

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO**  
**AMBIENTAL**

**GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS**

**MODELAGEM NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA E GERAÇÃO DE ENERGIA DOS**  
**DISPOSITIVOS OSCILANTES POR TRANSLAÇÃO DE ONDAS**

**PORTO ALEGRE**

**2018**

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

**MODELAGEM NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA E GERAÇÃO DE ENERGIA DOS  
DISPOSITIVOS OSCILANTES POR TRANSLAÇÃO DE ONDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini

Coorientador: Alexandre Beluco

PORTO ALEGRE

2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Fuhrmeister Vargas, Guilherme  
MODELAGEM NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA E GERAÇÃO DE  
ENERGIA DOS DISPOSITIVOS OSCILANTES POR TRANSLAÇÃO  
DE ONDAS / Guilherme Fuhrmeister Vargas. -- 2018.  
119 f.  
Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini.

Coorientador: Alexandre Beluco.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas  
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos  
Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS,  
2018.

1. Modelagem numérica de ondas. 2. OpenFOAM. 3.  
RANS. 4. Oscillating Wave Surge Converters. I.  
Camaño Schettini, Edith Beatriz, orient. II.  
Beluco, Alexandre, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

**MODELAGEM NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA E GERAÇÃO DE ENERGIA DOS  
DISPOSITIVOS OSCILANTES POR TRANSLAÇÃO DE ONDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 09 de Março de 2018.

---

Profa. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini – IPH – UFRGS  
Orientadora

---

Prof. Dr. Alexandre Beluco – IPH – UFRGS  
Coorientador

---

Prof. Dr. José de Souza – FETLSVC  
Examinador

---

Profa. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto – IPH – UFRGS  
Examinadora

---

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH – UFRGS  
Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais, Elizabeth Fuhrmeister e João Carlos Vargas, aos meus avós, Vitor Fuhrmeister (*in memoriam*) e Vilma Schröder Fuhrmeister, aos meus mestres e aos meus amigos, que fizeram de mim um guerreiro mais forte do que ontem.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha querida mãe, Elizabeth Fuhrmeister, por todo o carinho e suporte dado ao longo de toda minha vida, principalmente nos momentos em que fraquejei e pensei não haver solução para tantos problemas.

Agradeço ao meu pai, João Carlos Vargas, por me ensinar que nada na vida se conquista sem esforço e dedicação, e por me apoiar quando mais precisei.

Agradeço aos meus avós, Vitor Fuhrmeister (*in memoriam*) e Vilma Schröder Fuhrmeister, por todo o carinho e apoio, por festejarem comigo todas as conquistas, por estarem do meu lado quando precisei e por serem exemplos de motivação e superação.

Agradeço aos meus queridos tios, Evelise Biavaschi e Hugo Biavaschi, pelo apoio, suporte e carinho dados ao longo dos anos e no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos meus amigos de verdade, àqueles com quem posso contar nas horas mais difíceis, por todo apoio e motivação, por me ajudarem a levantar quando a vida me deu rasteiras, por serem um dos meus pilares de sustentação.

Agradeço a todos os meus mestres da época da graduação e da pós-graduação, por todo o conhecimento adquirido, sem ele não teria as bases mais sólidas para a minha formação profissional, assim como para a realização deste trabalho.

Agradeço, especialmente à minha querida orientadora, Edith Beatriz Camaño Schettini, que acima disto se mostrou uma grande amiga, me dando apoio e suporte nas horas difíceis, sempre me motivando a jamais desistir, a acreditar no meu potencial e me mostrando que tudo é possível quando se tenta.

Agradeço ao meu co-orientador Alexandre Beluco, pelas contribuições para a realização deste trabalho, bem como pelas sugestões de continuação e produção científica do mesmo.

Um agradecimento especial à minha melhor amiga, Luísa Vieira Lucchese, que esteve do meu lado em todas as minhas derrotas e conquistas, fielmente como meu braço direito.

Agradeço aos meus colegas do NETT, pela ajuda, motivação e suporte dados ao longo da realização deste trabalho, devo muito a vocês.

Não desista dos seus sonhos, pois és um guerreiro com  
tantas lutas e superação, que não é justo olhar para trás  
agora;  
Seja insuperável e inigualável para os olhos de quem não  
está do teu lado;  
Desvie de obstáculos intensificando sua determinação,  
seja um guerreiro corajoso, seja um guerreiro valoroso;  
E quando você se vê sem saída, acredite nas esperanças  
que rodeiam suas certezas.

*Julio Aukay*

## RESUMO

Os dispositivos oscilantes por translação de ondas correspondem a um dos sistemas de maior potencial de geração de energia elétrica a partir das ondas do oceano, razão pela qual diversos engenheiros e pesquisadores dedicam-se ao desenvolvimento e aperfeiçoamento desta tecnologia. O princípio de funcionamento destes conversores, cujos principais exemplos são o *Oyster*, o *Waveroller* e o *Langlee*, baseia-se no movimento oscilatório de um sistema placa-pistão, que promove a geração de eletricidade por meio de uma turbina. Os trabalhos existentes acerca destes dispositivos ainda não reúnem informações suficientes que possibilitem a estimativa do comportamento hidrodinâmico e da captação de energia dos mesmos em situações reais de funcionamento. Desta forma, o presente trabalho busca preencher estas lacunas por meio de modelagem numérica bidimensional, baseada em médias de Reynolds (RANS), de ondas regulares atuando sobre os respectivos dispositivos. As simulações são realizadas pelo código computacional livre e aberto OpenFOAM v 4.1 e sua extensão OLAFOAM, ambos fundamentados em volumes finitos e que utilizam a metodologia VOF para o tratamento da superfície livre, solucionando as equações de Navier-Stokes e da continuidade. A representação da dinâmica de corpo rígido dos dispositivos é tratada por uma metodologia que permite a deformação dos elementos de malha e o movimento do fundo do domínio, que oscila juntamente com as placas dos conversores no intuito de assegurar a convergência numérica. Tal metodologia é validada com base na comparação dos resultados numéricos com valores experimentais presentes na literatura. As simulações realizadas permitiram concluir que o método de fundo deformável se mostra adequado no estudo da hidrodinâmica e captação de energia destes conversores, sendo uma alternativa a outras metodologias existentes. Um aumento na largura das placas destes conversores relaciona-se a uma intensificação das velocidades angulares e numa maior captação de energia, sendo a largura ideal de placa aquela cuja dimensão é próxima a duas vezes a sua altura. Um aumento na espessura das placas ocasiona uma diminuição na oscilação e na captação energética dos dispositivos, sendo a espessura ideal com dimensão entre 10 % e 20 % da altura da placa. A captação de energia tende a diminuir com o aumento da profundidade, sendo que, para lâminas de água superiores a duas vezes a altura da placa do conversor, a influência da profundidade torna-se pouco significativa. O aumento do período de onda é responsável por intensificar a ação do campo de velocidades nas regiões próximas ao conversor, sendo o período de máxima captação de energia em torno de 11 s em escala real. Maiores alturas de onda são responsáveis por intensificar o movimento e a captação de energia dos conversores.



## ABSTRACT

The oscillating wave surge converters represents one of the most effective systems to transform the energy of ocean waves into electric power, reason why many researchers and engineers are dedicated to the development and improvement of this technology. The main examples of those kind of converters are Oyster, Waveroller and Langlee, which energy production is related to a oscillating plate-piston mechanism, that drives a secondary hydraulic system, moving a turbine and generating electricity. Recent papers about this technology does not bring enough information to predict the hydrodynamic and the power capture in real operation cases. In order to fulfill those gaps, the present study is focused on bidimensional numerical modelling of regular ocean waves interaction over the converters, based on Reynolds Average Navier Stokes equations (RANS). The numerical simulations are performed by the opensource code OpenFOAM v 4.1 and its extension OLAFOAM, both based on finite volume discretization and VOF method for free surface representation, which solves the Navier-Stokes and continuity equations. The rigid body dynamics is represented by a methodology that uses the mesh morphing method combined with an oscillating bottom, which moves according to the plate movement, in order to ensure numerical convergence. The present method is validated by the comparison of the numerical model results with previous experimental studies. The numerical results led to the conclusion that the oscillating bottom method seems to be adequate to perform a study based on the hydrodynamic and power capture of the oscillating wave surge converters, representing an alternative method to modelling the dynamic of those devices. An increase in plate width are related to an increase on the device oscillation and its power capture. The ideal width is approximately twice the plate height. Thicker plates causes lower angular velocities, as a result, lower electric generation. The more efficient thickness is around 10 % to 20 % of plate height. The power capture decreases according to an increase on water depth, and the depths with values around twice of the plate height does not seem to modify the device hydrodynamics. Higher wave periods causes an intensification of the velocity field near the converter. The pitching period, which is related to the maximum power captured, is near to 11 s in real scale. The highest wave heights are responsible to increase the converter oscillation and electricity generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estimativa da contribuição energética de fontes renováveis até o ano de 2030 .....	22
Figura 1.2 – Potência energética teórica da costa brasileira .....	23
Figura 1.3 – Dispositivos conversores do tipo oscilantes por translação de ondas .....	24
Figura 2.1 – Espectro de energia dos vários tipos de onda .....	27
Figura 2.2 – Classificação das regiões oceânicas, em função do comportamento orbital das partículas .....	29
Figura 2.3 – Elementos principais de uma onda .....	29
Figura 2.4 – Ábaco de aplicabilidade das teorias de onda, em função da profundidade, da altura e do período de onda .....	33
Figura 2.5 – Tipos de malha de cálculo .....	39
Figura 2.6 – Cascata de energia proposta por Kolmogorov, juntamente com as formas principais de se tratar a turbulência e os custos computacionais a elas associados .....	42
Figura 2.7 – Esquema de geração de eletricidade em conversores de absorção pontual .	47
Figura 2.8 – <i>Wavebob</i> e seu princípio de funcionamento .....	48
Figura 2.9 – <i>PowerBuoy</i> .....	48
Figura 2.10 – Funcionamento do dispositivo CETO 6 .....	49
Figura 2.11 – Geração de eletricidade em conversores do tipo coluna de água oscilante	50
Figura 2.12 – Principais dispositivos de coluna de água oscilante .....	50
Figura 2.13 – Princípio de funcionamento do AWS .....	51
Figura 2.14 – Dispositivo conversor de rotação de massa ( <i>Penguin</i> ) .....	52
Figura 2.15 – Funcionamento do Pelamis .....	53
Figura 2.16 – <i>Wavestar</i> .....	54
Figura 2.17 – Funcionamento do <i>Wavedragon</i> .....	55
Figura 2.18 – <i>Design</i> do SSG .....	55
Figura 2.19 – Esquema de funcionamento de um OWSC .....	56
Figura 2.20 – Modelos do dispositivo <i>Oyster</i> .....	56
Figura 2.21 – Variação do período de oscilação de um OWSC de 2 m de espessura, em função da profundidade e da largura do oscilador .....	57
Figura 2.22 – Energia captada, em função da profundidade e da espessura do oscilador, considerando o caso de uma placa de 10 m de largura, sob ação de uma onda incidente de 10 s de período e 2 m de altura .....	57
Figura 2.23 – Potência média captada em função da largura de placa de um OWSC do tipo <i>Oyster</i> .....	58

Figura 2.24 – Diminuição da energia captada, em função da amplitude angular atingida pela placa do oscilador .....	58
Figura 2.25 – Regiões sujeitas aos maiores gradientes de vorticidade e velocidade de um dispositivo do tipo <i>Oyster</i> .....	59
Figura 2.26 – Modelos recentes do dispositivo <i>Waveroller</i> .....	60
Figura 2.27 – Variação do módulo da força horizontal média, em função da variação do período e da altura de onda .....	61
Figura 2.28 – Campo de velocidades em função do aumento do período e da altura de onda .....	61
Figura 2.29 – Protótipo de <i>Langlee</i> composto por quatro placas oscilantes .....	62
Figura 2.30 – Esquema de funcionamento do <i>Langlee Robusto</i> .....	62
Figura 2.31 – Dispositivo híbrido de conversão de energia .....	63
Figura 3.1 – Domínio de cálculo e placa de dimensões $L_p$ , $h_p$ e $e_p$ .....	68
Figura 3.2 – Deformação da malha de cálculo para o tratamento do movimento do corpo rígido .....	70
Figura 3.3 – Movimento do corpo rígido com o <i>solver sixDoFRigidBodyMotion</i> .....	71
Figura 3.4 – Domínio de cálculo utilizado na validação com os resultados experimentais de Rafiee et al. (2013) e Wei et al. (2015) .....	72
Figura 3.5 – Domínio de cálculo utilizado em grande parte dos estudos realizados no presente trabalho .....	73
Figura 3.6 – Domínio de cálculo utilizado para avaliação da metodologia de fundo deformável .....	73
Figura 4.1 – Dimensões e eixo de giro da placa utilizada na verificação .....	78
Figura 4.2 – Verificação dos resultados para o caso da amplitude angular atingida pela placa do <i>Oyster</i> .....	79
Figura 4.3 – Verificação dos resultados para as sondas de nível d'água .....	80
Figura 4.4 – Verificação dos resultados para os medidores de pressão utilizados .....	80
Figura 4.5 – Comparação entre os resultados obtidos utilizando diferentes condições de contorno de velocidade na superfície da placa oscilante, aplicadas à validação realizada na Seção 4.2 .....	81
Figura 4.6 – Comparação dos resultados obtidos utilizando as condições de contorno de “ <i>noSlip</i> ” e de “ <i>movingWallVelocity</i> ” em um modelo bidimensional .....	82
Figura 4.7 – Comparação dos campos de velocidade utilizando as condições de contorno de “ <i>noSlip</i> ” e de “ <i>movingWallVelocity</i> ” em um modelo bidimensional .....	83
Figura 4.8 – Comparação dos resultados obtidos utilizando modelos 2D e 3D .....	84
Figura 4.9 – Comparação dos campos de velocidade utilizando modelos 2D e 3D .....	85
Figura 4.10 – Aberturas testadas para verificar a metodologia de fundo móvel .....	86

Figura 4.11 – Comparação entre os campos de velocidade considerando as metodologias de fundo fixo e fundo móvel para uma abertura de 0,05 m .....	87
Figura 4.12 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular da placa e força horizontal atuante, considerando a metodologia de fundo móvel e a de fundo fixo .....	87
Figura 4.13 – Erro relativo médio ao se utilizar a metodologia de fundo móvel, em função da abertura abaixo da placa do OWSC .....	88
Figura 4.14 – Disposição dos OWSC's para conversores do tipo <i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i> .....	89
Figura 4.15 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para quatro diferentes larguras de placa, considerando OWSC's do tipo <i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i> .....	90
Figura 4.16 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, das forças horizontais e estimativa da energia captada pelos OWSC's, frente a uma variação na largura da placa dos dispositivos .....	91
Figura 4.17 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da largura de placa adimensional .....	92
Figura 4.18 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para quatro diferentes espessuras de placa, considerando dois tipos de seção frontal de um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	93
Figura 4.19 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da espessura da placa de um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	94
Figura 4.20 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da espessura adimensional da placa de um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	95
Figura 4.21 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para quatro profundidades diferentes, considerando OWSC's do tipo <i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i> .....	96
Figura 4.22 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da profundidade de instalação dos dispositivos do tipo <i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i> .....	97
Figura 4.23 – Valores eficazes adimensionalizados da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da profundidade de instalação adimensional dos dispositivos do tipo <i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i> .....	98
Figura 4.24 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para dois períodos de onda diferentes, considerando quatro alturas de onda distintas e um dispositivo do tipo <i>Waveroller</i> .....	100
Figura 4.25 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para dois períodos de onda diferentes, considerando quatro alturas de onda distintas e um dispositivo do tipo <i>Langlee</i> .....	100

Figura 4.26 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda, para um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	101
Figura 4.27 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda, para um OWSC do tipo <i>Langlee</i> .....	101
Figura 4.28 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda adimensional, para um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	103
Figura 4.29 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda adimensional, para um OWSC do tipo <i>Langlee</i> .....	103
Figura 4.30 – Campo de velocidades, considerando o instante de máxima amplitude angular de um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> , em dois períodos e duas alturas de onda diferentes .....	104
Figura 4.31 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda, para um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	105
Figura 4.32 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda, para um OWSC do tipo <i>Langlee</i> .....	106
Figura 4.33 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda adimensional, para um OWSC do tipo <i>Waveroller</i> .....	107
Figura 4.34 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda adimensional, para um OWSC do tipo <i>Langlee</i> .....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Comparativo entre as formas de energia dos oceanos .....	21
Tabela 1.2 – Potencial de energia das ondas em regiões do mundo .....	22
Tabela 2.1 – Tipo de onda, mecanismo de atuação, período de onda típico e região de atuação .....	27
Tabela 2.2 – Comparação entre as três metodologias de análise .....	37
Tabela 2.3 – Variação da energia absorvida com o crescimento da altura significativa e do período de onda .....	60
Tabela 2.4 – Matriz de geração de energia, em kW, do <i>Langlee Robusto</i> , em função do período e da altura de onda .....	63
Tabela 3.1 – Condições de contorno usadas para as simulações no código OpenFOAM	69
Tabela 3.2 – Condições iniciais aplicadas nas simulações .....	69
Tabela 3.3 – Resumo e descrição dos casos de estudo do presente trabalho .....	75
Tabela 4.1 – Localização dos medidores de pressão e sondas de nível d'água .....	79
Tabela 4.2 – Estimativa do erro relativo eficaz médio da amplitude angular atingida, velocidade angular e força horizontal, ao se utilizar a metodologia de fundo móvel .....	88

## LISTA DE SIGLAS

AMI – *Arbitrary Mesh Interface*  
AWS – *Archimedes Wave Swing*  
BEM – *Boundary Element Method*  
CFD – *Computational Fluid Dynamics*  
DNS – *Direct Numerical Simulation*  
FEM – *Finite Element Method*  
FDM – *Finite Difference Method*  
FVM – *Finite Volume Method*  
IBM – *Immersed Boundary Method*  
LES – *Large Eddy Simulation*  
MULES – *Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*  
OWSC – *Oscillating Wave Surge Converter*  
PISO – *Pressure Implicit with Splitting of Operators*  
RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes*  
RMS – *Root Mean Square*  
SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*  
SPH – *Smoothed Particle Hydrodynamics*  
SSG – *Sea-wave Slot-cone Generator*  
SST – *Shear Stress Transport*  
SURGE – *Simple Underwater Renewable Generation of Energy*  
VOF – *Volume of Fluid*

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a$  – Abertura abaixo do OWSC utilizado para a verificação da metodologia de fundo móvel (m)
- $a_i$  – Amplitude dos termos de velocidade da Teoria de Stokes de quinta ordem (m/s)
- $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $C_i$  – Coeficientes de expressão polinomial, utilizados na Teoria de Stokes de quinta ordem (adimensionais)
- $C$  – Celeridade (velocidade de propagação da onda) (m/s)
- $C_0$  – Celeridade da onda em águas profundas (m/s)
- $C_{ad}$  – Coeficiente de amortecimento do dispositivo (kg.m<sup>2</sup>/s)
- $C_{ar}$  – Coeficiente de amortecimento em função da radiação das ondas (kg.m<sup>2</sup>/s)
- $C_g$  – Velocidade de grupo da onda (m/s)
- $C_{gr}$  – Velocidade de grupo referente a uma região mais rasa (m/s)
- $C_r$  – Celeridade da onda em uma região mais rasa (m/s)
- $e_a$  – Espessura da placa adimensional
- $e_p$  – Espessura da placa (m)
- $E_t$  – Energia das flutuações de velocidade em um escoamento turbulento (J)
- $E_{tot}$  – Energia total por unidade de área superficial contida em uma onda (J/m<sup>2</sup>)
- $F_a$  – Força de onda adimensional
- $F_x$  – Força horizontal da onda (N)
- $g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)
- $g_i$  – Componente da aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)
- $H$  – Altura de onda (m)
- $h$  – Profundidade (m)
- $H_0$  – Altura da onda em zonas profundas (m)
- $H_a$  – Altura da onda adimensional
- $H_a^*$  – Altura de onda adimensional inversa
- $h_a$  – profundidade adimensional
- $H_b$  – Altura com que a onda quebra (m)
- $h_p$  – Altura da placa (m)
- $H_r$  – Altura da onda em regiões mais rasas (m)
- $H_s$  – Altura significativa de onda (m)
- $I_m$  – Momento de inércia de massa do corpo (kg.m<sup>2</sup>)
- $I_{ma}$  – Momento de inércia de massa adicionada (kg.m<sup>2</sup>)
- $k$  – número de onda (m<sup>-1</sup>)
- $K_b$  – Coeficiente de quebra da onda (adimensional)



$K_r$  – Coeficiente de refração (adimensional)  
 $K_s$  – Coeficiente de profundidade (adimensional)  
 $L$  – Comprimento de onda (m)  
 $L_0$  – Comprimento de onda em águas profundas (m)  
 $L_a$  – Largura da placa adimensional (m)  
 $L_k$  – Escala de Kolmogorov (m)  
 $L_p$  – Largura da placa (m)  
 $L_t$  – Dimensão típica das maiores e mais energéticas flutuações (m)  
 $P$  – Pressão (Pa)  
 $P_a$  – Potência adimensional captada pelo OWSC  
 $P_{abs}$  – Potência captada pelo dispositivo (W)  
 $P_d$  – Pressão dinâmica (Pa)  
 $P_h$  – Pressão hidrostática (Pa)  
 $P_{tot}$  – Pressão total (Pa)  
 $P_u$  – Potência unitária transmitida pela onda (W/m)  
 $R$  – Momento de restauração devido ao empuxo (N.m)  
 $T$  – Período de onda (s)  
 $T_a$  – Período de onda adimensional  
 $t$  – Instante de tempo considerado (s)  
 $u_i, u_j$  – Componentes da velocidade em uma determinada direção (m/s)  
 $V_x$  – Componente horizontal da velocidade (m/s)  
 $V_z$  – Componente vertical da velocidade (m/s)  
 $x$  – Posição horizontal no sentido de propagação da onda (m)  
 $x_i, x_j$  – Componentes da posição em uma determinada direção (m)  
 $z$  – Posição vertical de referência em relação ao fundo do oceano (m)  
 $\alpha_0$  – Ângulo de propagação da onda em águas profundas (rad)  
 $\alpha_r$  – Ângulo de propagação da onda em uma região mais rasa (rad)  
 $\Delta_t$  – Incremento de tempo (s)  
 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  – Comprimento dos elementos de malha (m)  
 $\eta$  – Elevação da superfície da água (m)  
 $\theta$  – Ângulo de rotação da placa, a partir da posição inicial a  $90^\circ$  com a horizontal ( $^\circ$ ), também chamado de amplitude angular  
 $\kappa$  – Energia cinética turbulenta (J)  
 $\lambda$  – Parâmetro de cálculo da Teoria de Stokes de 5ª ordem (adimensional)  
 $M_t$  – Momento total da placa (N.m)

$\nu$  – Viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\nu_t$  – Viscosidade turbulenta ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\rho$  – Massa específica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_p$  – Massa específica da placa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\sigma$  – Frequência angular da onda ( $\text{s}^{-1}$ )

$\Phi$  – Fase da onda (rad)

$\omega$  – Velocidade angular da placa do OWSC (rad/s)

$\omega_a$  – Velocidade angular adimensional da placa do OWSC

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
1.1 OBJETIVOS .....	24
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	25
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	26
2.1 CONCEITOS DE ENGENHARIA COSTEIRA .....	26
<b>2.1.1 Formação e tipos de onda do mar</b> .....	26
<b>2.1.2 Hidrodinâmica das ondas</b> .....	28
2.1.2.1 Movimento orbital de partículas .....	28
2.1.2.2 Teoria Linear de Ondas .....	29
2.1.2.3 Teorias de onda não-lineares .....	33
2.1.2.3.1 Teoria de Stokes de segunda ordem .....	34
2.1.2.3.2 Teoria de Stokes de quinta ordem .....	34
2.2 TÓPICOS EM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL .....	36
<b>2.2.1 A importância da CFD</b> .....	36
<b>2.2.2 Componentes principais de uma simulação numérica</b> .....	37
2.2.2.1 Etapas da modelagem numérica .....	38
2.2.2.2 Tipos de malha de cálculo .....	38
2.2.2.3 Tratamento da malha para casos de corpos rígidos em movimento ...	39
2.2.2.4 Modelagem da turbulência .....	40
<b>2.2.3 Principais métodos de discretização</b> .....	43
2.2.3.1 Métodos dos elementos de contorno ( <i>Boundary Element Method</i> ) ...	43
2.2.3.2 Método dos elementos finitos ( <i>Finite Element Method</i> ) .....	43
2.2.3.3 Método das diferenças finitas ( <i>Finite Difference Method</i> ) .....	44
2.2.3.4 Método dos volumes finitos ( <i>Finite Volume Method</i> ) .....	44
2.2.3.5 Métodos espectrais .....	45
2.2.3.6 <i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i> (SPH) .....	45
2.3 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS .....	46
<b>2.3.1 Zonas energéticas</b> .....	46
<b>2.3.2 Principais dispositivos conversores</b> .....	46
2.3.2.1 Conversores de absorção pontual .....	47
2.3.2.1.1 <i>Wavebob</i> .....	47
2.3.2.1.2 <i>PowerBuoy</i> .....	48
2.3.2.1.3 <i>CETO</i> .....	49

2.3.2.2 Conversores do tipo coluna de água oscilante .....	50
2.3.2.3 Dispositivos submersos com diferencial de pressão .....	51
2.3.2.4 Corpos com rotação de massa .....	52
2.3.2.5 Atenuadores .....	52
2.3.2.5.1 <i>Pelamis</i> .....	53
2.3.2.5.2 <i>Wavestar</i> .....	53
2.3.2.6 Dispositivos de galgamento .....	54
2.3.2.7 Conversores por translação de ondas .....	55
2.3.2.7.1 <i>Oyster</i> .....	56
2.3.2.7.2 <i>Waveroller</i> .....	59
2.3.2.7.3 <i>Langlee</i> .....	62
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	64
3.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DO ESCOAMENTO E MODELAGEM DA TURBULÊNCIA .....	64
3.2 MOVIMENTO DO CORPO RÍGIDO E CÁLCULO DA POTÊNCIA CAPTADA PELO DISPOSITIVO .....	65
3.3 CÓDIGO OPENFOAM E A EXTENSÃO OLAFOAM .....	67
3.4 DOMÍNIO, CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO .....	68
3.5 MALHA DINÂMICA PARA O MOVIMENTO DO CORPO RÍGIDO .....	69
3.6 DOMÍNIOS UTILIZADOS .....	71
3.6.1 Domínio D1 .....	72
3.6.2 Domínio D2 .....	73
3.6.3 Domínio D3 .....	73
3.7 CASOS DE ESTUDO .....	74
<b>4 RESULTADOS</b> .....	76
4.1 CONSIDERAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS .....	76
4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO DINÂMICO UTILIZADO .....	78
4.3 VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DE VELOCIDADE APLICADA NA PLACA OSCILANTE .....	81
4.4 TESTE COMPARATIVO ENTRE UM MODELO 3D E OUTRO 2D .....	83
4.5 VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE FUNDO MÓVEL .....	85
4.6 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NA LARGURA DA PLACA .....	89
4.7 ESTUDO DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA DA PLACA .....	92
4.8 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PROFUNDIDADE .....	95
4.9 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ONDA .....	99
4.9.1 Avaliação da influência devido a mudanças no período da onda .....	99

<b>4.9.2 Avaliação da mudança ocasionada pela variação da altura de onda .....</b>	<b>104</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>108</b>
<b>6 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DESTE TRABALHO .....</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por fontes alternativas de energia vem crescendo significativamente, em razão da conservação do meio ambiente e dos problemas relacionados às energias oriundas de combustíveis fósseis, como os problemas de exploração e o fato destas fontes serem limitadas (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012). Destacam-se a energia solar e eólica como as principais energias limpas e renováveis, que possuem tecnologias em constante aperfeiçoamento e parques de geração em diversos países. Por outro lado, Campos (2013) ressalta o grande potencial energético existente nos oceanos (em média 32000 TW/ano), o qual, segundo Levitan (2014), encontra-se muito pouco maduro, em termos de exploração, se comparado às energias solar e eólica. Esta situação contrasta com as diversas possibilidades de extração da energia dos oceanos, dentre as quais estão as energias das marés, das correntes oceânicas, da diferença de salinidade entre regiões, do gradiente de temperatura e das ondas, como mostra a Tabela 1.1.

<b>Recurso</b>	<b>Potência (TW)</b>
Correntes oceânicas	0,05
Ondas	2,70
Marés	0,03
Gradiente térmico	2,00
Gradiente salino	2,60

Tabela 1.1 – Comparativo entre as formas de energia dos oceanos  
(fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

A Figura 1.1 mostra uma estimativa da contribuição energética de diversas fontes renováveis até o ano de 2030, onde é possível verificar que a maior parte desta contribuição deve-se às energias solar, eólica e de biomassa, e a menor à energia dos oceanos, ressaltando o baixo investimento e exploração desta fonte energética.

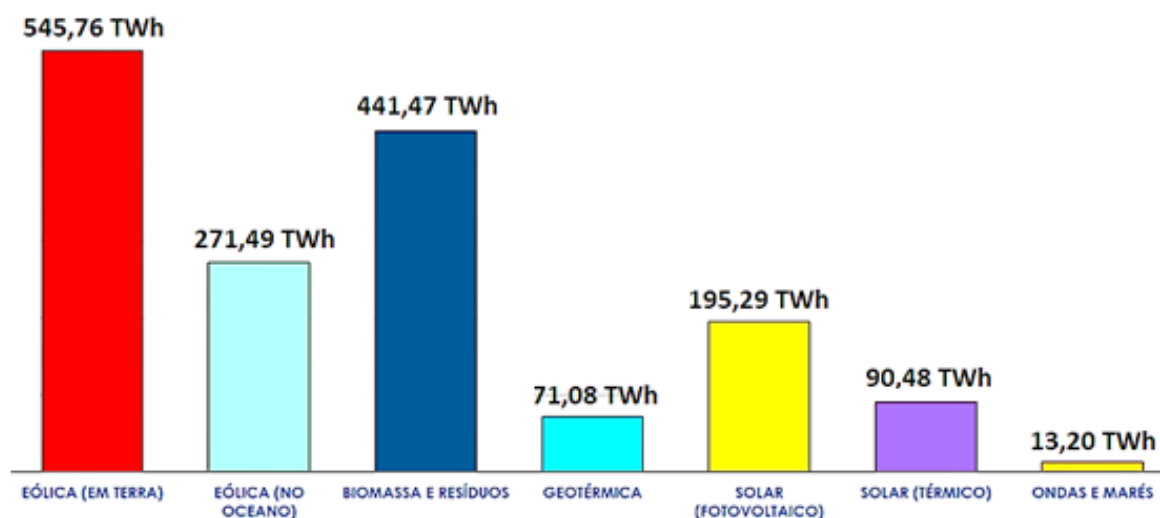


Figura 1.1 – Estimativa da contribuição energética de fontes renováveis até o ano de 2030 (fonte: adaptado de SILVA, 2012)

Morais (2009) afirma que o potencial energético existente nas ondas varia entre 8.000 TWh/ano e 80.000 TWh/ano, o que coloca as ondas como a fonte energética oceânica de maior potencial para geração de eletricidade. Isto pode ser explicado pelo fato da energia cinética transferida aos oceanos pela força dos ventos ser transportada pelas ondas, que, em regiões mais profundas, são capazes de percorrer grandes distâncias sem alterações energéticas significativas. O mesmo não ocorre em regiões mais rasas, onde os efeitos do fundo e das margens atuam como dissipadores de energia. Assim, existem zonas com maiores e menores potenciais energéticos, que podem ser associados a comportamentos hidrodinâmicos distintos. Desta maneira, espera-se que as diversas regiões do globo terrestre possuam potenciais energéticos diferentes, conforme mostra a Tabela 1.2.

Região	Potencial (TWh/ano)
Ásia	6200
Austrália, Nova Zelândia e Ilhas do Pacífico	5600
América do Sul	4600
América do Norte e Groenlândia	4000
África	3500
Norte e Oeste da Europa	2800
América Central	1500
Mar Mediterrâneo e Arquipélagos Atlânticos	1300

Tabela 1.2 – Potencial da energia das ondas em regiões do mundo (fonte: adaptado de STEFEN, 2015)

A costa brasileira, segundo Stefen (2015), possui uma potência energética teórica de aproximadamente 114 GW, destacando-se a região sul com a maior potência, em torno de 35 GW (Figura 1.2).

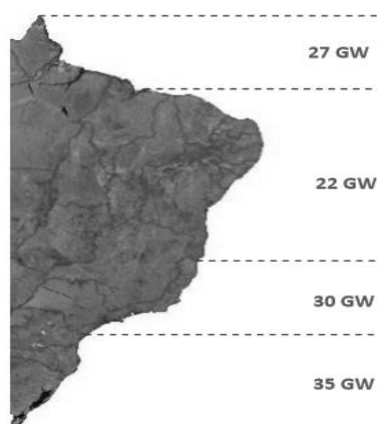


Figura 1.2 – Potência energética teórica da costa brasileira (fonte: STEFEN, 2015)

Diversos dispositivos hidráulicos responsáveis por converter a energia das ondas em energia elétrica vem sendo desenvolvidos ao longo dos anos, cada qual associado a um sistema de conversão de energia, que geralmente está relacionado à profundidade e às características hidrodinâmicas da região onde os conversores são instalados. Países como o Canadá, Irlanda, Holanda, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Reino Unido e Estados Unidos já possuem dispositivos conversores de ondas em operação e investem muito na exploração deste tipo de energia. Destaca-se também a China que vem incentivando e investindo em estudos nessa área tecnológica, desenvolvendo novos dispositivos conversores (OCEAN ENERGY SYSTEMS, 2015).

Estudos numéricos e experimentais são realizados para verificar o funcionamento dos diversos tipos de conversores de energia, avaliando o funcionamento dos mesmos e prevendo o futuro desempenho destes em campo. Merecem destaque os dispositivos que captam a energia contida na componente horizontal das ondas, conhecidos como conversores de energia por translação de ondas (também chamados de OWSC – *Oscillating Wave Surge Converters*), em virtude da possibilidade de instalação destes em diferentes profundidades e em regiões com comportamentos hidrodinâmicos e energéticos distintos.



O funcionamento dos OWSC's baseia-se no movimento de um sistema placa-pistão, que promove a geração de eletricidade por meio de uma turbina interna. Os principais exemplos dos conversores deste tipo são o *Oyster*, o *Langlee* e o *Waveroller*, mostrados na Figura 1.3.

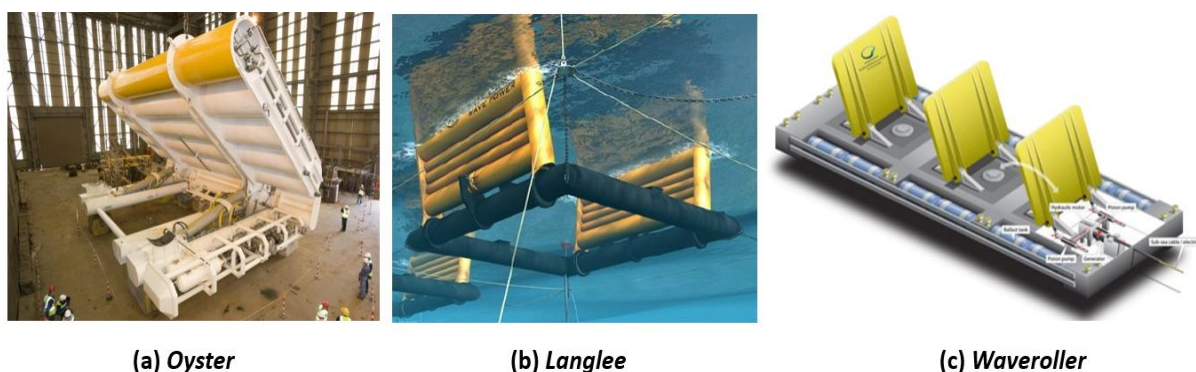


Figura 1.3 – Dispositivos conversores do tipo oscilantes por translação de ondas  
(fonte: MANZONI, 2013)

Ainda não existem trabalhos numéricos relacionando características da onda, como altura e período, bem como aspectos geométricos destes conversores, com a produção energética dos OWSC's, o que dificulta a verificação da aplicabilidade dos mesmos em regiões específicas. Desta maneira, buscando contribuir para o preenchimento das lacunas deixadas nesta área, surge a principal motivação deste estudo: avaliar a produção energética e o funcionamento dos dispositivos conversores por translação de ondas em função da sua geometria e de características básicas de onda.

## 1.1 OBJETIVOS

O **objetivo principal** deste trabalho é analisar como a hidrodinâmica e a captação de energia dos conversores oscilantes por translação de ondas são modificadas em função da ação de ondas regulares incidentes.

Os **objetivos secundários** são:

- a) analisar e compreender o funcionamento dos OWSC's, que se resumem ao *Oyster* (fixo ao fundo do oceano e parcialmente submerso), ao *Waveroller* (fixo ao fundo e totalmente submerso) e ao *Langlee* (parcialmente submerso e flutuante na superfície da água);
- b) verificar e validar o modelo numérico utilizado, comparando os resultados obtidos com resultados experimentais presentes na literatura;

- c) comparar os resultados fornecidos por um modelo bidimensional com aqueles encontrados em um modelo tridimensional, considerando uma situação similar;
- d) avaliar uma metodologia alternativa que utiliza um fundo deformável para a representação da dinâmica de um OWSC;
- e) verificar a influência da geometria (largura e espessura de placa) no comportamento hidrodinâmico do conversor;
- f) avaliar como a variação da profundidade de instalação modifica a hidrodinâmica e a energia captada pelos OWSC's;
- g) estudar como mudanças na altura e no período da onda incidente afetam o movimento e a captação de energia do dispositivo.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto foi dividido em seis partes:

- a) **Introdução** – tem como função fornecer uma breve apresentação da temática e contextualização do assunto no âmbito das energias renováveis, ressaltando a sua importância, bem como a justificativa, objetivos e divisão deste trabalho.
- b) **Revisão bibliográfica** – capítulo que reúne o conteúdo relevante para a pesquisa.
- c) **Metodologia** – abrange os métodos utilizados para realizar o presente trabalho.
- d) **Resultados** – composto pela validação numérica do código utilizado e pelos resultados obtidos para os casos analisados.
- e) **Considerações finais** – reúne as principais informações obtidas das simulações realizadas, bem como considerações importantes.
- f) **Sugestões de continuidade do trabalho** – apresenta alguns assuntos que podem ser abordados futuramente, complementando o estudo aqui realizado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo dedica-se aos principais fenômenos relacionados a hidrodinâmica das ondas, que influenciam diretamente a mecânica e o desempenho dos diversos sistemas de conversão de energia. Mesmo não sendo o tema central deste trabalho, é necessária uma revisão das principais metodologias numéricas utilizadas para modelar estes fenômenos bem como o conhecimento dos sistemas de conversão de energia já desenvolvidos. São abordados também trabalhos que trouxeram resultados relevantes acerca da dinâmica e da energia gerada pelos dispositivos oscilantes por translação de ondas, sistema de conversão no qual está focado o presente estudo.

