

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**



**AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA DE UM DISPOSITIVO OWC  
ONSHORE INSERIDO EM UM TANQUE COM RAMPA TRIANGULAR EM  
ESCALA REAL EMPREGANDO CONSTRUCTAL DESIGN**

MAX LETZOW

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Elizaldo Domingues dos Santos,  
Dr. Eng. Mecânica  
Co-orientador: Liércio André Isoldi, Dr. Eng.  
Mecânica

Rio Grande, Outubro de 2014.



***O temor do SENHOR é o princípio do conhecimento.***

*Provérbios 1: 7  
Bíblia Almeida Corrigida e Revisada Fiel.*

***Como as águas profundas é o conselho no coração do homem;  
mas o homem de inteligência o trará para fora.***

*Provérbios 20:5  
Bíblia Almeida Revisada.*

## ORAÇÃO DE AGRADECIMENTO

SENHOR meu DEUS, quero aqui tentar expressar palavras de agradecimento a Ti.

Agradecer por minha família, por meus irmãos, por minha mãe e ao meu pai, o qual aprouve ao SENHOR chamar. O apoio e ensinamentos recebidos desde tenras letras de meus pais sobre a Tua PALAVRA permitiram que eu permanecesse nos teus caminhos.

Agradecer por me dar amigos verdadeiros e sinceros, que pela jornada da vida, conheci e perdi, mas guardo boa lembrança no meu coração.

Agradecer por meus mestres, que com sabedoria, em todas as fases da minha vida demonstraram carinho e dedicação na transmissão do conhecimento.

Agradecer pela maravilhosa esposa que o SENHOR colocou ao meu lado. Esposa atenciosa, cuidadosa e amável, que sempre me conforta, apoia e me reconduz aos Teus caminhos, quando estou enfraquecido.

Agradecer, agradecer e agradecer por este lindo e maravilhoso presente dado pelo SENHOR, que é nossa filha. Quero, muito, guiá-la nos Teus Caminhos e na Tua Palavra.

SENHOR, sei de meus pecados e faltas, e que algumas vezes, este mundo me faz deixa-lo de lado. Porém, bem sei que em nenhum momento me abandonastes e que o SENHOR sempre acreditou em mim, até quando nem mesmo eu acreditava... em mim mesmo.

## RESUMO

Entre as pesquisas sobre formas de conversão de energia das ondas em energia elétrica, destacam-se os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante (OWC – do inglês: *Oscillating Water Column*). Este dispositivo tem seu princípio físico de funcionamento baseado em uma câmara fechada parcialmente submersa, aberta para o mar abaixo da superfície livre da água. O processo de geração de eletricidade divide-se em duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina devido ao aumento de pressão na câmara de ar. Quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior gerada no interior da câmara de ar. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica. No presente trabalho é realizado um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa e da câmara sobre o desempenho de um dispositivo OWC *onshore* em escala real, empregando *Constructal Design*. O principal propósito é verificar quais geometrias para a câmara (razão entre a altura e comprimento da câmara:  $H_1/L_1$ ) e rampa (razão entre a altura e comprimento da rampa:  $H_2/L_2$ ) que maximizam a potência disponível no dispositivo. Vale destacar que, neste trabalho, é avaliado apenas o princípio físico de funcionamento do dispositivo. Consequentemente, as geometrias ótimas obtidas aqui servem como uma recomendação teórica para futuros estudos e construções desse tipo de conversor de energia das ondas. Nas presentes simulações, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é utilizado. O emprego do *Constructal Design* permitiu aumentar significativamente o desempenho fluidodinâmico do dispositivo. Também foi observado que ambos graus de liberdade estudados ( $H_1/L_1$  e  $H_2/L_2$ ) possuem grande influência sobre a potência disponível no dispositivo. Contudo, os graus de liberdade apresentaram efeitos diferentes para os dois casos de comprimento da borda frontal do dispositivo estudados ( $H_3 = 2.5$  m e 5.0 m). A geometria ótima global foi obtida para  $H_3 = 2.5$  m,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $(H_2/L_2)_{oo} = 0.8$  apresentou uma potência  $Pot = 331.57$  W.

**Palavras-chave:** Modelagem Computacional, OWC, Otimização Geométrica, *Constructal Design*, Energia das Ondas do Mar.

## ABSTRACT

Among the researches about ways to convert wave energy into electrical one, it can be highlighted the Oscillating Water Column devices (OWC). This device has its main operational principle based on a closed chamber partially submerged and opened for the sea under the free surface of water. The generation of electricity process is shared in two steps: when the wave enters into the structure the air inside the chamber is forced to flow through a turbine due to the increase of pressure inside the chamber. In the second step, when the wave returns to the sea the air flows again through turbine, but in the contrary sense due to the decrease of pressure inside the chamber. The turbine-generator set is responsible for production of electric energy. In the present work it is performed a numerical study concerned with the effect of ramp and chamber geometry over the performance of an onshore OWC device in real scale by means of Constructal Design. The main purpose here is to verify whose geometries for the chamber (ratio between the height and length of chamber:  $H_1/L_1$ ) and ramp (ratio between the height and length of ramp:  $H_2/L_2$ ) that maximizes the available power in the device. It is worthy to mention that, in this work, it is evaluated only the main operational principle of the device. As a consequence, the optimal geometries reached here serve as a theoretical recommendation for future studies and buildings of this kind of wave energy converter. In the present simulations, the conservation equations of mass, momentum and the equation for volumetric fraction transport are solved with the finite volume method (FVM). For approach of water-air mixture, the multiphase model Volume of Fluid (VOF) is employed. The employment of Constructal Design allowed the achievement of a significant improvement in the fluid dynamic performance of the device. It is also noticed that both studied degrees of freedom ( $H_1/L_1$  and  $H_2/L_2$ ) has large influence over the available potency of device. However, the degrees of freedom had different effects for the two studied length of frontal board of device ( $H_3 = 2.5$  m and 5.0 m). The global optimum geometry was obtained for  $H_3 = 2.5$  m,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  and  $(H_2/L_2)_{oo} = 0.8$  showed a power  $Pot = 331.57$  W.

**Keywords:** Computational Modeling, OWC, Geometrical Optimization, Constructal Design, Wave Energy.

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE FIGURAS .....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 MOTIVAÇÃO.....	15
1.2 ESTADO DA ARTE .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	23
1.3.1 <i>Objetivos gerais</i> .....	23
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	24
2. FUNDAMENTOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS.....	25
2.1 POTENCIAL DE ENERGIA DAS ONDAS .....	25
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	26
2.2.1 <i>Galgamento</i> .....	28
2.2.2 <i>Corpo Oscilante</i> .....	29
2.2.3 <i>Coluna de Água Oscilante (OWC)</i> .....	30
2.3 TEORIA DAS ONDAS .....	33
2.3.1 <i>A formação das ondas</i> .....	33
2.4 TEORIA LINEAR .....	40
3. FUNDAMENTOS DE TEORIA CONSTRUCTAL.....	44
3.1 O CONSTRUCTAL DESIGN.....	45
3.2 O CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO EM DISPOSITIVOS DE OBTENÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO OWC.....	47
4. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	50
4.1 <i>CONSTRUCTAL DESIGN</i> APLICADO AO DISPOSITIVO DE OWC .....	50
4.2 O MODELO MULTIFÁSICO <i>VOLUME OF FLUID (VOF)</i> .....	54
5. MODELAGEM NUMÉRICA .....	57
5.1 MODELAGEM NUMÉRICA .....	58
5.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF) .....	60
5.3 DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO .....	66
5.4 TRATAMENTO DOS TERMOS ADVECTIVOS DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO.....	69
5.5 RESOLUÇÃO DE EQUAÇÕES APLICANDO O MÉTODO DE SOLUÇÃO SEGREGADO.....	71
5.6 ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE .....	72

5.7 MÉTODO GEO-RECONSTRUCTION.....	73
5.8 PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS .....	74
6. RESULTADOS .....	79
7. CONCLUSÕES .....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_1$	Área da câmara interna	[m <sup>2</sup> ]
$A_2$	Área da rampa	[m <sup>2</sup> ]
	Celeridade da onda	[m.s <sup>-1</sup> ]
$d$	Distância do fundo do tanque até o nível médio da água	[m]
$\bar{F}$	Forças externas por unidade de volume	[N.m <sup>-3</sup> ]
$g$	Aceleração do campo gravitacional	[m.s <sup>-2</sup> ]
$H$	Altura da onda	[m]
$H_1$	Altura da câmara	[m]
$H_2$	Altura da rampa	[m]
$H_T$	Altura total do tanque	[m]
$k$	Número de onda	[m <sup>-1</sup> ]
$L_T$	Comprimento total do tanque	[m]
$L_1$	Comprimento da câmara	[m]
$L_2$	Comprimento da rampa	[m]
$M$	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica instantânea	[kg/s]
$P$	Ponto principal de um volume de controle	
$P$	Pressão	[Pa]
$Pot$	Potência	[W]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Período de onda	[s]
$U_r$	Número de Ursell	[λ <sup>2</sup> H/h <sup>3</sup> ]
$\vec{v}$	Vetor velocidade	[m/s]
$w$	Coordenada espacial	[m]
$x$	Coordenada espacial	[m]
$z$	Coordenada espacial	[m]
$u_x$	Componente da velocidade na direção $x$	[m/s]
$u_z$	Componente da velocidade na direção $z$	[m/s]

## Símbolos gregos

$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
$\alpha_q$	Fração de volumétrica das duas fases (ar e água)	
$\alpha_{\text{água}}$	Fração volumétrica da fase água	
$\alpha_{\text{ar}}$	Fração volumétrica da fase ar	
$\eta$	Elevação da superfície livre	[m]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\rho$	Massa específica	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\phi$	Relação entre área da rampa e a área do tanque de ondas	
$\sigma$	Frequência da onda	[s <sup>-1</sup> ]
$\bar{\tau}$	Tensor taxa de deformação	[Pa]
$\Delta$	Variação da componente em relação ao tempo ou ao espaço	

## Sub-índices

$e$	Face leste do volume de controle
$f$	Face
$n$	Face norte do volume de controle
$s$	Face sul do volume de controle
$w$	Face oeste do volume de controle
( ) <sub>o</sub>	Uma vez otimizado
( ) <sub>oo</sub>	Duas vezes otimizado
( ) <sub>m</sub>	Uma vez maximizado
( ) <sub>mm</sub>	Duas vezes maximizado

## LISTA DE ABREVIATURAS

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
EDP	Equação Diferencial Parcial
Eq.	Equação
Fig.	Figura
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
NAE	Nível Estático (ou Nível Médio) da Água
OWC	Coluna de Água Oscilante ( <i>Oscillating Water Column</i> )
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SSG	<i>Sea Slot-cone Generator</i>
UDF	Função Definida pelo Usuário ( <i>User Defined Function</i> )
VC	Volume de Controle
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WD	<i>Wave Dragon</i>
WEC	<i>Wave Energy Conversion</i>
WPP	<i>Wave Plane Production</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Valores de $\varphi$ , $\Gamma^\varphi$ e $S^\varphi$ usados na Equação (5.9). .....	64
Tabela 5.2 – Valores de altura da superfície livre da onda ( $\eta$ ) no tempo de $t = 15.0$ s para os passos de tempo estudados e suas variações.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Dispositivo U-OWC, Boccotti (2007) .....	17
Figura 2.1 – Distribuição global da energia média anual das ondas (Thorpe, 1999).....	26
Figura 2.2 – Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López et al., 2013).....	27
Figura 2.3 – Classificação dos equipamentos (Falcão, 2010) .....	28
Figura 2.4 – Ilustração de um dispositivo do tipo SSG com estrutura fixa e localização <i>onshore</i> (Margheritini et al., 2009).....	29
Figura 2.5 – Ilustração de um dispositivo do tipo <i>Wave Dragon</i> com estrutura flutuante e localização <i>offshore</i> (Kofoed et al., 2006).....	29
Figura 2.6 – Pelamis (Bahaj., 2011).....	30
Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um sistema OWC, a) aumento de pressão da câmara, b) diminuição da pressão da câmara.....	31
Figura 2.8 – Central da ilha de Pico - Portugal (Cruz e Sarmento, 2004).....	32
Figura 2.9 Projeto da câmara OWC do Limpet (Wavegen, 2011) .....	32
Figura 2.10 – Distribuição aproximada da energia superficial e classificação de ondas oceânicas (Oliveira, 2012).....	35
Figura 2.11 – Elementos da Onda (Carneiro, 2007).....	36
Figura 2.12 – Teoria das ondas (Carneiro, 2007).....	38
Figura 2.13 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Chakrabarti, 2005).....	39
Figura 3.1 – Aletas de motor elétrico (Letzow et. al., 2011) .....	46
Figura 4.1 – Domínio computacional de um dispositivo OWC em escala real com três graus de liberdades. ....	51
Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo OWC com três graus de liberdade. ....	54
Figura 5.1 – Métodos de resolução para problemas físicos (Maliska, 2004).....	59
Figura 5.2 – Técnica de discretização (Maliska, 2004).....	60
Figura 5.3 – Volume de controle típico (Maliska, 2004).....	61
Figura 5.4 – Volume de controle empregado em MVF para um domínio bidimensional (Adaptado de Patankar, 1980).....	65
Figura 5.5 – Conexão espacial e temporal do volume $P$ (Maliska, 2004).....	67
Figura 5.6 – Tipos de formulações no tempo (Maliska, 2004).....	69
Figura 5.7 – Obtenção de $\phi f$ em uma face do volume de controle (Adaptado de Dos Santos, 2011).....	70
Figura 5.8 – Algoritmo de solução segregada (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).....	72
Figura 5.9 – (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).....	74
Figura 5.10 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo OWC <i>onshore</i> em escala real. .	75
Figura 5.11 – Detalhe da malha regular aplicada ao dispositivo. ....	75
Figura 5.12 – Teste de independência do passo de tempo. ....	77
Figura 5.13 – Verificação da solução numérica com solução analítica obtida pela teoria linear de Airy. ....	78

Figura 6.1 – Vazão mássica em função do tempo para várias razões de $H_1/L_1$ e $H_3 = 2.5$ m para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ). .....	80
Figura 6.2 – Variação da diferença de pressão na câmara e saída da chaminé ( $\Delta P$ ) em função do tempo para várias razões de $H_1/L_1$ e $H_3 = 2.5$ m para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0$ )..	81
Figura 6.3 – Variação da potência RMS ( $Pot_{RMS}$ ) em função do tempo para várias razões de $H_1/L_1$ e $H_3 = 2.5$ m para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ). .....	82
Figura 6.4 – Efeito de $H_1/L_1$ sobre a potência RMS média no tempo para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0$ ) e $H_3 = 2.5$ m. ....	83
Figura 6.5 – Efeito da razão $H_2/L_2$ sobre a vazão mássica em função do tempo para $H_3 = 2.5$ m e $H_1/L_1 = 0.2$ .....	84
Figura 6.6 – Efeito da razão $H_2/L_2$ sobre a diferença de pressão na câmara e saída da chaminé ( $\Delta P$ ) em função do tempo para $H_3 = 2.5$ m e $H_1/L_1 = 0.2$ .....	85
Figura 6.7 – Efeito da razão $H_2/L_2$ sobre a potência RMS ( $Pot_{RMS}$ ) em função do tempo para $H_3 = 2.5$ m e $H_1/L_1 = 0.2$ .....	86
Figura 6.8 – Efeito de $H_1/L_1$ sobre a potência média no tempo para vários valores de $H_2/L_2$ e $H_3 = 2.5$ m. ....	87
Figura 6.9 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.05$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 2.5$ m.....	88
Figura 6.10 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.05$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 2.5$ m. ....	88
Figura 6.11 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.2$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 2.5$ m.....	89
Figura 6.12 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.2$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 2.5$ m. ....	89
Figura 6.13 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.8$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 2.5$ m.....	90
Figura 6.14 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.8$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 2.5$ m. ....	90
Figura 6.15 – Efeito de $H_1/L_1$ sobre a potência média no tempo para vários valores de $H_2/L_2$ e $H_3 = 5.0$ m. ....	92
Figura 6.16 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com rampa $H_2/L_2 = 0.05$ e $H_1/L_1 = 0.8$ e $H_3 = 5.0$ m. ....	92
Figura 6.17 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com rampa $H_2/L_2 = 0.05$ e $H_1/L_1 = 0.8$ e $H_3 = 5.0$ m. ....	93
Figura 6.18 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com $H_2/L_2 = 0.8$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 5.0$ m.....	93
Figura 6.19 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com rampa $H_2/L_2 = 0.8$ , $(H_1/L_1)_o = 0.4$ e $H_3 = 5.0$ m.....	94
Figura 6.20 - Efeito da razão $H_2/L_2$ sobre a potência média no tempo uma vez maximizada e suas respectivas geometrias ótimas, $(H_1/L_1)_o$ , para $H_3 = 2.5$ m. ....	95
Figura 6.21 - Efeito da razão $H_2/L_2$ sobre a potência média no tempo uma vez maximizada e suas respectivas geometrias ótimas, $(H_1/L_1)_o$ , para $H_3 = 5.0$ m. ....	95

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O oceano e a plataforma continental brasileira são um campo fértil para pesquisas e desenvolvimento tecnológico. A descoberta de grandes campos de petróleo sob leito marinho, bem como, os incentivos governamentais na área de energia tem tornado as atividades de pesquisa na área muito atrativas. Reservas estas, de grande importância estratégica para o governo e a sociedade, pois afasta temporariamente a preocupação de escassez de combustíveis de origem fóssil. Porém, a costa oceânica brasileira dispõe de outras formas de energia alternativas a energia fósseis do leito marinho, como por exemplo, obtenção de energia das correntes marinhas, das marés e das ondas do mar.

A energia, seja qual for a sua forma de obtenção na natureza, é necessária para o desenvolvimento e sustentabilidade de qualquer sociedade. Porém, esta deve ser obtida e utilizada com moderação, sem desperdício e permitindo o máximo de conforto para as pessoas. Atualmente, acrescenta-se a preocupação sobre o impacto ambiental e social em toda a cadeia de energia, desde sua obtenção até a aplicação. Clément et al. (2002), Zhang et al. (2009) e Falcão (2010) apresentam levantamentos das políticas energéticas alternativas e seu atual estado de desenvolvimento e aplicações.

As fontes de energia renováveis apresentam-se como tendo o menor impacto negativo social e principalmente, ambiental. Porém, algumas ainda são pouco utilizadas devido, geralmente, ao alto grau de complexidade dos equipamentos captadores e elevado custo de obtenção. Apesar destas dificuldades, a substituição de fontes de energia esgotáveis (fóssil) justificam as pesquisas em novas formas de obtenção de energia em fontes ditas “inesgotáveis”, como, por exemplo, obtenção de energia das ondas do mar (Perdigão e Sarmiento, 2003 e Boccoti, 2007).

Atualmente em voga, o mar oferece inúmeras oportunidades para pesquisas e desenvolvimento tecnológico. As disponibilidades de formas alternativas de obtenção de energia oferecidas pelo oceano despertaram interesse pela complexidade de reprodução da fenomenologia física do problema de escoamento das ondas, bem como o princípio de funcionamento dos equipamentos de conversão de energia disponível sob diversas formas, no mar, como ondas, correntes e marés.

O aumento da demanda mundial de energia e o acordo de Kyoto para reduzir as emissões de gases de efeito estufa tem aumentado o interesse pelo estudo das energia renováveis. O crescimento e interesse em expandir o setor de energia das ondas são baseados em seu potencial estimado em até 10 TW (Sterling, 2008). De acordo com (Falcão, 2010) o nível de energia das ondas é geralmente expressa como potência por unidade de comprimento (ao longo da crista de onda ou ao longo do comprimento da costa). Os valores de energia por metro de onda considerados bons para exploração em regiões *offshore* (média anual) variam entre 20 e 70 kW / m e ocorrem principalmente em moderadas a altas latitudes. Neste sentido, as costas do sul da América do Sul, África e Austrália são particularmente atraentes para a exploração da energia das ondas.

Este potencial de energia das ondas do mar tem sido reconhecido ao longo da história. No entanto, é somente nos últimos tempos, após as crises do petróleo da década de 1970 quando a atenção estava voltada para a possibilidade de extrair maiores quantidades de energia a partir de fontes de energia naturais, que a exploração das ondas do mar na produção de energia elétrica foi estudada em mais detalhes. Experimentos em conversão de energia das ondas têm indicado que vários métodos com princípios de funcionamento diferentes são viáveis para obtenção de energia das ondas (Falcão, 2010).

