da superfície do mar provoca uma variação de pressão que força o ar a se deslocar pelo duto da turbina, onde se encontra uma turbina que se movimenta com a entrada e a saída do ar (Trujillo e Thurman, 2011).

Ainda há diversos desafios na conversão da energia das ondas que devem ser superados. Um deles é a flutuação dos níveis de potência das ondas durante o ano, onde o dispositivo deve operar com eficiência em estado de mar com potência de 20 kW/m, e também ser capaz de suportar ondas com potências na ordem de 1.000 kW/m (Estefen *et al.*, 2003). Além disso os dispositivos possuem altos custos implantação de manutenção e atualmente a eficiência não é atrativa para de comercialização. De modo geral os conversores instalados têm eficiência inferior à que foi estimada, para as plantas de LIMPET e Mutriku a eficiência é em torno de 8% (Ibarra-Berastegi *et al.*, 2018; Vicinanza *et al.*, 2019).

Deste modo, torna-se necessário estudar o dispositivo CAO para obter a melhor eficiência possível. Devido à complexidade dos fenômenos e as diversas variações de parâmetros envolvidos, a escolha da melhor geometria para construção desse dispositivo ainda é um desafio. Para isso, a simulação numérica tem um papel importante, uma vez que proporciona a facilidade de aquisição de dados a baixos custos de execução, comparados aos métodos experimentais.

Este trabalho tem o objetivo principal de investigar numericamente a performance de diferentes formas geométricas da câmara do dispositivo CAO. Especificamente, os objetivos são:

- Analisar o comportamento hidropneumático e hidrodinâmico; definir as parcelas de energia, Energia Extraída, Energia Refletida e Energia Perdida do balanço de energia do dispositivo de geometria padrão com diferentes inclinações da parede frontal;
- Propor novas geometrias de câmara, com inserção de uma parede frontal externa com diferentes inclinações, na busca de melhor eficiência do dispositivo,
- Analisar o comportamento hidropneumático e hidrodinâmico; definir as parcelas de energia, Energia Extraída, Energia Refletida e Energia Perdida do balanço de energia do dispositivo para as novas propostas de geometria;
- Comparar a performance dos dispositivos padrões com a dos propostos.

2 | Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica fornece a base para o entendimento do trabalho, apresentando os conceitos fundamentais da propagação e da transformação das ondas, bem como suas características principais; o princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas do tipo CAO; e o estado da arte em termos de análise numérica desses dispositivos visando a melhoria de performance.

2.1 Mecânica das Ondas

Nesta seção, serão descritas as principais características das ondas do mar. Esta introdução é a fundamentação teórica para estudar o dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo CAO. Primeiramente, é necessário saber como ocorre a formação das ondas. Segundo Cruz e Sarmiento (2004) as ondas são formadas a partir da ação do vento sobre a superfície do oceano. Os ventos por sua vez são originados pelo aquecimento desigual da superfície terrestre que ocasiona zonas de alta e baixa pressão. Sendo assim, a energia das ondas é gerada pela existência da energia solar (Assis *et al.*, 2013). Os mecanismos de transferência de energia do vento para as ondas são complexos. Costa (2004) identifica os seguintes aspectos: i) o ar que escoa sobre a superfície do mar transfere energia através de tensões cisalhantes, resultando na formação e no crescimento das ondas; ii) alterações dos campos de pressão e das tensões cisalhantes, em decorrência de escoamentos turbulentos de ar próximos da superfície, levam a uma intensificação do processo de formação das ondas; iii) quando atingem certo tamanho, as ondas podem sofrer uma ação mais intensa do escoamento de ar, o que se reflete em um maior crescimento das ondas.

As principais características de uma onda monocromática propagando-se em um canal de profundidade h estão representadas na figura 2.1. Os parâmetros principais que definem a onda são o período (T), que é o tempo requerido para duas cristas sucessivas passar por um determinado ponto; o comprimento (L), que é a distância entre duas cristas sucessivas; e a altura (H), que é medida do seu ponto mais alto chamado de crista até seu ponto mais baixo, a cava. A celeridade da onda c é a relação entre o comprimento e o período da onda, η é a elevação da superfície livre (interface ar-água), que representa a posição da superfície da água em relação ao nível de repouso.

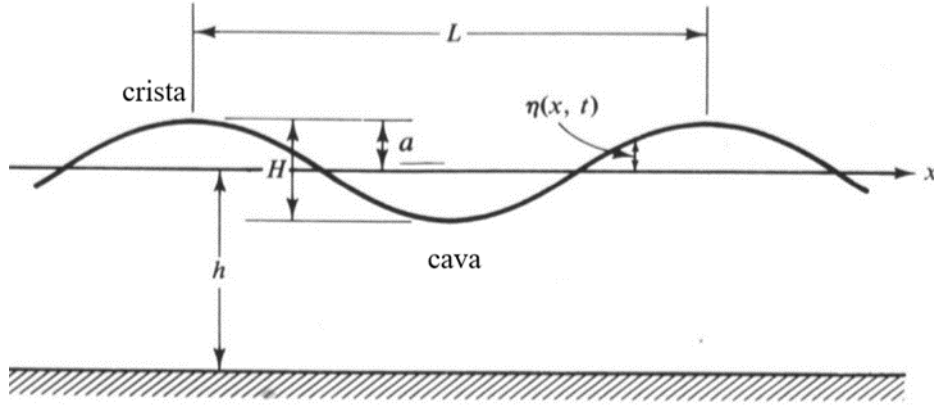


Figura 2.1: Principais características de uma onda em movimento. Fonte: adaptado de Dean e Dalrymple (2000).

Para descrever o movimento das ondas de gravidade existem diversas teorias. A teoria linear de Airy (1845) apesar de ser simplificada, é útil para compreensão de muitos fenômenos e solução de problemas reais. Essa teoria 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 teoria é desenvolvida considerando um escoamento potencial bidimensional, que é irrotacional e incompressível. Neste escoamento, as componentes de velocidade do escoamento estão relacionadas à função potencial de velocidade através da seguinte equação (Dean e Dalrymple 2000).

$$(u, w) = \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial x}, -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

onde Φ é a função potencial de velocidade, u é a componente horizontal da velocidade [m/s], w é a componente vertical da velocidade [m/s].

A aplicação da equação da conservação da massa para escoamentos potenciais resulta na equação de Laplace (McCormick, 1973).

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

Considerando que o comportamento temporal das variáveis é harmônico, o problema a ser solucionado passa a ser de valor de contorno em um trecho do canal, como representado na figura 2.2. Os contornos do domínio matemático são a superfície livre, as fronteiras laterais e o fundo (Dean e Dalrymple, 2000).

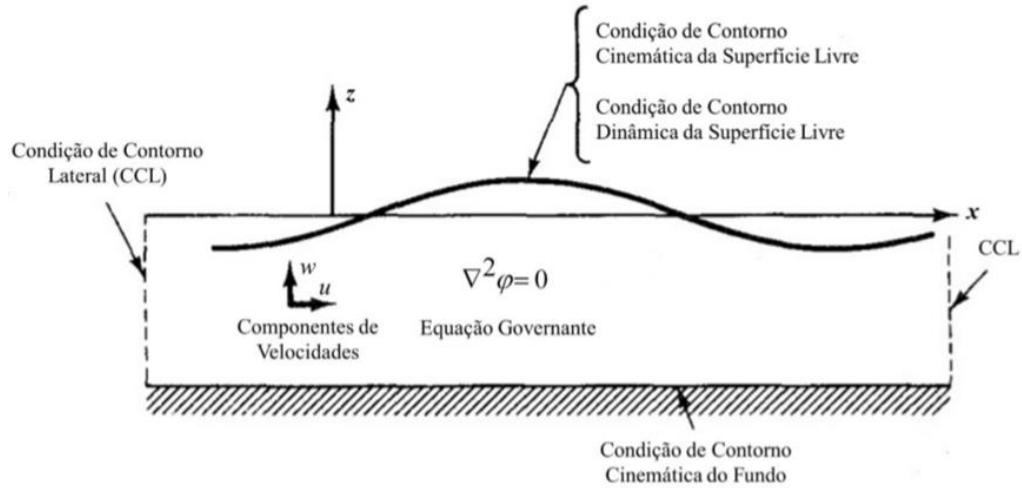


Figura 2.2: Problema de valor de contorno que descreve uma onda se propagando pela água. Fonte: adaptado de Dean e Dalrymple, 2000 apud Lisboa (2016) (tradução).

Na superfície livre, duas condições de contorno devem ser satisfeitas. A condição de contorno cinemática da superfície livre, que é expressa pela seguinte equação:

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

onde η é a elevação da superfície livre [m] e t é tempo [s].

A outra condição na superfície livre a ser satisfeita, é a condição de contorno dinâmica de superfície livre, que consiste na aplicação da equação de Bernoulli na superfície livre, considerando a pressão atmosférica nula, resultando na seguinte equação (Dean e Dalrymple, 2000).

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

onde p é a pressão atmosférica (Pa), ρ é a massa específica (kg/m³) e g é aceleração da gravidade (m/s²).

Para a condição de contorno no fundo, considerado impermeável e sem atrito, é imposta a velocidade vertical nula, conforme a equação (2.5) (Dean e Dalrymple, 2000).

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ em } z = -b \quad (2.5)$$

onde b é profundidade [m].

As condições de contorno laterais impõem que as ondas devam ser periódicas no tempo e no espaço. Assim, a função potencial de velocidade deve se repetir a cada período da onda (periodicidade no tempo) e a cada distância do comprimento de onda na direção x (periodicidade no espaço). Sendo assim, as ondas con-

tinuam a se propagar ao infinito, e não existem ondas que retornam em sentido oposto, conforme as equações (Dean e Dalrymple, 2000).

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x + L, z, t) \quad (2.6)$$

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x, z, t + T) \quad (2.7)$$

onde T é o período de onda [s] e L o comprimento de onda [m].

Uma das soluções desse problema de valor de contorno é aquela que representa as ondas progressivas, em que a elevação da superfície livre é expressa pela equação (2.8), a função potencial de velocidade pela equação (2.9) e a equação de dispersão pela equação (2.10) (Dean e Dalrymple, 2000).

$$H(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.8)$$

$$\Phi = \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh kb(b+z)}{\cosh kb} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.9)$$

$$\sigma^2 = gk \tanh kb \quad (2.10)$$

onde $\sigma = 2\pi/T$ é a frequência angular da onda [rad/s], $k = 2\pi/L$ é o número de onda [rad/m] e H a altura da onda [m].

As componentes de velocidade horizontal u e vertical, w são dadas pelas seguintes equações:

$$u(x, z) = \frac{H\sigma}{2} \frac{\cosh k(b+z)}{\sinh kb} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.11)$$

$$w(x, z) = \frac{H\sigma}{2} \frac{\sinh k(b+z)}{\sinh kb} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.12)$$

As partículas do fluido experimentam um movimento orbital elíptico, como representado na figura (2.3). Durante a propagação da onda, as partículas descrevem a trajetória de uma elipse, não havendo, portanto, transporte de massa, apenas transporte de energia na direção de propagação. A aproximação à superfície livre torna a forma da elipse mais achatada (Garrison, 2009).

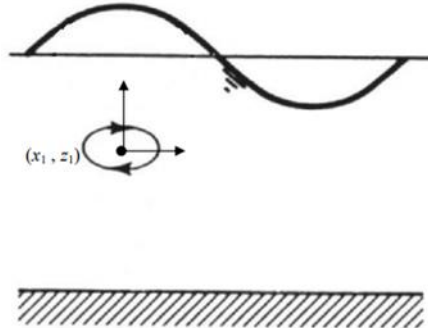


Figura 2.3: Movimento da partícula de água. Fonte: Adaptado Dean e Dalrymple (2000).

2.1.1 Teoria das ondas não lineares

Em ondas de grande amplitude, não é possível aplicar a teoria de Airy, pois esta é limitada a declividades de ondas $H/L < 5\%$ e uma profundidade relativa $h/L > 0,01$. Nesses casos, existem outras teorias de ondas mais complexas que podem ser aplicadas. A zona de aplicabilidade dessas teorias pode ser determinada por diagramas baseados em dois parâmetros independentes: a declividade da onda h/T^2 e a profundidade relativa H/T^2 , tal qual o diagrama da figura (2.4). Observa-se que a teoria de Stokes é a mais adequada para águas profundas, sendo a Cnoidal adequada em águas intermediárias e rasas. E a teoria linear tem o seu campo de aplicação restrito a baixas declividades e altas profundidades relativas, por ser uma onda de pequena amplitude.

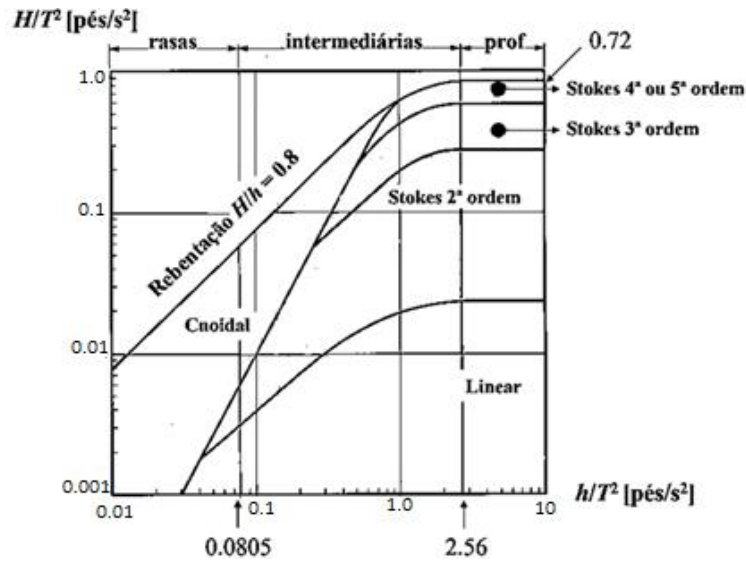


Figura 2.4: Diagrama do campo de aplicação das teorias das ondas. Fonte: adaptado de Chakrabarti (2005).

Existem diferentes ordens da teoria de Stokes, sendo a segunda e quinta ordens as mais usuais em aplicações de engenharia. Nestas teorias, aplica-se o método da perturbação para as variáveis do escoamento, acrescentando termos não-lineares à solução da teoria linear. Neste trabalho, é usada a teoria de Stokes de 2ª ordem.

Considerando a teoria de Stokes de 2ª ordem, o potencial de velocidade e da elevação de superfície livre da onda são obtidos pelas seguintes expressões, respectivamente (Dean e Dalrymple, 2000):

$$\phi = -\frac{Hg \cosh k(h+z)}{2\sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) - \frac{3H\sigma (\cosh 2k(h+z))}{32 \sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.13)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k \cosh kb}{16 \sinh^3 kb} (2 + \cosh 2kb) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.14)$$

As componentes de velocidade da teoria de Stokes são expressas como (Dean e Dalrymple, 2000):

$$u = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\cosh k(b+z)}{\cosh kb} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma K \cosh 2k(b+z)}{16 \sinh^4 kb} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.15)$$

$$w = \frac{Hgk \sinh k(b+z)}{2\sigma \cosh kb} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma K \sinh 2k(b+z)}{16 \sinh^4 kb} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.16)$$

2.1.2 Transformação das ondas

Ao se propagar, as ondas podem sofrer alguns fenômenos de transformação importantes, dentre eles, destacam-se o da reflexão, refração, difração e o de rebentação.

A reflexão é uma transformação que acontece em uma onda quando atinge um obstáculo e, com isso, uma parte da sua energia é refletida e a outra absorvida pelo obstáculo e/ou transmitida através do obstáculo. A reflexão total ocorre no caso da incidência de uma onda em uma parede vertical. Neste caso, a onda resultante é chamada de onda estacionária, em que a função potencial de velocidade e a elevação da superfície livre são a combinação da onda incidente com a refletida, dadas por (McCormick, 2010).

$$\Phi = \frac{H_S g \cosh k(b+z)}{2\sigma \cosh kb} \cos kx \sin \sigma t \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{H_S}{2} \cos kx \cos \sigma t \quad (2.18)$$

onde $H_S = H_I + H_R$ é altura da onda estacionária, H_I é a altura da onda incidente e H_R é a altura da onda refletida, que, neste caso de reflexão total, é igual a H_I .

O processo de refração é causado pela variação da velocidade de propagação pela presença de fundos de topografia variável. Assim, ao se aproximar da costa, as ondas sofrem mudanças de direção de propagação em que as cristas procuram um alinhamento com as linhas batimétricas. Além disso, ocorre o fenômeno chamado de empolamento, em que as ondas sofrem um aumento da altura com a diminuição da profundidade para conservar o fluxo de energia (Hearn, 2008).

O fenômeno da difração ocorre quando as ondas encontram um obstáculo (quebra-mar, ilha, barra, etc..), fazendo com que ocorra uma mudança de direção de propagação e que o fluxo de energia tenha componentes perpendiculares aos raios de onda (Suguio, 1992).

A rebentação ocorre quando a onda se aproxima de regiões rasas mais próximas à linha da costa e está associada a fenômenos de turbulência, emulsão de ar e dissipação de energia (Gomes, 1981). A forma com que a rebentação irá ocorrer depende da declividade e profundidade relativa da onda e da incli-

nação do fundo. Um parâmetro, denominado de parâmetro de similaridade de surf, permite estimar o tipo de rebentação. As formas principais de rebentação são: mergulhante (*plunging*), progressiva (*spilling*) e de fundo (*surging*).

2.1.3 Energia de uma onda

A energia de uma onda por área de superfície pode ser descrita em níveis de energia total, sendo a soma de duas componentes de energia: energia potencial (E_P) e energia cinética (E_C). A energia cinética é igual em magnitude à energia potencial conforme a teoria linear, de acordo com a equação (2.19), sendo a energia total (E_T) para ondas de gravidade expressa por unidade de área superficial (Garrison, 2009).

$$E_P = E_C = \frac{1}{16} \rho g H^2 \therefore E_T = E_P + E_C = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.19)$$

onde ρ é a massa específica da água [kg/m^3], g é aceleração da gravidade [m/s^2] e H é a altura da onda [m].