### **2.1 CONCEITOS DE ENGENHARIA COSTEIRA**

Para compreender a dinâmica e o comportamento das ondas do mar, é necessário entender como as mesmas são formadas, como se propagam, quais fenômenos estão envolvidos e como podem ser calculados o comprimento de onda, a celeridade e a energia teórica transportada por ondas progressivas. As seções a seguir abordam estes conceitos, reunindo os tópicos mais relevantes da engenharia costeira.

#### **2.1.1 Formação e tipos de ondas do mar**

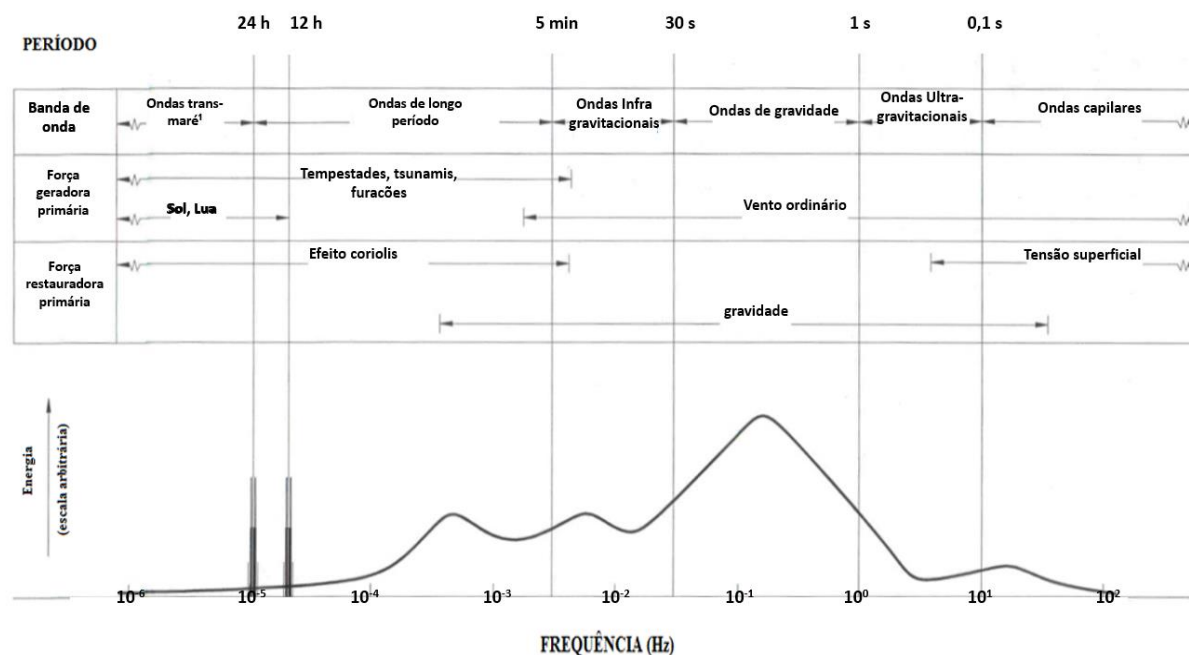
Dean e Dalrymple (2004) relatam que as ondas têm sua origem em forças geradoras, as quais atuam deformando uma massa líquida. Estas forças podem, por exemplo, ser consequência direta da ação dos ventos, de terremotos, de vulcões em erupção, do impacto de corpos sobre a superfície da água, entre outros. Após sua formação, passam a agir forças restauradoras, como a gravidade e a tensão superficial do fluido em movimento, que resultam em ondas dos mais diversos tamanhos e formatos. Assim, Mei et al. (2005) classificam as ondas em cinco tipos principais (sonoras, capilares, internas, planetárias e de gravidade), segundo o seu mecanismo de atuação e período de onda típico (Tabela 2.1).

Tipos de Onda	Mecanismo de atuação	Período Típico	Região de atuação
Sonoras	Compressibilidade	$10^2 - 10^5$ s	Em todo o oceano
Capilares	Tensão na superfície	$< 10^{-1}$ s	Interface ar-água
de Vento e Swell <sup>1</sup>	Gravidade	1 - 25 s	Interface ar-água
Tsunamis	Gravidade	10 min - 2 h	Interface ar-água
Internas	Gravidade e estratificação de densidade	2 min - 10 h	Interface entre diferentes densidades
de Tempestade	Gravidade e rotação da Terra	1 - 10 h	Próximo a linha de costa
de Maré	Gravidade e rotação da terra	12 - 24 h	Em todo o oceano
Planetárias	Gravidade, rotação da Terra e variação de latitude ou profundidade	$\approx 100$ dias	Em todo o oceano

<sup>1</sup>Swell é o termo utilizado para designar um “trem” de ondas harmônicas, com aproximadamente única frequência, sendo seus períodos maiores quando comparados aos períodos das ondas produzidas pelos ventos em regiões próximas da costa

Tabela 2.1 – Tipo de onda, mecanismo de atuação, período de onda típico e região de atuação (fonte: adaptado de MEI et al., 2005)

A seguir, a Figura 2.1 mostra um espectro das ondas de superfície dos oceanos, destacando-se as ondas de gravidade como as mais energéticas. Estas possuem períodos de onda relativamente curtos e são as responsáveis pela maior parte dos efeitos hidrodinâmicos que atuam sobre as estruturas localizadas em regiões costeiras (FENTON, 2013).



<sup>1</sup>Ondas trans-marés correspondem às ondas que possuem um comportamento combinado dos efeitos de tempestades ou furacões, com os fenômenos de marés já existentes

Figura 2.1 – Espectro de energia dos vários tipos de onda (fonte: adaptado de FENTON, 2013)

## 2.1.2 Hidrodinâmica das ondas

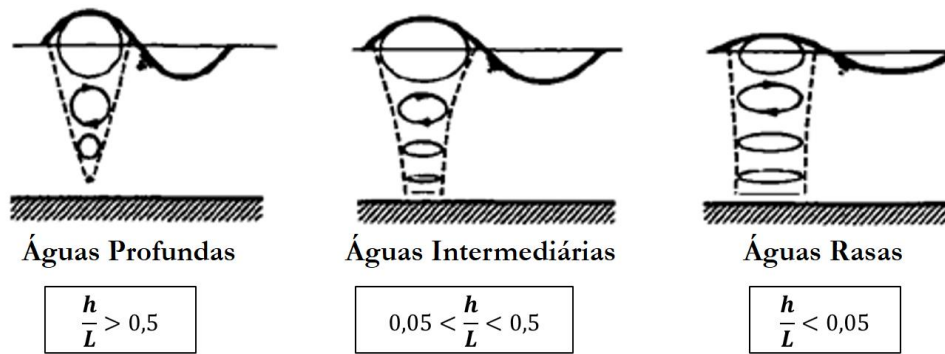
Toda onda oceânica que é formada em zonas de geração, normalmente localizadas em regiões mais profundas, tende a se deslocar em direção ao continente, sendo denominada onda progressiva. Ondas desse tipo, sofrem variações hidrodinâmicas ao longo de seu percurso, em função do relevo de fundo, da sua direção de propagação e da profundidade. Os tópicos subsequentes reúnem, de forma sucinta, uma descrição destes fenômenos, bem como a clássica Teoria Linear de ondas, frequentemente utilizada na engenharia e na modelagem das ondas, e as Teorias de onda não lineares.

### 2.1.2.1 Movimento orbital de partículas

Em função da tensão de cisalhamento exercida na superfície da água (considerando o caso mais geral de ondas produzidas pela ação dos ventos), ocorre uma perturbação do estado de equilíbrio que tende a ser restaurado pela ação da gravidade, desta forma, as ondas progressivas adquirem um movimento orbital de partículas, resultando em trajetórias circulares ou elípticas, as quais tendem a diminuir com o aumento da profundidade. Em regiões mais rasas (em outras palavras, com profundidade menor que meio comprimento de onda) as trajetórias são influenciadas pela rugosidade do fundo, que tendem a “achatar” estas órbitas (DEAN; DARLYMPLE, 1991).

Em função da relação entre a profundidade de escoamento e o comprimento de onda, divide-se o oceano em três regiões distintas (mostradas na Figura 2.2), diferenciadas em função do movimento descrito pelas partículas. São elas (HOLTHUIJSEN, 2007):

- a) **águas profundas** – apresentam órbitas circulares de partículas, pois os efeitos rugosos do fundo são desprezíveis nestas regiões. Para profundidades superiores a meio comprimento de onda, o movimento é muito pequeno, apresentando comportamento similar a um grande reservatório, com distribuição hidrostática da pressões;
- b) **águas intermediárias** – região onde ainda existem trajetórias circulares, porém, em profundidades menores, passa a existir influência da rugosidade do fundo, ocasionando o formato elíptico no movimento orbital de partículas;
- c) **águas rasas** – nesta zona são observadas somente trajetórias elípticas, em função da grande influência de efeitos rugosos do fundo e da praia.



Sendo:  $h$  – profundidade;  $L$  – comprimento de onda

Figura 2.2 – Classificação das regiões oceânicas, em função do comportamento orbital das partículas (fonte: adaptado de ANDRÉ, 2010)

### 2.1.2.2 Teoria Linear de ondas

Esta teoria, que também é conhecida como Teoria de Airy ou Teoria de Stokes de primeira ordem, é relativamente simples e apresenta uma boa estimativa dos valores de altura, comprimento, frequência angular, número de onda, velocidade e celeridade das ondas progressivas, o que justifica sua importância. Um pressuposto desta teoria é que a amplitude da onda incidente é muito pequena se comparada ao período da mesma, permitindo diversas simplificações nas equações. A obra de Dean e Dalrymple (1991) reúne toda a fundamentação desta teoria, que encontra-se resumida nos próximos parágrafos.

Em uma onda existem três elementos principais: a altura ( $H$ ), o período ( $T$ ) e a profundidade ( $h$ ). As expressões matemáticas que fundamentam todas as teorias de ondas, incluindo a Teoria Linear, estão baseadas nestes parâmetros. A Figura 2.3 apresenta um esquema com os principais elementos de uma onda progressiva.

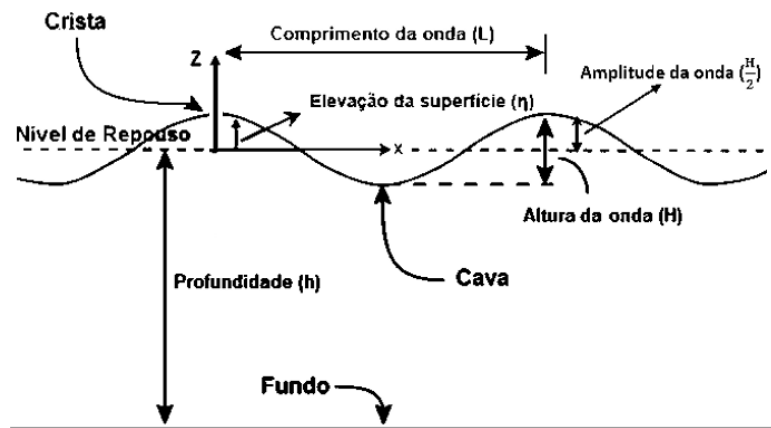


Figura 2.3 – Elementos principais de uma onda (fonte: adaptado de DOUGLASS e KROLAK, 2008)

Podem ser calculados outros parâmetros importantes como o comprimento de onda ( $L$ ), a celeridade ( $C$ ), o número de onda ( $k$ ), a frequência angular ( $\sigma$ ) e a elevação da superfície ( $\eta$ ):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (1)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (5)$$

Um caso particular das expressões (1) e (2) aplica-se à região de águas profundas onde o comprimento de onda ( $L_0$ ) e a celeridade ( $C_0$ ) podem ser calculados pelas seguintes expressões:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (6)$$

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (7)$$

Pode-se calcular também as componentes horizontal ( $V_x$ ) e vertical ( $V_y$ ) das velocidades orbitais:

$$V_x = \frac{gHk}{2\sigma} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t), \quad (8)$$

$$V_z = \frac{H\sigma}{2} \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \sin(kx - \sigma t), \quad (9)$$

em que  $t$  e  $z$  são respectivamente, um instante de tempo e uma profundidade de referência (medida conforme o referencial mostrado na Figura 2.3).

A pressão total existente em uma onda ( $P_{tot}$ ) pode ser definida como a soma da pressão hidrostática ( $P_h$ ) com a pressão dinâmica ( $P_d$ ), calculadas pelas seguintes expressões, que dependem também da massa específica ( $\rho$ ) da água:

$$P_h = -\rho g z \quad (10)$$

$$P_d = \frac{\rho g H}{2} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (11)$$

$$P_{tot} = P_h + P_d \quad (12)$$

A energia contida em uma onda pode ser definida como a soma de duas parcelas de energia: a potencial e a cinética. Desta forma, pode-se calcular a energia total por área superficial ( $E_{tot}$ ) contida em uma onda:

$$E_{tot} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (13)$$

Conhecendo-se a velocidade de grupo da onda ( $C_g$ ), juntamente com a energia total transportada, pode-se estimar, em W/m, a potência unitária ( $P_u$ ), transmitida no sentido de propagação de uma onda progressiva:

$$C_g = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (14)$$

$$P_u = E_{tot} C_g \quad (15)$$

Toda onda que se propaga em direção à praia está sujeita à ocorrência de três fenômenos principais: empolamento (em inglês, *shoaling*), refração e quebra. O primeiro deles refere-se ao fato de que a onda, ao se aproximar de regiões mais rasas, sofre diminuição em seu comprimento de onda e aumento em sua amplitude. O segundo retrata a mudança na direção de propagação da onda em função da profundidade, com a finalidade da mesma se alinhar com a linha de costa. Finalmente, o terceiro fenômeno retrata a condição em que a altura da onda cresce até um determinado ponto (limite do efeito de empolamento, ou em função de



tempestades), de tal forma, que a gravidade não consegue mais atuar como força restauradora e a mesma quebra, dissipando energia na forma de turbulência (FENTON, 2013).

As características de uma onda progressiva também são alteradas em função do relevo de fundo, tal comportamento pode ser explicado pela Lei da Refração, também conhecida como Lei de Snell, a qual, no caso de um relevo de fundo paralelo à linha de praia, é expressa por:

$$\frac{\text{sen}\alpha_0}{C_0} = \frac{\text{sen}\alpha_r}{C_r}, \quad (16)$$

em que  $\alpha_0$ ,  $\alpha_r$  e  $C_r$  são, respectivamente, o ângulo de propagação da onda em águas profundas, o ângulo de propagação e a celeridade em uma região mais rasa.

É possível estimar a altura ( $H_r$ ) que uma onda, formada em uma região profunda, terá em uma região mais rasa, assim como a altura ( $H_b$ ) com que a mesma irá quebrar:

$$K_s = \sqrt{\frac{C_0}{2C_{gr}}}, \quad (17)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\text{cos}\alpha_0}{\text{cos}\alpha_r}}, \quad (18)$$

$$H_r = H_0 \cdot K_s \cdot K_r, \quad (19)$$

$$H_b = \left(\frac{K_b}{g}\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{H_0^2 C_0 \text{cos}\alpha_0}{2}\right)^{\frac{2}{5}}, \quad (20)$$

em que  $K_s$ ,  $K_r$ ,  $K_b$ ,  $H_0$  e  $C_{gr}$  correspondem, respectivamente, aos coeficientes de profundidade, de refração e de quebra (geralmente  $K_b = 0,8$ ), a altura de onda em zonas mais profundas e a velocidade de grupo em uma região mais rasa.

### 2.1.2.3 Teorias de onda não lineares

Segundo Kamphuis (2000), existem diversas teorias que descrevem a hidrodinâmica das ondas, sendo cada uma delas especial para a correta representação em função de um determinado tipo de onda. A Teoria Linear é recomendada para a representação de ondas de pequena amplitude, tanto em águas intermediárias quanto em águas profundas. Já as teorias de Stokes de ordem superior (geralmente válidas para valores de  $\frac{h}{L}$  superiores a 0,125) são aplicáveis quando a amplitude das ondas são consideravelmente maiores, em águas intermediárias e profundas. A correta representação de uma onda que está prestes a quebrar, é obtida pela Teoria da Onda Solitária, recomendada para ondas em regiões bem rasas. Finalmente, a Teoria Cnoidal tem sua correta aplicação em ondas típicas de zonas pouco profundas (onde os valores de  $\frac{h}{L}$  encontram-se entre 0,1 e 0,02), sendo uma teoria intermediária entre a teoria de Stokes, para águas profundas, e a teoria de onda solitária, para águas muito rasas. De forma prática, o ábaco disposto na Figura 2.4 permite determinar a teoria de hidrodinâmica a ser utilizada em cada caso de estudo, em função da profundidade, do período e da altura de onda.

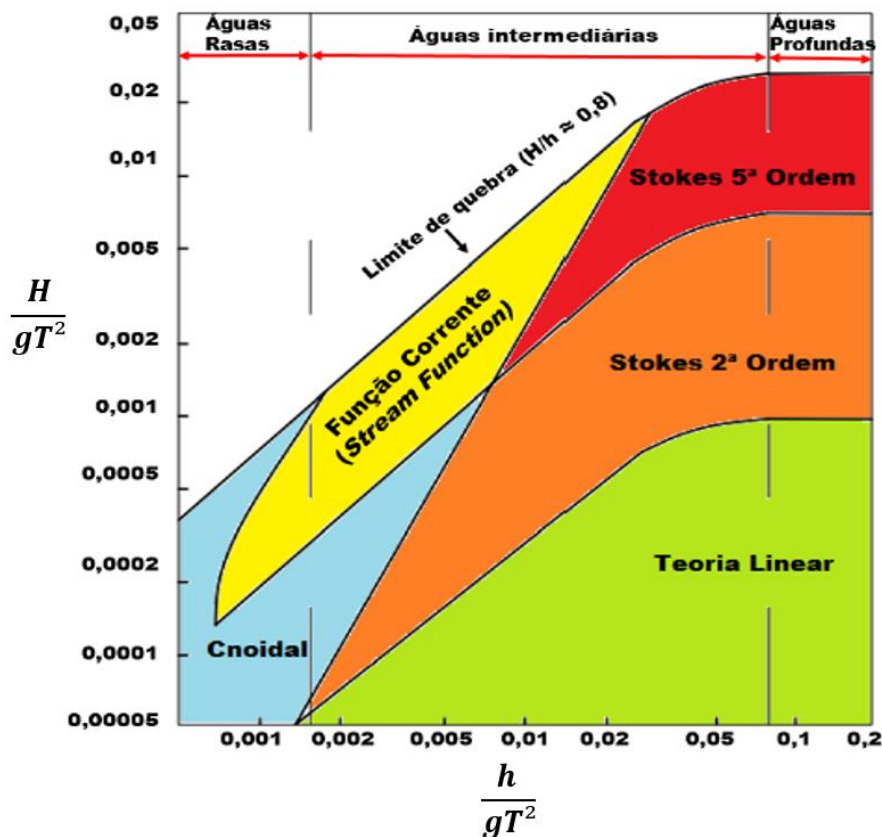


Figura 2.4 – Ábaco de aplicabilidade das teorias de onda, em função da profundidade, da altura e do período de onda (fonte: adaptado de VARGAS, 2015)

Em decorrência das características dinâmicas das ondas, os dispositivos conversores de energia por translação de ondas (geralmente instalados em profundidades entre 10 m e 25 m, sujeitos a ondas de altura que variam entre 1 m e 5 m e com períodos típicos próximos a 12 s) são influenciados por ondas corretamente descritas pelas teorias de Stokes de segunda e quinta ordem. Estas duas últimas teorias, são apresentadas, mais detalhadamente, nas subseções a seguir.

### 2.1.2.3.1 Teoria de Stokes de segunda ordem

A teoria de Stokes de segunda ordem acrescenta um termo de segunda ordem à teoria linear, resultando na soma de uma parcela de onda que oscila duas vezes mais rápido. As expressões obtidas para a variação da superfície e para as componentes da velocidade são, respectivamente, as seguintes (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{kH^2[2 + \cos(2kh)] \cos(kh) \cos(2kx - 2\sigma t)}{16 \sinh^3(kh)} \quad (21)$$

$$V_x = \frac{gHk}{2\sigma} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2\sigma k \cosh[2k(h+z)] \cos(2kx - 2\sigma t)}{16 \sinh^4(kh)} \quad (22)$$

$$V_z = \frac{gHk}{2\sigma} \frac{\sinh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2\sigma k \sinh[2k(h+z)] \sin(2kx - 2\sigma t)}{16 \sinh^4(kh)} \quad (23)$$

### 2.1.2.3.2 Teoria de Stokes de quinta ordem

A teoria de Stokes de quinta ordem é recomendada para ondas de grande amplitude em regiões tipicamente profundas (FENTON, 1985). Esta teoria baseia-se em expressões mais complexas que descrevem o comprimento de onda, a variação da superfície livre e as velocidades das partículas:

$$\frac{\pi H}{h} = \frac{L}{h} [\lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55})], \quad (24)$$

$$L = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) (1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2), \quad (25)$$

$$\eta = \frac{\lambda \cos(\phi)}{k} + (\lambda^2 B_{22} + \lambda^4 B_{24}) \frac{\cos(2\phi)}{k} + (\lambda^3 B_{33} + \lambda^5 B_{35}) \frac{\cos(3\phi)}{k} + \frac{\lambda^4 B_{44} \cos(4\phi)}{k} + \frac{\lambda^5 B_{55} \cos(5\phi)}{k}, \quad (26)$$

$$V_x = a_1 \cosh(kz) \cos(\phi) + a_2 \cosh(2kz) \cos(2\phi) + a_3 \cosh(3kz) \cos(3\phi) + a_4 \cosh(4kz) \cos(4\phi) + a_5 \cosh(5kz) \cos(5\phi), \quad (27)$$

$$V_z = a_1 \sinh(kz) \sin(\phi) + a_2 \sinh(2kz) \sin(2\phi) + a_3 \sinh(3kz) \sin(3\phi) + a_4 \sinh(4kz) \sin(4\phi) + a_5 \sinh(5kz) \sin(5\phi), \quad (28)$$

$$a_1 = \frac{2\pi}{Tk} (\lambda A_{11} + \lambda^3 A_{13} + \lambda^5 A_{15}), \quad (29)$$

$$a_2 = \frac{4\pi}{Tk} (\lambda^2 A_{22} + \lambda^4 A_{24}), \quad (30)$$

$$a_3 = \frac{6\pi}{Tk} (\lambda^3 A_{33} + \lambda^5 A_{35}), \quad (31)$$

$$a_4 = \frac{8\pi}{Tk} (\lambda^4 A_{44}), \quad (32)$$

$$a_5 = \frac{10\pi}{Tk} (\lambda^5 A_{55}), \quad (33)$$

sendo,  $\phi$  a fase da onda (definida como  $\phi = kx - \sigma t$ ),  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $C_i$  os coeficientes de expressões polinomiais (dependentes de  $L$ ), conforme Fenton (1985), e  $a_i$  corresponde à amplitude dos termos de velocidade.

## 2.2 TÓPICOS EM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

O uso de computadores para simular fenômenos físicos na engenharia, relacionados à mecânica dos fluidos, dos sólidos e dos gases, tornou-se cada vez mais frequente, o que pode ser justificado pelo considerável desenvolvimento tecnológico na área e na grande capacidade de processamento das máquinas. Tal atividade se mostra atrativa, pois atua como um complemento às análises experimentais realizadas nos laboratórios, resultando em um estudo mais completo de um determinado fenômeno. Nesta seção, serão apresentados tópicos importantes que fundamentam a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) e as principais metodologias de discretização utilizadas pelos códigos computacionais.

### 2.2.1 A importância da CFD

Para Fortuna (2000), a fluidodinâmica computacional tem como principal objetivo favorecer o estudo de fenômenos relacionados a fluidos em movimento, com ou sem troca de calor, otimizando projetos de engenharia, reduzindo custos operacionais e melhorando o desempenho dos objetos estudados.

O mesmo autor relata que a CFD atua em conjunto com as análises teóricas e com os métodos experimentais, reduzindo o número de testes destes últimos e explorando fenômenos que não podem ser vistos ou obtidos nos ensaios em laboratório. Uma vantagem, ao se utilizar a metodologia numérica computacional, é a facilidade na mudança da geometria do objeto estudado, bem como da velocidade, pressão e outras condições iniciais, pois todos estes dados são “variáveis de entrada” do simulador.

A Tabela 2.2 mostra uma comparação entre as três metodologias de análise dos fenômenos estudados em mecânica dos fluidos, cada qual com suas vantagens e desvantagens, porém, que podem ser utilizadas em conjunto, como no caso da utilização de uma solução analítica de uma determinada equação para verificar os resultados experimentais obtidos, e a utilização destes para validar um determinado modelo numérico.

<b>Técnica</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Teórica</b>	- Mais geral - Fórmula fechada	- Restrita a geometrias e processos físicos simplificados - Geralmente Restrita a problemas lineares
<b>Experimental</b>	- Possibilidade de estudar fenômenos ainda complicados de serem modelados numericamente	- Equipamento exigido - Problemas de escala - Dificuldades de medição - Custo operacional
<b>Numérica</b>	- Menos restritiva - Possibilidade de lidar com geometrias e processos complicados - Acompanhamento da evolução temporal do processo	- Erros de truncamento - Custos computacionais

Tabela 2.2 – Comparação entre as três metodologias de análise (fonte: adaptado de FORTUNA, 2000)

### 2.2.2 Componentes principais de uma simulação numérica

A simulação numérica de um fenômeno relacionado à dinâmica de um escoamento depende de uma série de fatores como a malha de cálculo utilizada, as equações matemáticas envolvidas (equações governantes de um fenômeno), a metodologia adotada para a resolução destas equações (esquemas de cálculo), o intervalo de tempo simulado, as condições de contorno e as condições iniciais (condições de velocidade e pressão, por exemplo). Desta forma, é imprescindível garantir que todas as etapas, que se desenvolvem desde a formulação matemática até a interpretação dos resultados, sejam devidamente executadas, visando a minimização de erros (como erros de truncamento e arredondamento) e a correta representação de um fenômeno real.

Ferziger e Peric (2002) ressaltam que a solução encontrada é sempre aproximada, pois depende principalmente da ordem dos esquemas de resolução adotados, os quais devem ser consistentes (o erro de truncamento deve tender a zero à medida que o incremento de tempo ( $\Delta t$ ) e os comprimentos dos elementos de malha ( $\Delta x_i$ ) tendam a zero), estáveis (os erros devem diminuir com o passar do tempo de simulação) e, conseqüentemente, convergentes (a solução deve se aproximar da solução exata).

As seguintes seções fornecem noções importantes sobre a modelagem numérica de um problema em mecânica dos fluidos, contemplando uma breve descrição das principais etapas de uma simulação, das malhas de cálculo possíveis e da modelagem da turbulência, a qual é um fenômeno extremamente importante e que deve ser levado em consideração em uma simulação, no intuito de garantir um resultado mais realista e representativo.

### 2.2.2.1 Etapas da modelagem numérica

Basicamente, uma simulação numérica pode ser dividida em três etapas principais (TU et al., 2008):

- a) **pré-processamento** – etapa na qual é realizada a definição das equações matemáticas que descrevem o fenômeno (modelo matemático), da geometria do problema, das condições iniciais e da malha de cálculo;
- b) **solver** – consiste na resolução das expressões matemáticas, que juntas formam um sistema de equações, o qual é solucionado por um determinado esquema numérico (sendo este baseado em uma metodologia de discretização, como por exemplo, os volumes finitos), que deve convergir para uma solução e garantir a minimização de erros;
- c) **pós-processamento** – etapa em que os resultados são recolhidos e tratados por programas auxiliares.

### 2.2.2.2 Tipos de malha de cálculo

A malha, ou grade de cálculo, consiste na representação de um domínio dividido em elementos ou células, em que são resolvidas numericamente as equações que regem o fenômeno estudado. Quanto mais elementos tiver uma malha, mais pontos de cálculo serão agregados ao sistema, tornando esta malha mais refinada, melhorando a precisão e a riqueza de detalhes. Em função da geometria e dos fenômenos envolvidos, é necessário escolher o tipo de malha a ser utilizada, sendo três possíveis (FERZIGER; PERIC, 2002):

- a) **Malha estruturada** – constituída de células planares com quatro arestas em duas dimensões, ou células volumétricas com seis faces em três dimensões, sendo possível estabelecer uma enumeração consecutiva de elementos (Figura 2.5a).
- b) **Malha não-estruturada** – apresenta células em diversas formas, geralmente triângulos ou quadriláteros (em duas dimensões) e tetraedros ou hexaedros (em três dimensões), não sendo possível realizar uma enumeração consecutiva dos elementos (Figura 2.5b).
- c) **Malha híbrida** – consiste em uma grade que reúne uma combinação de regiões ou blocos de malha estruturada e não estruturada (Figura 2.5c).

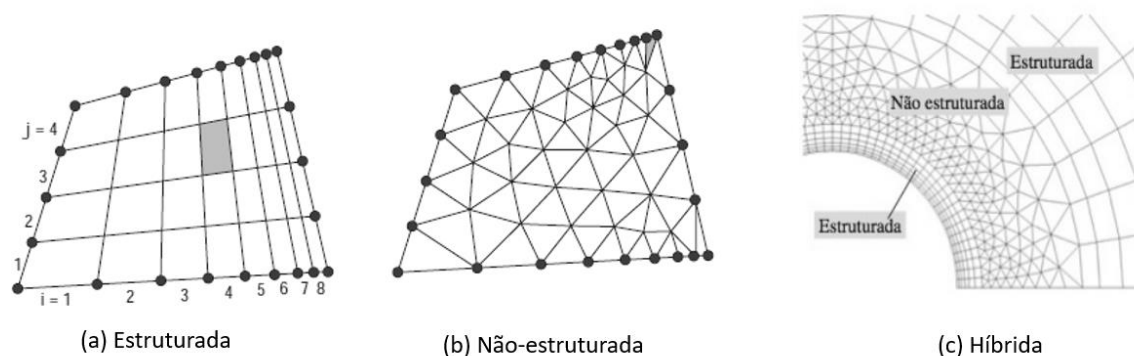


Figura 2.5 – Tipos de malha de cálculo (fonte: adaptado de ÇENGEL; CIMBALA, 2015)

Çengel e Cimbala (2015) sugerem evitar a utilização de células muito angulosas (“pontiagudas”), pois estas ocasionam problemas de convergência nos cálculos, comprometendo os resultados. Uma grade está suficientemente refinada quando, para mesmas condições iniciais e de geometria, os resultados obtidos no caso de uma malha menos refinada e em uma mais refinada não se mostrarem significativamente diferentes um do outro. Este teste de refinamento é conhecido como **teste da independência da malha**.

### 2.2.2.3 Tratamento da malha para casos de corpos rígidos em movimento

Diferente dos casos em que o objeto estudado permanece estático (no qual não existe maiores complicações inerentes à malha de cálculo utilizada), quando o corpo adquire certo movimento, a malha passa a exigir um tratamento especial que torne possível o cálculo das propriedades estudadas em cada passo de tempo, que está associado à posição adquirida pelo corpo em cada instante. Desta forma são conhecidas quatro abordagens principais: *Imersed Boundary Method* (IBM), *Arbitrary Mesh Interface* (AMI), redefinição de malha (*remeshing*) e distorção da malha (*mesh distortion*).

O IBM, segundo Yao (2016), consiste em inserir um objeto delimitado por uma fronteira sólida (malha curvilínea móvel, referente às variáveis lagrangeanas) dentro de uma malha cartesiana principal fixa (relacionadas às variáveis eulerianas), por meio da utilização de uma condição de contorno que impõe forças fictícias ao escoamento, ou através de modificações diretas no sistema de equações. Porém, esta metodologia pode ocasionar problemas de convergência e de estabilidade numérica, sendo necessários diversos cuidados em sua implementação.



A metodologia AMI consiste em utilizar dois domínios independentes que interagem, sendo um deles responsável pelo escoamento em si e o outro pelo movimento do corpo, que se comunicam relacionando às forças provenientes do escoamento ao movimento do objeto considerado. Na prática, o método funciona, basicamente, como dois domínios sobrepostos, dispensando deformações nos elementos de malha e os problemas numéricos existentes no IBM. Em alguns casos, esta metodologia exige implementações trabalhosas ao código principal (OPENFOAM FOUNDATION, 2017).

O método de redefinição da malha, consiste em modificar a malha a cada passo de tempo, no intuito de adaptá-la à posição atingida pelo corpo no instante considerado. O principal inconveniente deste método reside no custo computacional elevado, que, na maioria das vezes, torna a metodologia inviável (SCHMITT; ELSAESSER, 2015).

O método de distorção da malha está baseado na deformação dos elementos de malha para que a topologia do objeto que se movimenta seja preservada. A principal limitação desta metodologia está relacionada aos instantes em que os elementos tornam-se “achatados” e angulosos, ocasionando problemas numéricos, que, por sua vez, acabam resultando na divergência das simulações. Por outro lado, é um método que, geralmente, não exige implementações ao código principal, apresenta custos computacionais viáveis e resultados satisfatórios (OPENFOAM FOUNDATION, 2016).

#### **2.2.2.4 Modelagem da turbulência**

Garde (1994) relata que o escoamento turbulento representa a grande maioria dos casos reais e de aplicação na engenharia. Este tipo de escoamento é caracterizado por apresentar uma intensa mistura entre as camadas de fluido, dando origem a vórtices de diversos tamanhos (escalas), o que ocasiona a oscilação dos valores das propriedades de um escoamento, como a velocidade e a pressão, em torno de um valor médio, sendo necessário, portanto, um tratamento estatístico para compreender e estimar os efeitos turbulentos. A turbulência pode variar de intensidade e direção, o que mostra a complexidade deste fenômeno, assim, representá-la numericamente não é algo trivial, porém deve ser levada em consideração para a correta modelagem de um problema físico, como, por exemplo, no caso do dimensionamento de um automóvel, avião ou de estruturas submersas.

Tennekes e Lumley (1972) caracterizam o escoamento turbulento como um escoamento com grande difusividade (com elevada mistura de quantidade de movimento, calor e massa), elevados números de Reynolds (número adimensional que relaciona as forças inerciais com as forças viscosas), flutuações tridimensionais de vorticidade e altamente dissipativo (a turbulência precisa de um contínuo fornecimento de energia, caso contrário, decai rapidamente).

O escoamento turbulento se manifesta em diferentes escalas de comprimento, que estão relacionadas às dimensões características dos vórtices formados. Estes vórtices drenam energia do escoamento médio e a transferem para outros vórtices menores (juntamente com certa quantidade de movimento) e assim sucessivamente, criando-se um processo de transferência de energia, que tende a ir em direção a uma escala de tamanhos menores, até que a energia remanescente seja dissipada por tensões viscosas. Este processo é conhecido como Cascata de Energia (apresentada na Figura 2.6), e foi proposto pela primeira vez por Kolmogorov no ano de 1941. Dessa forma, a menor escala de turbulência é conhecida como escala de Kolmogorov (ZIKANOV, 2010).

Em função destas escalas turbulentas, existem três maneiras principais de modelar a turbulência (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

- a) **Método das equações de médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes*)** – metodologia focada em aspectos médios do escoamento e nos efeitos da turbulência sobre propriedades médias. Desta forma, utilizam-se equações escritas em termos médios, modelando todas as escalas de turbulência, sendo necessária a utilização de modelos de turbulência para a representação correta da mesma. Por ser uma metodologia completamente modelada, exige menor custo computacional, razão pela qual é a mais utilizada nas simulações dos problemas de engenharia.
- b) **Simulação Numérica Direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*)** – neste método as equações de Navier-Stokes são resolvidas diretamente para todas as escalas de turbulência, sem nenhuma modelagem. Assim, são necessárias malhas muito refinadas e um grande custo computacional, tornando-se inviável para algumas situações. Por outro lado, é a metodologia que mais apresenta riqueza de detalhes.
- c) **Método das grandes escalas (LES – *Large Eddy Simulation*)** – aqui as equações de Navier-Stokes são resolvidas diretamente para as grandes escalas. As pequenas escalas são filtradas e modeladas, o que torna esta metodologia um meio termo entre o RANS e o DNS, exigindo custos computacionais intermediários, porém resulta em uma boa riqueza de detalhes da turbulência.

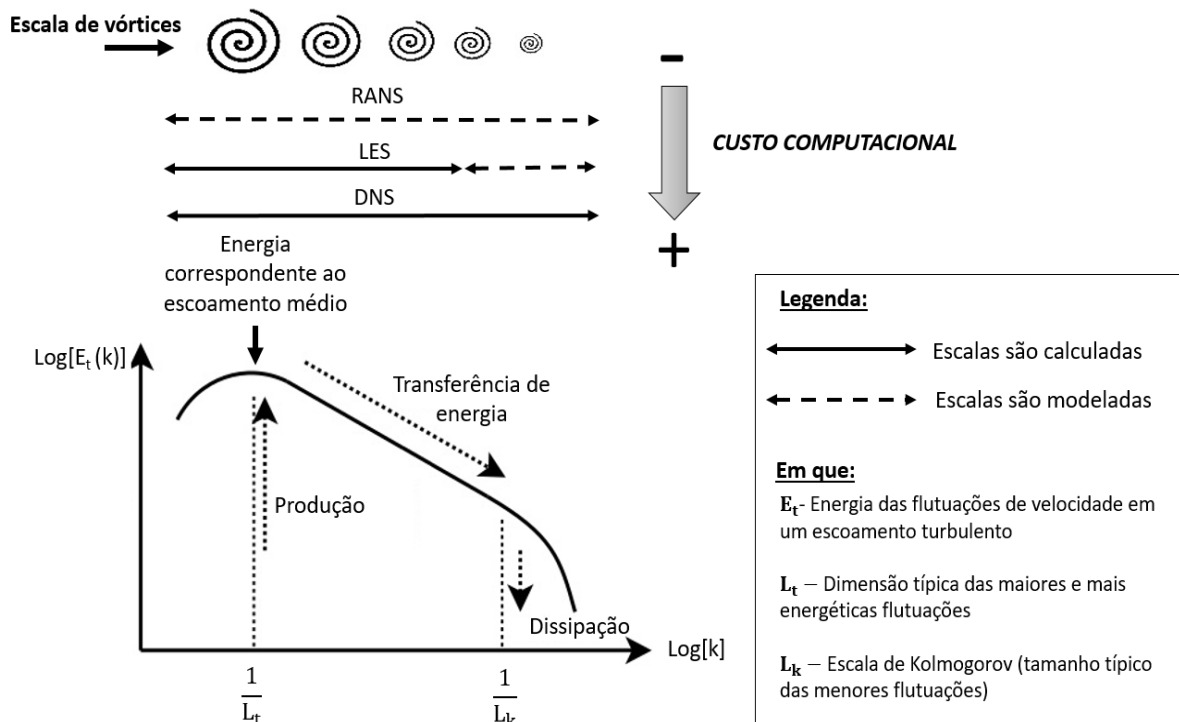


Figura 2.6 – Cascata de energia proposta por Kolmogorov, juntamente com as formas principais de se tratar a turbulência e os custos computacionais a elas associados (fonte: adaptado de GRETE, [2016?])