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Diversos estudos têm sido realizados para obter uma melhor compreensão do funcionamento do dispositivo de conversão de energia das ondas em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (OWC - *Oscillating Water Column*). São apresentados estudos nos âmbitos analíticos, numéricos e experimentais e alguns artigos de revisão. A seguir serão apresentados alguns estudos para obter uma melhor compreensão da proposta do presente trabalho. Procurou-se manter uma ordem cronológica dos trabalhos realizados na literatura.

Falcão e Rodrigues (2002) propuseram um modelo estocástico, ou seja, um processo não determinístico, com origem em eventos aleatórios, para uma planta de obtenção de energia através das ondas do mar empregando um dispositivo do tipo OWC que utiliza uma turbina do tipo Wells. O clima de ondas foi representado por um estado do oceano caracterizado por seu espectro de potencia e superfície livre. A variação e distribuição de pressão do ar internamente no duto da chaminé onde está localizada a turbina foram computados para cada um dos estados. Este estudo permitiu determinar uma faixa de eficiência de uma turbina para uma variação climática ao longo de um período de um ano.

Clement et al. (2002) realizaram um levantamento sobre a energia das ondas no continente europeu, seu estado para a época e perspectivas futuras, o estado tecnológico e econômico da energia das ondas aplicadas no continente europeu até aquele momento. A pesquisa destaca o desenvolvimento e aplicação prática de geradores de energia em escala funcional e produtiva.

Perdigão e Sarmiento (2003) apresentaram um estudo numérico bidimensional de um dispositivo OWC submetido a três espectros de onda e controle de produção de energia. Os autores também observaram que em uma tomada de força, um eficiente controle pode prover uma excelente absorção de energia, mas não uma excelente produção de energia.

Boccotti (2007) propôs uma comparação entre um dispositivo de obtenção de energia das ondas OWC em sua forma convencional e um dispositivo U-OWC (do inglês: *Under - Oscillating Water Column*) em que a este dispositivo é acrescido um duto vertical em sua entrada, conforme Figura. 1.1. A amplitude e flutuação da pressão, bem como a eficiência energética foram maiores para o U-OWC do que para um dispositivo que emprega o princípio de funcionamento convencional.

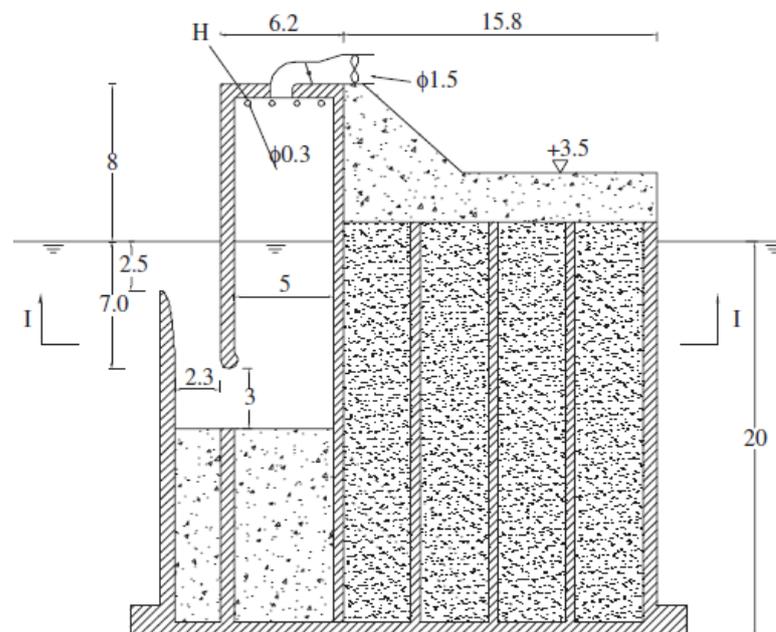


Figura 1.1 – Dispositivo U-OWC, Boccotti (2007)

Anant e Elangovan (2008) utilizaram o software Ansys® CFX e o método VOF (Volume of Fluid) para resolver numericamente um canal de ondas tridimensional que utiliza um batedor tipo “flap”. Neste canal foi realizado um refinamento da malha gerada na região da superfície livre com o intuito de capturar mais acuradamente os movimentos gerados pelas ondas. Este trabalho permitiu estabelecer um batedor de ondas apropriado para um canal de ondas existente a partir do tipo de onda que se desejava gerar no canal.

Conde e Gato (2008) apresentaram um estudo numérico tridimensional do comportamento do escoamento de ar em uma determinada tubulação (ou chaminé) de um dispositivo OWC. É nesta tubulação específica que normalmente se colocaria a turbina conversora de energia. Neste trabalho foi analisado o comportamento do fluxo e verificado se poderiam ocorrer possíveis danos na turbina por causa da erosão causada por partículas de água acompanhando o escoamento de ar.

Gomes et. al. (2009) modelaram numericamente um canal de ondas bidimensional com duas metodologias numéricas diferentes para a geração de ondas regulares em canais de ondas. O método de superfície móvel consiste em aplicar condições de contorno na parede do tanque para atuar similarmente a um batedor tipo pistão utilizando malha móvel. A onda gerada é determinada pelo movimento do batedor. O método de função consiste em aplicar na superfície do tanque responsável pela geração de onda um perfil de velocidade dependente do espaço e do tempo que atua imitando o efeito do gerador de ondas. Ambos métodos apresentaram resultados bastante similares, contudo, o segundo método apresentou a vantagem de rapidez na obtenção de resultados numéricos (aproximadamente 75% mais rápido que o primeiro método). Ambos os métodos conduziram a resultados de perfis de velocidade e altura da superfície livre da onda próximos dos obtidos analiticamente.

Zhang et al. (2009) realizaram uma revisão das tecnologias aplicadas para obtenção de energia através das ondas e a evolução das mesmas com o passar dos anos, como o caso do OWC *onshore* e *offshore*. Além disso, os autores levantaram as principais dificuldades e políticas públicas que influenciavam no desenvolvimento dos dispositivos de conversão e perspectivas futuras para obtenção de energia das ondas.

Semelhantemente, Falcão (2010) apresentou uma revisão sobre a utilização de tecnologias considerando vários países e seus recursos disponíveis. Também apresentou tecnologias já consolidadas e em fase experimental, conceitos e tipos como OWC de estrutura fixa e OWC de estrutura flutuante, fazendo uma breve explanação sobre cada uma delas.

Liang et. al. (2010) analisaram numericamente os efeitos de trens de ondas irregulares em estruturas oceânicas. As ondas irregulares são geradas numericamente em um

canal de ondas bidimensional empregando o modelo Volume of Fluid (VOF). O modelo de batidos de ondas escolhido para a geração das ondas é do tipo pistão. Este trabalho permitiu determinar o comportamento de ondas irregulares e as consequências em estruturas *offshore*, permitindo-se assim melhorias estruturais nos projetos do dispositivo.

Elangovan (2011), em seu trabalho, também desenvolveu um estudo sobre ondas irregulares geradas em um canal de ondas numérico bidimensional. Neste canal há uma rampa na extremidade oposta ao batedor tipo "flap" simulando uma praia artificial com o objetivo de eliminar o fenômeno de refração das ondas em direção ao batedor. O modelo numérico de canal apresentado neste trabalho é de um canal de ondas de 100 metros, este canal numérico é baseado nas dimensões de um canal experimental. Para o espectro de ondas analisado, foi possível determinar significativamente o comprimento e o período de ondas irregulares.

Dizadji e Sajadian (2011) afirmaram que o OWC possui um baixo custo de implementação em relação aos demais princípios de funcionamento por ser possível instalar uma estrutura *onshore* e pelo processo de transmissão de energia já utilizar as tecnologias existentes. Destaca-se que, por ser situado na costa, tem fácil acesso e relativamente simples manutenção. Ainda de acordo com os autores, o OWC apresenta-se como sendo o conceito de maior aplicação na atualidade para obtenção de energia das ondas. Em seu estudo, foram feitos extensivos ensaios experimentais em um tanque de ondas de dimensões reduzidas para varias formas geométricas de OWC para obtenção da máxima eficiência de geração de energia. A câmara experimental em estudo sofreu variações dimensionais a fim de se determinar uma condição geométrica ótima, que apresenta a melhor eficiência para uma máxima conversão de energia.

Pereiras et al. (2011) propuseram um estudo empregando um outro tipo de turbina, a turbina de impulso radial cujo conceito havia sido proposto anteriormente por McCormick et al. (1992). Seu estudo dedicou-se a alterar a forma da lâmina e da hélice da turbina e estudar o comportamento do escoamento de ar por meio destas. Através de simulações numéricas, foi possível determinar uma condição geométrica que permitiu um acréscimo na eficiência energética da turbina em estudo em relação à turbina tipo do Wells amplamente utilizada em estudos da literatura.

Zabihian e Fung (2011) realizaram uma breve revisão do estado-da-arte no aproveitamento da energia do mar. Os autores também estudaram as posições e características da fronteira e mares internos e lagos do Irã do ponto de vista da energia e a possibilidade de utilizar estes recursos energéticos. De acordo com esse estudo, os potenciais de energia nos

mares e os oceanos podem ser classificados em cinco grupos: energia das ondas, energia das marés, energia térmica oceânica, energia das correntes oceânicas, e a energia do gradiente de salinidade.

AbuBakr e Bahaj (2011) estabelecem uma abordagem que pode ser utilizada na tecnologia e desenvolvimento do OWC, descrevendo os resultados com base em observações experimentais e de campo sobre os fundamentos do dispositivo, abordagens de modelagem, as questões de desenvolvimento do projeto. Inclui análise dos vários caminhos e abordagens necessárias para os problemas de distribuição de dispositivos ou conversor de tecnologia e, como a maioria de tecnologia desenvolvimentos estão atualmente sediada no Reino Unido. O documento também discute mecanismos financeiros do Reino Unido disponíveis para apoiar esta área de energia renovável, com destaque para as abordagens econômicas necessárias em tecnologia de desenvolvimento. Perspectivas futuras para o desenvolvimento de tecnologias empregadas na conversão de energia das ondas e das correntes marinhas em energia elétrica são também discutidas.

Mala et al. (2011) realizaram um estudo sobre uma turbina dupla de fluxo unidirecional. Esta turbina atua em ambos os sentidos do escoamento de ar, dependendo do sentido do fluxo de ar, haverá atuação para uma turbina, e para a segunda turbina, somente na saída do fluxo. Seu estudo foi aplicado em um modelo experimental em escala reduzida para produção de energia utilizando-se da simulação de um fluxo bidirecional de ar. Seus resultados serviram para validar o conceito deste modelo de turbina. Este conceito apresenta uma melhor eficiência energética sobre os demais modelos de turbinas.

Gomes et al. (2012a) realizaram um estudo sobre a otimização geométrica de um dispositivo do tipo OWC em escala de laboratório considerando um escoamento em um domínio bidimensional. empregando-se dos fundamentos do *Constructal Design*, são empregados graus de liberdade para determinação das dimensões ótimas de altura e comprimento da câmara do dispositivo, mantendo-se as dimensões da chaminé inalteradas. Para a solução numérica das equações de conversão da massa, quantidade de movimento e do transporte da fração volumétrica para o escoamento da mistura ar-água foi empregado o método dos volumes finitos (FVM – do inglês – *Finite Volume Method*). Enquanto que a mistura foi resolvida com o método *Volume of Fluid* (VOF).

O *Constructal Design* é o método empregado para aplicar a Lei Constructal. O método é baseado no princípio de objetivos e restrições (locais e globais) (Bejan e Lorente, 2008). A Lei Constructal preconiza que para um sistema de fluxo de dimensões finitas persistir no tempo (sobreviver) sua configuração deve evoluir no tempo de forma a facilitar o

acesso das correntes que fluem através do sistema (Bejan, 1997; Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012).

Um trabalho sobre metodologia de geração numérica de ondas em um tanque bidimensional como também um estudo sobre a geração da malha proposto por Gomes et al. (2012b) testou dois tipos de geração e refinamento de malhas. Empregou-se o método CFD (CFD – do inglês: *Computational Fluid Dynamics*), também baseado em FVM (FVM – do inglês: *Finite Volum Method*) com o intuito de encontrar uma malha independente fornecendo resultados acurados e com o menor esforço computacional.

Oliveira (2012) apresenta uma avaliação preliminar do desempenho de um dispositivo costeiro de conversão de energia das ondas dos oceanos do tipo Coluna de Água Oscilante (OWC). O equipamento é submetido à atuação de uma onda monocromática cujas características se assemelham às características do regime de ondas que afeta a região sul da costa litorânea brasileira. A modelagem numérica do problema foi realizada empregando-se Dinâmica dos Fluidos Computacional, mais precisamente o método de volumes finitos com o software FLUENT<sup>®</sup>. Para este estudo foi utilizado a metodologia *Constructal Design* para determinar as dimensões ótimas de comprimento e de altura da câmara hidropneumática do equipamento. Para tal, impõe-se restrições geométricas que fixam o valor da área da câmara em um valor constante. O objetivo da otimização é determinar o valor de razão entre as dimensões de altura ( $H_1$ ) e o comprimento da câmara ( $L_1$ ) para o qual a potência hidropneumática disponível média transmitida ao OWC é máxima. Verificou-se que a geometria ótima, a qual forneceu maior valor de potência hidropneumática, foi a que possuía geometria de uma câmara quadrada ( $H_1/L_1 = 1.0$ ). Os resultados mostraram que a geometria ótima obtida com o *Constructal Design* possui um desempenho superior aos encontrados com geometria não otimizadas. Além disso, mostrou-se que a razão  $H_1/L_1$  possui grande influência sobre o desempenho do problema.

Rezanejad et al. (2013) formularam matematicamente um problema bidimensional utilizando a teoria linear da onda. Neste estudo, foi aplicado, ao fundo de um dispositivo OWC, um degrau de profundidade. Este degrau sofre alterações de posição com vistas a determinar sua influência na eficiência do dispositivo OWC. Duas diferentes abordagens matemáticas para resolução deste problema de valor de fronteira, primeiramente pelo método da função expansão de Eigen e em um segundo método, método das equações integrais de contorno. Os resultados obtidos através das resoluções analíticas e numéricas mostraram-se bastante similares. Este estudo demonstrou que um ajuste adequado do degrau pode elevar a eficiência do dispositivo, contudo, não foi realizado um estudo de otimização.

Outros dispositivos também têm sido estudados, por exemplo, o dispositivo de galgamento. Em Dos Santos et al. (2013) foi realizado um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento *offshore* e em escala de laboratório por meios do *Constructal Design*. A ideia básica foi semelhante ao estudo realizado em Iahnke (2010), Machado (2012) contudo em Dos Santos et al. (2013) o volume total e a fração de volume da rampa foram definidas como restrições. Assim, a razão entre o volume da rampa do dispositivo e o volume total do tanque foi mantida constante. Além disso, o problema apresentou outros parâmetros fixos referentes ao tipo de onda empregado, como, por exemplo, a razão entre a altura e o comprimento de onda (declividade da onda), a relação entre a profundidade e comprimento de onda (profundidade relativa) e a relação entre a altura da onda e a profundidade (altura relativa da onda). O objetivo foi maximizar a vazão mássica de água que entrou no reservatório do dispositivo. Os resultados mostraram que existe uma razão ótima intermediária de  $(H_1/L_1)_o = 0.6$ , que maximizou a quantidade de massa que entrou no reservatório (objetivo). Além disso, o galgamento não ocorreu para as relações extremas. Para o caso estudado também foi observada uma razão ótima local para  $H_1/L_1 = 1.0$ . Os resultados de uma forma geral comprovaram a aplicabilidade do *Constructal Design* para a otimização geométrica em problemas de conversão de energia das ondas do mar em elétrica através desse dispositivo.

Posteriormente, em Dos Santos et al. (2014) foi realizado um estudo numérico para determinar a otimização geométrica de um WEC (WEC – do inglês: *Wave Energy Conversion*) do tipo galgamento para algumas profundidades relativas:  $h/\lambda = 0.3, 0.5$  e  $0.62$  empregando o *Constructal Design*. O objetivo principal e a avaliação da influencia da profundidade relativa sobre a da geometria da rampa (relação entre a altura e o comprimento da rampa:  $H_1/L_1$ ), bem como, investigar a razão que conduz a uma maior quantidade de água ao reservatório. No estudo apresentado, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para a solução da interface água-ar é utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados mostraram que a forma ótima,  $(H_1/L_1)_o$ , tem uma forte dependência da profundidade relativa, isto é, não há uma geometria universal que conduza ao melhor desempenho de um dispositivo de galgamento para diversas condições de onda. Ao conhecimento do autor, não tem sido observados estudos relacionados à otimização geométrica de um dispositivo OWC *onshore* em escala real investigando o efeito da geometria da rampa abaixo do dispositivo, ou seja, a geometria que maximiza a potência útil disponível na chaminé do dispositivo OWC. No presente trabalho, pretende-se empregar

*Constructal Design* para investigar numericamente a influência da geometria da chaminé, bem como, da rampa abaixo do OWC sobre a potência disponível no dispositivo.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência das geometrias de um dispositivo do tipo OWC *onshore* e de uma rampa triangular localizada abaixo desse dispositivo. O uso dessa rampa tem o propósito de maximizar a potência disponível na região da turbina do dispositivo. Para a avaliação geométrica da câmara e da rampa será empregado o método *Constructal Design*. O problema analisado possui três graus de liberdade e duas restrições geométricas. As restrições geométricas do problema são as áreas da câmara hidropneumática e da rampa triangular sob o dispositivo OWC. O primeiro grau de liberdade refere-se às dimensões da câmara hidropneumática (razão entre altura e comprimento da câmara,  $H_1/L_1$ ), o segundo grau de liberdade refere-se à rampa sob a câmara do dispositivo com área constante (razão entre altura e comprimento da rampa,  $H_2/L_2$ ), e por fim, o terceiro grau de liberdade está associado à dimensão do *Lip* a partir do nível da água ( $H_3$ ). Os objetivos principais são obter recomendações teóricas para a geometria da câmara e da rampa que maximizam a potência disponível na chaminé do dispositivo OWC para dois diferentes valores de  $H_3$  ( $H_3 = 2.5$  m e 5.0m) e também comparar a potência obtida para os casos com e sem rampa abaixo do OWC.

As dimensões do domínio definidas aqui são realizadas com referência nas dimensões aplicadas ao dispositivo OWC existente na central da ilha de Pico, em Portugal, e no tipo de onda empregada na costa da região sul do Brasil. As variações sofridas a partir da referência permitem avaliar o grau de influência das variações dimensionais.

Além disso, em todos os casos foi considerado um escoamento incompressível de uma mistura de ar e água em um domínio bidimensional. A mistura de ar e água está sendo abordada com o método Volume of Fluid (Lin et al., 2001; Lv et al., 2011). As equações de conservação foram resolvidas através do Método dos Volumes Finitos (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 1995).

### 1.3.2 Objetivos específicos

No presente estudo se tem os seguintes objetivos específicos:

- verificar a metodologia matemática e numérica aplicada no problema;
- obter uma recomendação teórica sobre a geometria da câmara interna ( $H_1/L_1$ ) que conduza a máxima potência disponível no dispositivo OWC *onshore*;
- obter uma recomendação teórica para estabelecer uma geometria da rampa ( $H_2/L_2$ ) que conduza a máxima potência disponível no dispositivo OWC *onshore*;
- avaliar a influência da geometria da rampa ( $H_2/L_2$ ) sobre a potência uma vez maximizada  $Pot_m$  e sobre geometria ótima da câmara ( $H_1/L_1$ )<sub>o</sub>.
- avaliar a influência de dois diferentes valores de  $H_3$  sobre a potência da turbina duas vezes maximizada  $Pot_{mm}$ ;
- avaliar a influência de dois diferentes valores de  $H_3$  sobre a geometria ótima da rampa uma vez otimizada ( $H_2/L_2$ )<sub>o</sub> e da câmara duas vezes ótima ( $H_1/L_1$ )<sub>oo</sub>.
- avaliar a influência da geometria da câmara ( $H_1/L_1$ ), da rampa ( $H_2/L_2$ ) para dois diferentes valores de  $H_3$  sobre o comportamento fluidodinâmico transiente do escoamento da onda sobre o dispositivo OWC *onshore*;
- comparar as potências máximas obtidas para um dispositivo com rampa abaixo do dispositivo e sem rampa para dois diferentes valores de  $H_3$ ;
- comparar a geometria ótima para a câmara do dispositivo OWC com rampa abaixo do dispositivo e sem rampa para dois diferentes valores de  $H_3$ ;

## **2. FUNDAMENTOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS**

### **2.1 POTENCIAL DE ENERGIA DAS ONDAS**

Há uma forte tendência para que investimentos energéticos ditos mais limpos sejam utilizados para suprir a demanda energética do mundo, dessa forma, são muitas as discussões a respeito de energia elétrica, no âmbito da geração e principalmente do consumo da mesma. Uma das variáveis para definir o grau de desenvolvimento de um país, é a facilidade de acesso da população aos serviços de infraestrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia (ANEEL, 2008).