2.2 Dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante

Dentre dos dispositivos de conversão de energia o tipo CAO é o mais estudado até o momento. O princípio de funcionamento do conversor CAO consiste na oscilação da superfície livre dentro da câmara de ar, devido ao efeito da onda incidente em uma abertura submersa da câmara. Assim, ocorre a compressão e descompressão do ar dentro da câmara hidropneumática, o qual é forçado a passar por uma abertura na parte superior, onde está instalada uma turbina, que gera energia mecânica e que é convertida em energia elétrica (Lagoun *et al.*, 2010). A figura 2.5 mostra um esquema do dispositivo CAO.

Comumente é utilizada a turbina Wells nos dispositivos CAO, pela sua capacidade de manter o sentido de rotação, independente do sentido de escoamento do ar. O rendimento da turbina é em torno de 70 até 80%. Esta turbina se caracteriza por ter uma relação linear entre a diferença de pressão entre a câmara e a atmosfera Δp e a vazão volumétrica Q , dada por Falcão (2010):

$$K_t = \frac{\Delta p}{Q} \quad (2.20)$$

onde K_t é a relação característica da turbina [Pa.s/m^3].

A potência pneumática (P) dentro da câmara disponível para a turbina é calculada pela seguinte equação (Torres *et al.*, 2016):

$$P = \frac{\Delta p^2}{k_t} \quad (2.21)$$

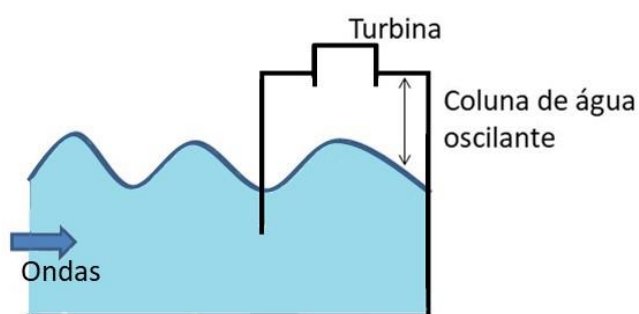


Figura 2.5: Esquema de um dispositivo CAO.

Protótipos de CAO foram construídos de forma experimental ao redor do mundo. Na Figura 2.6 é apresentada a central de PICO no arquipélago de Açores em Portugal, com uma potência instalada de 400 kW, que foi construída entre 1995 a 1999. A central foi inserida numa reentrância da costa, com nível médio de 8 m de profundidade. Sua câmara apresenta dimensões de 12x12 m (Falcão, 2010).

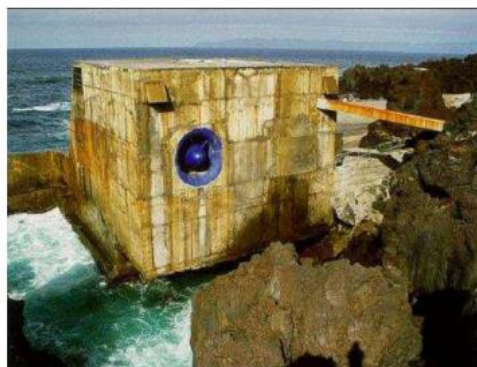


Figura 2.6: Dispositivo CAO na ilha de PICO – Portugal. Fonte: (Falcão, 2010).

Com a mesma tecnologia de PICO funciona a central de LIMPET (*Land Installed Marine Powered Energy Transmitter*) apresentada na figura 2.7, constituído por uma ligação que contém três câmaras com inclinação da parede frontal de 40° em relação à horizontal, sua capacidade de geração de até 500 kW de eletricidade para a rede eléctrica da ilha de Islay (Escócia), para cerca de 400 habitações (Vicinanza *et al.*, 2019).



Figura 2.7: Dispositivo CAO, LIMPET- Escócia. Fonte: (Vicinanza *et al.*, 2019).

Ao redor do mundo se tem diversos dispositivos CAO *onshore* construídos: Na Noruega em Tofteshallen com potência de (500kW); na Espanha em Mutriku

(596 kW); no Japão em Sakata (30 kW). Na Índia Vizhinjam (150 kW) (Falcão, 2010).

2.3 Balanço de energia na CAO

A análise do balanço de energias no domínio do dispositivo CAO permite entender melhor os fenômenos envolvidos, além de ajudar no projeto de um dispositivo mais eficiente. Autores como Tseng *et al.* (2000), Folley e Whittaker (2002), Fleming *et al.* (2012), Elhanafi *et al.* (2016) e Gaspar *et al.* (2020) seguem essa ideia em que é analisada a cadeia de transformação de energia no dispositivo CAO. Com esta análise que inclui os efeitos de reflexão, da turbulência e das forças viscosas, é possível definir os ganhos e perdas de cada proposta geométrica de câmara. Assim, pode-se evidenciar a quantidade de energia útil frente à total que poderia ser aproveitada.

A energia total presente na onda incidente (E_I) é transformada em energia extraída (ou pneumática) (E_E), pelo sistema de pressão da câmara, e posteriormente convertida em energia elétrica por um sistema turbina gerador. Este é o sistema básico de conversão de energia pelo dispositivo CAO, mas para a análise da cadeia energética da CAO, a energia devido à reflexão da onda (E_R) e as perdas por turbulência e forças viscosas (energia perdida), (E_L) devem ser consideradas. Assim, baseado na teoria de conservação de energia, o balanço energético da CAO pode ser expresso pela equação (2.22) (Tseng *et al.*, 2000, Elhanafi *et al.*, 2016):

$$E_I = E_R + E_E + E_L \quad (2.22)$$

onde E_I é a energia média da onda em um comprimento de onda. Considerando a energia da onda por unidade de superfície (E_T) da Eq. (2.19), a energia média da onda E_I é definida pela equação (2.23) Elhanafi *et al.*, 2016):

$$E_I = \frac{1}{8} \rho g H^2 L b \quad (2.23)$$

onde L é o comprimento da onda [m], b é a largura da câmara [m].

As energias estão presentes nas ondas em forma de energia cinética e potencial proporcionais à altura das mesmas. Isso nos possibilita realizarmos relações entre as quantidades de energia com coeficientes proporcionais à altura da onda, como, por exemplo, o coeficiente de reflexão e o fator de amplificação, dado pela equação (2.24) (Tseng *et al.*, 2000, Elhanafi *et al.*, 2016):

$$\frac{E_R}{E_I} = \frac{\frac{1}{8} \rho g H_R^2 L b}{\frac{1}{8} \rho g H_I^2 L b} = \left(\frac{H_R}{H_I} \right)^2 = C_R^2 = K_R \quad (2.24)$$

onde C_R é o coeficiente de reflexão da onda e K_R é o coeficiente de reflexão de energia.

A energia pneumática extraída pela turbina na câmara pode ser 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 extraída e a energia média pneumática podem ser calculadas através da integral (Elhanafi *et al.*, 2016):

$$E_E = \int_0^T \Delta p(t) Q(t) dt \quad (2.25)$$

onde Δp é a diferença de pressão do ar entre o interior da câmara e a atmosfera, Q é a vazão volumétrica de ar causada pelo deslocamento da Superfície Livre (SL) dentro da câmara.

Conhecendo a E_I e determinadas E_E e E_R , a partir da equação (2.22), pode ser determinada a E_L . A eficiência da CAO é dada pela relação da E_E e E_I , expresso pela equação (2.26):

$$\mathcal{E} = \frac{E_E}{E_I} \quad (2.26)$$

onde $\mathcal{E}$ é a eficiência.

2.4 Estado da Arte

A pesquisa de dispositivos do tipo CAO para geração de energia elétrica foi realizada por diversos autores desde 1940 com os estudos pioneiro de Yoshio Masuda (Falcão, 2010). O primeiro protótipo deste sistema foi desenvolvido no final da década de 80 em Tofteshallen (Noruega) e, a partir daí, outros protótipos em escala real foram desenvolvidos (Falcão, 2010). Dos estudos teóricos desenvolvidos sobre dispositivos CAO *onshore*, destaca-se o de Evans (1982), que inicialmente considerou uma abordagem simplificada do tipo "pistão rígido" para a modelagem da superfície livre no interior do dispositivo de CAO. Em seus estudos, Sarmento e Falcão (1985) e Evans (1982) desenvolveram modelos teóricos que permitiram a avaliação de alguns parâmetros construtivos (formato geométrico, dimensões, parâmetros de turbina), considerando ondas regulares e geometrias bidimensionais simplificadas. Evans e Porter (1995) investigaram a otimização de um dispositivo bidimensional abordando a submersão da cavidade do dispositivo de CAO. Análises em geometrias mais complexas foram desenvolvidas por Brito-Melo (2000), Delauré e Lewis (2003) e Josset e Clément (2007), dentre outros, usando modelos numéricos baseados no método de elementos de contorno.

Com o aumento da capacidade computacional e da abrangência dos códigos da Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes na média de Reynolds (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* – RANS) e no método *Volume of Fluid* (VOF) ganharam o seu espaço. Destaca-se inicialmente o trabalho de Horko (2007), que validou um modelo de tanque de onda numérico bidimensional com o sistema CAO utilizando software comercial FLUENT (baseado no método dos volumes finitos) para escoamento bidimensional. Neste trabalho, foi avaliada a influência da geometria da parede frontal do dispositivo sobre a sua eficiência hidrodinâmica. Os resultados do estudo também mostraram que algumas alterações na geome-

tria da abertura da parede frontal podem fornecer melhorias significativas na eficiência de captura de energia em dispositivos do tipo CAO. Liu *et al.* (2009) também usou o software FLUENT para a análise do dispositivo CAO, investigando a elevação da onda, variação de pressão dentro da câmara e a velocidade do escoamento do ar no duto.

Em busca de melhorias na eficiência do dispositivo CAO, alguns estudos foram dedicados ao entendimento da influência das características da geometria das câmaras dos dispositivos na hidrodinâmica e no desempenho da conversão de energia. Ângulo das paredes, largura da câmara, profundidade de imersão da parede frontal, espessura da parede frontal da CAO são algumas variações estudadas por alguns autores. A seguir, citam-se alguns autores que desenvolveram pesquisas relacionadas à busca do melhoramento da performance do dispositivo tipo CAO. Hong *et al.* (2007) analisaram os efeitos de alguns parâmetros geométricos na capacidade de absorção de energia de um dispositivo CAO sob as condições de mar da costa da Coreia do Sul em Jeju. Modelos teóricos baseados na equação potencial foram comparados com experimentos em um canal. O comprimento da câmara, a profundidade e a espessura da parede frontal e o ângulo de inclinação do fundo da câmara foram variados para identificar os seus efeitos na absorção de energia em termos de amplitude de elevação de superfície livre dentro da câmara, coeficiente de reflexão e potência pneumática. Em seus resultados observou que a absorção de energia tem variação com os parâmetros analisados.

A parede frontal da câmara CAO foi o parâmetro geométrico estudado por Boualia e Larbia (2013) na busca de melhor performance do dispositivo. Os autores usaram um modelo do tipo RANS-VOF para analisar os efeitos da profundidade de imersão, inclinação e forma a ser disposta da parede frontal. Concluíram que a parede com inclinação de 90° teve os melhores resultados dentre os testados. Além disso, os autores observaram que a profundidade de imersão da parede frontal é um dos fatores mais importantes no projeto da câmara do CAO.

Nos últimos anos o método *Design Construtal*, que é baseado na Teoria Construtal desenvolvida por Bejan (2000), tem sido empregado na solução de problemas de engenharia. Gomes *et al.* (2017) aplicou a metodologia do *Design Construtal* em um estudo numérico bidimensional sobre a análise da geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas tipo CAO para maximizar a potência hidropneumática absorvida pelo dispositivo. A metodologia do *Design Construtal* foi empregada usando o software FLUENT para analisar dois graus de liberdade: o ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com superfície livre (β) e a profundidade de submersão do dispositivo (H_3). Os autores notaram que o melhor desempenho foi obtido quando $\beta = 30^\circ$ e $H_3 = 9,50$ m, enquanto que o pior desempenho ocorre quando $\beta = 80^\circ$ e $H_3 = 10,25$ m. Lima *et al.* (2019) analisaram numericamente (através do software FLUENT) o dispositivo CAO com duas câmaras em sequência usando o *Design Construtal* associado ao método de busca exaustiva para a otimização geométrica com o intuito de obter a maior potência hidropneumática disponível. Os graus de liberdade analisados foram as relações altura/comprimento das câmaras hidropneumáticas do primeiro e segundo dispositivos (H_1/L_1 e H_2/L_2 , respectivamente), a altura e a espessura da coluna que divide os dois dispositivos (H_2 e e_2 , respectivamente). A maior potência hidropneumática foi encontrada para $H_1 / L_1 = H_2 / L_2 = 0,2613$ e $e_2 = 2,22$ m, obtendo um total de 5716,2 W de potência hidropneumática. O caso de menor po-

tência tem $H_1 / L_1 = H_2 / L_2 = 0,2613$ e $e_2 = 0,1$ m, obtendo um total de 4818,5 W de potência hidropneumática. Letzow *et al.* (2020) empregaram a metodologia *Design Construtal* para maximizar a potência disponível em uma CAO *onshore* com rampa no fundo em escala real. As análises foram realizadas usando o software FLUENT, considerando três graus de liberdade: relação altura/comprimento da câmara, relação altura/comprimento da rampa e a submersão da parede frontal. A geometria ideal apresentou uma potência disponível 37,3% maior do que a do melhor caso sem a rampa do fundo do mar abaixo da câmara. Os autores observaram a forte influência das relações altura/comprimento da câmara e da rampa na potência disponível da CAO.

Ning *et al.* (2017) conduziram um estudo no qual o objetivo era analisar a performance de um dispositivo CAO com duas câmaras e apenas um orifício. Para isso, foi usado um modelo 2D baseado na teoria do escoamento potencial e no método de elementos de contorno de alta ordem HOBEM (*Higher-order boundary element method*). A influência das variações geométricas das câmaras na variação da elevação de superfície e na pressão de ar dentro das duas câmaras foi investigada. Concluíram que a resposta do dispositivo tem uma forte dependência com as condições da onda incidente. Quanto maior o comprimento da onda, mais sincronizado é o movimento das colunas de água dentro das câmaras.

Teixeira *et al.* (2013) usaram dois programas, FLUINCO e FLUENT, baseados nas equações RANS, para analisar os efeitos da profundidade da parede frontal, do comprimento da câmara e das características da turbina na performance do dispositivo CAO. Os autores observaram as tendências da influência desses efeitos na eficiência do dispositivo de paredes frontais e posteriores verticais, tal qual ao da planta de PICO, Portugal.

Destacam-se também os estudos de Tseng *et al.* (2000), Folley e Whittaker (2002), Fleming *et al.* (2012) e Elhanafi *et al.* (2016), que apresentam os balanços energéticos a fim de determinar o desempenho do dispositivo CAO. Estas investigações são referências para a análise de balanço de energia apresentada neste trabalho.

Em seu trabalho, Paulus (2019) utilizou o programa FLUENT com o objetivo de avaliar o comportamento hidrodinâmico e das parcelas energéticas envolvidos na conversão de energia das ondas do dispositivo CAO, com diferentes inclinações da parede frontal da câmara. O método *Volume of Fluid* (VOF) é utilizado para considerar o escoamento multifásico. O autor apresenta a relação entre períodos de onda e valores de eficiência, sendo o maior no período de 7,5 s. Também observou que os valores máximos de *run up/down* e de elevação da superfície livre dentro da câmara são significativamente maiores para os casos mais inclinados e diminuem para ângulos mais retos.

Gaspar *et al.* (2020), usou o programa FLUENT (RANS-VOF) para comparar a performance de um dispositivo típico da planta de PICO, Portugal, que possui paredes verticais, com um dispositivo de paredes inclinadas em 40°, tal qual o de LIMPET, Escócia. Os autores realizaram análises do comportamento hidrodinâmico, da interação fluido-estrutura fora e dentro da câmara e da distribuição de energia do sistema. Os resultados mostraram que o dispositivo com as paredes inclinadas possui uma melhor eficiência. No entanto, o dispositivo com paredes verticais apresentou uma menor variação de eficiência na faixa de período de onda analisado.

Este trabalho procura ampliar os estudos desenvolvido por Paulus (2019) e Gaspar *et al.* (2020), sendo analisados os efeitos de outras inclinações de paredes sobre a performance do dispositivo. Além disso, também são investigadas as novas propostas geométricas deste trabalho, com o intuito de encontrar uma melhor eficiência.

3 | Metodologia

Nesta seção são apresentados os métodos utilizados na execução do trabalho. Especificamente, são descritos o estudo de caso, as equações governantes e o modelo numérico adotado, e o método de aquisição de dados.

3.1 Estudo de caso

Os casos a serem analisados consistem na incidência de ondas sobre um dispositivo CAO *onshore* a 10 m de profundidade (figura 3.1). A altura da câmara de ar é de 6 m e as paredes frontais são submersas até 2,5 m e tem espessura de 0,5 m.

As configurações geométricas analisadas neste trabalho têm como referência os protótipos da planta de PICO, Açores, Portugal, em que as paredes são verticais (Falcão, 2000) e a planta de LIMPET, em que as paredes tem inclinação de 40° (Queen's University of Belfast (QUB), 2002). Elas foram divididas em dois casos:

- Caso A (figura 3.1a), em que as paredes frontal e posterior possuem uma inclinação θ_2 . Os valores de θ_2 a serem analisados são de 40°, 52°, 65°, 77°, 90°. Este caso é uma proposta que dá seguimento aos trabalhos de Gaspar *et al.* (2020) e de Paulus (2019).
- Caso B (figura 3.1b), que é a nova geometria proposta neste estudo. Neste caso, as paredes internas da câmara têm uma inclinação θ_2 e a parte externa da parede frontal é inclinada no sentido oposto ao de propagação da onda incidente (θ_1). Os valores de θ_1 e θ_2 a serem analisados são combinações de 40°, 52°, 65°, 77°, 90°.