Sendo a metodologia RANS a mais utilizada nas aplicações em engenharia, é necessário recorrer aos modelos de turbulência, com a finalidade de representar satisfatoriamente sua influência no escoamento, tornando a simulação mais próxima da realidade. Os principais modelos de turbulência, segundo Simões (2009), são:

- $\kappa$ - $\epsilon$**  – recomendado para modelar regiões afastadas das paredes (corrente livre), fornecendo bons resultados para a maioria dos escoamentos na área industrial. Porém, devido a sua formulação, apresenta dificuldade para tratamento das regiões muito próximas aos contornos sólidos.
- $\kappa$ - $\omega$**  – modelo robusto e preciso, adequado para a modelagem e tratamento de regiões próximas às paredes, porém apresenta forte sensibilidade aos valores de  $\omega$  na corrente livre.
- $\kappa$ - $\omega$  SST** – reúne os benefícios dos dois modelos anteriores, recorrendo ao modelo  $\kappa$ - $\omega$  em regiões próximas às paredes e ao  $\kappa$ - $\epsilon$  na corrente livre. Além disso, é um modelo insensível aos valores de  $\omega$  e  $\epsilon$  na corrente livre e acrescenta um melhor tratamento ao transporte de tensão cisalhante na camada limite, em função da sua formulação.

### 2.2.3 Principais métodos de discretização

Atualmente, existem diversos métodos numéricos de discretização utilizados em CFD, sendo os métodos dos elementos finitos, dos volumes finitos e das diferenças finitas, os mais conhecidos. Independentemente do método utilizado, o objetivo é o mesmo para todas metodologias numéricas: fornecer resultados satisfatórios e que representem, de forma aproximada, a realidade. Cada método possui vantagens e desvantagens, sendo necessário um conhecimento prévio destes para julgar qual é o mais adequado ao fenômeno estudado. As seções seguintes fornecem uma breve descrição dos métodos mais utilizados, juntamente com seus pontos positivos e negativos.

#### 2.2.3.1 Método dos elementos de contorno (*Boundary Element Method – BEM*)

Esta metodologia consiste na resolução de equações diferenciais descritas na forma integral e aplicadas aos contornos do caso estudado, que podem ser discretizados em termos lineares, quadráticos ou cúbicos. A principal característica deste método reside no fato de que somente os contornos são discretizados (resultando na diminuição de uma dimensão do problema inicial) em uma quantidade menor de dados de entrada e operações numéricas e, dependendo do problema, em menor custo computacional (ALI; RAJAKUMAR, 2004).

Costabel (1987) ressalta que a possibilidade de se trabalhar com regiões infinitas ou semi-infinitas, dispensando a discretização destas e os consequentes erros adicionais, assim como a grande convergência obtida, são as principais vantagens deste método. Por outro lado, esta metodologia apresenta uma formulação matemática complexa e altamente dependente da forma como o cálculo das integrais, que definem os contornos, é efetuado, bem como problemas de cálculo em regiões com geometrias complexas.

#### 2.2.3.2 Método dos elementos finitos (*Finite Element Method – FEM*)

A resolução do problema através deste método ocorre por meio da divisão do domínio contínuo do problema em pequenas partes (os elementos finitos), de comportamento bem definido, e que podem assumir diversas formas, como a triangular e a quadrangular. Estes elementos são ligados por pontos (nós), formando uma malha de cálculo (Dhatt et al., 2012).

Como principais vantagens pode-se citar o emprego desta metodologia a geometrias complexas e o fato de diversas condições de contorno serem impostas automaticamente na sua formulação. Dependendo do fenômeno estudado, o método pode resultar em grande custo computacional, fazendo com que outras metodologias, como diferenças finitas ou volumes finitos, sejam mais vantajosas (MUKHOPADHYAY, 2004).

### **2.2.3.3 Método das diferenças finitas (*Finite Difference Method – FDM*)**

Nesta metodologia, as equações diferenciais são discretizadas em diferenças finitas para a resolução das incógnitas, ou seja, as derivadas das equações são substituídas por aproximações baseadas em diferenças. Estas podem ser obtidas por meio das séries de Taylor, transformando o problema de equações diferenciais em um problema algébrico mais simples. As séries de Taylor dão origem às diferenças finitas e aos termos de erro, os quais decorrem do truncamento desta série, caracterizando a ordem de um esquema. Um dos pontos positivos deste método é o fato de existir uma gama de possibilidades para o equacionamento dos esquemas de resolução de uma mesma equação (PLETCHER et al., 2012).

Cabe ressaltar, que este método, apesar de ser relativamente simples de programar, é mais adequado a geometrias mais simples e a malhas estruturadas, nas quais reside a facilidade de tratamento e programação das equações envolvidas, resultando em um ganho computacional (FADLUN et. al, 2000).

### **2.2.3.4 Método dos volumes finitos (*Finite Volume Method – FVM*)**

O método dos volumes finitos é, atualmente, o mais utilizado em CFD. Seu funcionamento consiste basicamente em dividir o domínio em volumes de controle onde são aplicadas as equações integrais de conservação e armazenadas todas informações das propriedades calculadas. Nas faces dos elementos de volume, o valor da propriedade calculada no nó é aproximado por meio de interpolações (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Moukalled et. al (2016) ressalta que esta metodologia é estritamente conservativa, pois a propriedade que deixa um volume de controle anterior é a mesma que entra em um volume vizinho. Da mesma forma, os elementos de volume podem ser adaptados a geometrias complexas, resultando em malhas não estruturadas, o que representa vantagens sobre outras metodologias, como as diferenças finitas, por exemplo.

### 2.2.3.5 Métodos espectrais

A função deste método é resolver as equações diferenciais do problema estudado em termos de séries conhecidas, como, por exemplo, as séries de Fourier, facilitando os cálculos. Este método tem se mostrado uma boa alternativa aos métodos usuais de elementos finitos, volumes finitos e diferenças finitas, principalmente na área de CFD, quando se trata do estudo de transição e turbulência, previsão do tempo e hidrodinâmica dos oceanos. O uso da transformada rápida de Fourier é recomendado a condições de contorno que exibam alguma periodicidade, resultando na precisão e eficiência do método. Sendo assim, pode-se dizer que esta metodologia apresenta alguns inconvenientes, além da dependência de condições periódicas, dentre os quais pode-se citar o fato da necessidade de utilização de algumas aproximações (aproximação de Garlekin, Tau ou *Collocation*) e da sua incompatibilidade em estudos que envolvam geometrias complexas. Por outro lado, sua correta aplicação implica em uma convergência muito rápida, que pode ser, inclusive, de forma exponencial, diminuindo custos computacionais (GOTTLIEB; ORSZAG, 1977).

### 2.2.3.6 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

O SPH consiste em um método baseado na descrição Lagrangeana do escoamento, tratando o fluido como um conjunto de partículas que interagem entre si. Esta metodologia, diferente dos métodos de discretização anteriormente abordados, não necessita de uma malha de cálculo, o que a torna muito útil no caso do estudo da interação fluido-estrutura e em escoamentos multifásicos. As quantidades físicas entre as partículas são tratadas em função da distância com as partículas vizinhas por meio das funções de atenuação, conhecidas por *Kernel* (MONAGHAN, 2005).

Dentre as vantagens, tem-se a garantia da conservação de massa, melhor previsão na advecção e transportes das propriedades do sistema, boa precisão para casos em que existe grande colisão e deformabilidade entre partículas (como o caso da interação fluido-estrutura) e facilidade de implementação (se comparada aos métodos usuais de discretização). A principal desvantagem está relacionada ao grande custo computacional, pois, em diversos casos, são necessárias muitas partículas para simulações numéricas precisas, além do fato da posição inicial das partículas afetar consideravelmente os resultados (Crespo, 2008).

## 2.3 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Nos últimos anos, a pesquisa na área de conversão da energia das ondas em energia elétrica vem crescendo significativamente. Diversos dispositivos são criados e estudados, cada qual com suas vantagens e desvantagens, porém, ainda não existe um consenso sobre qual é o mais eficiente e que possui o melhor custo benefício. Esta seção dedica-se a uma pequena introdução sobre a transformação da energia das ondas em energia elétrica e a apresentação dos principais dispositivos existentes, bem como o princípio de funcionamento e potencial de geração dos mesmos.

### 2.3.1 Zonas energéticas

As ondas, ao viajarem de regiões mais profundas a regiões mais rasas, sofrem efeitos de empolamento, difração, alteração do movimento orbital, quebra e perda de energia por atrito com o fundo. Desta forma, a disponibilidade energética varia em função da profundidade e da distância com a costa, sendo possível classificar o oceano em três zonas energéticas (SOUZA, 2011):

- a) *onshore (shoreline)* – região sobre a costa ou muito próxima da mesma (inferiores a 8 m, de profundidade). Os dispositivos instalados nesta zona têm a vantagem de possuírem fácil acesso e manutenção, diminuindo custos. Por outro lado, em função da grande interação rugosa desta zona, o potencial energético para conversão em eletricidade é reduzido;
- b) *nearshore* – zona intermediária, geralmente localizada entre 8 m e 25 m de profundidade. Possui médio potencial energético de geração e, assim como a zona *onshore*, apresenta algumas vantagens de manutenção e acesso;
- c) *offshore* – região onde a profundidade é maior que 25 m. Ao contrário das zonas anteriores, é a região onde a instalação de dispositivos oferece menor risco de impacto ao meio ambiente e detém o maior potencial energético. A principal desvantagem desta região reside no aspecto da instalação e manutenção dos dispositivos, bem como a interferência dos mesmos com rotas de navegação, o que resulta no aumento dos custos envolvidos.

### 2.3.2 Principais dispositivos conversores

Diversos dispositivos foram desenvolvidos, diferenciando-se entre si em função do *design*, da zona energética a ser instalado, do mesmo ser flutuante, submerso ou fixo ao fundo do oceano, e em função de aspectos econômicos e dos impactos ambientais envolvidos. Os conversores

podem ser classificados em função do seu princípio de funcionamento, dando origem a sete grupos: os dispositivos de absorção pontual, de coluna de água oscilante, submersos com diferencial de pressão, de rotação de massa, atenuadores, de galgamento e oscilantes por translação de ondas (DHANAK et al. 2016).

Um resumo das principais tecnologias de extração da energia das ondas é apresentado a seguir, enfatizando-se os conversores por translação de ondas, principal objeto de estudo deste trabalho.

### 2.3.2.1 Conversores de absorção pontual

São dispositivos normalmente flutuantes de tamanho pequeno, se comparado ao comprimento das ondas incidentes, que captam a energia através do movimento vertical das ondas. Este movimento para cima e para baixo alimenta uma turbina que, por sua vez, gera energia elétrica, conforme mostra o esquema presente na Figura 2.7 (DHANAK et al. 2016).

Pode-se citar, como exemplos de conversores de absorção pontual, os dispositivos *Wavebob*, *PowerBuoy* e o CETO, os quais são apresentados a seguir.

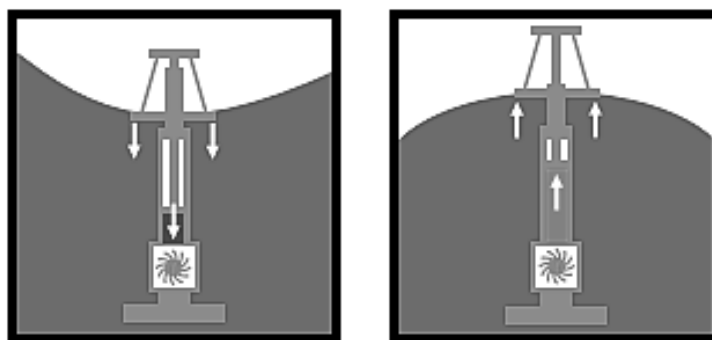


Figura 2.7 – Esquema de geração de eletricidade em conversores de absorção pontual (fonte: OREGON SEA GRANT, 2013)

#### 2.3.2.1.1 *Wavebob*

Este dispositivo utiliza um mecanismo hidráulico composto por um fluido biodegradável, evitando possíveis danos ao ambiente. Possui um sistema de controle, que possibilita mudar a frequência natural do conversor de acordo com a frequência de onda predominante, e outro que protege o dispositivo contra situações extremas do oceano. Possui cerca de 15 m de diâmetro e é instalado em regiões *offshore*, em profundidades próximas a 50 m; sua capacidade de geração



estimada é de 1 MW (JOUBERT et. al, 2013). A Figura 2.8 ilustra o *Wavebob* e o seu funcionamento.

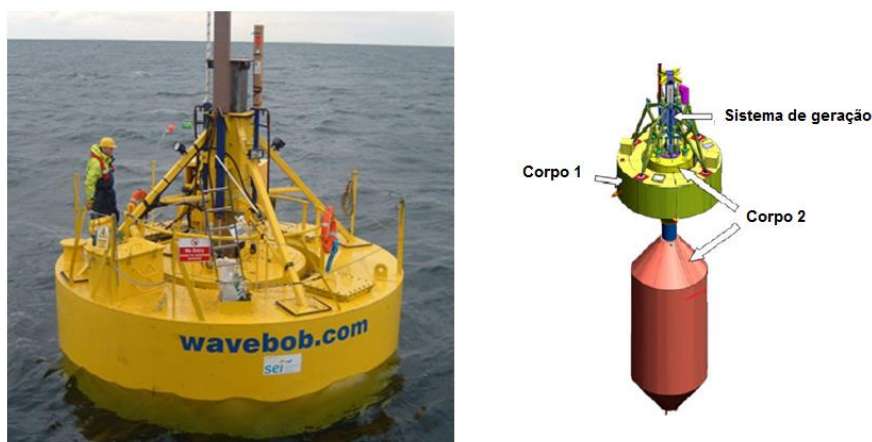


Figura 2.8 – *Wavebob* e seu princípio de funcionamento (fonte: ENFERAD; NAZARPOUR, 2013)

#### 2.3.2.1.2 *PowerBuoy*

Conversor desenvolvido pela empresa australiana *Ocean Power Technologies*, cujo funcionamento baseia-se em uma estrutura flutuante que se movimenta verticalmente com o passar das ondas. Diferente do *Wavebob*, ele possui uma extensão para a parte externa, que, juntamente com a parte inferior, atua como um pistão e movimenta um gerador interno. O seu potencial de geração é aproximadamente 40 kW, com dimensões de 3,7 m de diâmetro e 15,8 m de altura. Geralmente é instalado em profundidades entre 30 m e 60 m (JOUBERT et. al, 2013). A Figura 2.9 ilustra o *PowerBuoy*.



Figura 2.9 – *PowerBuoy* (fonte: ENFERAD; NAZARPOUR, 2013)

### 2.3.2.1.3 CETO

Este dispositivo vem sendo constantemente aperfeiçoado pela sua empresa desenvolvedora, a *Carnegie Wave Energy Limited*, que atualmente vem testando um novo protótipo antes de ser lançado em escala comercial, nomeado de CETO 6. Este poderá ser instalado em regiões *nearshore* ou *offshore* e seu funcionamento consiste em uma grande estrutura flutuante, que encontra-se totalmente submersa, ancorada ao fundo do oceano, e que possui em seu interior um sistema hidráulico, cujo gerador é alimentado pelo movimento contínuo de um pistão (localizado abaixo da estrutura principal), em função da componente vertical das ondas. A energia gerada é levada a costa por meio de cabos conectados na parte superior, evitando as possíveis perdas de energia que ocorriam nos modelos anteriores. Estima-se que o potencial de geração do CETO 6 seja de, aproximadamente, 1 MW (OTTAVIANO, 2016).

Um esquema de funcionamento do conversor CETO 6 é apresentado na Figura 2.10.

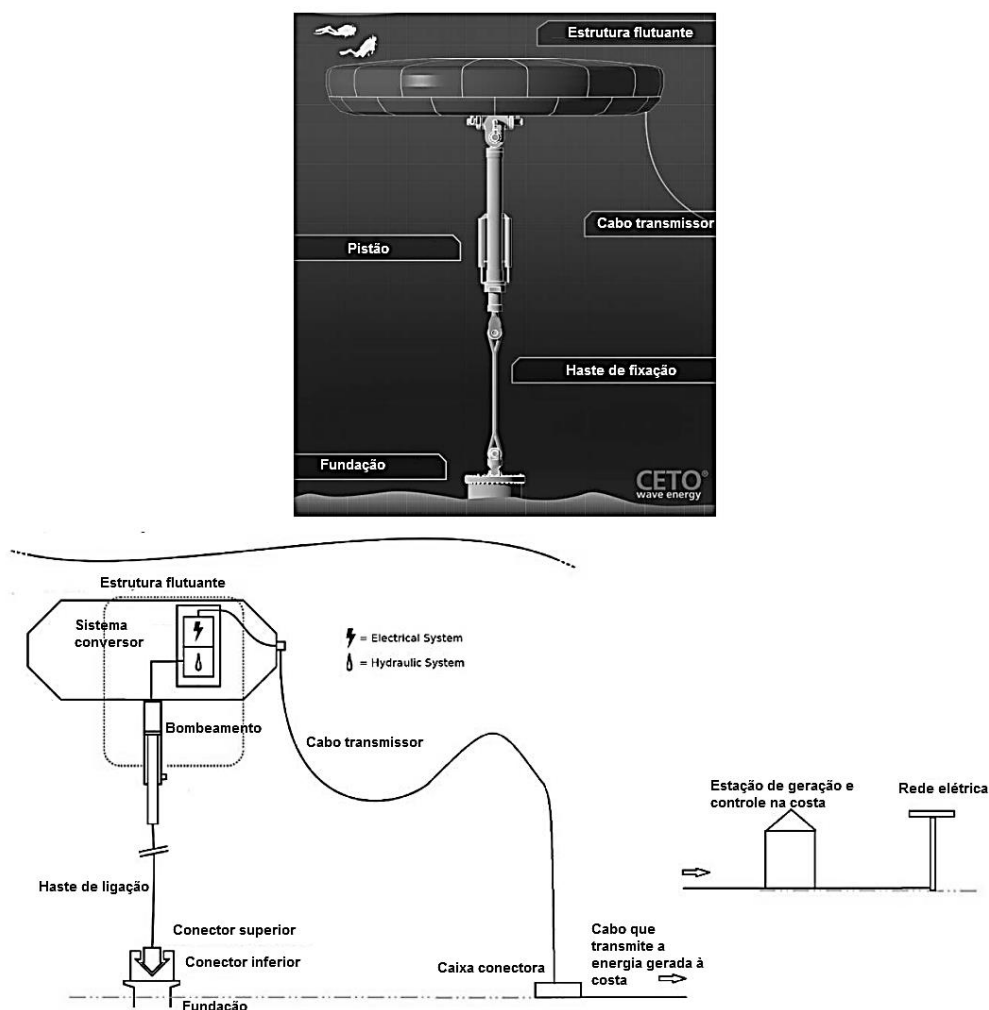


Figura 2.10 – Funcionamento do dispositivo CETO 6 (fonte: adaptado de OTTAVIANO, 2016)

### 2.3.2.2 Conversores do tipo coluna de água oscilante

Dispositivos deste tipo possuem uma câmara por onde a água entra e, em função do movimento das ondas, a coluna de água existente neste local varia com o tempo, induzindo gradientes de pressão que movimentam uma turbina do tipo *Wells* (capaz de girar em ambos sentidos). Estima-se que a absorção de energia do movimento das correntes de ar seja cerca de até 30% da energia existente (HOLMBERG et al., 2011).

Na Figura 2.11 é mostrado um esquema do funcionamento deste tipo de dispositivo.

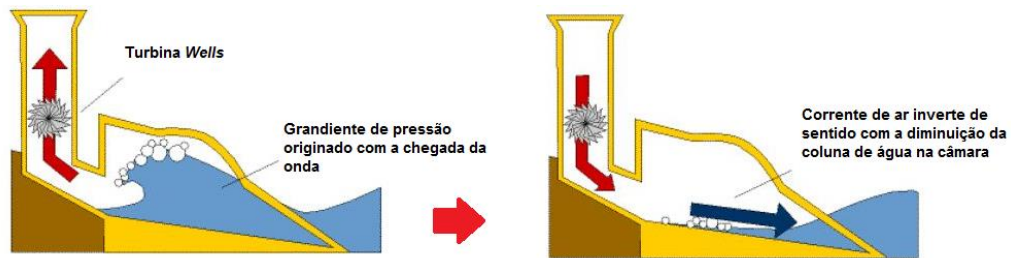


Figura 2.11 – Geração de eletricidade em conversores do tipo coluna de água oscilante (fonte: adaptado de THERMAL FLUIDS CENTRAL, 2010)

Como principais exemplos de conversores que utilizam esta tecnologia, pode-se citar o *Limpet* (conversor *Shoreline* construído no Reino Unido, com potencial de 500 kW), o *Oceanlinx greenWAVE* (dispositivo *nearshore* em funcionamento na Austrália, que possui 1 MW de potencial) e o *Ocean Energy Buoy* (protótipo *offshore* colocado em funcionamento na Irlanda, que encontra-se em fase de testes), os quais são apresentados na Figura 2.12 (FALCÃO; HENRIQUES, 2016).



(a) Limpet



(b) Ocean Energy Buoy



(c) Oceanlinx greenWAVE

Figura 2.12 – Principais dispositivos de coluna de água oscilante (fonte: FALCÃO; HENRIQUES, 2016)

### 2.3.2.3 Dispositivos submersos com diferencial de pressão

Conversores deste tipo possuem uma certa similaridade de operação com os dispositivos de absorção pontual, porém são típicos de regiões mais profundas e encontram-se totalmente submersos e fixos ao fundo do oceano. A dinâmica das ondas induz um movimento vertical no dispositivo, movimentando um pistão, fazendo com que um sistema secundário, contido na câmara principal, gere energia elétrica. O principal dispositivo deste tipo é o *Archimedes Wave Swing* (AWS), que tem seu princípio de funcionamento descrito na Figura 2.13 (CARGO, 2012).

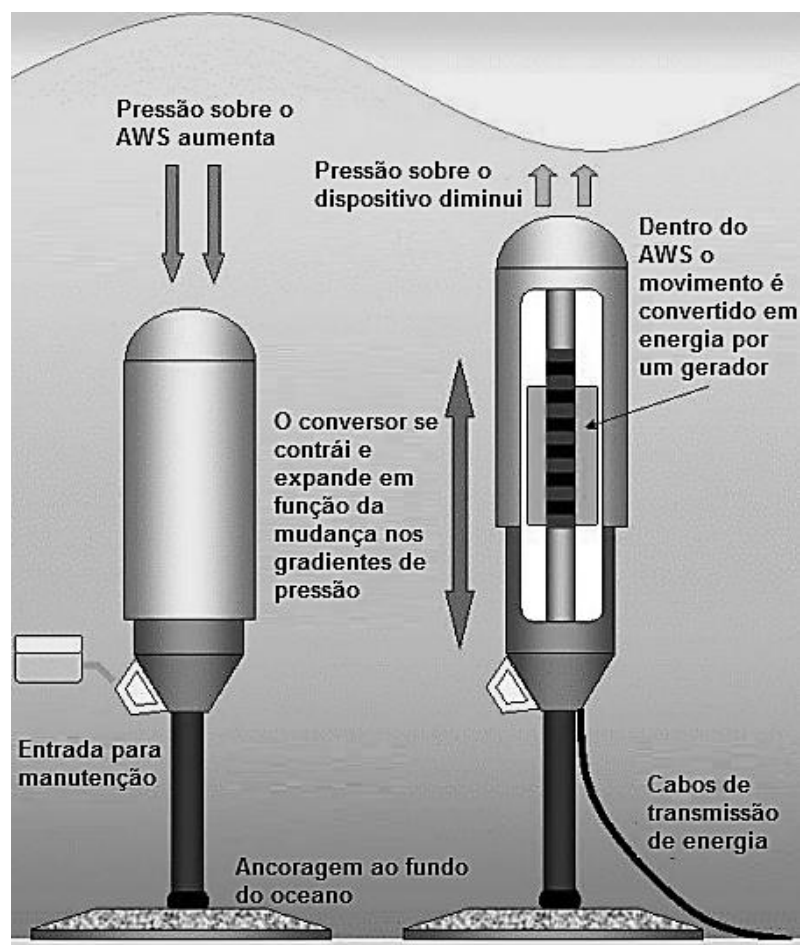


Figura 2.13 – Princípio de funcionamento do AWS (fonte: CARGO, 2012)

Meisen e Loiseau (2009) ressaltam que o dispositivo deve ser instalado em zonas *offshore* em profundidades entre 40 m e 100 m, para que produzam o potencial esperado de 1,2 MW por unidade (o que equivale, aproximadamente, à energia consumida por 500 residências).

### 2.3.2.4 Corpos com rotação de massa

Segundo Amir et al. (2016), o princípio de funcionamento deste tipo de conversor está baseado na captação do movimento de elevação e balanço das ondas, que ocasionam uma força excêntrica e um movimento de precessão (mudança no eixo de rotação), respectivamente. Em ambos casos, o dispositivo sofre rotação, o que aciona um gerador contido em sua parte interna. Este dispositivo, também conhecido como *Penguin*, foi desenvolvido pela empresa *Wello Ltd*, e é construído para ser rentável, simples e extremamente durável perante os diversos estados de oceano. Seu potencial energético, por unidade, encontra-se entre 0,5 MW e 1 MW.

Hottola (2016) relata que o *Penguin* é um conversor de fácil construção e que deve ser instalado em regiões *offshore* em profundidades próximas a 50 m. Além disso, evidencia a alta capacidade de geração de energia mesmo em ondas de pequena amplitude, variando entre 300 kW e 700 kW, para essas condições. A figura 2.14 ilustra o *Penguin*.



Figura 2.14 – Dispositivo conversor de rotação de massa (*Penguin*)  
(fonte: AMIR et al., 2016)

### 2.3.2.5 Atenuadores

São conversores do tipo flutuantes alinhados à direção de propagação das ondas, em que sua dimensão é significativa em comparação ao comprimento da onda incidente, fazendo com que o dispositivo compreenda diversas cristas de onda. Normalmente são compostos por vários segmentos ou partes, gerando energia pelo movimento relativo que ocorre entre estes (CARGO, 2012). Os principais exemplos deste grupo de dispositivos são o *Pelamis* e o *Wavestar*.

#### 2.3.2.5.1 *Pelamis*

Este conversor é similar a uma “cobra”, podendo oscilar tanto na vertical quanto na horizontal. Seus segmentos são ligados por articulações que, ao se movimentarem, induzem um sistema interno, composto por pistões, a gerar energia por meio de uma pequena turbina. Esta estrutura flutuante *offshore* deve ser instalada em regiões com profundidade próxima a 50 m, possui aproximadamente 150 m de extensão e detém um potencial médio de geração de 750 kW. O mesmo encontra-se esquematizado na Figura 2.15 (JOUBERT et. al, 2013).

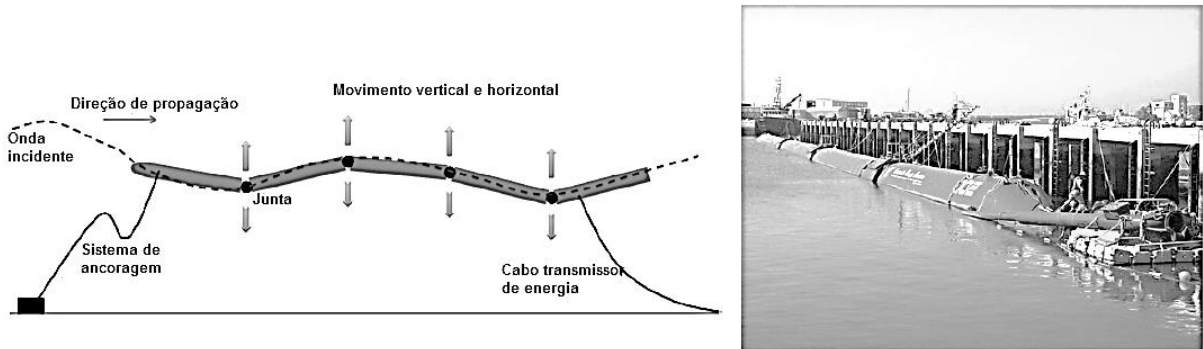


Figura 2.15 – Funcionamento do Pelamis (fonte: adaptado de KARIMIRAD, 2014)

### 2.3.2.5.2 Wavestar

O *Wavestar* normalmente é instalado em profundidades entre 7 m e 30 m e pode ser considerado como um conjunto de conversores de absorção pontual. Estes são ligados a uma grande estrutura flutuante por braços mecânicos, que, por sua vez, movimentam os geradores existentes na plataforma principal. Assim, o movimento vertical das ondas é captado por diversos segmentos, otimizando o potencial de geração deste dispositivo. Pode-se citar como principal vantagem desse conversor o fato do mesmo poder erguer seus braços mecânicos em condições extremas do oceano, evitando avarias em sua estrutura (KARIMIRAD, 2014).

A Figura 2.16a apresenta um modelo atual deste dispositivo, conhecido como *Wavestar C-6*, com capacidade de produção de 600 kW e que pode, inclusive, formar um sistema híbrido de geração de energia (Figura 2.16b), no qual parte da eletricidade é gerada pela energia eólica e outra pela energia das ondas.

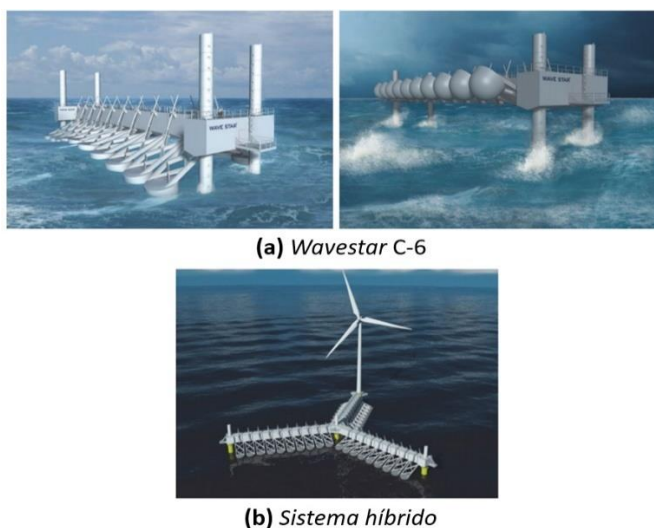


Figura 2.16 – Wavestar (fonte: MARQUIS et al., 2012)

### 2.3.2.6 Dispositivos de galgamento

O princípio de funcionamento destes conversores consiste na utilização de uma rampa concentradora em sua entrada, a qual alimenta um reservatório interno, de nível variável, em função da entrada de água oriunda do empolamento das ondas. Na saída do mesmo, são instaladas turbinas axiais que se movimentam conforme a água retorna ao oceano (DHANAK et al., 2016).

Bevilacqua e Zanuttigh (2011) ressaltam que estes dispositivos possuem baixas flutuações na produção de energia, se comparados a outras tecnologias existentes, pois a geração de eletricidade está diretamente associada ao nível d'água existente no reservatório interno. Dessa maneira, os dispositivos podem funcionar em condições mais calmas de oceano, além do fato de poderem ser associados a outras funções, como a prática da pesca ou sua utilização como estruturas de dissipação de ondas. Alguns cuidados devem ser tomados em sua execução, como garantir segurança à fadiga e a durabilidade da estrutura, bem como a correta ancoragem da mesma ao fundo do oceano. Podem ser citados como exemplos dessa tecnologia, o *Wavedragon* (estrutura *offshore* com potencial estimado entre 4 MW e 10 MW) e o *Sea-wave Slot-cone Generator* — *SSG* (dispositivo construído sobre a costa, que encontra-se em fase de desenvolvimento), apresentados nas Figuras 2.17 e 2.18, respectivamente.

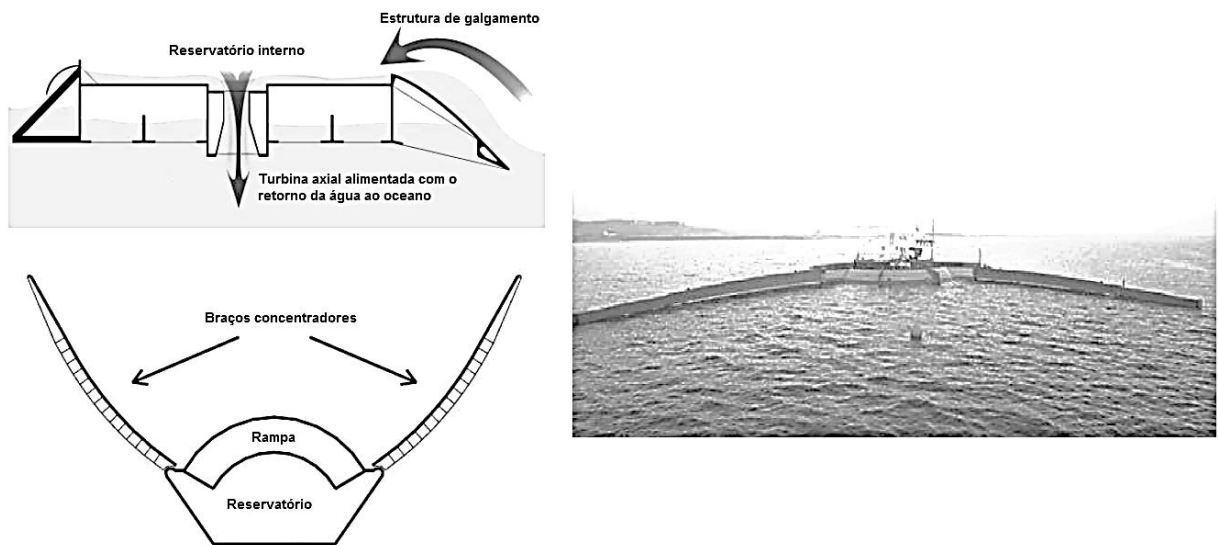


Figura 2.17 – Funcionamento do *Wavedragon* (fonte: adaptado de BEVILACQUA; ZANUTTIGH, 2011)



Figura 2.18 – *Design* do SSG (fonte: VICINANZA et al., 2012)

### 2.3.2.7 Conversores por translação de ondas

Esta metodologia de conversão baseia-se na captação da componente horizontal da velocidade das ondas, a qual movimentava uma estrutura em formato de placa que gira em torno de uma rótula localizada na base do dispositivo. O corpo principal é conectado a um ou mais pistões que impulsionam um sistema hidráulico secundário (conforme mostra a Figura 2.19), exercendo um movimento similar a um pêndulo, gerando energia elétrica. Pode-se citar o *Waveroller*, o *Oyster* e o *Langlee* como exemplos de dispositivos conversores deste tipo (SCHMITT; ELSAESSER, 2015).



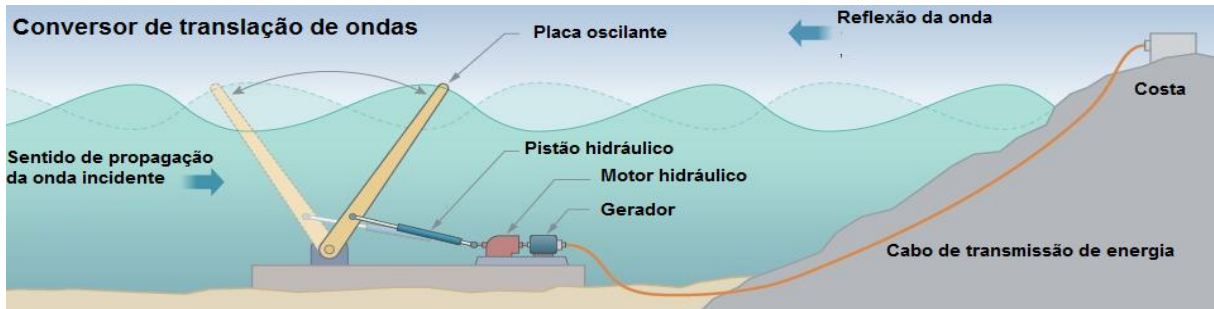


Figura 2.19 – Esquema de funcionamento de um OWSC  
(fonte: adaptado de U.S DEPARTMENT OF ENERGY, [2016?])

### 2.3.2.7.1 Oyster

O *Oyster* é um dos dispositivos pioneiros que utiliza o princípio de translação por ondas. O mesmo foi criado e vem sendo aperfeiçoado pela empresa *Aquamarine*, que sugere a sua instalação em profundidades em torno de 12 m, para que praticamente toda coluna de água existente seja ocupada pela placa do conversor. O primeiro protótipo desenvolvido foi o *Oyster 1* (Figura 2.20a) em 2009, com capacidade de geração de 315 kW. O segundo, atual protótipo, é conhecido como *Oyster 800* (Figura 2.20b), possuindo 12 m de altura e 26 m de largura, com 800 kW de potencial. O mecanismo de funcionamento baseia-se no movimento oscilante para frente e para trás de sua placa, que passa a impulsionar água em alta pressão a uma central localizada na costa, onde existe uma turbina que gera energia elétrica (RÜHLICK; HAAG, 2012).

