

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

SARAH AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO DE UM OSCILLATING WATER
COLUMN

Joinville
2023

SARAH AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO DE UM OSCILLATING WATER
COLUMN

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Ernane Silva

Joinville
2023

SARAH AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO DE UM OSCILLATING WATER
COLUMN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em engenharia naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de Novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Orientador(a): Dr. Ernane Silva
Orientador(a)
Presidente

Dr. Lucas Weihmann
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Filipe Dutra da Silva
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a mim e a minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe e meu pai que me presentearam com amor e dedicação por toda a vida, me possibilitando estar aqui hoje;

Agradeço em especial ao meu orientador Ernane Silva por toda paciência, dedicação e tempo gasto no TCC;

Agradeço ao meu tio Carlos por sempre estar presente;

Agradeço ao professor Paulo Guerra que sempre acreditou no meu potencial e a quem devo meu ingresso em uma faculdade tão renomada;

Agradeço a irmã Simone, ao colégio Vicentino Santa Cruz e seu corpo docente e a todas as freiras da rede Vicentina;

Agradeço a Equipe Babitonga que me apresentou amigos e uma visão dinâmica da engenharia;

Agradeço ao professor Wagner Pachekoski que me deu a oportunidade de ser monitora e ao professor Filipe Dutra que me auxiliou na iniciação científica;

Agradeço ao professor Ricardo Aurélio que me orientou no estágio, ao meu supervisor de estágio Carlos Eduardo de Souza, assim como o estaleiro INC e sua equipe que me ensinaram muito sobre a engenharia;

Agradeço aos professores da faculdade que me capacitaram para ser uma engenheira naval, e a cada técnico e servidor da UFSC;

Agradeço a minha pátria amada Brasil e a Universidade Federal de Santa Catarina por transformar minha vida e mostrar que sou muito mais capaz do que achava;

Agradeço aos amigos que fiz na faculdade, em especial ao meu amigo Gabriel Lima;

Agradeço ao BTS por favor muita música boa e principalmente agradeço a mim por não desistir, não me deixar abalar e por acreditar que posso conquistar tudo o que me propor a fazer.

All the underdogs in the world
A day may come when we lose
But it is not today
Today we fight! (BTS, 2017)

RESUMO

Devido às recentes mudanças climáticas têm-se buscado fontes de energia renováveis para a substituição dos combustíveis fósseis, promovendo a descarbonização e a redução da temperatura global. Ondas tem alta densidade energética, tornando, desta forma, a energia ondomotriz umas das energias renováveis mais promissoras. Neste trabalho foi realizada a análise bibliométrica de metadados de artigos científicos de 2012 a 2022, obtidos na base de dados *Scopus*, para selecionar um conversor de energia ondomotriz a ser estudado. Optou-se pelo *oscillating water column (OWC)* o conversor de energia de onda mais pesquisado e implementado, que apresenta média a alta eficiência. Em seguida, selecionou-se um artigo científico que propusesse a geometria de um OWC fixo tradicional utilizando metadados de 1986 a 2022. Desenvolveu-se um modelo hidrodinâmico numérico bidimensional utilizando do software *olaFlow* para análise do coeficiente de absorção de energia. Três malhas de diferentes refinamentos foram simuladas utilizando a onda de um metro de altura significativa, com as teorias de geração de ondas Stokes I e Stokes II, para cálculo do índice GCI e comparação de resultados com a literatura de referência. Observou-se um GCI para as malhas grossa e intermediária acima de 4,5% e para as malhas intermediária e refinada no valor de 0,1% . O erro percentual para a simulação em relação ao coeficiente de absorção proposto pela literatura base com o uso da teoria de Stokes I e a malha refinada foi de 5,3% , mostrando que o modelo desenvolvido tem capacidade de representar o problema proposto. Três ondas regulares entre meio metro e um metro e meio de altura significativa foram simuladas com a teoria de geração de ondas Stokes II, obtendo respectivos coeficiente de absorção de energia máximo de 29,9 e mínimo de 21,8, mostrando que o coeficiente de absorção de energia diminui com o aumento da amplitude de onda devido a efeitos que dissipam a energia do fluido.

Palavras-chave: Oscillating water column. energia de onda. conversor de energia de onda.

ABSTRACT

Due to recent climate changes, renewable energy sources have been researched for to replace fossil fuels, promoting decarbonization and reducing global temperatures. Waves have high energy density, making wave energy one of the most promising renewable energies. In this work, a bibliometric analysis of metadata from scientific articles from 2012 to 2022 was carried out, obtained from *Scopus* database, to select an wave energy converter to be studied. The *oscillating water column (OWC)* was chosen, the most researched and implemented wave energy converter, which has medium to high efficiency. Next, a scientific article was selected to propose the geometry of a traditional fixed OWC using metadata from 1986 to 2022. A two-dimensional numerical hydrodynamic model was developed using the *olaFlow* software to analyze the energy absorption coefficient. Three meshes of different refinements were simulated using a wave with a significant height of one meter, with the Stokes I and Stokes II wave generation theories, to calculate the GCI index and compare results with reference literature. The GCI observed for the coarse and intermediate meshes was above 4.5% and for the intermediate and refined meshes at a value of 0.1% . The percentage error for the simulation in relation to the absorption coefficient proposed by the literature using the Stokes I theory and the refined mesh was 5.3% , showing that the model developed has the capacity to represent the proposed problem. Three regular waves between half a meter and one and a half meters of significant height were simulated with the Stokes II wave generation theory, obtaining respective maximum energy absorption coefficient of 29.9 and minimum of 21.8, showing that the energy absorption coefficient decreases with the increase of wave amplitude due to effects that dissipate the energy of the fluid.

key-words: Oscillating water column. wave energy. wave energy converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de WEC.	16
Figura 2 – Características das ondas.	20
Figura 3 – Funções hiperbólicas dependentes de kh.	21
Figura 4 – Esquema de conversão de energia de onda em elétrica.	23
Figura 5 – PowerBuoy.	24
Figura 6 – Pelamis.	24
Figura 7 – Oyster.	25
Figura 8 – Funcionamento do conversor tipo OWEC.	26
Figura 9 – Wave Dragon.	26
Figura 10 – Funcionamento do OWC.	27
Figura 11 – Configuração das câmaras de ar.	28
Figura 12 – Perfis de parede frontal.	28
Figura 13 – Tipos de fundo.	29
Figura 14 – Degraus.	29
Figura 15 – Conversor OWC móvel da Oceanlinx.	30
Figura 16 – Planta Pico.	31
Figura 17 – Planta Mutriku.	31
Figura 18 – Fluxo de trabalho da análise bibliométrica realizada.	32
Figura 19 – Palavras-chave de artigos científicos entre 2012 e 2022.	32
Figura 20 – Ocorrência acumulada de artigos científicos entre 2002 e 2022.	33
Figura 21 – Densidade de palavras-chave em artigos científicos entre 1986 e 2022.	34
Figura 22 – Árvore de palavras-chave mais citadas em artigos científicos entre 1986 e 2022.	34
Figura 23 – Acoplamento de termos em artigos científicos entre 1986 e 2022.	35
Figura 24 – Colaboração de autores e co-autores entre os artigos científicos mais influentes de 1986 a 2022.	36
Figura 25 – Geometria selecionada, unidades em metros.	37
Figura 26 – Aplicabilidade das teorias de onda.	43
Figura 27 – Malha intermediária gerada.	46
Figura 28 – Malha intermediária, detalhes da câmara de ar.	46
Figura 29 – Ocorrência percentual de ondas características da região Sul do Brasil.	47
Figura 30 – Condições de contorno.	47
Figura 31 – Simulação.	48
Figura 32 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 1,0 m, Stokes I.	49

Figura 33 – Elevação da câmara na simulação com Stokes I.	51
Figura 34 – Elevação da câmara na simulação com Stokes II.	52
Figura 35 – A_{bs} para casa onda simulada.	53
Figura 36 – Redução em % de A_{bs} para cada onda simulada.	53
Figura 37 – Superfície livre (m) x Tempo (s) malha grossa, onda de 1,0 m, Stokes I.	58
Figura 38 – Superfície livre (m) x Tempo (s) malha grossa, onda de 1,0 m, Stokes II.	58
Figura 39 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 1,0 m, Stokes II.	59
Figura 40 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha refinada, onda de 1,0 m, Stokes I.	59
Figura 41 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha refinada, onda de 1,0 m, Stokes II.	60
Figura 42 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 0,5 m, Stokes II.	60
Figura 43 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 1,5 m, Stokes II.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores teóricos da energia global dos oceanos.	16
Tabela 2 – Teorias de onda.	42
Tabela 3 – Características das ondas simuladas.	45
Tabela 4 – Refinos de malha.	47
Tabela 5 – Variáveis índice GCI.	50
Tabela 6 – Resultados das simulações da onda de 1,0 metro.	50
Tabela 7 – Resultados das simulações com Stokes II.	52

LISTA DE SÍMBOLOS

UNCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática
WEC	Conversor de energia de onda
OBWEC	Conversor de energia de onda tipo <i>oscillating body</i>
OWC	Conversor de energia de onda tipo <i>oscillating water column</i>
OWEC	Conversor de energia de onda tipo <i>overtopping</i>
λ	Comprimento de onda
T	Período de onda
A	Amplitude de onda
H	Altura de onda
ω	Frequência angular de onda
κ	Número de onda
c	Velocidade de fase de onda
c_g	Velocidade de grupo de ondas
h	profundidade do mar
g	aceleração da gravidade
\tilde{F}	Fluxo de energia da onda
E_{onda}	Energia média por área de superfície
ρ	densidade do fluido
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional
m_{sis}	Massa no sistema
\vec{V}	Vetor de velocidade
E_{sis}	Energia interna do sistema
Q	Quantidade de calor fornecido

W	Trabalho realizado
N	Propriedade extensiva
η	Propriedade intensiva
TTR	Teorema do transporte de Reynolds
u	Componente da velocidade em x
v	Componente da velocidade em y
w	Componente da velocidade em z
τ	Força viscosa
S	Forças de corpo
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
VOF	Modelo multifásico
MVF	Método dos volumes finitos
X_a	Fração volumétrica da fase a
c	Fase contínua
d	Fase dispersa
\vec{u}	Vetor de velocidade
$\tau^=$	Tensões viscosas
\vec{M}_{ab}	Troca interfacial da quantidade de movimento entre duas fases
C_D	Coeficiente de arrasto da força do líquido
D_d	Diâmetro médio de Sauter das gotas de líquido
A_{bs}	Coeficiente de absorção de energia
\tilde{F}_{OWC}	Fluxo de energia do conversor
B	Comprimento da câmara de ar
L	Largura da câmara
P	Pressão hidrodinâmica no centro da entrada de água
$\zeta(t)$	Função da altura da câmara de ar

H_{owC}	Altura do conversor
$\xi(t)$	Função que descreve a superfície livre no conversor
r	Fator de refino
ϕ	Variável de interesse
ϕ_{ext}^{21}	Valor extrapolado
e_a^{21}	Erro aproximado
e_{ext}^{21}	Erro extrapolado
GCI	Índice de convergência de malha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Ondas e seu potencial energético	19
2.2	Wave energy converters e suas formas de conversão de energia de onda	22
2.2.1	Oscillating body wave energy converter	23
2.2.2	Overtopping wave energy converter	25
2.2.3	Oscillating water column	26
2.3	Análise bibliométrica	30
2.4	Modelo numérico	37
2.4.1	Equações governantes	37
2.4.2	Método dos volumes finitos	40
3	MÉTODO	42
3.1	OlaFlow	42
3.2	Índice GCI	43
3.3	Construção do caso numérico	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE A	58
	ANEXO A	62

1 INTRODUÇÃO

A energia é, por definição, a capacidade de realizar trabalho, e dentre suas formas, a elétrica tem facilidade de transporte e conversão direta, por isso é a forma mais consumida. Estima-se que países desenvolvidos duplicam seu consumo de energia elétrica a cada dez anos (FARIAS; SELLITTO, 2011).

As emissões de gases de efeito estufa, entre outros impactos oriundos da exploração do planeta Terra pela humanidade, vem causando mudanças climáticas cada vez mais extremas. Mediante os problemas ecossistêmicos ocorridos nas últimas décadas, tem crescido a busca de formas de captação de energia menos agressivas ao ambiente. Acredita-se que o uso desenfreado de combustíveis fósseis seja um dos principais motivos do aquecimento global, uma vez que 35% dos gases de efeito estufa são lançados ao ambiente por usinas de energia de fonte não renovável e 40% desses gases são provenientes das usinas de carvão (RAHMAN; FARROK; HAQUE, 2022).

De forma a mitigar os efeitos do aquecimento do planeta, foi proposto em 2015 pela UNCCC (Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática) o acordo de Paris, que propõe a descarbonização do setor elétrico até 2050, de forma a diminuir a temperatura global em até dois graus Celsius. O acordo conta com investimento anual de US\$ 3,5 trilhões e vem em momento crucial, pois concomitante ao agravamento das mudanças climáticas a demanda global de energia tem previsão de aumentar em 56% até 2040 (RAHMAN; FARROK; HAQUE, 2022).

Com a visão de diminuir e até mesmo acabar com o uso de energia de fontes não renováveis, buscam-se fontes de energia renováveis com alta densidade energética, de forma a substituir os combustíveis fósseis. A aposta global é que a transição energética com foco na descarbonização irá abrandar os sintomas do aquecimento global (RAHMAN; FARROK; HAQUE, 2022).

As energias derivadas do oceano tem grande potencial, conforme se vê na Tabela 1. Além de ocupar 2/3 do planeta, o que facilita e favorece sua exploração, o oceano possibilita diversas formas de geração de energia, como a geração por correntes marítimas que explora a energia cinética proveniente do fluxo de água contínuo, a osmótica que utiliza do gradiente de salinidade das águas e o princípio da osmose retardada por pressão e da eletrodíálise reversa. Além dessas, há a geração térmica oceânica que usa o gradiente de temperatura das águas, a geração de energia por marés e por fim a exploração de ondas (JU, 2022).

A energia ondomotriz, que advém das ondas, apesar de ocupar apenas 0,2% da matriz energética global tem previsão de crescimento exponencial (RAHMAN; FARROK; HAQUE, 2022). As ondas têm, dentre as formas de energia renovável,

Tabela 1 – Valores teóricos da energia global dos oceanos.

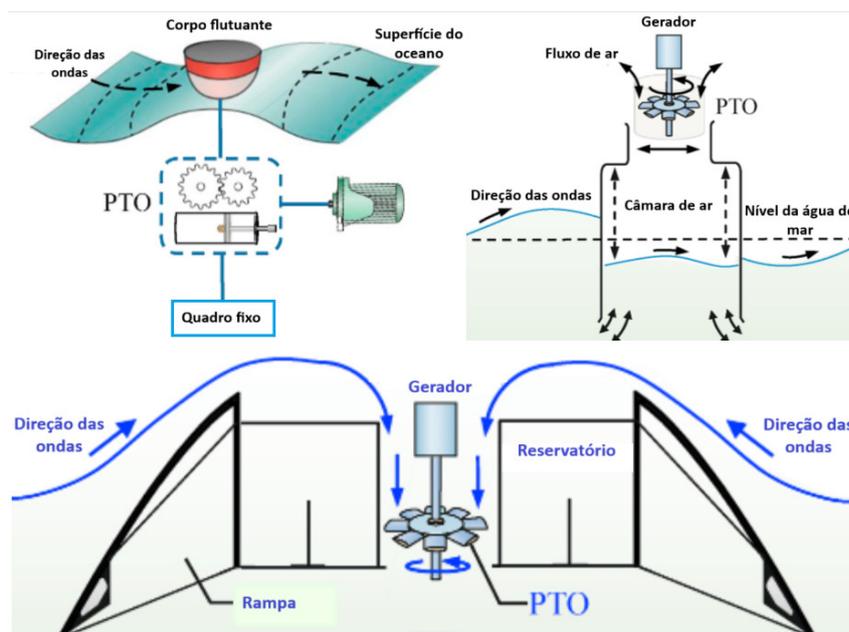
Fonte	Capacidade (GW)	Geração anual (TWh)
Correntes marítimas	5000	50000
Osmótica	20	20000
Térmica oceânica	1000	10000
Marés	90	800
Ondas	1000-9000	8000-80000

Fonte: Modificado de Zhang et al. (2021)

a maior densidade energética, além de o processo de geração ter boa previsibilidade e menor variabilidade que a geração de energia eólica, por exemplo (DREW; PLUMMER; SAHINKAYA, 2009). A Figura 1 apresenta valores teóricos de geração de energia a partir dos oceanos, mostrando também que dentre as formas a ondomotriz é a mais promissora.

A conversão de ondas em energia ocorre por meio de conversores de energia de onda (*WEC - wave energy converters*). Existem diversos tipos de WEC, que se dividem em três categorias: *Oscillating Body (OBWEC)*, *Oscillating Water Column (OWC)* e *Overtopping (OWEC)*, de acordo com a Figura 1. Dessa forma, as ondas do mar são convertidas em energia potencial por meio do WEC, a energia potencial é transformada em mecânica através de sistemas mecânicos e posteriormente convertida em elétrica através da conexão do sistema mecânico com o gerador (ZHANG et al., 2021).

Figura 1 – Tipos de WEC.



Fonte: Modificado de Zhang et al. (2021)

A seleção do conversor ideal depende das características de onda do oceano em questão, assim como a profundidade e a localidade disponível para a implementação do WEC (FOTEINIS, 2022). Fatores como custo de implementação, manutenção, além de interação com o ambiente também são considerados.

O Brasil tem uma área costeira que se estende de Norte a Sul do país, além disso o Oceano Atlântico, que banha as terras brasileiras, tem como característica baixa amplitude de onda, baixa potência significativa anual e águas calmas o que contribuiria para escolha de WECs de menor custo, maior vida útil e maior eficiência (FOTEINIS, 2022).