Estima-se, que em todo o globo, para o ano de 2011, o consumo de energia foi de aproximadamente  $1.6 \times 10^7$  MW, sendo que a principal fonte de energia para suprir essa demanda é de origem fóssil (Zabihian e Fung, 2011).

As necessidades de investimentos em novas formas de obtenção de energia levou o homem a procurar novas fontes potenciais de geração. Com relação ao potencial energético disponível nos oceanos, pesquisas veem sendo realizadas nas últimas décadas revelando significativos valores disponíveis com vantagens aos demais processos já existentes, como por exemplo, baixo impacto social e ambiental. Estima-se que o potencial energético dos mares disponível, principalmente em regiões costeiras, em escala global, esteja em torno de 2TW (Cruz e Sarmiento, 2004), tornando-se um campo fértil para exploração. Consequentemente, o estudo de mecanismos para exploração dessa energia é algo muito importante.

Então, de algumas décadas para cá, os oceanos tornaram-se foco de estudos mais aprofundados sobre suas características e influências geográficas nas várias regiões do globo. Pesquisas começaram a ser desenvolvidas em como transformar esta energia disponível nas correntes, nas marés e até mesmo nas ondas em energia disponível para o consumo. Em todas elas, ou na maioria, a forma escolhida é a energia elétrica (Falcão, 2010). Partindo-se deste princípio, começaram a surgir ideias que resultaram no desenvolvimento de novas tecnologias de obtenção de energia disponível dos oceanos em energia elétrica. Porém, as condições adversas do mar quanto à instalação e manutenção de dispositivos mostraram que a tarefa de converter essa energia abundante em energia elétrica para consumo não seria

simples ou pelo menos similar as tecnologias já existentes como, por exemplo, uma hidroelétrica em uma região continental. Neste exemplo, uma barragem para acúmulo de água de um rio potencial, um gerador apropriado e uma longa linha de transmissão podem apresentar uma melhor viabilidade técnico-econômica.

Também, é consenso que não existe uma forma, tecnologia ou dispositivo que se destaque como adequado para todos os fins e aplicações em todas as regiões (Falcão, 2010). Uma análise da Fig 2.1 em que mostra que nem mesmo o potencial das ondas em KW/m de frente de onda é uniforme em todas as regiões do mundo, apresentando valores mais significativos em regiões mais afastadas do equador, em contra partida, na linha do equador, os fenômenos de marés são os mais intensos. Portanto, acredita-se que deve haver tecnologias e desenvolvimentos de equipamentos mais adequados para cada caso, afim de obter, do fenômeno físico relacionado, a melhor eficiência energética (Zhang et al., 2009).

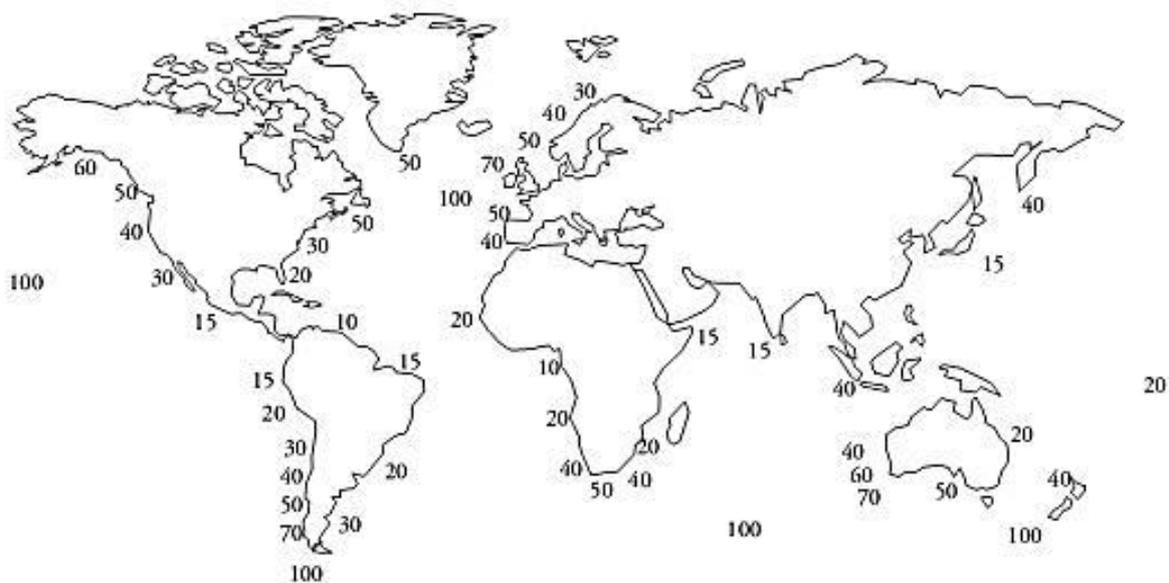


Figura 2.1 – Distribuição global da energia média anual das ondas (Thorpe, 1999).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Quando se refere à energia nos oceanos, a forma de obtenção pode ocorrer de diferentes maneiras.

Cabe ressaltar que, embora o termo oceano dê idéia de mar aberto ou alto mar, regiões costeiras e até mesmo linhas litorâneas de praia ou quebra mar estão contempladas nas

pesquisas. Os equipamentos para obtenção são classificados conforme sua forma construtiva, princípios de funcionamento e aplicação (Paredes, 2008).

No que se refere a localização, a classificação é definida de acordo com a profundidade oceânica em que é aplicado o referido equipamento, podendo ser costeiro próximo ou na linha de praia (*onshore* ou *shoreline*). Próximo a linha de praia ou a algumas dezenas de metros desta, em molhes ou quebra mares (*nearshore*). Equipamentos em zonas muito afastadas da costa, em altas profundidades, sendo sistemas flutuantes (*offshore*) (Cruz e Sarmento, 2004). A classificação de acordo com a localização do dispositivo com relação a costa é melhor ilustrado na Fig. 2.2.

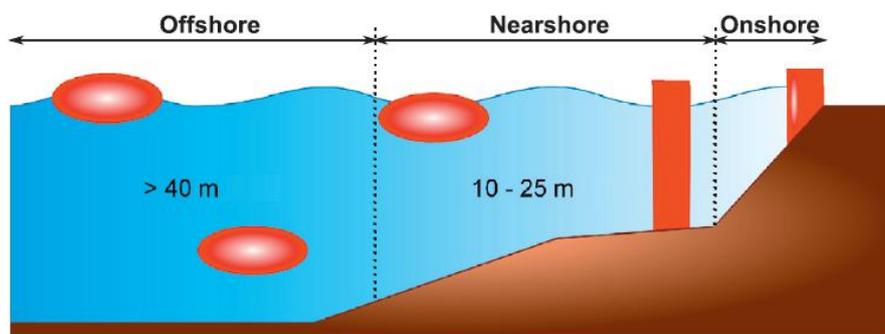


Figura 2.2 – Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López et al., 2013).

Para os equipamentos fixados em linhas costeiras (*onshore*), a obtenção da energia se dá através da ação das ondas ou dos efeitos de marés. Em equipamentos, tanto próximos ou afastados da costa, as formas mais comuns de obtenção de energia são por ação de ondas ou pela ação das correntes marinhas (Paredes, 2008).

Outra classificação possível está associada ao princípio de conversão de energia das ondas em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem fundamentalmente três classes principais de conversores de energia das ondas (Cruz e Sarmento, 2004), que são: *Oscillating Water Column* (OWC); Corpos Flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*); e galgamento. A Fig. 2.3 apresenta a classificação de conversores de energia das ondas conforme princípio de funcionamento.

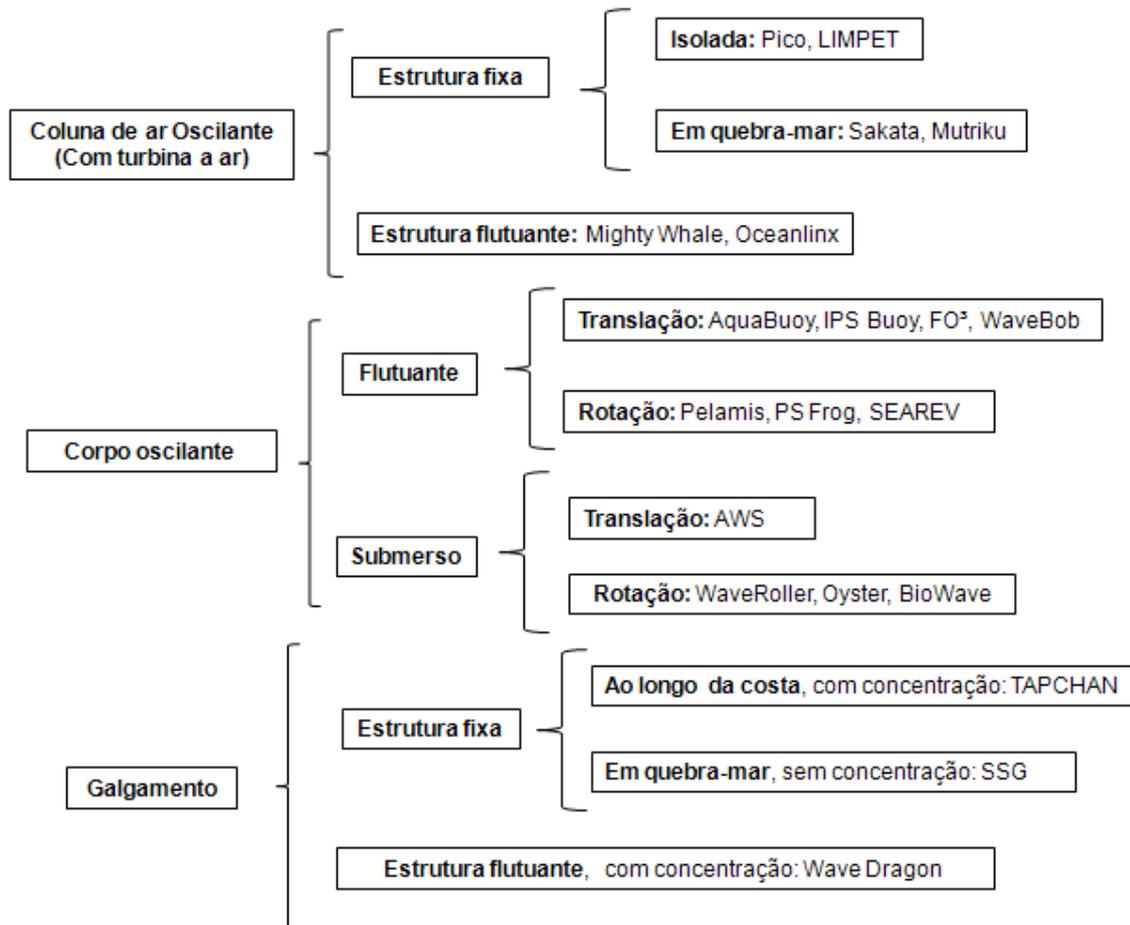


Figura 2.3 – Classificação dos equipamentos (Falcão, 2010)

### 2.2.1 Galgamento

O princípio de funcionamento baseia-se em um dispositivo semi submerso com formato de uma rampa além de uma barragem com reservatório. Este reservatório é constantemente preenchido por ondas com altura suficiente para galgar uma rampa que conduz a água do mar a um reservatório sobre elevado ao nível médio da água. A partir desse reservatório, a água escoar por gravidade para um canal convergente onde se localiza uma turbina de baixa queda e, posteriormente, retorna ao oceano. A energia potencial que a água possui é convertida por um conjunto turbina hidráulica/gerador em energia elétrica (André, 2010).

Alguns protótipos têm sido apresentados na literatura, entre os principais é possível citar o *Sea Wave Slot Cone Generator* (SSG) (Margheritini et al., 2009), *Wave Plane* (López et al., 2013) e *Wave Dragon* (Kofoed et al., 2009). Estes equipamentos podem ser

construídos com estrutura fixa e localização *onshore*, como o dispositivo SSG ilustrado na Fig. 2.4, ou com estrutura flutuante de localização *offshore*, como o dispositivo *Wave Dragon* ilustrado na Fig. 2.5.

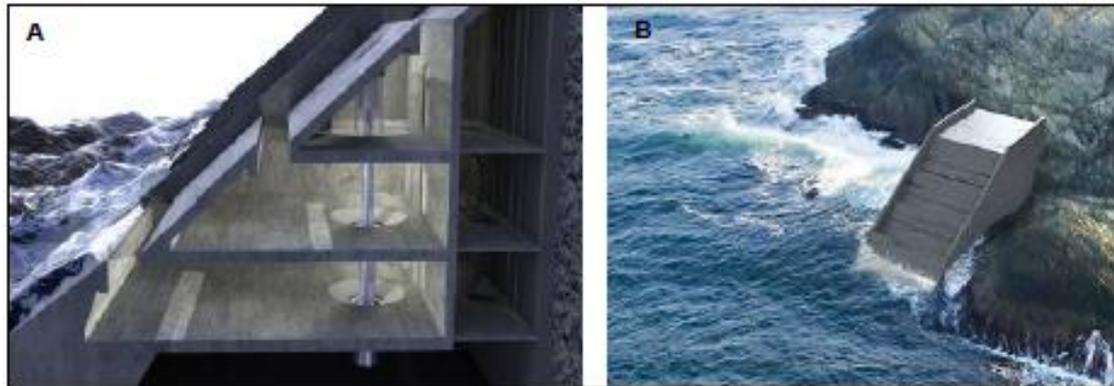


Figura 2.4 – Ilustração de um dispositivo do tipo SSG com estrutura fixa e localização *onshore* (Margheritini et al., 2009).



Figura 2.5 – Ilustração de um dispositivo do tipo *Wave Dragon* com estrutura flutuante e localização *offshore* (Kofoed et al., 2006).

### 2.2.2 Corpo Oscilante

Existe uma grande variedade de sistemas regidos por este princípio de funcionamento. O projeto básico destes equipamentos envolve um corpo flutuante (Fig. 2.6) ou totalmente submerso em que as características hidrodinâmicas e de massa são definidas para o corpo de modo a entrar em ressonância com as ondas, sendo que a sua capacidade de extração de energia depende da sua dimensão. Alguns sistemas exploram os regimes de maior

densidade energética localizados mais longe da costa. Estes dispositivos acarretam um desafio tecnológico mais elevado. O seu desenvolvimento enfrenta obstáculos como o acesso à manutenção dos dispositivos, transferência para terra da energia elétrica produzida e sistemas de amarração (André, 2010; Falcão, 2010; Bahaj, 2011).



Figura 2.6 – Pelamis (Bahaj., 2011)

### 2.2.3 Coluna de Água Oscilante (OWC)

Este equipamento é apresentado sob forma de uma estrutura parcialmente submersa contendo uma câmara interna com abertura abaixo da linha da água. É possível encontrar aplicações deste equipamento em regiões costeiras acidentadas (*onshore*) ou afastadas das linhas costeiras (*nearshore*). Em ambos os casos, seus princípios e suas formas construtivas se assemelham, porém, diferem na complexidade. Para o primeiro caso, sua estrutura é fixa a massa continental. Para aplicação *nearshore*, sua estrutura é flutuante e a forma de transmissão de energia se dá quase sempre por cabos submersos. Estes cabos são, invariavelmente, de custo elevado e limitam o alcance do equipamento (Falcão, 2010).

O mecanismo OWC pode ser representado por três componentes principais: câmara, turbina e gerador (Conde e Gato, 2008).

A câmara propriamente dita, sendo a parte visível externa e também o suporte para os demais componentes. Com relação as suas dimensões, as mesmas estão apropriadamente dimensionadas para o tipo de onda local (Conde e Gato, 2008).

A chaminé conduz o fluxo de ar para o conjunto turbina/gerador de energia elétrica. Este conjunto está posicionado no interior da chaminé e permite, pela forma

construtiva de suas pás, manter o mesmo sentido de rotação, independente do sentido de escoamento para obter energia do fluxo bidirecional de ar que atravessa a mesma. A Fig. 2.7 apresenta uma esquematização do princípio de funcionamento deste dispositivo. Quando a onda incidente atinge o equipamento, ocorre um aumento da superfície livre e aumento de pressão na câmara (fig. 2.7-a) e no ciclo de descida da superfície livre na câmara há uma diminuição de pressão na câmara e o sentido do escoamento de ar na turbina se inverte (fig 2.7-b).

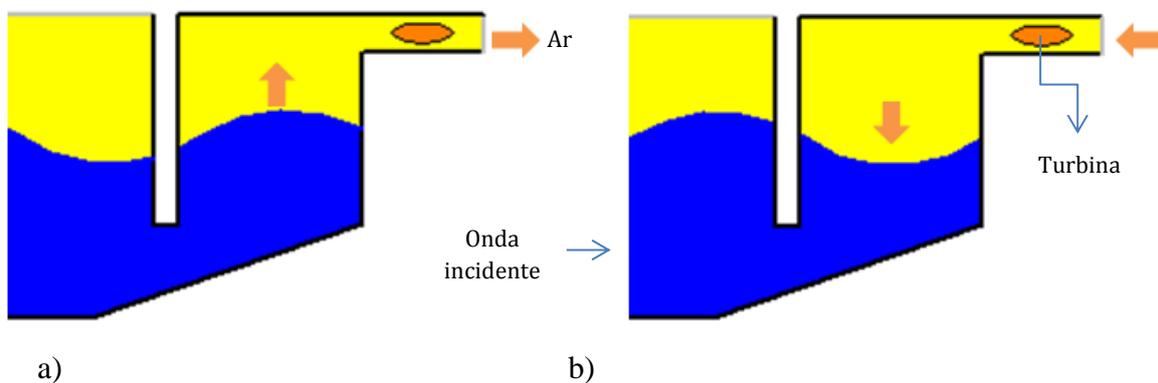


Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um sistema OWC, a) aumento de pressão da câmara, b) diminuição da pressão da câmara

A Central Piloto Européia da Ilha do Pico, Fig. 2.8, está localizada na ilha do Pico em Açores, Portugal, e tem capacidade instalada de 400kW de potência. Foi construída entre 1995 e 1999 por uma equipe européia coordenada pelo Instituto Superior Técnico (IST), de Portugal, e obteve a colaboração de duas universidades estrangeiras: *Queen's University of Belfast*, do Reino Unido e *University College Cork*, da Irlanda (Sarmiento et al., 2003).

A central está equipada com uma turbina *Wells*, com velocidade de rotação variável, acoplada diretamente a um gerador para a produção de eletricidade e duas válvulas - uma válvula de guilhotina, localizada na entrada que liga a câmara ao exterior, cuja finalidade é isolar a turbina durante os períodos de parada; e uma válvula de alívio de atuação rápida, que tem por finalidade controlar o valor máximo da pressão no interior da câmara (Falcão, 2000).



Figura 2.8 – Central da ilha de Pico - Portugal (Cruz e Sarmiento, 2004)

Outro projeto de dispositivo *OWC* que merece destaque é a Central do Limpet na ilha de Islay (Escócia), apresentada na Fig. 2.9. Construída no período de 1998 a 2000, em Islay, foi idealizada a partir de um protótipo de 75 kW que já funcionava na ilha. Limpet é a primeira central a ser explorada comercialmente no mundo. Tem capacidade de 500 kW e fornece energia elétrica a quatrocentas famílias da região. Depois de realizado um levantamento das potencialidades locais, identificou-se a costa norte da Escócia, a costa ocidental de algumas das ilhas escocesas, juntamente com a costa norte da Cornualha e Devon como as áreas mais promissoras para a instalação de uma central de energia das ondas (Wavegen, 2002). A câmara pneumática é composta por três compartimentos, com dimensões 6 m x 6 m cada, e 40° de inclinação na parede frontal. Conta com dois conjuntos, gerador - turbina Wells, com capacidade de 250 kW cada. (Heath, 2001).