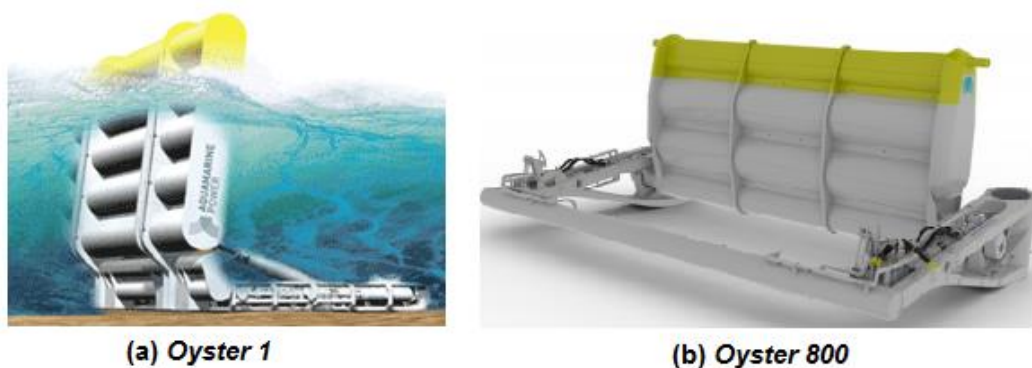


Figura 2.20 – Modelos do dispositivo *Oyster* (fonte: RÜHLICK; HAAG, 2012)

O trabalho de Folley et al. (2007) ressalta que os OWSC's tem sua capacidade de captação de energia reduzida à medida que o período da onda aumenta. Além disso, os autores relatam que a largura da placa e a profundidade onde o dispositivo é instalado influenciam diretamente no

período de oscilação do mesmo (Figura 2.21), da mesma forma que a espessura da placa deve variar conforme a profundidade de instalação (Figura 2.22).

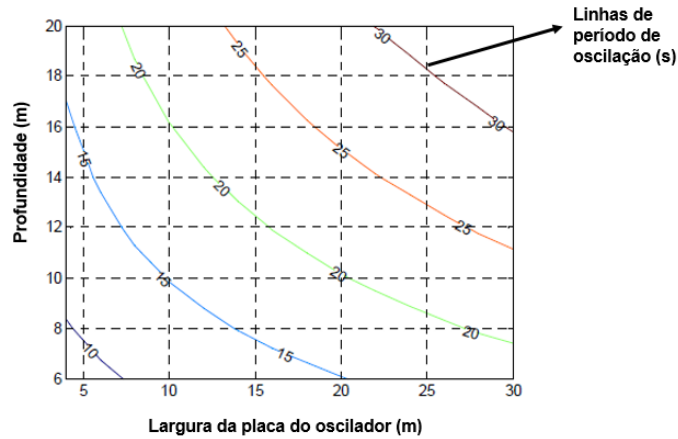


Figura 2.21 – Variação do período de oscilação de um OWSC de 2 m de espessura, em função da profundidade e da largura do oscilador (fonte: adaptado de FOLLEY et al., 2007)

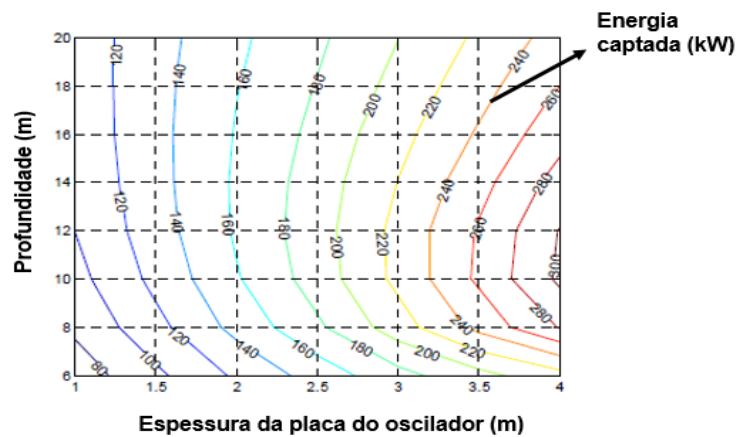


Figura 2.22 – Energia captada em função da profundidade e da espessura do oscilador, considerando o caso de uma placa de 10 m de largura, sob ação de uma onda incidente de 10 s de período e 2 m de altura (fonte: adaptado de FOLLEY et al., 2007)

Henry et al. (2010) abordam que o *Oyster*, mesmo instalado em regiões *nearshore*, possui algumas vantagens como o aumento da força horizontal e a grande possibilidade de movimento em função da altura da placa oscilante, que se estende desde o fundo até a superfície da água. Os mesmos autores relatam que a largura do oscilador possui uma relação aproximadamente linear com a potência média capturada pelo mesmo, o que pode ser observado na Figura 2.23.

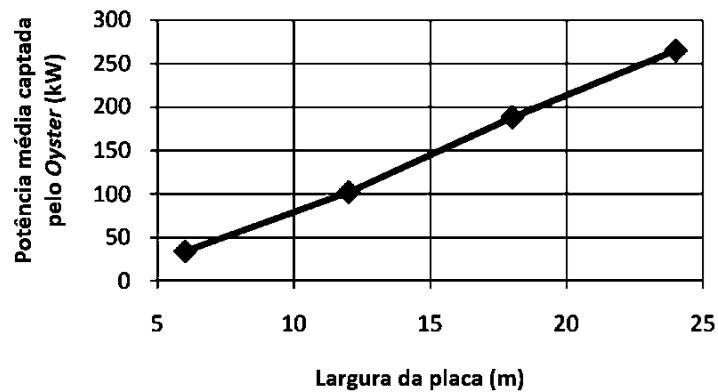


Figura 2.23 – Potência média captada em função da largura da placa de um OWSC do tipo *Oyster* (fonte: adaptado de HENRY et al., 2010)

Por meio dos experimentos realizados por Whittaker et al. (2007), é possível afirmar que os dispositivos por translação tem sua captação de energia e, portanto, seu potencial de geração de eletricidade, diminuídos à medida que as placas atingem posições mais inclinadas, conforme mostram os resultados dispostos na Figura 2.24.

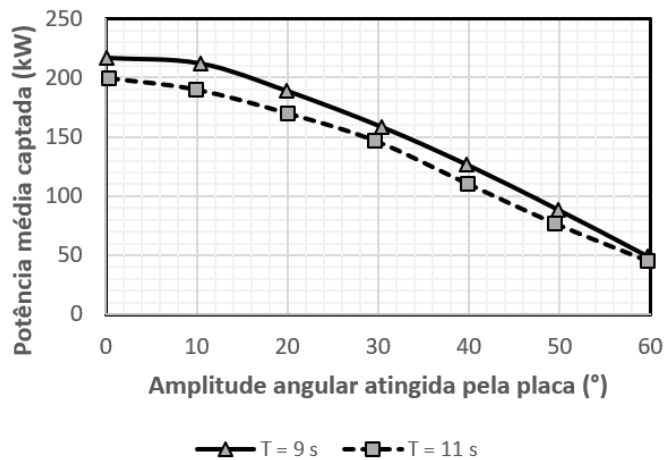


Figura 2.24 – Diminuição da energia captada, em função da amplitude angular atingida pela placa do oscilador (fonte: adaptado de WHITTAKER et al., 2007)

O recente trabalho de Wei et al. (2015) reúne diversas informações sobre estudos numéricos e experimentais acerca de um modelo de *Oyster* com altura, espessura e largura de placa iguais a, respectivamente, 12 m, 3 m e 26 m. Estes autores relatam que o comportamento hidrodinâmico do dispositivo (aceleração angular e amplitude angular atingidas pela placa) não apresenta variações significativas em função do modelo de turbulência utilizado na modelagem numérica. O trabalho ressalta que o desempenho destes dispositivos é influenciado, principalmente, pelas perdas viscosas, as quais são mais acentuadas nos modelos em escala

reduzida do que nos dispositivos em escala real. Além disso, os mesmos autores abordam que as zonas sujeitas aos maiores gradientes de velocidade e formação de vórtices são as extremidades laterais e superiores das placas (Figuras 2,25a e 2.25b).

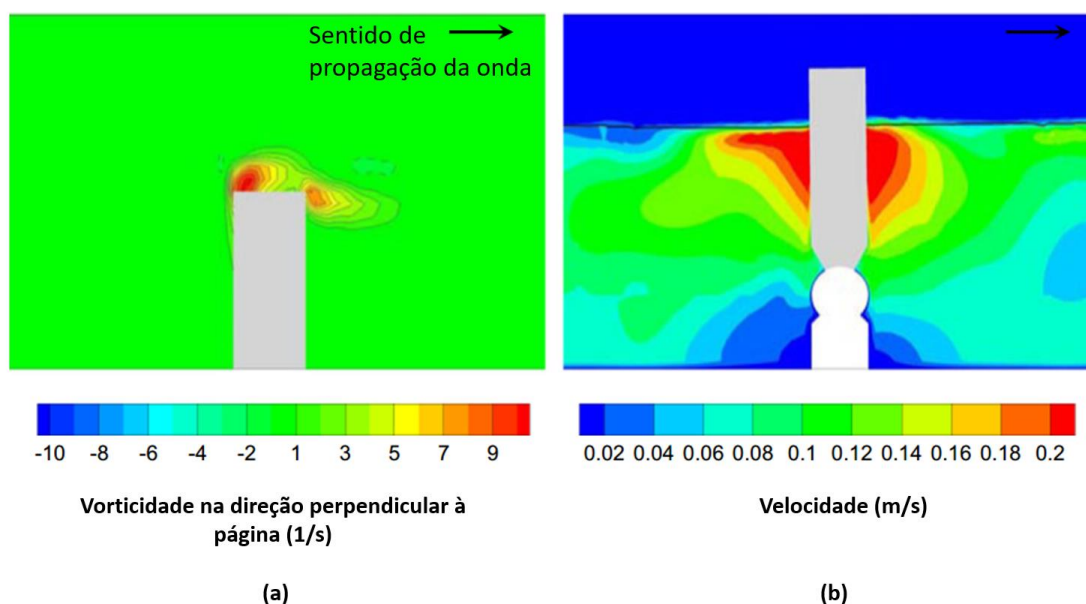


Figura 2.25 – Regiões sujeitas aos maiores gradientes de vorticidade (a) e velocidade (b) de um dispositivo do tipo *Oyster* (fonte: adaptado de WEI et al., 2015)

No mesmo trabalho, os autores testaram numericamente os efeitos de escala (sendo 1:1, 1:25, 1:50 e 1:100 as escalas estudadas) sobre a hidrodinâmica do *Oyster*, levando à conclusão de que a mesma não é alterada significativamente em função da escala utilizada.

### 2.3.2.7.2 *Waveroller*

Este dispositivo é muito similar ao *Oyster*, porém, ao contrário deste, encontra-se totalmente submerso e fixo ao fundo do oceano em profundidades entre 8 m e 20 m na região *nearshore*. Sua placa movimenta uma bomba hidráulica de pistão, que passa a impulsionar um fluido em alta pressão em um sistema hidráulico interno, alimentando um gerador que produz energia elétrica, a qual é levada à costa por meio de cabos. Estima-se, atualmente, que um único dispositivo, em função de sua geometria e dimensões, pode resultar em um potencial de geração entre 500 kW e 1000 kW (AW-ENERGY, 2017).

Na Figura 2.26a é apresentado o protótipo constituído por três placas de *Waveroller*, colocado para funcionar em 2012 em Peniche (Portugal), o qual constituí o Projeto SURGE (*Simple Underwater Renewable Generation of Electricity*), com potencial de 300 kW. Um modelo mais

recente com potencial de 350 kW, composto por uma única placa de 18 m de largura e 10 m de altura, é mostrado na Figura 2.26b (KASANEN, 2015).



Figura 2.26 – Modelos recentes do dispositivo *Waveroller* (fonte: KASANEN, 2015)

Conforme Mäki et al. (2014), a energia absorvida pelo dispositivo aumenta para maiores alturas de onda significativa ( $H_s^1$ ) e, com o aumento do período, sofre, primeiramente, um leve crescimento para, após um pico próximo aos 10 s, permanecer praticamente constante. Tal resultado está apresentado na Tabela 2.3 e, segundo os autores, o mesmo comportamento ocorre para diversas profundidades de instalação e direções de propagação de onda.

		Te (s)										
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H <sub>s</sub> (m)	1	0.043	0.051	0.060	0.062	0.065	0.065	0.064	0.061	0.061	0.057	0.057
	2		0.198	0.226	0.238	0.232	0.240	0.233	0.225	0.212	0.197	0.191
	3			0.465	0.485	0.491	0.454	0.463	0.454	0.440	0.408	0.399
	4				0.744	0.697	0.782	0.745	0.698	0.722	0.659	0.631
	5					0.973	1.000	0.998	0.982	0.953	0.889	0.844

Tabela 2.3 – Variação da energia absorvida com o crescimento da altura significativa e do período de onda (fonte: MÄKI et al., 2014)

O trabalho de Vargas (2015) reúne um estudo numérico da ação de ondas regulares sobre um módulo composto por três *Waverollers*, considerando posições estáticas de suas placas. Neste trabalho são analisados os campos de velocidade, vorticidade e forças atuantes, no qual é observado que um aumento na altura de onda (Figura 2.27b) é responsável pela intensificação das forças horizontais atuantes (relacionadas à produção de energia). Por outro lado, o aumento no período (Figura 2.27a) ocasiona, primeiramente, um crescimento das forças horizontais até

<sup>1</sup> A altura significativa de onda é definida como a média de altura de 1/3 das ondas mais altas, contidas em um registro temporal.

um pico máximo de período, próximo a 10 s, estando de acordo com os resultados apresentados na Tabela 2.3.

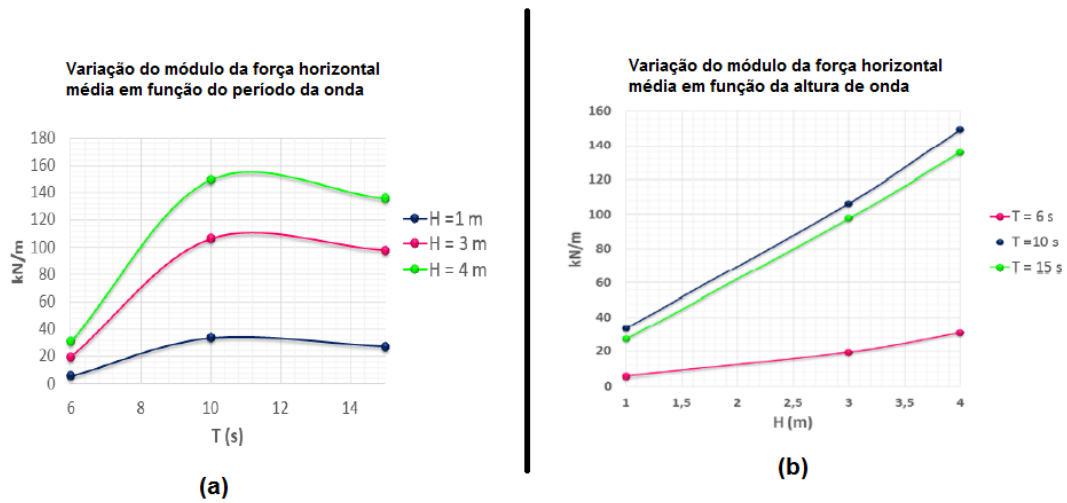


Figura 2.27 – Variação do módulo da força horizontal média, em função da variação do período e da altura de onda (fonte: adaptado de VARGAS, 2015)

No mesmo trabalho, é observado que o aumento da altura de onda é responsável por intensificar a magnitude da velocidade nas regiões próximas às placas, assim como o aumento do período ocasiona maiores magnitudes de velocidades nas regiões entre as placas, conforme mostra a Figura 2.28.

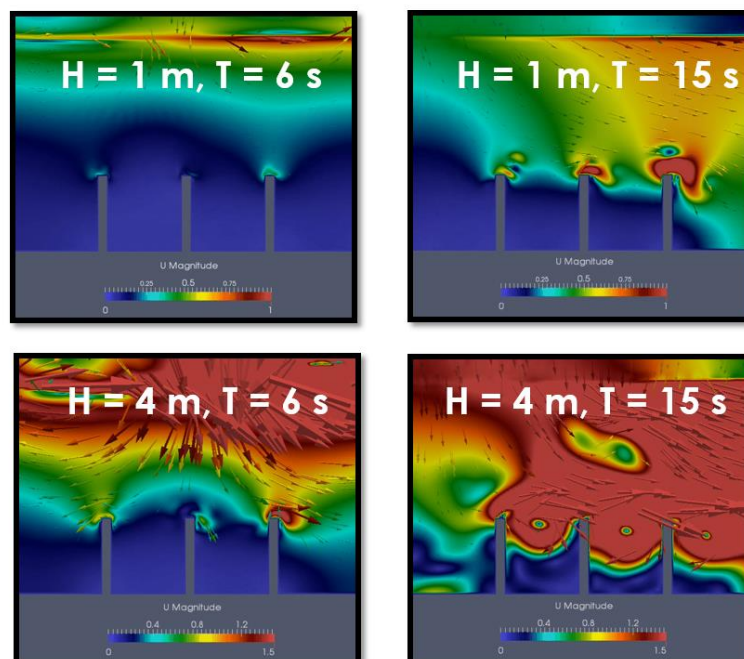


Figura 2.28 – Campo de velocidades em função do aumento do período e da altura de onda (fonte: adaptado de VARGAS, 2015)



### 2.3.2.7.3 Langlee

Dos dispositivos que utilizam o princípio por translação de ondas, o *Langlee* é o único que pode ser instalado em regiões mais profundas (*offshore*), pois ele é assentado em uma estrutura flutuante, que transmite a energia gerada a uma central, localizada na praia, por meio de cabos submersos. Da mesma forma que o *Waveroller*, ele possui o gerador de energia dentro da estrutura flutuante, sendo seu funcionamento dependente do movimento oscilatório de suas placas (BARBARIT et al., 2012).

Atualmente, existem dois protótipos do *Langlee* sendo testados, o primeiro deles (Figura 2.29), apresentado no trabalho de Pecher et al. (2010), é constituído de uma estrutura flutuante composta por quatro placas aproximadamente quadradas (com lados de 9,5 m). O segundo (Figura 2.30), conhecido por *Langlee Robusto*, é composto por duas placas de 8 m de altura e 28 m de largura e possui capacidade de geração de 132 kW (LANGLEE WAVE POWER, 2015).

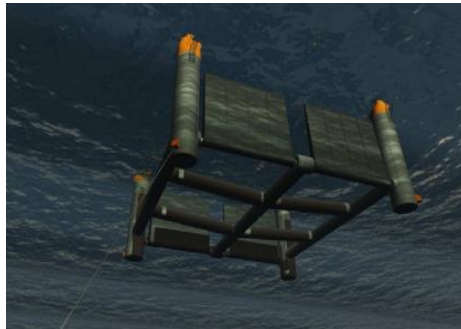


Figura 2.29 – Protótipo do *Langlee* composto por quatro placas oscilantes (fonte: PECHER et al., 2010)

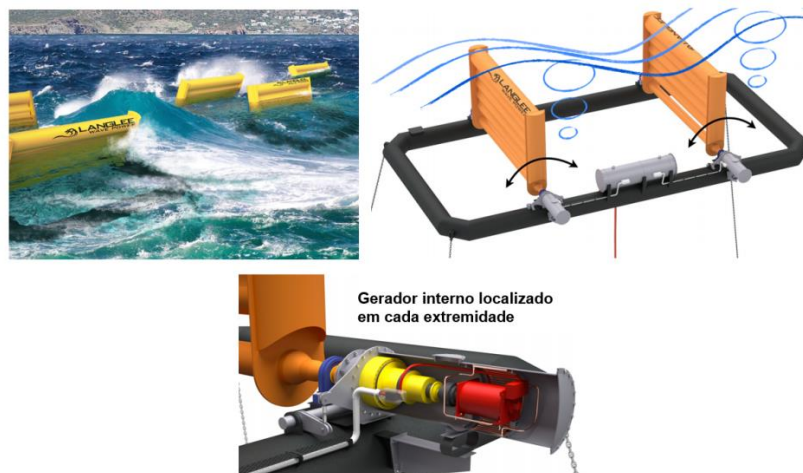


Figura 2.30 – Esquema de funcionamento do *Langlee Robusto* (fonte: adaptado de LANGLEE WAVE POWER, 2015)

Peiffer e Roddier (2012) ressaltam que existe a possibilidade da utilização do *Langlee* em um dispositivo híbrido, gerando energia elétrica por meio das ondas e pela força dos ventos, conforme mostra a Figura 2.31. Os resultados encontrados por estes autores lança esta associação de fontes de geração como promissora.

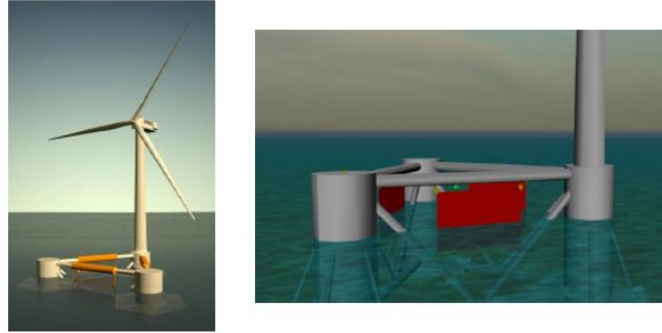


Figura 2.31 – Dispositivo híbrido de conversão de energia (fonte: PEIFER; RODDIER, 2012)

Testes realizados pela *Langlee Wave Power* (2015) mostram que o potencial de geração de energia do *Langlee* tende a aumentar para alturas de onda maiores e para períodos próximos a 10 s, conforme mostra a Tabela 2.4.

H \ T	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0.5	2	6	11	13	12	9	7	5	3	2	2
1	6	25	48	57	51	38	30	20	13	9	8
1.5	13	58	118	132	132	102	82	52	33	22	16
2	22	90	132	132	132	132	132	90	60	42	33
2.5	33	131	132	132	132	132	132	132	94	69	56
3	45	132	132	132	132	132	132	132	132	99	79
3.5	54	132	132	132	132	132	132	132	132	132	104
4	57	132	132	132	132	132	132	132	132	132	127

Tabela 2.4 – Matriz de geração de energia, em kW, do *Langlee Robusto*, em função do período e da altura de onda (fonte: adaptado de LANGLEE WAVE POWER, 2015)



### 3 METODOLOGIA

O estudo é realizado por meio do código computacional livre e aberto OpenFOAM, associado ao seu complemento OLAFOAM, que agrega ao código principal as teorias e geração de ondas. Ambos são fundamentados em volumes finitos para a resolução das equações que descrevem a hidrodinâmica e a mecânica dos OWSC's, utilizando o método VOF (*Volume of Fluid*) para a representação da superfície livre e a metodologia RANS para a modelagem da turbulência. Este capítulo, portanto, destina-se a abordagem das equações governantes do escoamento e da dinâmica de corpo rígido do conversor, assim como, a apresentação das condições de contorno aplicadas às simulações, ao modelo numérico utilizado para a representação do movimento do dispositivo, ao cálculo para a estimativa da energia captada e aos casos analisados.

#### 3.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DO ESCOAMENTO E MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

Todos os escoamentos incompressíveis podem ser descritos pelas equações de Navier-Stokes e da continuidade, as quais, escritas em notação tensorial, são dadas por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (34)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (35)$$

sendo,  $u_i$  e  $u_j$  as componentes da velocidade em uma determinada direção, e  $x_i$  e  $x_j$  as componentes da posição em uma dada direção.  $P$ ,  $g_i$  e  $\nu$  representam, respectivamente, a pressão do fluido, a componente da aceleração da gravidade e a viscosidade cinemática da água.

Conforme Rezende (2009), as equações anteriores podem ser reescritas em termos médios por meio do princípio da decomposição em médias de Reynolds:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (36)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (37)$$

O termo  $-\overline{u_i' u_j'}$  chama-se tensor de Reynolds e representa a influência das flutuações de turbulência no fluxo médio. Este termo resulta em novas incógnitas agregadas ao sistema de equações existente, sendo necessárias equações adicionais para sua resolução. Uma das maneiras de contornar este problema é utilizar a hipótese de Boussinesq, que propõe a representação da turbulência por um modelo análogo ao da tensão de origem molecular, possibilitando reescrever a Eq. 36 da seguinte maneira (LAUNDER; SANDHAM, 2002):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{1}{\rho} \bar{P} + \frac{2}{3} \kappa \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i, \quad (38)$$

em que  $\kappa$  e  $v_t$  correspondem, respectivamente, a energia cinética turbulenta e a viscosidade turbulenta.

O modelo de turbulência (necessário para o tratamento da viscosidade turbulenta presente na Eq. 38) utilizado ao longo deste estudo é o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST, proposto por Menter et al. (2003), que combina as principais vantagens dos modelos  $\kappa$ - $\omega$  e  $\kappa$ - $\epsilon$ , e que mostra-se adequado ao caso estudado (WEI et al., 2015).

### 3.2 MOVIMENTO DO CORPO RÍGIDO E CÁLCULO DA POTÊNCIA CAPTADA PELO DISPOSITIVO

Os dispositivos oscilantes por translação de ondas descrevem um movimento análogo ao de um pêndulo, sendo que sua dinâmica é influenciada por uma série de forças existentes, que atuam como amortecedores do movimento. Sultan (2013) aborda as principais forças envolvidas no movimento dos OWSC:

- a) **oriunda das ondas** – resultante do movimento das ondas, onde a parte dinâmica é a que mais influencia o comportamento oscilatório das placas dos conversores;
- b) **de amortecimento** – força mecânica ocasionada pelo sistema de conversão, como, por exemplo, a força envolvida no movimento de um pistão;

- c) **hidrostática de restauração** – é a força ocasionada pelo empuxo, que tende a restaurar o movimento do corpo a sua posição de equilíbrio;
- d) **de radiação das ondas** – resultante de fenômenos como a quebra de ondas, grandes tempestades e da interação entre ondas e correntes secundárias;
- e) **de perdas** – refere-se às forças existentes nas perdas por atrito mecânico e viscoso, bem como na dissipação ocorrida na quebra das ondas.

Desta forma, a equação de movimento do corpo rígido, que define o comportamento oscilante da placa, está baseada no momento resultante em torno do eixo de rotação, descrito pela seguinte equação diferencial (RENZI et al., 2012):

$$(I_m + I_{ma}) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + (C_{ar} + C_{ad}) \frac{\partial \theta}{\partial t} + R\theta = M_t, \quad (39)$$

onde  $I_m$  e  $I_{ma}$  são, respectivamente, o momento de inércia de massa da placa e o momento de inércia de massa adicionada (em função do movimento da placa);  $C_{ar}$  e  $C_{ad}$  são os coeficientes de amortecimento em função da radiação das ondas e do dispositivo, respectivamente;  $R$  é o momento de restauração devido ao empuxo,  $M_t$  corresponde ao momento total da placa e  $\theta$  a amplitude angular atingida pela placa (contada a partir da posição inicial de  $90^\circ$  com a horizontal).

Segundo Dhanak et al. (2016), se a espessura do oscilador for muito pequena, quando comparada ao comprimento da onda incidente e à largura da placa, e a massa do dispositivo for uniformemente distribuída, podem ser usadas as seguintes expressões para o cálculo de “ $I_m$ ” e “ $R$ ”:

$$I_m = \frac{1}{3} \rho_p e_p L_p h_p^3, \quad (40)$$

$$R = 0,5 \rho g e_p L_p h_p^2 \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho}\right), \quad (41)$$

em que  $\rho_p$  corresponde à massa específica da placa;  $e_p$ ,  $L_p$ ,  $h_p$  correspondem, respectivamente à espessura, à largura e à altura da placa.

Estando solucionada a Equação (39), a potência captada (“ $P_{abs}$ ”) pelo conversor pode ser obtida por meio da seguinte expressão, resultando em um valor médio para um período de onda (RENZI et al., 2012):

$$P_{abs} = \frac{1}{T} \int_0^T C_{ad} \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 dt \quad (42)$$

### 3.3 CÓDIGO OPENFOAM E A EXTENSÃO OLAFOAM

O estudo é realizado por meio do código computacional *opensource* OpenFOAM v. 4.1, programado na linguagem C++, o qual utiliza a metodologia de discretização baseada em volumes finitos, realizando simulações numéricas diretas, de grandes escalas ou em termos médios (RANS), com esquemas de resolução com precisão de até quarta ordem. Sua programação é dividida em *solvers*, que variam em função do caso analisado e têm como objetivo a resolução de um problema contínuo de mecânica dos fluidos, e em *utilities*, que permitem trabalhar com os resultados, calculando ou extraindo determinadas variáveis de interesse (OPENFOAM FOUNDATION, 2016).

Para rodar qualquer simulação são necessários diversos arquivos, que devem ser modificados pelo usuário em função do caso estudado. Estes encontram-se em três diretórios básicos:

- a) **diretório de tempo** – reúne informações de propriedades que variam com o tempo de simulação, como a velocidade, a pressão, a vorticidade, etc;
- b) **diretório system** – é a pasta principal, que reúne as condições necessárias para solucionar as equações governantes. Desta forma, existem, pelo menos três arquivos neste diretório, um deles responsável pelo controle da simulação (*controlDict*), outro pelos métodos adotados para a discretização (*fvSchemes*) e aquele que reúne os métodos de solução a serem utilizados (*fvSolution*), como, por exemplo, o modelo de turbulência empregado;
- c) **diretório constant** – onde estão contidas informações da geometria e da malha de cálculo utilizadas (*polyMesh*) e detalhes das propriedades físicas do escoamento (*transportProperties*).

A extensão OLAFOAM agrega dois novos *solvers* ao OpenFOAM: *olaFoam* (para malhas estáticas) e *olaDyMFoam* (para malhas dinâmicas). Ambos, resolvem as equações médias de Reynolds (RANS) nas três dimensões em escoamentos bifásicos. Esta extensão também fornece ao código as teorias de hidrodinâmica das ondas, bem como as condições de contorno de geração e absorção das mesmas.

A representação da superfície livre é baseada no método VOF (*Volume of Fluid*) o qual utiliza uma variável, chamada de fração de volume, que pode variar de 0 (preenchido somente por ar)

a 1 (totalmente preenchido por água), indicando a interface ar-água. Para a correta identificação desta interface, é necessário aplicar uma compressão artificial, dando origem a um termo que é somado à equação de transporte e só fica ativo na região da superfície. A solução é calculada pelo método MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*). As velocidades e as pressões são obtidas pelo algoritmo PIMPLE, o qual é baseado no algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) e no SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), garantindo uma boa aproximação e convergência dos resultados (HIGERA, 2016).

### 3.4 DOMÍNIO, CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

O domínio de cálculo (Figura 3.1) é composto por uma entrada, uma saída, duas laterais, um topo, um fundo “tipo a” (que permanece estático), um fundo “tipo b” (que se move juntamente com o conversor, ocasionando uma região de deformação da malha de cálculo) e pela placa do dispositivo, chamada nesse estudo de “obstáculo”. Esta gira sempre em torno de um eixo existente no ponto médio da direção horizontal e que passa pela sua extremidade inferior.

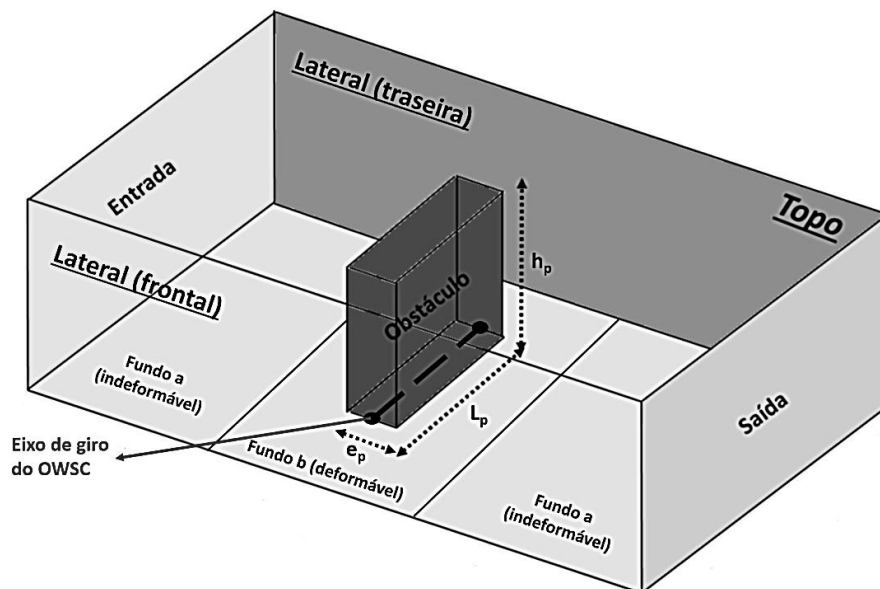


Figura 3.1 – Domínio de cálculo e placa de dimensões  $L_p$ ,  $h_p$  e  $e_p$

As dimensões do domínio e do obstáculo variam conforme o caso estudado (tal informação encontra-se detalhada na Seção 3.6, que aborda os casos estudados e os domínios utilizados), porém, em todos os casos, exceto na validação numérica do código, o obstáculo encontra-se localizado exatamente no centro do domínio.

As condições de contorno aplicadas em cada passo de tempo (sendo a discretização temporal inicial  $\Delta t = 0,01$  s a adotada e considerando que esta seja modificada a cada instante, em função da deformação dos elementos de malha, garantindo a estabilidade numérica) encontram-se dispostas na Tabela 3.1, e as condições iniciais da simulação são mostradas na Tabela 3.2.

<i>patch/ Cond.</i>	<b>Velocidade</b>	<b>Pressão</b>	<b>Alpha/water</b>	<b>Point Displacement</b>
<b>obstáculo</b>	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>calculated/sixDoFRigidBodyDisplacement*</i>
<b>fundoa</b>	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>
<b>fundob</b>	<i>slip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>calculated/fixedValue*</i>
<b>entrada</b>	<i>waveVelocity</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>waveAlpha</i>	<i>fixedValue</i>
<b>saída</b>	<i>waveAbsorption2DVelocity</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>
<b>topo</b>	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>totalPressure</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>fixedValue</i>
<b>laterais</b>	<i>Empty (2D); slip (3D)</i>	<i>Empty (2D); zeroGradient (3D)</i>	<i>Empty (2D); zeroGradient (3D)</i>	<i>fixedValue</i>

\*As condições *sixDoFRigidBodyDisplacement* e *fixedValue* aplicadas, respectivamente, aos contornos obstáculo e fundob, no arquivo *PointDisplacement*, referem-se apenas ao caso do estudo destinado à verificação da metodologia de fundo deformável.

Tabela 3.1 – Condições de contorno usadas para as simulações no código OpenFOAM

<i>patch/ Cond.</i>	<b>Velocidade</b>	<b>Pressão</b>	<b>Alpha/water</b>	<b>Point Displacement</b>
<b>obstáculo</b>	-	<i>uniform 0</i>	-	<i>uniform 0</i>
<b>fundoa</b>	-	<i>uniform 0</i>	-	<i>uniform 0</i>
<b>fundob</b>	-	<i>uniform 0</i>	-	<i>uniform 0</i>
<b>entrada</b>	<i>uniform (0 0 0)</i>	<i>uniform 0</i>	<i>uniform 0</i>	<i>uniform 0</i>
<b>saída</b>	<i>uniform (0 0 0)</i>	-	-	<i>uniform 0</i>
<b>topo</b>	<i>uniform (0 0 0)</i>	<i>uniform 0</i>	<i>uniform 0</i>	<i>uniform 0</i>
<b>laterais</b>	<i>uniform (0 0 0) (3D)</i>	-	-	<i>uniform 0</i>
<b>internalField</b>	<i>uniform (0 0 0)</i>	<i>uniform 0</i>	<i>uniform 0</i>	<i>uniform 0</i>

Tabela 3.2 – Condições iniciais aplicadas nas simulações

A última coluna (“*Point Displacement*”) diz respeito a qual parte das fronteiras deve se deformar para acompanhar o movimento do corpo rígido, tal metodologia é abordada com mais detalhe na próxima seção.

### 3.5 MALHA DINÂMICA PARA MOVIMENTO DO CORPO RÍGIDO

A utilização de uma grade estruturada facilita o tratamento da superfície livre e o movimento oscilatório da placa do OWSC. Assim, optou-se por utilizar este tipo de malha para as simulações numéricas seguintes. A mesma é gerada pela aplicação conhecida como *snappyHexMesh*, própria do código, e que tem como função criar um “recorte” de um dado corpo em uma “malha base” inicial, o que permite o tratamento de objetos com geometrias mais complexas.

O método de deformação das malhas foi escolhido para o tratamento da dinâmica do corpo rígido considerado, em função do mesmo já fazer parte do pacote de métodos dinâmicos do código *OpenFOAM*, dispensando implementações posteriores. Por outro lado, esta metodologia é limitada no que se refere às grandes amplitudes angulares atingidas pela placa de um OWSC, resultando em elementos de malha muito angulosos que, por sua vez, ocasionam instabilidades numéricas. O problema é ainda maior quando é necessário simular a dinâmica de um OWSC do tipo *Waveroller* ou *Oyster*, os quais encontram-se muito próximos ao fundo do oceano. Em decorrência disto, o elemento que mais se deforma localiza-se praticamente junto à parte inferior do domínio, levando rapidamente à divergência dos cálculos nas situações usuais de operação destes dispositivos.

Uma forma de contornar esta limitação e estender a aplicação do método, consiste em permitir que o fundo na malha de cálculo se deforme juntamente com o movimento do corpo rígido, evitando que os elementos de grade mais próximos à parte inferior do domínio ocasionem instabilidades numéricas. Tal deformação pode ser visualizada na Figura 3.2, que mostra a comparação entre dois instantes de uma simulação numérica de um OWSC do tipo *Langlee*.