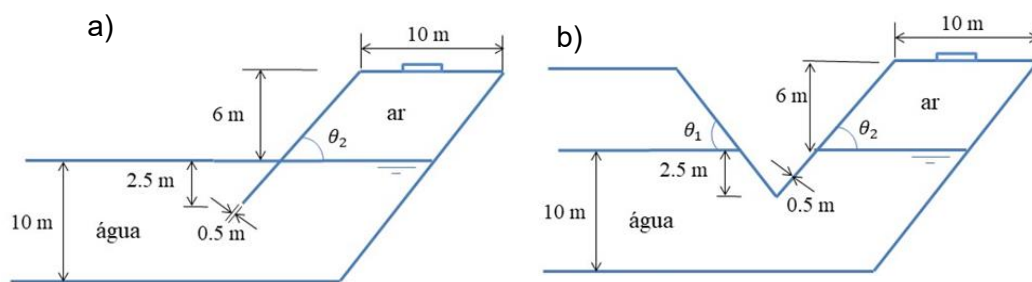


Figura 3.1: Vista lateral dos dispositivos do tipo CAO. (a) caso A; (b) caso B.

A figura 3.2 mostra o fluxograma com todos os casos analisados, sendo que todas as simulações foram executadas considerando uma turbina Wells com uma relação característica da onda (k_t) de 100 Pa.s/m³. Esse k_t foi adotado pois corresponde a aproximadamente ao k_t ótimo usado na planta do Pico, cuja turbina Wells tinha um diâmetro de 2,3 m (Falcão, 2002). E a altura da onda foi constante em 1,5 m. Diferentes períodos de ondas foram analisados $T = 6, 7,5, 9, 10,5$ e 12 s.

Para cada período de onda foi analisada cinco diferentes inclinações da parede frontal (θ_2), resultando em 25 simulações para o caso A. Para a nova proposta geométrica (caso B) o processo se repete forma analisadas as diferentes inclinações de (θ_2), e para cada (θ_2) foi analisada uma inclinação de (θ_1) diferente, resultando para o caso B, 125 simulações. Salientado que a geometria do caso B, $\theta_2 = \theta_1 = 90^\circ$ é mesma do caso A, $\theta_2 = 90^\circ$.

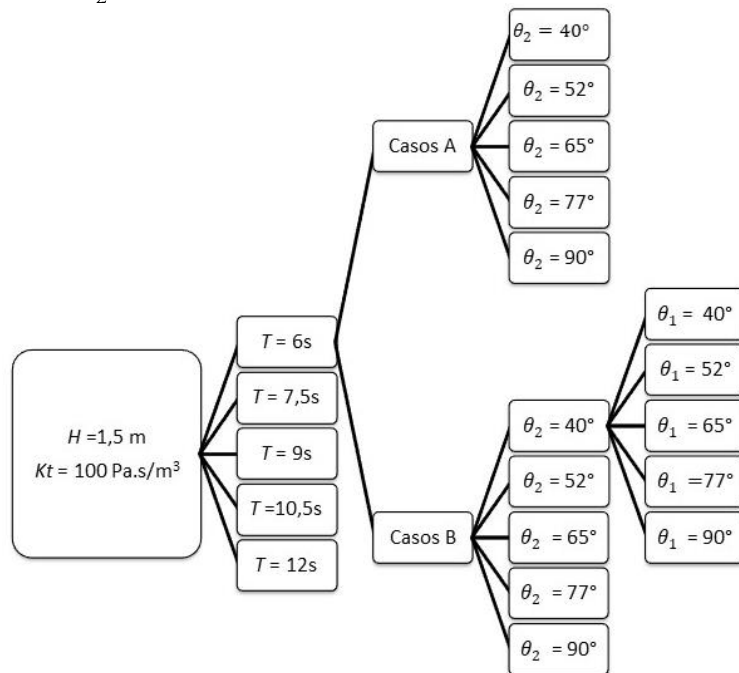


Figura 3.2: Fluxograma de todos os casos analisados.

Conforme a equação de dispersão (equação 2.10) os comprimentos de onda para cada período de onda são os seguintes: para $T = 6$ s, $L = 48,41$ m; $T = 7,5$ s, $L = 65,40$ m; $T = 9$ s, $L = 81,70$ m; $T = 10,5$ s, $L = 97,64$ m; $T = 12$ s, $L = 113,30$ m. Esses períodos de ondas foram analisados nos trabalhos de Gaspar et al. 2020 e de Paulos 2019. E foram escolhidas pois representam uma faixa de ondas comumente encontrados em estado de mar. Visto que o litoral brasileiro possui como característica uma altura que oscila entre 1,2 a 3 m e períodos de onda predominante de 5 a 12 s (Tolmasquim, 2016).

Especificamente, serão analisados o comportamento fluido dinâmico dos dispositivos, a elevação da superfície livre, a pressão de ar, as potências pneumáticas dentro da câmara e o balanço de energia envolvida.

3.2 Equações governantes

As simulações são realizadas através do programa FLUENT, em que se aplica o método dos volumes finitos nas equações da dinâmica dos fluidos. Neste trabalho, o escoamento é bidimensional, sendo que o escoamento da água é conside-

rado incompressível e o do ar é compressível. As equações de conservação são as da continuidade, da quantidade de movimento e da energia para um fluido newtoniano, dadas por (Versteeg e Malalasekera, 1999):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho e + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} u_j) \quad (3.3)$$

$$e = h - \frac{p}{\rho} + \frac{|u|^2}{2} \quad (3.4)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.5)$$

onde $i, j = 1, 2$ para um escoamento 2D, ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], g_i a componente da aceleração da gravidade [m/s^2], u_i são os componentes da velocidade [m/s], p é a pressão [Pa], μ é a viscosidade dinâmica [Pa.s] e S_i é um termo fonte que, neste estudo, corresponde à inclusão de uma zona porosa para simular os efeitos de uma turbina, e é a energia específica, κ é o coeficiente de condutividade térmica, $|u|$ o módulo da velocidade, h a entalpia específica e o termo τ_{ij} é o tensor de tensão viscosa. O ar segue a equação de estado de um gás ideal, regida pela equação (Atkins, 2008):

$$\rho = \frac{p}{T R / M_w} \quad (3.6)$$

onde R é a constante geral dos gases ideais e M_w é a massa molecular do gás [g/mol].

No escoamento turbulento, os movimentos das partículas são tridimensionais e aleatórios. Sendo assim, a velocidade (u) pode ser expressa como a soma de um valor médio ($\bar{u}$) e flutuante, (u') (Lesieur, 1996).

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.7)$$

As equações básicas de Navier-Stokes, são modificadas para representar a variável instantânea como uma composição variável média, resultando nas equações médias de Reynolds (*Reynolds-Averaged Navier Stokes* – RANS), dadas pela equação (Fluent, 2016):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u'_i u'_j}) \quad (3.8)$$

onde $(-\rho \bar{u'_i u'_j})$ é o tensor de tensões de Reynolds.

A hipótese de Boussinesq, foi um dos primeiros métodos para relacionar o tensor de tensões de Reynolds ao gradiente de velocidades (Wilcox, 1998).

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

onde μ_t é a viscosidade turbulenta [Pa.s], k é a energia cinética turbulenta [J/kg] e δ_{ij} é o delta de Kronecker.

Os modelos de turbulência proporcionam o fechamento do problema. Neste trabalho, é usado o modelo $k - \varepsilon$, que é um modelo de duas equações, ou seja, inclui duas equações de transporte extras para representar as propriedades turbulentas do escoamento. A primeira variável transportada é a energia cinética turbulenta k . A segunda variável transportada neste caso é a dissipação turbulenta ε , sendo a viscosidade turbulenta μ_t , calculada como função de k e ε . As equações do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ são (Wilcox, 1998):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \mu_t (2 S_{ij} S_{ij}) - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S_k \quad (3.10)$$

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

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

sendo

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.13)$$

onde C_μ , $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes de valor padrão 0,09, 1,44 e 1,92 respectivamente, σ_k e σ_ε são os números de Prandtl para k e ε .

O método *Volume of Fluid* (VOF) é usado para considerar o escoamento de dois fluidos. A fração volumétrica (α) representa as fases dentro de cada volume de controle. A soma de todas as fases deve ser igual a um. Nas simulações desse trabalho, há duas fases, ar e água, assumindo $\alpha_{ar} = 0$ e $\alpha_{água} = 1$. A porção de interface entre água e ar é dada pela posição $\alpha = 0,5$ superfície livre. A fração de volume é regida pela equação de transporte descrita pela seguinte equação (Fluent, 2016).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (3.14)$$

Em paralelo com este método se utilizou o esquema de cálculo de interface *geometric reconstruction* (ou *geo-reconstruct*) que assume que a interface entre as

duas fases tem uma forma linear dentro de cada volume, primeiramente calculando 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. Na segunda etapa são calculadas as quantidades de fluido proveniente de cada fase, usando a representação linear da interface e a distribuição da velocidade normal e tangencial em cada face. Por fim, recalcula-se a fração volumétrica em cada volume usando o balanço de fluxo calculado no passo anterior (Fluent, 2016)

3.3 Modelo numérico

O domínio computacional 2D é composto de um canal numérico de 10 m de profundidade e comprimento de $2L$ com o dispositivo CAO no seu final, a largura da câmara do dispositivo é de 10 m e é considerada para o cálculo do volume de fluido deslocado e, conseqüentemente, para o cálculo da pressão de ar imposta pela turbina dentro da câmara (figura 3.3). Modelo numérico verificado conforme Teixeira *et al.* (2013).

Como condições iniciais, considera-se a superfície livre em repouso, as componentes de velocidade nulas, a pressão hidrostática na água e a pressão atmosférica no ar; a energia cinética turbulenta e taxa de dissipação iniciais são iguais a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

As condições de contorno impostas no canal são as seguintes:

- a) No contorno do topo do canal, é imposta a pressão atmosférica (101325 Pa) e a temperatura ambiente (27 °C).
- b) Nas paredes da câmara e no fundo, é imposta a condição de não deslizamento, ou seja, o fluido junto a esses contornos possui velocidade nula. As velocidades paralelas às linhas das paredes são nulas.
- c) No batedor estático, são impostas as componentes de velocidade e a elevação da superfície livre conforme a teoria de Stokes de 2ª ordem descritas pelas equações (2.13) e (2.14). A elevação da superfície livre é imposta pelo valor da fração de volume (0 para ar e 1 para água) a cada instante. As imposições são realizadas através de uma UDF (*User Defined Functions*), desenvolvida em Didier *et al.* (2016). Para eliminar a re-reflexão das ondas no batedor, é aplicada a técnica de absorção ativa, evitando resultados errôneos. Este método foi desenvolvido por Schäffer e Klopman (2000), em que a velocidade horizontal é corrigida a cada instante pelo monitoramento da superfície livre em uma sonda à frente do batedor (neste trabalho a sonda é localizada a 1 m do batedor). Esta metodologia foi validada e aplicada por diversos autores em estudos de dispositivos CAO (Dias *et al.*, 2015), (Didier *et al.*, 2011), (Mendonça *et al.*, 2017), (Conde *et al.*, 2011) e (Teixeira *et al.*, 2013).
- d) No contorno do topo da CAO é imposta a pressão atmosférica e a temperatura ambiente. Os efeitos de imposição de pressão da turbina são reproduzidos pela implementação de uma zona porosa em duas camadas de elementos abaixo do contorno do topo da CAO de acordo

com o método desenvolvido por Gonçalves *et al.* (2020). A zona porosa se equivale ao modelo de disco atuador, que é muito utilizado em simulações numéricas, para representar turbinas eólicas (Norris *et al.*, 2010). Nesse trabalho, na zona porosa, são adicionados termos fonte nas equações de quantidade de movimento (equação (3.2)) compostos por perdas viscosas e de inércia, que no caso de um meio poroso homogêneo são (Fluent, 2016):

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + \frac{\rho C_2}{2} |u| u_i\right) \quad (3.15)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica [Pa.s], α é a permeabilidade [m^3], ρ é a massa específica [kg/m^3], C_2 é o fator de resistência inercial, u_i são as componentes de velocidade ($i, j = 1, 2$) e $|u|$ é o módulo de velocidade. A perda de pressão causada pelo meio poroso é $p = \delta S_i$, onde δ é a espessura da zona porosa [m]. Para representar o efeito da turbina Wells, a perda de pressão é proporcional à velocidade equação (2.20). Assim, a constante C_2 é nula e o modelo do meio poroso segue a lei de Darcy.

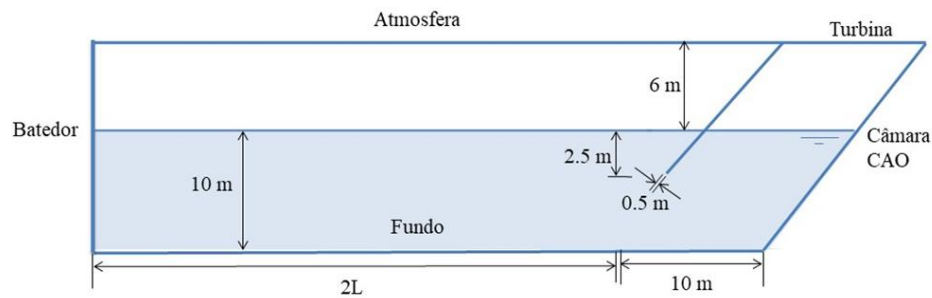


Figura 3.3: Domínio computacional e condições de contorno para o caso A com $\theta_2 = 40^\circ$.

No programa FLUENT, foi usado o método SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent*), a discretização espacial da pressão PRESTO! (*Pressure Staggering Option*), o esquema de interpolação de 3ª ordem MUSCL (*Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws*) e a método de reconstrução da superfície Modified HRIC. Foram usados os parâmetros de relaxação para a pressão, massa específica, quantidade de movimento, forças de volume e viscosidade de turbulência iguais a um; e energia cinética e taxa de dissipação de turbulência iguais a 0,8. Esta metodologia foi utilizada nos trabalhos de Paulus (2019) e Gaspar *et al.* (2020), que são referências para o desenvolvimento desse trabalho e foi validada anteriormente nos estudos de Dias *et al.* (2015), Didier *et al.* (2011), Mendonça *et al.* (2017), Conde *et al.* (2011) e Teixeira *et al.* (2013).

3.4 Método para aquisição de dados

Nesse trabalho, a aquisição dos dados é realizada através de monitores (sondas), distribuídos ao longo do canal e no interior da câmara da CAO. Para obtenção dos resultados necessários para análise desse estudo, três tipos diferentes de sondas foram utilizados: monitores de integral de variável (elevação da SL), monitor de pressão e monitor de volume (elevação média ao longo da câmara da CAO).

Nas duas geometrias, caso A e caso B, a distribuição das sondas segue a mesma metodologia. O monitor de volume dentro da CAO integra a fração de volume a cada instante de tempo. O valor médio da elevação de superfície livre dentro da CAO é obtido dividindo este volume pela sua largura, que é 10 m.

Na parede frontal, a sonda SPB faz a leitura das elevações da SL usada para determinar o *run up/down* e é inserida paralelamente à parede frontal, como pode ser visto nas figuras 3.4a e 3.4b. Para monitorar o *sloshing*, três sondas internas, SPI1, SPI2 e SPI3, foram colocadas no interior da câmara, distanciadas igualmente. Além dessas, foram inseridas mais duas sondas internas, uma em cada parede lateral da câmara, nomeadas de SPA1 e SPA2, (figuras 3.4a e 3.4b).

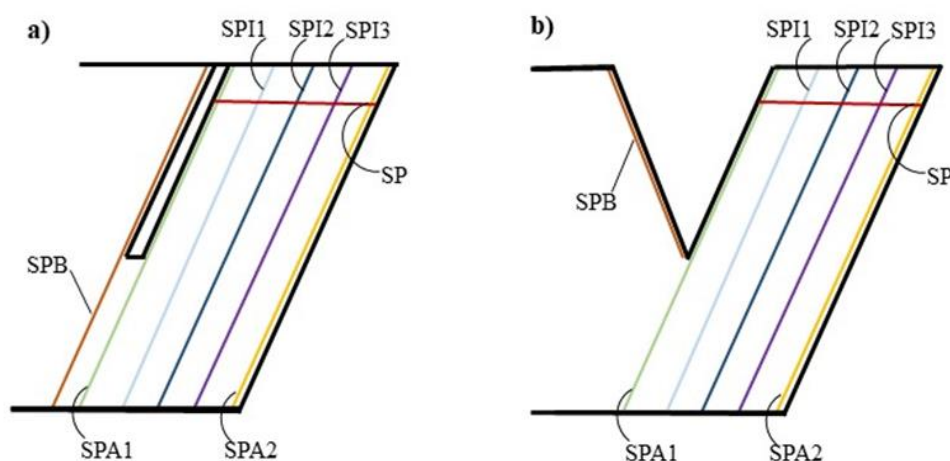


Figura 3.4: Esquema de distribuição das sondas para obtenção de dados de *run up/down*, *sloshing* e pressão. (a) caso A; (b) caso B.

Os dados de pressão dentro da câmara também foram lidos pela integração da pressão ao longo da sonda de pressão SP, localizada horizontalmente a 5,5 m de altura no interior da CAO, como mostra figura 3.5. Ao dividir o valor adquirido na sonda pelo comprimento da sonda 10 m, obtém-se o valor médio da pressão dentro da câmara.

Ainda foram colocadas mais três sondas ao longo do canal para obter o coeficiente de reflexão da onda, seguindo a metodologia implementada por Sousa *et al.* (2011), em que três sondas são utilizadas para medir a elevação de SL no canal, cuja distância entre as sondas é proporcional ao comprimento de onda. Segundo Sousa *et al.* (2011), as distâncias a serem adotadas são as seguintes: entre a primeira (WP1) e a segunda sonda (WP2) $0,1L$; entre a primeira (WP1) e terceira

sonda (WP3) $0,27L$. Essas foram as distâncias adotadas nesse trabalho, conforme pode ser visto na figura 3.5. A primeira sonda foi instalada no meio do canal a $1L$ do batedor. Esta metodologia também foi utilizada por Paulus (2019) e Gaspar *et al.* (2020) em suas análises.