Figura 2.9 Projeto da câmara *OWC* do Limpet (Wavegen, 2011) .

## 2.3 TEORIA DAS ONDAS

### 2.3.1 A formação das ondas

O ar próximo das superfícies de menor capacidade calorífica se aquece e expande com maior rapidez, de forma contrária ao que acontece com o que está próximo das superfícies em resfriamento, ou do que está próximo das superfícies de maior capacidade calorífica. Formam-se, assim, zonas de baixas e de altas pressões, forçando o ar a se movimentar de umas às outras para compensar diferenças ou desequilíbrios de pressão. Esse movimento ocorre das zonas de altas pressões para as zonas de baixas pressões, ao nível do solo, ocorrendo o movimento contrário nas camadas mais altas da atmosfera. Esse movimento é o vento (Oliveira, 2012).

A influência dos ventos sobre os oceanos permite com que a energia dos ventos seja transmitida para a superfície da água formando as ondas. Segundo Oliveira (2012), os mecanismos de transferência de energia do vento para as ondas são complexos. O ar que escoa sobre a superfície do mar transfere energia através da atuação das tensões cisalhantes, resultando na formação e crescimento das ondas. O escoamento turbulento do ar, próximo à superfície livre, gera uma intensa variação das tensões cisalhantes e do campo de pressões. Se estas oscilações entram em fase com as ondas já existentes ocorre uma intensificação no processo de geração das ondas e quando as ondas atingem um determinado tamanho, o vento pode exercer uma ação mais intensa na sua face, acarretando um crescimento ainda maior.

O enrugamento da superfície do mar é originado pelas flutuações da pressão e das tensões tangenciais devidas ao caráter turbulento do vento. A consequência deste enrugamento é um maior atrito do vento, aumentando a transferência de energia entre vento e superfície de água, intensificando o potencial da onda (Oliveira, 2012).

No que se refere as ondas do mar, estas podem ser classificadas por diversos critérios, como por exemplo, com o período ou frequência, com as forças perturbadoras e com as forças restauradoras. As ondas de menor período têm como principal força perturbadora o vento, que atua na interface atmosfera/oceano. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano, resultando no movimento irregular da superfície do oceano, que é denominado por agitação marítima. Nesse processo, a gravidade atua como força restauradora, para recuperar a condição de equilíbrio. Em contra partida, as ondas de maior período têm como principais

forças perturbadoras os sistemas de tempestades e tsumamis, bem como o movimento da terra na órbita do sol e o movimento da lua na órbita da terra. A força de *Coriolis* age como força restauradora primária (Bryant, 2001).

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas geradas pelo vento dependem não só da intensidade do vento, mas da dimensão da zona onde esse atua, que se designa por *fetch* ou comprimento de geração. Em cada uma destas etapas ocorre concentração de energia de modo que níveis de potência solar da ordem de 100W/m podem eventualmente se transformar em ondas com níveis de potência acima de 1000W/m (Thorpe, 1999).

As ondas que se propagam na interface água-ar, devido à influência do campo gravitacional, são denominadas ondas de gravidade. Na interface água-ar há também a possibilidade de surgirem ondas de tensão superficial. No entanto, efeitos de tensão superficial são totalmente desprezíveis para as ondas marítimas, pois eles somente se fazem sentir na velocidade de propagação das ondas na água se o comprimento de onda for inferior a centímetro (Silveira e Varriale, 2004).

Com a variação do vento na zona de geração das ondas, a superfície do mar apresenta-se bastante irregular, sendo composta por ondas de diferentes comprimentos e direções. A agitação gerada, dessa forma, denomina-se vaga (*windsea*). As ondas que se propagam para fora da zona de geração recebem a denominação genérica de ondulação (*swell*) (Gonçalves, 2003).

De uma forma geral, as teorias de ondas são descritas relacionando-se três parâmetros básicos: a altura de onda  $H$ , o comprimento de onda  $\lambda$  e a profundidade  $h$  da lâmina d'água. Os demais parâmetros, como os campos de pressão, de velocidades e de acelerações das partículas do fluido são obtidos analiticamente em função destas quantidades básicas, fazendo-se uso das teorias disponíveis na literatura. Na abordagem do problema em questão, emprega-se a teoria linear de Airy (Dean e Dalrymple, 1991).

Para este trabalho, foram adotados parâmetros pré estabelecidos baseados nas características de ondas da região sul do estado do Rio Grande do Sul que são comprimento de onda  $\lambda = 65.4$  m e um período de ondas  $T = 7.5$  s. Considera-se, também, uma altura de onda  $H$  de 1 m e profundidade de lâmina de água  $h$  de 10m. A Figura 2.10 mostra a frequência de ação para o referido período.

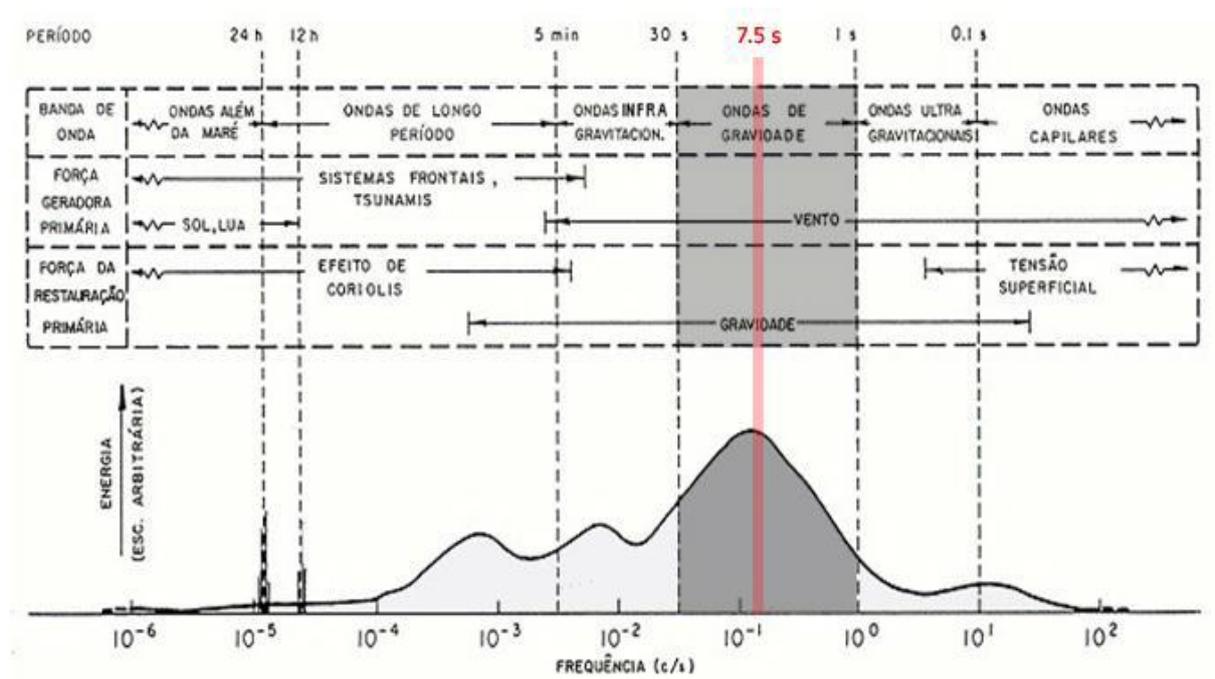


Figura 2.10 – Distribuição aproximada da energia superficial e classificação de ondas oceânicas (Oliveira, 2012).

Os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares. Essa classificação também é conhecida como ondas determinísticas e aleatórias. A teoria de ondas regulares admite ondas com comportamento bem definido e constante em cada período de tempo ou espaço, diferentemente do que ocorre com as ondas irregulares. Nesses modelos, as ondas são formadas pela soma de pequenas ondas regulares com altura e período diferentes. Entre os modelos existentes, os de ondas irregulares são os que melhor representam o real estado do mar nos ambientes oceânicos (Gomes, 2010). Porém, ao longo deste trabalho utilizam-se as ondas regulares para o estudo numérico com a finalidade de determinar a melhor forma geométrica da câmara de um dispositivo de OWC. Na Figura 2.11, é possível observar as principais características das ondas regulares bem como os elementos básicos de uma onda oceânica.

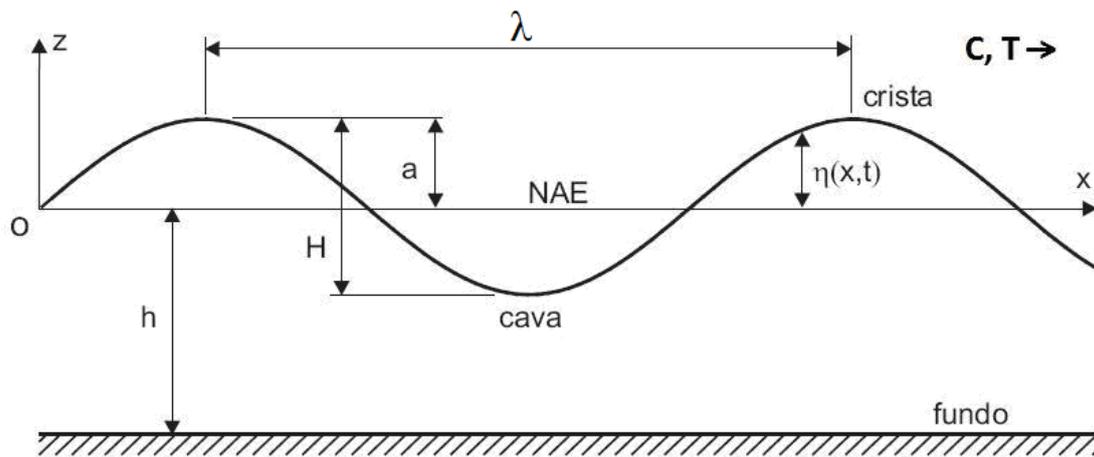


Figura 2.11 – Elementos da Onda (Carneiro, 2007).

A seguir, apresenta-se a descrição dos componentes da onda descrita na Fig 2.11, conforme o modelo para descrição do comportamento de onda teórica regular

- NAE: Nível de água estático (ou nível médio).
- Crista: é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água.
- Cava: é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o plano do nível médio da água.
- Profundidade ( $h$ ): é à distância do fundo do mar até o nível médio da água (superfície livre).
- Período ( $T$ ): é o tempo de uma oscilação completa, ou ainda, o tempo necessário para que um ponto qualquer da onda percorra uma distância igual ao comprimento de onda.
- Frequência ( $\sigma$ ): é o número de oscilações que ocorrem na unidade de tempo.

- Amplitude ( $a$ ): é a distância entre a crista e a superfície livre (nível da água) ou a distância entre a cava e a superfície livre da água.
- Comprimento de Onda ( $\lambda$ ): é a distância entre duas cristas consecutivas ou duas cavas consecutivas.
- Celeridade ( $C$ ): representa a velocidade de propagação da onda.
- Altura ( $H$ ): é a distância entre as cristas e as cavas sucessivas.
- Elevação da Superfície Livre ( $\eta$ ): representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água.

Algumas teorias de ondas foram desenvolvidas, as quais podem ser aplicadas para diferentes casos, levando-se em consideração as condições ambientais. Os principais aspectos que devem ser levados em consideração para a determinação da teoria a ser aplicada são a altura de onda  $H$ , o comprimento da onda  $\lambda$  e a profundidade da água  $h$ . Esses fatores são comumente compostos nos seguintes parâmetros adimensionais:

$$\text{Declividade} \left( \frac{H}{\lambda} \right)$$

$$\text{Profundidade relativa} \left( \frac{h}{\lambda} \right)$$

$$\text{Altura de onda relativa} \left( \frac{H}{h} \right)$$

$$\text{Número de Ursell} \quad U_R = \left( \frac{\lambda^2 H}{h^3} \right)$$

A teoria de ondas mais simples é a teoria linear de ondas, também conhecida como teoria de Airy. Essa teoria é mais indicada quando a declividade, a profundidade

relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades.

Segundo Gomes (2010), teorias não lineares resultam em uma representação mais próxima das ondas reais, possibilitando a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas.

A teoria de Stokes se aplica para alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas. A partir da teoria de segunda ordem aparecem componentes super-harmônicas, isto é, componentes de frequências mais altas em 2, 3,...  $n$  vezes a frequência fundamental, o que acarreta em cristas mais altas e cavas mais achatadas. Outro fenômeno que aparece é o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que a solução não apresenta mais o caminho das partículas como uma órbita fechada (Carneiro, 2007).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), as abordagens de teoria de ondas são Airy, Stokes, Cnoidal e Solitária. A forma da superfície livre da onda para cada uma dessas teorias é ilustrada na Fig. 2.12.

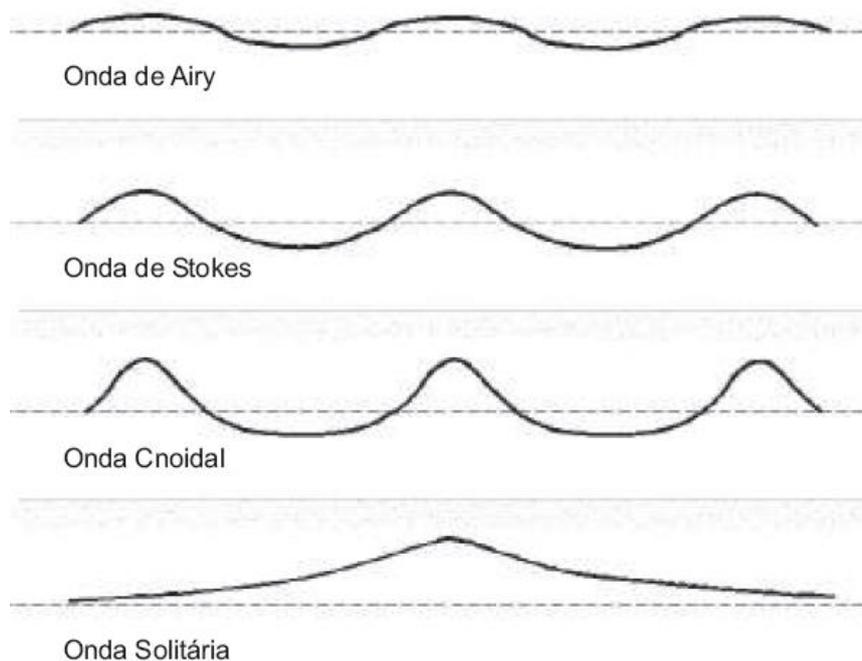


Figura 2.12 – Teoria das ondas (Carneiro, 2007).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), a solução de Stokes é válida quando  $k.h < 1$  e  $H/\lambda \leq 1$ , sendo  $k = 2\pi/\lambda$  o número de onda. Em termos do número de Ursell o limite de aplicação é  $U_R < 26$ . Quanto à profundidade,  $h/\lambda > 0,5$  caracteriza águas profundas.

Na Fig. 2.13 é possível comparar o formato dos tipos de ondas de gravidade, conforme número de Ursell. Conhecendo-se os parâmetros  $h$ ,  $H$ ,  $T$  e  $g$  (gravidade) e com a ajuda do gráfico apresentado na Fig. 2.10 pode-se selecionar qual teoria de ondas é a mais recomendada. Nos trabalhos de âmbito numérico, as equações dos campos de velocidades definidas por cada teoria de ondas são empregadas como condições de contorno nos tanques numéricos para simular o efeito de um gerador de ondas, simulando o efeito do escoamento no mar.

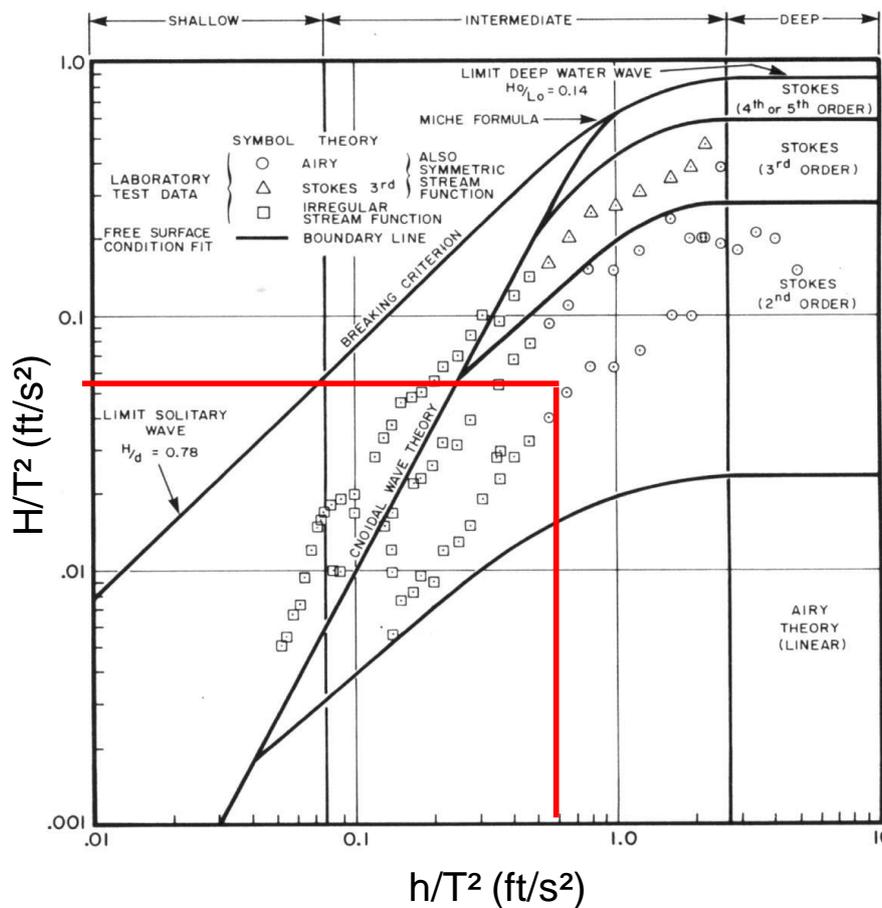


Figura 2.13 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Chakrabarti, 2005).

Considerando as características da onda empregada nesse trabalho ( $T = 7.5$  s,  $H = 1.0$  m,  $\lambda = 65.4$  m e  $h = 10.0$  m) a mesma possui uma melhor descrição através da Teoria de Stokes de 2ª ordem. Contudo, de acordo com Chakrabarti (2005) nesta faixa de aplicação existem resultados experimentais que demonstram que a consideração da teoria linear não causa prejuízos na caracterização dos campos de velocidade e na fenomenologia do escoamento. Em função disso e também pela maior simplicidade de aplicação e facilidade de

convergência neste estudo considerou-se a teoria linear para definir a onda empregada nas presentes simulações.

## 2.4 TEORIA LINEAR

No presente estudo, empregou-se a teoria de ondas de pequena amplitude, também denominada teoria de Airy. Esta teoria se baseia na hipótese de que a altura da onda é pequena em relação ao seu comprimento e à profundidade da lâmina d'água. Com isto, as condições de contorno da superfície livre podem ser linearizadas e satisfeitas na superfície média ao invés de na superfície livre.

Esta teoria fornece equações que são teoricamente exatas quando os movimentos de onda são iguais a zero, porém esta solução é assumida como sendo válida para movimentos de onda diferentes de zero. A teoria linear de Airy é aplicável para situações onde  $H/h \ll 1$ ,  $(H/L)(L/h)^3 \ll 1$  e  $h/L > 0.5$  (Dean e Dalrymple, 1991).

A teoria linear das ondas pode ser aplicada a um conjunto muito particular de ondas que não existem na natureza, porém este modelo é útil para a compreensão de muitos fenômenos e na solução de um grande número de problemas reais (Carneiro, 2007).

Na abordagem da teoria linear das ondas podem-se realizar as seguintes simplificações: fluido incompressível, portanto a massa específica da água será considerada constante; altura da onda considerada pequena quando comparada ao seu comprimento e com a profundidade da água; profundidade da água constante; desconsideração dos efeitos da turbulência, viscosidade e tensão superficial; escoamento bidimensional e irrotacional (vorticidade nula).

Neste trabalho serão apresentadas as equações que modelam o problema de conformidade com Holthuijsen (2007), Gomes (2010), Dos Santos et al. (2014) e Goulart (2014), sendo a equação da continuidade:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.3)$$

Substituindo a Eq. (2.2) e a Eq. (2.3) na Eq. (2.1), podemos representá-la pela equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

onde  $u_x$  e  $u_z$  representam a velocidade nas direções  $x$  e  $z$ , respectivamente;  $\phi$  o potencial de velocidade;  $x$  e  $z$  as coordenadas do plano cartesiano.