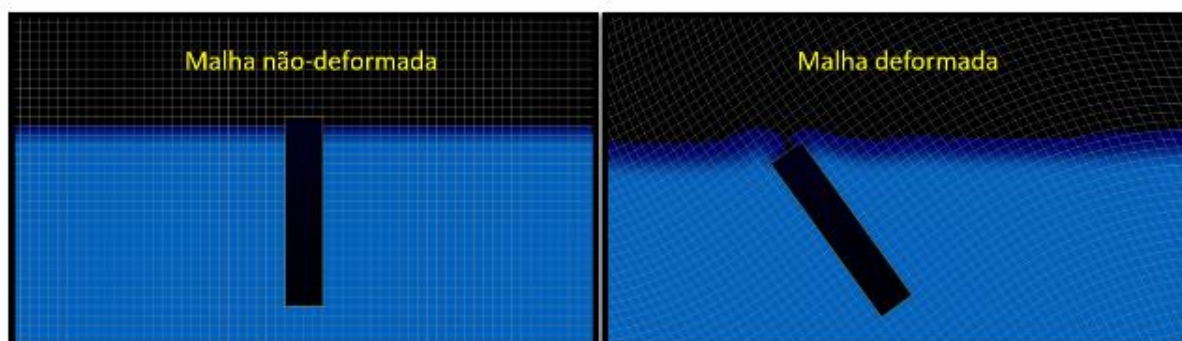


Figura 3.2 – Deformação da malha de cálculo para o tratamento do movimento do corpo rígido

O método baseado no princípio da deformação da malha é tratado no código por um *solver* denominado *dynamicMotionSolverFvMesh*. A maneira como a malha deve se deformar pode ser controlada por dois outros *solvers*: o *sixDoFRigidBodyMotion* ou o *displacementSBRStress*. O primeiro deles reúne informações como a massa, o momento de inércia de massa e centro de gravidade do corpo rígido, bem como os graus de liberdade existentes e o tamanho da região onde é permitida a deformação da malha, além de exigir a condição de contorno do tipo “*calculated*” na superfície da placa no arquivo “*Point Displacement*”. O *solver displacementSBRStress* força a malha a se ajustar da melhor forma possível para representar o

movimento do objeto considerado, sendo necessário utilizar a condição de contorno do tipo “*sixDoFRigidBodyDisplacement*” na placa do conversor no arquivo “*Point Displacement*”, com o intuito de fornecer as informações necessárias para o movimento do corpo (OPENFOAM WIKI, 2016).

O *solver sixDoFRigidBodyMotion* foi utilizado em praticamente todo o trabalho, tendo em vista que o segundo tende a falhar para os dispositivos muito próximos ao fundo do oceano. Assim, o *solver “displacementSBRStress”* somente foi utilizado no estudo de verificação da metodologia que utiliza o fundo deformável. A Figura 3.3 mostra um exemplo de malha dinâmica utilizada na simulação de um OWSC do tipo *Waveroller*, na qual é possível identificar a região onde a malha está livre para se deformar e o comportamento do fundo que acompanha a deformação dos elementos da mesma.

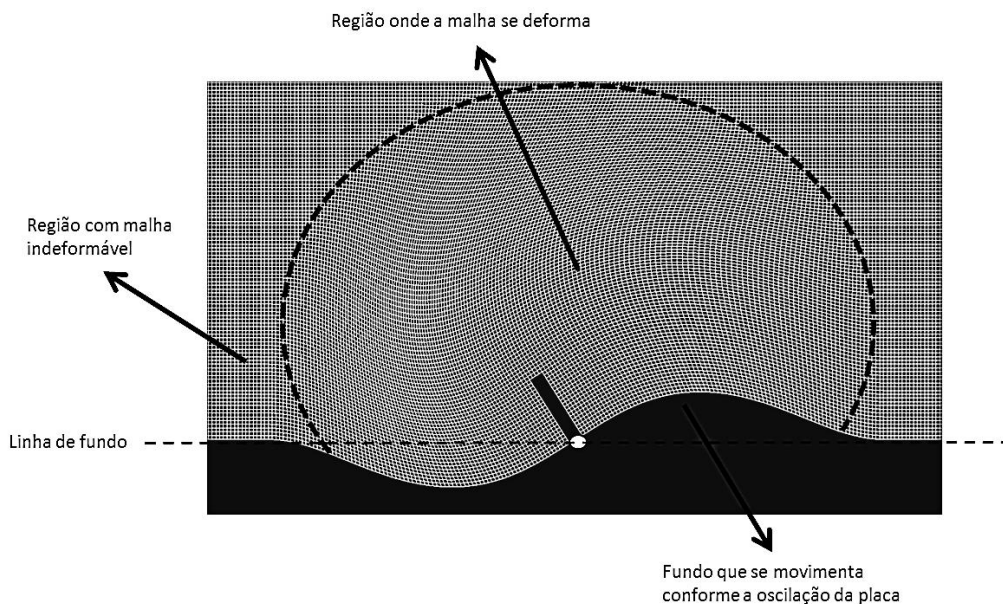


Figura 3.3 – Movimento do corpo rígido com o *solver sixDoFRigidBodyMotion*

### 3.6 DOMÍNIOS UTILIZADOS

No presente trabalho, foram utilizados três domínios numéricos (domínios  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ ) para a realização das simulações. O primeiro deles (domínio  $D_1$ ) é destinado à etapa de verificação dos resultados numéricos com resultados experimentais, fornecidos pela literatura, e aos testes das condições de contorno. O segundo (domínio  $D_2$ ) destina-se à verificação das condições de contorno, do modelo bidimensional e das simulações posteriores do trabalho. Por fim, o terceiro



domínio (domínio D<sub>3</sub>) é utilizado somente na etapa da verificação da metodologia que permite a deformação do fundo para acompanhar o movimento da placa do conversor.

### 3.6.1 Domínio D1

Este domínio foi elaborado com base nos trabalhos de Rafiee et al. (2013) e Wei et al. (2015). O mesmo precisou ser levemente readaptado, em função da metodologia aplicada neste trabalho, que utiliza a deformação de malhas e o movimento da malha do fundo “tipo b” para permitir maiores amplitudes, principalmente para simulações de dispositivos do tipo *Oyster* e *Waveroller*. A principal mudança no domínio consiste na utilização de um fundo plano na parte em que o dispositivo está assentado, enquanto que o fundo possui uma leve declividade no domínio original. A altura do degrau (0,15 m), existente entre a parte mais profunda e a mais rasa, foi mantida e a placa foi posicionada a uma distância de 9,82 m da região de geração da onda. O domínio readaptado, utilizado para a verificação numérica do código e das condições de contorno aplicadas sobre a placa do conversor, encontra-se esquematizado na Figura 3.4.

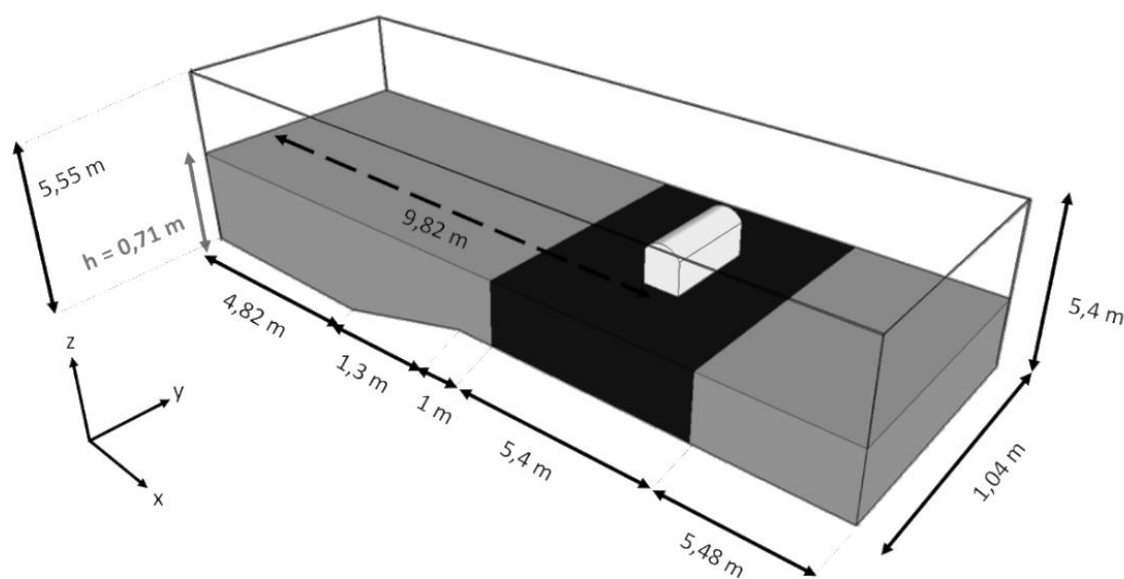


Figura 3.4 – Domínio de cálculo utilizado na validação com os resultados experimentais de Rafiee et al. (2013) e Wei et al. (2015)

### 3.6.2 Domínio D2

O segundo domínio possui um fundo plano, 12,8 m de extensão e 4,8 m de altura. A sua largura possui 4,8 m nas simulações tridimensionais e largura igual à largura da placa nos modelos

bidimensionais. As placas estudadas localizam-se sempre na metade do domínio, tendo apenas a distância entre a sua base e o fundo do domínio variada, em função do tipo de conversor abordado. O domínio  $D_2$ , utilizado em grande parte das simulações do presente trabalho, é apresentado na Figura 3.5.

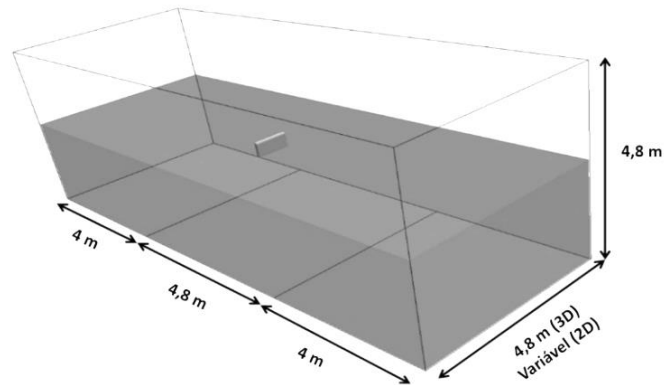


Figura 3.5 – Domínio de cálculo utilizado em grande parte dos estudos realizados no presente trabalho

### 3.6.3 Domínio D3

Este domínio destina-se, exclusivamente, à avaliação da metodologia de fundo deformável. O mesmo se assemelha muito ao domínio  $D_2$ , porém possui dimensões levemente menores que este, possuindo 12 m de comprimento, 4 m de altura e 0,8 m (dimensão igual à da placa considerada no estudo) de largura. Uma representação do domínio  $D_3$  é mostrada na Figura 3.6.

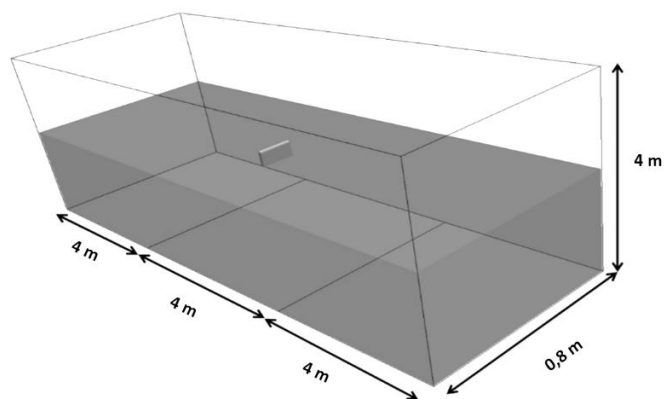


Figura 3.6 – Domínio de cálculo utilizado para a avaliação da metodologia de fundo deformável

## 3.7 CASOS DE ESTUDO

O trabalho foi dividido em diversos casos de estudo, que contemplam desde testes de verificação numérica do código, da metodologia utilizada e das condições de contorno até os estudos relacionados à hidrodinâmica e geração de energia dos conversores oscilantes por translação de ondas. A divisão contempla, no total, oito casos de estudo:

- a) **Validação do modelo dinâmico utilizado** – este estudo tem como objetivo comparar os resultados numéricos obtidos pelo método de distorção das malhas, associado ao fundo deformável, utilizado neste trabalho, com os resultados experimentais realizados no tanque de ondas da *Queen's University Belfast*, apresentados nos trabalhos de Rafiee et. al (2013) e Wei et al. (2015).
- b) **Verificação da condição de contorno de velocidade aplicado na placa oscilante** – contempla a comparação entre as condições de contorno de velocidade “*noSlip*” e “*movingWallVelocity*”, aplicadas na superfície da placa, no intuito de verificar qual é a mais adequada para a representação da dinâmica dos OWSC's, considerando a metodologia adotada no trabalho.
- c) **Teste comparativo entre um modelo 3D e outro 2D** – este teste busca verificar se um modelo bidimensional é suficiente para representar de forma adequada a hidrodinâmica de um OWSC, levando em conta os métodos utilizados.
- d) **Verificação da metodologia de fundo móvel** – para verificar se a metodologia que permite a deformação do fundo do domínio ocasiona erros consideráveis na análise da hidrodinâmica dos conversores, são realizados testes comparativos entre a metodologia de fundo móvel e a de fundo fixo, considerando posições de placas cada vez mais próximas ao fundo do domínio.
- e) **Influência da variação na largura da placa** – estudo que busca avaliar a influência do aumento na largura da placa na hidrodinâmica e geração de energia dos dispositivos considerados.
- f) **Estudo da variação de espessura da placa** – contempla as análises de como um aumento na espessura da placa de um OWSC modifica a hidrodinâmica e a captação de energia dos conversores.
- g) **Influência da variação de profundidade** – estudo que tem como objetivo avaliar como uma mudança na profundidade de instalação do conversor está relacionada ao movimento oscilatório do mesmo e a sua captação de energia.
- h) **Influência da variação das características de onda** – nesta análise são variados os períodos e as alturas das ondas regulares incidentes, permitindo a compreensão de como essas duas variáveis se relacionam à hidrodinâmica e a captação de energia dos dispositivos.

Uma tabela resumo (Tabela 3.3) foi criada para reunir, de forma prática, os parâmetros, as dimensões de placa, domínios, tipos de dispositivos tratados e o de modelo dimensional utilizado nos casos de estudo abordados no presente trabalho.

Caso de estudo	Dimensões da placa	Características da onda	Domínio utilizado	Modelo	Tipo de OWSC	Breve descrição
Validação do modelo dinâmico utilizado	$h_p = 0,48$ m; $L_p = 1,04$ m; $e_p = 0,12$ m	$H = 0,25$ m; $T = 2$ s; $h = 0,71$ m	Domínio D <sub>1</sub>	2D	<i>Oyster</i>	Comparação entre os resultados numéricos obtidos com resultados experimentais presentes nos trabalhos de Rafiee et al. (2013) e Wei et al. (2015).
Verificação da condição de contorno de velocidade aplicado na placa oscilante	$h_p = 0,48$ m (Domínio D <sub>1</sub> ); $h_p = 0,4$ m (Domínio D <sub>2</sub> ); $L_p = 1,04$ m (Domínio D <sub>1</sub> ); $L_p = 0,8$ m (Domínio D <sub>2</sub> ); $e_p = 0,12$ m (Domínio D <sub>1</sub> ); $e_p = 0,08$ m (Domínio D <sub>2</sub> )	$H = 0,25$ m (Domínio D <sub>1</sub> ); $H = 0,1067$ m (Domínio D <sub>2</sub> ); $T = 2$ s (Domínio D <sub>1</sub> ); $T = 2,4$ s (Domínio D <sub>2</sub> ); $h = 0,71$ m (Domínio D <sub>1</sub> ); $h = 2,4$ m (Domínio D <sub>2</sub> )	Domínio D <sub>1</sub> e Domínio D <sub>2</sub>	2D	<i>Oyster</i> e <i>Langlee</i>	Estudo comparativo entre a condição de contorno <i>noSlip</i> e a <i>movingWallVelocity</i> .
Teste comparativo entre um modelo 3D e outro 2D	$h_p = 0,4$ m; $L_p = 0,8$ m; $e_p = 0,08$ m	$H = 0,1067$ m; $T = 2,4$ s; $h = 2,4$ m	Domínio D <sub>2</sub>	2D e 3D	<i>Langlee</i>	Estudo que busca verificar a representatividade do modelo dinâmico bidimensional na hidrodinâmica do OWSC.
Verificação da metodologia de fundo móvel	$h_p = 0,4$ m; $L_p = 0,8$ m; $e_p = 0,08$ m	$H = 0,1067$ m; $T = 2,4$ s; $h = 0,56$ m	Domínio D <sub>3</sub>	2D	<i>Langlee</i>	Avaliação da significância dos erros ocasionados pela utilização de um fundo que se movimentava. Estudo realizado com base na variação da distância entre o eixo de rotação do conversor e o fundo do oceano.
Influência da variação na largura da placa	$h_p = 0,4$ m; $L_p =$ variável; $e_p = 0,08$ m	$H = 0,1067$ m; $T = 2,4$ s; $h = 0,8$ m	Domínio D <sub>2</sub>	2D	<i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i>	Verificação da hidrodinâmica e captação de energia para quatro larguras de placas: 0,4 m (L <sub>1</sub> ); 0,8 m (L <sub>2</sub> ); 1,2 m (L <sub>3</sub> ) e 1,6 m (L <sub>4</sub> ).
Estudo da variação de espessura da placa	$h_p = 0,4$ m; $L_p = 0,4$ m e 1,6 m; $e_p =$ variável	$H = 0,1067$ m; $T = 2,4$ s; $h = 0,8$ m	Domínio D <sub>2</sub>	2D	<i>Waveroller</i>	Verificação da hidrodinâmica e captação de energia para quatro espessuras de placas: 0,04 m (e <sub>1</sub> ); 0,08 m (e <sub>2</sub> ); 0,12 m (e <sub>3</sub> ) e 0,16 m (e <sub>4</sub> ).
Influência da variação de profundidade	$h_p = 0,4$ m; $L_p = 0,4$ m; $e_p = 0,08$ m	$H = 0,25$ m; $T = 2,4$ s; $h =$ variável	Domínio D <sub>2</sub>	2D	<i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i>	Verificação da hidrodinâmica e captação de energia para quatro profundidades: 0,4 m (h <sub>1</sub> ); 0,8 m (h <sub>2</sub> ); 1,2 m (h <sub>3</sub> ) e 1,6 m (h <sub>4</sub> ).
Influência da variação das características de onda	$h_p = 0,4$ m; $L_p = 0,4$ m; $e_p = 0,08$ m	$H =$ variável; $T =$ variável; $h = 0,8$ m	Domínio D <sub>2</sub>	2D	<i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i>	Verificação da hidrodinâmica e captação de energia para quatro alturas de onda (H <sub>1</sub> = 0,0267 m; H <sub>2</sub> = 0,0534 m; H <sub>3</sub> = 0,1067 m; H <sub>4</sub> = 0,16 m) e quatro períodos de onda (T <sub>1</sub> = 1,2 s; T <sub>2</sub> = 2,4 s; T <sub>3</sub> = 3,6 s; T <sub>4</sub> = 4,8 s).

Tabela 3.3 – Resumo e descrição dos casos de estudo do presente trabalho

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas, primeiramente, as considerações e simplificações adotadas, seguidas da validação da metodologia numérica utilizada para o movimento do corpo rígido, da análise de duas condições de contorno de velocidades, de uma comparação entre um modelo bidimensional e outro tridimensional, da verificação da metodologia que utiliza o fundo deformável. Além disso, contempla o estudo da variação das propriedades de interesse (força horizontal, amplitude angular e velocidade angular atingidas pela placa, assim como a estimativa da energia captada pelo dispositivo) em função da modificação largura e espessura da placa do OWSC, da profundidade de instalação e das influências decorrentes de variações na altura e no período de uma onda regular incidente.

### 4.1 CONSIDERAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS

Primeiramente, foi necessário utilizar a condição de não deslizamento (*noSlip*) na superfície da placa simulada, sendo esta mais adequada aos casos de modelagem numérica de problemas estáticos e não aos casos dinâmicos. A condição de contorno recomendada pelo OpenFOAM Wiki (2016) é a “*movingWallVelocity*”, a qual garante que a superfície da placa e o fluido em contato com esta região tenham a mesma velocidade. Porém, como será apresentado a seguir, a condição usualmente utilizada para modelar os casos dinâmicos não se mostrou adequada à metodologia de deformação de malhas e de fundo oscilante, aplicada neste trabalho.

Como foi adotada uma condição de contorno não usual para a modelagem da dinâmica dos OWSC's, realizou-se uma verificação com estudos experimentais realizados na *Queen's University Belfast*, detalhados nos trabalhos de Rafiee et al. (2013) e de Wei et al. (2015). Sendo a validação condizente com os resultados experimentais, utilizou-se as mesmas condições de discretização aplicadas na verificação ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z (3D) = 0,04 m$ ) para os elementos de malha na região de entorno do dispositivo (na qual a base é delimitada pelo “fundo b” do domínio), assim como o emprego da semelhança de Froude (a mesma utilizada nos estudos experimentais, que possuem escala geométrica de 1:25, sendo esta última, aplicada a todos os casos abordados na sequência) em todas as simulações numéricas realizadas neste trabalho.

Os parâmetros utilizados na equação que descreve o movimento do corpo rígido, em função das forças e momentos atuantes, foram o momento de inércia de massa da placa, o coeficiente de

amortecimento do dispositivo e o momento de restauração devido ao empuxo. O momento de inércia de massa adicionado e o coeficiente de amortecimento devido à radiação das ondas não foram previamente calculados, sendo estes intrínsecos a modelagem numérica, à medida que a simulação inicia, estando diretamente relacionados à interação fluído-estrutura.

Para a estimativa da potência absorvida pelo dispositivo foi utilizada uma modificação da Equação 42, que inclui a hipótese de um coeficiente de amortecimento do dispositivo constante e uma estimativa ao longo de todo o tempo de simulação (sendo o tempo de 16 s o adotado para todos os casos de estudo, o que corresponde a um tempo de 80 s em escala real). Dessa forma, a equação 42 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$P_{abs} = \frac{C_{ad}}{t} \int_0^t \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 dt \quad (43)$$

Com esta simplificação, a potência captada pelo OWSC torna-se proporcional ao coeficiente de amortecimento do dispositivo (parâmetro que depende de características mecânicas e construtivas do OWSC, que estão além do escopo deste trabalho). Assim, assume-se para fins práticos um valor igual à unidade para este parâmetro, fazendo com que os resultados estimados da potência captada sejam divididos por um coeficiente de amortecimento. A integral da equação 43 é solucionada numericamente pelo método de Simpson composto, tendo como base a série temporal das velocidades angulares atingidas pela placa.

Em função dos dados disponíveis na literatura utilizada para a verificação numérica do código, a massa específica da placa foi estimada em 620,3 kg/m<sup>3</sup>, valor este que é utilizado em todas simulações do presente trabalho. Além disso, a largura dos domínios nos casos bidimensionais sempre possui valor igual à largura da placa considerada, impedindo os fluxos laterais. Estes passam a ocorrer no domínio tridimensional, que possui largura maior que a largura da placa.

Foram considerados apenas os dispositivos do tipo *Langlee* e *Waveroller* nos estudos principais do presente trabalho (que abordam a variação da largura de placa, da espessura da placa, da profundidade de instalação e das características básicas de onda) tendo em vista que um OWSC do tipo *Waveroller* se torna um dispositivo do tipo *Oyster* no caso onde a lâmina de água é menor ou igual a altura da placa do conversor.

Todas as simulações foram realizadas em um computador de médio porte, com processador Intel Core i7, 16 GB de memória e 8 núcleos, sendo possível rodar em paralelo diversas simulações. O tempo de simulação variou em torno de 2 dias (simulações 2D) a 1 semana (simulações 3D).

## 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO DINÂMICO UTILIZADO

O estudo experimental realizado no tanque de ondas da *Queen's University Belfast*, cujo objetivo consistia na avaliação das características dinâmicas envolvidas no movimento de um OWSC do tipo *Oyster*, encontra-se descrito nos trabalhos de Rafiee et al. (2013) e Wei et al. (2015). O primeiro fornece informações mais detalhadas sobre a amplitude angular atingida pela placa ao longo do tempo e da pressão medida em alguns pontos específicos da estrutura. O segundo reúne também as medições da lâmina de água em algumas regiões do domínio.

O domínio numérico utilizado nesta análise foi o domínio  $D_1$ , previamente descrito. A placa do dispositivo possui 0,48 m de altura, 1,04 m de largura e 0,12 m de espessura, e encontra-se sobre uma base, aqui dimensionada, de forma delgada, com 0,16 m de altura e 0,04 m de espessura. Esta se movimenta junto com o corpo rígido, impedindo o fluxo de água por baixo do dispositivo. A massa da placa e o momento de inércia de massa (obtidos por meio do cruzamento de informações dos trabalhos utilizados para a verificação) foram estimados como sendo 33 kg e  $2,9 \text{ kg.m}^2$ , respectivamente. As dimensões da placa utilizada e eixo de giro são mostrados na Figura 4.1.

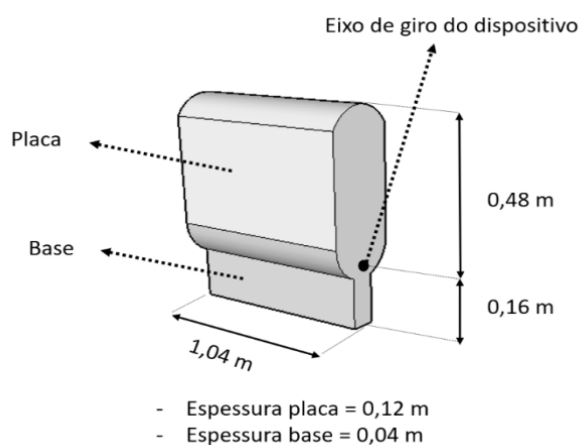


Figura 4.1 – Dimensões e eixo de giro da placa utilizada na verificação

Os medidores de pressão e sondas de leitura de nível de água, baseadas nos trabalhos utilizados como referência, tem suas coordenadas mostradas na Tabela 4.1, sendo estas medidas a partir da extremidade inferior esquerda (considerada como origem) do domínio  $D_1$ .

	Coordenadas		
	x (m)	y (m)	z (m)
Sonda de nível d'água 1	3,9900	0,5200	0,7100
Sonda de nível d'água 2	8,9200	0,5200	0,7100
Medidor de pressão 1	9,7600	0,5200	0,5010
Medidor de pressão 2	9,7600	0,5200	0,6998

Tabela 4.1 – Localização dos medidores de pressão e sondas de nível d'água

A altura significativa e o período de onda utilizados para esta verificação foram, respectivamente, 0,12 m (o que corresponde a uma altura de onda igual a 0,25 na região bem próxima da sua geração) e 2 s. A lâmina de água utilizada corresponde a 0,71 m na zona mais profunda. Assim, foram plotados gráficos comparando os resultados numéricos obtidos utilizando um modelo bidimensional com aqueles experimentais presentes nos trabalhos referenciados, para o caso da amplitude angular atingida pela placa e para os medidores de pressão e de níveis d'água apresentados na Tabela 4.1.

A Figura 4.2 mostra a comparação dos valores obtidos para o caso da amplitude angular atingida pela placa. Nela é possível observar uma boa concordância dos resultados a partir dos 4,8 s de simulação, sendo as diferenças existentes nos instantes anteriores a este atribuídas às condições de *startup* da simulação, as quais são diferentes devido à pequena modificação realizada no domínio de cálculo.

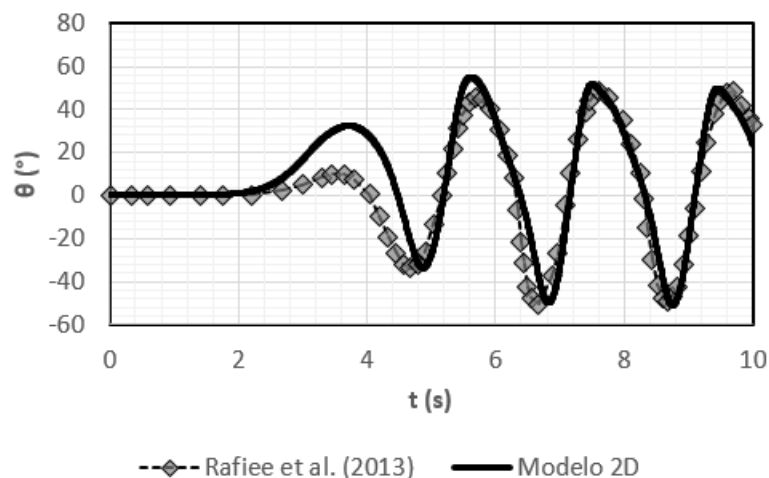


Figura 4.2 – Verificação dos resultados para o caso da amplitude angular atingida pela placa do *Oyster*



Na Figura 4.3 são apresentados os gráficos comparativos das sondas de níveis de água. Na sonda mais próxima dos batedores de onda (sonda de nível 1) é possível verificar uma pequena diferença nas medições posteriores a  $t = 6$  s, a qual pode ser atribuída a uma provável reflexão de ondas decorrente do impacto com a placa oscilante, as quais são mais expressivas em um modelo bidimensional. Na sonda mais próxima da placa oscilante (sonda de nível 2), nota-se uma semelhança dos dados após o tempo de 5 s, onde as condições iniciais de simulação já se estabilizaram.

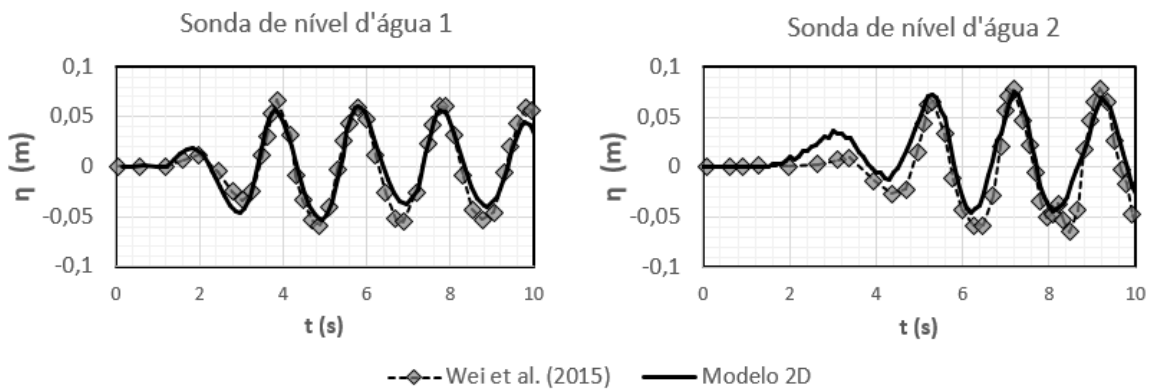


Figura 4.3 – Verificação dos resultados para as sondas de nível d'água

Uma comparação gráfica realizada para os medidores de pressão (Figura 4.4) mostra uma boa concordância entre os resultados, porém com algumas oscilações secundárias existentes em ambos os medidores. Estas podem ser atribuídas à condição de contorno “*noSlip*”, aplicada neste trabalho aos casos dinâmicos, bem como ao método de modelagem da turbulência utilizado (RANS). Porém, mesmo com essas diferenças os valores médios de pressão, são muito similares, não comprometendo diferenças significativas na medição da amplitude angular do dispositivo.

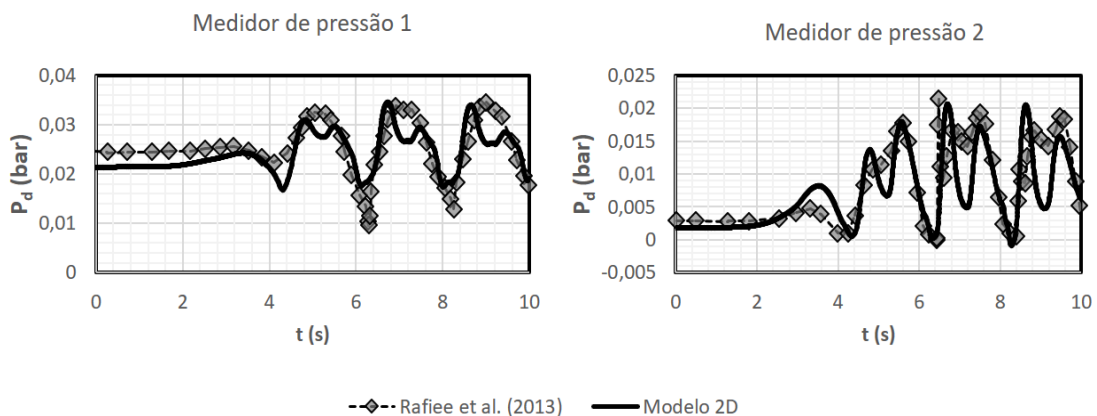


Figura 4.4 – Verificação dos resultados para os medidores de pressão utilizados

### 4.3 VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DE VELOCIDADE APLICADA NA PLACA OSCILANTE

Como foi aplicada uma condição de contorno não usual em casos dinâmicos (“*noSlip*”) à superfície da placa e os resultados obtidos, utilizando esta condição, mostraram uma boa concordância com aqueles contidos nos estudos experimentais tratados na Seção 4.2, faz-se necessário realizar uma breve análise utilizando a condição recomendada de “*movingWallVelocity*” à placa oscilante. Este estudo tem o intuito de verificar se a primeira condição de contorno adotada é, de fato, a melhor opção para os casos abordados neste trabalho.

Primeiramente, a validação realizada na Seção 4.2 é repetida, trocando-se apenas a condição de contorno aplicada à placa de “*noSlip*” para “*movingWallVelocity*”. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.5, a seguir.

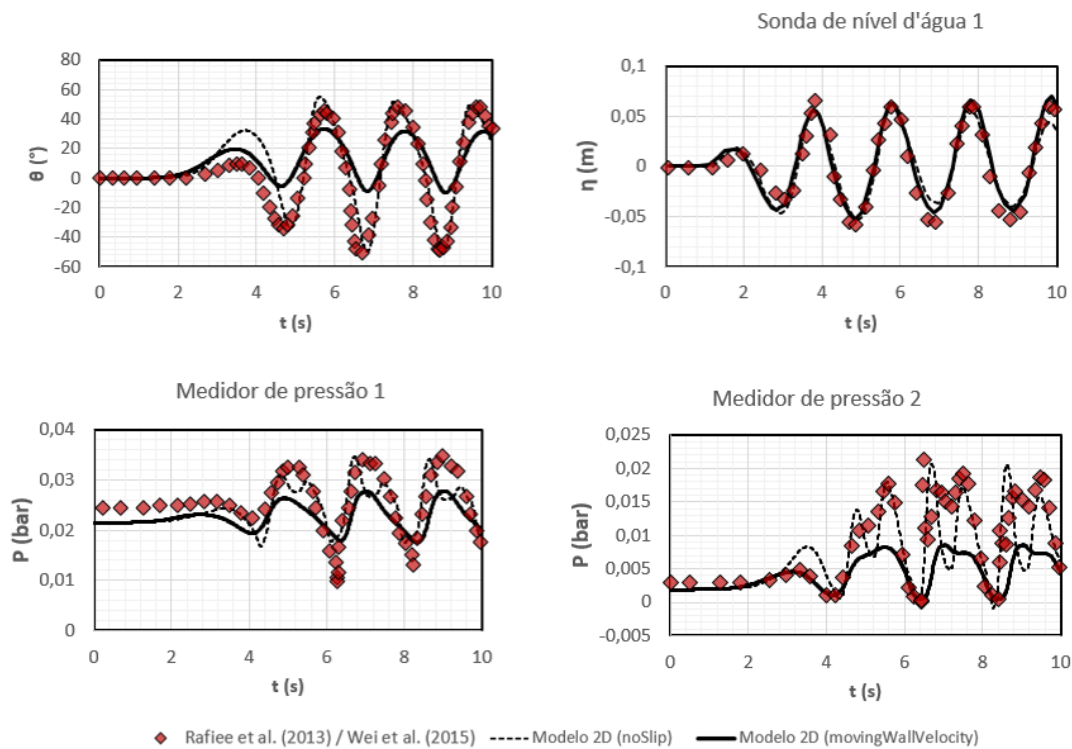


Figura 4.5 – Comparação entre os resultados obtidos utilizando diferentes condições de contorno de velocidade na superfície da placa oscilante, aplicadas à validação realizada na Seção 4.2

É possível verificar que a condição de contorno “*noSlip*” fornece resultados muito mais próximos dos valores obtidos experimentalmente que a condição “*movingWallVelocity*”, a qual tende a diminuir a amplitude das oscilações, exceto para o caso da sonda de nível 1 (distante do conversor), que apresenta pouca variação, o que sugere que esta condição de contorno exerce

influência direta na superfície da placa. Sendo assim, a condição “*noSlip*” mostra-se mais adequada a esse estudo, o qual utiliza o método de deformação de malhas aliado à presença de um fundo oscilante.

Uma nova análise é realizada, tendo como base o domínio  $D_2$ , utilizado em todas as simulações seguintes deste trabalho. Para este teste, escolheu-se como objeto de estudo uma placa cuja altura, espessura e largura são, respectivamente, 0,4 m, 0,08 m e 0,8 m, e sua localização é exatamente no meio do domínio, com 0,04 m de placa localizados para fora da superfície da água. A profundidade foi arbitrada como 2,4 m, no intuito de representar um OWSC do tipo *Langlee* funcionando em águas profundas, região na qual não há influência do fundo (que, neste caso, não se movimenta juntamente à placa, permanecendo estático). A altura e o período da onda incidente, para este caso, são, respectivamente, 0,1067 m e 2,4 s.

Os dois testes comparativos foram realizados tendo como base um modelo 2D, diferindo um do outro apenas pela condição de contorno de velocidade aplicada na superfície placa. A Figura 4.6 apresenta uma comparação gráfica entre os resultados obtidos usando a condição “*movingWallVelocity*” com aqueles obtidos utilizando a condição “*noSlip*”. Nesta figura, é possível identificar o mesmo comportamento existente na análise realizada anteriormente (apresentada na Figura 4.5), que identifica menores amplitudes de oscilações nos valores da amplitude angular atingida pela placa, velocidade angular do OWSC e forças horizontais resultantes ( $F_x$ ), quando comparadas à condição de “*noSlip*”.

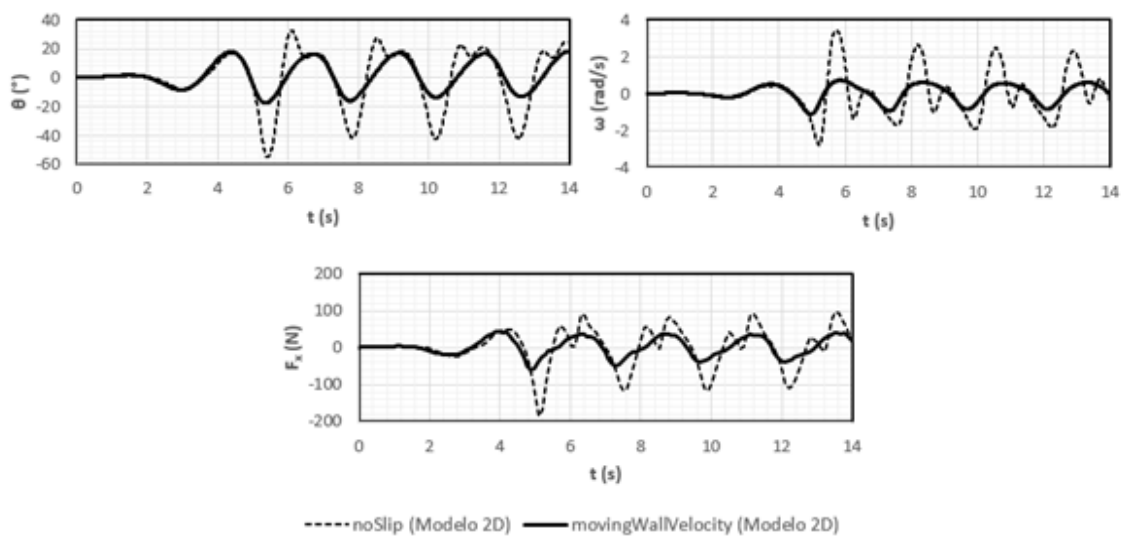


Figura 4.6 – Comparação dos resultados obtidos utilizando as condições de contorno de “*noSlip*” e de “*movingWallVelocity*” em um modelo bidimensional

Na Figura 4.7 é apresentada uma comparação entre os campos de velocidade em instantes iguais, utilizando as duas condições de contorno.