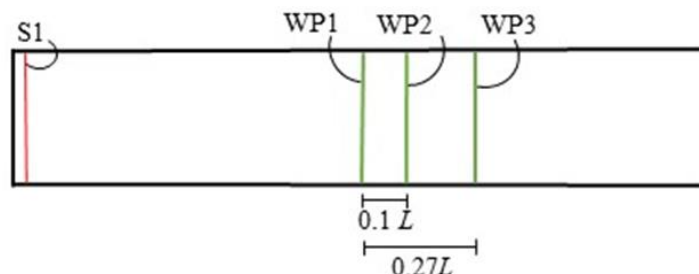


Figura 3.5: Esquema do posicionamento das sondas para cálculo do coeficiente de reflexão.

Através dos resultados de elevação da superfície livre oriundos das sondas WP1, WP2 e WP3 e através de um algoritmo desenvolvido no software MATLAB de autoria de Sousa *et al.* (2011) baseado no método de Mansard e Funke (1980). Neste método, é possível dividir 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).

3.5 Discretização do domínio

As malhas foram elaboradas utilizando o software gerador de malha Gmsh, sendo uma malha específica construída para cada caso estudado, com as diferentes inclinações da parede frontal e os comprimentos de onda, resultando em 145 malhas. O fato de uma malha ser gerada para cada comprimento de onda é porque o domínio computacional horizontal foi definido considerando dois comprimentos de onda para o canal ($2L$).

Conforme Teixeira *et al.* (2013) e Didier *et al.* (2016), é demonstrado que a propagação da 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 a fim de evitar a difusão numérica e, ao mesmo tempo, manter o número de volumes da malha reduzido. Portanto, a malha construída no presente trabalho é baseada nessas características de discretização espacial.

A figura 3.6 mostra os refinamentos adotados na malha. Na direção vertical, uma região em torno da superfície de repouso ($\pm H$) tem células de altura $H/26$ constante. O tamanho da célula aumenta até o topo da malha e o número de células é de 55. Na região entre a zona refinada próxima à superfície livre e o fundo,

segue uma distribuição bi exponencial, em que o número de células é de 85 (figura 3.6).

Na região do canal, a discretização horizontal é constante ($L/70$). Na região entre o batedor e a sonda usada na absorção ativa tem três camadas de células. Em seguida, tem uma transição entre esta região e o canal. Há um refinamento na região das paredes da CAO, em que o tamanho dos elementos na direção horizontal é o equivalente a $\frac{1}{4}$ da espessura da parede frontal. Uma zona de transição de comprimento L conecta essa zona com a do canal, conforme mostra em detalhe a figura 3.7.

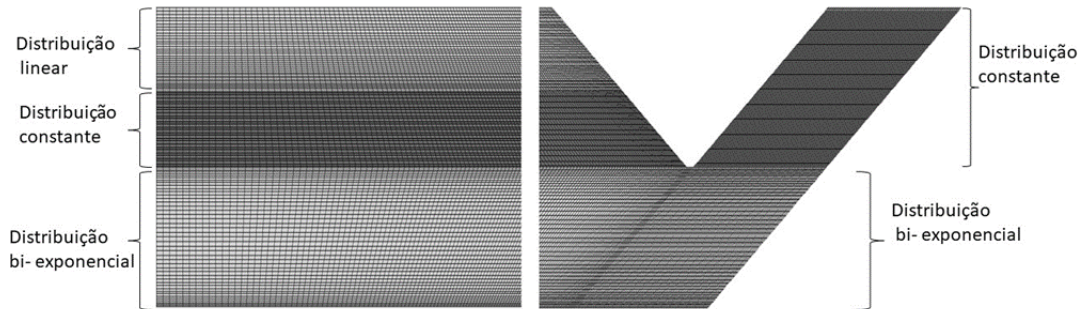


Figura 3.6: Malha de volumes finitos. Exemplo caso B, inclinação parede frontal $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, $T = 6s$.

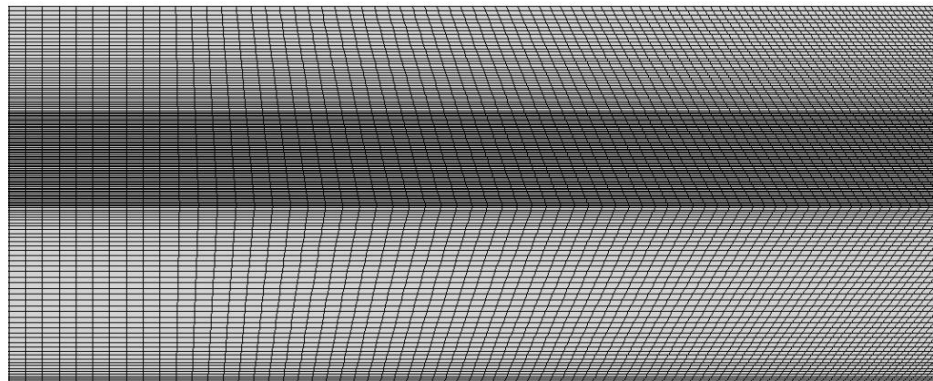


Figura 3.7: Detalhe da malha, começo da transição da parede inclinada. Exemplo caso B, inclinação da parede frontal, $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, $T = 6s$.

A discretização do tempo foi realizada através de formulação implícita de primeira ordem com incremento temporal equivalente a $T / 1280$, resultando em 0,005 s para período de 6 s, 0,006 s para o período de 7,5 s, e 0,007 s para período de 9 s, 0,008 s para período de 10,5 s e 0,009 s para período 12 s conforme praticado pelos autores André (2010), Teixeira *et al.* (2013) e Didier *et al.* (2016).

4 | Resultados e Discussões

Serão apresentados os resultados dos casos padrões (caso A) e da nova proposta geométrica (caso B). Primeiramente é apresentada a análise do comportamento hidropneumático dos dispositivos CAO's, e também do comportamento hidrodinâmico fora e dentro da câmara da CAO. Por fim são apresentados os resultados da análise do balanço de energia, a fim de definir a eficiência de cada dispositivo CAO analisado.

4.1 Análise do comportamento hidropneumático da CAO

Nesta seção, são analisados os comportamentos hidropneumáticos do dispositivo CAO para os dois casos e, também, o comportamento da pressão do ar e a potência pneumática dentro das câmaras. Para isso, foram tomados como exemplo uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m e câmaras com inclinação de $\theta_2 = 40^\circ$ e $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, correspondentes aos casos A e B (figura 3.1).

A figura 4.1 apresenta os contornos da magnitude de velocidade e linhas de corrente próximos à câmara da CAO para o Caso A ($\theta_2 = 40^\circ$) em nove instantes que completam um período de onda. O instante de tempo ($t = 0$) corresponde ao zero-ascendente da elevação da superfície livre dentro da câmara. Nota-se que, em $t = 0$ as linhas de corrente mostram o escoamento entrando na câmara, como era de se esperar, e a elevação de superfície livre dentro da câmara passa pelo zero-ascendente com um comportamento quase uniforme ao longo do comprimento da câmara. Ainda se observa a presença de *run-up* na parede externa da câmara. Em $t = 2T/8$, o módulo da velocidade dentro da câmara é muito baixo devido ao fato de que a elevação de superfície livre está aproximadamente no seu valor máximo. No entanto, mesmo assim, observa-se a presença de vórtices na parte inferior da superfície interna da parede frontal. Neste instante, a superfície livre na parte externa da parede frontal está na fase inicial de decaimento. No próximo instante ($t = 3T/8$), a velocidade próxima à parede externa e junto à superfície livre atinge o máximo valor de 2,07 m/s. A partir desse instante até $t = 5T/8$, o escoamento está na direção para fora da câmara, em que a elevação de superfície livre dentro da câmara está na sua fase descendente. Observa-se que em $t = 4T/8$ e $t = 5T/8$, que o módulo de velocidade é maior na parte inferior da parede frontal, sendo seus máximos iguais a 1,82 e 1,57 m/s, respectivamente. Em $t = 6T/8$, a elevação da superfície livre dentro da câmara é mínima e, assim, o módulo de velocidade dentro da câmara tem valores baixos (entre 0,05 e 0,50 m/s). Na parte externa inferior da parede frontal observa-se a presença de vórtices. No instante $t = 8T/8$, nota-se um comportamento similar ao do instante $t = 0$, uma vez que é o instante que completa o ciclo analisado.

Observa-se que a amplitude de oscilação da superfície livre dentro da câmara é maior nas proximidades da parede posterior em relação àquela nas proximidades

da parede frontal, caracterizando uma oscilação dentro da câmara (*sloshing*). Na seção 4.3 serão apresentadas as séries temporais de sondas próximas a essas paredes, quantificando essas diferenças.

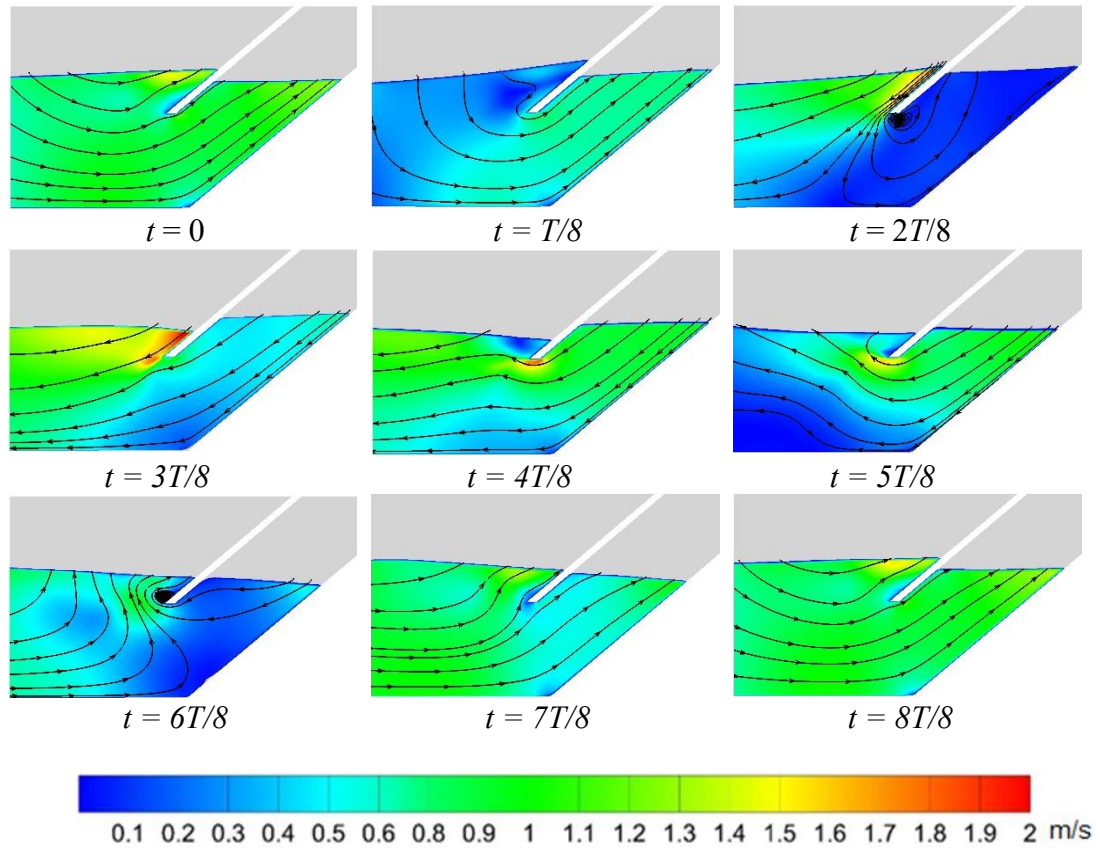


Figura 4.1: Campos do módulo de velocidade e linhas de corrente nas proximidades da câmara da CAO do caso A para uma onda de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.

O comportamento hidropneumático para o caso B $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$ dentro da câmara apresentado na figura 4.2, mostrou-se semelhante com o do caso A, visto que as linhas de corrente seguem um mesmo padrão para os instantes de tempo ao longo do período de onda. As oscilações da superfície livre e as magnitudes de velocidades na parte externa da parede frontal são menos intensas que as do caso A, sendo que os valores máximos do módulo de velocidade registrados de *run-up* em (entre $t = 0$ e $t = 2T/8$) é em torno de $0,63$ m/s e *run-down* em $t = 5T/8$ é de $0,60$ m/s. Os fenômenos de *run-up/down* ficaram mais controlados no caso B devido à inclinação da parede frontal externa ser oposta à da onda incidente, direcionando o fluxo para a abertura submersa da câmara. Os maiores valores do módulo de velocidade foram registrados na parte inferior da parede frontal tendo, nos instantes $t = 4T/8$ e $t = 5T/8$, os valores de $1,88$ e $1,96$ m/s, respectivamente. Vórtices são observados apenas na parte externa inferior da parede frontal no instante $t = 7T/8$.

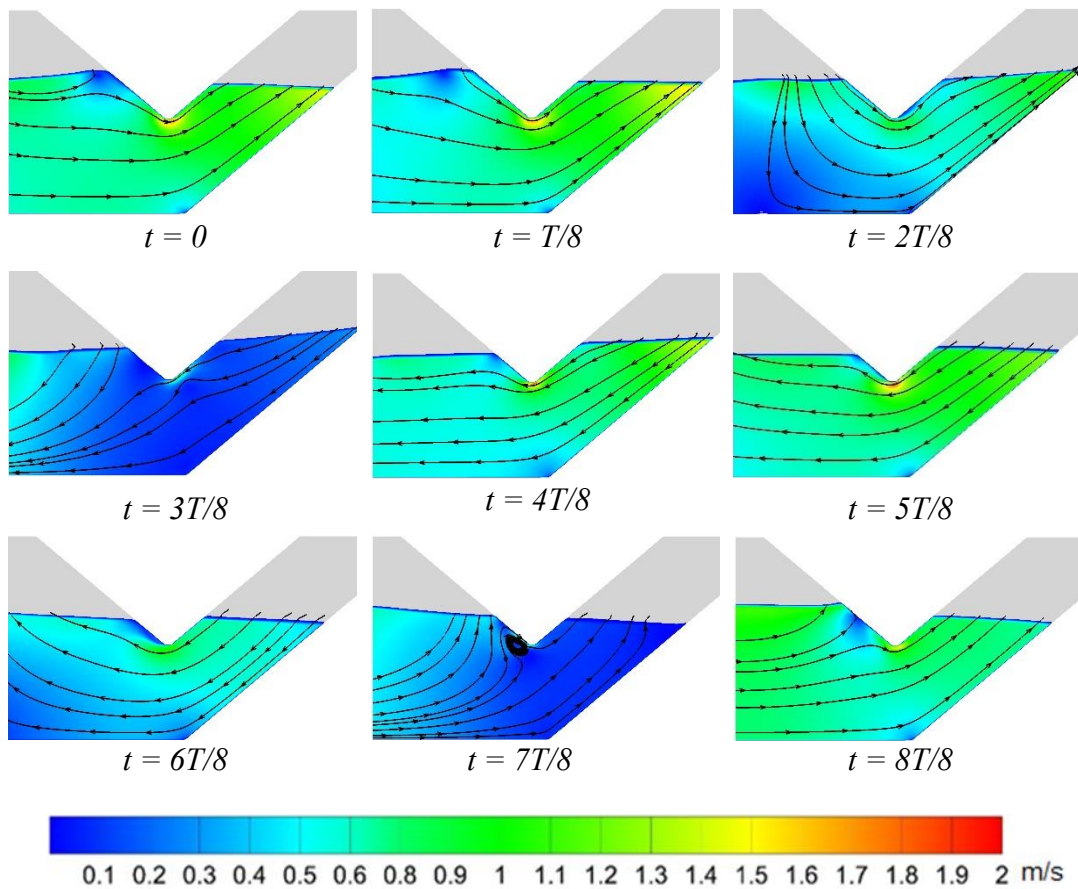


Figura 4.2: Campos do módulo de velocidade e linhas de corrente nas proximidades da câmara da CAO do caso B para uma onda de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m em 9 instantes de tempo ao longo de um período de onda.

4.2 Análise do comportamento hidrodinâmico fora da câmara

Nesta seção, é analisado o comportamento hidrodinâmico fora das câmaras, incluindo o *run-up/down* na parede frontal e o fenômeno de reflexão da onda. A figura 4.3 apresenta as séries temporais da elevação da SL na superfície externa da parede frontal para os casos A e B (onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m).

A figura 4.3b mostra a série temporal em um período de onda com a marcação dos instantes de tempo sincronizados com os das figuras 4.1 e 4.2. Os resultados da altura de elevação da SL são importantes para dimensionar tanto a parte acima do nível de repouso da superfície livre, quanto da imersa da parede frontal. Assim, pode-se prever a possibilidade de galgamento na parte superior da câmara ou a possibilidade de entrada de ar na câmara, se a elevação de superfície livre passar da dimensão da parte imersa da parede frontal. Ressalta-se que a inclinação da parede frontal proposta no caso B é favorável ao impedimento de galgamento, com exceção das geometrias com $\theta_1 = 90^\circ$.

Observa-se claramente que o fenômeno de *run-up/down* no caso A é mais intenso do que no caso B, principalmente em *run-up*, em que a elevação da SL atinge 1,56 m ($t = T/8$), enquanto que o caso B chega a 1,07 m ($t = 0$). O *run-down* no caso A ocorre entre os instantes ($t = 3T/8$ e $t = 4T/8$) sendo de -1,08 m. Já o caso B apresenta maior *run-down* de -0,54 m no instante ($t = 5T/8$). Esses resultados corroboram para a discussão que o caso B apresenta uma menor possibilidade de galgamento e de entrada de ar na câmara.