Na Equação (2.4) as seguintes condições de contorno são assumidas:

Condição de contorno cinemática na superfície de fundo, considerando-a rígida e impermeável:

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

Condição de contorno cinemática na superfície livre:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \text{ em } z = 0 \quad (2.6)$$

Condição de contorno dinâmica na superfície livre:

$$p = 0, \text{ em } z = 0 \quad (2.7)$$

onde  $p$  representa a pressão na superfície da água. A equação de Bernoulli na superfície livre onde  $z = \eta$  é dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0, \text{ em } z = 0 \quad (2.8)$$

onde  $g$  representa a aceleração da gravidade.

Segundo Massel (1999), a solução da Eq. (2.4) é dada por:

$$\phi(x, z, t) = \frac{H}{2} \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.9)$$

onde  $k$  representa o número de onda e é dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.10)$$

e  $\sigma$  representa a frequência da onda que pode ser calculada por:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.11)$$

A partir das Eqs. (2.8) e (2.9) é obtida a equação da elevação da superfície do mar:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.12)$$

E a partir das Eqs. (2.6), (2.9) e (2.12) a seguinte equação é obtida:

$$\tanh kh = \frac{\sigma^2}{gk} \quad (2.13)$$

Então, substituindo as Eqs. (2.10) e (2.11) na Eq. (2.13), obtém-se:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (2.14)$$

Para águas profundas ( $\lambda < 2h$ ),  $kh$  é grande e  $\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) = 1$ . Assim, é possível calcular o comprimento de onda por:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.15)$$

Esta teoria, apesar de válida em alguns casos, quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades não é a que conduz aos melhores resultados em uma comparação com medições experimentais do comportamento das ondas (Carneiro, 2007). Contudo, há situações dentro da região predita pela teoria de Stokes de 2ª ordem onde medições experimentais mostram que a teoria linear é adequada para a caracterização dos campos de velocidades (Chakrabarti, 2005).

Os componentes de velocidade na direção de propagação de onda ( $x$ ) e na direção vertical ( $z$ ) para o canal de entrada são baseados na teoria linear de Airy e são dadas respectivamente por Chakrabarti (2005).

### 3. FUNDAMENTOS DE TEORIA CONSTRUCTAL

A *Teoria Constructal* foi desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan, 1997;). De uma forma ampla, explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo contínuo que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados entre outros) pode ser fundamentada através de um princípio do acesso aos fluxos no decorrer do tempo. O princípio físico que conduz a formação determinística da forma e estrutura em sistemas de fluxo é denominado de Teoria Constructal, que afirma que para um determinado sistema persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através deste sistema (Bejan e Lorente, 2008).

Dessa forma, com a *Lei Constructal* um sistema vivo possui duas características universais: ele flui (é um sistema em desequilíbrio termodinâmico), e se transforma livremente para configurações que permitem que todas as suas correntes escoem mais facilmente ao longo do tempo. A vida e a evolução são fenômenos físicos e pertencem à física (Bejan, 1997; Basak, 2011).

Sendo assim, o campo da *Lei Constructal* iniciou-se a partir da constatação de que o "*Design*" é um fenômeno físico universal. Ela une o animado com o inanimado através de uma ampla gama de escalas, do *design* em árvore, dos flocos de neve ao *design* animal e o *design* em árvore da bacia do rio Amazonas (Bejan e Lorente, 2013).

Os sistemas em geral são similares, isso é possível verificar através do desenho (empregando a *Lei Constructal*). A aplicação da *Lei Constructal* nos permite obter o conhecimento através da evolução, direção, propósito e desenho. A direção da evolução é a facilidade do fluxo, o desenho que observamos na natureza, forma e estrutura dos rios, animais, cidades e etc., é a manifestação da tendência da natureza em gerar forma e estrutura para facilitar o acesso e escoamento do fluxo, de forma contínua. A *Lei Constructal* identifica o fenômeno tão antigo quanto o próprio universo, mas não é reconhecido até agora. A partir desta observação, podemos descrever e também prever a evolução de todos os conjuntos e sistemas de fluxo. A *Lei Constructal* mostra qual é a tendência da natureza e com isso permite obter uma melhor condição de fluxo. Usando essa lei podemos projetar processos de forma orgânica e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados. (Bejan e Zane, 2012).

Portanto, a teoria Constructal mostra que a natureza da forma redonda dos tubos, das seções transversais de rios e a forma como as veias se distribuem para atingir o

pulmão, são determinadas por um princípio, isto é, existe uma direção para onde os sistemas abertos caminham, sempre com o objetivo de melhorar seu desempenho e eficiência. Nos sistemas complexos, é observado que o escoamento de ponto para volume, ou vice-versa, assume a forma de árvore, por isso esse tipo de *design* é comumente encontrado em vários sistemas animados ou inanimados na natureza (árvores, bacias de rios, animais, pulmões entre outros) (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012).

### 3.1 O CONSTRUCTAL DESIGN

O *Constructal Design* é um método empregado para a obtenção de formas geométricas ótimas de sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo aplicado. Para isto, neste método, o fluxo é maleável e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho de todas as variáveis analisadas. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000). Para aplicar *Constructal Design* na otimização geométrica de um sistema físico é necessário, basicamente, determinar um objetivo final (uma grandeza a ser otimizada: vazão mássica, potência, energia e etc.), graus de liberdade (parâmetros geométricos que sofrerão variações durante o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização) (Bejan, 2000). Destaca-se, a seguir, algumas das diversas aplicações que tem sido estudadas com o uso do *Constructal Design*.

Bello-Ochende et. al (2007) desenvolveram um trabalho de otimização tridimensional utilizando a *Teoria Constructal* em micro canais de um dissipador de calor com objetivo de obter uma melhor eficiência do mesmo. O grau de liberdade escolhido foi a seção transversal do micro canal e as soluções foram obtidas através de abordagem numérica.

Lorenzini e Rocha (2009) realizaram um trabalho numérico para obter a melhor geometria de montagem de aletas T-Y para um sistema de dissipação de calor. Através do *Constructal Design*, a forma da aleta sofreu variações em graus de liberdade pré-estabelecidos.

Kim et. al. (2010) apresentaram um estudo sobre um trocador de calor tubular com convecção natural e forçada, com tubos em disposição vertical. Neste a variação da quantidade de tubos e também o diâmetro dos tubos sofre variação a fim de obter a condição mais próxima da ideal.

Bejan e Lorente (2005) apresentaram uma análise dos progressos recentes no *Design Constructal* feito em duas principais áreas: estruturas de fluxo de multi escala, e design multi objetivo. A direção da evolução do *design* é associada com a maximização da taxa de transferência de calor em um volume fixo no limite de diminuir escalas de comprimento.

Letzow et. al. (2011) apresentaram um estudo numérico sobre a otimização de um geometria semelhante à encontrada em quadros de motor eléctrico conforme Fig. 3.1, por meio de Projeto Constructal. As aletas que formam o motor sofrem variação de espessura e comprimento para determinar a melhor forma de dissipação do calor gerado internamente no motor.

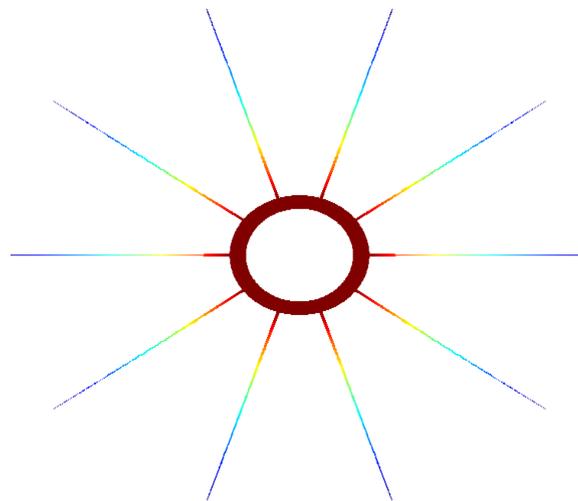


Figura 3.1 – Aletas de motor eléctrico (Letzow et. al., 2011)

Lorenzini et al. (2013) investigou a influência do fluxo de transferência de calor por convecção de uma cavidade em forma de T inserida em uma superfície condutora sólida por meio da *Teoria Constructal*. A cavidade é arrefecida por convecção constante enquanto o sólido gera calor uniformemente. O fluxo de calor por convecção é imposto como condição de contorno das superfícies da cavidade e a otimização geométrica é conseguida por variação de parâmetros geométricos da cavidade. O estudo objetivou minimizar o excesso de temperatura máxima adimensional entre o sólido e a cavidade. A geometria da cavidade em forma de T se adapta para a variação do fluxo de calor de convecção aplicada para o

superfícies da cavidade, ou seja, o sistema flui e se transforma com as condições impostas para que suas correntes possam fluir mais facilmente.

### 3.2 O CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO EM DISPOSITIVOS DE OBTENÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO OWC

As fontes de energia alternativa de origem oceânica estão sujeitas a avaliações de capacidade e desempenho, sendo, portanto, aptas a aplicação do *Constructal Design* para determinar, sob condições específicas de local, intensidade e incidência de ondas, sua melhor condição geométrica e construtiva.

Utilizando-se o *Constructal Design* com a modelagem computacional, é possível avaliar a influência da geometria no princípio de funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. O objetivo, de uma forma geral, tem sido maximizar (racionalizar) a vazão útil disponível nos dispositivos (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Dos Santos et al., 2013).

Apresenta-se, aqui, alguns estudos já realizados, associando a utilização do *Constructal Design* com o estudo da forma geométrica de um dispositivo para obtenção de energia das ondas realizado recentemente.

Lopes et al. (2012) aplicou *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo OWC, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé e o comprimento da câmara OWC. Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório e tanto o comprimento da câmara OWC quanto à altura da câmara foram mantidos constantes, enquanto que o diâmetro de saída da chaminé foi variado. O principal objetivo foi maximizar o fluxo de massa de ar na chaminé de saída do dispositivo OWC.

Gomes et al. (2012a) realizou um estudo numérico bidimensional sobre otimização geométrica, utilizando *Constructal Design*, de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo OWC *offshore* em um domínio bidimensional, onde a razão entre a altura e comprimento da câmara do OWC foi variada e a razão entre a altura e o diâmetro da chaminé foi mantido constante.

Em Dos Santos et al. (2013), baseado nos estudos de Gomes (2010) e Lopes (2012) foi empregado *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo OWC, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé ( $l$ ) e o comprimento da câmara OWC ( $L$ ). Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório e tanto o comprimento da câmara OWC ( $L$ ) quanto à altura da câmara ( $H_1$ ) foram mantidos constantes, enquanto que o diâmetro de saída da chaminé ( $l$ ) foi variado, possibilitando a variação do grau de liberdade  $l/L$ . O objetivo foi maximizar o fluxo de massa de ar na chaminé de saída do dispositivo OWC. O resultado principal indica que a razão ótima foi obtida para  $(l/L)_o = 0.6$ .

Grimmler (2013) em seu trabalho analisou numericamente o princípio de funcionamento do dispositivo de OWC. O objetivo de seu estudo foi investigar a influência de diferentes formas geométricas da câmara sobre a vazão mássica de ar que passava pela turbina. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D e 3D. Um modelo computacional desenvolvido nos softwares GAMBIT e FLUENT foi utilizado, em que o conversor OWC foi acoplado a um tanque de ondas. O método *Volume of Fluid* (VOF) e a teoria de 2ª ordem Stokes foram utilizados para gerar ondas regulares, permitindo uma interação mais realista entre água, ar e OWC. O Método dos Volumes Finitos (MVF) foi utilizado para a discretização das equações governantes. A função objetivo foi a maximização da vazão mássica de ar que passa através da chaminé do dispositivo OWC, analisado através do método mínimos quadrados, do inglês *Root Mean Square* (RMS). Os resultados indicaram que a forma geométrica da câmara influencia na transformação da energia das ondas em energia elétrica. As geometrias das câmaras analisadas que apresentaram maior área da face de incidência das ondas (sendo altura constante), apresentaram também maior desempenho do conversor OWC. A melhor geometria, entre os casos desse estudo, ofereceu um ganho no desempenho do dispositivo em torno de 30% em comparação com o dispositivo com pior desempenho.

Levien e Pons (2014) apresentaram uma avaliação preliminar do desempenho de um dispositivo *onshore* de conversão de energia das ondas dos oceanos do tipo OWC. O dispositivo é submetido à atuação de uma onda com altura  $H = 1.0$  m, período  $T = 7.5$  s e comprimento de onda igual a  $\lambda = 65.4$  m que é propagada ao longo de um canal de profundidade de  $d = 10$  m com a presença do dispositivo OWC no final deste canal, sendo o comprimento total deste canal numérico de 327 m. A metodologia *Constructal Design* foi aplicada a fim de determinarem-se as dimensões ótimas de comprimento e de altura da

câmara hidropneumática do equipamento. Para tal, impõe-se uma restrição geométrica que fixa o valor da área da câmara em um valor constante. Os objetivos do trabalho foram avaliar a geometria  $H_1/L_1$  que maximiza a potência do dispositivo para uma condição específica de onda e avaliar a influência do comprimento da borda frontal.

## 4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a construção do domínio computacional, foi empregado o software GAMBIT. A solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi realizada com um código CFD baseado no MVF, FLUENT (FLUENT, 2007). No que diz respeito a geração da onda, a mesma será realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido e caracterizado pela teoria linear de ondas, que no software FLUENT é realizado pelo emprego de uma Função Definida pelo Usuário (UDF – do inglês: *User Defined Function*). Esta metodologia foi empregada anteriormente nos trabalhos de Gomes (2010), Machado (2012), Dos Santos et al. (2013), Dos Santos et al. (2014) e Goulart (2014). Para a abordagem adequada da interação entre ar, água e dispositivo será empregado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), semelhante ao utilizado por Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b) e Iahnke (2010).

### 4.1 CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO AO DISPOSITIVO DE OWC

O problema físico analisado consiste de um dispositivo OWC bidimensional colocado em um tanque de ondas, conforme representado na Fig. 4.1. A terceira dimensão  $W$  é perpendicular ao plano da figura. O movimento da onda é gerado pela imposição de um campo de velocidades na superfície esquerda do tanque. O objetivo da análise é a determinação da geometria ideal da câmara ( $H_1/L_1$ ) associada à rampa ( $H_2/L_2$ ) localizada ao fundo da câmara que conduza a máxima potência disponível no dispositivo OWC *Onshore*. Também, é considerada variação de dois valores de lip ( $H_3$ ) e determinado sua influência no dispositivo OWC. Os graus de liberdade  $H_1/L_1$  e  $H_2/L_2$  são otimizados para um escoamento com uma profundidade  $d = 10.0$  m e comprimento total do tanque  $L = 327.0$  m, e para uma onda com comprimento de onda de  $\lambda = 65.4$  m (profundidade relativa de  $h/\lambda = 0.15$ ) e período  $T = 7.5$  s. Para a área da câmara, será considerada uma área fixa de  $A_1 = 80.0$  m<sup>2</sup>, e para a rampa, será considerada uma área fixa de  $A_2 = 40.0$  m<sup>2</sup>. Em todos os casos, a dimensão do canal que contem a turbina será  $d_c = 0,6$  m.

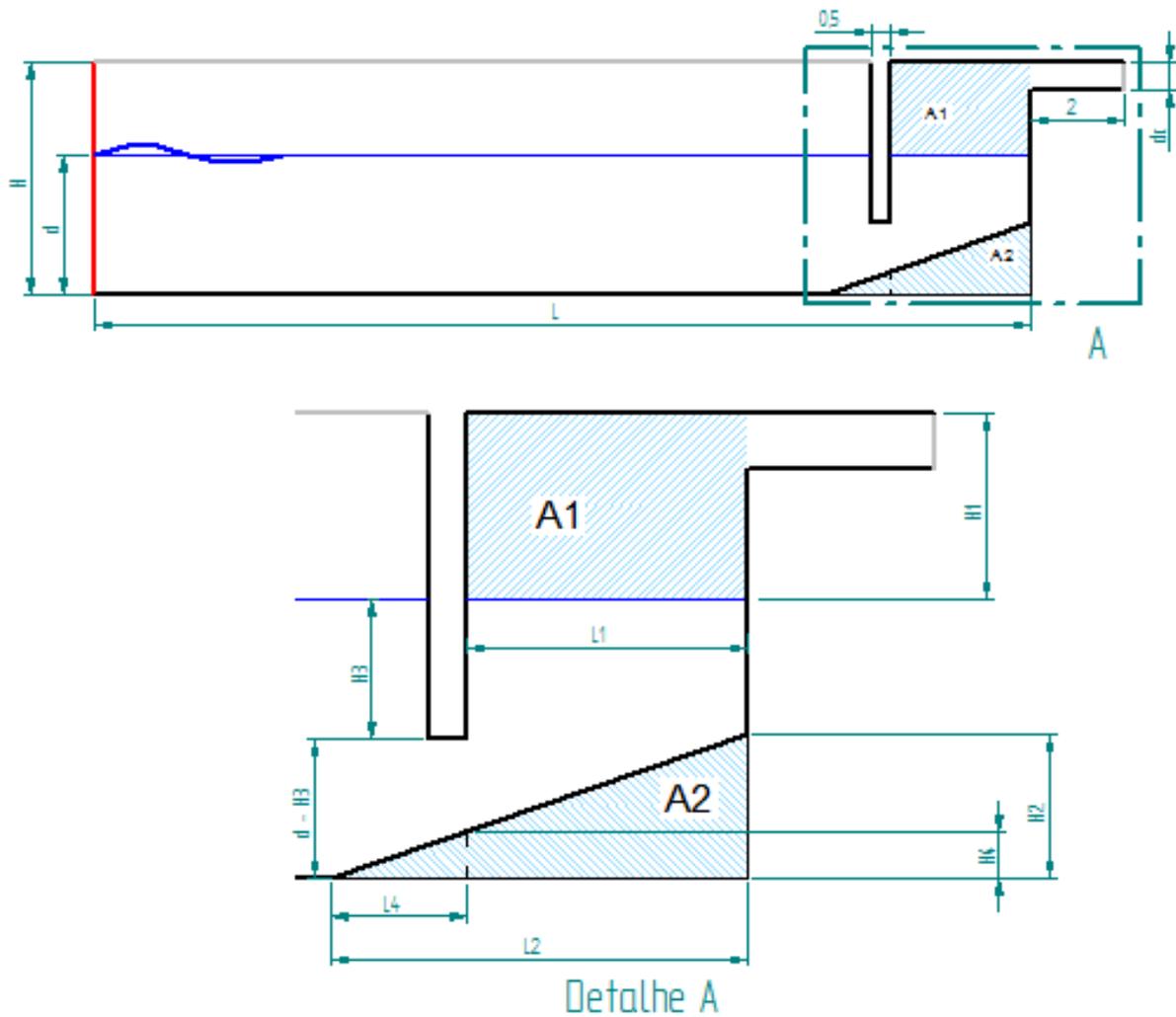


Figura 4.1 – Domínio computacional de um dispositivo OWC em escala real com três graus de liberdades.