Dentre os diversos tipos de WEC, o *oscillating water column* tem sido destaque em pesquisa e aplicação, isso se deve por ter menor custo de manutenção, boa confiabilidade, adequada resposta hidrodinâmica em mares de baixa amplitude além de apresentar boa eficiência alcançando valores de até 50% (KHARKESHI et al., 2022). O conceito do OWC foi apresentado pelo comandante naval japonês Yoshio Masuda em 1940. Basicamente, a conversão de energia no OWC segue a lógica de um pistão pneumático, conforme o movimento das ondas o volume de água no aparelho é alterado, dessa forma a massa de ar no conversor estende e comprimi. A extensão e compressão causa um gradiente de pressão entre a câmara de ar e a atmosfera, que se conectam pelo bocal da turbina. Desta forma, durante a extensão o ar faz o caminho atmosfera→câmara de ar pelo bocal e durante a compressão o caminho é o inverso. A passagem pelo bocal movimentam a turbina que aciona o gerador (MALARA et al., 2017).

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto para análise hidrodinâmica numérica bidimensional de um OWC fixo tradicional sujeito a ondas regulares, utilizando do software olaFlow. Assim como a comparação dos resultados numéricos com dados da literatura disponíveis.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo hidrodinâmico numérico bidimensional de um OWC sujeito a ondas regulares.

1.1.2 Objetivos Específicos

De forma a atingir o objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Revisão bibliométrica dos WEC;
- Definir geometria do OWC com base nos dados disponíveis na literatura;

- Desenvolver um modelo numérico para simular o comportamento hidrodinâmico do OWC;
- Comparar os resultados obtidos com dados disponíveis na literatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos de ondas e seu potencial energético, *wave energy converters* e suas formas de conversão de energia de onda, nas respectivas seções 2.1 e 2.2. Também serão discorridos o método de análise de artigos que utilizou-se para selecionar a geometria do caso de estudo, conforme seção 2.3; e os conceitos físicos, hipóteses e mecanismos que possibilitaram aos softwares de dinâmica de fluido computacional (CFD), simular o comportamento de um WEC, conforme seção 2.4.

2.1 ONDAS E SEU POTENCIAL ENERGÉTICO

As ondas do mar são um clássico exemplo de onda mecânica, caracterizando-se como uma perturbação em meio material com periodicidade espacial e temporal, regidas pela Lei de Newton.

A forma de geração das ondas é o que as caracteriza. Ondas geradas pelo vento são chamadas gravitacionais, aquelas geradas por diferença de densidade na coluna d'água são chamadas internas. Há ainda as ondas inerciais, provenientes da aceleração de Coriolis e ondas capilares geradas pela tensão superficial no fluido. Independente do tipo, as ondas se propagam apenas na superfície do corpo hídrico (FUJARRA, em edição, 83 pg).

Comprimento (λ), período (T), amplitude (A), altura (H), frequência (ω), número de onda (κ) e velocidade de fase (c) são algumas das informações que descrevem a onda. O comprimento é a dimensão espacial da onda, o comprimento de crista à crista ou de cava à cava; o período é o espaço temporal para que o evento se repita, no caso para que λ se repita; amplitude é a distância entre crista e a superfície do corpo hídrico; altura é a distância entre crista e cava (KHALIGH; ONAR, 2010). Essas relações podem ser vistas na Figura 2.

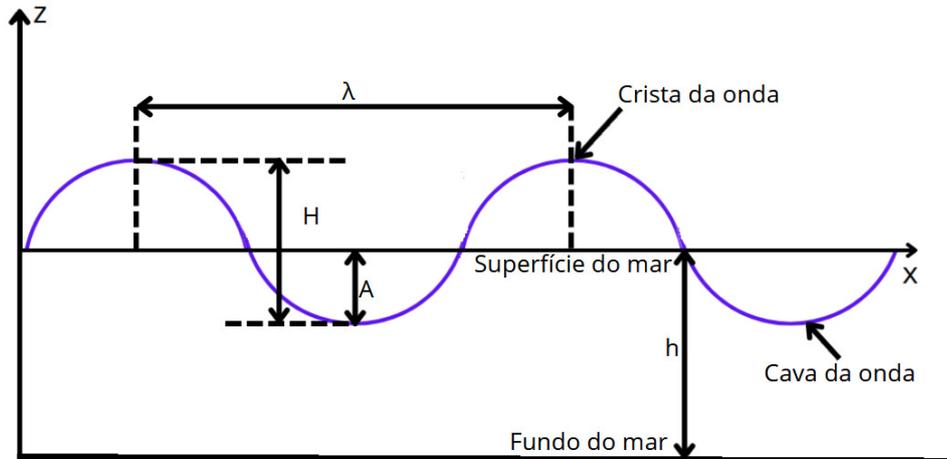
A frequência angular da onda indica a mudança de fase da onda conforme período, de acordo com a equação 1. O número de onda é representado pela equação 2 e a velocidade de fase da onda é demonstrada pela equação 3 (FUJARRA, em edição, 83 pg).

$$\omega = 2\pi/T \quad (1)$$

$$\kappa = 2\pi/\lambda \quad (2)$$

$$c = \omega/\kappa \quad (3)$$

Figura 2 – Características das ondas.



Fonte: Autora (2023)

É importante citar que existe uma relação direta entre a ciclicidade espacial e temporal da onda, que é expressa através da Relação de Dispersão da Onda, que pode ser observada na equação 4.

$$\omega^2 = g\kappa[\tanh(\kappa h)] \quad (4)$$

$$\omega^2 = g\kappa \quad (5)$$

A profundidade em que a onda está se propagando (h) afeta a amplitude, comprimento e até mesmo a velocidade de fase da onda. Consideram-se águas profundas quando $h \geq 0,5\lambda$, dessa forma $\tanh(\kappa h) \approx 1$, assim, a profundidade praticamente não afeta o comprimento da onda e a relação da dispersão da onda pode ser simplificada, seguindo a equação 5. Conforme h diminui $\tanh(\kappa h) \neq 1$, a profundidade passa a afetar os parâmetros da onda (FUJARRA, em edição, 83 pg). A Figura 3 ilustra as funções hipérbolicas e o comportamento dessas funções quando dependentes de kh .

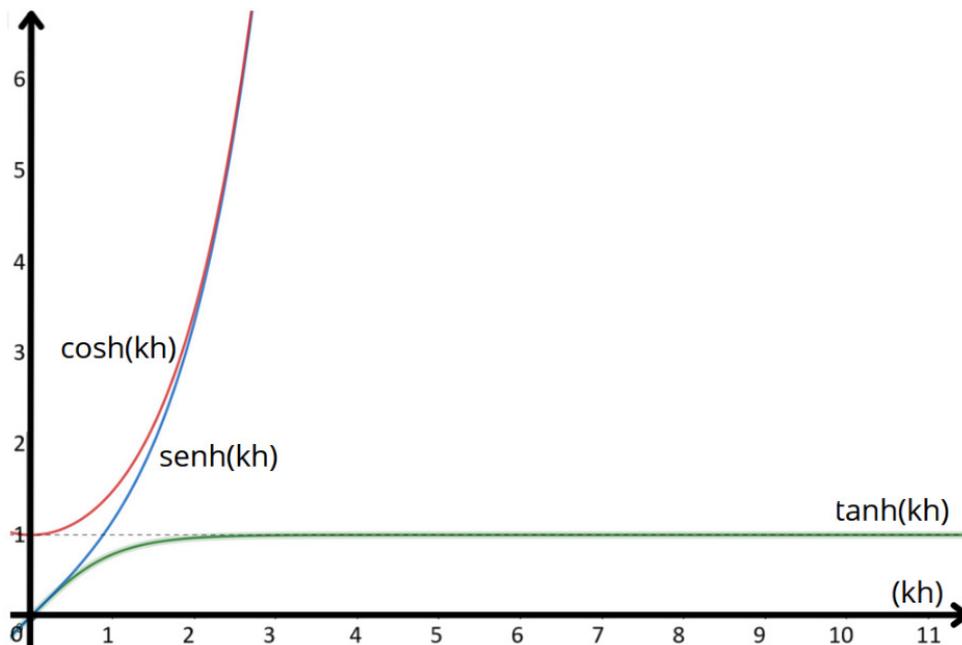
O primeiro efeito registrado com a propagação das ondas em águas rasas ($h < 0,5\lambda$) é o encurtamento do comprimento da onda. É possível observar esse efeito matematicamente ao considerar que a onda é gerada em águas profundas até alcançar águas rasas, assim, é possível igualar equações 5 e 4, obtendo a expressão 6.

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\omega^2}{g} = \frac{2\pi}{\lambda} \tanh(\kappa h) \quad (6)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \tanh(\kappa h) \quad (7)$$

Onde λ_0 é o comprimento de onda em águas profundas e λ é o comprimento de onda em águas rasas. A equação 7 relaciona os comprimentos de onda impactados pela profundidade de seu local de propagação (FUJARRA, em edição, 83 pg).

Figura 3 – Funções hiperbólicas dependentes de kh.



Fonte: Autora (2023)

O aumento da amplitude de onda é outra consequência da diminuição da profundidade do mar, essa relação é perceptível ao analisar o fluxo de energia das ondas na equação 8 (FUJARRA, em edição, 83 pg).

$$\tilde{F} = E_{onda}c_g = \frac{\rho g A^2 \omega}{4\kappa} \left(1 + \frac{2\kappa h}{\sinh(2\kappa h)} \right) \quad (8)$$

O movimento de elevação da superfície livre do mar e o movimento das partículas fluidas no mar caracterizam a onda, formando respectivamente a energia potencial e cinética, componentes da energia ondomotriz. Dessa forma, a energia de onda decorre da movimentação de uma massa fluida em relação à uma superfície livre (FUJARRA, em edição, 83 pg). O fluxo de energia (\tilde{F}) é definido pelo produto entre a energia média por área de superfície (E_{onda}), e a velocidade de grupo (c_g). Em que a velocidade de grupo é uma simplificação que considera que a frequência das ondas são próximas, compõem assim uma banda estreita de frequência, logo é possível considerar que elas andam em grupo.

Em águas profundas a expressão do fluxo de energia segue a equação 9. Considerando a progressão de águas profundas para rasas e igualando as expressões 8 e 9 obtém-se a expressão 10 que demonstra o crescimento da amplitude de onda conforme se aproxima da costa. Em que ρ é a densidade da água do corpo hídrico

(FUJARRA, em edição, 83 pg) .

$$\tilde{F}_0 = \frac{\rho g A_0^2 c}{4\kappa} \quad (9)$$

$$\frac{A}{A_0} = \left[\frac{\kappa}{\kappa_0} \left(\frac{1}{1 + \frac{2\kappa h}{\sinh(2\kappa h)}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Apesar do comprimento e amplitude da onda serem alterados com a profundidade o período da onda independe dessa característica. A independência do tempo com a profundidade existe devido à diminuição da velocidade de fase na região de águas rasas. A relação entre a celeridade em águas rasas (c) e em águas profundas (c_0) é demonstrada em 11.

$$c = c_0 \tanh(\kappa h) \quad (11)$$

Uma vez ciente que o potencial da onda cresce com a altura da onda ao quadrado, conforme é possível notar em 8 e 9, sabendo ainda que com a diminuição da profundidade a amplitude de onda aumenta é possível que conclua-se equivocadamente que WECs em águas rasas ou ainda em áreas com grande incidência de tempestades tem maior potencial. Ocorre que os WECs são projetados para atuarem em determinada faixa de valores de onda. Em águas profundas, *offshore*, a variabilidade das condições de onda é muito pequena, desta forma, a captação de energia se torna constante e eficiente (MALARA et al., 2017). Próximo a costa, em águas rasas, há processos como fricção de fundo, difração, refração de ondas, além do efeito da quebra de onda decorrente da proximidade do solo (FALNES, 2007). As ondas se tornam instáveis, há perda de energia e a geração de energia se torna mais difícil de prever. No caso de tempestades em alto mar, onde há, de fato, alto potencial de energia de onda diversos fatores impedem a instalação de WECs, entre eles a resistência estrutural do conversor, que pode vir à falha; alto custo para implementação e manutenção, e o fato do aparelho entrar em modo sobrevivência uma vez que suas faixas de valores de trabalho são extrapoladas, assim, deixa de cumprir sua função de converter energia (MALARA et al., 2017).

O estudo da região de implementação do conversor, assim como as características do mar que o WEC será inserido são de suma importância para obter um projeto de conversor eficiente e confiável.

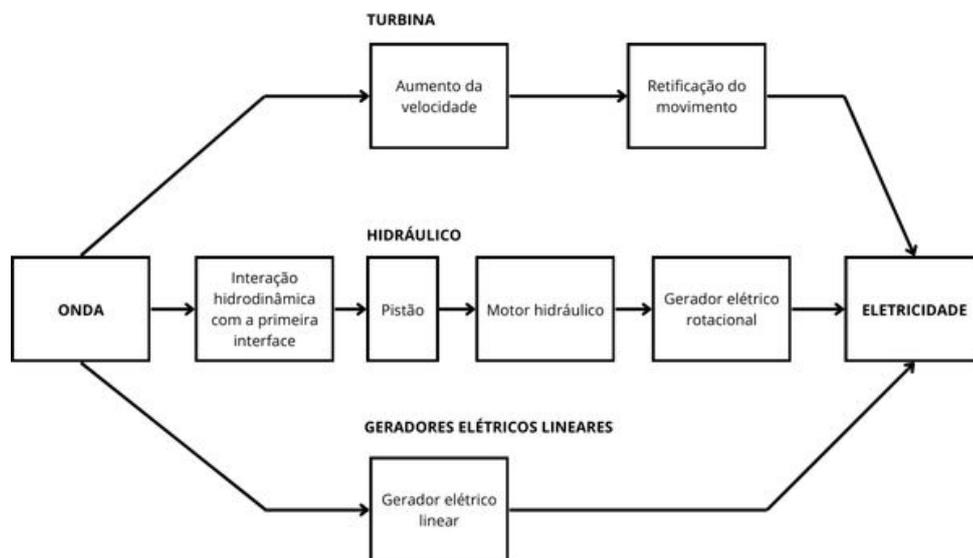
2.2 WAVE ENERGY CONVERTERS E SUAS FORMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDA

Existe atualmente uma infinidade de conversores de energia, esta grande gama de opções busca sempre uma maior eficiência aliado de menor custo de implementação, maior confiabilidade e adaptabilidade (ZHANG et al., 2021).

A eficiência dos conversores depende de fatores como: local de instalação, espectro de mar e condições climáticas. Assim, é possível que o mesmo conversor tenha respostas diferentes em diferentes mares ou oceanos. O fundamental é um estudo estatístico para se descobrir determinado padrão das condições naturais da região e com esses dados decidir qual o WEC que melhor se adapta nestas condições (MALARA et al., 2017).

O esquema representado na Figura 4 mostra as etapas de conversões de energia de onda até elétrica baseado nos sistemas de transformação de energia de cada conversor. De forma geral, pode-se dizer que os WECs apresentam três estágios de conversão de energia. O primeiro estágio consiste em transformar a energia de onda em potencial, mecânica ou pneumática utilizando do conversor. O segundo estágio é a transformação da energia absorvida no estágio um em energia mecânica com a utilização de sistemas de transformação que podem ser hidráulicos, por turbinas, entre outros. O terceiro é a geração da energia elétrica a partir da mecânica com a utilização de geradores (ZHANG et al., 2021).

Figura 4 – Esquema de conversão de energia de onda em elétrica.



Fonte: Modificado de Drew, Plummer e Sahinkaya (2009)

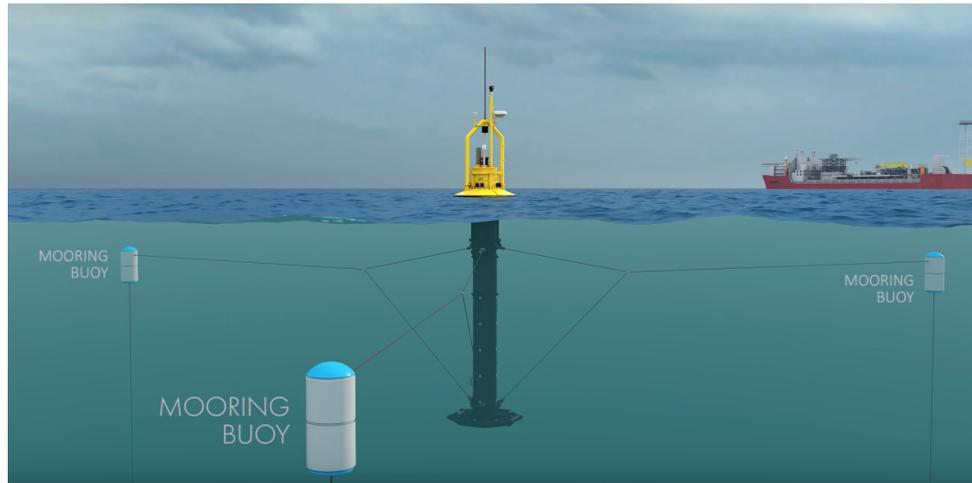
A seguir serão detalhados o modo de conversão de energia dos conversores tipo OBWEC, OWEC e OWC. Nas respectivas subseções 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3.

2.2.1 Oscillating body wave energy converter

O *OBWEC* (*oscillating body wave energy converter*) é um conversor compacto e de menor custo de implementação. Seu maior uso é em áreas *offshore* e se subdivide em três categorias: *point absorber*, *attenuator* e *terminator*.

O *point absorber* é composto por um corpo flutuante acoplado a um pistão hidráulico que aciona um gerador. A onda passa pelo corpo flutuante que descreve o movimento crescente e decrescente no pistão hidráulico. Este, por sua vez, aciona o gerador que produz eletricidade (ZHANG et al., 2021). Um exemplo clássico de *point absorber* é o conversor *PowerBuoy* proposto pela *Ocean Power Technology*, que pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – PowerBuoy.



Fonte: OPT (2023)

O *Pelamis*, disponível na Figura 6, é um dos conversores que utilizam do princípio *attenuator*. Desenvolvido pela *Pelamis Wave Power*, o *Pelamis* é constituído de partes flutuantes cilíndricas, interligadas entre si por um sistema hidráulico que aciona o gerador. Alinhado a direção predominante das ondas da região o conversor passeia sobre elas, sofrendo deslocamentos angulares entre suas partes durante o movimento oscilatório, o que cria pressão hidráulica e aciona o gerador (ZHANG et al., 2021).