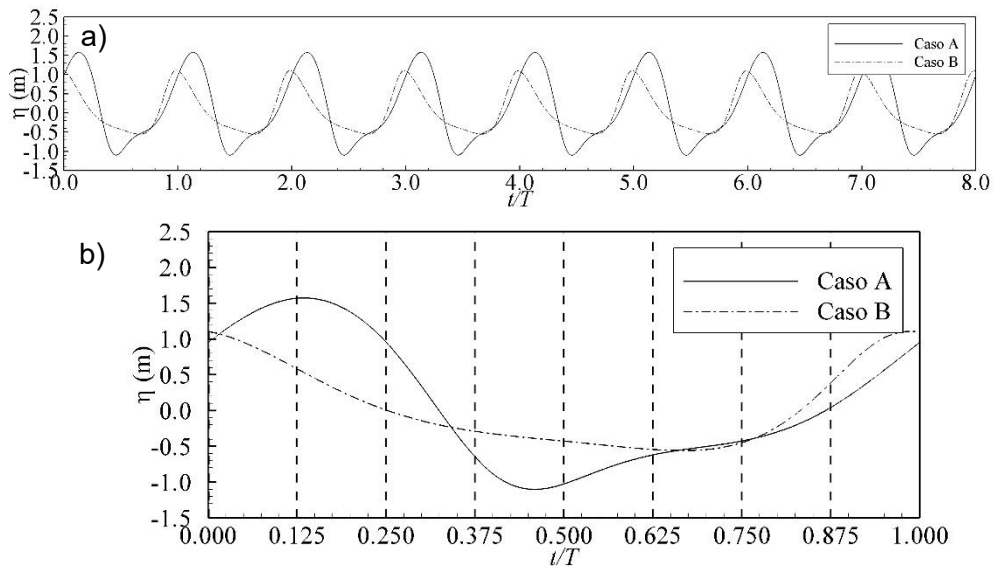


Figura 4.3: Séries temporais da elevação da SL na superfície externa da parede frontal para os casos A e B (inclinações de paredes de 40°) e para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) ao longo de um período de onda.

A figura 4.4 apresenta as alturas de *run-up/down* para diferentes períodos de onda incidente com $H = 1,5$ m e para as geometrias dos casos A e B (inclinações de paredes de 40° , 65° e 90°). No caso A nota-se maiores valores de H_{run} em períodos abaixo de 9 s, principalmente em ângulos das paredes mais inclinados, chegando a 1,92 m e -1,88 m para $\theta_1 = 40^\circ$ e $T = 6$ s.

Nota-se que as geometrias do caso B apresentam maior regularidade de H_{run} ao longo dos períodos de onda. Ainda, a configuração do caso B faz com que as mudanças de inclinação de θ_1 e θ_2 não influenciem significativamente H_{run} .

Comparando os resultados do caso A ($\theta_2 = 40^\circ$) e caso B ($\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$), para todos os períodos, o H_{run} do caso A é maior que no caso B, com exceção do período de onda de 12 s, em que os valores são praticamente iguais sendo aproximadamente (1,0 m e -1,0 m). Dessa maneira, corroborando com o resultado da análise da elevação da SL na superfície externa da parede frontal apresentado anteriormente ($T = 9$ s e $H = 1,5$ m), o caso B apresenta uma menor possibilidade de ocorrência de galgamento e de entrada de ar na câmara.

É importante ressaltar que, para que o estudo de *run-up/down* na parede frontal da câmara tenha contribuição no projeto dessas estruturas, devem ser avaliadas as respostas devido aos diferentes cenários presentes no estado de mar da região onde o dispositivo está instalado, principalmente aos estados de mar extremos.

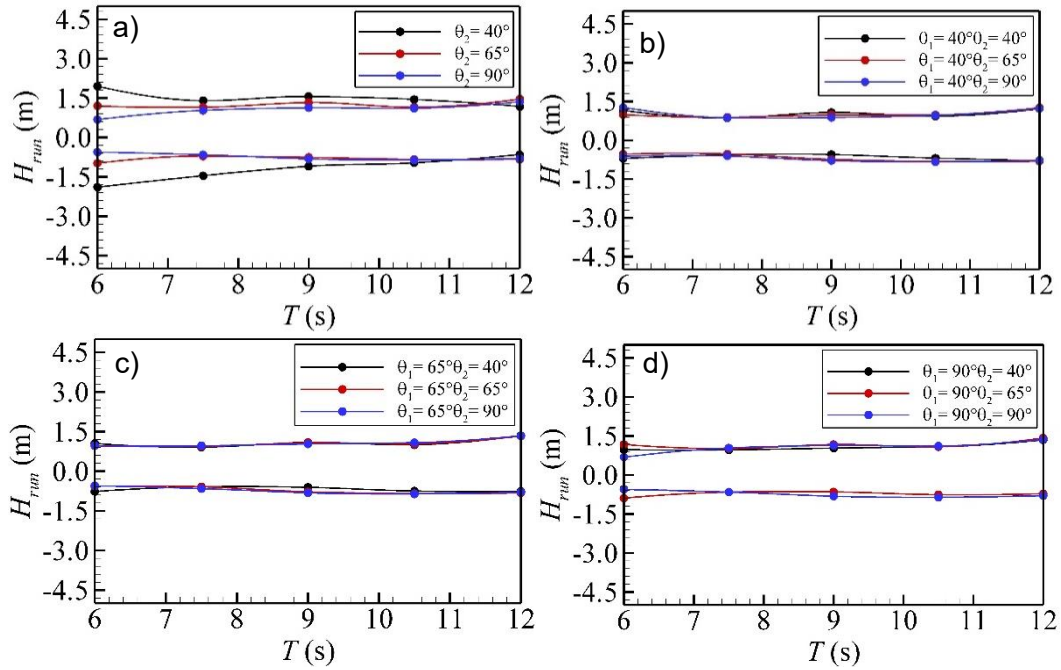


Figura 4.4: Alturas de *run-up/down* ao longo dos períodos de onda incidente ($H = 1,5$ m). (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (c) caso B ($\theta_1 = 65^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$). (d) caso B ($\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$).

A figura 4.5 apresenta as séries temporais das elevações da SL nas três sondas (WP1, WP2, WP3) usadas para determinar o coeficiente de reflexão nos casos A e B. Esses resultados são usados para determinar os coeficientes de reflexão pela separação entre onda incidente e refletida, utilizando o algoritmo descrito por Sousa *et al.* (2011) na obtenção dos dados das sondas.

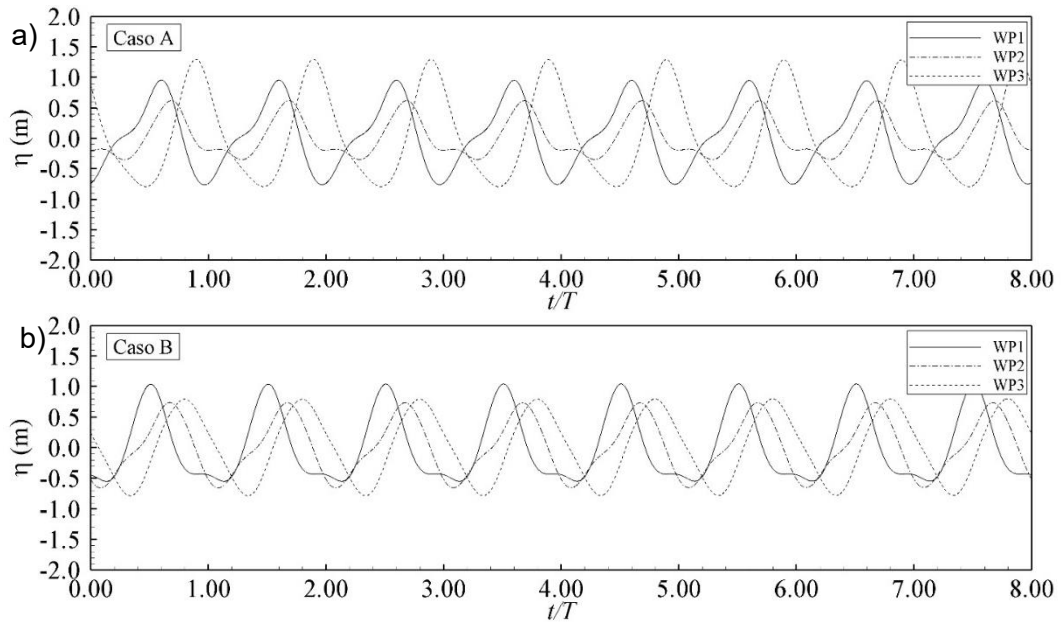


Figura 4.5: Séries temporais da elevação da SL nas sondas WP1, WP2 e WP3 para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) caso A $\theta_2 = 40^\circ$. (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$).

A figura 4.6 mostra as séries temporais das ondas incidente e refletida obtidas pelo modelo para o caso A $\theta_2 = 40^\circ$ e caso B $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$. A elevação da superfície livre da onda refletida do caso A apresenta uma maior não linearidade do que a do caso B. Para os dois casos, a altura imposta pelo batador é $H = 1,5$ m e as alturas da onda refletida são de 0,73 m e 0,37 m para os casos A e B, respectivamente.

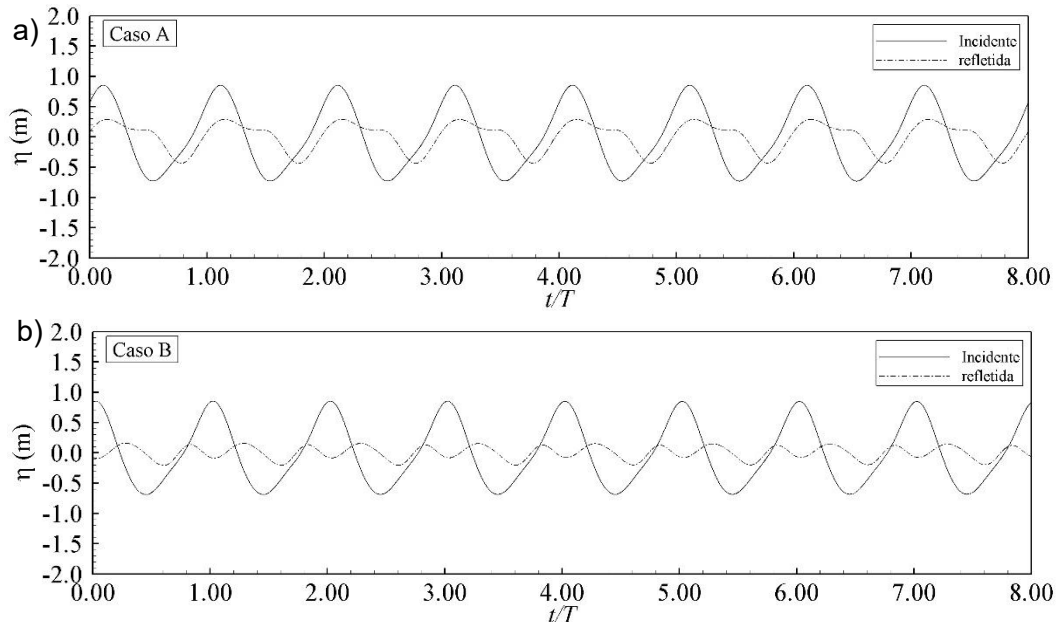


Figura 4.6: Séries temporais das elevações da SL da onda incidente e da onda refletida para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ$). (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$).

A figura 4.7 mostra o coeficiente de reflexão (C_R) em relação ao período da onda incidente para os casos A e B (inclinações da parede frontal de 40° , 65° e 90°). Os resultados mostram diferentes comportamentos de C_R quando $\theta_2 = 40^\circ$. Nestes casos, C_R aumenta com o aumento do período, exceto $T = 6$ s. Também observa-se o comportamento em que C_R tem maiores valores para θ_2 mais verticais, exceto no caso A, onde $\theta_2 = 65^\circ$ tem valores superiores a $\theta_2 = 90^\circ$ em todos os períodos de onda (figura 4.7a).

Analisando somente as geometrias do caso B, nota-se que para $\theta_1 = 40^\circ$ o C_R é elevado para $T = 6$ s (figura 4.7b). Ainda se observa que θ_1 tem influência sobre o C_R , para câmaras com $\theta_2 = 40^\circ$, quando em combinação com θ_1 menos inclinados o C_R em $T = 6$ s tende a diminuir.

Comparando o caso A ($\theta_2 = 40^\circ$) com o caso B ($\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$), nota-se que para períodos acima de aproximadamente 7,5 s os valores dos coeficientes de reflexão para o caso A são de 1,2 a 2 vezes maiores que os coeficientes do caso B. No entanto, para $T = 6$ s, C_R do caso B é maior do que aquele do caso A.

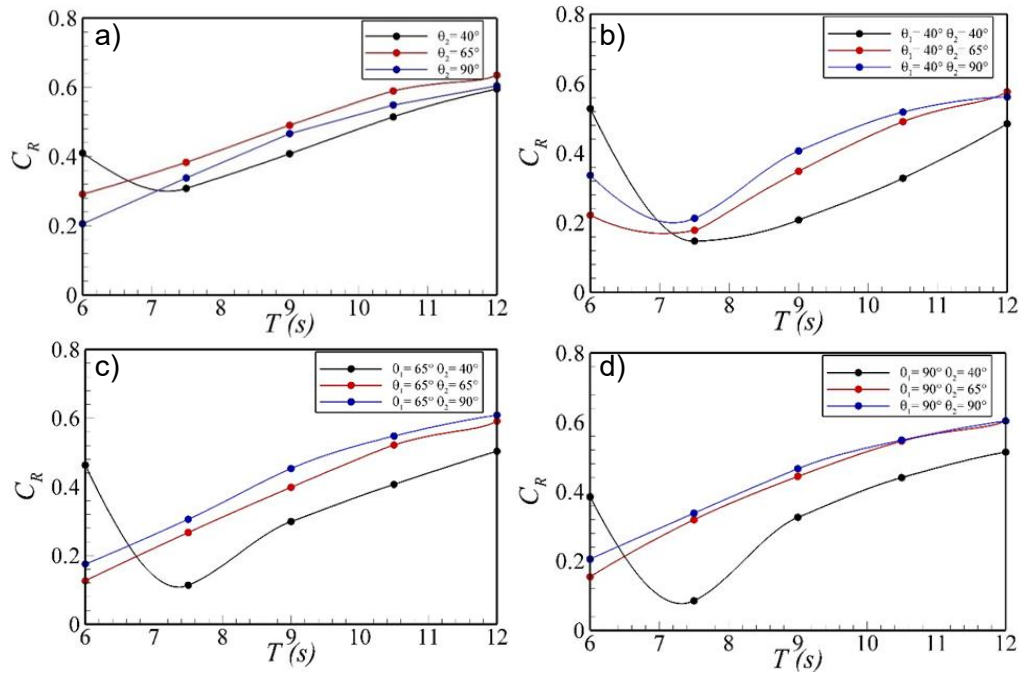


Figura 4.7: Coeficiente de reflexão em relação ao período da onda incidente ao longo dos períodos de onda incidente ($H = 1,5$ m). (a) caso A ($\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (c) caso B ($\theta_1 = 65^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (d) caso B ($\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$).

4.3 Análise do comportamento hidrodinâmico dentro da câmara

Nesta seção, faz-se uma análise do comportamento da elevação da SL dentro da câmara ao longo do tempo para os casos A e B destacados (inclinações das paredes de 40° e onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m), bem como da pressão do ar e da potência disponível para a turbina.

A figura 4.8 mostra as séries temporais da elevação da SL de duas sondas que passam pelas superfícies interiores das paredes frontal (SPA1) e posterior (SPA2) da câmara (ver esquema da figura 3.4). A maior diferença entre as elevações de SL medidas no mesmo instante por essas sondas é definida como parâmetro de *sloshing* (s), conforme Teixeira *et al.* (2013) e Gaspar *et al.* (2020). Tanto no caso A como no caso B, o período fundamental das elevações segue o mesmo período da onda incidente ($T = 9$ s). Para ambos os casos, a sonda SPA2 apresenta uma amplitude de oscilação maior de superfície livre, indicando que a vazão de água que entra e sai da câmara tem uma intensidade maior na parte mais próxima à parede posterior da câmara. Esse fenômeno também pode ser observado nas figuras 4.1 e 4.2, em que a elevação de superfície livre é maior próximo à parede posterior da câmara. Para o caso A, o parâmetro de *sloshing* é definido na sucção ($s = 0,79$ m), enquanto que na compressão a diferença máxima entre elevações de SL foi de 0,54 m. No caso B, o parâmetro de *sloshing* foi definido no estágio de compressão ($s = 1,06$ m), enquanto que na sucção a diferença foi menor (0,32 m).

Levando em conta que a extração de energia nesse dispositivo depende da taxa de variação de volume de ar dentro da câmara, o importante é o que acontece

com a média da elevação da superfície livre ao longo do comprimento da câmara. Portanto, esta oscilação de superfície livre de amplitudes diferentes ao longo do comprimento da câmara não traz benefícios para a eficiência do dispositivo, uma vez que é uma dinâmica que não reverte em energia extraída pela turbina. Assim, espera-se que quanto menor as diferenças de amplitudes de elevação de SL dentro da câmara ao longo do comprimento, mais eficiente pode ser a extração de energia. Nos casos A ($\theta_1 = 40^\circ$) e B ($\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$) para $T = 9$ s, o caso B apresentou um valor de s um pouco maior do que o do caso A, o que representa uma desvantagem neste aspecto. No entanto, este é apenas um fator que influencia na extração de energia do dispositivo e, por isso, é necessária uma análise mais completa do balanço de energia (Seção 4.4) para entender a relevância desse fenômeno na performance global do dispositivo.