No âmbito do *Constructal Design*, a otimização do problema estudado está sujeita a duas restrições, ou seja, a área total da câmara do dispositivo OWC

$$A_1 = H_1 L_1 \quad (4.1)$$

e a área da rampa sob o dispositivo OWC

$$A_2 = \frac{H_2 L_2}{2} \quad (4.2)$$

reescrevendo a equação (4.1)

$$\frac{H_1}{A_1^{1/2}} \frac{L_1}{A_1^{1/2}} = \frac{A_1}{A_1} \quad (4.3)$$

Adimensionalizando a equação (4.3)

$$\tilde{H}_1 \tilde{L}_1 = 1 \quad (4.4)$$

onde

$$\tilde{H}_1 = \frac{H_1}{A_1^{1/2}} \quad (4.5)$$

$$\tilde{L}_1 = \frac{L_1}{A_1^{1/2}} \quad (4.6)$$

temos

$$\tilde{L}_1 = \sqrt{\frac{1}{(\tilde{H}_1/\tilde{L}_1)}} \quad (4.7)$$

$$\tilde{H}_1 = \left(\frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1}\right) \tilde{L}_1 \quad (4.8)$$

Os seguintes valores foram aplicados para o grau de liberdade  $H_1/L_1= 0.2; 0.4; 0.8; 1.0; 2.0; 3.0; 5.0$ .

reescrevendo a equação (4.2)

$$\frac{H_2}{A_2^{1/2}} \frac{L_2}{A_2^{1/2}} = 2 \frac{A_2}{A_2} \quad (4.9)$$

adimensionalizando a equação (4.9)

$$\tilde{H}_2 \tilde{L}_2 = 2 \quad (4.10)$$

onde

$$\tilde{H}_2 = 2 \frac{H_2}{A_2^{1/2}} \quad (4.11)$$

$$\tilde{L}_2 = \frac{L_2}{A_2^{1/2}} \quad (4.12)$$

temos

$$\tilde{L}_2 = \sqrt{\frac{2}{(\tilde{H}_2/\tilde{L}_2)}} \quad (4.13)$$

$$\tilde{H}_2 = \left(\frac{\tilde{H}_2}{\tilde{L}_2}\right) \tilde{L}_2 \quad (4.14)$$

Os seguintes valores foram aplicados para o grau de liberdade  $H_2/L_2 = 0.05; 0.1; 0.2; 0.4; 0.8; 1.0$ .

Devendo se observar a restrição imposta pelo Lip e a rampa de forma que a profundidade do Lip não cruze a rampa

$$H_4 < (d - H_3) \quad (4.15)$$

Quanto ao processo de otimização, o mesmo é dividido em três passos conforme ilustrado na Fig. 4.2. Primeiramente, a cota de profundidade do Lip é variada para valores de  $H_3 = 2,5$  m e  $5,0$  m. No segundo passo, para um valor de  $H_2/L_2$ , a geometria é otimizada pela variação da razão  $H_1/L_1$ . Em um terceiro momento, o mesmo processo é repetido para vários valores de  $H_2/L_2$ . Para o estudo, foi estipulado um total de 112 simulações envolvendo os três graus de liberdade. A distribuição das simulações se desenvolve da seguinte forma, dois grupos de 56 simulações para cada  $H_3$ , estes subdivididos em oito grupos para cada  $H_1/L_1$  sendo feita uma varredura de sete simulações para os valores de  $H_2/L_2$ .

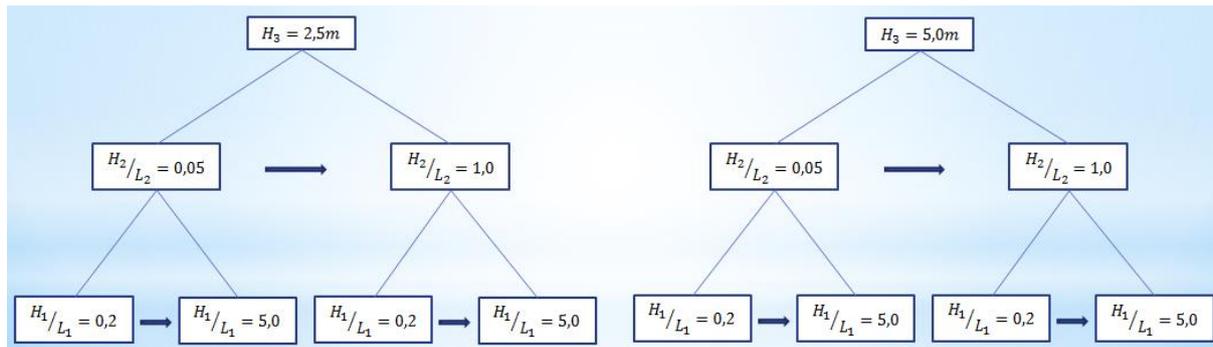


Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo OWC com três graus de liberdade.

## 4.2 O MODELO MULTIFÁSICO *VOLUME OF FLUID* (VOF)

A análise consiste em encontrar a solução de um escoamento de uma mistura ar-água. Por isso, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica são resolvidas com o MVF. Mais especificamente usando o software FLUENT.

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por (Schlichting, 1979):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{4.16}$$

onde  $\rho$  é a massa específica da mistura ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $\vec{v}$  o vetor de velocidade do escoamento ( $\text{m/s}$ ).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{4.17}$$

onde  $p$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho\vec{v}$  e  $\vec{F}$  são as forças de campo (empuxo) e forças externas ao corpo ( $\text{N/m}^3$ ), respectivamente. Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, conseqüentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo  $\bar{\tau}$  é o tensor taxa de deformação ( $\text{N/m}^2$ ), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T \right) \right] \quad (4.18)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $\text{kg}/(\text{ms})$ ). O segundo termo do lado direito da Eq. (4.18) descreve as tensões desviadoras ou deviatórias ( $\text{N/m}^2$ ) e está relacionada com a deformação volumétrica em escoamentos compressíveis. Uma vez que as velocidades obtidas no escoamento da onda (tanto na região do ar quanto da água) são baixas (número de Mach  $< 0.3$ ) será considerado um escoamento incompressível e o termo de tensões desviadoras não é levado em consideração na solução numérica do problema.

Para lidar com o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *Volume of fluid* (VOF). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase (Hirt e Nichols, 1981).

Nas simulações deste estudo, são consideradas duas diferentes fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume ( $\alpha_q$ ) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, devem ser unitária ( $0 \leq \alpha_q \leq 1$ ). Conseqüentemente, se  $\alpha_{\text{água}} = 0$ , o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1$ ). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja,  $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ . Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária (Ling et al., 2001; Lv et al., 2011; Gomes, 2010):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}}\vec{v}) = 0 \quad (4.19)$$

Vale ressaltar que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Portanto, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por:

$$\rho = \alpha_{agua}\rho_{agua} + \alpha_{ar}\rho_{ar} \quad (4.20)$$

$$\mu = \alpha_{agua}\mu_{agua} + \alpha_{ar}\mu_{ar} \quad (4.21)$$

Com relação à geração de onda, um perfil de velocidades é imposto na entrada do canal (superfície lateral esquerda da Fig. 4.1) e simula o comportamento de um gerador de onda (Horko, 2007). Os componentes de velocidade na direção de propagação de onda ( $x$ ) e na direção vertical ( $z$ ) para o canal de entrada são baseados na teoria linear de Airy e são dadas respectivamente por (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (4.10)$$

$$w(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (4.11)$$

onde  $H$  é a altura de onda (m),  $k$  é o número de onda dado por  $k = 2\pi/\lambda$  ( $m^{-1}$ ),  $h$  é a profundidade da água (m),  $T$  é o período da onda (s),  $\sigma$  é a frequência dada por  $\sigma = 2\pi/T$  (rad/s) e  $t$  é o tempo (s).

Para as outras condições de contorno, a região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica  $P_{abs} = 101.3$  kPa.

Com relação as condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso e que a lâmina de água possui uma superfície livre com altura  $d = 10.0$  m.

## 5. MODELAGEM NUMÉRICA

A metodologia de pesquisa utilizada no presente trabalho foi baseada na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) uma ferramenta que permite a análise e solução de problemas físicos, de grande complexidade matemática, voltados a aplicações de engenharia (Maliska, 2004).

Através dessa ferramenta trabalha-se com a discretização do campo de solução do problema e aplicação de um método numérico que permita encontrar de forma adequada à solução do mesmo. Para este trabalho, foram empregados os *softwares* GAMBIT (GAMBIT, 2006) e FLUENT (FLUENT, 2007) que constituem um pacote comercial para CFD da empresa ANSYS®.

Existem três métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais em engenharia: o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). A diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1995).

Nesse pacote, o GAMBIT é um programa que auxilia na construção e discretização da geometria para solução computacional e o FLUENT é um programa baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF – Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 1995), para a modelagem de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas; o que se dá pela conversão das equações de conservação de massa e da quantidade de movimento da forma diferencial em um sistema de equações algébricas para todos os volumes de controle.

Estudos numéricos por meio de modelagem computacional são, normalmente, divididos em três etapas, descritas a seguir de acordo com o estudo desenvolvido:

- Pré-processamento: quando é realizada a construção da geometria do problema e a geração da malha, onde foi empregado o *software* GAMBIT; e a definição das condições iniciais e de contorno, onde foi empregado o *software* FLUENT;
- Processamento: nessa etapa são resolvidas as equações que compõe o modelo matemático do problema, onde foi empregado o *software* FLUENT;

- Pós-processamento: quando é feita a coleta dos resultados dos cálculos e a análise dos dados pela plotagem de gráficos e topologias, o *software* FLUENT oferece recursos para esta etapa, porém outros, como planilhas eletrônicas, foram utilizados por permitem manusear os dados com mais facilidade.

## 5.1 MODELAGEM NUMÉRICA

Podem ser empregados três tipos de métodos na solução de um problema de engenharia: experimentais, analíticos e numéricos. Cada um destes métodos apresenta desvantagens e vantagens sobre os demais dependendo do problema e dos recursos disponíveis para resolvê-lo. Discussões a respeito podem ser vistas nos textos de Ferziger e Peric (1997), Maliska (2004), Fortuna (2000), Versteeg e Malalasekera (1995), Patankar (1980) e Tannehill et. al (1997). Este trabalho descreve uma resolução teórica, aplicando a conservação das equações de movimento, massa, energia e condições de contorno, uma vez que a resolução proposta aplica a Modelagem Matemática e Métodos Numéricos, conforme pode ser observado na Fig. 5.1.

A tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. Uma vez que se está resolvendo um sistema algébrico de equações, ao invés de um conjunto de equações diferenciais, a solução passa a ser obtida para um número discreto de pontos ao longo do domínio e não mais em um nível infinitesimal (Maliska, 2004).

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é uma realidade, devido ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Graças a essa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica. Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia, e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas, são outros fatores motivadores para seu uso (Maliska, 2004).



Figura 5.1 – Métodos de resolução para problemas físicos (Maliska, 2004).

A análise de sistemas, através de simulações computacionais, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, é conhecida como Dinâmica de Fluidos Computacional – *Computational Fluid Dynamics* – ou simplesmente CFD, e apresenta as seguintes vantagens: redução substancial de tempo e custo em novos projetos, capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados (Versteeg e Malalasekera, 1995).

## 5.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)

A tarefa do método numérico é transformar uma equação diferencial, definida num domínio, em um sistema de equações algébricas. Para isso as derivadas da função existente na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. O MVF é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, o método fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP. O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza, que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs (Maliska, 2004; Bortoli, 2000; Fortuna, 2000).

Quando não é possível a solução analítica, e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceita-se ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro, esperando que quanto maior for este número de pontos mais perto da solução exata será a solução aproximada. Um método analítico com habilidade de resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número finito de pontos (Maliska, 2004).

A Figura 5.2 ilustra a técnica de discretização empregada pelo método numérico, o qual converte uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas.

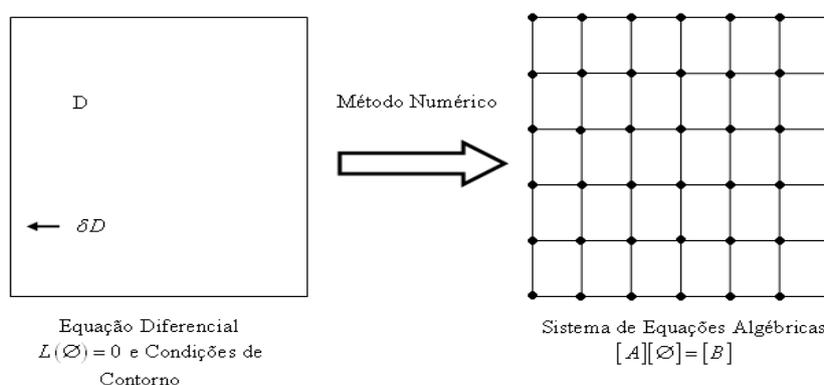


Figura 5.2 – Técnica de discretização (Maliska, 2004).

O método de volumes finitos é construído a partir da divisão do domínio de integração das equações em volumes de controles, de forma que para cada célula exista um ponto nodal ou nó.

Assim, todo método que, para obter equações aproximadas, satisfaz a conservação de propriedade em nível de volumes elementares é um Método de Volumes Finitos. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas para esta metodologia. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa (Maliska, 2004).

A Figura 5.3 mostra a representação de um volume de controle. O ponto  $P$  é o ponto principal, nó, de um volume de controle genérico, sendo que os volumes de controles adjacentes possuem o mesmo arranjo, com um nó central. As faces dos volumes de controle são representadas pelas linhas em negrito e  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são as distâncias entre as faces, ou dimensão do volume de controle. As velocidades na direção  $x$  nas faces leste e oeste são representadas por  $u$ , e as velocidades na direção  $y$  nas faces norte e sul são representadas por  $v$ .

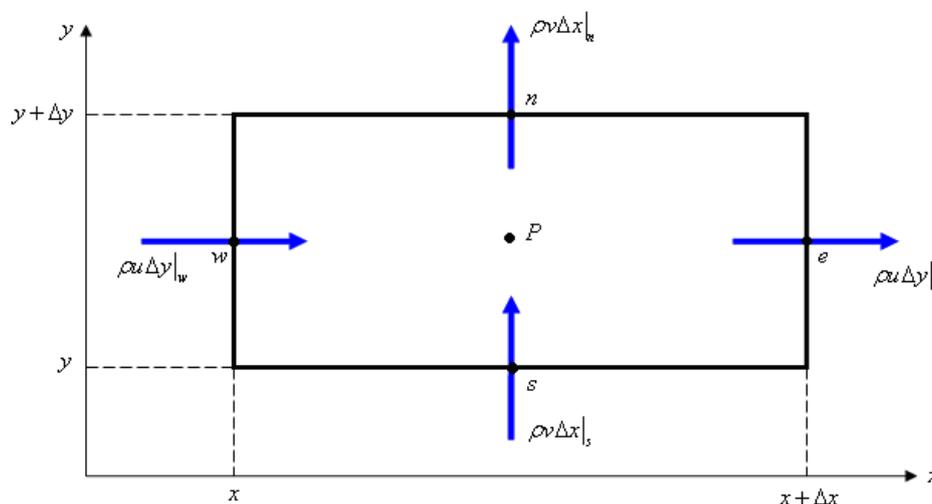


Figura 5.3 – Volume de controle típico (Maliska, 2004).

A dedução da equação diferencial que representa a conservação da massa para um escoamento incompressível (divergência do campo de velocidades igual a zero) é realizada a partir do balanço de massa no volume de controle, conforme mostrado na Fig. 5.3:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (5.1)$$

onde  $\dot{m}$  denota o fluxo de massa e os índices  $e$ ,  $w$ ,  $n$  e  $s$  significam respectivamente leste, oeste, norte e sul e servem para identificar as faces do volume de controle na discretização numérica. A Equação que representa a vazão mássica que cruza as fronteiras do volume de controle especificado na Fig. 5.4 é a seguinte:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (5.2)$$

Na qual  $u, v$  e  $\rho$  significam, respectivamente, componente da velocidade na direção  $x$ , componente da velocidade na direção  $y$  e massa específica. Dividindo a Eq. (5.2) pelo produto  $\Delta x \Delta y$  :

$$\frac{\rho u|_e - \rho u|_w}{\Delta x} + \frac{\rho v|_n - \rho v|_s}{\Delta y} = 0 \quad (5.3)$$

Aplicando o limite, encontra-se a equação diferencial que define a forma diferencial da Equação da conservação da massa, para um escoamento permanente:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (5.4)$$

A partir da Equação de conservação para um volume finito pode se obter a equação de conservação em nível infinitesimal. Logo, a Eq. (5.4) será resolvida pela maneira prática do MVF, ou seja, através de integração numérica no volume elementar, como se pode observar nas Eqs. (5.5) e (5.6):

$$\int_w^e \int_s^n \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) \right] dx dy = 0 \quad (5.5)$$

$$\int_s^n [\rho u|_e - \rho u|_w] dy + \int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx = 0 \quad (5.6)$$

Avaliando o fluxo de massa no meio da face do volume como representação da média de variação na face, pode-se escrever:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (5.7)$$

A Equação (5.7) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (5.8)$$

A Equação (5.8) é a equação aproximada que vale para o volume  $P$ . Portanto, realizar a integração da forma conservativa da equação diferencial ou fazer o balanço são procedimentos equivalentes. Realizando a integração para todos os volumes elementares, obtém-se uma equação algébrica para cada volume e, portanto, o sistema de equações algébricas procurado (Maliska, 2004).

A seguir é apresentado uma descrição do método de volumes finitos aplicado as equações governantes do escoamento da mistura água e ar apresentados no capítulo 4. Mais precisamente será comentado sobre as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e do transporte da fração volumétrica.

Com o intuito de simplificar a apresentação do modelo numérico, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e transporte da fração volumétrica são definidas na forma geral apresentada por Maliska (2004):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \vec{v} \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma^\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S^\varphi \quad (5.9)$$

onde  $\varphi$  é o escalar que está sendo transportado,  $\Gamma^\varphi$  é o coeficiente de difusão e  $S^\varphi$  é o termo fonte ou sumidouro por unidade de volume. Os termos relacionados com o escalar  $\varphi$  são apresentados na Tabela 5.1 para cada equação de conservação.

Tabela 5.1 – Valores de  $\varphi$ ,  $\Gamma^\varphi$  e  $S^\varphi$  usados na Equação (5.9).

Equação de Conservação	$\varphi$	$\Gamma^\varphi$	$S^\varphi$
Massa	1	0	0
Quantidade de movimento	$\vec{v}$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} \delta_{ij} + \rho g_i + F_i$
Transporte da fração volumétrica	$\alpha_{\text{água}}$	0	0

De acordo com Maliska (2004), a Eq. (5.9) representa a conservação de massa, quando  $S^\varphi$  for igual a zero e  $\varphi = 1$ . As equações de conservação da quantidade de movimento nas três direções coordenadas são obtidas fazendo-se  $\varphi = v_1, v_2$  e  $v_3$  com o apropriado termo fonte, que, neste caso, inclui o gradiente de pressão. Para o transporte da fração volumétrica, o valor de  $\varphi = \alpha_{\text{água}}$  e o termo fonte é nulo. Para a equação de conservação da quantidade de movimento  $\Gamma_\varphi = \mu$ .

Para obter uma solução aproximada pelo MFV deve-se dividir o domínio em vários volumes de controle, onde a variável de interesse fica situada no volume de controle. Posteriormente, integram-se as equações governantes, Eq. (5.1), sobre cada volume de controle (VC) e ao longo do tempo, para um passo de tempo  $\Delta t$ . A equação do transporte, Eq. (5.9), na forma integral é dada por (Versteeg e Malalasekera, 1995):

$$\int_{VC} \left( \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\varphi) dt \right) dV + \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_A n \cdot (\rho\vec{v}\varphi) dA \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_A n \cdot (\Gamma\nabla\varphi) dA \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} S_\varphi dV dt \quad (5.10)$$

onde  $\vec{v}$  é o vetor do campo de velocidades,  $n$  é o vetor unitário normal à superfície do volume de controle  $\forall$  e  $dA$  é a magnitude do elemento de área da superfície de controle.

A Equação (5.10) é empregada para cada volume de controle do domínio computacional. Um exemplo de um volume de controle bidimensional é apresentado na Fig. 5.5.

A discretização da Eq. (5.10) para um volume de controle qualquer envolvendo suas faces é dada por (FLUENT, 2007):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \nabla + \sum_f \rho_f u_{i|f} \phi_f n_{fi} A_f = \sum_f \Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \Big|_f n_{fi} A_f + S_\phi \nabla \quad (5.11)$$

onde  $N_f$  é o número de faces que compõem o volume de controle,  $\phi_f$  é a variável obtida na face  $f$ ,  $u_{i|f}$  é o campo de velocidades na direção  $i$  obtido na face  $f$ ,  $A_f$  é a área da face  $f$  e  $n_{fi}$  é o vetor unitário normal a face  $f$ . Na Figura 5.4 as faces do volume de controle bidimensional são representadas pela linha vermelha tracejada. É possível observar neste caso que  $f$  pode representar qualquer uma das faces: leste ( $e$ ), oeste ( $w$ ), norte ( $n$ ) ou sul ( $s$ ). O primeiro termo do lado esquerdo da Eq. (5.11) representa o termo transiente, sendo necessário fazer alguma consideração quanto à evolução das variáveis das células vizinhas em função do tempo. No presente trabalho foi empregado um esquema de avanço temporal implícito, que será posteriormente apresentado.