Figura 6 – Pelamis.

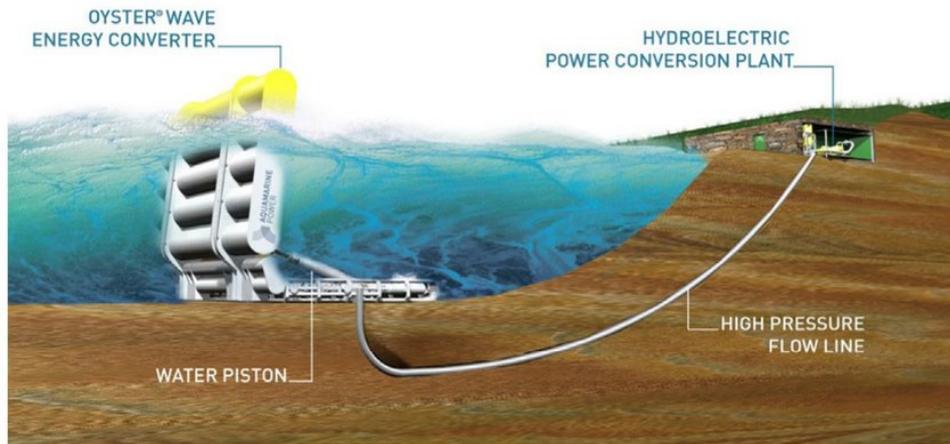


Fonte: EMEC (2023)

A empresa *Aquamarine Power* foi uma das pioneiras investindo no conversor tipo *terminator*, seu conversor pode ser visto na Figura 7. O *terminator* é um dos tipos de WEC com maior eficiência, funciona como uma parede sujeita a oscilação das ondas

e fixa ao fundo do mar, desta forma, ele acompanha o movimento das ondas e assim seus pistões hidráulicos de alta pressão acionam um gerador hidro-elétrico (DREW; PLUMMER; SAHINKAYA, 2009).

Figura 7 – Oyster.



Fonte: AP (2023)

Existe pelo mundo fazendas de *OBWEC* e recentemente tem crescido a quantidade de *OBWEC* acoplados com geradores de energia eólica offshore. Os conversores híbridos apresentam maior capacidade de captação de energia, isso porque em águas profundas a densidade de onda é muito maior e além disso os ventos têm maior intensidade (MALARA et al., 2017).

Os maiores desafios para implementação do *OBWEC* são confiabilidade e manutenção. Estando em águas profundas, esses conversores sofrem grande estresse estrutural, além disso a manutenção é difícil e com alto custo (MALARA et al., 2017).

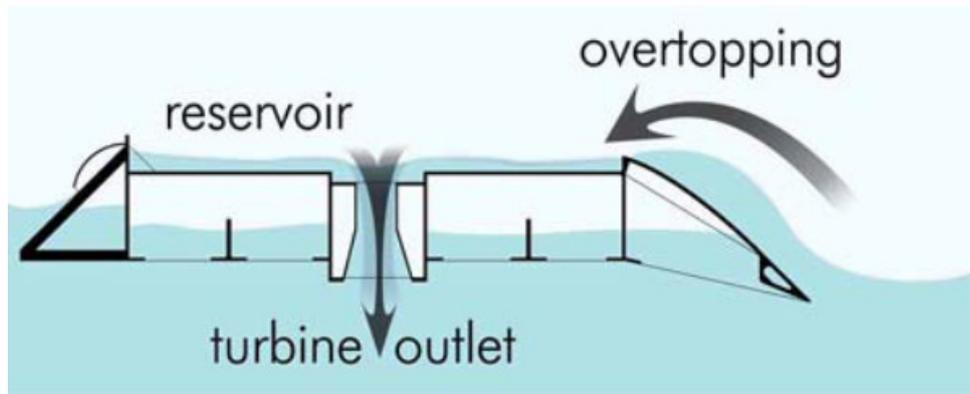
2.2.2 Overtopping wave energy converter

Os conversores do tipo *OWEC* (*overtopping wave energy converter*) se subdividem em fixo e móvel, e ao contrário dos *OBWEC*, são de grande porte além de terem um maior custo de implementação. O funcionamento dos *OWEC* fixos e móveis são semelhantes ao de uma hidrelétrica. Desta forma, o conversor utiliza de rampas para formar uma piscina em nível acima do mar e a água represada em queda passa por uma turbina que alimenta o gerador. Na figura 8 é possível ver um esquema de funcionamento do conversor e na Figura 9 o conversor *Wave Dragon* desenvolvido pela empresa *Wave Dragon APS*.

O *OWEC* fixo funciona de forma semelhante ao móvel, entretanto, é localizado na costa.

A implementação dos *overtopping* tem algumas facilidades, como a confiabilidade estrutural, além do maior conhecimento dos processos de conversão de energia mecânica-elétrica devido ao arcabouço teórico advindo das turbinas

Figura 8 – Funcionamento do conversor tipo OWEC.



Fonte: Drew, Plummer e Sahinkaya (2009)

Figura 9 – Wave Dragon.



Fonte: MJ (2003)

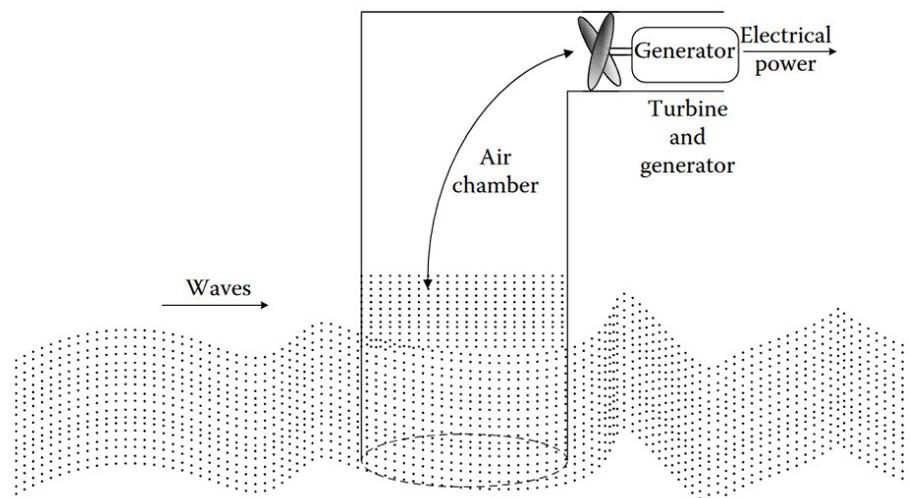
hidrelétricas. Entretanto, sua instalação impacta mais a vida marinha local, principalmente na questão de ruído (ZHANG et al., 2021).

2.2.3 Oscillating water column

O *oscillating water column (OWC)* consiste primariamente de duas partes: uma câmara de ar e uma turbina. Este tipo de conversor se subdivide em fixo e móvel, em ambos os casos seu modo de captação de energia utiliza da pressão pneumática da massa de ar na câmara, que durante a compressão e descompressão gira uma turbina que aciona o gerador (ZHANG et al., 2021).

A abertura de entrada do aparelho recebe o fluxo de água conforme a passagem das ondas. A alteração do volume de água no conversor é o que gera a pressão pneumática e a energia cinética na câmara de ar, pois conforme a superfície livre do fluido oscila há a compressão e descompressão da massa de ar. Durante a descompressão a câmara de ar tem seu volume máximo, desta forma a abertura de saída, abertura à atmosfera onde fica alocada a turbina, permite a entrada de ar. Porém, durante a compressão a câmara de ar tem seu volume mínimo, comprimindo e acelerando o fluido no local, assim, ele escapa pela abertura de saída. A entrada e saída de ar gira a turbina que aciona o gerador (ZHANG et al., 2021). A Figura 10 ilustra o funcionamento de um OWC.

Figura 10 – Funcionamento do OWC.



Fonte: Khaligh e Onar (2010)

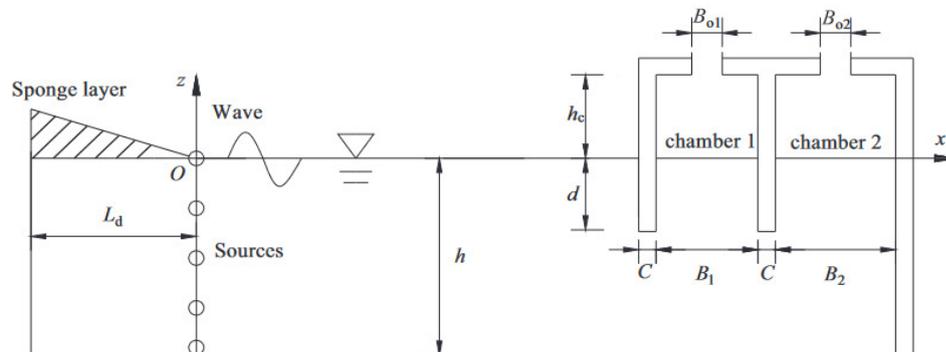
A interação fluido-estrutura, ou ainda, onda-estrutura, indica como o OWC se comportará mediante a incidência de determinada amplitude e frequência de onda. Há três possíveis situações de interação onda-estrutura, são elas: absorção de energia através da incidência da onda, não absorção de energia através da reflexão da onda e não absorção de energia na dissipação da onda. Procura-se evitar a dissipação e reflexão da onda de forma a aumentar a eficiência do conversor (FALCAO; HENRIQUES; GATO, 2016).

Tratando-se das ondas regulares, que tem altura e frequência prevista, o projeto do conversor tenta maximizar sua absorção e ao mesmo tempo reduzir a reflexão e dissipação. Em questão as ondas irregulares, que são randômicas, o comportamento do conversor depende da característica da onda (FALCAO; HENRIQUES; GATO, 2016).

Por consequência de sua forma de conversão é possível decompor a eficiência do OWC como produto das eficiências hidrodinâmica, aerodinâmica e elétrica. Onde a hidrodinâmica corresponde a interação fluido-estrutura e a capacidade de conversão

de energia ondomotriz, a aerodinâmica é relacionada a eficiência da turbina e por fim a eficiência elétrica que refere-se a eficiência do gerador (FALCAO; HENRIQUES; GATO, 2016).

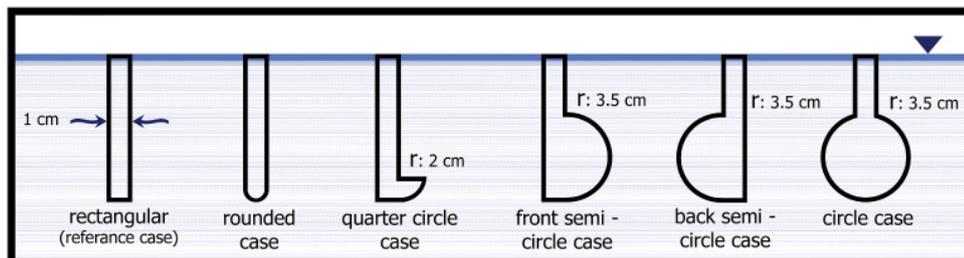
Figura 11 – Configuração das câmaras de ar.



Fonte: Çelik (2022)

A geometria impacta na eficiência hidrodinâmica do OWC. A câmara de ar, o perfil do fundo, a adição de degrau, além do perfil de parede frontal tem a capacidade de otimizar a captação da energia ondomotriz e sua conversão.

Figura 12 – Perfis de parede frontal.

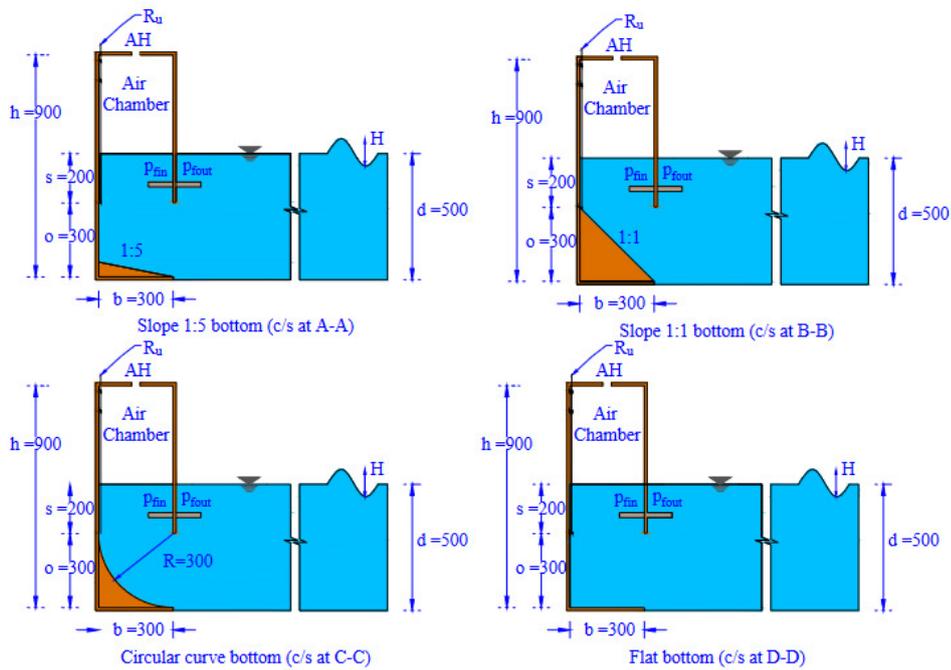


Fonte: Çelik (2022)

O tamanho da câmara de ar e a quantidade, assim como as dimensões da abertura de saída foram objeto de estudo de Ning et al. (2019), conforme Figura 11. Notou-se que a utilização de duas câmaras de ar além de aumentar a eficiência do conversor em mais de 10% , aumentou a frequência de banda. Observou-se também que o tamanho da câmara e o tamanho da parede frontal depende intrinsecamente do número de onda. Porém, a parede frontal, no caso da utilização de duas câmaras, deve sempre ser menor que a intermediária.

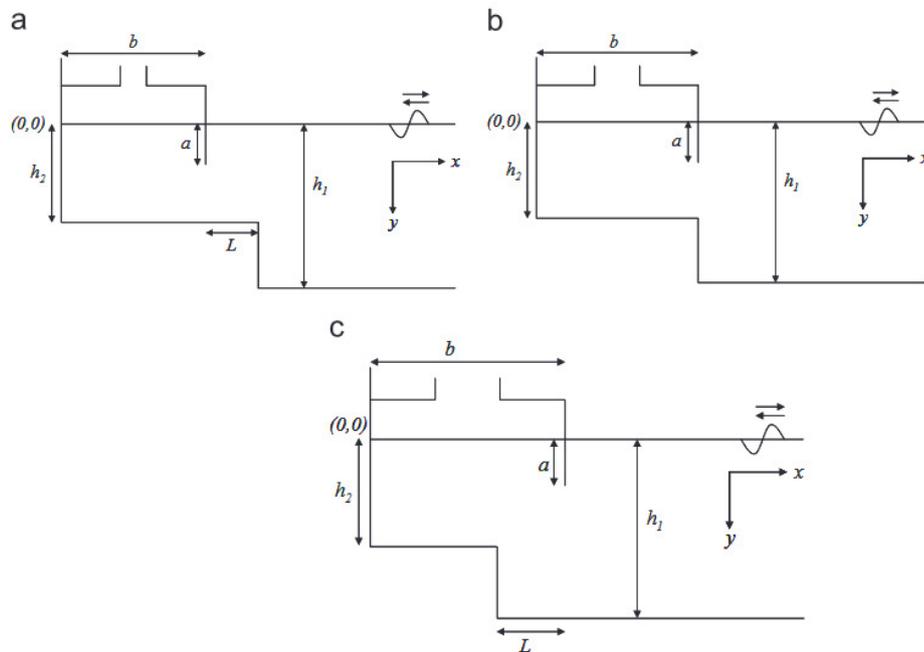
A parede frontal contribui para a reflexão de ondas e criação de vórtex que dissipam energia do fluido. Çelik (2022) analisou experimentalmente vários perfis de parede frontal, conforme Figura 12, de forma a diminuir a formação de vórtex, aumentando a eficiência hidrodinâmica e a razão de captura de energia do conversor. A geometria circular apresentou melhor comportamento hidrodinâmico em todos os comprimentos de onda e em todas as relações de raio, além de diminuir a criação de

Figura 13 – Tipos de fundo.



Fonte: Ashlin, Sundar e Sannasiraj (2016)

Figura 14 – Degraus.



Fonte: Rezanejad, Bhattacharjee e Soares (2013)

vórtex e o *stress* na estrutura.

O perfil de fundo do OWC é outro fator que diminui a reflexão de ondas e aumenta sua razão de captura de energia, conforme estudo de Ashlin, Sundar e Sannasiraj (2016). Experimentalmente investigou-se o comportamento de quatro tipos

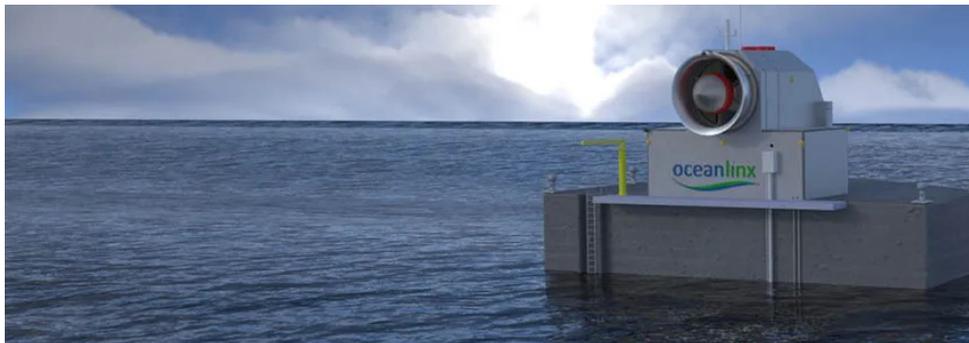
de fundo, que podem ser vistos na Figura 13. O fundo circular apresentou maior eficiência, visto que a pressão de ar no interior da câmara foi maior, além de apresentar maior coeficiente de absorção e diminuir o coeficiente de reflexão.