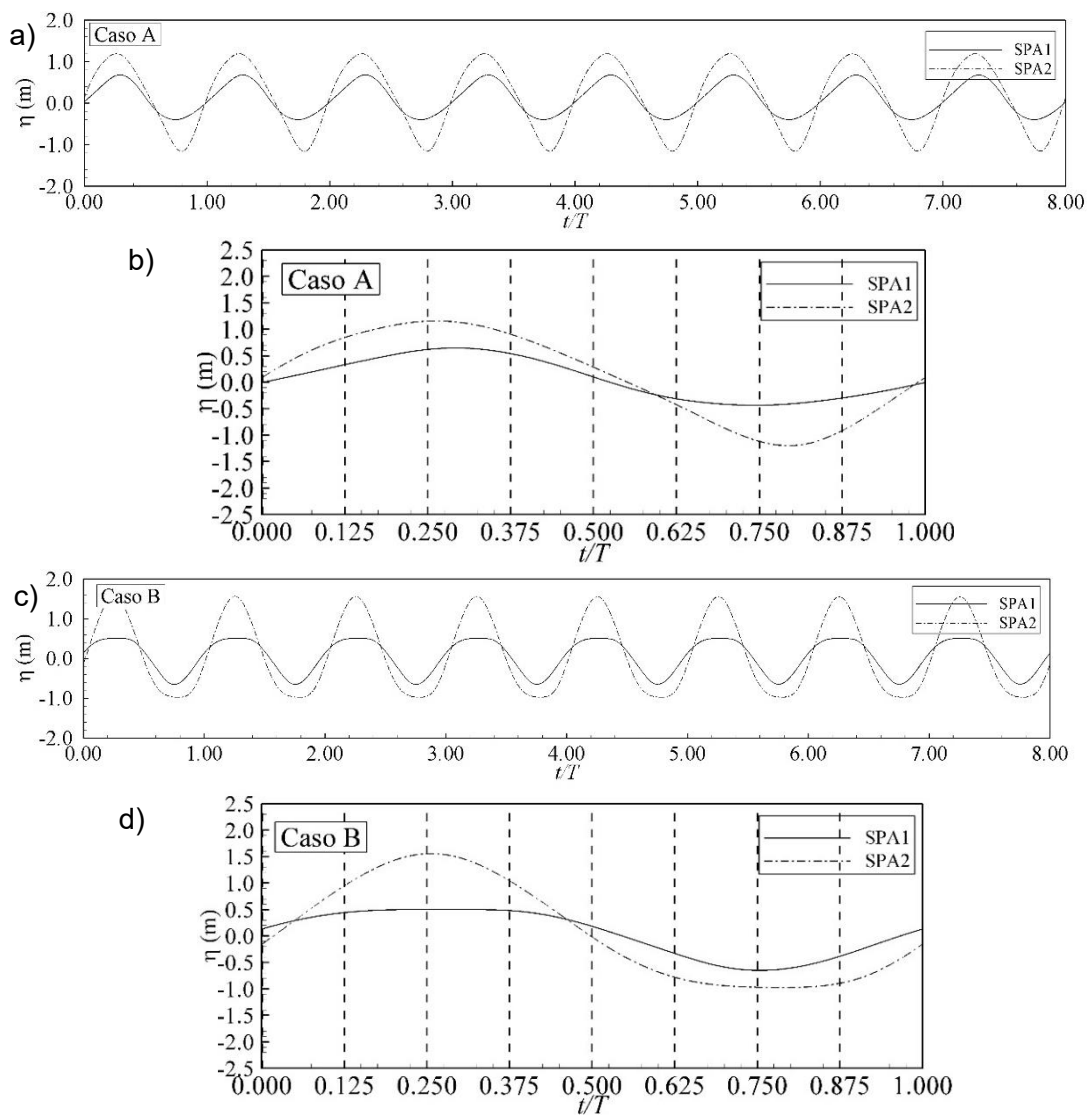


Figura 4.8: Séries temporais da superfície livre de duas sondas dentro da câmara perto da parede frontal SPA1 e perto da parede traseira SPA2 para o caso A e caso B, a onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) e (c) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) e (d) ao longo de um período de onda.

Visto a importância da existência de sloshing dentro da câmara, a figura 4.9 apresenta os parâmetros de *sloshing* para as geometrias do caso A e B (inclinações da parede frontal de 40°, 65° e 90°), ao longo dos períodos de onda analisados nesse trabalho. A primeira observação importante a ser feita é sobre faixa de períodos de onda. Nota-se que o caso B apresenta um s maior do que o do caso A apenas para os períodos de 9 s e 12 s, pois, para os outros períodos, os valores são muito similares.

Para θ_2 diferente de 40°, praticamente não há diferença do parâmetro de *sloshing* entre os casos A e B ao longo dos períodos de onda. Portanto, não se pode concluir que a parede frontal do caso B com $\theta_1 = 40^\circ$ tenha influência significativa no *sloshing* dentro da câmara, pois isso depende tanto do período de onda considerado como de θ_2 .

De maneira geral, nota-se que s diminui com o aumento de θ_2 tanto para o caso A como para o caso B. Por outro lado, o valor de θ_1 tem uma influência pouco significativa sobre s .

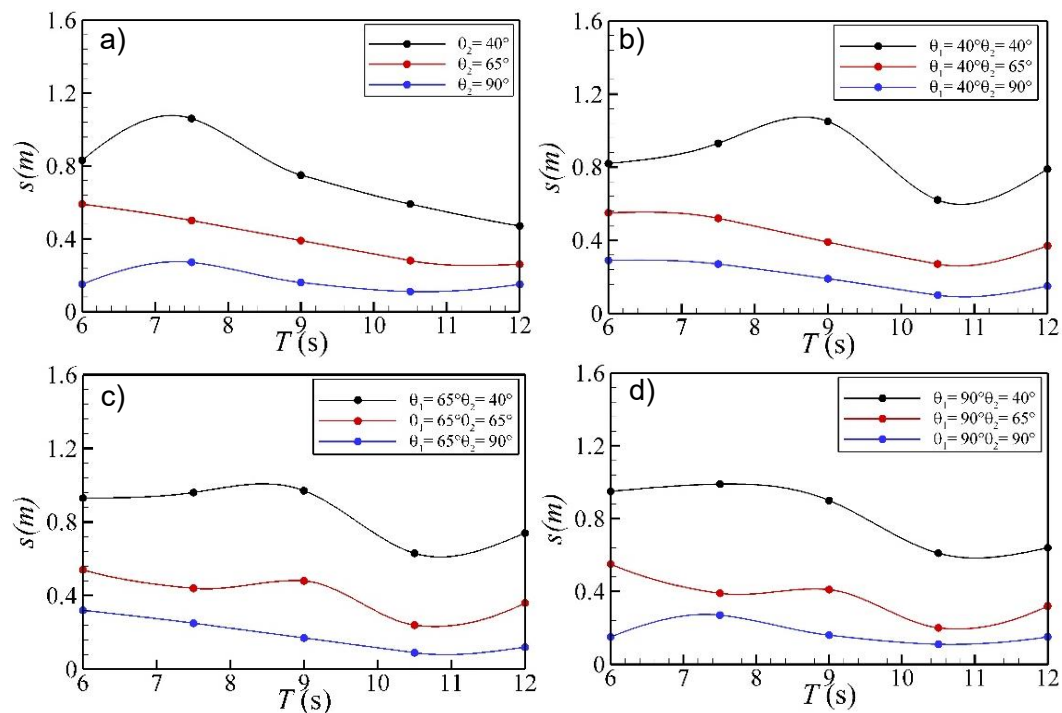


Figura 4.9: *Sloshing* em relação ao longo dos períodos de onda incidente ($H = 1,5$ m). (a) caso A ($\theta_1 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (b) caso B ($\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (c) caso B ($\theta_1 = 65^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$); (d) caso B ($\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ; 65^\circ; 90^\circ$).

As séries temporais da pressão de ar dentro da câmara para os casos A ($\theta_1 = 40^\circ$) e B ($\theta_1 = 40^\circ, \theta_2 = 40^\circ$) são apresentados na (figura 4.10a) e (figura 4.10b) está sincronizada com os instantes de tempo do campo do módulo de velocidade, mostrados nas figuras 4.1 e 4.2. Após a estabilização do escoamento, registram-se pressões máximas (entrada de ar) e mínimas (saída de ar) de 5,99 e -5,62 kPa, respectivamente, para o caso A; e para o caso B são 6,30 e -5,92 kPa, respectivamente.

Nota-se que os picos de pressão para o caso B são em torno de 5% maiores que os do caso A, que permite inferir que a inclinação da parede frontal voltada para o sentido contrário daquele da onda incidente no caso B fez aumentar a oscilação de pressão dentro da câmara.

Outra observação é de que, para os dois casos analisados, as pressões máximas são maiores que as pressões mínimas, devido à diferença de comportamento hidrodinâmico durante a entrada do escoamento dentro da câmara em relação ao da sua saída.

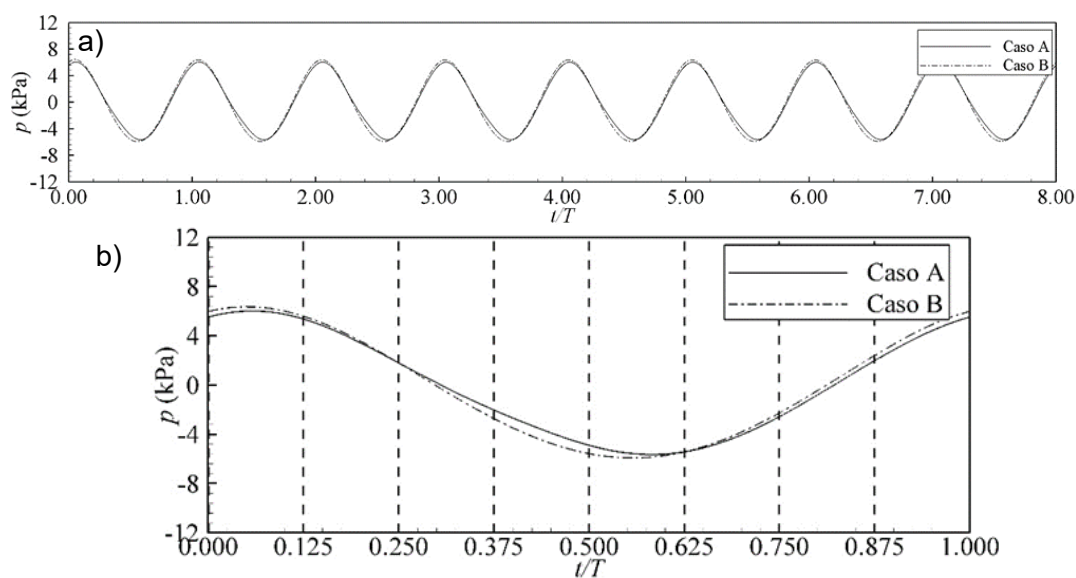


Figura 4.10: Séries temporais da pressão de ar dentro da câmara para os casos A e B (inclinações de paredes de 40°) e para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) ao longo de um período de onda.

A figura 4.11 mostra as séries temporais da potência pneumática para os casos A e B. Os valores máximo e mínimo de potência para o caso A são de 714,18 e 638,81 kW, respectivamente, enquanto que para o caso B são 803,10 e 693,98 kW, respectivamente.

Portanto, o caso B apresenta picos de potência maiores que os do caso A. Observa-se que há diferenças de potência entre os estágios de compressão (entrada de ar) e de sucção (saída de ar) dentro da câmara. Este fato está relacionado aos comportamentos da pressão de ar dentro da câmara observados na figura 4.10, uma vez que a potência tem uma relação quadrática com a pressão no caso da turbina Wells.

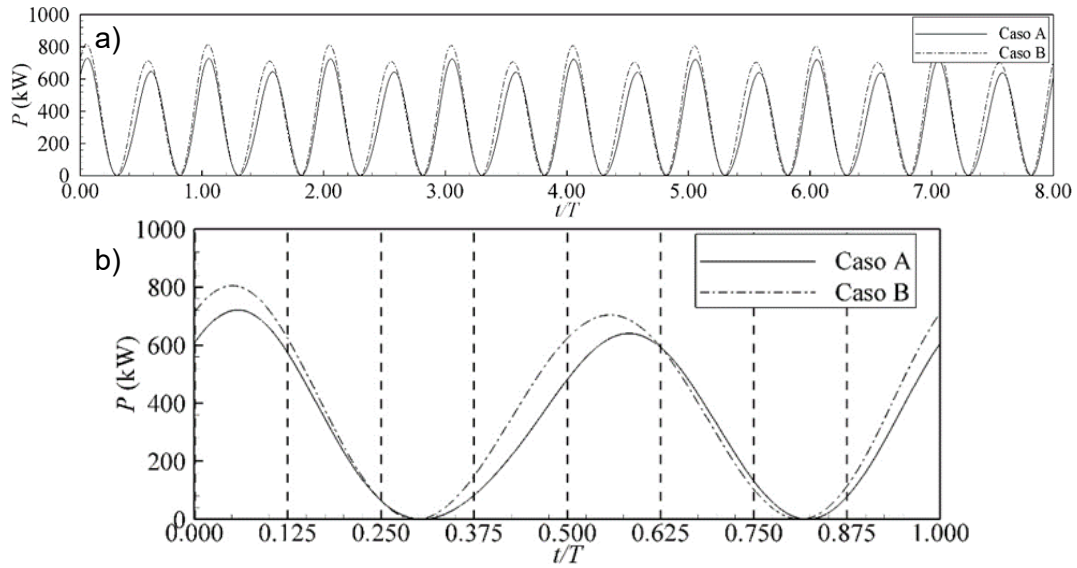


Figura 4.11: Séries temporais da potência pneumática para os casos A e B (inclinações de paredes de 40°) e para uma onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m. (a) ao longo de 8 ciclos de onda; (b) ao longo de um período de onda.

4.4 Balanço de energia no dispositivo CAO

Nesta Seção, se faz uma análise do balanço de energia no dispositivo CAO com o intuito de entender melhor a influência de cada parcela de energia na eficiência dos dispositivos. É apresentada a parcela de energia EE/EI , que corresponde à porcentagem de energia extraída em relação à energia incidente da onda, sendo, portanto, a parcela de energia disponível para a captação por parte da turbina, considerada, neste trabalho, como a eficiência do dispositivo. ER/EI é a porcentagem de energia refletida pelo dispositivo. EL/EI é a porcentagem de energia perdida durante o processo por viscosidade e turbulência.

A figura 4.12 mostra EE/EI , ER/EI e EL/EI versus período de onda para câmaras com diferentes inclinações de parede para o caso A. Na figura 4.12(a) são apresentados os valores de EE/EI , sendo a maior porcentagem de 65% em $T = 9$ s para $\theta_2 = 40^\circ$. Nota-se uma tendência de menores EE/EI para períodos extremos ($T = 6$ e 12 s), sendo que em $\theta_2 = 40^\circ$, tem os menores valores para esses períodos 20% para $T = 6$ s e 30% para $T = 12$ s.

Assim, a parede de inclinação 40° apresenta melhor EE/EI em períodos intermediários, enquanto declives de 90° atingem o menor. Portanto, a principal desvantagem da inclinação de 40° é o menor EE/EI em $T = 6$ e 12 s. O caso com $\theta_2 = 52^\circ$ tem EE/EI menor do que aquele com $\theta_2 = 40^\circ$ nos períodos de 9 a 10,5 s; entretanto, em outros períodos EE/EI é maior que $\theta_2 = 40^\circ$. Por essas razões, o caso com $\theta_2 = 52^\circ$ é uma opção que pode ser considerada.

Em geral, as figuras 4.12(b) e 4.12(c) mostram que a energia refletida aumenta com o aumento do período da onda e o inverso ocorre com as perdas de

energia. Esse comportamento é esperado, pois nos casos em que ER/EI é menor, mais energia interage com o dispositivo e, conseqüentemente, ocorre maior dissipação de energia devido à viscosidade e turbulência e, por conseqüência, maior EL/EE . Particularmente no caso de $\theta_2 = 40^\circ$, é possível perceber que o principal motivo da redução de EE/EI em $T = 6$ s e 12 s é o aumento de EL/EI .

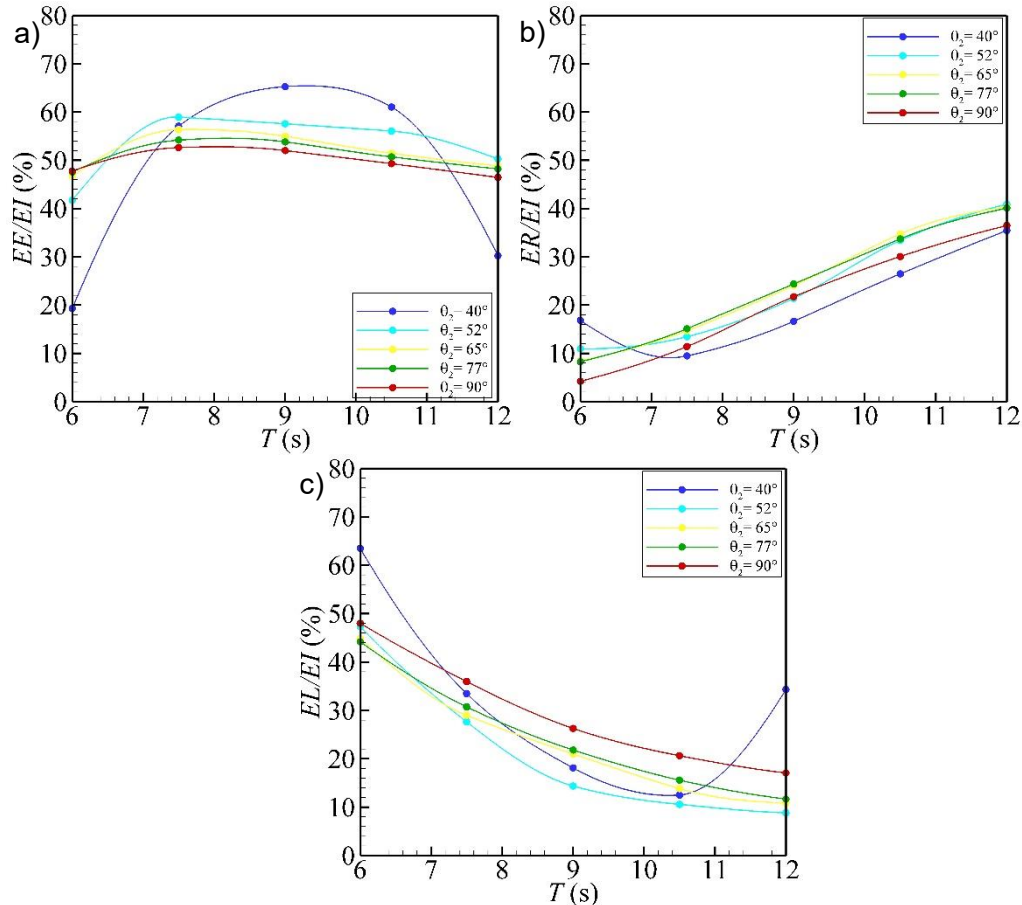


Figura 4.12: Relação entre a energia das ondas versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede para o caso A. (a) energia extraída (EE/EI); (b) energia refletida (ER/EI); (c) perdas de energia (EL/EI).