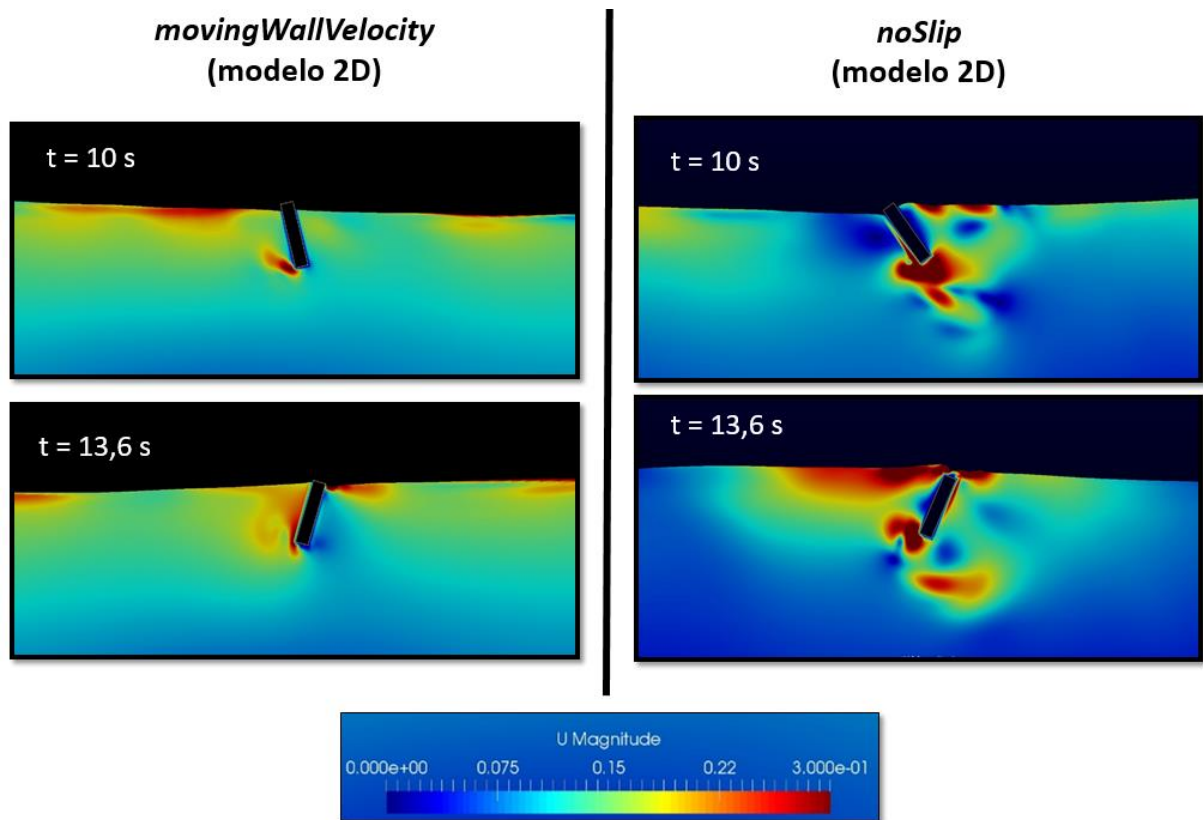


Figura 4.7 – Comparação dos campos de velocidade utilizando as condições de contorno de “noSlip” e de “movingWallVelocity” em um modelo bidimensional

Percebe-se que a amplitude angular atingida pela placa com a condição “noSlip” é maior quando comparada à outra condição de contorno. É possível notar diferenças no padrão dos campos de velocidades em ambos instantes analisados, sendo que, com o uso da condição “movingWallVelocity”, a placa parece não exercer uma influência significativa no campo de velocidades, o que é algo irreal. Enquanto isso, a outra condição evidencia a influência do movimento da placa no campo de velocidades nas regiões próximas ao OWSC. Dessa forma, conclui-se que a condição “noSlip” é a que gera resultados mais representativos.

#### 4.4 TESTE COMPARATIVO ENTRE UM MODELO 3D E OUTRO 2D

Este teste tem como objetivo verificar se a hidrodinâmica do OWSC pode ser representada, satisfatoriamente, por um modelo bidimensional, por meio da comparação dos resultados

obtidos pelo modelo 2D com aqueles gerados em uma situação similar, porém representados por um modelo 3D.

Para a realização deste estudo, utilizou-se o domínio  $D_2$ , com as mesmas dimensões de placa, alturas e períodos de onda dispostos na segunda parte da Seção 4.3. As variáveis utilizadas para a comparação foram a amplitude angular atingida pela placa, a velocidade angular, a força horizontal resultante e a pressão que atua na superfície frontal da placa (na face esquerda, considerando uma onda que se propaga da esquerda para direita), na profundidade do centro de gravidade do objeto considerado. Estes são apresentados na Figura 4.8, a seguir.

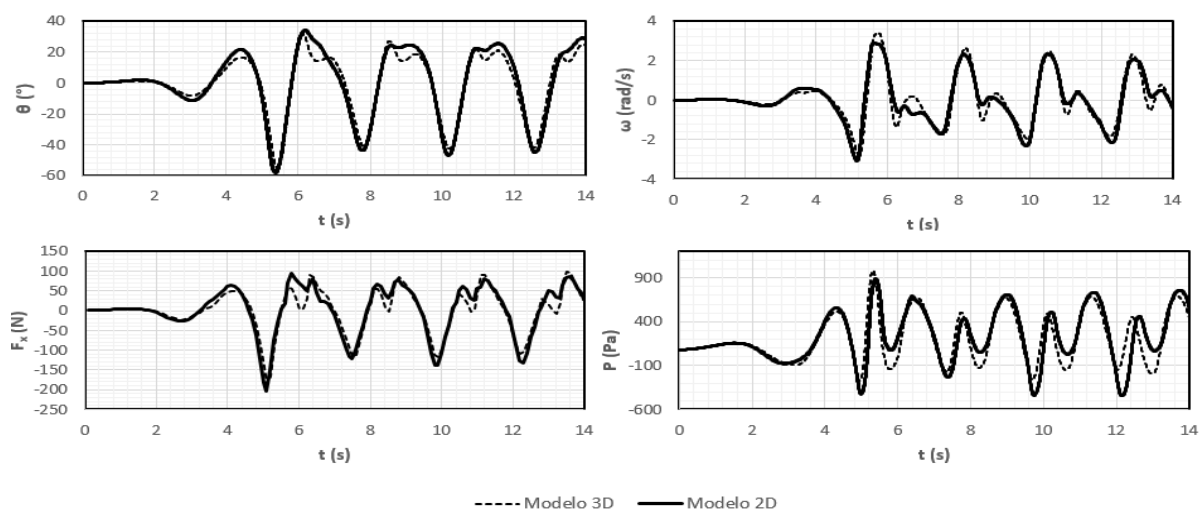


Figura 4.8 – Comparação dos resultados obtidos utilizando modelos 2D e 3D

É possível perceber similaridade entre os resultados quando o modelo bidimensional é comparado com o tridimensional, sendo que o modelo bidimensional tende a apresentar valores levemente mais elevados que o modelo 3D. Este comportamento também pode ser visualizado na Figura 4.9, que mostra uma comparação entre os campos de velocidade, para ambos os modelos em instantes iguais de tempo. Nesta figura, é possível observar que a magnitude das velocidades e a amplitude angular atingida pela placa são levemente maiores para o modelo bidimensional, sendo que o padrão do campo de velocidades não são exatamente iguais devido a tridimensionalidade do fluxo no modelo 3D, que permite passagem de água pelas laterais do conversor.

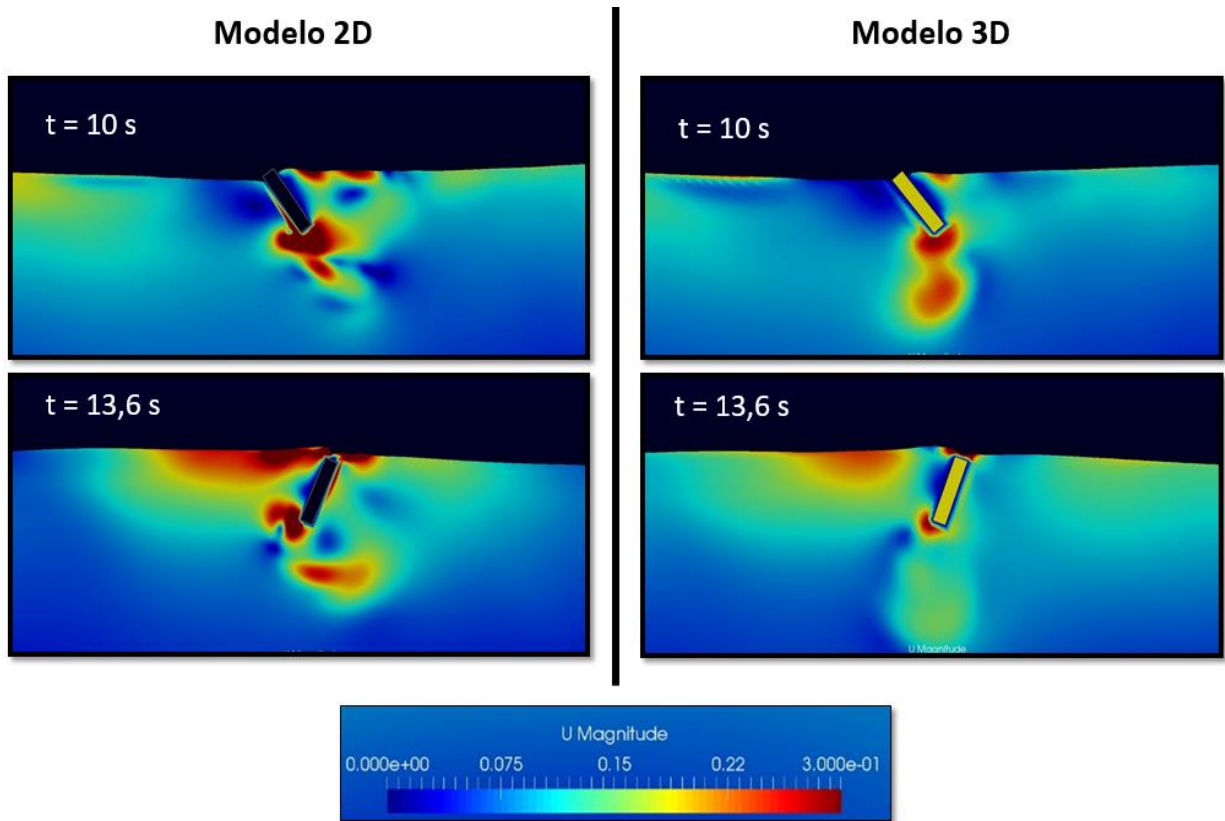


Figura 4.9 – Comparação dos campos de velocidade utilizando modelos 2D e 3D

Com base nesses resultados, conclui-se que os valores fornecidos pelo modelo bidimensional para o comportamento dinâmico (amplitude angular e velocidade angular atingidas pela placa e forças horizontais atuantes) do OWSC são muito similares aos obtidos pelo modelo tridimensional, sob as mesmas condições. Dessa maneira, existe um ganho computacional, permitindo estudar um maior número de fenômenos e variáveis em um intervalo de tempo menor, razão pela qual o modelo 2D foi utilizado em todas as simulações seguintes deste trabalho.

#### 4.5 VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE FUNDO MÓVEL

Este estudo tem como objetivo principal identificar se a método que permite a deformação do fundo do domínio ocasiona diferenças muito significativas, quando comparado à metodologia de fundo fixo. Para tal, foi utilizado o domínio  $D_3$  e uma placa com 0,4 m de altura, 0,8 m de largura e 0,08 m de espessura, sujeita a ação de uma onda incidente de altura e período iguais a, respectivamente, 0,1067 m e 2,4 s.

A verificação da influência do fundo oscilante é realizada mantendo-se fixa a lâmina de água em 0,56 m, e variando a abertura abaixo do OWSC em valores cada vez menores. São realizadas comparações entre os resultados obtidos utilizando o método de fundo deformável e o de fundo fixo, considerando a análise da amplitude angular do conversor, da velocidade angular atingida pela placa e da força horizontal atuante. O *solver* responsável por controlar a deformação da malha no caso do fundo fixo é o “*displacementSBRStress*”, enquanto o que utiliza a deformação do fundo é denominado “*sixDofRigidBodyMotion*” (ambos apresentados na Seção 3.5).

A Figura 4.10 mostra um esquema das três aberturas estudadas ( $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ ), que podem assumir os valores de 0,2 m, 0,1 m e 0,05 m, tendo como base o domínio  $D_3$ .

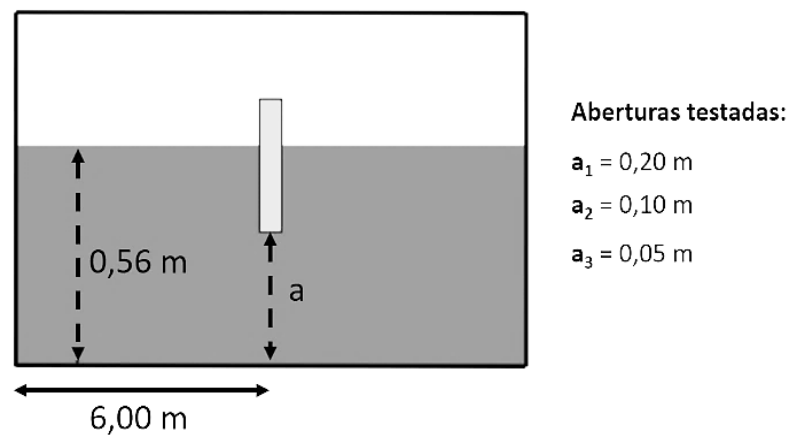


Figura 4.10 – Aberturas testadas para verificar a metodologia de fundo móvel

Uma comparação entre os campos de velocidade (para a abertura de 0,05 m), considerando as duas metodologias, é apresentada na Figura 4.11. Nela é possível observar que existe certa semelhança entre os padrões dos campos analisados, sendo que, na metodologia de fundo fixo, as regiões com os maiores valores de velocidade parecem mais extensas. Porém, de uma maneira geral, ambas apresentam as mesmas tendências nas regiões de maiores magnitudes de velocidade e as amplitudes angulares da placa encontram-se muito próximas em ambos os modelos.

De forma similar, são plotadas em um mesmo gráfico (Figura 4.12), as séries temporais da amplitude angular, da velocidade angular da placa e da força horizontal atuante para os casos de maior e menor aberturas, considerando os métodos de fundo móvel e fundo fixo. Nesta comparação, é possível identificar que ambos os métodos apresentam curvas muito semelhantes, sendo as diferenças existentes pouco significativas.



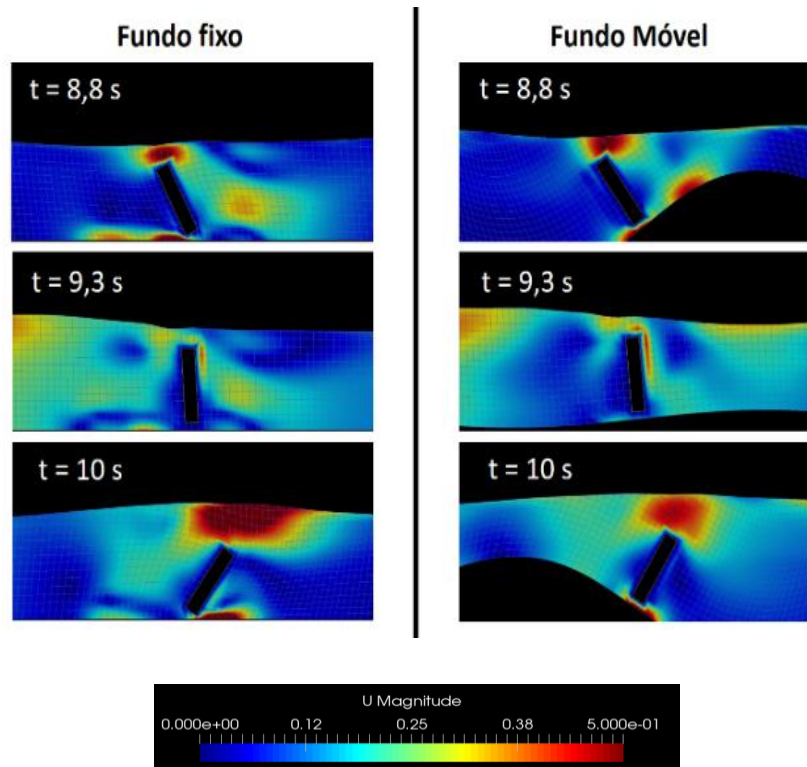


Figura 4.11 – Comparação entre os campos de velocidade considerando as metodologias de fundo fixo e fundo móvel para uma abertura de 0,05 m

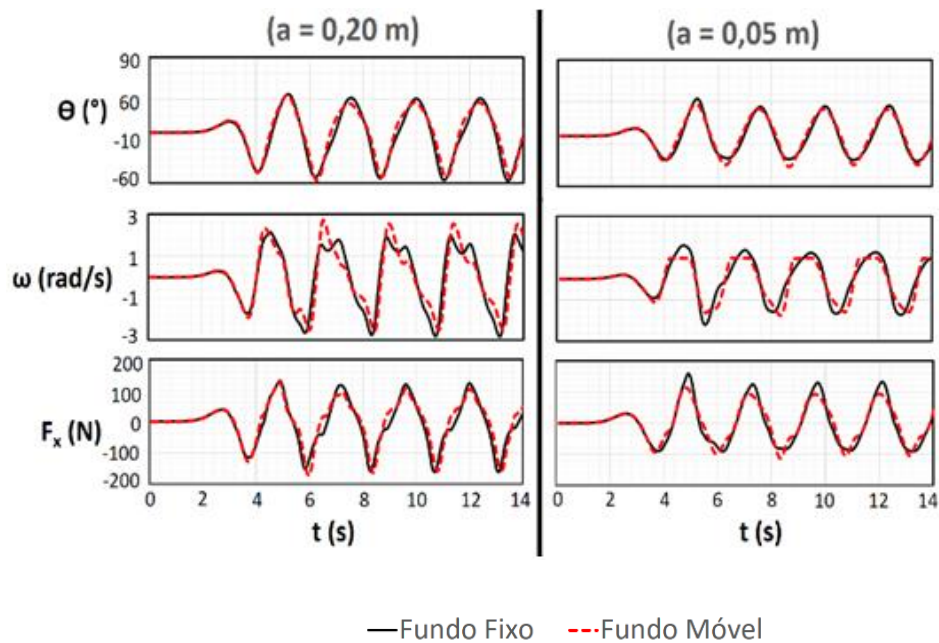


Figura 4.12 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular da placa e força horizontal atuante, considerando a metodologia de fundo móvel e a de fundo fixo.



Para analisar o erro ocasionado ao se utilizar a metodologia de fundo deformável, foram calculados os valores RMS dos erros relativos das variáveis estudadas, considerando as três aberturas estudadas. Estas diferenças encontram-se dispostas na Tabela 4.2. Nela é possível identificar que o maior erro relativo ao se utilizar o método do fundo móvel oscilante reside no cálculo das forças horizontais atuantes, não sendo este superior a 13 %.

<b>Erro relativo eficaz médio (%)</b>			
<b>a (m)</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\omega</math></b>	<b><math>F_x</math></b>
<b>0,05</b>	9,37	10,58	12,44
<b>0,1</b>	6,47	0,75	2,89
<b>0,2</b>	5,63	3,39	4,77

Tabela 4.2 – Estimativa do erro relativo eficaz médio da amplitude angular atingida, velocidade angular e força horizontal, ao se utilizar a metodologia do fundo móvel

Por meio da estimativa de um erro médio (calculado pela média dos erros relativos obtidos em cada abertura), foi possível plotar uma curva (Figura 4.13) para identificar como os erros tendem a crescer conforme o OWSC encontra-se mais próximo ao fundo.

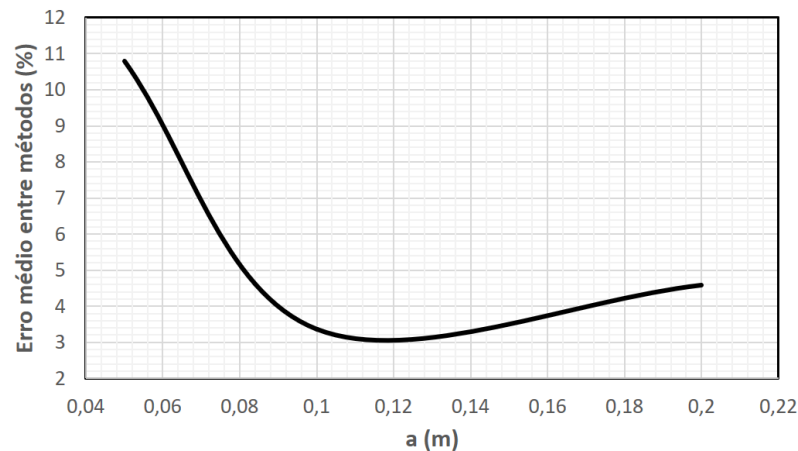


Figura 4.13 – Erro relativo médio ao se utilizar a metodologia de fundo móvel, em função da abertura abaixo da placa do OWSC

Na figura anterior, é possível identificar que, para posições mais afastadas do fundo, os erros médios tendem a ser menores que 5 %, enquanto que, segundo a tendência da curva, os erros associados a uma abertura de 0 m estariam próximos a 18 %. Dessa forma, não representam diferenças tão significativas a ponto de comprometer a análise das tendências hidrodinâmicas e da captura de energia dos conversores estudados.

#### 4.6 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NA LARGURA DA PLACA

Um estudo necessário consiste em avaliar como uma variação na dimensão da largura da placa influencia na hidrodinâmica da mesma e, conseqüentemente, na geração de energia pelo OWSC. Assim, admitem-se constantes a altura de onda, o período de onda, a profundidade, a espessura, a altura de placa e a massa específica da mesma, cujos valores são, respectivamente, 0,1067 m, 2,4 s, 0,8 m, 0,08 m, 0,4 m e 620,3 kg/m<sup>3</sup>.

Foram avaliadas duas situações de funcionamento do dispositivo, a primeira representando um dispositivo do tipo *Waveroller* e a segunda o caso de um OWSC do tipo *Langlee* (Figura 4.14).

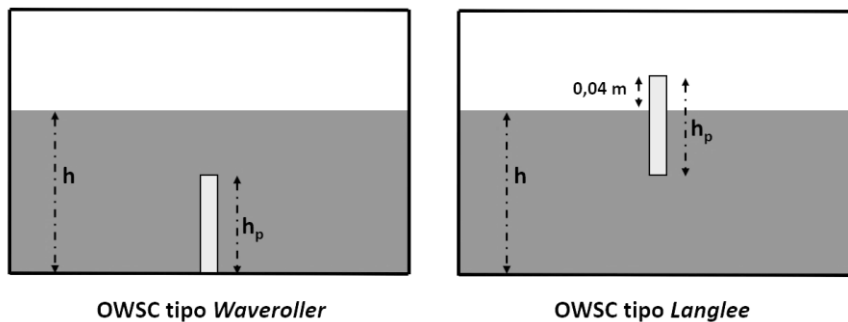


Figura 4.14 – Disposição dos OWSC's para conversores do tipo *Waveroller* e *Langlee*

As larguras de placa utilizadas neste estudo foram 0,4 m ( $L_1$ ), 0,8 m ( $L_2$ ), 1,2 m ( $L_3$ ) e 1,6 m ( $L_4$ ) que correspondem, respectivamente, a placas com larguras de 10 m, 20 m, 30 m e 40 m em escala real. As simulações das placas foram realizadas no domínio  $D_2$ .

As séries temporais, mostrando a variação dos valores da amplitude angular, da velocidade angular e das forças horizontais são mostradas na Figura 4.15. Nela, é possível observar que a amplitude de todos esses parâmetros aumenta com o aumento da largura da placa, sendo que as séries temporais de velocidade e posição angular referentes às placas de largura 1,2 m e 1,6 m, praticamente encontram-se sobrepostas, o que leva à conclusão de que a largura ideal da placa deva ser algo entre duas a três vezes a altura da placa do OWSC considerado.

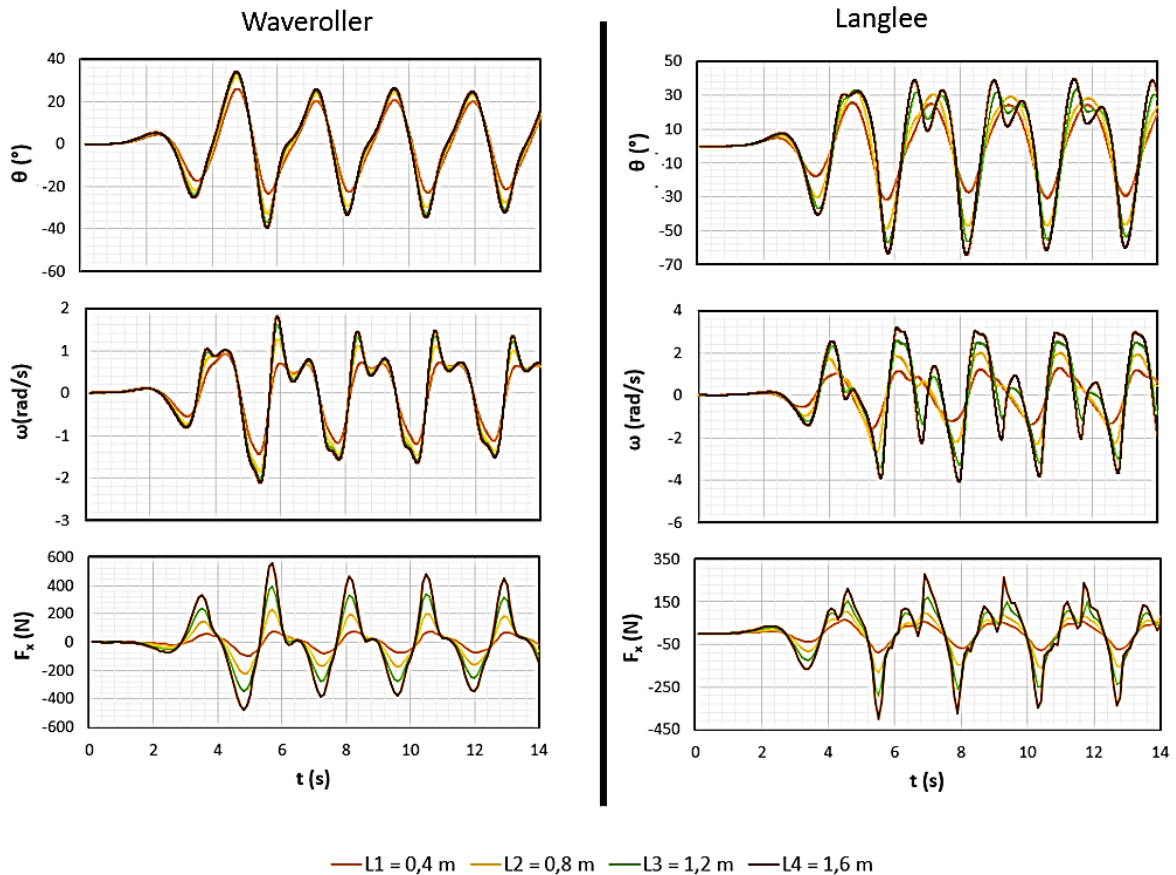


Figura 4.15 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para quatro diferentes larguras de placa, considerando OWSC's do tipo *Waveroller* e *Langlee*

Foram calculados, com base nas séries temporais, os valores eficazes (RMS) das forças horizontais, amplitude angular e velocidade angular. Assim, foi possível correlacionar estes valores com a variação da largura de placa do dispositivo, bem como estimar a potência captada pelos OWSC's. Tais resultados são apresentados na Figura 4.16, na qual pode-se observar que maiores larguras de placa estão relacionadas a maiores amplitudes angulares e velocidades angulares atingidas, assim como a maiores forças horizontais e, conseqüentemente, a maiores taxas de captação de energia. Nota-se, ainda, que os dispositivos do tipo *Langlee* possuem maiores potenciais de captação de energia que os do tipo *Waveroller*. Este fato que pode ser explicado em razão do dispositivo do primeiro tipo encontrar-se muito próximo à superfície da água, estando assim sujeito a zonas de maiores magnitudes de velocidade, que atuam diretamente sobre a placa do dispositivo, movendo-a em velocidades angulares maiores que as placas daqueles dispositivos que encontram-se totalmente submersos, os quais estão sujeitos a menores velocidades angulares. Sendo a potência captada pelo dispositivo altamente dependente do comportamento da velocidade angular atingida pela placa do OWSC, pode-se concluir que esta potência será maior para placas mais largas, com uma relação

aproximadamente linear entre as duas variáveis (efeito também observado pelos autores Henry et al. (2010)).

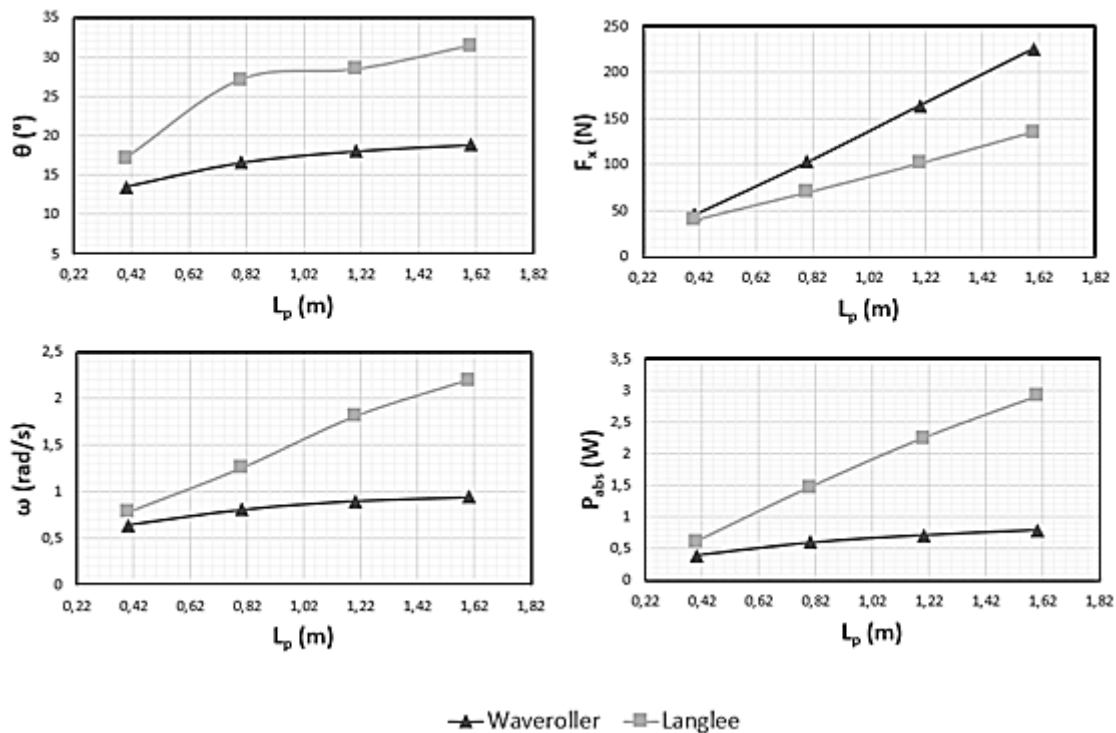


Figura 4.16 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, das forças horizontais e estimativa da energia captada pelos OWSC's, frente a uma variação na largura da placa dos dispositivos.

Para tornar os resultados anteriores aplicáveis aos OWSC's em escala real, foi necessário adimensionalizar as variáveis estudadas. Para tal, aplicou-se o Teorema de Pi de Buckingham, resultando nas seguintes adimensionalizações:

$$L_a = \frac{L_p}{\left(\frac{H^2}{L}\right)}, \quad (44)$$

$$\omega_a = \frac{\omega}{\left(\frac{C}{H}\right)}, \quad (45)$$

$$F_a = \frac{F_x}{\rho H^2 C^2}, \quad (46)$$

$$P_a = \frac{P_{abs}}{\rho H^2 C^3}, \quad (47)$$

em que  $L_a$ ,  $\omega$ ,  $\omega_a$ ,  $F_x$ ,  $F_a$  e  $P_a$  correspondem, respectivamente, a largura de placa adimensional, velocidade angular, velocidade angular adimensional, força horizontal, força adimensional e potência adimensional.

Por meio das adimensionalizações propostas, os gráficos da Figura 4.16 são reescritos em termos adimensionais e apresentados na Figura 4.17, nos quais as tendências e formato das curvas são preservados.

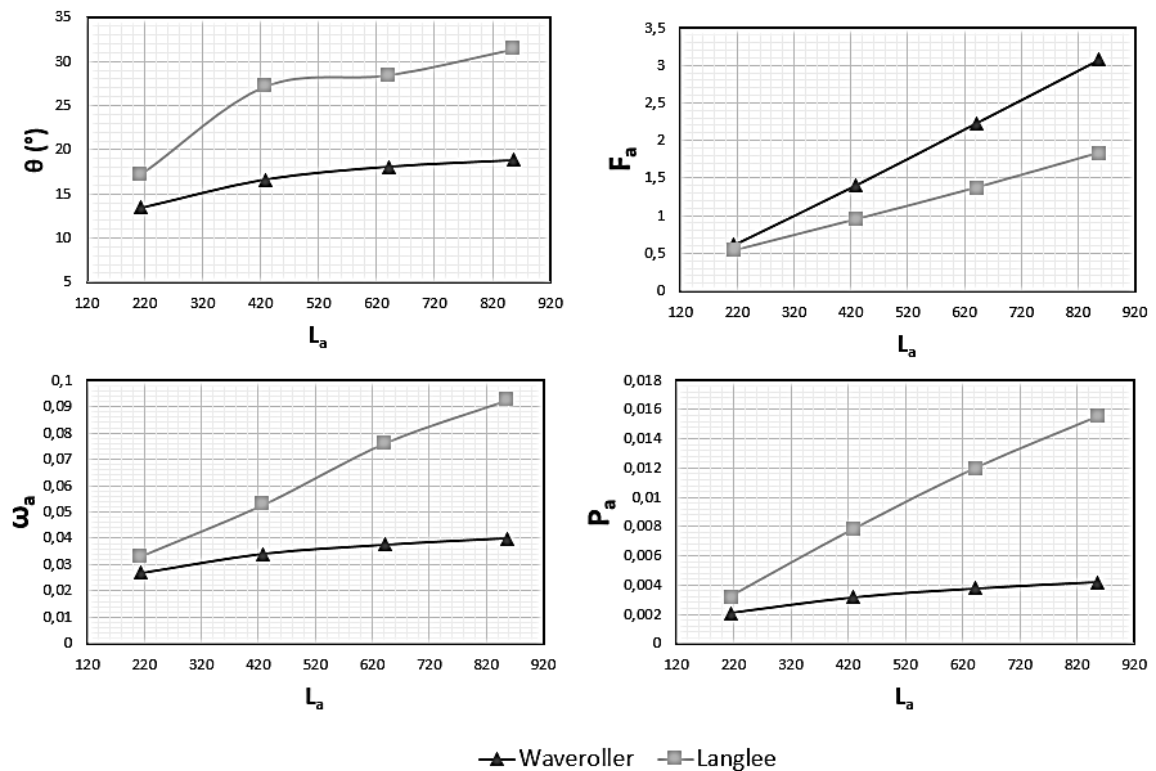


Figura 4.17 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada em função da largura de placa adimensional

## 4.7 ESTUDO DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA DA PLACA

Para completar o estudo referente às mudanças geométricas das placas dos OWSC's, foram realizados testes avaliando a influência de variação da espessura da placa na hidrodinâmica e captação de energia do dispositivo. Mantiveram-se constantes a altura e o período de onda, a

profundidade, a altura da placa e a massa específica desta, valores estes e domínio de cálculo iguais aos utilizados no caso estudado na Seção 4.6.

Neste estudo, foi considerado como objeto de análise um dispositivo totalmente submerso (OWSC do tipo *Waveroller*), cujas larguras escolhidas para a placa correspondem a 0,4 m e 1,6 m, dando origem a duas seções frontais analisadas:

- a) **seção tipo A** – seção frontal quadrada, com altura e largura iguais a 0,4 m;
- b) **seção tipo B** – seção frontal retangular, com 0,4 m de altura e 1,6 m de largura.

Para cada tipo de seção foram avaliadas quatro espessuras: 0,04 m ( $e_1$ ), 0,08 m ( $e_2$ ), 0,12 m ( $e_3$ ) e 0,16 m ( $e_4$ ). As séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para os casos analisados são apresentadas na Figura 4.18.