O degrau é um artifício de perfil de fundo que aumenta a eficiência do conversor, apesar de não diminuir o coeficiente de reflexão, conforme o estudo de Rezanejad, Bhattacharjee e Soares (2013). A Figura 14 mostra os degraus para conversores fixos que foram analisados, concluiu-se que ao utilizar um degrau maior que a câmara a eficiência é maior pois aproxima os picos de ressonância do conversor.

A otimização geométrica produz conversores mais hidrodinâmicos, resistentes e eficientes, entretanto, aumenta o custo de implementação e manutenção do WEC.

Entre os exemplos de OWC testados e implementados, tem-se o WEC da empresa *Oceanlinx*, conversor OWC móvel que pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Conversor OWC móvel da Oceanlinx.



Fonte: INDAILY (2014)

O OWC fixo é um dos conversores mais estudados e implementados. Comumente este WEC é fixo a quebra-mares, estruturas robustas que sofrem grande incidência de onda e tem como objetivo proteger portos, píers e até mesmo cidades do avanço do mar. Dessa forma, a principal característica desse conversor é a confiabilidade, sendo robusto e preparado para lidar com estresse estrutural, além de apresentar facilidade de construção, operação e manutenção, diminuindo o custo de implementação (ZHANG et al., 2021). Alguns exemplos de conversores fixos de sucesso incluem a planta de Pico em Azores, Portugal, que pode ser vista na Figura 16, e a planta de Mutriku no país Basco, Espanha, conforme Figura 17.

2.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica utiliza de cálculos estatísticos para analisar os metadados de artigos científicos. Seu procedimento padrão inicia com a obtenção dos metadados, informações como: número de citações do artigo, palavras-chave, autor, ano. Em seguida há o tratamento dos dados a partir de ferramenta bibliométrica

Figura 16 – Planta Pico.



Fonte: WEC (2012)

Figura 17 – Planta Mutriku.



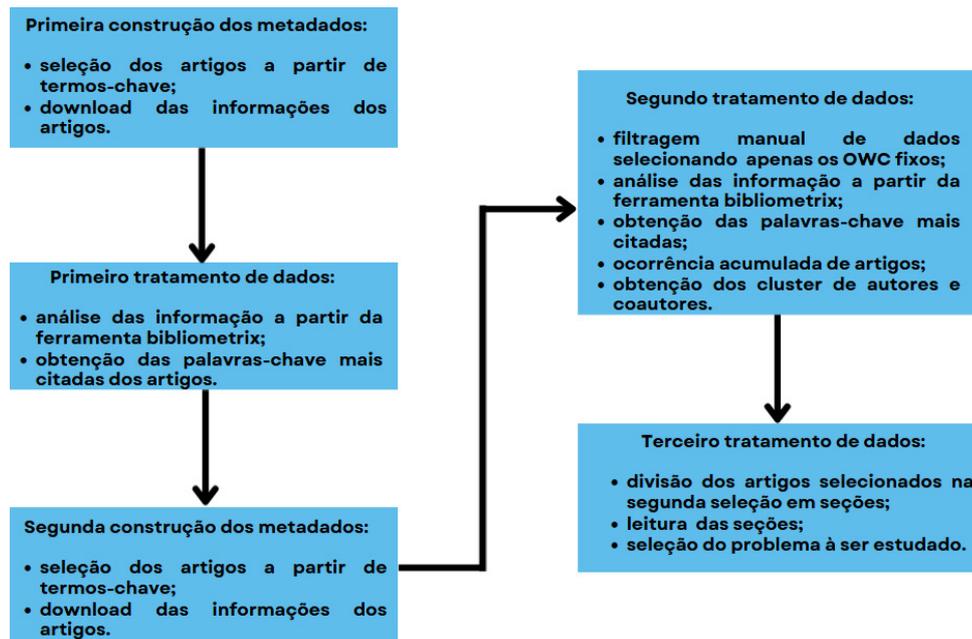
Fonte: OWR (2020)

e por fim a interpretação dos dados. A ferramenta bibliométrica mais utilizada é o bibliometrix, um software em código aberto que utiliza de linguagem R para a análise dos metadados (SILVA, 2021).

O estudo bibliométrico é importante para analisar tendências, número de publicações por anos, países e autores mais influentes em determinado tema, além de artigos e periódicos com maior fator de impacto. Dados importantes para compor pesquisas, além de relizar estudos lexicográficos (SILVA, 2021).

A seleção da geometria do conversor OWC fixo tradicional deu-se a partir da análise bibliométrica de metadados de artigos científicos referentes a energia de onda, disponíveis na plataforma *Scopus*.

Figura 18 – Fluxo de trabalho da análise bibliométrica realizada.

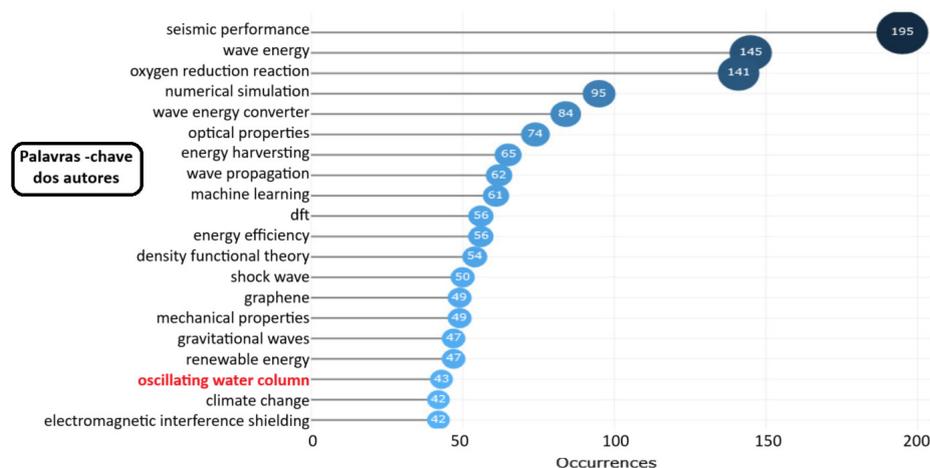


Fonte: modificado de Silva (2021)

O fluxograma apresentado na Figura 18 mostra o passo-a-passo da análise bibliométrica realizada até a seleção do problema a ser desenvolvido.

A primeira construção de metadados adveio das informações de artigos científicos entre 2012 e 2022, a partir da pesquisa dos termos "*wave energy*", com os filtros: *article*, *english*, *journal*. Após o download com a extensão *.CVS* as informações foram tratadas com a ferramenta bibliometrix que gerou o gráfico que pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Palavras-chave de artigos científicos entre 2012 e 2022.

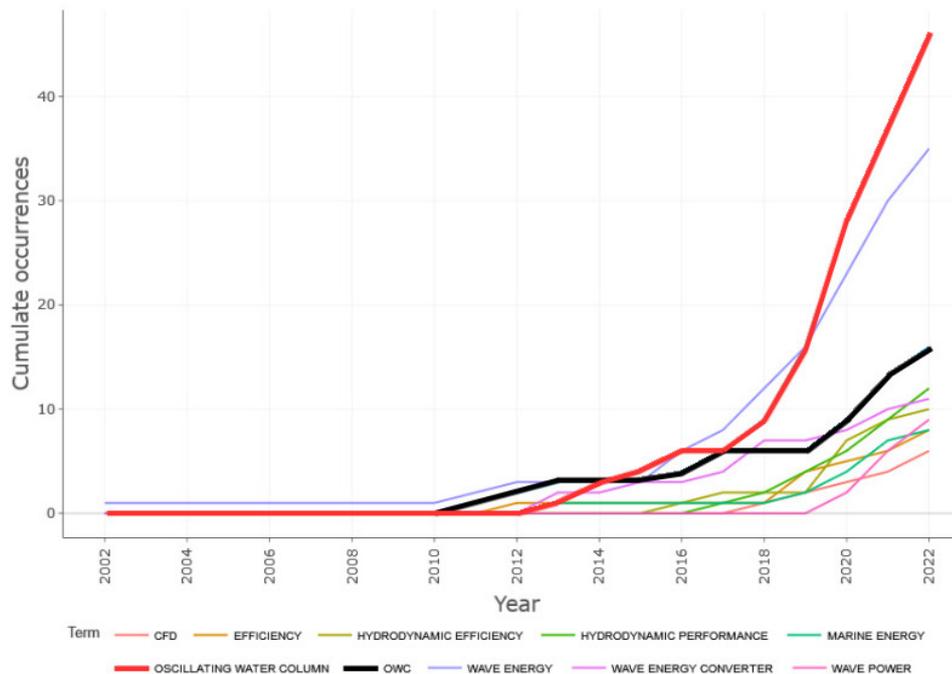


Fonte: autora (2023)

É possível notar na Figura 19 o termo "*oscillating water column*" na lista das vinte palavras-chave mais citadas, mostrando ser um dos conversores mais estudados.

Dessa forma, definiu-se pelo conversor tipo OWC por haver maior bibliografia disponível. Como visto na seção 2.2.3 este conversor se subdivide em tipo fixo e móvel, optou-se por analisar o conversor fixo uma vez que há maior simplicidade na construção do modelo numérico devido a malha fixa.

Figura 20 – Ocorrência acumulada de artigos científicos entre 2002 e 2022.



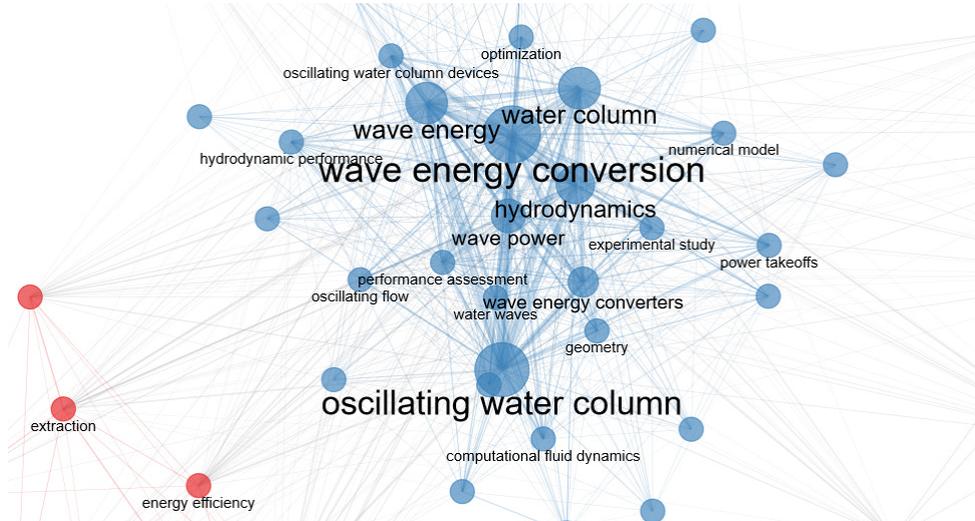
Fonte: autora (2023)

Selecionado o conversor de interesse, construiu-se novamente os metadados, dessa vez referente ao termo "*oscillating water column*", utilizando dos mesmos filtros porém com espaço de 1986 a 2022. O segundo tratamento de dados iniciou com a filtragem manual, de forma a analisar-se apenas os conversores OWC fixos, em seguida os metadados foram tratados pelo bibliometrix retornando os gráficos de ocorrência acumulada, palavras-chave mais citadas e árvore de palavras-chave mais citadas, que podem ser vistos nas respectivas Figuras 20, 21 e 22.

O gráfico 20 mostra o crescimento acumulado da quantidade de artigos referentes ao conversor tipo OWC. É notável o perfil exponencial das pesquisas referentes a esse WEC, note os termos *oscillating water column* e OWC em destaque. O gráfico demonstra não apenas o grande interesse dos pesquisadores neste WEC, mas também o crescimento do interesse referente à energia ondomotriz. Termos como CFD, eficiência, eficiência hidrodinâmica, performance hidrodinâmica tem notável crescimento alido a pesquisas do OWC.

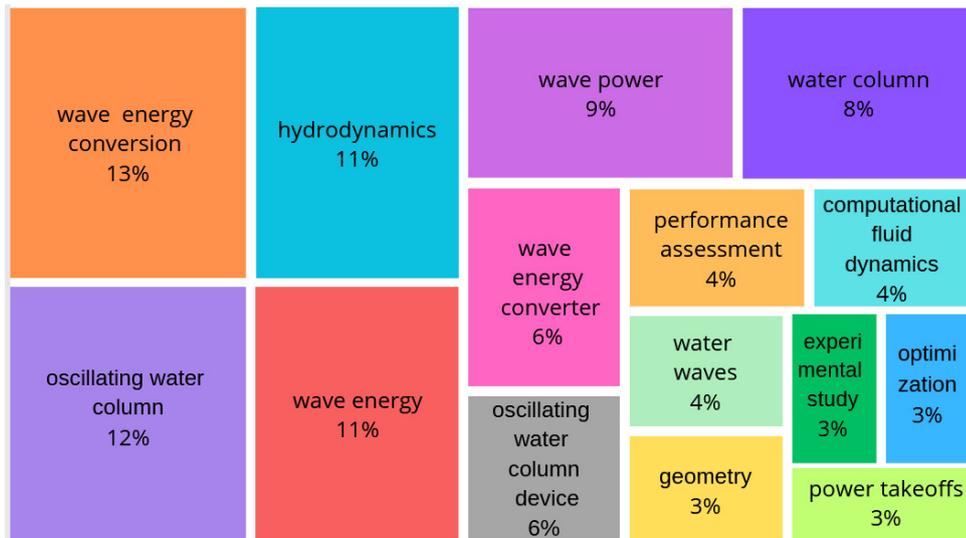
O gráfico 21 traz a densidade das palavras-chave obtidas na segunda construção dos metadados, o tamanho das esferas representativas a cada termo mostra o quão citado o termo foi entre os artigos. É possível ver em destaque palavras-

Figura 21 – Densidade de palavras-chave em artigos científicos entre 1986 e 2022.



Fonte: autora (2023)

Figura 22 – Árvore de palavras-chave mais citadas em artigos científicos entre 1986 e 2022.

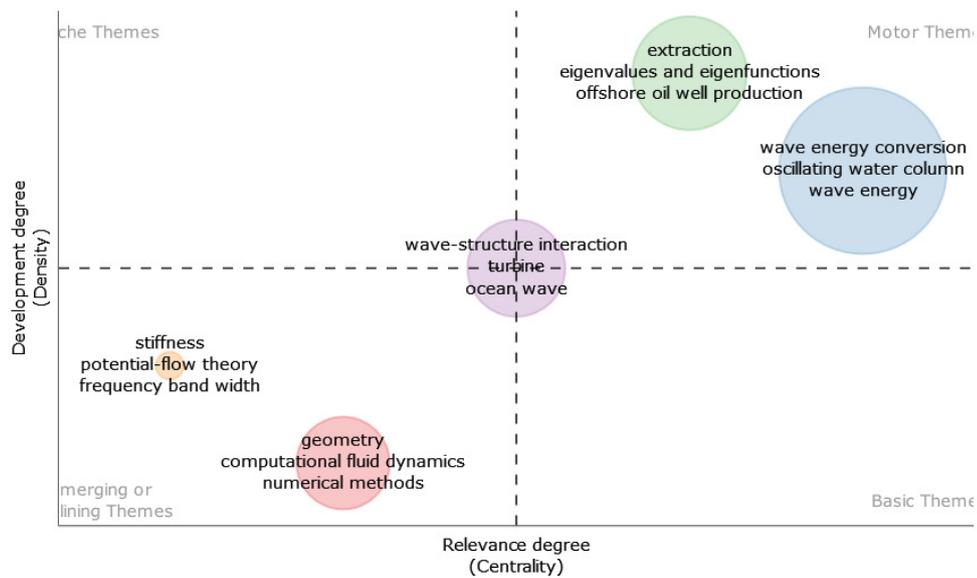


Fonte: autora (2023)

chave, como: hidrodinâmica, otimização, CFD, estudo experimental e *power takeoffs*. A Figura 22 traz a densidade das quinze palavras-chave em % que compõem 100% . Desta forma, é possível notar quantitativamente os parâmetros mais investigados, nota-se que a hidrodinâmica do OWC é estudada por 11% dos artigos, o estudo computacional realizado em 4% deles, enquanto o experimental é aplicado em 3% .

O acoplamento de termos é apresentado na Figura 23, que mostra a densidade de termos nos artigos e como eles se aliam. Observa-se que os termos geometria e dinâmica computacional dos fluidos são por muitas estudados conjuntamente, estando atrelados.

Figura 23 – Acoplamento de termos em artigos científicos entre 1986 e 2022.



Fonte: autora (2023)

Mantendo o objetivo de ter maior bibliografia disponível, optou-se por fazer um estudo hidrodinâmico relacionado a geometria do conversor utilizando de modelo numérico.

Selecionado o tipo de conversor e o problema a ser estudado, a terceira e última etapa de tratamento de dados constituiu-se da divisão dos artigos obtidos na segunda construção de metadados nas seguintes categorias: câmara, fatores geométricos, degrau, parede, diversos e OWC. Realizou-se a leitura dos artigos de forma a entender com propriedade as adversidade e problemáticas envolvendo o conversor OWC e seu funcionamento, para assim melhor desenvolver o estudo a ser empregado.