A figura 4.13 mostra EE/EI versus T para câmaras com diferentes inclinações de parede para ambos os casos A e B. As principais observações sobre o comportamento de EE/EI para o caso B são:

a) Influência de θ_1 : Em geral, o aumento de θ_1 diminui a eficiência do dispositivo. Portanto, na faixa de θ_1 testada neste estudo, o uso de uma inclinação da parede frontal de $\theta_1 = 40^\circ$ é recomendada. As diferenças máximas ocorrem entre $\theta_1 = 40^\circ$ e 90° na maioria dos períodos de onda, que são em média 10%.

b) Influência de T : Em geral, EE/EI do caso B tem o mesmo comportamento do caso A em relação ao período de onda; os maiores valores de EE/EI ocorrem entre $T = 7,5$ s e 9 s (máximo $EE/EI = 74\%$ para $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$ em $T = 9$ s). Os menores valores de EE/EI ocorrem no limite da faixa de período, ou seja, $T = 6$ s e 12 s (mínimo $EE/EI = 35\%$ para $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$ em $T = 6$ s).

c) Influência de θ_2 : Em geral, EE/EI diminuem ligeiramente com o aumento da inclinação da parede posterior θ_2 , exceto em $T = 6$ e 12 s. Além disso, os valores de EE/EI são mais uniformes em relação ao período de onda com o aumento de θ_2 , como observado no caso A. O caso com $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$ tem a diferença máxima de EE/EI ao longo do período da onda, isso ocorre entre $T = 6$ s e 9 s (111%). O caso com $\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 90^\circ$ (no qual o caso B coincide com o caso A) tem a diferença mínima de EE/EI ao longo do período da onda, ou seja, 13% entre $T = 7,5$ e 12 s. Embora o caso com $\theta_1 = 90^\circ$ e $\theta_2 = 90^\circ$ não tenha o maior EE/EI , tem um comportamento mais uniforme ao longo do período de onda, o que pode ser uma vantagem em situações práticas, uma vez que o mar tem um comportamento aleatório em que a onda possui energia distribuída em um espectro de frequências.

A análise do comportamento energético permite entender as razões das diferenças entre os resultados do caso B e os do caso A. A figura 4.14 mostra ER/EI versus período de onda para todos os casos. Em geral, de $T = 7,5$ a 12 s, ER/EI aumenta com o aumento do período de onda para todos os casos. Pode-se observar que o principal motivo das diferenças entre os casos B e A são a diminuição da ER/EI na faixa dos períodos das ondas, exceto em $T = 6$ s.

Além disso, as diferenças de ER/EI do caso B em relação ao caso A diminuem com o aumento de θ_2 . Para $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$ em $T = 9$ s, por exemplo, ER/EI do caso A e B são 17% e 4%, respectivamente, enquanto para $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 90^\circ$ em $T = 9$ s, ER/EI do caso A e B são 22% e 16%, respectivamente.

As perdas de energia têm comportamento diferente da energia refletida, conforme mostrado na figura (4.15). Em geral, EL/EI diminui com o aumento do período de onda. Os valores de EL/EI do caso B são maiores que os do caso A, exceto em $T = 6$ s e 12 s para $\theta_2 = 40^\circ$.

No entanto, essas diferenças diminuem com o aumento de θ_2 . Considerando os mesmos exemplos anteriores em $T = 9$ s, EL/EI do caso A e B com $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 40^\circ$ são 18% e 21%, respectivamente, e EL/EI dos casos com $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 90^\circ$ são praticamente iguais, em torno de 26%.

As análises de ER/EI e EL/EI permitem concluir que a diminuição do efeito da reflexão da onda causada pela parede frontal proposta no caso B é mais significativa do que o aumento das perdas de energia. Isso resulta em um aumento da eficiência do dispositivo CAO.

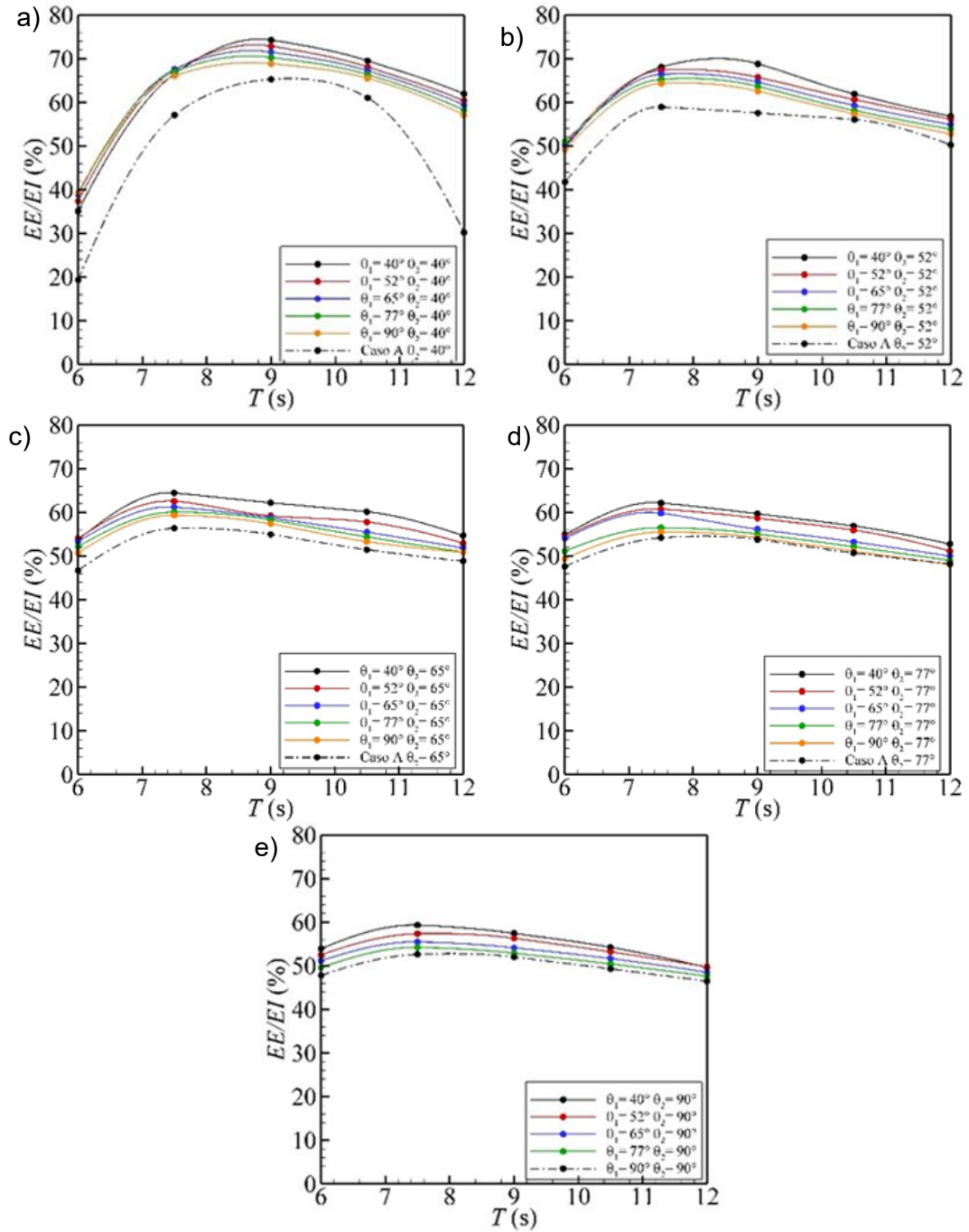


Figura 4.13: Energia extraída relacionada à energia das ondas (EE/EI) versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede. (a) $\theta_2 = 40^\circ$; (b) $\theta_2 = 52^\circ$; (c) $\theta_2 = 65^\circ$; (d) $\theta_2 = 77^\circ$; (e) $\theta_2 = 90^\circ$.

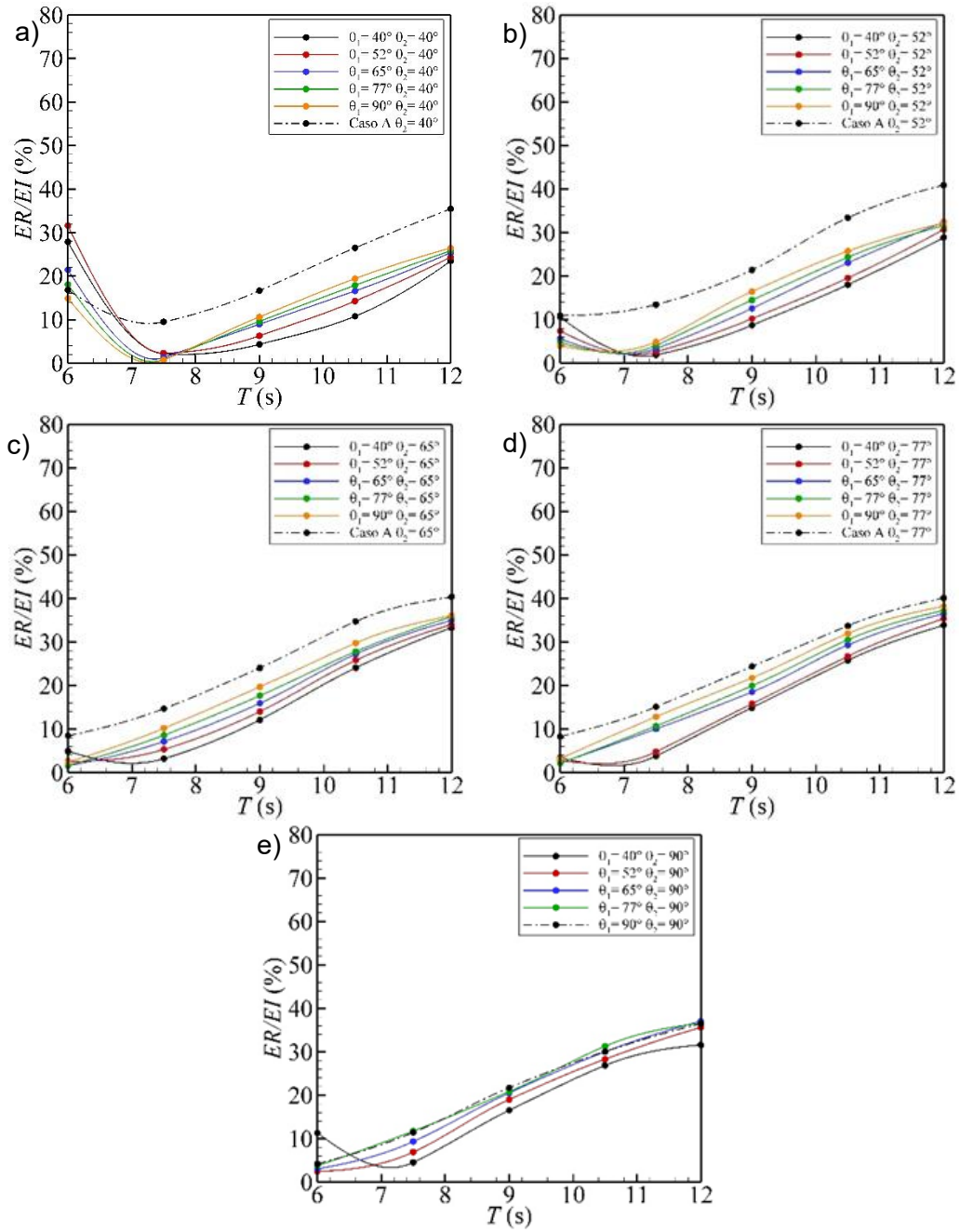


Figura 4.14: Energia refletida relacionada à energia das ondas (ER/EI) versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede. (a) $\theta_2 = 40^\circ$; (b) $\theta_2 = 52^\circ$; (c) $\theta_2 = 65^\circ$; (d) $\theta_2 = 77^\circ$; (e) $\theta_2 = 90^\circ$.

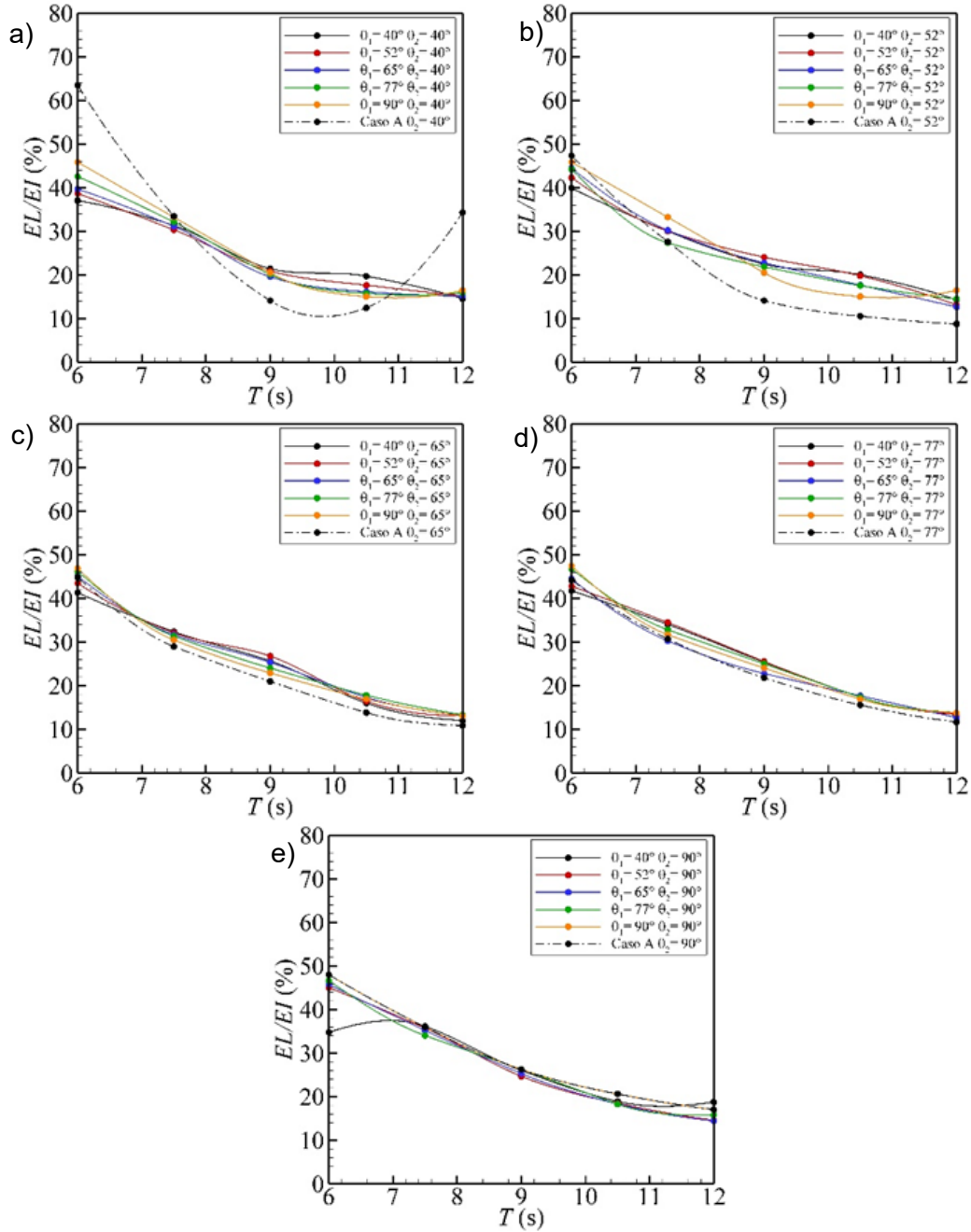


Figura 4.15: Perdas de energia relacionadas à energia das ondas (EL/EI) versus período das ondas para câmaras com diferentes inclinações de parede. (a) $\theta_2 = 40^\circ$; (b) $\theta_2 = 52^\circ$; (c) $\theta_2 = 65^\circ$; (d) $\theta_2 = 77^\circ$; (e) $\theta_2 = 90^\circ$.

As análises de EE/EI do caso B, anteriormente mostraram que $\theta_1 = 40^\circ$ apresentou melhores resultados de eficiência na maioria dos casos. Então para escolher a melhor geometria dos casos B que apresenta o melhor desempenho a figura 4.16 (a) apresenta o EE/EI de todos os casos B com $\theta_1 = 40^\circ$. O caso $\theta_2 = 40^\circ$ tem o maior EE/EI para períodos de onda maiores que $T = 7,5$ s ($\theta_2 = 52^\circ$ tem praticamente o mesmo valor em $T = 7,5$ s). Em $T = 6$ s, $\theta_2 = 40^\circ$ mostra o menor valor de EE/EI (35%) e $\theta_2 = 52^\circ$ o segundo menor (50%); porcentagem

próxima das outras inclinações de parede (cerca de 54%). Portanto, os casos com melhor desempenho são aqueles que apresentam $\theta_1 = 40^\circ$ e θ_2 entre 40° e 52° . A melhor solução única depende das características do estado do mar da região em que o dispositivo CAO será instalado.