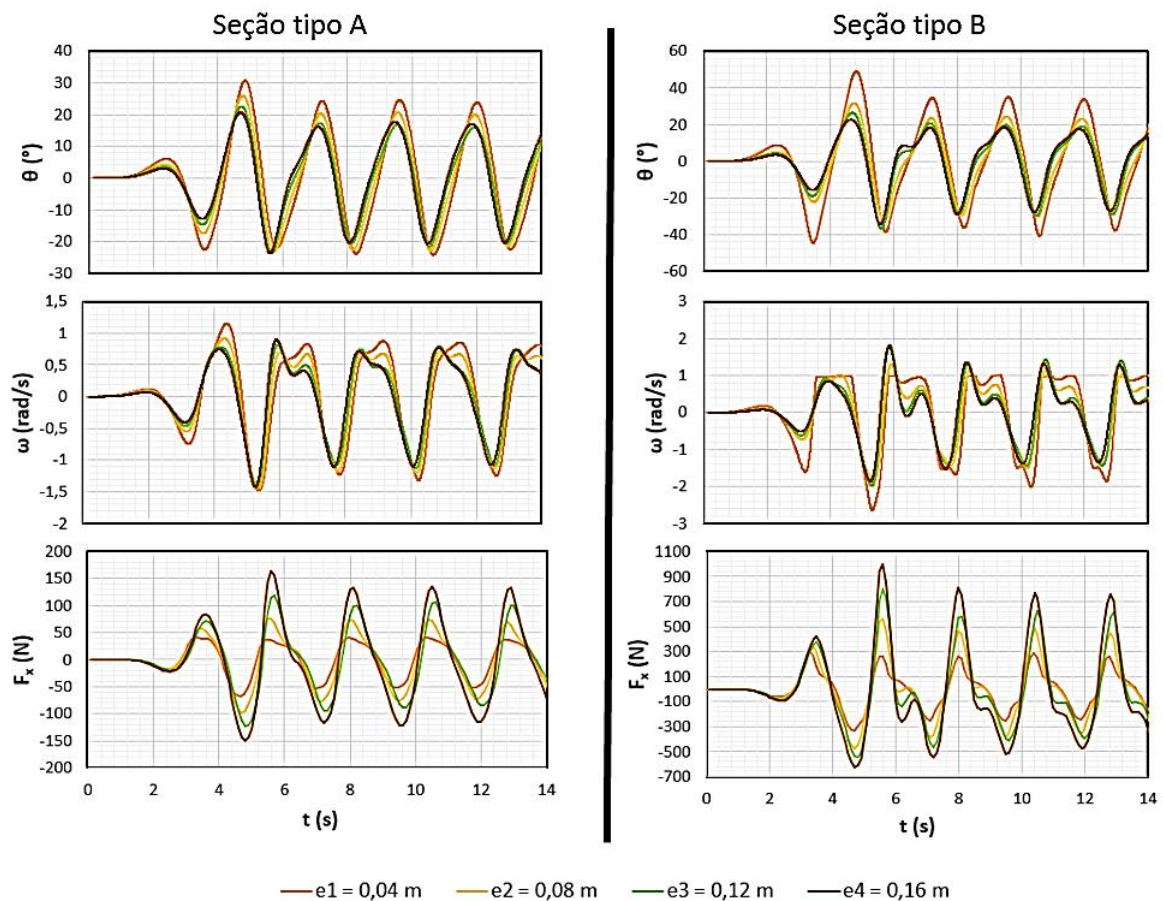


Figura 4.18 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para quatro diferentes espessuras de placa, considerando dois tipos de seção frontal de um OWSC do tipo *Waveroller*

Percebe-se, primeiramente, que, quanto maior a espessura, menores são as amplitudes angulares e velocidades angulares, o que pode ser explicado pelo aumento do momento de inércia e da massa do corpo em placas mais espessas. Já as forças horizontais são maiores para as placas mais espessas, visto que estas forças se relacionam à área de contato fluido-estrutura, a qual, claramente, é maior em placas de maior espessura.

Os valores eficazes da amplitude angular e velocidade angular tendem a diminuir com o aumento da espessura, pois placas mais espessas são mais difíceis de rotacionar, dessa forma, a energia captada também diminui com o aumento da espessura. Nota-se que, para placas com espessuras maiores que 0,08 m, a energia captada é praticamente a mesma, o que leva a crer que a espessura ideal deve ter um tamanho em torno de 10 % a 20 % da altura da placa. Já os valores eficazes da força horizontal mostram que a sua relação com o aumento da espessura é linear, estando as placas mais espessas sujeitas às maiores forças horizontais e a menores taxas de geração de energia. Tais resultados são mostrados na Figura 4.19.

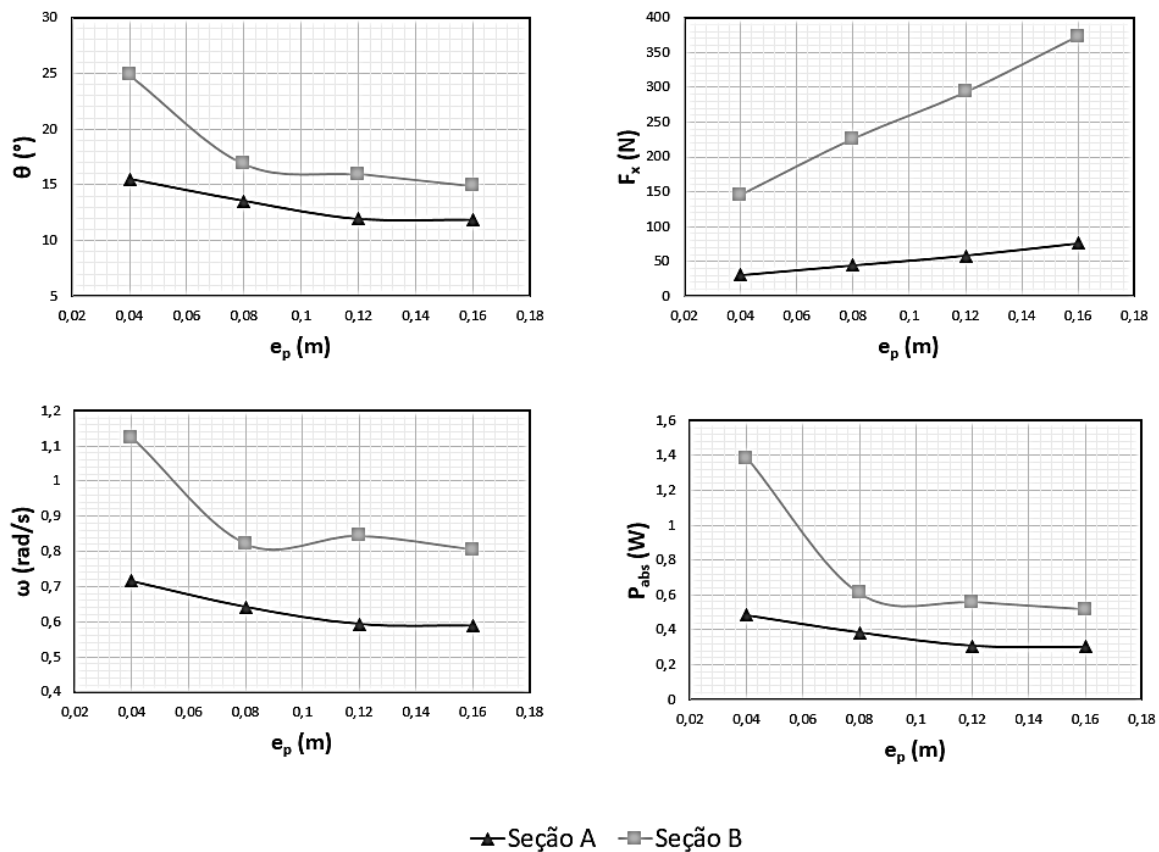


Figura 4.19 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da espessura da placa de um OWSC do tipo *Waveroller*



Os gráficos anteriores foram reescritos em termos adimensionais (Figura 4.20), considerando a seguinte adimensionalização para a espessura da placa:

$$e_a = \frac{e_p}{\left(\frac{H^2}{L}\right)}, \quad (48)$$

em que  $e_a$  corresponde a espessura de placa adimensional.

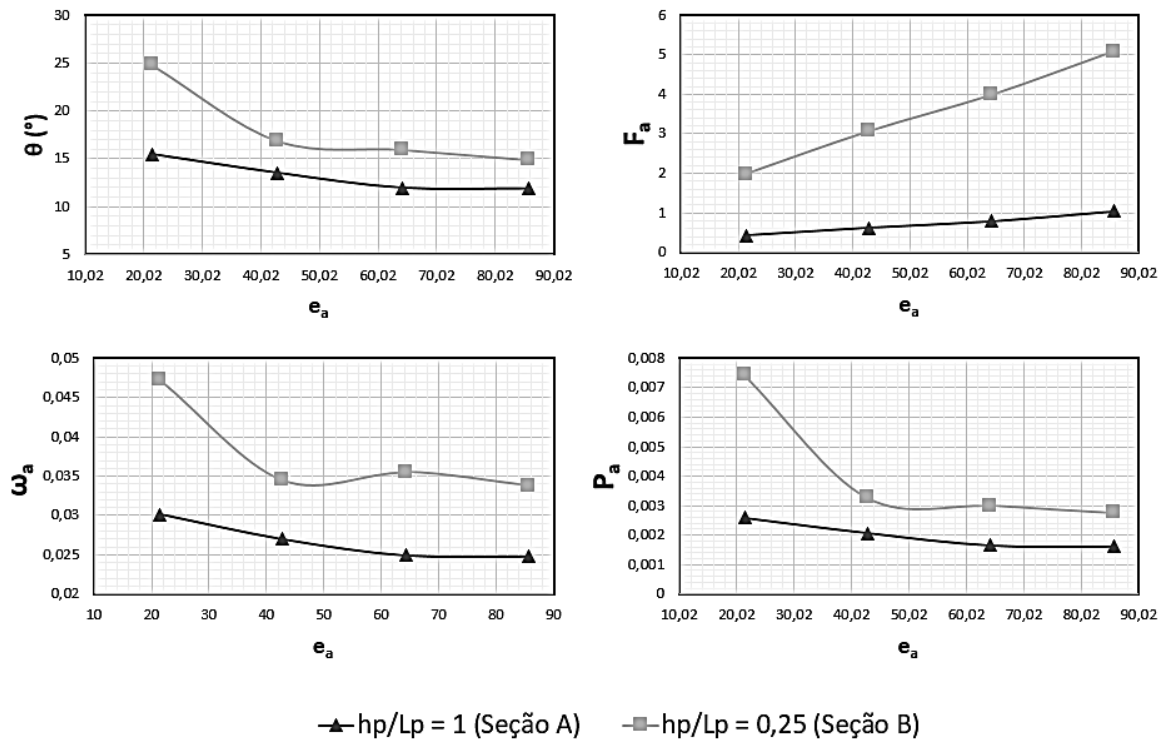


Figura 4.20 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da espessura adimensional da placa de um OWSC do tipo *Waveroller*

Nota-se que o formato e tendências das curvas adimensionais permanecem iguais às obtidas em condições dimensionais.

#### 4.8 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PROFUNDIDADE

Após o estudo da influência de mudanças geométricas do OWSC, visto nas seções anteriores, é preciso analisar como a profundidade de instalação destes dispositivos modifica a sua hidrodinâmica e geração de energia. Deve-se salientar que um dispositivo do tipo *Waveroller* passa a ser um dispositivo do tipo *Oyster* no momento em que a profundidade torna-se igual ou



inferior à altura da placa oscilante, motivo pelo qual, as informações aqui presentes podem ser aplicadas ao OWSC do tipo *Oyster* sem nenhum problema.

A seção frontal utilizada para a realização deste estudo foi a seção quadrada (seção tipo A) com lados iguais a 0,4 m, e o domínio utilizado foi o domínio D<sub>2</sub>. Para tal, foram considerados altura e período de onda constantes, com valores iguais a, respectivamente, 0,1067 m e 2,4 s. Adotaram-se quatro lâminas d'água para a análise ( $h_1 = 0,4$  m,  $h_2 = 0,8$  m,  $h_3 = 1,2$  m e  $h_4 = 1,6$  m) as quais representam as profundidades reais de, 10 m, 20 m, 30 m e 40 m, que são estudadas para os dispositivos do tipo *Waveroller* e *Langlee*, sendo o último, como nas seções anteriores, parcialmente submerso com 0,04 m (1 m, em escala real) acima da superfície da água.

As séries temporais de amplitude angular, velocidade angular e força horizontal são mostradas na Figura 4.21, na qual verifica-se que em profundidades mais rasas, ambos dispositivos apresentam um aumento na amplitude de oscilações das variáveis analisadas, sendo que para profundidades maiores que 0,8 m as séries temporais praticamente se sobrepõem, significando que, a partir de uma dada lâmina de água, a hidrodinâmica não é mais significativamente modificada em função da profundidade. Percebe-se, também, que o comportamento dos OWSC's do tipo *Waveroller* e *Langlee*, para a profundidade de 0,4 m são muito parecidos, mostrando que uma pequena abertura de 0,04 m abaixo do dispositivo não ocasiona resultados muito diferentes daqueles obtidos no caso da placa localizada junto ao fundo do domínio.

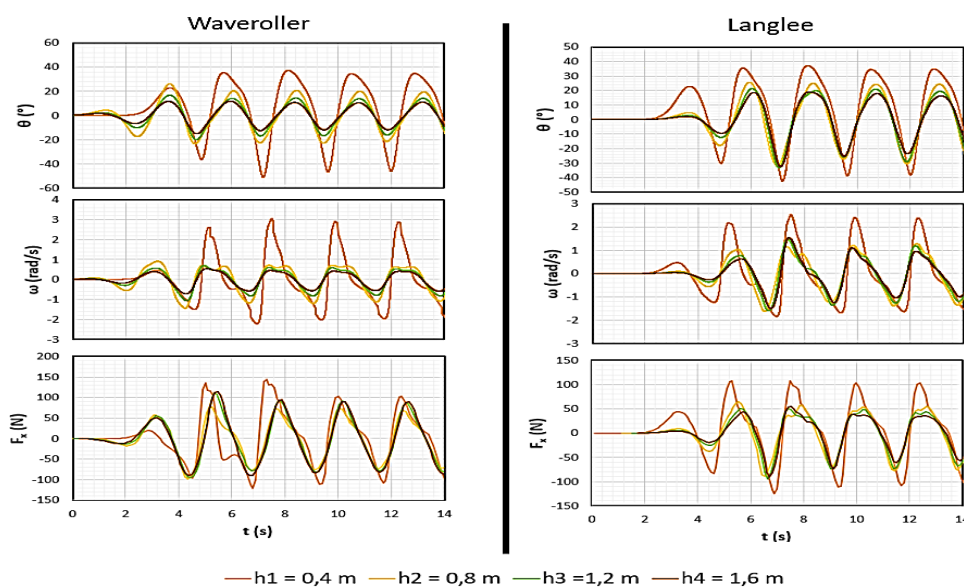


Figura 4.21 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para quatro profundidades diferentes, considerando OWSC's do tipo *Waveroller* e *Langlee*

A Figura 4.22 apresenta os gráficos dos valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, bem como a estimativa da potência captada, em função da profundidade de instalação

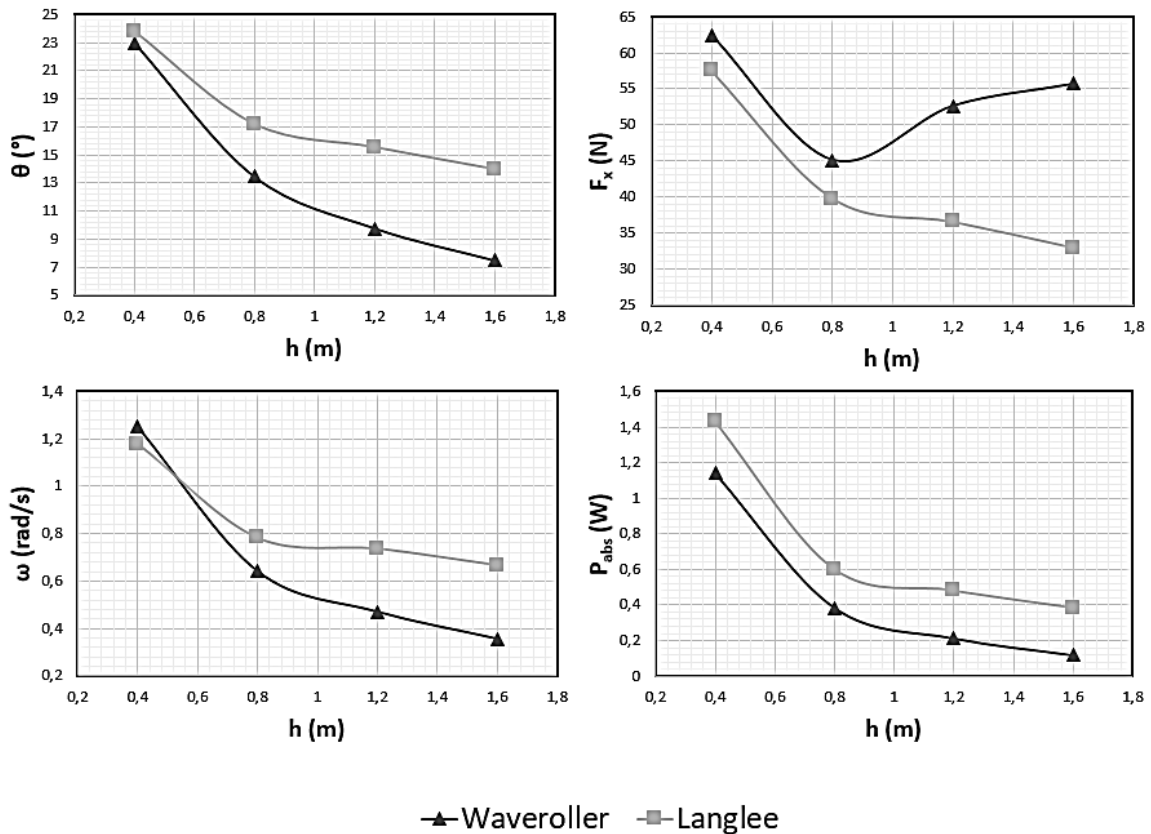


Figura 4.22 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da profundidade de instalação dos dispositivos do tipo *Waveroller* e *Langlee*

Nos gráficos anteriores, é possível observar que o aumento da profundidade está relacionado a uma diminuição da amplitude angular e da velocidade angular e, conseqüentemente, à diminuição da potência captada pelo dispositivo. Verifica-se que, a partir da profundidade de 0,8 m (equivalente a 20 m em escala real), a potência captada passa a não ser modificada significativamente pela profundidade de instalação, o que sugere que os dispositivos do tipo *Langlee* devam ser instalados em profundidades maiores que 20 m (sendo estes projetados para o funcionamento em regiões *offshore*), enquanto os do tipo *Waveroller* devam ser assentados em profundidades entre 10 m e 20 m (0,4 m e 0,8 m, em escala 1:25), com a finalidade de maximizar a potência captada. No caso do dispositivo do tipo *Waveroller*, existe uma profundidade onde a tendência efetiva das forças horizontais é menor que em outras

profundidades, este comportamento ocorre para lâminas d'água próximas a 20 m, o que sugere o assentamento dos dispositivos desse tipo em profundidades inferiores a esta, a fim de potencializar as forças envolvidas, favorecendo a hidrodinâmica do OWSC.

Para generalizar os resultados, adimensionalizou-se os valores obtidos na Figura 4.22, tendo em vista a profundidade adimensional dada pela seguinte expressão:

$$h_a = \frac{h}{L}, \quad (49)$$

em que  $h_a$  corresponde a profundidade adimensional.

Os valores eficazes adimensionalizados da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada são apresentados na Figura 4.23, que mostra gráficos cujas curvas preservam as tendências e características dos gráficos dimensionais.

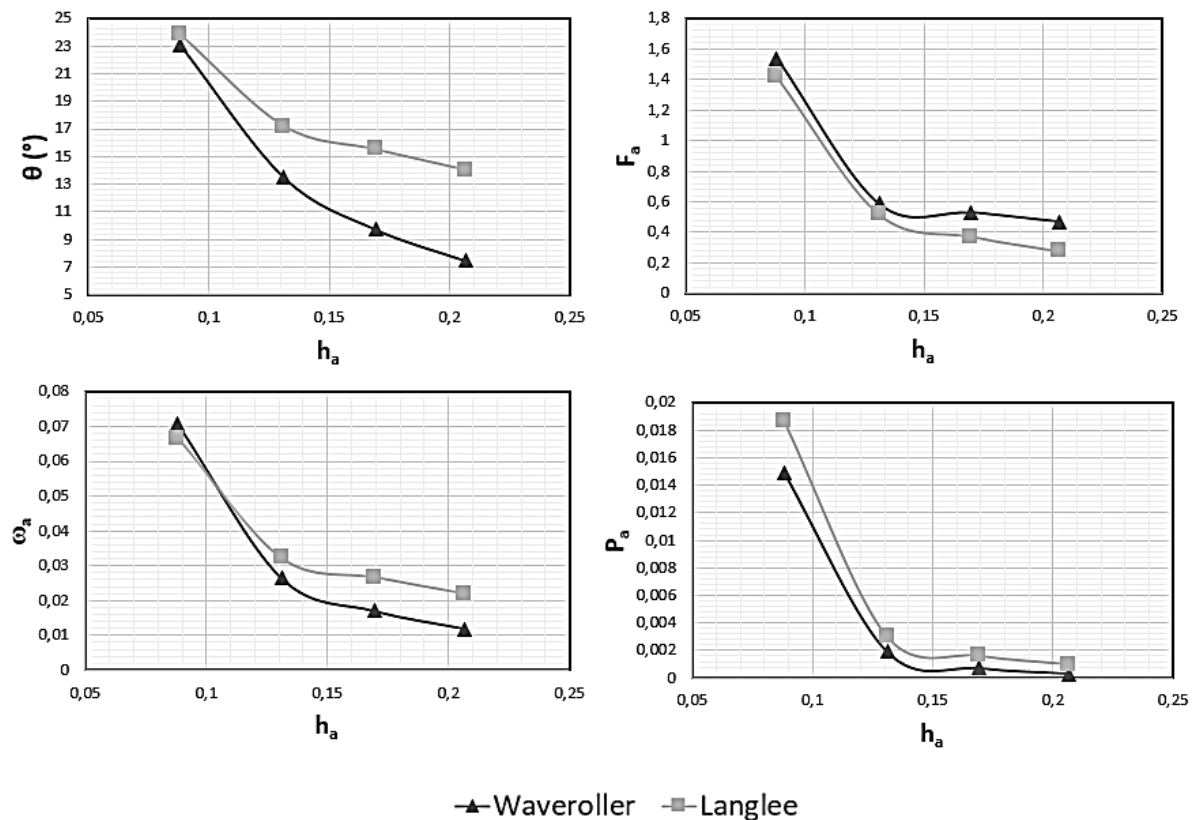


Figura 4.23 – Valores eficazes adimensionalizados da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da profundidade de instalação adimensional dos dispositivos do tipo *Waveroller* e *Langlee*

## 4.9 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ONDA

Esta seção dedica-se aos casos mais importantes deste trabalho, que consistem em avaliar como mudanças no período e na altura de uma onda regular afetam o desempenho e a captação de energia dos OWSC's. Para tal estudo considerou-se o domínio  $D_2$ , bem como a utilização de uma placa com seção frontal tipo A (seção frontal quadrada 0,4 m x 0,4 m), espessura igual a 0,08 m e massa específica igual a 620,3 kg/m<sup>3</sup>. A profundidade foi considerada constante para todos os casos, com valor igual a 0,8 m, e os dispositivos analisados foram o *Waveroller* e o *Langlee*.

### 4.9.1 Avaliação da influência devido a mudanças no período da onda

Para este caso foram mantidas fixas as alturas de onda em 0,0267 m ( $H_1$ ), 0,0534 m ( $H_2$ ), 0,1067 m ( $H_3$ ), e 0,16 m ( $H_4$ ), que correspondem, respectivamente, às alturas de onda de 0,67 m, 1,34 m, 2,67 m e 4 m em escala real. Para cada uma delas, variou-se o período em quatro valores distintos: 1,2 s ( $T_1$ ), 2,4 s ( $T_2$ ), 3,6 s ( $T_3$ ), e 4,8 s ( $T_4$ ).

Uma breve comparação entre as séries temporais (com períodos  $T_2$  e  $T_4$  constantes e com alturas de ondas variáveis) da amplitude angular, da velocidade angular e da força horizontal são mostradas nas Figuras 4.24 e 4.25, sendo a primeira, referente a um dispositivo do tipo *Waveroller* e a segunda a um do tipo *Langlee*.

Nota-se, em ambas, que as oscilações nos valores das variáveis analisadas ocorrem com um período muito próximo ao da onda incidente, e que, em períodos mais longos, efeitos secundários podem se manifestar (como, por exemplo, o efeito de vibração induzida por vórtices), tendo em vista a ocorrência de maiores trajetórias elípticas de partículas, o que afeta diretamente a hidrodinâmica de um OWSC. A amplitude das oscilações está diretamente ligada à altura de onda, a qual aumenta a magnitude dos valores de amplitude angular, velocidade angular e força horizontal. Pode-se observar também, que o dispositivo do tipo *Langlee* atinge maiores picos de velocidade angular e amplitude angular, ao contrário do dispositivo do outro tipo, o que pode ser explicado pelo fato do primeiro estar em uma região próxima à superfície livre, a qual está sujeita aos maiores valores de velocidade. Já o dispositivo que está totalmente submerso, possui menor desempenho hidrodinâmico (menores amplitudes angulares e

velocidades angulares atingidas pela placa) em função das baixas magnitudes de velocidade que ocorrem em regiões mais profundas.

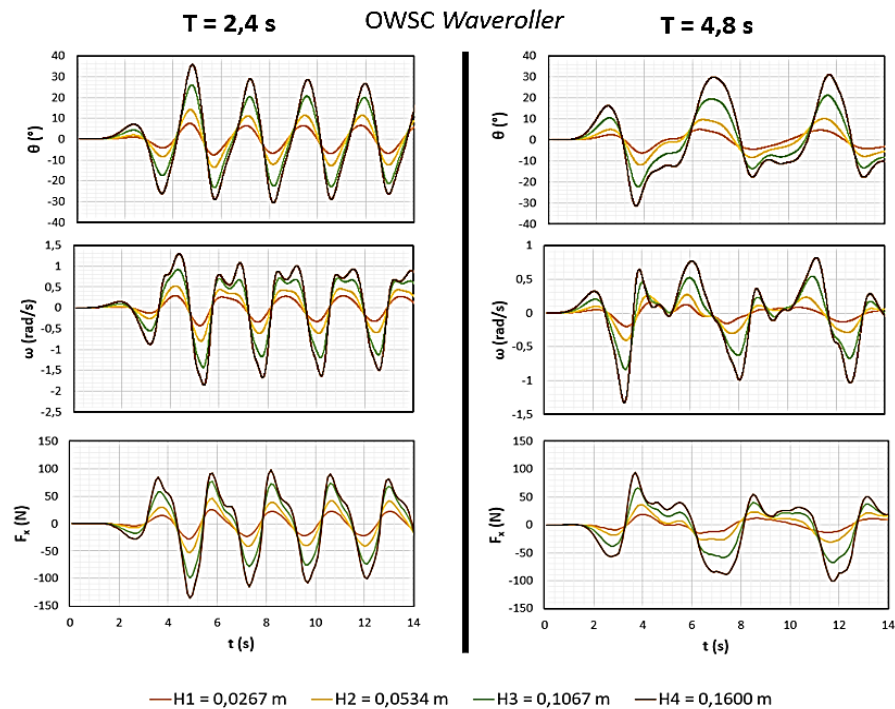


Figura 4.24 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para dois períodos diferentes, considerando quatro alturas de onda distintas e um dispositivo do tipo *Waveroller*

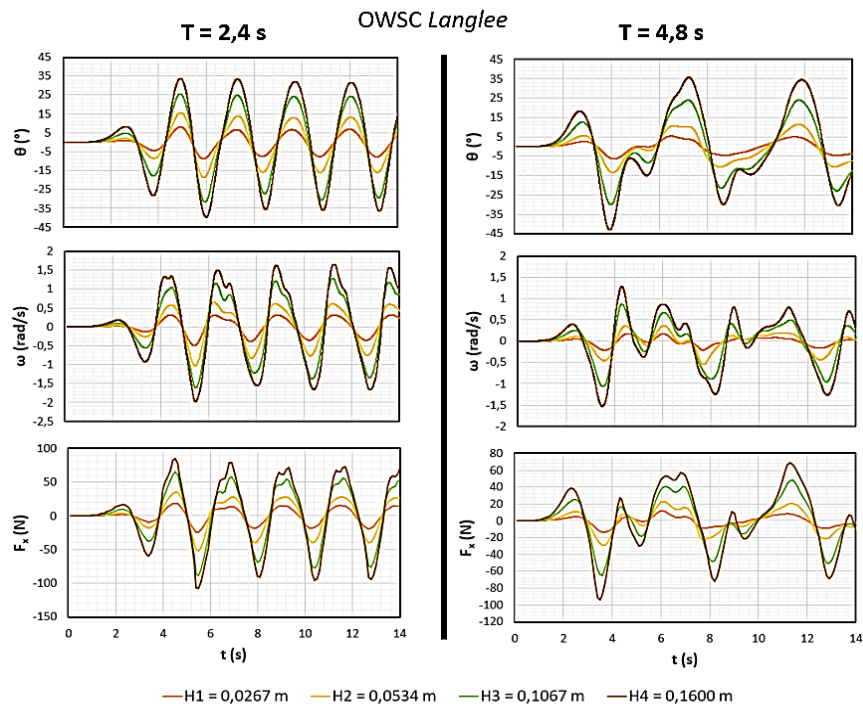


Figura 4.25 – Séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, para dois períodos diferentes, considerando quatro alturas de onda distintas e um dispositivo do tipo *Langlee*

Os valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, assim como a estimativa da potência captada pelos dispositivos *Waveroller* e *Langlee* são apresentados, respectivamente, nos gráficos dispostos nas Figuras 4.26 e 4.27.

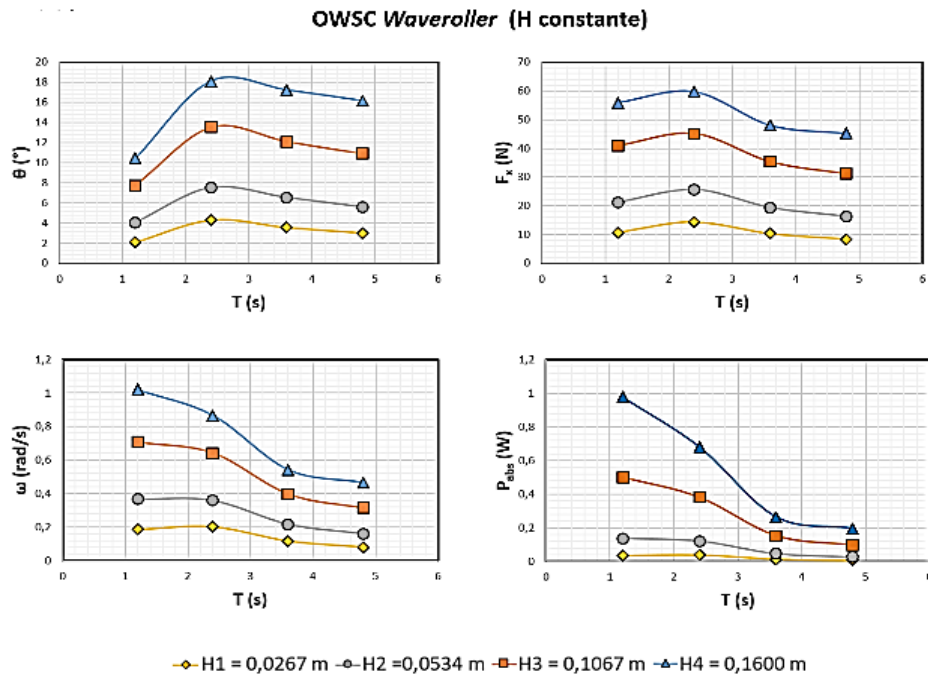


Figura 4.26 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda, para um OWSC do tipo *Waveroller*

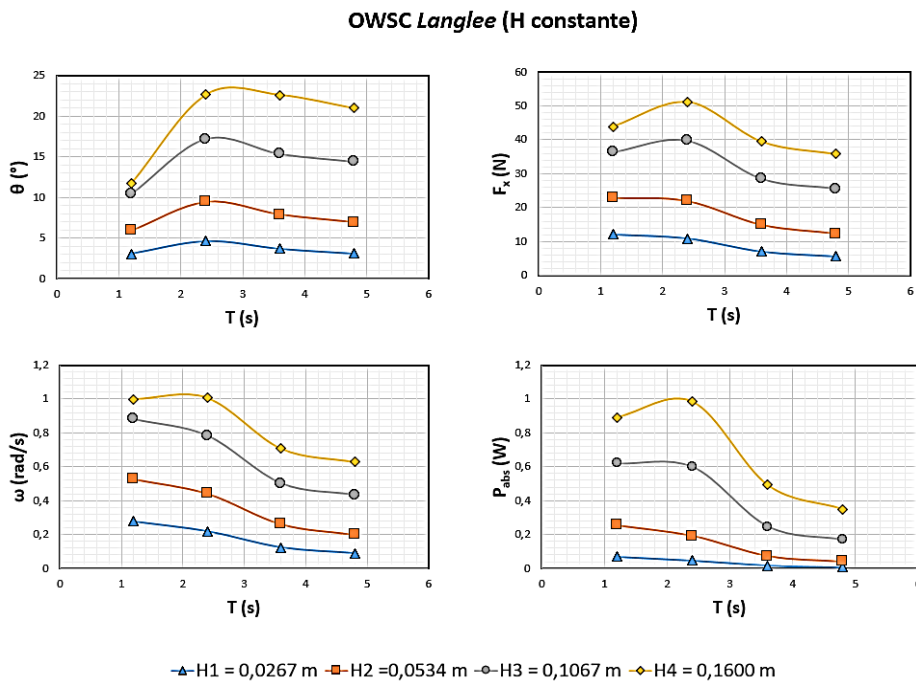


Figura 4.27 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda, para um OWSC do tipo *Langlee*

É possível verificar, em ambos dispositivos, que uma elevação da altura de onda aumenta a magnitude das variáveis consideradas e de pequenas tendências, como o surgimento de um ponto de máxima amplitude angular e máxima força horizontal, em um período de aproximadamente 2,2 s (11 s em escala real). Estes pontos de máximo tornam-se mais evidentes no caso das duas maiores alturas de onda ( $H_3 = 0,1067$  m e  $H_4 = 0,16$  m). No caso de um OWSC do tipo *Langlee*, pode-se notar, inclusive, o aparecimento de pontos de máximo nos gráficos de potência captada e velocidade angular, o que sugere a instalação destes dispositivos em regiões de períodos típicos de 11 s, a fim de favorecer sua captação de energia. Após um determinado período (algo em torno de 3,8 s, que corresponde a 19 s em escala real), os valores dos parâmetros estudados não mudam significativamente, sugerindo que, para grandes períodos de onda, o comportamento hidrodinâmico e geração de energia do dispositivo, dependam, principalmente da altura de onda típica da região de instalação do OWSC.

Para adimensionalizar os valores eficazes estudados, foi necessário utilizar as seguintes expressões:

$$T_a = \frac{T}{\left(\frac{c}{g}\right)}, \quad (50)$$

$$H_a = \frac{H}{(h)}, \quad (51)$$

$$H_a^* = \frac{1}{H_a}, \quad (52)$$

em que  $T_a$ ,  $H_a$ ,  $H_a^*$ , correspondem, respectivamente, ao período de onda adimensional, altura de onda adimensional, e altura de onda adimensional inversa.

Os valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada encontram-se reunidos, para os casos de um *Waveroller* e de um *Langlee*, respectivamente, nas Figuras 4.28 e 4.29. Pode-se perceber que os pontos de maximização são “mascarados” nestes gráficos, aparecendo, exclusivamente, nas curvas de amplitude angular atingidas pelo dispositivo; porém a tendência das curvas (crescência/decrescência) é preservada.



**OWSC Waveroller**

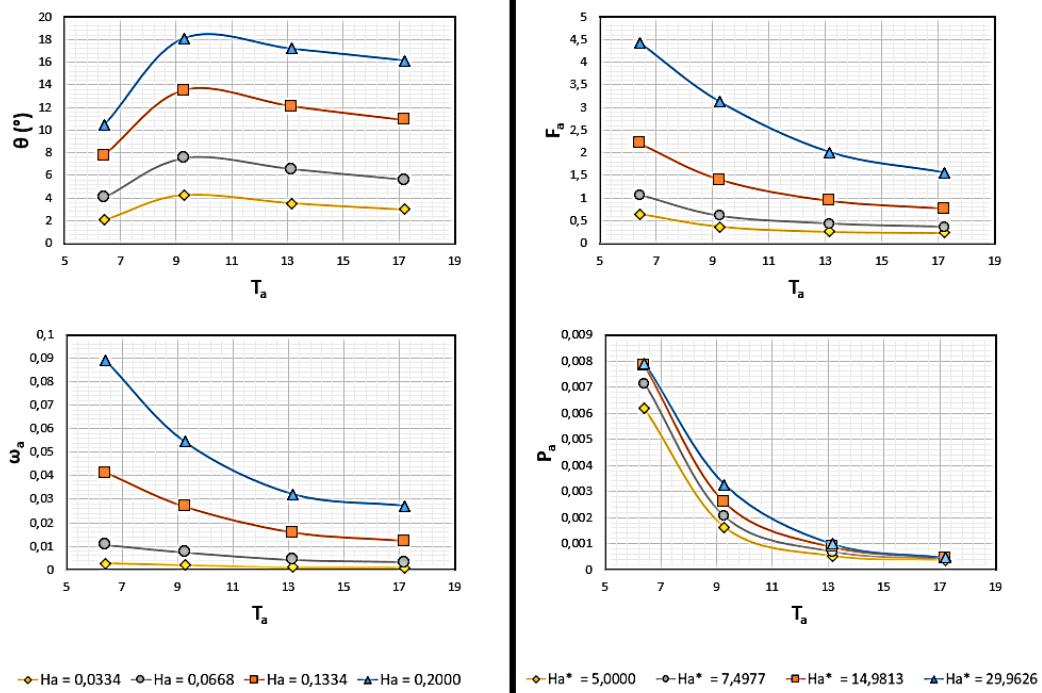


Figura 4.28 – Valores eficazes dimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda dimensional, para um OWSC do tipo *Waveroller*

**OWSC Langlee**

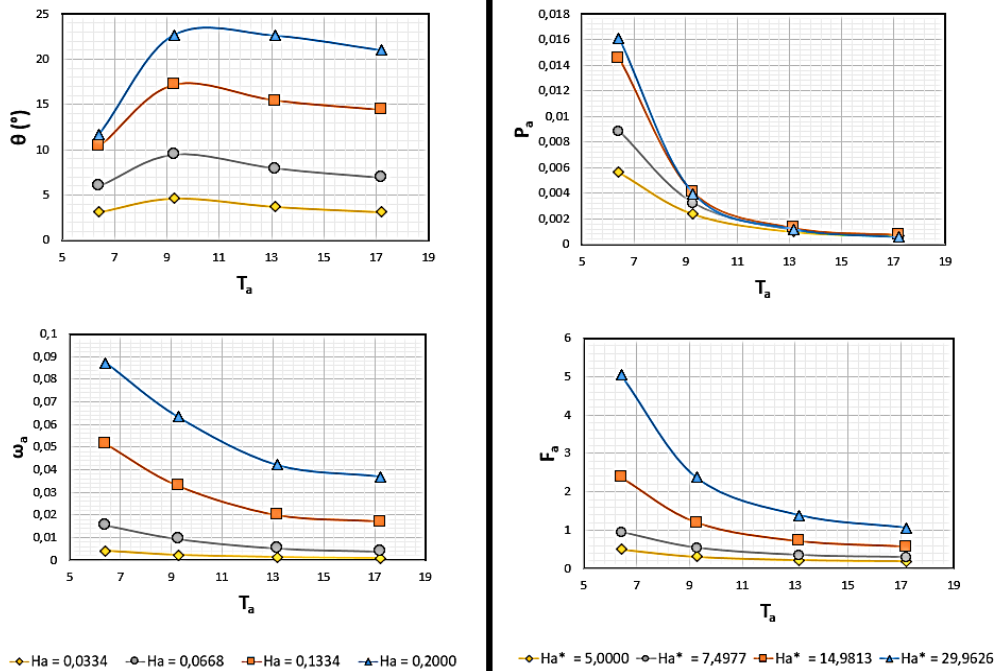


Figura 4.29 – Valores eficazes dimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação no período de onda dimensional, para um OWSC do tipo *Langlee*



#### 4.9.2 Avaliação da mudança ocasionada pela variação da altura de onda

Neste estudo mantiveram-se fixos os períodos de onda em 1,2 s ( $T_1$ ), 2,4 s ( $T_2$ ), 3,6 s ( $T_3$ ), e 4,8 s ( $T_4$ ), que correspondem, respectivamente, aos períodos, em escala real, de 6 s, 12 s, 18 s e 24 s. Para cada um deles, utilizaram-se quatro valores de alturas de onda ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  e  $H_4$ ), descritos no Item 4.9.1.