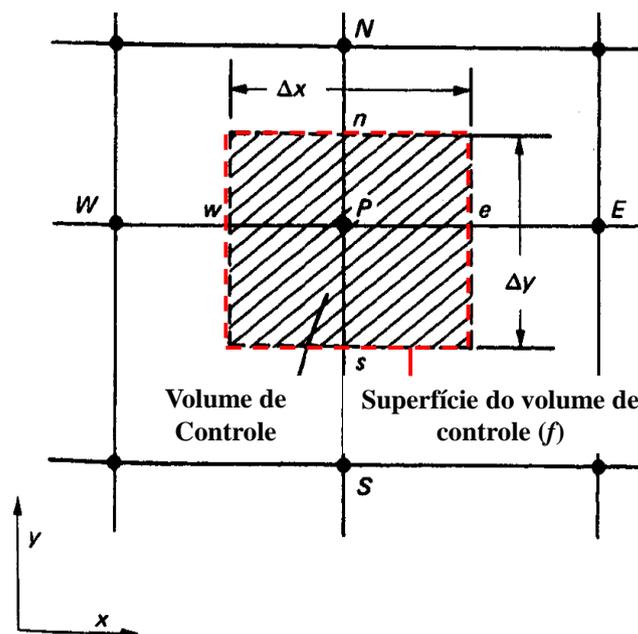


Figura 5.4 – Volume de controle empregado em MVF para um domínio bidimensional (Adaptado de Patankar, 1980).

A equação discretizada do transporte escalar, Eq. (5.11), é usada para obter as variáveis escalares desconhecidas  $\phi$  no centro da célula  $P$  ( $\phi_P$ ) assim como os valores das incógnitas nas células vizinhas,  $\phi_E$ ,  $\phi_W$ ,  $\phi_N$  e  $\phi_S$  (para um domínio bidimensional). Apesar da não linearidade desta equação com respeito às variáveis das células vizinhas, é possível escrevê-la na seguinte forma linear (Dos Santos, 2011):

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5.12)$$

Na Equação (5.12) o subíndice  $nb$  refere-se às células vizinhas,  $a_p$  é o coeficiente principal,  $a_{nb}$  são os coeficientes das células vizinhas ( $E$ ,  $W$ ,  $N$  e  $S$ ) e  $b$  contabiliza o termo fonte e o produto entre o coeficiente e a variável escalar no ponto  $P$  no passo de tempo anterior. De acordo com Savicki (2007) os coeficientes  $a_p$ ,  $a_{nb}$  e  $b$  mudam de acordo com a função de interpolação usada (*upwind*, *power-law*, *QUICK* entre outros) e também podem variar de acordo com a linearização do termo fonte de cada equação.

### 5.3 DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

Depois de realizar a discretização espacial da equação é importante definir qual o tipo de formulação será utilizada para resolver o problema no tempo. Para se poder analisar problemas transientes, torna-se necessário a utilização de algum esquema de interpolação no tempo, que pode, por sua vez, ser classificado como: explícito, totalmente implícito e implícito (Maliska, 2004).

Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e permitem o uso de um maior passo de tempo em relação aos demais. Todavia, para domínios de grande dimensão há uma grande dificuldade para o armazenamento na memória principal das matrizes completas do sistema, gerando um maior tempo de processamento para obtenção de resultados da simulação, já os esquemas explícitos ocupam pouco espaço na memória central. Entretanto, tais esquemas são afetados por fortes restrições de estabilidade numérica, limitando o passo de tempo a ser adotado (Dos Santos, 2011).

A Figura 5.5 ilustra, para os três tipos de formulação, as conexões existentes entre o ponto  $P$  e seus vizinhos, no instante de tempo de cálculo e no instante de tempo anterior.

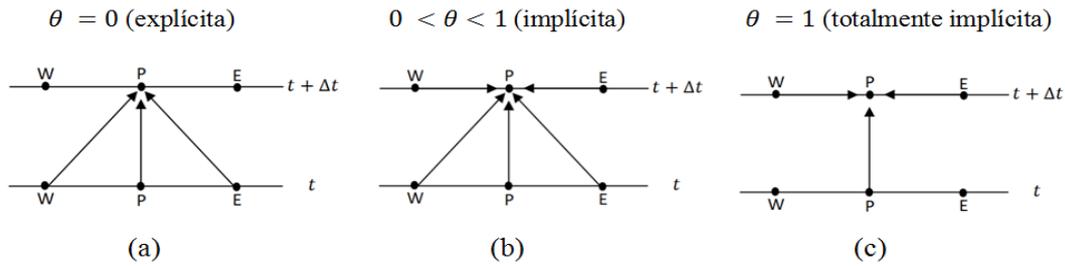


Figura 5.5 – Conexão espacial e temporal do volume  $P$  (Maliska, 2004).

Neste estudo é utilizado o esquema de avanço temporal totalmente implícito, conforme é ilustrado na Fig. 5.5 (c). De acordo com Maliska (2004), o método Crank-Nicolson é o mais conhecido dessa classe, em que as variáveis são tomadas como média aritmética entre as variáveis em  $P(t)$  e  $P(t + \Delta t)$ . Um exemplo de equacionamento para velocidade é dado por:

$$V_P^\theta = \theta V_P + (1 - \theta)V_P^0 \tag{5.13}$$

Analisando a Eq. (5.13), tendo  $\theta \neq 0$ , as equações ficam acopladas. Isso caracteriza a implicitude entre as mesmas. Já tomando  $\theta = 0$ , tem-se a formulação explícita, ilustrada na Fig. 5.5 (a). Logo, todas as temperaturas vizinhas a  $P$  são avaliadas no instante anterior e, portanto, já são conhecidas. Então, é possível explicitar a incógnita da Eq. (5.13), ou seja,  $V_P^\theta$ , em função das temperaturas vizinhas, todas conhecidas (Maliska, 2004).

Como há uma equação para cada ponto discreto e em cada uma das equações as velocidades vizinhas são sempre no instante anterior, a formulação explícita dá origem a um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas uma a uma, obtendo-se o valor da propriedade em cada ponto do espaço para cada nível de tempo. Como as equações não são acopladas entre si, não há um sistema de equações a ser resolvido, porém um conjunto de equações. É importante mencionar que para esse caso, deve-se conhecer o valor da propriedade no começo e no fim do intervalo de tempo (Maliska, 2004).

Na formulação totalmente implícita, Fig. 5.5 (c), considera-se  $\theta = 1$ , todas as incógnitas estarão no mesmo nível de tempo. Conseqüentemente, tem-se um sistema de

equações algébricas para ser resolvido. Havendo interesse na solução transiente, é importante resolver o problema com precisão a cada passo de tempo. Dessa forma, se um método iterativo está sendo utilizado, para a resolução do problema, é necessário que os valores das incógnitas sejam iterados até que um critério de convergência seja satisfeito naquele passo de tempo (Maliska, 2004).

Ao observar a Fig. 5.5 (b) identifica-se a formulação implícita, a qual é admitido  $0 < \theta < 1$ , isto é, será utilizada a função de interpolação no tempo representada pela Eq. (5.13). Nessa função, será utilizado o valor da função no tempo atual e no tempo anterior, relacionadas pelos coeficientes  $\theta$  e  $(1 - \theta)$ . Logo, o presente tipo de formulação também produzirá um sistema de equações algébricas para ser resolvido (Maliska, 2004).

Ao observar a Fig. 5.5 (b) identifica-se a formulação implícita, a qual é admitido  $0 < \theta < 1$ , isto é, será utilizada a função de interpolação no tempo representada pela Eq. (5.13). Nessa função, será utilizado o valor da função no tempo atual e no tempo anterior, relacionadas pelos coeficientes  $\theta$  e  $(1 - \theta)$ . Logo, o presente tipo de formulação também produzirá um sistema de equações algébricas para ser resolvido (Maliska, 2004).

Este tipo de solução também produzirá um sistema de equações algébricas. Um resumo dessas formulações pode ser visto na Fig. 5.6.

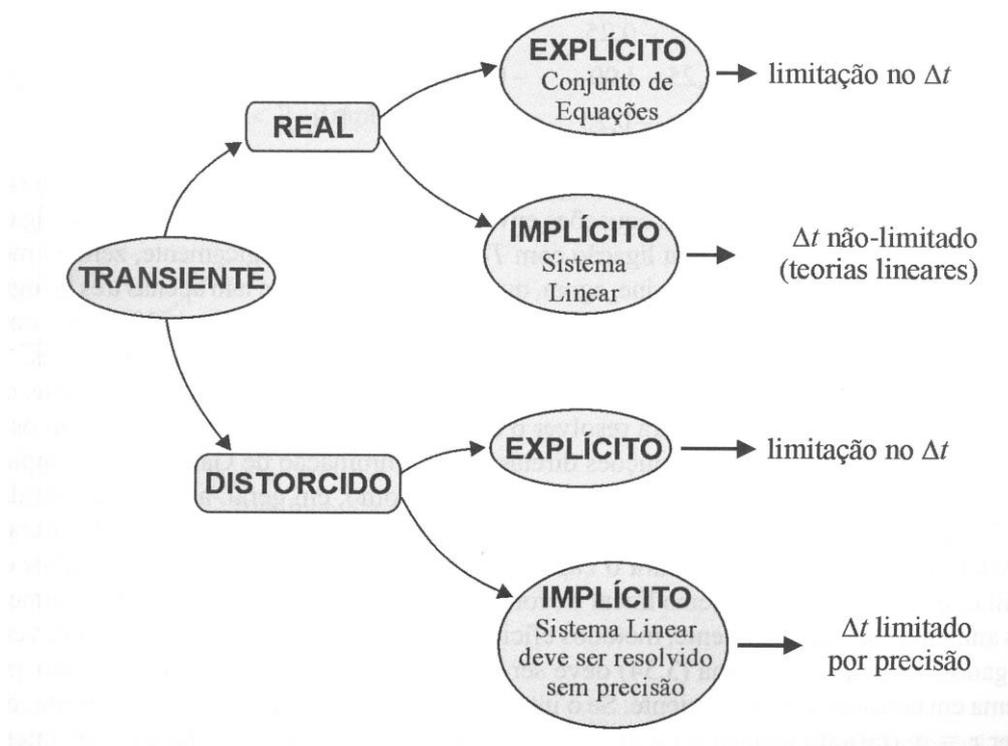


Figura 5.6 – Tipos de formulações no tempo (Maliska, 2004).

## 5.4 TRATAMENTO DOS TERMOS ADVECTIVOS DAS EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

Conforme Maliska (2004), os escoamentos advectivos-dominantes possuem grandes instabilidades numéricas quando se adotam discretizações por diferenças finitas centrais no tratamento dos termos advectivos. As soluções frequentemente apresentam oscilações espúrias nos campos de velocidades, pressão e temperaturas. Tais oscilações podem ser reduzidas empregando um maior refinamento de malha. Conforme explica Maliska (2004) e Dos Santos (2011), entretanto, não é possível empregar este tipo de refinamento em problemas reais devido ao elevado esforço computacional. Em decorrência disso, foram desenvolvidas técnicas para abordagem deste problema.

No âmbito do método dos volumes finitos, as oscilações numéricas geradas ocorrem devido à negatividade dos coeficientes dos termos advectivos das equações de conservação, que ocorre quando é utilizada uma discretização por diferenças finitas centrais (Dos Santos, 2011). Uma forma de evitar isso é através do emprego de outra aproximação para os termos advectivos nas faces dos volumes de controle (Patankar, 1980; Maliska, 2004).

Neste trabalho, foi utilizado o esquema de advecção *upwind* para os termos advectivos. Para o presente esquema, a direção do escoamento é levada em consideração para a realização do cálculo do valor de uma determinada variável (velocidade, temperatura) na face do volume finito. Além disso, a positividade dos coeficientes dos termos advectivos é sempre garantida, sendo geradas soluções numéricas ausentes de oscilações numéricas (Dos Santos, 2011). Aliado a isso, como grande vantagem, se tem que a função de interpolação *upwind* é a simplicidade de sua aplicação em algoritmos de CFD (Brum, 2013).

No esquema de advecção *upwind* de primeira ordem, o valor  $\phi_f$  na interface é igual ao valor da célula que está à montante da face (Patankar, 1980; Dos Santos, 2011). Por exemplo, se a velocidade principal do escoamento ocorre na direção, conforme ilustra a Fig. 5.7, a variável  $\phi_e$  (na face leste) será dada por:

$$\phi_e = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e > 0 \quad (5.14)$$

$$\phi_e = \phi_E \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e < 0 \quad (5.15)$$

Para face oeste, tem-se:

$$\phi_w = \phi_W \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e > 0 \quad (5.16)$$

$$\phi_w = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e < 0 \quad (5.17)$$

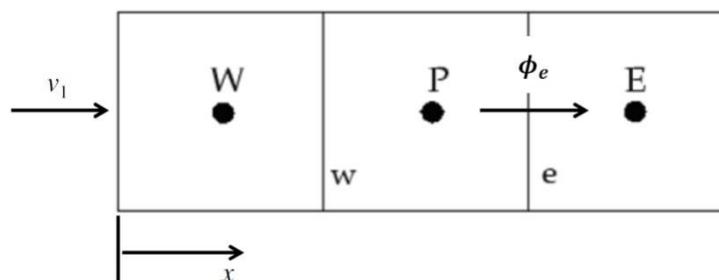


Figura 5.7 – Obtenção de  $\phi_f$  em uma face do volume de controle (Adaptado de Dos Santos, 2011)

## 5.5 RESOLUÇÃO DE EQUAÇÕES APLICANDO O MÉTODO DE SOLUÇÃO SEGREGADO

O FLUENT permite escolher entre dois métodos numéricos: segregado (*segregated solver*) ou acoplado (*coupled solver*). Usando qualquer método, o FLUENT integra as equações (da conservação da massa, da quantidade de movimento) geradas pela discretização.

Comparando os dois métodos, pode se concluir que a diferença entre esses métodos consiste na forma de resolução das incógnitas. Enquanto o solver acoplado resolve todas as incógnitas simultaneamente (e para isso cria uma única matriz envolvendo todos os coeficientes), resolvendo todas as equações governantes para todas as variáveis (velocidade, pressão, temperatura e etc) em todos os volumes de controle ao mesmo tempo (ou de maneira simultânea ou acoplada). O método segregado resolve as equações governantes para uma variável (por exemplo, a velocidade) em todos os volumes de controle um de cada vez (ou sequencialmente), atualizando para isso os coeficientes (Maliska, 2004). A solução segregada apresenta vantagens sobre a solução simultânea. Enquanto a solução acoplada apresenta uma matriz resultante com um altíssimo índice de esparsidade, a solução segregada engendra matrizes menos esparsas, o que acelera a resolução dos sistemas lineares e diminui a alocação de memória.

Em função das não linearidades existentes nas equações governantes, no método segregado (baseado em pressão), várias iterações devem ser efetuadas até se obter a convergência. Cada iteração consiste de um incremento, conforme observado na Fig. 5.8 (Duarte, 2006).

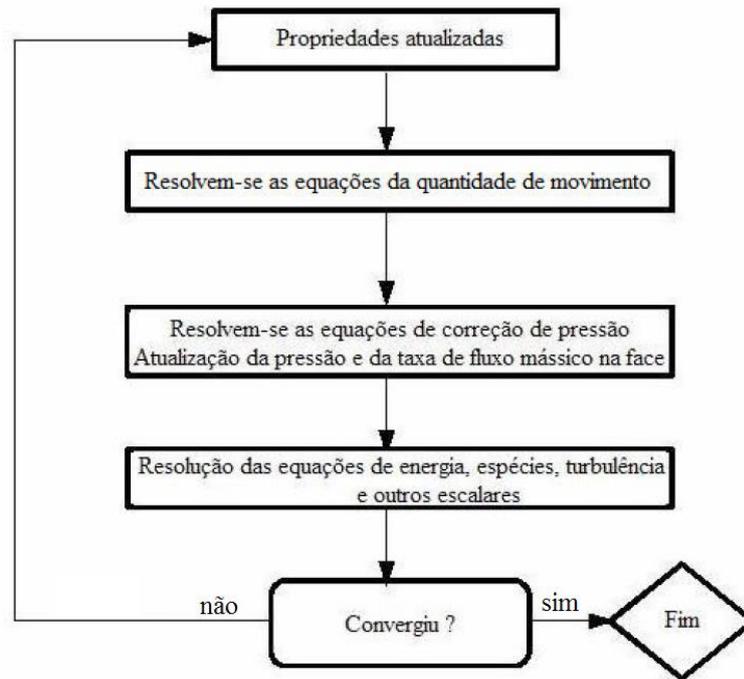


Figura 5.8 – Algoritmo de solução segregada (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).

Em cada uma das iterações:

- As propriedades dos fluidos são atualizadas;
- As equações da quantidade de movimento são solucionadas utilizando valores atualizados para pressão e fluxos de massa na face;
- Se as velocidades obtidas em um incremento de tempo não satisfizerem a equação da continuidade localmente, então é gerada uma equação para a correção da pressão, a partir da equação da continuidade e das equações do movimento linearizadas. Esta equação de correção de pressão é então resolvida para obter as correções necessárias de pressão e do perfil de velocidade e o fluxo de massa na face, até o ponto de chegar atender à continuidade.

## 5.6 ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Neste sentido é preciso encontrar um procedimento sequenciado e iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão de modo que o campo de

velocidade se aproximem progressivamente da solução que satisfaça a equação da continuidade na forma discretizada (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Os campos de velocidades podem ser avançados no tempo empregando a equação da conservação da quantidade de movimento. Já o campo de pressões não possui uma equação que relacione o seu avanço no tempo. Lembrando que a equação da conservação da quantidade de massa é somente uma restrição a ser obedecida pelo campo de velocidades e não serve de evolução de nenhuma variável no tempo (Dos Santos, 2011; Maliska, 2004).

No presente estudo é empregado o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Esse algoritmo é análogo ao SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) no qual relaciona a correção do campo de velocidades com a correção do campo de pressões a partir da equação da conservação da quantidade de movimento, mas com um passo a mais de correção das variáveis. Essa correção é aplicada a fim de garantir a conservação de massa.

## 5.7 MÉTODO GEO-RECONSTRUCTION

Segundo Gomes (2010), no método de reconstrução geométrica (Geo-Reconstruction), os esquemas de interpolação padrão do FLUENT são usados para obter o fluxo nas faces sempre que um volume esta completamente preenchido com uma fase ou outra, cuja interface é representada na Fig. 5.9. Quando o volume esta perto da interface entre as duas fases o esquema de reconstrução geométrica é utilizado. O esquema de reconstrução geométrica representa a interface entre os fluidos utilizando a aproximação *piecewise-linear*.

Nesse método considera-se que a interface dos dois fluidos tem uma inclinação linear na célula, gerada a partir de uma interpolação linear, dentro de cada volume. Essa inclinação é usada para calculo do fluxo de advecção do fluido pelas faces do volume de controle (Gomes, 2010).

Na primeira etapa é realizado o cálculo da posição da interface linear relativa ao centro do volume de controle parcialmente preenchido, isso baseado na informação sobre a fração volumétrica.

Na segunda etapa é calculado o montante de advecção do fluido de cada uma das faces, usando informações sobre a distribuição de velocidades nas faces.

A terceira etapa consiste no cálculo da fração de volume em cada volume de controle usando o balanço de fluxos calculados na etapa anterior.

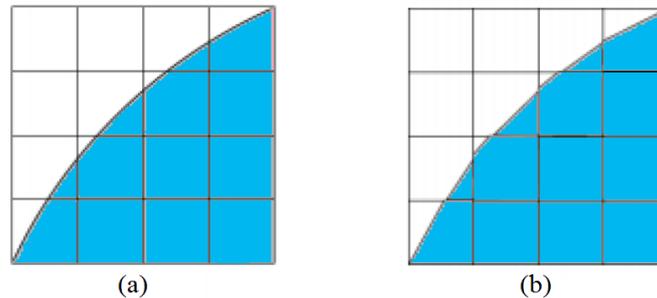


Figura 5.9 – (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).

## 5.8 PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

O solver empregado é baseado na pressão e todas as simulações foram realizadas com esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem e PRESTO (*Pressure Staggering Option*) para as discretizações espaciais do termo advectivo da equação da conservação da quantidade de movimento e pressão, respectivamente. O acoplamento pressão-velocidade é realizado pelo método PISO (Versteeg e Malalasekera, 1995). É empregado o método Geo-reconstruction para a determinação da superfície ocupada pela água (Gomes, 2010; Iahnke, 2010). Além disso, fatores de sub-relaxação de 0.3 e 0.7 serão impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente. A metodologia numérica aplicada neste trabalho já foi validada em estudos anteriores, por exemplo, Gomes (2010), Lopes (2012), Machado (2012), Grimler (2013) e Goulart (2014).