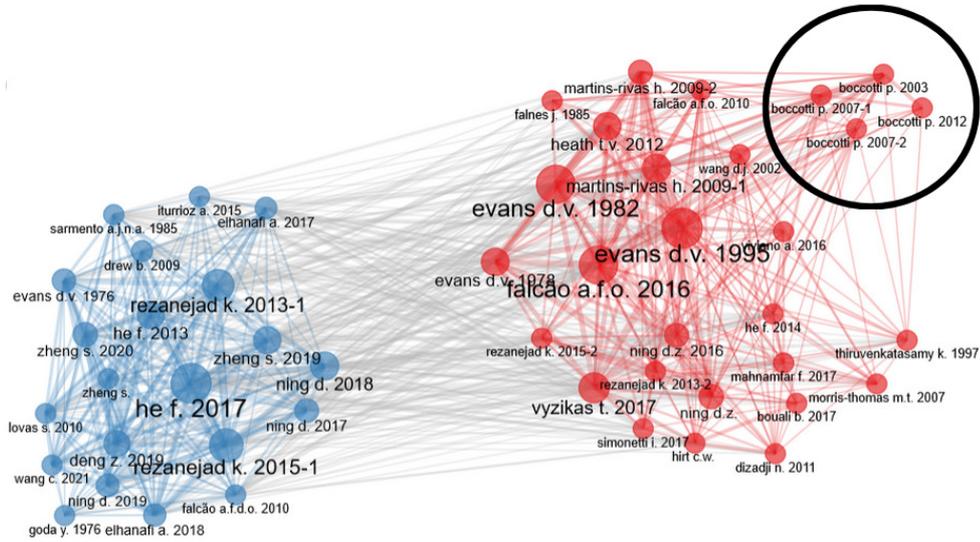
A leitura dos artigos além de contribuir para entender o comportamento do aparelho e as variáveis que mais influenciam no processo de conversão de energia, mostrou quais as tendências de pesquisas atuais e quais os artigos mais influentes no meio.

De modo a compreender melhor o comportamento do OWC e sua interação com o ambiente, além da facilidade de implementação, a geometria selecionada foi de um OWC fixo tradicional. O conversor apresenta um fundo chato, com parede frontal reta e uma câmara de ar com saída no topo. As plantas de Pico e Mutriku, apresentadas nas imagens 16 e 17, são exemplos de OWC fixo tradicional.

A seleção do artigo base que propusesse a geometria deu-se com a utilização do gráfico de colaboração de autores e co-autores entre os artigos mais influentes de 1986 a 2022, que pode ser visto na Figura 24.

O gráfico 24 mostra os artigos mais citados e a rede de colaboração entre os autores. O tamanho das esferas representativas mostram o quão citados os artigos

Figura 24 – Colaboração de autores e co-autores entre os artigos científicos mais influentes de 1986 a 2022.



Fonte: autora (2023)

foram, e as linhas representam a rede de citação entre os artigos. Há dois clusters bem definidos entretanto nota-se que eles se relacionam de forma próxima formando uma rede de colaboração.

Observou-se uma grande relevância na série de artigos referentes ao *oscillating water column* escritos por Paolo Boccotti, em destaque na Figura 24. Seus artigos apresentam estudos teóricos, numéricos e experimentais quanto ao comportamento hidrodinâmico de um OWC fixo tradicional e geometricamente otimizado. Desta forma, a geometria selecionada foi descrita pelo autor e pode ser vista na Figura 25.

A geometria proposta por Boccotti (2007) foi simulada usando o modelo de Borgman (1967), que baseia seu estudo na teoria de ondas lineares. O OWC foi sujeito a ondas regulares de um a seis metros de altura significativa com diferentes períodos, algumas das ondas propostas no estudo são semelhantes as encontrados na região Sul do Brasil, de acordo com Lisboa et al. (2018), um dos motivos para o desenvolvimento do modelo numérico da geometria. O autor analisou o WEC hidrodinamicamente quanto ao seu coeficiente de absorção de energia (A_{bs}), sua equação pode ser vista em 12.

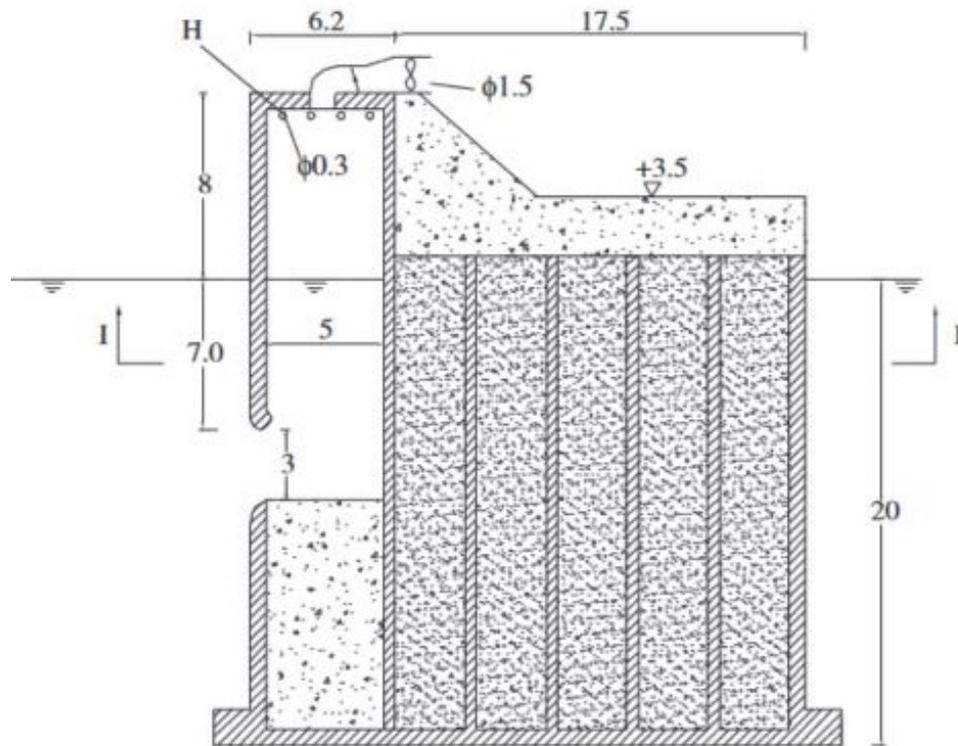
$$A_{bs} = \frac{\tilde{F}_{OWC}}{\tilde{F}} \quad (12)$$

$$\tilde{F}_{OWC} = \frac{BL}{T} \left[P(0)\zeta(0) - P(T)\zeta(T) + \int_0^T \zeta(t) \frac{dP}{dt} dt \right] \quad (13)$$

$$\zeta(t) = H_{OWC} - h - \xi(t) \quad (14)$$

O coeficiente A_{bs} relaciona o fluxo de energia transformado pelo conversor

Figura 25 – Geometria selecionada, unidades em metros.



Fonte: Boccotti (2007)

com o fluxo de energia das ondas. Em que o fluxo de energia das ondas é dado pela equação 8, descrito na seção 2.1, e o fluxo de energia do conversor é expresso pela equação 13, proposta por Boccotti, Filianoti e Fiamma (2007). Note que B é o comprimento da câmara de ar, L é a largura da câmara, P é a pressão hidrodinâmica no centro da entrada de água e $\zeta(t)$ é o altura da câmara de ar em cada instante de tempo obtido através da expressão 14 em que H_{OWC} é a altura do conversor e $\xi(t)$ é a função que descreve a superfície livre no conversor.

2.4 MODELO NUMÉRICO

2.4.1 Equações governantes

As equações governantes são formas matemáticas de expressar fenômenos físicos. Normalmente representadas em forma diferencial, as expressões usualmente representam balanço ou equilíbrio entre dois termos (PATANKAR, 1980).

Os softwares CFD (*computational fluid dynamics*) utilizam de aproximações das equações governantes para simular problemas reais. As equações utilizadas são baseadas nas seguintes leis, segundo Versteeg e Malalasekera (2007):

- Lei da conservação: a massa de um sistema não se altera com o tempo, conforme

expressão 15;

$$\frac{dm_{sis}}{dt} = 0 \quad (15)$$

- Segunda lei de Newton: a variação da quantidade de movimento de um sistema é igual a força resultante aplicada no mesmo, de acordo com a equação 16;

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (16)$$

- Primeira lei da termodinâmica: a variação da energia do sistema é a soma das energias externas que se deslocam pelas fronteiras do sistema, de acordo com 17.

$$\frac{dE_{sis}}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (17)$$

Em que m_{sis} é a massa no sistema, V representa a velocidade, E_{sis} a energia interna do sistema, Q é a quantidade de calor fornecido ao sistema e W é o trabalho realizado (CUENCA, 2007).

A simulação de um OWC fixo versa sobre uma simulação bidimensional multifásica com utilização de dois fluidos. Assim, os solvers para esta aplicação utilizam apenas da primeira lei da conservação e da segunda lei de Newton.

Sabe-se que a simulação numérica calcula a aproximação das leis governantes sob um dado volume de controle. Assim, é necessário converter a equação de um sistema em uma equivalente para um volume de controle. Esta equivalência é feita através do Teorema do Transporte de Reynolds (TTR), sua expressão pode ser vista em 18 (PRITCHARD, 2011).

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_{sistema} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \eta \rho dV + \int_{CS} \eta \rho d\vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (18)$$

Onde a mudança de uma propriedade extensiva N de um sistema implica na variação dessa propriedade em dado volume de controle (PRITCHARD, 2011). Em que η representa a propriedade intensiva relacionada a N .

Aplicando o Teorema do Transporte de Reynolds a equação da conservação da massa, obtem-se a expressão 19 que é a equação da continuidade em um ponto do fluido compressível. Representa, desta forma, o fluxo de massa entrando e saindo no volume elementar (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Convém para algumas aplicações a consideração de fluido incompressível, onde ρ é constante, neste caso $\nabla \vec{V} = 0$, e assim a equação da continuidade segue a equação 20 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{V} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

Note que u , v e w são as componentes da velocidade nas coordenadas x , y e z , respectivamente.

Quanto a segunda lei de Newton, é importante analisar que há dois tipos de força atuando no volume elementar: as forças de superfície e as forças de corpo. As forças de superfície envolvem forças viscosas e de pressão, enquanto as forças de corpo são relativas a força gravitacional, centrífuga, Coriolis e eletromagnética (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Aplicando o TTR na equação da segunda lei de Newton obtém-se as equações diferenciais 21, 22 e 23 referentes a quantidade de movimento nas respectivas coordenadas x , y e z .

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (21)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (22)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (23)$$

Convém citar que p é a pressão, S representa as forças de corpo e τ é o tensor tensão viscoso. As tensões viscosas são compostas pelas tensões normais e cisalhantes devido ao escoamento do fluido, em fluidos Newtonianos são representadas pela equação 24. Em que μ é a viscosidade dinâmica do fluido, \mathbf{I} é o tensor identidade e \mathbf{S} é a parte simétrica do tensor taxa de deformações, de acordo com equação 25 (ROSA, 2023).

$$\tau_{ij} = - \left[\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right] \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{S} \quad (24)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \left(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T \right) \quad (25)$$

Problemas referentes a geração de ondas utilizam de dois fluidos newtonianos, isotérmicos e imiscíveis: água e ar. O modelo multifásico, também chamado VOF, resolve simulações numéricas de escoamento de duas ou mais fases utilizando do modelo Euler-Euler ou Euler-Lagrange (ZERWAS, 2017). O VOF do olaFlow é baseado no VOF do solver interFOAM e resolve as equações de Navier-Stokes, que podem ser vistas em 26, 27 e 28.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} u) + S_{Mx} \quad (26)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} v) + S_{My} \quad (27)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} w) + S_{Mz} \quad (28)$$

Na abordagem Euler-Euler, utilizada no olaFlow, as fases do escoamento são consideradas meios contínuos impenetrantes, e cada fase é modelada pela equação

de conservação da massa e quantidade de movimento, respectivas expressões 29 e 30. Além disso, a interação entre as fases ocorrem por meio de termos de troca de momento, conforme expressão 31 (ZERWAS, 2017).

$$\frac{\partial(X_a \rho_a)}{\partial t} + \nabla(X_a(\rho_a \vec{u}_a)) = S_a \quad (29)$$

$$\frac{\partial(X_a \rho_a \vec{u}_a)}{\partial t} + \nabla(X_a(\rho_a \vec{u}_a \vec{u}_a)) = -X_a \nabla P + X_a \rho_a \vec{g} + X_a \nabla \cdot \tau_a^- + \vec{M}_{ab} \quad (30)$$

$$\vec{M}_{ab} = \vec{M}_{dc} = \frac{3C_D}{4D_d} X_d \rho_c |\vec{u}_d - \vec{u}_c| (\vec{u}_d - \vec{u}_c) \quad (31)$$

Em que X_a é a fração volumétrica da fase a , c é a fase contínua e d a fase dispersa. ρ_a é a densidade da fase a , \vec{u}_a é o vetor de velocidade e S_a é o termo de produção da fase a . ∇P é gradiente de pressão, \vec{g} é o vetor da gravidade e τ_a^- são as tensões viscosas da fase a . O termo \vec{M}_{ab} refere-se a troca interfacial da quantidade de movimento entre as duas fases, em que C_D é o coeficiente de arrasto da força do líquido, ρ_d é a densidade da fase líquida, D_d é o diâmetro médio de Sauter das gotas de líquido (ZERWAS, 2017).

2.4.2 Método dos volumes finitos

A fluidodinâmica computacional tem a capacidade de prever, mediante simulação numérica, situações reais que ocorrem sob condições definidas. Com baixo custo e produzindo respostas de forma mais rápida e detalhada o CFD representa um grande avanço tecnológico, entretanto, tem suas restrições. Alguns passos são necessário para uma simulação CFD, o primeiro é ter um problema que respeite as leis da física, a partir disso é necessário entender quais as leis descrevem o problema, determinando assim as equações governantes. Na seção 2.4.1 comentou-se sobre a utilização dessas expressões em sua forma diferencial, a próxima etapa é, portanto, descobrir um método que permita o cálculo de aproximações das equações governantes propondo uma solução coerente para o problema proposto (FEM-UNICAMP, 2023).

O método dos volumes finitos, também chamado MVF, propõe a discretização do domínio, divisão em regiões menores os chamados volumes finitos ou volumes elementares, e a obtenção de equações aproximadas a partir de balanços de conservação das propriedades nos volumes finitos (MALISKA, 1995).

O processo de discretização é regido por algumas propriedades, segundo Santos (2020), são elas:

- Conservação: em volumes vizinhos, que compartilham uma face, o fluxo que sai de um pela face compartilhada é o mesmo que entra no outro;
- Convergência: ocorre uma vez que a diferença entre duas iterações é menor que o valor ε determinado pelo usuário;

- Consistência: a solução numérica é consistente uma vez que a solução de todos os pontos do domínio se aproxima da solução exata quando Δt e Δx tendem a 0.

Desta forma, com a malha discretizada o MVF obtém as equações aproximadas ao integrar a equação governante diferencial em sua forma conservativa sobre o volume elementar no espaço e tempo. Essa solução é mais fácil, prática e obtém-se o mesmo resultado que realizar o balanço de propriedade em cada volume elementar. Sendo ainda que a depender da regularidade do volume de controle e das equações governantes do problema o levantamento de propriedades pode ser difícil e custoso, um exemplo é o balanço de quantidade de movimento que necessita da identificação do somatório das tensões atuantes no volume de controle (MALISKA, 1995).

Assim, é possível resumir o método dos volumes finitos em 5 passos, de acordo com Santos (2020), são eles:

1. Discretização do domínio, criando a malha a ser simulada;
2. Integração das equações de governo diferenciais no espaço e tempo com base na malha;
3. Aproximação das propriedade de interesse e suas derivadas utilizando funções de interpolação de forma a gerar equações algébricas;
4. Aplicação das condições de contorno do problema;
5. Resolução do sistema de equações algébricas obtido encontrando a solução numérica.

3 MÉTODO

Aqui serão apresentados o software olaFlow em 3.1, o índice GCI na seção 3.2 e a construção do caso numérico em 3.3.

3.1 OLAFLOW

O olaFlow é um solver bifásico baseado no solver interFOAM pertencente ao software openFOAM (OLAFOAM, 2016). O openFOAM é um software CFD gratuito de código aberto, com casos base em linguagem C++ que permite a simulação numérica de problemas de turbulência, dinâmica dos fluidos, eletromagnético, reações químicas e combustão. Além de permitir a solução numérica o openFOAM tem bibliotecas de geração de malha (blockMesh e snappyHexMesh), decomposição e reconstrução de malha e amostragem de dados (gauges e probes) (HIGUERA; LARA; LOSADA, 2013).

O interFOAM é um dos solvers inclusos no openFOAM e de forma simples é capaz de gerar complexas configurações de superfície livre, uma vez que não envolvam movimentações na malha. Entretanto, perde sua acurácia quando a tensão superficial aumenta (HIGUERA; LARA; LOSADA, 2013).

O olaFlow foi desenvolvido para solucionar problemas envolvendo geração e absorção de ondas. Em estrutura semelhante ao openFOAM apresenta tutoriais base e dois solvers: olaFlow e olaDyMfoam, contando com 6 teorias de onda que podem ser vistas na Tabela 2. A escolha da teoria de onda vem de acordo com o imagem 26, que utiliza dos parâmetros da onda e profundidade do local em que o problema está sendo desenvolvido para sua determinação.

Um dos problemas envolvendo a simulação de ondas é a reflexão de ondas. Este fenômeno interfere nas ondas a serem geradas e comprometem o resultado da simulação. Para evitar a reflexão o olaFlow utiliza de absorção ativa na entrada e saída de fluxo nos limites da malha (CONDE, 2019).