As séries temporais apresentadas nas Figuras 4.24 e 4.25 mostraram que o aumento da altura de onda não modifica os períodos de oscilação das variáveis de estudo, apenas suas amplitudes, potencializando-as. Na Figura 4.30, é mostrado o campo de velocidades no instante de máxima amplitude angular de uma placa de um OWSC do tipo *Waveroller*, para as alturas de onda de 0,0534 m e 0,16 m e para os períodos de onda de 1,2 s e 4,8 s.

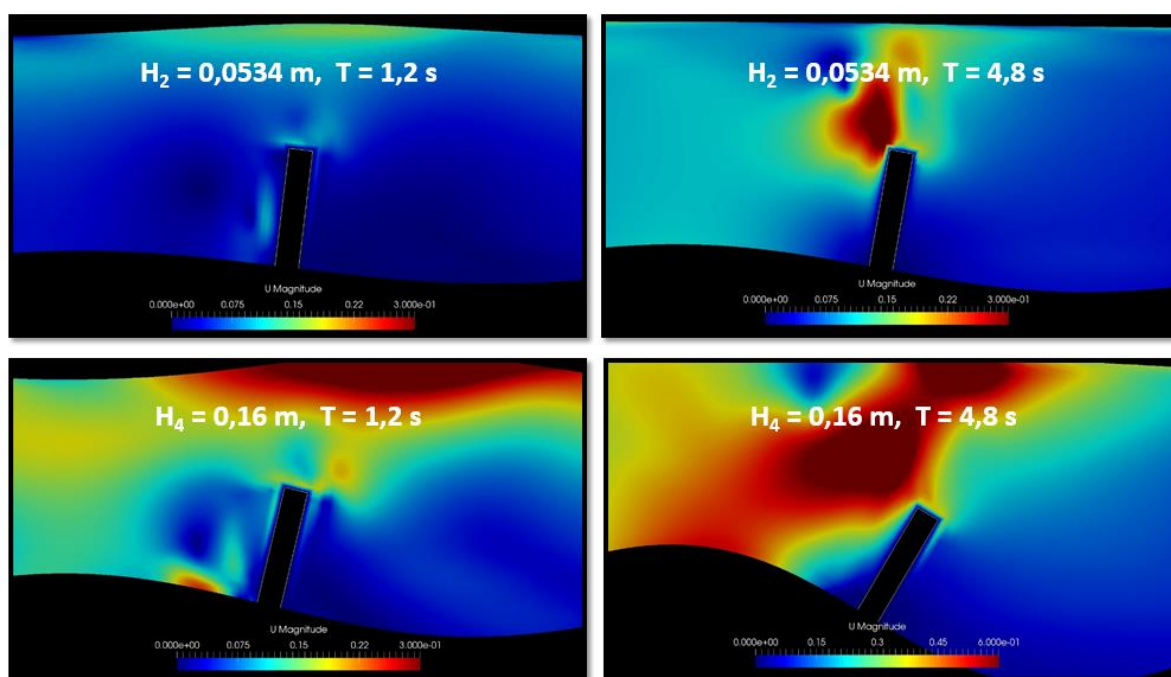


Figura 4.30 – Campo de velocidades, considerando o instante de máxima amplitude angular, de um OWSC do tipo *Waveroller*, em dois períodos e duas alturas de onda diferentes

Nesta figura, é possível observar que o aumento do período ocasiona zonas de maiores magnitudes de velocidade nas regiões próximas às placas, e o aumento da altura de onda intensifica as tendências já existentes, aumentando a magnitude das velocidades e a amplitude angular máxima atingida pela placa do dispositivo.

Plotando os valores eficazes de amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada em função de cada altura de onda considerada (Figuras 4.31 e 4.32), é possível identificar, tanto no caso de um *Waveroller* quanto no de um *Langlee*, que maiores alturas de onda ocasionam maiores valores das variáveis em questão. Um comportamento peculiar é identificado no gráfico da amplitude angular, onde as curvas mais elevadas correspondem, em ordem decrescente, aos períodos de 3,6 s e 2,4 s, o que se comparados aos valores obtidos nas Figuras 4.28 e 4.29, correspondem ao intervalo onde se localiza o ponto de máxima captação energética. Assim, conclui-se que o efeito combinado de grandes alturas de onda e períodos entre 11 s e 18 s (em escala real) compreendem a faixa ideal de operação de um OWSC para maximização da geração de energia.

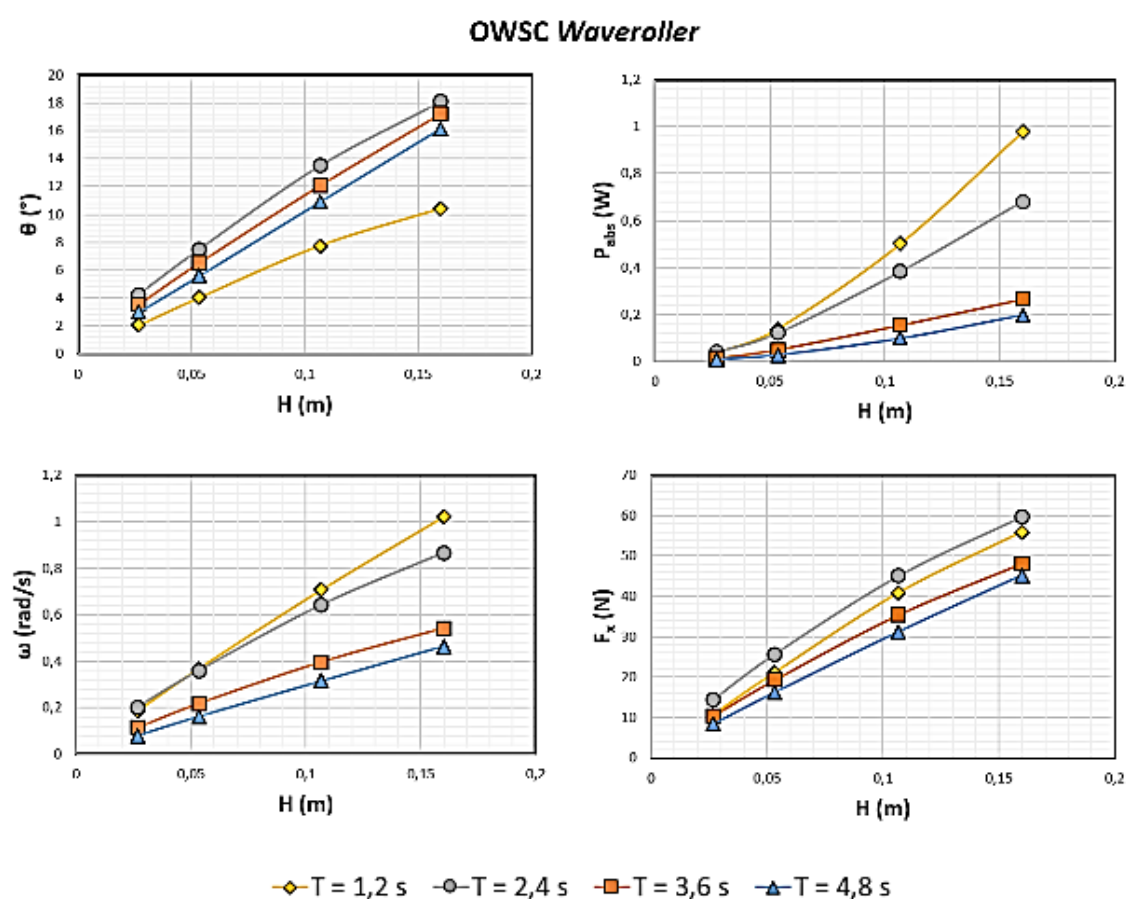


Figura 4.31 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda, para um OWSC do tipo *Waveroller*

## OWSC Langlee

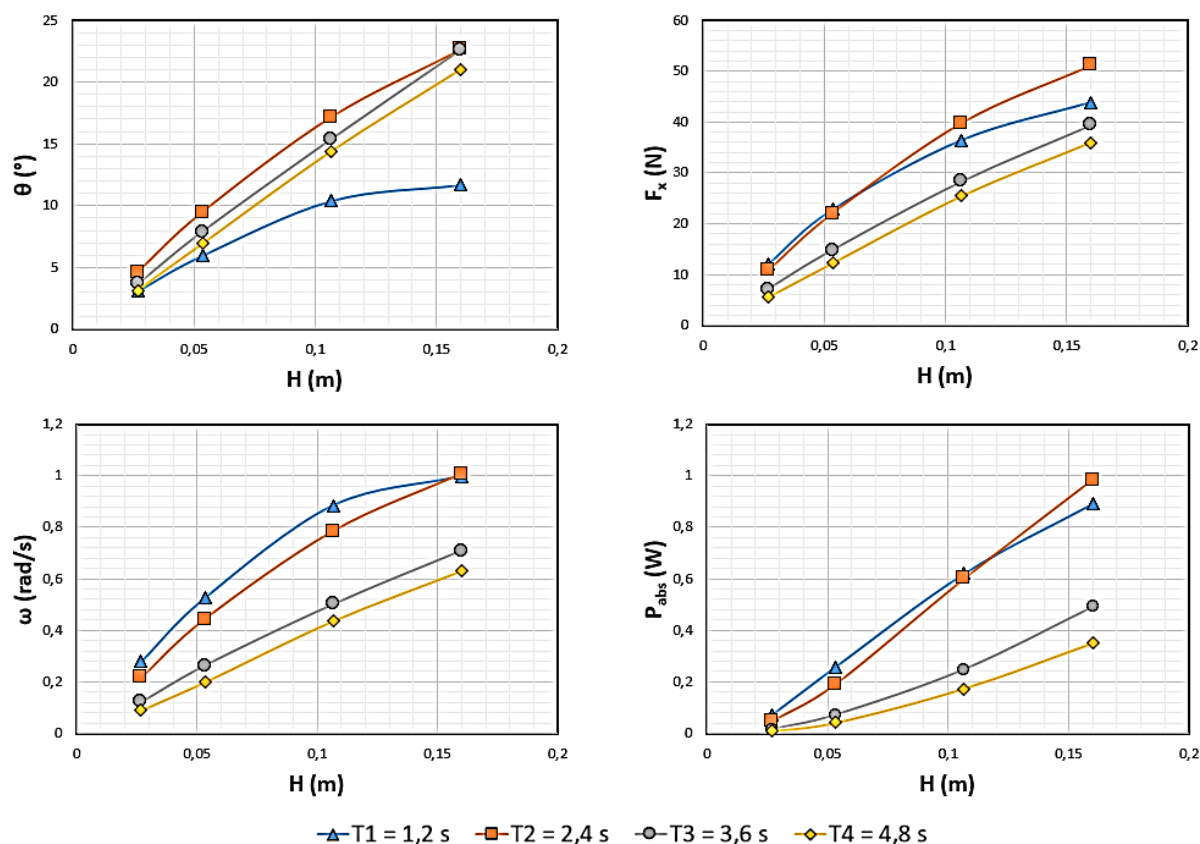


Figura 4.32 – Valores eficazes da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda, para um OWSC do tipo *Langlee*

A adimensionalização dos valores eficazes, mostrados anteriormente, foi realizada utilizando as mesmas expressões do Item 4.9.1, e os gráficos adimensionais são mostrados nas Figuras 4.33 e 4.34, que representam, respectivamente, os dispositivos *Waveroller* e *Langlee*.

O formato das curvas adimensionalizadas é diferente das curvas reais, porém a tendência de crescimento/decrescimento das curvas é conservada. O comportamento observado anteriormente para a amplitude angular atingida, no qual os períodos de 2,4 s e 3,6 s correspondem ao intervalo onde existe o ponto de máxima captura energética, é preservado, sendo o intervalo adimensional de máxima captura de energia o delimitado pelos períodos adimensionais de 9,27 e 13,15.

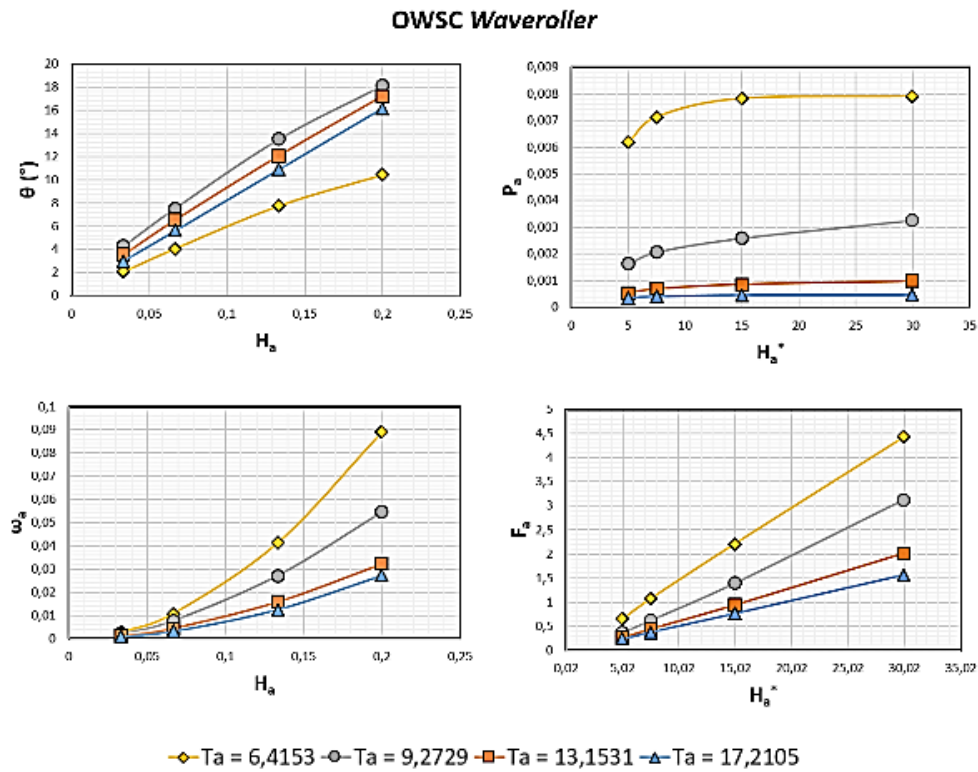


Figura 4.33 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda adimensional, para um OWSC do tipo *Waveroller*

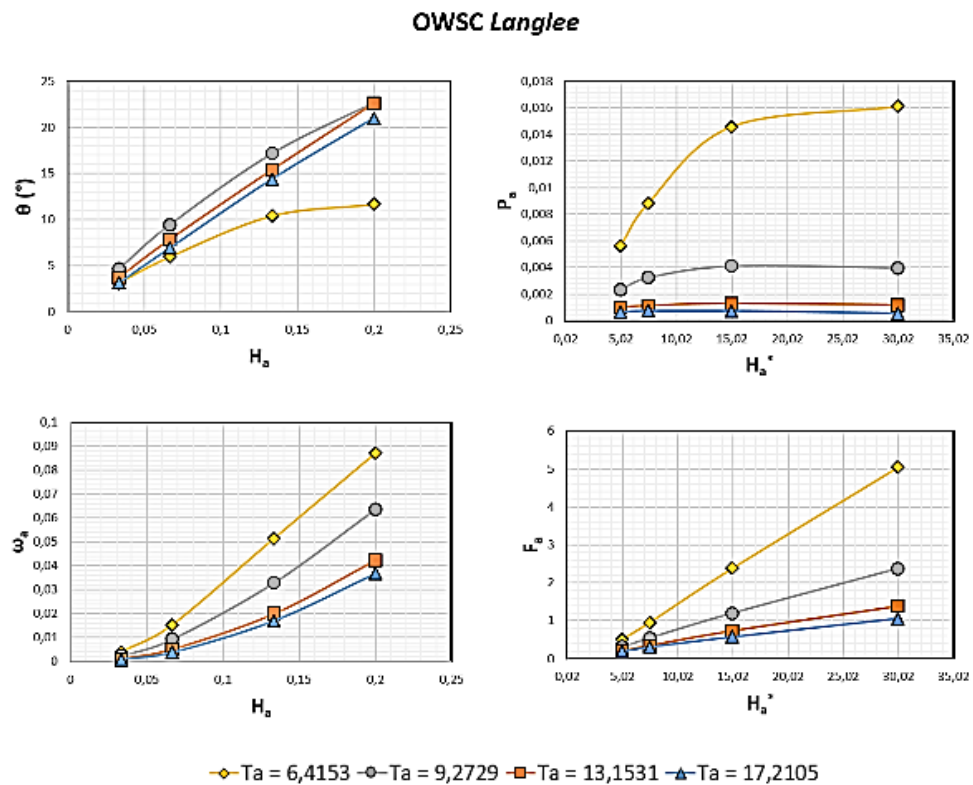


Figura 4.34 – Valores eficazes adimensionais da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função da variação na altura de onda adimensional, para um OWSC do tipo *Langlee*

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o constante desenvolvimento das tecnologias que aproveitam a energia das ondas para a geração de eletricidade e a falta de dados numéricos e experimentais acerca dos dispositivos conversores oscilantes por translação de ondas, foram realizados, neste trabalho, estudos que complementam algumas lacunas existentes. Foram abordados aspectos considerados importantes, como mudanças na geometria das placas de um OWSC, variações na profundidade de instalação e características de ondas regulares incidentes, que modificam o desempenho hidrodinâmico do conversor (maior amplitude angular, velocidade angular e maior captação de energia), fornecendo meios práticos para estimar e prever o comportamento destes tipos de dispositivo em situações reais de funcionamento.

As simulações foram realizadas por meio do código computacional OpenFOAM v 4.1, em conjunto com a extensão OLAFOAM, e do emprego da metodologia baseada em médias de Reynolds para a modelagem da turbulência (RANS). O método de modelagem numérica utilizado neste trabalho consiste na aplicação de uma malha dinâmica deformável, que acompanha o movimento do corpo rígido, aliado à oscilação de um fundo artificial. Este fundo se movimenta juntamente com o conversor, permitindo maiores amplitudes angulares para o corpo estudado, sendo que métodos usuais de deformação de malhas, geralmente, falhariam para inclinações muito acentuadas da placa do OWSC, considerando um fundo fixo. Ao se utilizar essa metodologia, a condição de contorno “*movingWallVelocity*”, normalmente aplicada em corpos em movimento, tende a apresentar resultados não representativos, sendo necessário utilizar a condição “*noSlip*”, com alguns cuidados para garantir uma aproximação satisfatória de casos reais. Por meio de estudos comparativos com dados experimentais, a metodologia utilizada se mostrou adequada para o tratamento da dinâmica do dispositivo.

A comparação entre os modelos 2D e 3D apresentou grande concordância entre os resultados, mostrando que uma análise principal pode ser realizada satisfatoriamente pelos modelos bidimensionais. Para análises mais precisas e detalhadas seriam necessárias simulações numéricas tridimensionais, as quais demandam um custo computacional mais elevado.

Por meio das simulações realizadas, conclui-se que maiores larguras de placa resultam em maiores amplitudes angulares e velocidades angulares atingidas pela mesma, bem como em maiores forças horizontais que agem sobre a estrutura. Em larguras cujos valores são maiores

que três vezes a altura da placa, o comportamento hidrodinâmico e a captação de energia tornam-se inerentes à variação da largura, levando à conclusão de que a largura ideal de um OWSC deva possuir dimensões entre duas a três vezes a altura de sua placa.

A espessura da placa de um dispositivo oscilante por translação de ondas está diretamente relacionada ao momento de inércia de massa da mesma, o qual cresce com o aumento da espessura, dificultando o movimento da placa e a consequente produção de energia. Este comportamento é observado nas curvas resultantes das simulações, as quais mostram que maiores espessuras estão relacionadas a menores taxas de captação de energia. Verificou-se que os dispositivos desse tipo obtêm o melhor desempenho hidrodinâmico quando a dimensão de sua espessura encontra-se entre 10 % e 20 % da altura de placa.

À medida que a profundidade cresce, é possível perceber uma diminuição do desempenho hidrodinâmico e consequente geração de energia do OWSC, sendo que, para uma profundidade igual ou superior a, aproximadamente, duas vezes a altura da placa, a influência na geração de energia passa a não depender significativamente da lâmina de água envolvida. Assim, os dispositivos do tipo *Langlee* devem ser instalados em profundidades maiores que o dobro de sua altura e os do tipo *Waveroller* e *Oyster*, em zonas menos profundas, a fim de compensar as perdas de energia que ocorrem nas regiões *Nearshore*.

O aumento do período de onda ocasiona uma intensificação da magnitude dos campos de velocidade nas regiões próximas às placas, porém, as oscilações nos valores da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, tendem a manter um período muito próximo ao da onda incidente. Existe um período de captação máxima, relacionado a uma intensificação da velocidade angular e das forças horizontais, observado, principalmente para o dispositivo do tipo *Langlee*, que ocorre em um período próximo a 11 s (escala real). Para períodos maiores que 20 s, a potência captada não tende a variar mais em função do período, dependendo somente da altura da onda incidente. Conclui-se que o período de máxima captação ocorre para valores próximos aos 10 s, que pode ser potencializada caso, nesta região, ocorram ondas de alturas significativamente elevadas. Um aumento na altura de onda está diretamente relacionado à intensificação de fenômenos já existentes, causando um aumento nas amplitudes das oscilações da amplitude angular, velocidade angular e da potência captada pelo dispositivo.

Com a união de todas essas informações é possível, conhecendo características básicas de onda, de profundidade e da geometria do OWSC, prever, de forma estimada, qual será o seu desempenho hidrodinâmico e a potência captada pelo dispositivo, facilitando a compreensão do seu funcionamento e a verificação da viabilidade de instalação (em termos construtivos e financeiros) em comparação a outras fontes renováveis de energia.

## 6 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DESTE TRABALHO

O presente trabalho complementou os estudos realizados por Vargas (2015), desenvolvendo uma metodologia alternativa para o tratamento dinâmico dos dispositivos oscilantes por translação de ondas. Esta metodologia dispensa implementações posteriores no código principal, mostrando-se adequada a modelagem numérica de um único dispositivo, porém pode se tornar um problema para a modelagem de dois ou mais dispositivos que se movimentam em conjunto. Assim, a seguir são apresentadas algumas sugestões para dar continuidade e complementar o estudo desta tecnologia no âmbito das energias renováveis:

- a) **implementar um método baseado em IBM para a modelagem dinâmica** – a utilização da metodologia de fronteiras imersas pode contornar alguns problemas, pois a malha principal não irá se deformar e o objeto em si será tratado como um contorno móvel dentro do domínio;
- b) **relacionar as forças horizontais à energia produzida com base em um modelo estático** – consiste em prever a energia captada por um dispositivo com base em simulações não-dinâmicas, mais simples e práticas (placas estáticas na posição a 90° com a horizontal), promovendo um ganho computacional em simulações 3D. Para tal, seria necessário comparar os resultados obtidos em um modelo dinâmico com aqueles encontrados pelo modelo estático proposto, estendendo os resultados para, por exemplo, uma análise da geração de energia e comportamento hidrodinâmico em um parque de OWSC's;
- c) **análise da profundidade de submersão dos dispositivos do tipo *Oyster* e *Langlee*** – a profundidade de submersão consiste na “altura submersa” da placa do dispositivo, sendo que os conversores deste tipo apresentam parte de sua placa localizada (na posição de repouso) acima da superfície livre. O grau de submersão está relacionado, conforme Whitaker et al. (2007), ao desempenho hidrodinâmico do dispositivo;
- d) **simulações 3D para análise de perfis hidrodinâmicos** – consiste na utilização de um modelo tridimensional para testar como mudanças no *design* das placas são capazes de potencializar a energia captada pelos OWSC's;
- e) **estudo da vibração induzida por vórtices sobre as placas em ondas de grandes períodos** – o efeito ocasionado por um grande período de onda é muito similar ao que ocorre quando existe uma corrente que se propaga de montante para jusante, o qual se manifesta devido à grande trajetória orbital das partículas para este caso. Dessa maneira, é esperado que ocorra um efeito de vibração induzida sobre a placa do conversor, o que afetará a sua hidrodinâmica.



## REFERÊNCIAS

- ALI, A.; RAJAKUMAR, C. **The Boundary Element Method: Applications in sound and vibration**. CRC Press, 2004.
- AMIR, M. A. U.; SHARIP, R. M.; MUZANNI, M. A.; ANUAR, H. A. Wave energy convertors (WEC): A review of the technology and power generation. In: AIP CONFERENCE, v. 1775, 2016. **Proceedings...** American Institute of Physics, 2016. p. 030100.
- ANDRÉ, R. A. A. **Modelação de um sistema de conversão de energia das ondas**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.
- AW-ENERGY. **Conceito do Waveroller**. Vantaa, FL, [2017?]. Disponível em: < <http://aw-energy.com/pt-pt/sobre-o-waveroller/conceito-do-waveroller>>. Acesso em: 12 mar. 2017
- BABARIT, A.; HALS, J.; MULIAWAN, M. J.; KURNIAWAN, A.; MOAN, T.; KROKSTAD, J. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 41, n. 1, p. 44-63, May. 2012.
- BEVILACQUA, G.; ZANUTTIGH, B. **Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development**. 2011.
- CAMPOS, G. A. P. **Estudo de mecanismo aplicado na geração de energia a partir de correntes oceânicas**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- CARGO, C. **Design and Control of Hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters**. 2012. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Bath, Bath, UK, 2012.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. 3ed. Porto Alegre, RS: AMGH Editora, 2015.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão CEMIG**. Belo Horizonte, MG, 2012.
- COSTABEL, M. Principles of boundary element methods. **Computer Physics Reports**, North-Holland, Amsterdam, v. 6, n. 1-6, p. 243-274, Aug. 1987.
- CRESPO, A. J. C. **Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPysics to free-surface hydrodynamics**. 2008. 170 f. Tese (Doutorado em Ciências Físicas) – Departamento de física aplicada, Universidade de Vigo, Vigo, 2008.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. 2nd ed. Singapore: World Scientific, 1991.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Coastal Process**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

DHANAK, M. R.; XIROS, N. I.; DARWISH, M. **Springer handbook of Ocean Engineering**. USA: Springer, 2016.

DHATT, G.; TOUZOT, G.; LEFRANÇOIS, E. **Finite Element Method**. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2012.

DOUGLASS, S.L.; KROLAK, J. **Highways in the Coastal Environment**. Hydraulic Engineering Circular 25. Contract, 2008.

ENFERAD, E.; NAZARPOUR, D. **Ocean's Renewable Power and Review of Technologies: Case Study Waves**. INTECH Open Access Publisher, 2013.

FADLUN, E. A.; VERZICCO, R.; ORLANDI, P.; YUSOF, J. M. Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations. **Journal of computational physics**, North-Holland, Amsterdam, v. 161, n. 1, p. 35-60, Feb. 2000.

FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1391-1424, Jan. 2016.

FENTON, J. D. A fifth-order Stokes theory for steady waves. **Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering**, v. 111, n. 2, p. 216-234, 1985.

FENTON, J. **Coastal and Ocean Engineering**. TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Vienna, Austria, 2013.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer, 2002.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T.W.T.; VAN'T HOFF, J. The design of small seabed—manted bottom—hinged wave energy converters. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 7th, 2007, Porto, Portugal. **Proceedings...** Belfast: Queen's University Belfast, 2007. Não paginado.

FORTUNA, A.de O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

GARDE, R. J. **Turbulent Flow**. John Wiley & Sons, 1994.

GOTTLIEB, D.; ORSZAG, S. A. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1977.

GRETE, P. **Subgrid-scale modeling of MHD turbulence**. [2016?]. Disponível em: <<https://pgrete.de/research/>>. Acesso em: 25 abr. 2017.

HENRY, A.; DOHERTY, K.; CAMERON, L.; WHITTAKER, T.; DOHERTY, R. Advances in the design of the Oyster wave energy converter. In: RINA MARINE AND OFFSHORE ENERGY CONFERENCE, 2010. **Proceedings...2010**.

- HIGERA, P. **OLAFOAM Reference Manual**. Cantabria: Universidad de Cantabria, 2016.
- HOLMBERG, P.; ANDERSSON, M.; BOLUND, B.; STRANDANGER, K. Wave Power: Surveillance study of the development. **Elforsk rapport**, Stockholm, Sweden, v. 11, n. 2, p. 47, May. 2011.
- HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- HOTTOLA, N. **Wave energy converter test application**. 2016. 33 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finlândia, 2016.
- JOUBERT, J. R.; van NIERKEK, J. L.; REINECKE, J.; MEYER, I. **Wave Energy Converters**. Stellenbosch, South Africa: Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013.
- KAMPHUIS, J. W. **Introduction to coastal engineering and management**. Vol 16. Singapore: World Scientific, 2000.
- KARIMIRAD, M. **Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms**. Springer, 2014.
- KASANEN, E. Positive experiences of the Waveroller in Portugal and France. **WavEC Conference 2015**, Lisbon, Portugal. 2015.
- LANGLEE WAVE POWER. **Robusto**. Asker, Norway. 2015. Disponível em: <<https://www.environmental-expert.com/downloads/langlee-robusto-wave-energy-converters-brochure-466619>>. Acesso em: 22 mar. 2017.
- LAUNDER, B. E.; SANDHAM, N. D. **Closure strategies for turbulent and transitional flows**. Cambridge University Press, 2002.
- LEVITAN, D. Why Wave Power Has Lagged Far Behind as Energy Source. **Yale Environment 360**, Philadelphia, 2014. Disponível em: <[http://e360.yale.edu/features/why\\_wave\\_power\\_has\\_lagged\\_far\\_behind\\_as\\_energy\\_source](http://e360.yale.edu/features/why_wave_power_has_lagged_far_behind_as_energy_source)> Acesso em: 21 mar. 2017.
- MÄKI, T.; VUORINEN, M.; MUCHA, T. Waveroller: one of the leading technologies for wave energy conversion. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 5th, 2014, Halifax, Canada. **Proceedings...** Lisbon: OES, 2014. Não paginado.
- MANZONI, A. **Stato dell'arte delle tecnologie di conversione dell'energia dal moto ondoso**. 2013. 183 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia de Energia) – Faculdade de Engenharia Industrial, Politecnico di Milano, Milão, 2013.
- MARQUIS, L.; KRAMER, M.; KRINGELUM, J.; CHOZAS, J. F.; HELSTRUP, N. E. Introduction of Wavestar wave energy converters at the Danish offshore wind power plant Horns Rev 2. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 4th, 2012, Dublin, IRL. **Proceedings...** Ocean Energy Systems, 2012. p. 1-6.

MEI, C. C.; STIASSNIE, M.; YUE, D. K. P. **Theory and applications of ocean surface waves**. Vol 23. Singapore: World Scientific, 2005.

MEISEN, P.; LOISEAU, A. **Ocean energy technologies for renewable energy generation**. Global Energy Network Institute, 2009.

MENTER, F. R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TURBULENCE, HEAT AND MASS TRANSFER, 4th, 2003, Antalya, Turkey. **Proceedings...** New York: Begell House, 2003. Não paginado.

MONAGHAN, J. J. Smoothed particle hydrodynamics. **Reports on progress in physics**, v. 68, n. 8, p. 1703-1759, July. 2005.

MORAIS, T. A. N. da S. **Estudo da operação de parques de sistemas de conversão de energia das ondas em energia eléctrica**. 2009. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. Switzerland: Springer, 2016.

MUKHOPADHYAY, M. **Mechanics of Composite Materials and Structures**. Himayatnagar, Hyderabad, Índia: Universities Press, 2004.

OCEAN ENERGY SYSTEMS. **Annual Report**, Lisboa, Portugal, 2015. Disponível em: < <https://www.ocean-energy-systems.org/documents/83113-report-oes-web-29abr.pdf/>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM User Guide v. 4.0**. 2016. Disponível em: <<http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM 2.3.0: Arbitrary Mesh Interface**. 2017. Disponível em: < <https://openfoam.org/release/2-3-0/non-conforming-ami/>>. Acesso em: 08 fev. 2018.

OPENFOAM WIKI. **Parameter Definitions - dynamicMotionSolverFvMesh**. 2016. Disponível em: < [http://openfoamwiki.net/index.php/Parameter\\_Definitions\\_-\\_dynamicMotionSolverFvMesh](http://openfoamwiki.net/index.php/Parameter_Definitions_-_dynamicMotionSolverFvMesh)>. Acesso em: 08 fev. 2018.

OREGON SEA GRANT. **A Primer on Wave Energy: Wave Energy Devices**. Corvallis, Oregon, USA: Oregon State University, 2013.

OTTAVIANO, M. **CETO 6 Concept Design Complete**. North Fremantle, Western Australia: Carnegie Wave Energy Limited, 2016.

PECHER, A.; KOFOED, J. P.; ESPEDAL, J.; HAGBERG, S. Results of an Experimental Study of the Langlee Wave Energy Converter. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND

POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 20th, 2010, Beijing, China. **Proceedings...** Aalborg, Denmark: Aalborg University, 2010. p. 877-885.

PEIFFER, A.; RODDIER, D. Design of an oscillating wave surge converter on the windfloat structure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 4th, 2012, Dublin, IRL. **Proceedings...** Ocean Energy Systems, 2012. p. 1-9.

PLETCHER, R. H.; TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. **Computational fluid mechanics and heat transfer**. CRC Press, 2012.

RAFIEE, A.; ELSAESSER, B.; DIAS, F. Numerical Simulation of Wave Interaction With an Oscillating Wave Surge Converter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 32th, 2013, Nantes, France. **Proceedings...** ASME, 2013. p 1-9.

RENZI, E.; ABDOLALI, A.; BELLOTI, G.; DIAS, F. Mathematical modelling of the oscillating wave surge converter. In: CONFERENCE OF HYDRAULICS AND HYDRAULIC ENGINEERING, 33th, 2012, Brescia, Italy. **Proceedings...** Brescia, 2012. Não paginado.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. 2009. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RÜHLICK, I.; HAAG, M. Oyster - Wave Energy Power Plants: A new Challenge for Hydraulic Cylinders. In: INTERNATIONAL FLUID POWER CONFERENCE, 8th, 2012, Dresden, Germany. **Proceedings...** 2012. Não paginado.

SCHMITT, P.; ELSAESSER, B. On the use of OpenFOAM to model Oscillating Wave Surge Converters. **Ocean Engineering**, v. 108, p. 98-104, July. 2015.

SILVA, M. A. C. da. **Factores de sustentabilidade em energias renováveis**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Área Departamental de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, [Lisboa], 2012.

SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, R. de A. E. **Escolha de tecnologia de conversão da energia das ondas em energia elétrica**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2011.

STEFEN, S. F. **Ocean Energy Development in Brazil**. Rio de Janeiro: COPPE, UFRJ, 2015.

SULTAN, I. **Power Take-off System Design for Wing-Wave WEC**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Department of Marine and Environmental Systems, Florida Institute of Technology, Melbourne, Florida, 2013.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. MIT press, 1972.

THERMAL FLUIDS CENTRAL. **Power Generation from Waves**. 2010. Disponível em: <[http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Power\\_Generation\\_from\\_Waves#Onshore\\_Systems](http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Power_Generation_from_Waves#Onshore_Systems)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A practical Approach**. 1st ed. Oxford, UK: Elsevier, 2008.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Marine and hydrokinetic technology glossary**. [2016?]. Disponível em: <<https://energy.gov/eere/water/marine-and-hydrokinetic-technology-glossary>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

VARGAS, G. F. **Waveroller: Análise das características hidráulicas e de escoamento influentes na geração de energia elétrica por simulação numérica**. 2015. 148 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education, 2007.

VICINANZA, D.; MARGHERITINI, L.; KOFOED J. P.; BUCCINO, M. The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. **Energies**, v. 5, n. 2, p. 193-226, Jan. 2012.

WEI, Y.; RAFIEE, A.; HENRY, A.; DIAS, F. Wave interaction with an oscillating wave surge converter, part I: Viscous effects. **Ocean Engineering**, v. 104, p. 185-203, June. 2015.

WHITTAKER, T.; COLLIER, D.; FOLLEY, M.; OSTERRIED, M.; HENRY, A.; CROWLEY, M. The development of Oyster: a shallow water surging wave energy converter. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 7th, 2007, Porto, Portugal. **Proceedings...** Belfast: Queen's University Belfast, 2007. Não paginado.

YAO, G. **Immersed Boundary Method for CFD: Focusing on Its Implementation**. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.

ZIKANOV, O. **Essential Computational Fluid Dynamics**. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010.