Um ponto importante da discussão é sobre a comparação de EE/EI do caso B, que é a proposta da CAO, e os casos padrões (caso A). Em geral, EE/EI do caso B é maior que o do caso A para todos os valores de θ_1 , com porcentagens bem superiores em $\theta_1 = 40^\circ$. A figura 4.16 (b) apresenta uma comparação de EE/EI dos melhores resultados das geometrias dos casos A e B. Considerando $\theta_2 = 40^\circ$, na faixa de ressonância (períodos de onda de 7,5 e 9 s), as diferenças são de 10 a 20%, enquanto essas diferenças são de 7 a 105% nos períodos de onda nos limites da faixa de períodos ($T = 6$ e 12 s). No caso de $\theta_2 = 52^\circ$, as diferenças ao longo da faixa de períodos de onda são de 14 a 19%. Portanto, em ambas as inclinações da parede traseira ($\theta_2 = 40^\circ$ e 52°), a proposta do caso B tem melhor desempenho do que o caso A.

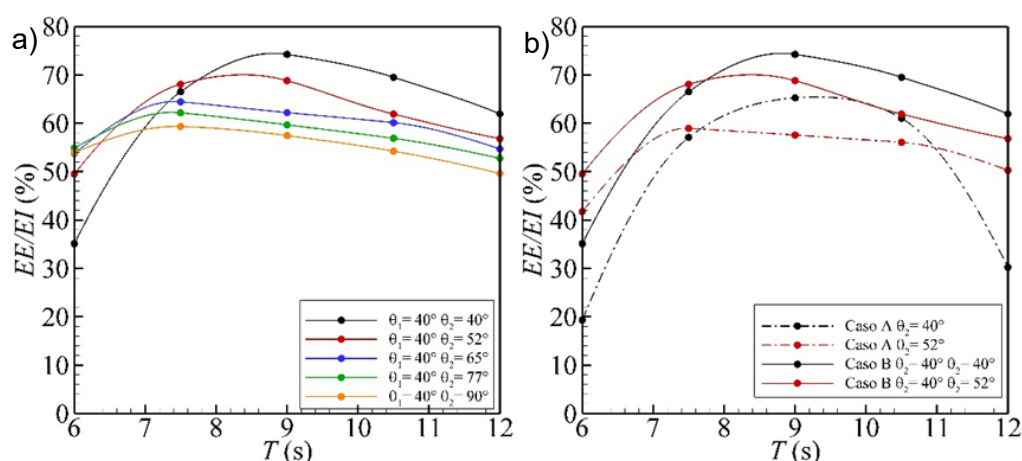


Figura 4.16: Energia extraída relacionada à energia da onda (EE/EI) versus período da onda (a) para as câmaras do caso B com $\theta_1 = 40^\circ$ e (b) para os melhores resultados dos casos A e B.

5 | Conclusões

Neste trabalho, realizou-se 145 simulações numéricas usando o modelo FLUENT, baseado nas equações RANS, considerando períodos de onda incidente $T = 6, 7,5, 9, 10,5$ e 12 s e $H = 1,5$ m em um dispositivo CAO com geometrias diferentes da câmara (casos A e B) e com uma turbina Wells ($k_t = 100$ Pa.s/m³). Foram analisadas a altura média da SL no CAO, o *run up/run down* sobre a parede frontal dos dispositivos, o *sloshing* dentro da câmara do dispositivo, a reflexão da onda e o balanço de energia do dispositivo CAO.

Na análise do comportamento hidropneumático da CAO, considerando os casos com inclinações de paredes de 40° e onda incidente de $T = 9$ s e $H = 1,5$ m, observou-se um comportamento mais suave do campo de velocidades para o caso B, devido às diferenças de inclinação da parede frontal da câmara.

Na superfície externa da parede frontal, notou-se que o fenômeno de *run-up/down* é bem mais intenso para o caso A, como era de se esperar, em função da inclinação bem mais favorável ao movimento da superfície livre ao longo da parede. Sendo está uma vantagem importante para o caso B em relação ao galgamento e à profundidade submersa das restrições da parede frontal. O caso A apresentou uma reflexão de onda maior do que a do caso B, com exceção para o período de onda incidente de 6 s. Esse fato infere que a quantidade de energia das ondas incidentes que entram na câmara da CAO dos casos B são maiores do que do caso A. Para as câmaras com $\theta_2 = 40^\circ$ o *sloshing* dentro da câmara teve uma significativa variação de comportamento ao longo do período da onda, mas, para outros casos, o parâmetro de *sloshing* (s) diminuiu com o aumento de θ_2 , enquanto que o valor de θ_1 tem uma influência pouco significativa sobre s .

Os resultados dos balanços de energia dos dispositivos CAO mostraram que, na maioria dos casos, a menor perda de energia encontrada no caso B se deve pela sua menor parcela de energia de onda refletida (ER/EI) em relação à do caso A. Além disso, tanto para o caso A como para o B, observou-se que $\theta_2 = 40^\circ$ e 52° são os mais eficientes. Especificamente para o caso B, $\theta_1 = 40^\circ$ mostrou o melhor desempenho. Em ambas as inclinações da parede, $\theta_2 = 40^\circ$ e 52° , o caso B mostrou melhor desempenho do que o caso A. Para $\theta_2 = 40^\circ$, as diferenças podem variar de 7% ($T = 6$ s) a 105% ($T = 12$ s) e no caso de $\theta_2 = 52^\circ$, as diferenças ao longo da faixa de períodos de onda são de 14 a 19%. Portanto, a maior eficiência da CAO proposta em relação ao padrão o habilita como uma opção muito boa para ser utilizada no projeto de planta CAO. No entanto, os ângulos de inclinação das partes externa e interna da parede frontal devem ser escolhidos de acordo com as características do estado do mar da região em que o dispositivo CAO será instalado.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja avaliada a performance do dispositivo CAO proposto em regiões costeiras com potencial para extração de energia das ondas, especialmente na região da costa do Rio Grande do Sul, cujo levantamento das características do estado de mar foi realizado por Lisboa (2016). A investigação deve ser ampliada para se obter as características ótimas da turbina a

ser instalada no dispositivo, usando as metodologias desenvolvidas por Torres *et al.* (2018) e aplicadas por Lisboa *et al.* (2018).

A forma da parede frontal do dispositivo proposto impõe desafios para o seu projeto estrutural e sua construção. Por esta razão, sugere-se também que futuramente seja realizada uma análise estrutural das paredes da CAO.

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.
- Assis, L. E., A. Beluco e L. E. B. Almeida (2013). “Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 18, n. 3, pp. 21-29, jul./set.
- Atkins, P.W. (2008). *Físico-Química*; vol. 1, 8ª ed. LTC Editora.
- Bejan, A. (2000). “Shape and Structure, from Engineering to Nature”. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bouali, B. e S. Larbi (2013). “Contribution to the Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter”. Em: *Terra Green 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment*, *Energy Procedia*, v. 36, pp. 565-573.
- Brito-Melo, A. (2000). “Modelação e pré-dimensionamento de centrais de coluna de água oscilante: aplicação à central de energia das ondas do Pico, Açores”. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, École Centrale de Nantes.
- Brooke, J., Bhattacharyya, R. e McCormick, M.E. (2003). “Wave Energy Conversion”. Em: *Ocean Engineering*, Elsevier vol. 6.
- Chakrabarti, S. K. (2005). “Handbook of offshore engineering”, vol.1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, p. 661.
- Conde, J. M. P., P. R. F. Teixeira, e E. Didier (2011). “Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter: comparison of two numerical codes” Em: *Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, pp. 688-674.
- Costa, P. R. (2004). “Energia das Ondas do Mar para Geração de Eletricidade”. Dissertação de mestrado, programa de engenharia oceânica, COPPE. Rio de Janeiro.
- Costa, R. S., F. J. L. D. Lima, R. Rüther, S. L. D. Abreu, G. M. Tiepolo, S. V. Pereira e J. G. D. Souza (2017). “Atlas Brasileiro de Energia Solar”. 2ª ed.: IN-PE. São José dos Campos – São Paulo.
- COPPE/UFRJ e SEAHORSE WAVE ENERGY (20132). Grupo de energias renováveis do mar – laboratório de tecnologia submarina. Fontes de energia renovável do mar: Panorama no Brasil. Material preparado para a EPE.
- Cruz, J. M. B. P. e Sarmento, A. J. N. A. (2004). “Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais”. Instituto do Ambiente, Amadora. 61p.
- Dean, R. G. e R. A. Dalrymple (2000). “Water wave mechanics for engineers and scientists”. First Published in 1984 by Prentice Hall, Inc. World scientific publishing Co. Pte. Ltd., London.
- Delaure, Y. e A. Lewis (2003). “3D hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods”. Em: *Ocean Engineering*, v. 30, pp. 309-30.
- Dias, J., A. Mendonça, E. Didier, M. G. Neves, J. M. P. Conde e P. R. F. Teixeira, (2015). “Application of URANS-VOF models in hydrodynamics study of oscil-

- lating water column”. Em: Proceedings of SCACR2015 - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Florence, Italy.
- Didier, E., J. M. P. Conde e P. R. F. Teixeira (2011). “Numerical simulation of an oscillation water column wave energy converter with and without damping”. Em: Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Lisbon, p. 206-217.
- Didier, E., P. R. F. Teixeira e M. G. Neves (2016). “A 3D Numerical Wave Tank for Coastal Engineering Studies”. Defect and Diffusion Forum, v. 372, pp. 1-10.
- Edenhofer, O., R. P. Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer e C. Von stechow (2012). “IPCC Special Report on Renewable Energy”. Em: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Elhanafi, A., A. Fleming, G. Macfarlane e Z Leong (2016). “Numerical energy balance analysis for an onshore oscillating water column wave energy converter”. Em: Energy, v. 116, pp. 539-557.
- Estefen, S. F., A. C. Fernandes e P. T. Esperança (2003). “Energia das ondas”. Em: Tolmasquim, M. T. (Org.) Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência.
- Evans, D. V. e R. Porter (1995). “Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device”. Applied Ocean Research, v. 17, pp. 155-164.
- Evans, D. V. (1982). “Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions”. Em: journal fluid mechanics., v. 114, p. 481-99.
- Falcão, A. F. (2002). “Control of an oscillating-water-column wave power plant for maximum energy production”. Applied Ocean Research, v. 24, n. 2, pp. 73-82.
- Falcão, A. F. (2010). “Wave energy utilization: A review of the technologies”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 14, pp. 899-918.
- Falcão, A., J. Henriques (2016). “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines” A review. Renewable Energy, v. 85, pp. 1391-1424.
- Fleming, A., I. Penesis, G. Macfarlane, N. Bose e T. Deniss (2012). “Energy balance analysis for an oscillating water column wave energy converter”. Em: Ocean Engineering, v. 54, pp. 26-33.
- Fluent (2007). Fluent — User’s guide. 6.3.16. ANSYS Inc.
- Folley, M. e T. Whittaker (2002). “Identification of non-linear flow characteristics of the LIMPET shoreline OWC”. Em: Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan.
- Garrison, T. (2009). “Essentials of Oceanography”. Orange Coast College, University of Southern California, 5 ed.
- Gaspar, A. L., P. R. F Teixeira e E. Didier (2000). “Numerical analysis of the performance of two onshore oscillating water column wave energy converters at different chamber wall slopes”. Em: Ocean Engineering, v. 201, pp. 107-119.
- Gonçalves R.A.A.C., P.R.F. Teixeira, E. Didier e F.R. Torres, (2020). “Numerical analysis of the influence of air compressibility effects on an Oscillating Water Column wave energy converter chamber”. Em: Renewable Energy, v. 153, pp. 1183-1193.

- Gomes, V. F. (1981). “Espraçamento de Ondas Regulares sobre Taludes de Obras, Marítimas”. Dissertação de Doutorado em Hidráulica Aplicada, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Gomes, M. das N., L. F., E Cassel, D dos Santos, L. A. Isoldi e L. A. O. Rocha. (2017). “Análise geométrica de dois graus de liberdade de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante na forma trapezoidal”. Em: *Revista Brasileira de Energia Renováveis*, v. 6, pp. 567-585.
- Hearn, C. (2008). “The Dynamics of Coastal Models”. Cambridge University Press.
- Hong, K., S. H. Shin, D. C. Hong, H. S. Choi e S. W. Hong (2007). “Effects of Shape Parameters of OWC Chamber in Wave Energy Absorption”. Em: *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, ISOPE, pp. 428-433.
- Horko, M. (2007). “CFD Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter”. University of Western Australia.
- Ibarra-Berastegi, G., J. Sáenz, A. Ulazia, P. Serras, G. Esnaola e C. Garcia-Soto (2018). “Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014–2016)”. *Ocean Engineering*, v. 147, pp. 20-29.
- Josset, C. e A. Clement (2007). “A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants”. Em: *Renew. Energy*; v. 32, pp. 1379-402.
- Lagoun, M. S., A. Benalia e M. E. H. Benbouzid (2010). “Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status”. Em: *International Energy Conference, IEEE 2010*. Manama, Bahrain, pp. 636-641.
- Lesieur, M. (1996). “Turbulence in Fluids”. Kluwer Academic Publishers, Londres.
- Letzow, M., G. Lorenzini, D. V. E. Barbosa, R. G. Hübner, L. A. O. Rocha, M. D. N. Gomes, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos (2020). “Numerical Analysis of the Influence of Geometry on a Large Scale Onshore Oscillating Water Column Device with Associated Seabed Ramp”. Em: *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, v. 15, pp. 873-884.
- Lima, Y. T. B., M. D. N. Gomes, C. F. Cardozo, L. A. Isoldi, E. D. dos Santos, e L. A. O. Rocha (2019). “Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hidropneumatic Chamber”. Em: *Defect and Diffusion Forum*, v. 396, pp. 22-31.
- Lisboa, R. C. (2016). “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.
- Lisboa R. C., P. R. F. Teixeira, F. R. Torres e E. Didier (2018). “Numerical evaluation of the power output of an oscillating water column wave energy converter installed in the Southern Brazilian coast”. Em: *Energy*, v. 162, pp. 1115-1124.
- Liu, Z., B. Hyun, K. Hong e Y. Lee (2009). “Investigation on integrated system of chamber and turbine for OWC wave energy convertor”. Em: *Proceedings of the nineteenth international Offshore and Polar engineering conference*, Osaka.

- Magagna, D. e A. Uihlein (2015). "Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives". Em: *International Journal Of Marine Energy*, [s.l.], v. 11, pp. 84-104, set. 2015.
- Mansard, E. P. D. e E. R. Funke. (1980). "The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a least Squares Method". *Coastal engineering*, cap. 8.
- McCormick, M. E. (1973). "Ocean Engineering Mechanics with applications". Cambridge University
- Mendonça, A., J. Dias, E. Didier, C. J. E. M. Fortes, M. G. Neves, M. T. Reis, J. M. P. Conde, P. Poseiro e P. R. F., Teixeira (2017). "An integrated tool for modelling OWCWECs in vertical breakwaters: preliminary developments". Em: *J. Hydro-environ. Res.* ISSN: pp. 1570- 6443.
- Mørk, G., S. Barstow, M. T. Pontes e A. Kabuth (2010). "Assessing the global wave energy potential" Em: *Proceedings of OMAE 2010, 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Shanghai, China, pp. 6-11.
- Ning, D., R. Wang e C. Zhang (2017). "Numerical Simulation of a Dual-Chamber Oscillating Water Column Wave Energy Converter". Em: *Sustainability*, v. 9, pp. 1529-1541.
- Norris, S. E., Cater, J. E., Stol, K. A., Unsworth, C. P., 2010. *Wind Turbine Wake Modelling using Large Eddy Simulation*, 17th Australian Fluid Mechanics Conference, Auckland
- Paulus, G. G. (2019). "Análise numérica da performance de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante para diferentes inclinações das paredes". Trabalho de conclusão de curso, em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Rio Grande.
- Queen's University of Belfast. Islay LIMPET Wave Power Plant: Publishable Report. 1º de Novembro de 1998 até 30 de Abril de 2002.
- Sarmiento, A. J. N. A e A. F. Falcão (1985). "Wave Generation by an oscillating surface pressure and its application in wave-energy extraction". Em: *Journal of Fluid Mechanics*, v. 150, pp 467-485.
- Schäffer, H. A. e G. Klopman (2000). "Review of multidirectional active wave absorption methods". Em: *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, v. 126, n. 2, pp. 88–97.
- Sousa, G. A. C. F., M. G. Neves e R. Capitão (2011). "Separação de agitação incidente e reflectida: testes comparativos". Em: *7ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, AIPCN-PIANC.
- Suguio, K. (1992). "Dicionário de Geologia Marinha, com termos correspondentes em Inglês, Francês e Espanhol". T. A. Queiroz. São Paulo.
- Teixeira, P. R. F., D. P. Davyt, E. Didier e R. Ramalhais (2013). "Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations". Em: *Energy*, v. 61, pp. 513-530.
- Torres F. R., P. R. F. Teixeira e E. Didier (2016). "Study of the turbine power output of an oscillating water column device by using a hydrodynamic-aerodynamic coupled model". Em: *Ocean Engineering*, v. 125, pp. 147-154.
- Torres F. R., P. R. F. Teixeira e E. Didier (2018). "A methodology to determine the optimal size of a Wells turbine in an oscillating water column device by using coupled hydro-aerodynamic models". Em: *Renewable Energy*, v. 121, pp. 9-18.

- Tolmasquim, M. T., (2016). “Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica” EPE: Rio de Janeiro. v. 1, pp. 10.
- Trujillo, A. P. e H. V. Thurman (2011). “Essentials of Oceanography”. Em: Prentice Hall, 10ª ed.
- Tseng, R. S., R. H. Wu, e C. C. Huang (2000). “Model study of a shoreline wave-power system”. Em: Ocean Engineering, v. 27, pp. 801–821.
- Versteeg, H. K. e W. Malalasekera (1999). “An Introduction to Computational Fluid Dynamics”. Longman, Malasia, p. 257.
- Vicinanza, D., D. Lauro Enrico, P. Contestabile, C. Gisonni, L. Lara Javier, J. Losada Inigo (2019). “Review of Innovative Harbor Breakwaters for Wave-Energy Conversion.” Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, v. 145, n. 4. pp. 03119001.
- Wilcox, D. C. (1998). “Turbulence Modeling for CFD”. Second edition. Anaheim: DCW Industries.