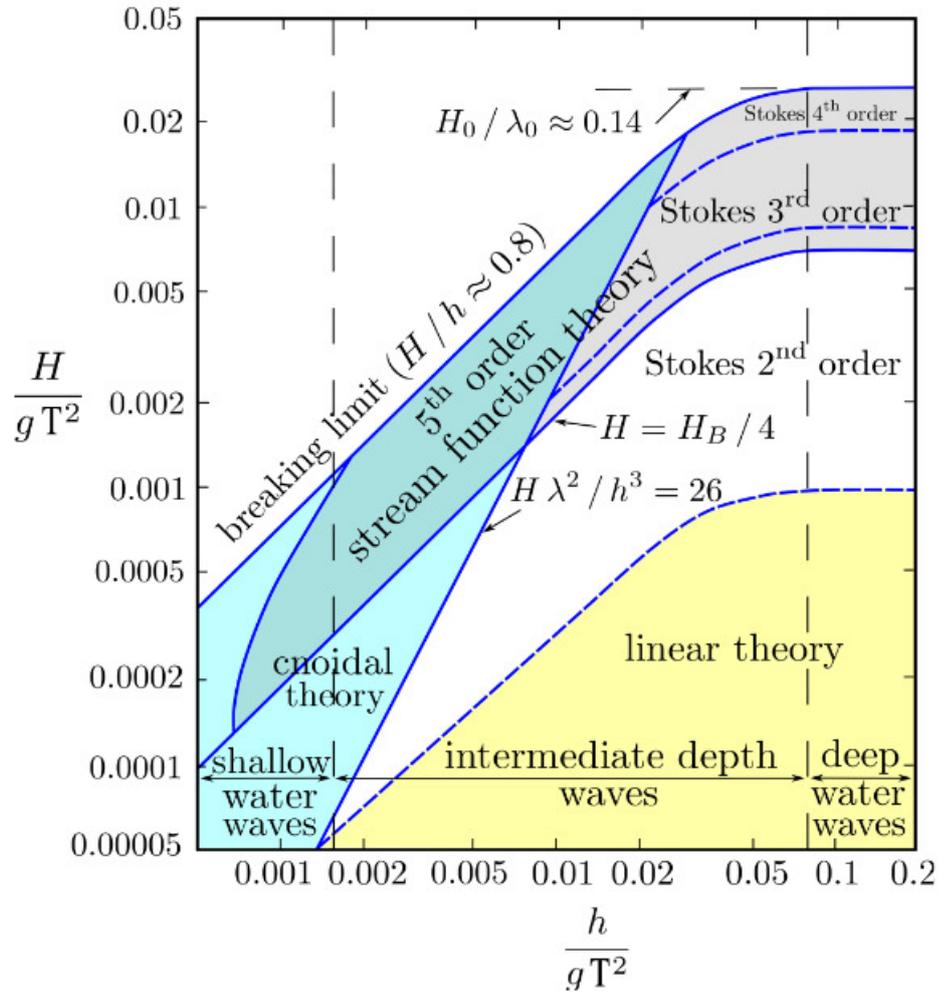
A absorção 2D segue o modelo de Schaffer and Klopman (2000) que baseia-se

Tabela 2 – Teorias de onda.

Teoria de Onda	Referência
Stokes I e II	Dean and Dalrymple (1991)
Stokes V	Skjelbreia and Hendrickson (1960)
Cnoidal	Svendsen (2006)
Streamfunction	Fenton (1988)
Solitary wave	Lee et al. (1982)

Fonte: OLAFOAM (2016)

Figura 26 – Aplicabilidade das teorias de onda.



Fonte: OLAFOAM (2016)

na teoria linear de águas rasas e mostra relativo bom comportamento para ondas fora do intervalo de águas rasas (OLAFOAM, 2016). As malhas Quasi-3D utilizam de uma correção da teoria 2D de absorção, já a teoria 3D, que mostrou taxa geral de reflexão menor que 10% é original e mostrou bom desenvolvimento apenas nos ângulos 0° e 90° , tendo comportamento intermediário nos outros, de acordo com Higuera, Lara e Losada (2013).

3.2 ÍNDICE GCI

O índice *GCI* (*Grid Convergence Index*) calcula a convergência entre as malhas, de forma a analisar a influência do refino de malha no resultado obtido (SANTOS et al., 2022). Um passo a passo é descrito baseado nas propriedades de três malhas com três graus de refino e no resultado numérico por elas obtido (CELIK et al., 2008).

O r é a primeira variável a ser estimada, relaciona-se ao tamanho da malha,

sendo a relação entre a malha mais grossa e a mais refinada, conforme 32. Assim, para as três malhas tem-se $h_1 < h_2 < h_3$. Onde h_1 refere-se a malha grossa e h_3 a refinada. É recomendável que o fator de refino seja de no mínimo 1,3 (CELIK et al., 2008).

$$r_{21} = \frac{h_1}{h_2} \quad (32)$$

ϕ refere-se a variável de interesse, ε_{ij} é a variação do resultado de ϕ , conforme expressão 33. p é a ordem aparente, calculada conforme equação 34, que depende de $q(p)$ e s . Para o caso de r constante $q(p) = 0$.

$$\varepsilon_{ij} = \phi_i - \phi_j \quad (33)$$

$$p = \frac{1}{\ln r_{21}} |\ln |\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad (34)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (35)$$

$$s = \text{sign}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad (36)$$

As equações do valor extrapolado, erro extrapolado e aproximado além do índice GCI podem ser vistas em 37, 38, 39 e 40.

$$\phi_{ext}^{ij} = (r_{ij}^p \phi_j - \phi_i) / (r_{ij}^p - 1) \quad (37)$$

$$e_{ext}^{ij} = \left| \frac{\phi_{ext}^{ij} - \phi_j}{\phi_j} \right| \quad (38)$$

$$e_a^{ij} = \left| \frac{\phi_j - \phi_i}{\phi_j} \right| \quad (39)$$

$$GCI_{fine}^{ij} = \frac{1,25 e_a^{ij}}{r_{ij}^p - 1} \quad (40)$$

3.3 CONSTRUÇÃO DO CASO NUMÉRICO

A construção de um caso numérico pode ser dividida nos seguintes passos, segundo Siebert e Salazar (2022):

1. escolha de um modelo (solver);
2. criação da estrutura de arquivos;
3. criação da malha;
4. especificação das condições de contorno;
5. especificação de parâmetros físicos;
6. configuração do solver e parâmetros numéricos;
7. adição de funções de cálculo;
8. execução da simulação;
9. pós-processamento.

Tabela 3 – Características das ondas simuladas.

Altura significativa de onda (m)	Período de onda (s)	Teoria de onda
0,50	6,00	Stokes II
1,00	4,05	Stokes I
1,00	4,05	Stokes II
1,50	4,97	Stokes II

Fonte: autora (2023)

Para o problema do OWC fixo sujeito a ondas regulares a utilização do software CFD *olaFlow*, torna a escolha do solver automática, já que o solver *olaFlow* simula a geração e absorção de ondas em malhas estáticas (OLAFOAM, 2016). Utilizou-se do tutorial *BASEWAVEFLUME* disponibilizado pelo software para determinar a estrutura de arquivos, os parâmetros físicos além das configurações de solver e parâmetros numéricos. Uma vez que este caso gera ondas regulares em 2D e utiliza dos fluidos água e ar, sem a adição de porosidade.

O escoamento foi considerado laminar de forma a simplificar o modelo de estudo, levando também em consideração que Boccotti (2007) desconsiderou efeitos viscosos, dessa forma a modelagem simplificada do escoamento não impactaria significativamente na solução.

Uma das facilidades do *olaFlow* é a geração de ondas, requer-se apenas: altura significativa, período e a teoria de geração de ondas que simula o problema. As características das ondas simuladas, assim como a teoria de geração de ondas utilizada para as simulações podem ser vistas na Tabela 3. A simulação da onda de um metro de altura proposta por Boccotti (2007) com a utilização da teoria Stokes I se deu de forma a comparar o resultado com a literatura base.

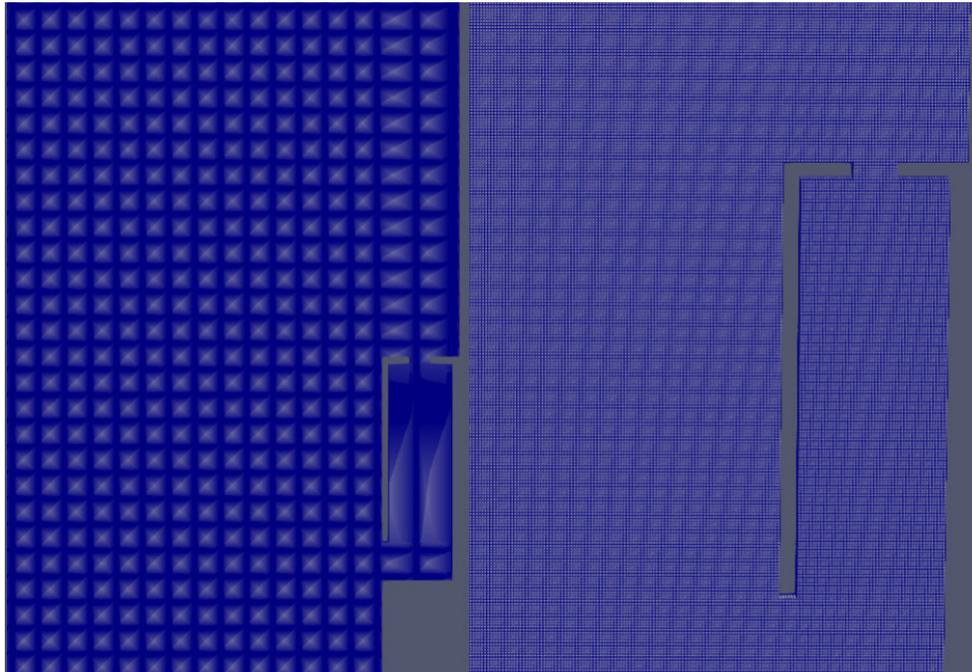
As ondas selecionadas para incidir no conversor foram retiradas do artigo de Lisboa et al. (2018) que simulou a implementação de um OWC fixo na região Sul do Brasil. A ocorrência percentual dos valores de altura significativa de ondas e seus respectivos períodos podem ser vistos na Figura 29.

A malha foi gerada com ferramenta *blockMesh* que secciona o domínio em blocos hexaédricos (SIEBERT; SALAZAR, 2022). Foram criadas malhas com volumes elementares quadrados com diferentes graus de refino, que podem ser vistos na Tabela 4. A construção das três malhas se deu para a posterior comparação do erro atrelado ao refino da malha e o quanto ele afetou o resultado final. A Figura 27 apresenta a malha intermediária gerada para a simulação, e a Figura 28 mostra com maior riqueza de detalhes a região da entrada de água e câmara de ar na malha intermediária.

As condições de contorno do problema, foram estabelecidas de acordo com o problema físico e a geometria proposta por Boccotti (2007), tendo como modelo o tutorial base, é possível vê-las na Figura 30.

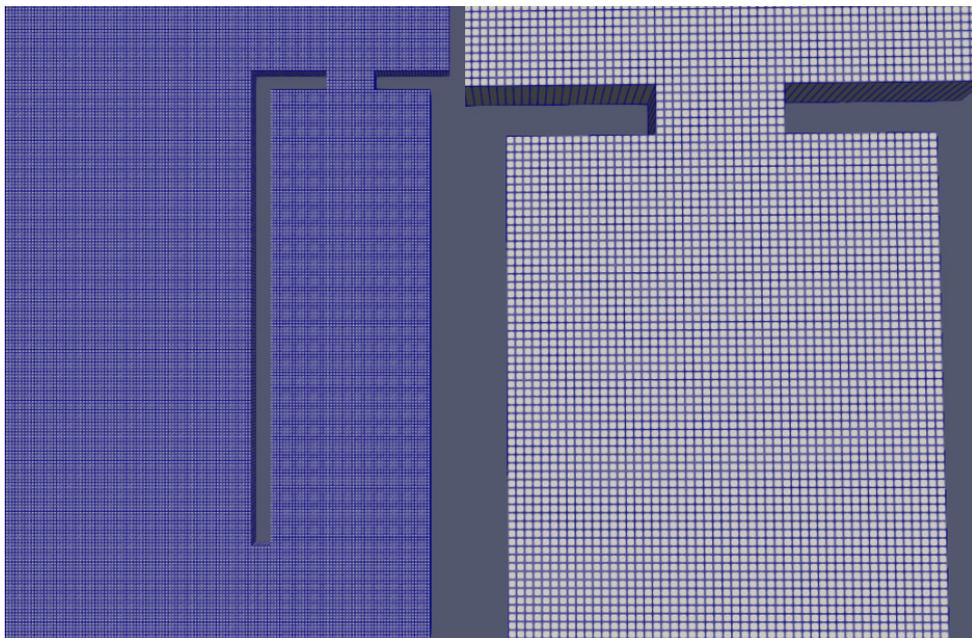
Note que na condição *inlet* onde ocorre a geração das ondas, *wall* é restrito aos

Figura 27 – Malha intermediária gerada.



Fonte: Autora (2023)

Figura 28 – Malha intermediária, detalhes da câmara de ar.



Fonte: Autora (2023)

limites da malha, como as paredes do conversor e o fundo do mar, por fim *atmosphere* que representa a região com predominância do fluido ar.

Adotou-se para a pressão a condição de *FixedFluxPressure* com valor uniforme 0 nas condições de contorno *inlet* e *wall* e a condição *totalPressure* com p_0 nula para *atmosphere*. Referente a velocidade utilizou-se *waveVelocity* na condição *inlet*,

Figura 29 – Ocorrência percentual de ondas características da região Sul do Brasil.

H (m) \ T (s)	T (s)							
	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5	8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5
0.25 - 0.75	16.84	12.89	7.46	3.99	1.58	0.48	0.07	0.00
0.75 - 1.25	10.73	7.17	3.33	3.81	4.89	3.38	0.91	0.07
1.25 - 1.75	0.06	0.60	1.62	2.12	1.65	2.70	1.86	0.35
1.75 - 2.25	0.00	0.00	0.08	0.46	0.71	0.53	0.76	0.26
2.25 - 2.75	0.00	0.00	0.01	0.02	0.07	0.13	0.15	0.10
2.75 - 3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.05

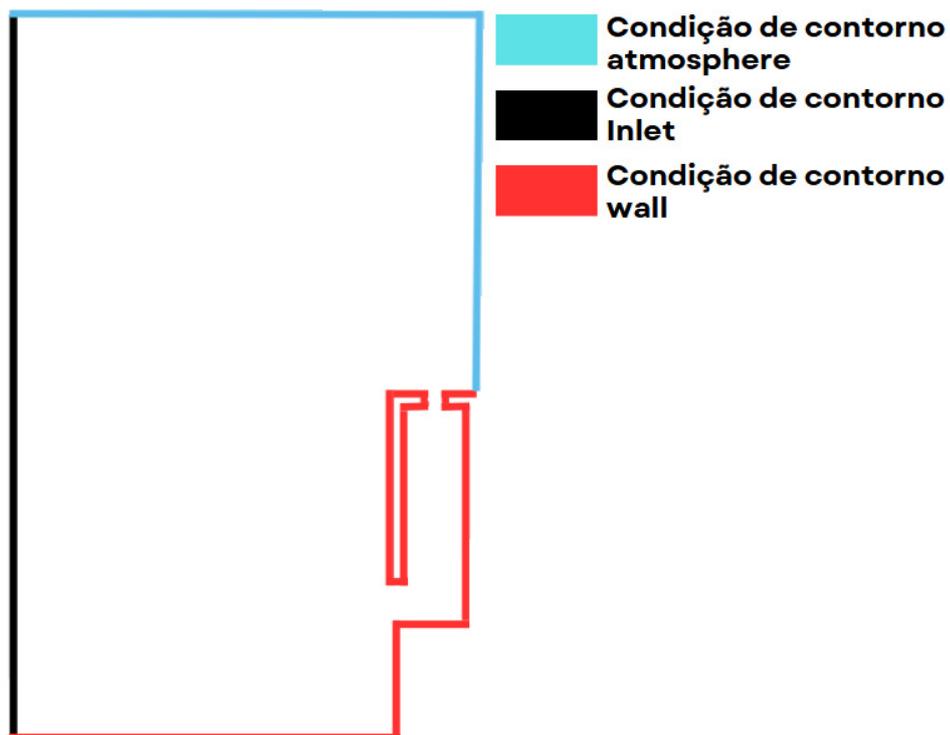
Fonte: Lisboa et al. (2018)

Tabela 4 – Refinos de malha.

Malha	Dimensão lateral
Grossa	0,13
Intermediária	0,10
Refinada	0,07

Fonte: autora (2023)

Figura 30 – Condições de contorno.



Fonte: autora (2023)

e velocidade uniforme nula em *wall* com *FixedValue*, em *atmosphere* utilizou-se *pressureInletOutletVelocity* uniforme nula.

Para o cálculo da altura da câmara de ar e da pressão hidrostática adicionou-se as funções de cálculo *GaugesVOF* e *probes*, que foram responsáveis respectivamente pela determinação da alteração da superfície livre da água no conversor e a medição

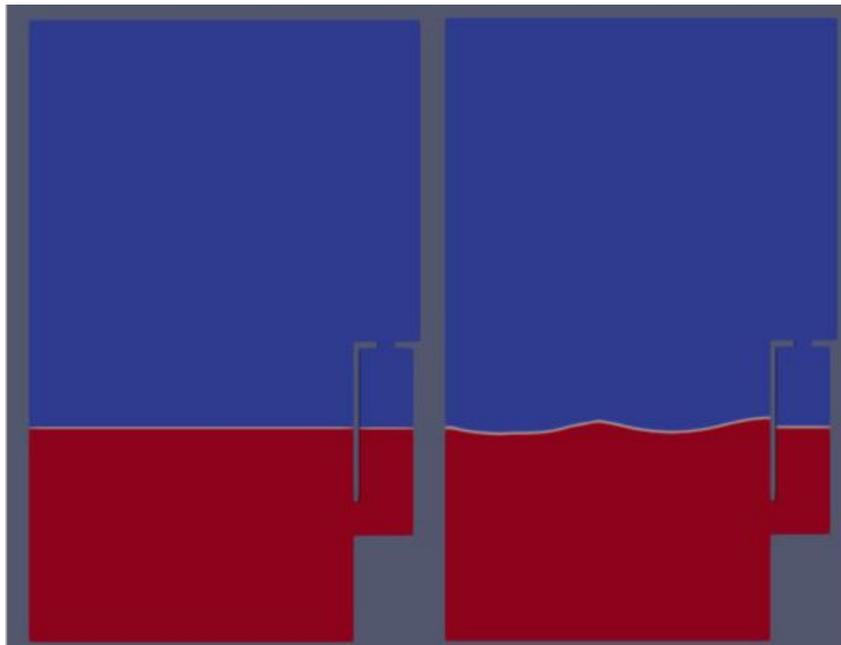
da pressão hidrostática no centro da entrada de água.

A Figura 31 mostra o desenvolvimento da simulação, o momento de início, anterior a formação de ondas, e o momento final com a passagem de ondas e a simulação estabilizada. A variação da superfície livre no conversor com o tempo pode ser vista no APÊNDICE A - Estabilidade das Simulações.

Os dados para o cálculo de \tilde{F}_{OWC} e A_{bs} foram captados após a estabilização da simulação, aumentou-se o período de escrita das pastas de *output* de forma a captar 100 intervalos em um período de onda, em seguida calculou-se numericamente a derivada e a integral presente na equação 13 pela regra do trapézio que pode ser vista em 41.

$$\int_t^{t+T} \zeta(t) \frac{dP}{dt} dt = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(\zeta_{i+1} + \zeta_i)(P_{i+1} - P_i)}{2} \quad (41)$$

Figura 31 – Simulação.

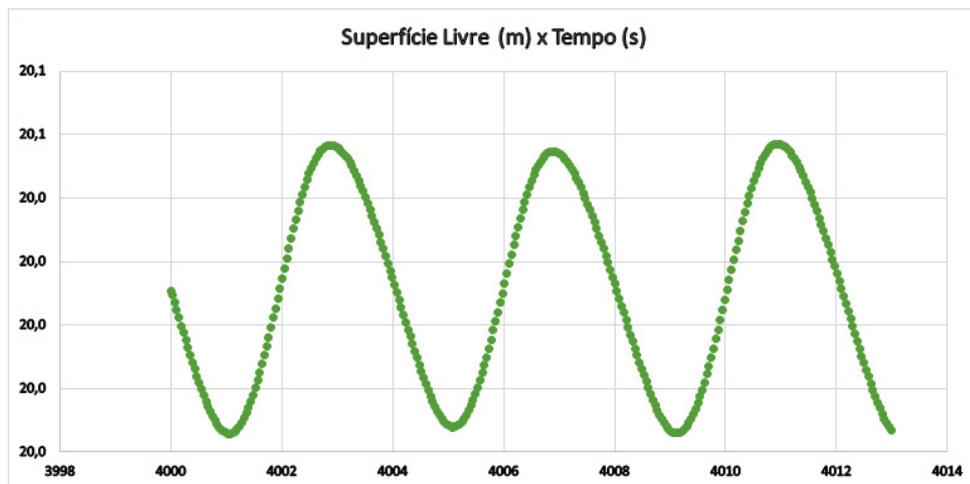


Fonte: autora (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verificou-se para todas as malhas que foi obtido a periodicidade entre a superfície livre do conversor em metros e o tempo da simulação em segundos. A Figura 32 mostra a estabilidade da simulação para a malha intermediária.

Figura 32 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 1,0 m, Stokes I.



Fonte: autora (2023)

Todos os dados foram captados com as simulações devidamente estabilizadas.

A Tabela 5 mostra as variáveis utilizadas para o cálculo do índice GCI, assim como seus valores entre as malhas grossa e intermediária e também intermediária e refinada para as teorias de geração de ondas Stokes I e Stokes II, levando em consideração a simulação para a onda de um metro de altura significativa. Considerou-se como variável de interesse (ϕ) o coeficiente de absorção de energia A_{bs} , e r igual a 1,3.

Observa-se que o índice GCI entre as malhas grossa-intermediária é muito superior ao das malhas intermediária-refinada, sendo respectivamente 6,1% e 0,1% para a teoria Stokes I e 4,5% e 0,1% para Stokes II. Esse resultado demonstra que há impacto do refino da malha na solução numérica entre as malhas grossa e intermediária porém esse impacto é praticamente irrelevante quando se trata das malhas intermediária e refinada.

Boccotti (2007) e Boccotti, Filianoti e Fiamma (2007) investigaram o comportamento hidrodinâmico do OWC utilizando da teoria de geração de ondas Stokes I. A comparação dos resultados obtidos na simulação utilizando a teoria de Stokes I com os dados de Boccotti (2007) podem ser vistos na Tabela 6, que apresenta: o coeficiente de absorção proposto por Boccotti (2007), além do obtido através da

Tabela 5 – Variáveis índice GCI.

	STOKES I	STOKES II
r_{21}	1,3	1,3
r_{32}	1,3	1,3
ϕ_1	10,6	14,3
ϕ_2	26,1	27,9
ϕ_3	26,6	27,4
p	13,09	12,59
ϕ_{ext}^{21}	12,6859	17,2565
ϕ_{ext}^{32}	32,8149	34,9604
e_a^{21}	146,2%	95,1%
e_a^{32}	1,9%	1,8%
e_{ext}^{21}	0,2%	0,2%
e_{ext}^{32}	0,2%	0,2%
GCI_{fine}^{21}	6,1%	4,5%
GCI_{fine}^{32}	0,1%	0,1%

Fonte: autora (2023)

Tabela 6 – Resultados das simulações da onda de 1,0 metro.

Malha	Boccotti (2007)	Stokes I	
	$A_{bs}\%$	A_{bs}	Erro%
Grossa	28,1	10,3	62,3
Intermediária	28,1	26,1	7,1
Refinada	28,1	26,6	5,3

Fonte: autora (2023)

simulação para a malha grossa, intermediária e refinada e o erro relativo entre a resposta numérica e o valor proposto pela literatura base.

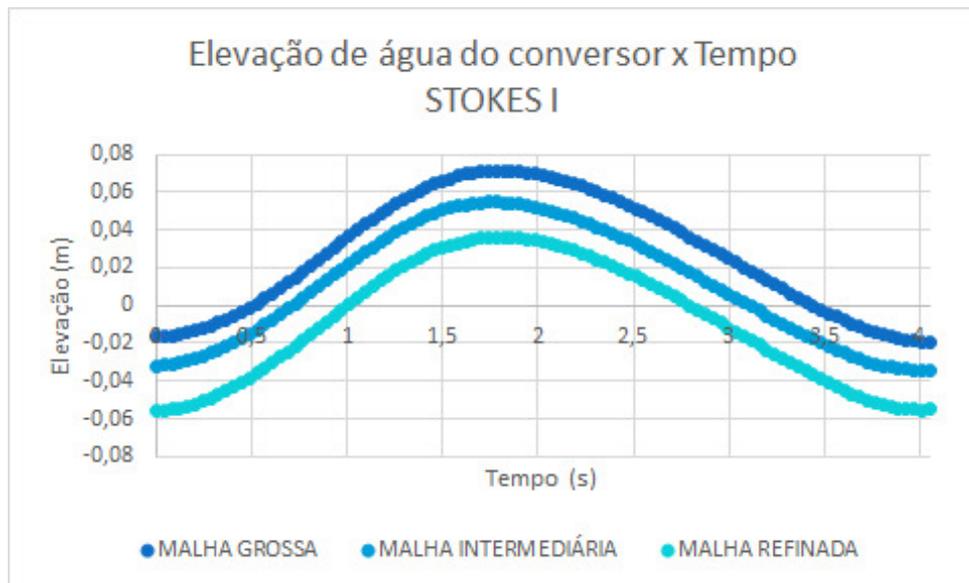
Em relação aos resultados numéricos obtidos é perceptível que a malha grossa mostra valor discrepante das outras malhas em relação ao A_{bs} proposto por Boccotti (2007). Além disso, tem erro percentual muito maior em relação à malha intermediária e refinada, estando acima de 62,0% . A malha intermediária e refinada, entretanto, mostram pouco percentual de erro, estando entre 5,0% e 8,0% .

Apesar da malha grossa mostrar grande erro relativo a A_{bs} observa-se que a curvatura das funções de elevação da superfície livre do conversor das três malhas é semelhante, conforme a Figura 33. A semelhança demonstra a coerência das respostas, mostrando que as três malhas com diferentes refinamentos são capazes de modelar o problema, porém o erro atrelado a resposta depende do custo computacional que se admitir.

Alguns fatores podem ter contribuído para a variação da resposta em relação à literatura, são eles:

1. efeito de reflexão das ondas simuladas;

Figura 33 – Elevação da câmara na simulação com Stokes I.



Fonte: autora (2023)

2. integração numérica com o uso do método do trapézio.

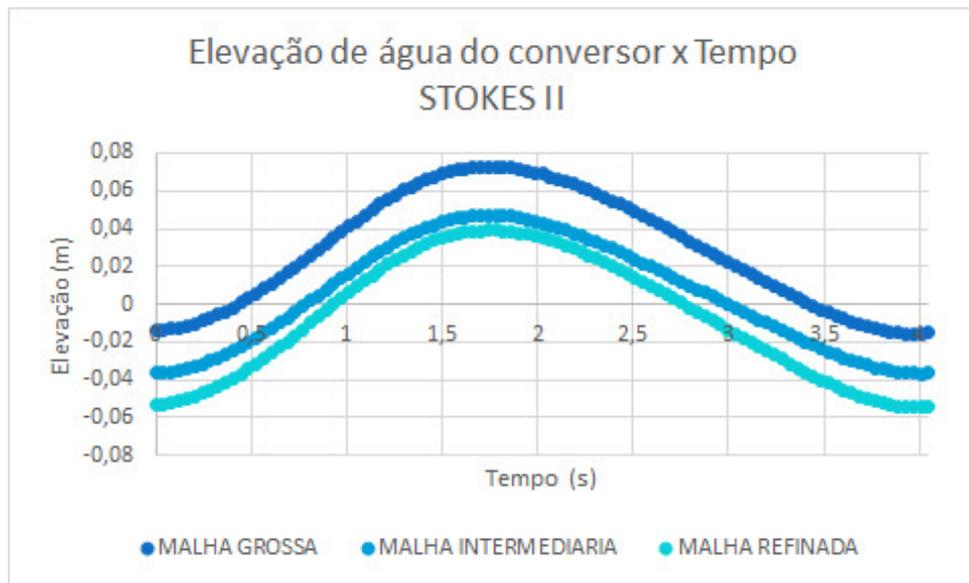
Certos fatores que contribuem ao erro podem ser minimizados, como o da integração numérica, por exemplo. Uma possível solução seria aumentar o intervalo das pastas de *output* para mais que 100 pastas por período, ou ainda, mudar o método de integração. Outros efeitos tem maior complexidade sendo mais difícil de minimizar, como o efeito de reflexão das ondas.

Observou-se, segundo o gráfico 26 disponibilizado pelo olaFlow, que a teoria de geração de ondas a modelar o problema de acordo com as características da onda e a profundidade do local de instalação deveria ser Stokes II. Dessa forma, simulou-se as três malhas (grossa, intermediária e refinada) e calculou-se o índice GCI para onda de um metro de altura significativa, seu resultado pode ser visto em 5 que mostra dados semelhantes aos da teoria de Stokes I, porém uma discrepância menor entre as malhas grossa e intermediária.

O gráfico 34 mostra que a semelhança na curvatura das funções de elevação se mantêm para as três malhas com a utilização da teoria de onda Stokes II, mantendo a conclusão de que a malha grossa modela o problema com menor custo computacional, uma vez que se admita determinado percentual de erro.

O estudo do comportamento do WEC mediante a incidência de ondas se deu com a simulação da malha intermediária, uma vez que apresenta menor custo computacional que a refinada. Os resultados das simulações utilizando a teoria de geração de ondas Stokes II podem ser vistos na Tabela 7, que apresenta o coeficiente de absorção de energia em cada altura de onda e a redução em % de A_{bs} em relação ao coeficiente de absorção de energia da onda de meio metro de altura.

Figura 34 – Elevação da câmara na simulação com Stokes II.



Fonte: autora (2023)

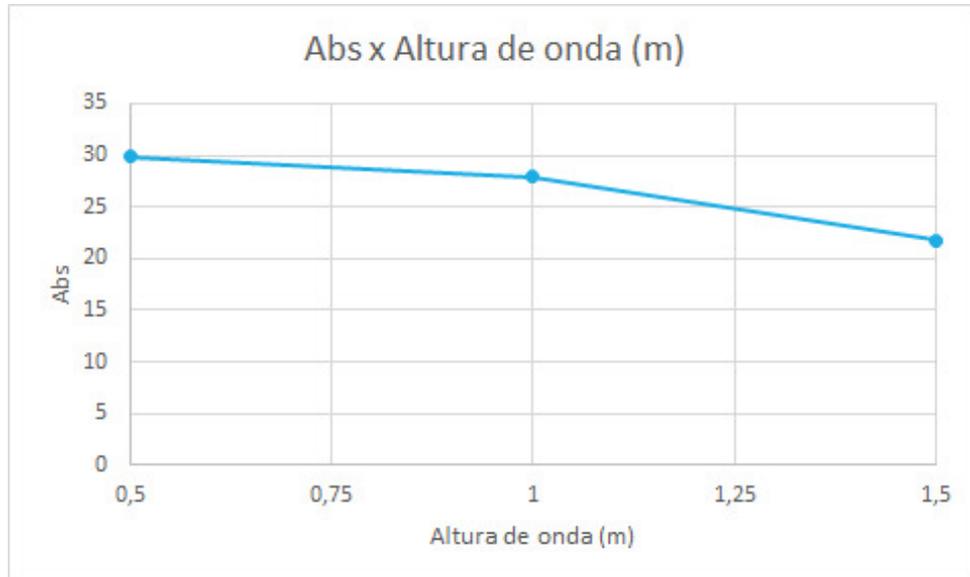
Tabela 7 – Resultados das simulações com Stokes II.

Onda (m)	A_{bs} %	Redução % de A_{bs}
0,50	29,9	0
1,00	27,9	6,7
1,50	21,8	27,1

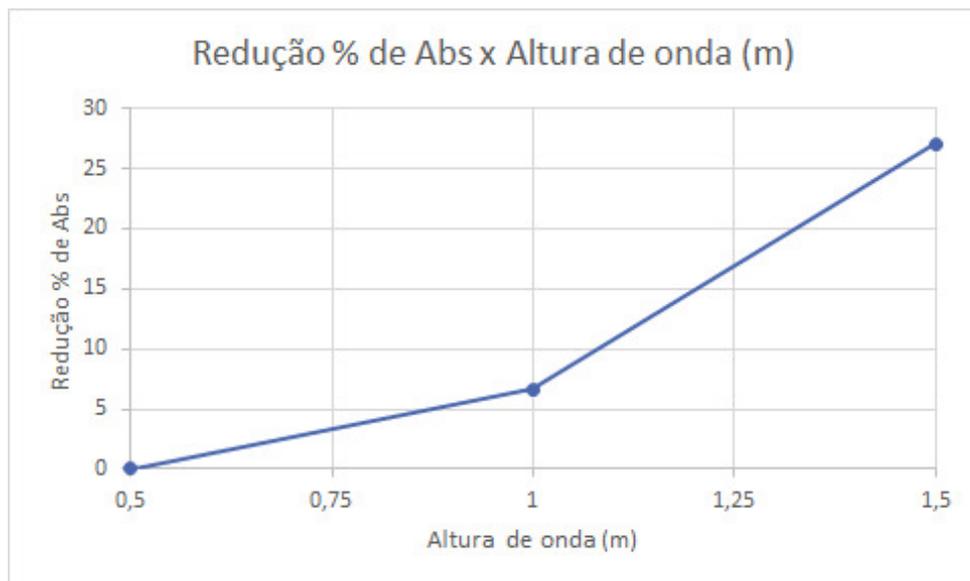
Fonte: autora (2023)

Nota-se que o coeficiente de absorção máximo foi igual a 29,9% e o mínimo 21,8% sendo respectivamente na onda de meio metro e um metro e meio de altura. A curva de A_{bs} nas ondas simuladas pode ser vista em 35, que descreve de forma gráfica os resultados da Tabela 7. Observa-se a queda do coeficiente de absorção de energia com o aumento da amplitude de onda, o que era um comportamento esperado levando em consideração que o aumento da amplitude gera maior criação de vórtices, que dissipam a energia do fluido, e maior reflexão de ondas devido ao impacto com a parede frontal e o fundo do conversor. Além disso, com o aumento da amplitude de onda há maior influência do fundo do mar, diminuindo a estabilidade das ondas e seu o fluxo de energia.

A redução % de A_{bs} em relação ao da onda de meio metro com o a altura de onda pode ser vista no gráfico 36. O crescimento é bastante expressivo principalmente em valores acima de um metro, nota-se que a redução cresce de 5% a quase 30% .

Figura 35 – A_{bs} para casa onda simulada.

Fonte: autora (2023)

Figura 36 – Redução em % de A_{bs} para cada onda simulada.

Fonte: autora (2023)

5 CONCLUSÕES

O índice GCI para as malhas grossa-intermediária foi de de 4,5% para a teoria de geração de ondas Stokes II, e 6,1% utilizando da teoria de onda Stokes I. O menor GCI entrado foi de 0,1% entre as malhas intermediária e refinada, tanto para a teoria de Stokes I quanto Stokes II.

Notou-se maior impacto do refino de malha nas malhas grossa e intermediária que mostrou resultado discrepante em relação ao coeficiente de absorção de energia proposto pela literatura base. O método GCI indicou pouco impacto do refino nas malha intermediária e refinada.

A simulação de onda de um metro de altura utilizando da teoria de Stokes I apresentou erro em relação a literatura de 62,3% para a malha grossa, 7,1% para a malha intermediária e 5,3% para a malha refinada. Mostrando que a modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi capaz de simular o problema do OWC fixo tradicional proposto por Boccotti (2007) com erro menor de 6% .

A teoria de geração de ondas Stokes II foi utilizada para modelar as ondas incidentes do problema, conforme se viu na tabela 3. Foram simuladas ondas de meio metro a um metro e meio de altura, utilizando da malha intermediária desenvolvida. O maior coeficiente de absorção de energia foi 29,9% obtido com a onda de meio metro de altura e o menor foi 21,8% obtido na onda de um metro e meio de altura. A diminuição de A_{bs} devido ao aumento da amplitude de onda era esperado, devido a maior criação de vórtices e reflexão de onda mediante o impacto das ondas na parede frontal e fundo do OWC, além da interação do fundo do mar com as ondas que diminui a estabilidade e o fluxo de energia delas. Observou-se que um rápido crescimento na redução percentual de A_{bs} em relação ao valor obtido para a onda de meio metro a partir da altura de onda de um metro.

Como sugestão de trabalhos futuros, incluiria considerar a o escoamento turbulento no modelo, criar uma curva de eficiência para as ondas típicas da região Sul do Brasil e implementar otimizações geométricas para o OWC fixo estudado.

REFERÊNCIAS

- AP. **AP - Aquamarine Power**. 2023. <https://www.aquamarinepower.com/>. Acessado em 25/10/2023.
- ASHLIN, S. J.; SUNDAR, V.; SANNASIRAJ, S. Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristics. **Renewable Energy**, v. 96, p. 341–353, 2016.
- BOCCOTTI, P. Comparison between a u-owc and a conventional owc. **Ocean Engineering**, v. 34, p. 799–805, 2007.
- BOCCOTTI, P.; FILIANOTI, P.; VINCENZO FIAMMA, F. A. Caisson breakwaters embodying an owc with a small opening—part ii: A small-scale field experiment. **Ocean Engineering**, v. 34, p. 820–841, out. 2007.
- BORGMAN, L. E. Ocean wave simulation for engineering design. **Journal of Waterways and Harbors and Coastal Engineering Division**, 1967.
- CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in cfd applications. **Mechanical and Aerospace Engineering Department**, jul. 2008.
- CONDE, J. M. P. Comparison of different methods for generation and absorption of water waves. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 18, n. 1, p. 71–77, jun. 2019.
- CUENCA, R. G. **Leis de Conservação - Volume de Controle**. [S.l.], 2007. Acessado em 27/10/2023.
- DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK**, jun. 2009.
- EMEC. **EMEC - The European Marine Energy Centre LTDA**. 2023. <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>. Acessado em 25/10/2023.
- FALCAO, A.; HENRIQUES, J.; GATO, L. Rotational speed control and electrical rated power of an oscillating-water-column wave energy converter. **Energy**, v. 120, p. 253–261, 2016.
- FALNES, J. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures**, v. 20, p. 185–201, 2007.
- FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **ResearchGate**, jan. 2011.
- FEM-UNICAMP. **Fluidodinâmica Computacional (CFD)**. 2023. http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/SITE_PHOENICS/AULAS/AULA1/aula1.pdf. Acessado em 12/11/2023.

FOTEINIS, S. Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, n. 112448, jul. 2022.

FUJARRA, A. L. C. **Hidrodinâmica das Ondas de Gravidade**. 1. ed. Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina: Texto de apoio às aulas de Hidrodinâmica Aplicada II, em edição, 83 pg.

HIGUERA, P.; LARA, J. L.; LOSADA, I. J. Realistic wave generation and active wave absorption for navier–stokes models application to openfoam. **Coastal Engineering**, v. 71, p. 102–118, 2013.

INDAILY. **INDAILY**. 2014. <https://indaily.com.au/news/business/2014/04/01/oceanlinx-struggles-stay-afloat/>. Acessado em 26/10/2023.

JU. **Jornal da USP - A energia que vem dos mares**. 2022. <https://jornal.usp.br/artigos/a-energia-que-vem-dos-mares/>. Acessado em 02/11/2023.

KHALIGH, A.; ONAR, O. C. **Energy harvesting : solar, wind, and ocean energy conversion systems**. 1. ed. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: Taylor and Francis Group, LLC, 2010.

KHARKESHI, B. A. et al. Experimental study on the performance of an oscillating water column by considering the interaction effects of optimal installation depth and dimensionless hydrodynamic coefficients for the caspian sea waves characteristics. **Ocean Engineering**, v. 256, n. 111513, 2022.

LISBOA, R. C. et al. Numerical evaluation of the power output of an oscillating water column wave energy converter installed in the southern brazilian coast. **Energy**, v. 162, p. 1115–1124, 2018.

MALARA, G. et al. The influence of three-dimensional effects on the performance of u-type oscillating water column wave energy harvesters. **Renewable Energy**, v. 111, p. 506–522, 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas**. 1. ed. Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor - SINMEC: LTC, 1995.

MJ. **MJ - Maritime Journal**. 2003. <https://www.maritimejournal.com/denmarks-wave-dragon-delivers-power-to-the-grid/485454.article>. Acessado em 25/10/2023.

NING, D. zhi et al. Experimental investigation of a land-based dual-chamber owc wave energy converter. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, n. 1, p. 48–60, jun. 2019.

OLAFOAM. **OLAFOAM reference manual**. [S.l.], 2016.

OPT. **OPT - Ocean Power Tecnology**. 2023. <https://oceanpowertechnologies.com/>. Acessado em 25/10/2023.

OWR. **OWR - Official World Record**. 2020. <https://info-24278.medium.com/the-largest-wave-energy-production-plant-eb51dda90375>. Acessado em 25/10/2023.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. 1221 Avenue of the Americas New York, New York 10020: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1980.

PRITCHARD, P. J. **Fox and McDonald's INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS**. [S.l.]: JOHN WILEY SONS, INC., 2011.

RAHMAN, A.; FARROK, O.; HAQUE, M. M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 161, 2022.

REZANEJAD, K.; BHATTACHARJEE, J.; SOARES, C. G. Stepped sea bottom effects on the efficiency of nearshore oscillating water column device. **Ocean Engineering**, v. 70, n. 1, p. 25–38, jun. 2013.

ROSA, E. **Formulação Diferencial das Equações de Transporte**). 2023. http://www.fem.unicamp.br/~im250/SITE%20IM250/AULAS/Aula-5%20&%206-EQ.%20DIFERENCIAL/Eq_Constitutiva_EqN-S.pdf. Acessado em 14/11/2023.

SANTOS, J. S. **Método dos Volumes Finitos Aplicado à Resolução de Problemas de Difusão de Calor**. 2020.

JESUS SANTOS, P. H. de et al. Estudo de convergência de malha para análise de escoamento gás- líquido utilizando o método gci. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 32586–32599, 2022.

SIEBERT, D. D. N.; JUAN P. L. C. SALAZAR, P. **Introdução ao OpenFOAM Aula 03 - Construindo um novo caso**. [S.l.], 2022. Acessado em 03/11/2023.

SILVA, B. V. da. **Oceanografia Sísmica: uma caracterização do estado-da-arte por meio da análise de metadados de artigos científicos**. 2021.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2. ed. Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, England: Pearson prentice hall, 2007.

WEC. **WEC - Wave Energy Centre**. 2012. https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=SXxvYvWZ5fg&ab_channel=MDDIGITALMUSIC. Acessado em 25/10/2023.

ZERWAS, A. A. **Modelagem e simulação do escoamento em um sistema de lavagem de gases por técnicas de fluidodinâmica computacional**. 2017.

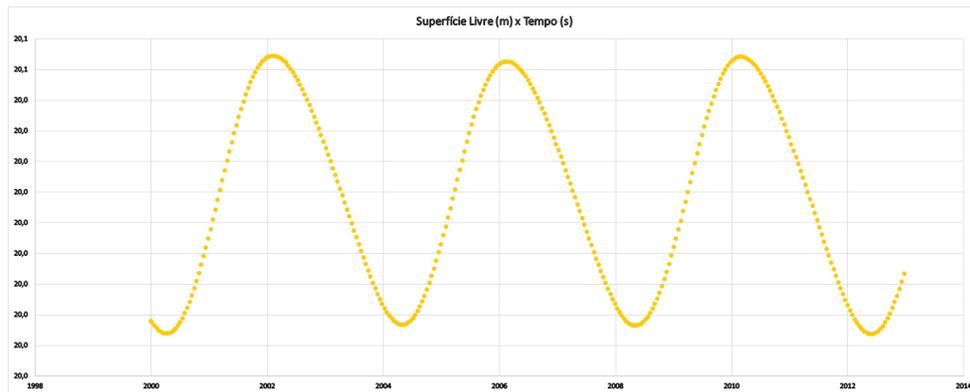
ZHANG, Y. et al. Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, n. 110780, 2021.

ÇELIK, A. An experimental investigation into the effects of front wall geometry on owc performance for various levels of applied power take off dampings. **Ocean Engineering**, v. 248, n. 110761, mar. 2022.

APÊNDICE A - ESTABILIDADE DAS SIMULAÇÕES

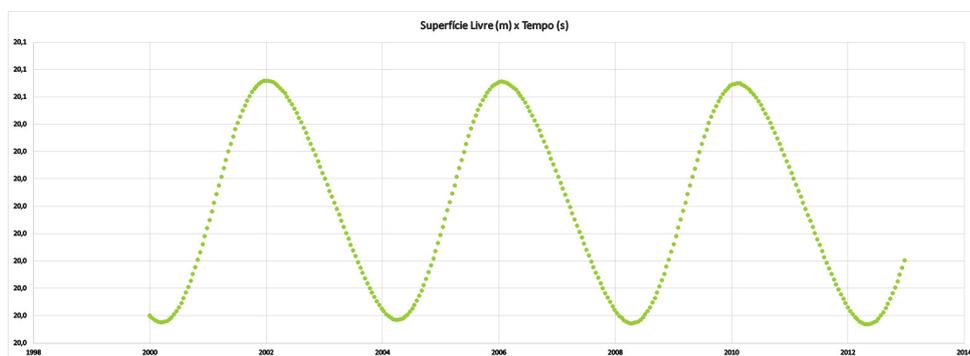
A seguir podem ser vistos os gráficos de variação da superfície livre de água no conversor de acordo com o tempo de duração da simulação.

Figura 37 – Superfície livre (m) x Tempo (s) malha grossa, onda de 1,0 m, Stokes I.



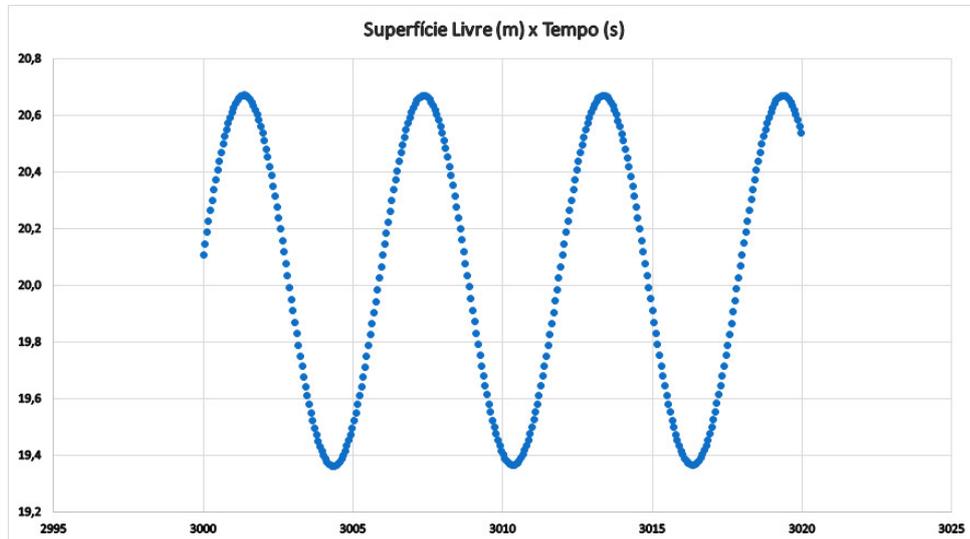
Fonte: autora (2023)

Figura 38 – Superfície livre (m) x Tempo (s) malha grossa, onda de 1,0 m, Stokes II.



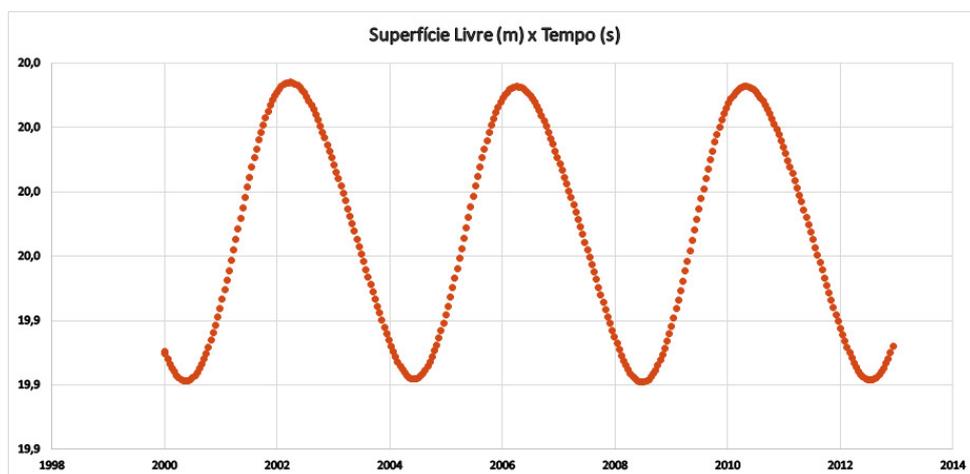
Fonte: autora (2023)

Figura 39 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 1,0 m, Stokes II.



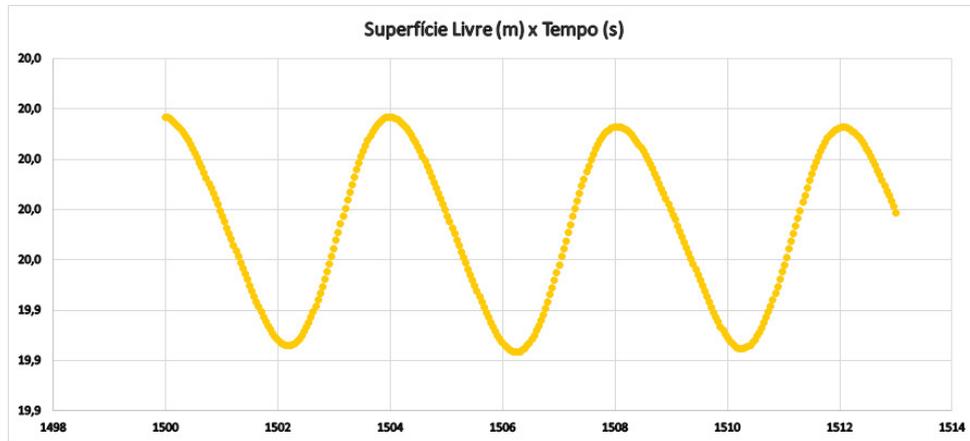
Fonte: autora (2023)

Figura 40 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha refinada, onda de 1,0 m, Stokes I.



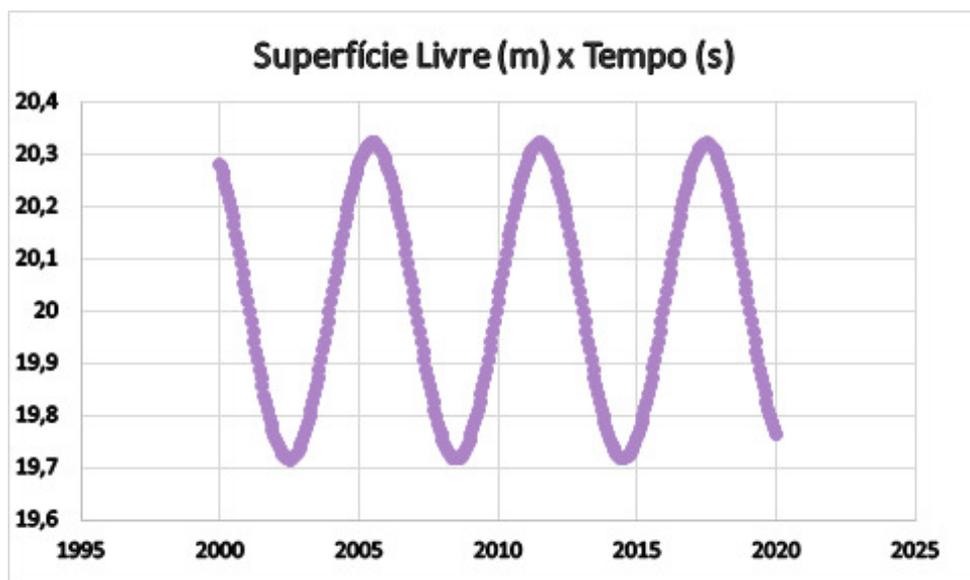
Fonte: autora (2023)

Figura 41 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha refinada, onda de 1,0 m, Stokes II.



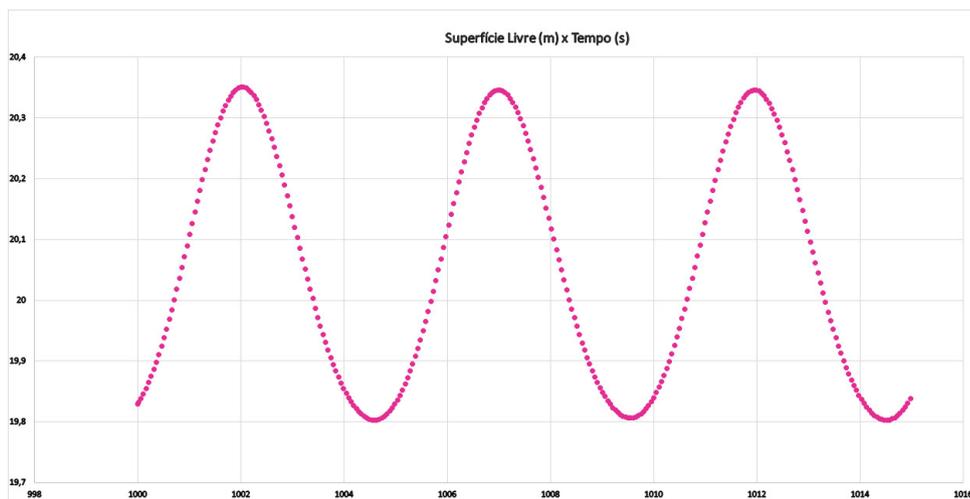
Fonte: autora (2023)

Figura 42 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 0,5 m, Stokes II.



Fonte: autora (2023)

Figura 43 – Superfície livre (m) x Tempo (s), malha intermediária, onda de 1,5 m, Stokes II.



Fonte: autora (2023)