As soluções obtidas aqui foram consideradas convergidas quando os resíduos foram menores do que  $10^{-6}$  para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções  $x$  e  $y$ .

A discretização adequadamente aplicada facilita predição adequada dos escoamentos simulados, bem como, o esforço computacional requerido para a realização destas simulações. A redução de esforço computacional torna-se importante, devido a

quantidade de simulações executadas para a avaliação geométrica do dispositivo OWC. A etapa de geração da malha tem se tornado muito importante e diversas recomendações a respeito da sua construção têm sido realizadas (Santos, 2008).

Nos estudos anteriores de Barreiro (2009) e Gomes et al. (2012b) é apresentada uma recomendação para o número de volumes empregados ao longo do domínio. De acordo com os autores, na região da superfície livre devem ser adotados elementos com dimensões equivalentes a  $H/20$  na direção  $z$  (perpendicular ao sentido de propagação do escoamento) e com 50 volumes por comprimento de onda ( $\lambda$ ) na direção  $x$  (na direção principal de propagação do escoamento). A Figura 5.10 ilustra a malha empregada no presente trabalho e também as condições de contorno empregadas no domínio. O número de volumes na direção  $z$  na região da superfície livre foi superior a  $H/30$  na direção  $z$  e superior a 70 volumes por comprimento de onda na direção  $x$ , estes valores sofreram variações devido a parametrização da malha, adaptando-a para cada caso. Adotou-se um refinamento com variação do espaçamento (*ratio*) entre faces, conforme fig. 5.11.



Figura 5.10 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo OWC onshore em escala real.

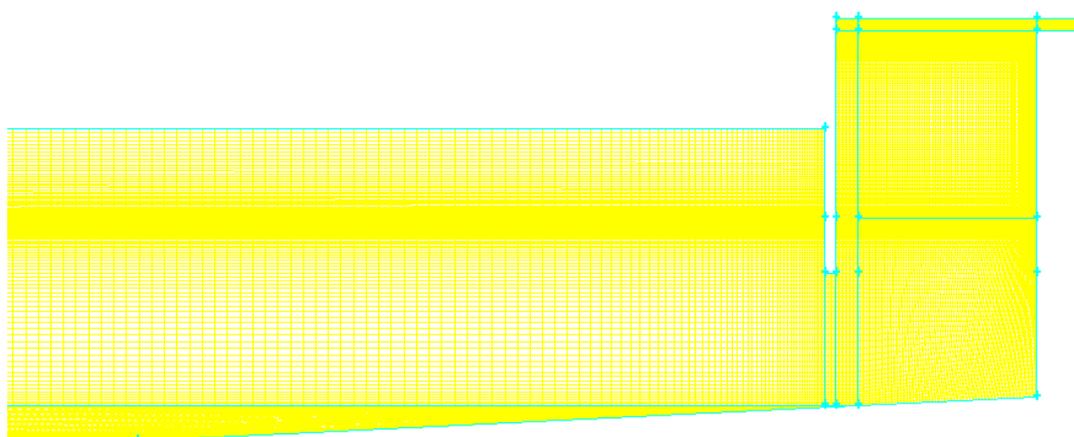


Figura 5.11 – Detalhe da malha regular aplicada ao dispositivo.

Foi empregado um refinamento maior perto das paredes devido aos maiores gradientes do campo de velocidades nessas regiões, sendo gerados acima de 170000 volumes finitos em uma malha regular. Nos trabalhos de Iahnke (2010) e Machado (2012) as malhas

empregadas eram irregulares com elementos triangulares e se adaptavam mais facilmente ao domínio computacional empregado.

A vantagem do emprego de malhas regulares com volumes retangulares é evitar efeitos numéricos como falsa difusão sobre a solução das variáveis primárias do problema. Conseqüentemente, o uso dessa técnica para esse problema é uma contribuição adicional do presente trabalho.

Para a determinação da discretização espacial empregada, foi realizado um estudo de independência do passo de tempo uma vez que se está abordando um problema transiente. Para este estudo foram realizadas 4 simulações variando apenas o passo de tempo e foi investigada a influência desse passo de tempo sobre a altura da superfície livre da onda. Em todas as simulações o tempo final foi de  $t_f = 100.0$  s. Foram avaliados os seguintes passos de tempo:  $\Delta t = 5.0 \times 10^{-3}$  s,  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2}$  s,  $\Delta t = 2.0 \times 10^{-2}$  s e  $\Delta t = 4.0 \times 10^{-2}$  s. A Figura 5.12 mostra o comportamento transiente da superfície livre da onda para os vários passos de tempo estudados. Foi possível observar que para valores de  $\Delta t \leq 2.0 \times 10^{-2}$  s todos os passos de tempo empregados conduziram a resultados concordantes. Para  $\Delta t = 4.0 \times 10^{-2}$  s é possível observar que houve uma defasagem com relação ao tempo e também um amortecimento na magnitude da onda. Foi adotado nas simulações posteriores de avaliação geométrica o passo de tempo de  $\Delta t = 2.0 \times 10^{-2}$  s, visto que o mesmo conduz a um menor esforço computacional comparado com passos de tempo menores e conduz a soluções concordantes.

Os valores de altura da superfície livre da onda ( $\eta$ ) no tempo de 15.0 s para os passos de tempo estudados e suas variações são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Valores de altura da superfície livre da onda ( $\eta$ ) no tempo de  $t = 15.0$  s para os passos de tempo estudados e suas variações.

$\Delta t$ (s)	$\eta$ (m)	Variação (%)
$5.0 \times 10^{-3}$ s	10.50779 m	$1.9 \times 10^{-4}$ %
$1.0 \times 10^{-2}$ s	10.50777 m	$6.6 \times 10^{-4}$ %
$2.0 \times 10^{-2}$ s	10.50770 m	$1.1 \times 10^{-1}$ %
$4.0 \times 10^{-2}$ s	10.49640 m	-

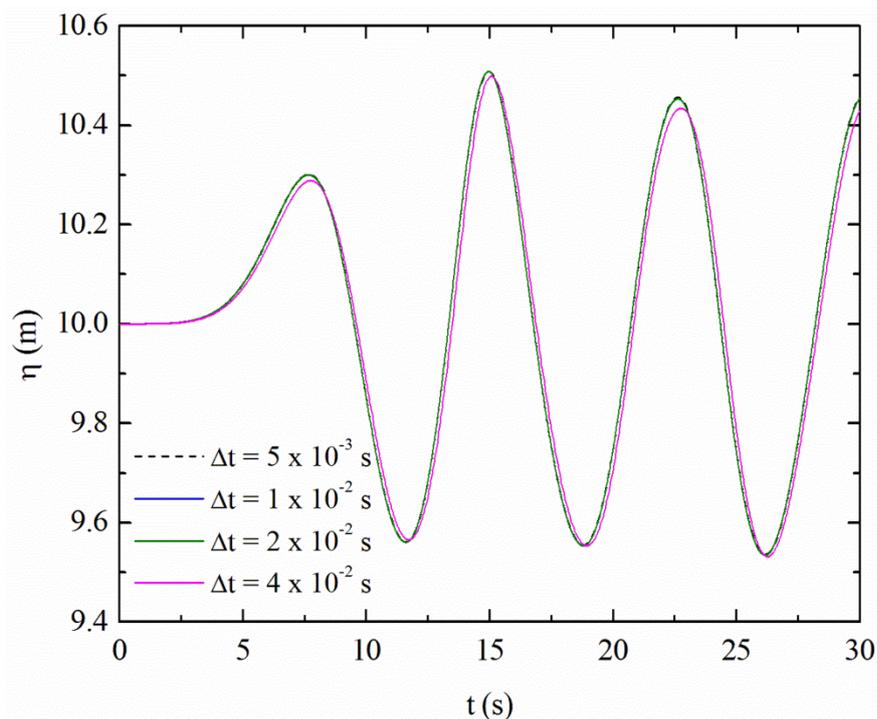


Figura 5.12 – Teste de independência do passo de tempo.

Foi realizada uma comparação entre a altura da superfície livre da onda obtida numericamente e medida em um ponto específico do tanque ( $x = 50.0$  m) e a solução analítica descrita em Chakrabarti (2005). Essa comparação é apresentada na Fig. 5.13. A Figura 5.13 mostra que a estabilização da solução numérica ocorreu em torno de  $t = 15.0$  s. Antes desse período a solução numérica capta o processo de inércia do escoamento entre o ponto de repouso do fluido e o ponto de estabilização e após sofre a incidência da onda, o que não é contemplado na solução analítica. Assim apenas o intervalo entre  $15.0 \text{ s} \leq t \leq 80.0 \text{ s}$  foram considerados para a verificação da onda gerada e também a propagação dessa onda ao longo do tanque.

Observando a diferença entre os resultados numéricos e analíticos no intervalo onde a onda estava estabilizada, o desvio médio obtido foi aproximadamente a 0.1 % comparando-se as alturas da superfície livre e aproximadamente 8.0 % comparando-se somente a variação de altura da superfície livre, apresentando assim uma boa concordância entre os resultados.

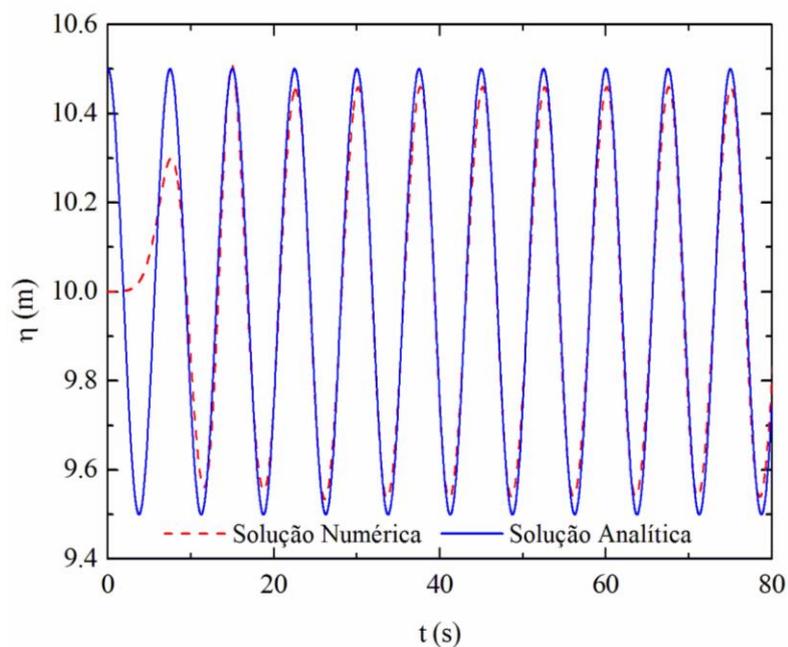


Figura 5.13 – Verificação da solução numérica com solução analítica obtida pela teoria linear de Airy.

As simulações foram realizadas nos computadores contidos nos laboratórios de simulação numérica Labsin1 e Labsin2 da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande. O tempo médio de uma simulação foi de aproximadamente 13 horas.

## 6. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo da avaliação geométrica da câmara de um dispositivo OWC *onshore*. Este está inserido em um tanque com rampa triangular. Foram utilizadas escalas reais empregando o *Constructal Design*. O monitoramento dos valores se dá por um sensor localizado no ponto médio do bocal interno da chaminé.

Para otimização do dispositivo, foi considerada uma área constante para a câmara de  $A_1 = 80.0 \text{ m}^2$  sendo analisados os seguintes valores para a razão  $H_1/L_1$ :  $H_1/L_1 = 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0$ , onde  $H_1$  refere-se à altura e  $L_1$ , a largura correspondente da câmara do dispositivo OWC. Para a variação da rampa foi assumida uma área constante  $A_2 = 40.0 \text{ m}^2$  sendo analisados os seguintes valores de  $H_2/L_2 = 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ , onde  $H_2$  representa a altura da rampa e  $L_2$  o comprimento da mesma.

Foram testados dois diferentes valores para o comprimento da borda frontal  $H_3 = 2.5$  e  $5.0$ . Os demais parâmetros de onda para todas as simulações foram  $\lambda = 65.4 \text{ m}$ ;  $T = 7.5 \text{ s}$ ;  $d = 10.0 \text{ m}$  e  $H = 1.0 \text{ m}$ . Além disso, o tanque possui um comprimento de  $L_T = 327.0 \text{ m}$  e uma altura de  $H_T = 14.0 \text{ m}$ .

A seguir, apresenta-se uma avaliação preliminar do desempenho de um dispositivo OWC instalado no final deste canal. Aplicou-se o *Constructal Design* a fim de determinarem-se as dimensões ótimas de comprimento e de altura da câmara hidropneumática do equipamento. Para tal, impôs-se uma restrição geométrica que fixa o valor da área da câmara em um valor constante. O objetivo aqui foi avaliar o efeito da razão  $H_1/L_1$  sobre a potência disponível instantânea do dispositivo ao longo do tempo para  $H_3 = 2.5 \text{ m}$ . Neste primeiro estudo, não foi considerado o efeito de uma rampa ao fundo do dispositivo OWC, considerando-se, neste caso,  $H_2/L_2 = 0$ , i.e., avaliou-se somente o efeito da câmara do OWC.

A Figura 6.1 apresenta a comparação para três casos diferentes de  $H_1/L_1$  mostrando a variação da vazão mássica em função do tempo. Os casos  $H_1/L_1 = 0.2$  e  $H_1/L_1 = 5.0$  representam os extremos inferior e superior avaliados, enquanto a razão  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  foi a que conduziu as maiores potências entre os casos estudados. Pode-se observar um comportamento oscilante e simétrico da vazão mássica instantânea na turbina similar para os casos  $H_1/L_1 = 0.2, 0.4$  e  $5.0$  sem defasagem nos picos e vales em função do tempo. É possível observar que  $H_1/L_1 = 5.0$  apresenta o pior comportamento em todos os instantes de tempo. Para o instante  $t = 57.5 \text{ s}$ , a vazão mássica instantânea obtida com  $H_1/L_1 = 5.0$  foi

aproximadamente duas vezes inferior à obtida no caso ótimo. Os casos de  $H_1/L_1 = 0.2$  e  $0.4$  apresentam resultados bastante próximos. Contudo, a razão  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  apresentou uma leve superioridade no desempenho nas regiões de maiores magnitudes. É importante destacar que para  $H_1/L_1 = 5.0$  os resultados revelam que o emprego de uma câmara com elevada altura dificulta a chegada do escoamento de ar imposto pelo movimento da superfície livre da onda.

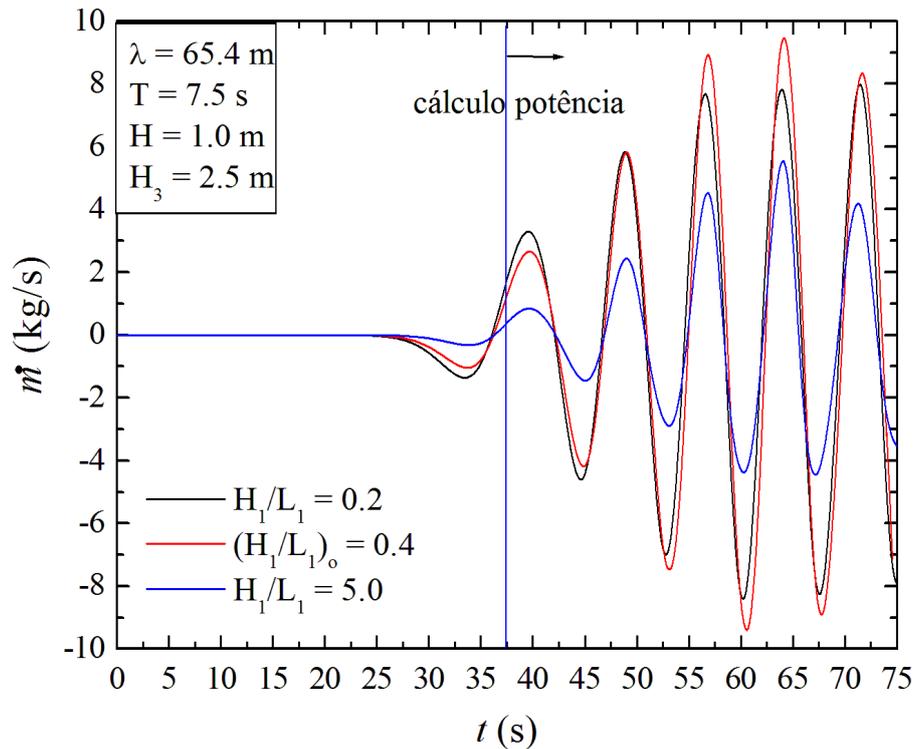


Figura 6.1 – Vazão mássica em função do tempo para várias razões de  $H_1/L_1$  e  $H_3 = 2.5$  m para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ).

Quando se avalia a diferença de pressão na região da chaminé em função do tempo para os mesmos valores de  $H_1/L_1$  estudados na fig. 6.1 e com  $H_2/L_2 = 0$ , pode-se observar que as curvas apresentam um comportamento oscilante, porém, não simétrico como na vazão mássica, com magnitudes dos picos atingindo valores maiores do que as magnitudes encontradas nos vales (vide fig. 6.2). Esta condição se deve, provavelmente, ao fato de a saída se dar para pressão atmosférica e a entrada se dar para a câmara fechada. Vale destacar aqui que, apesar do comportamento assimétrico da diferença de pressão na entrada e saída do ar na câmara a razão  $(H_1/L_1)_o$  foi a que conduziu as maiores diferenças de pressão em todos os instantes de tempo, com exceção do instante de tempo  $t = 45.0$  s onde a razão  $H_1/L_1 = 0.2$  apresentou uma ligeira vantagem sobre a geometria ótima.

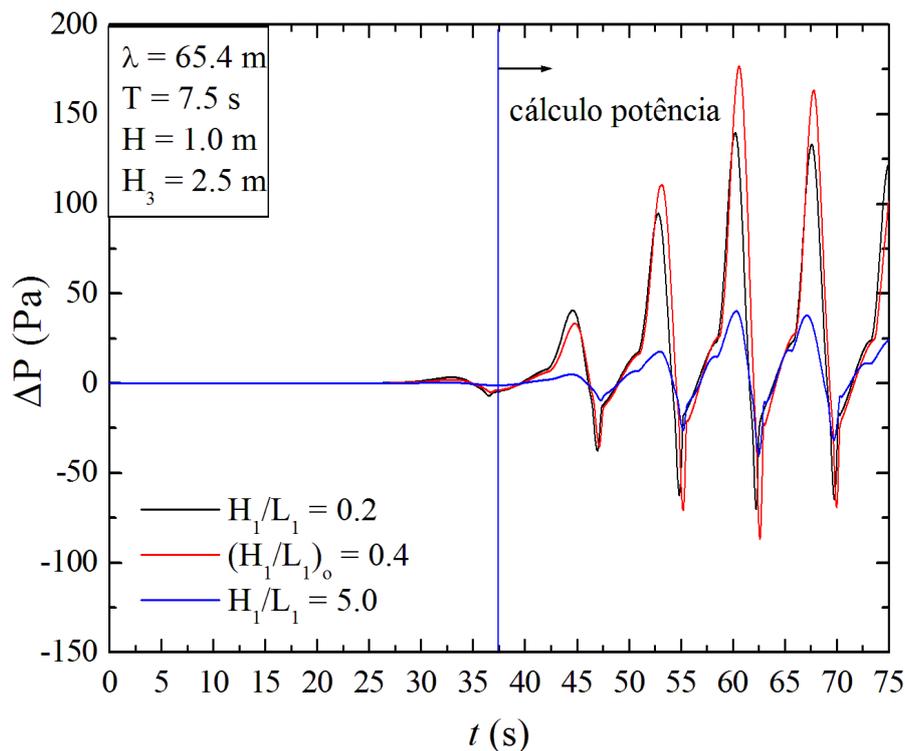


Figura 6.2 – Variação da diferença de pressão na câmara e saída da chaminé ( $\Delta P$ ) em função do tempo para várias razões de  $H_1/L_1$  e  $H_3 = 2.5 \text{ m}$  para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0$ ).

Após avaliar-se o efeito da geometria sobre a vazão mássica instantânea e sobre a diferença de pressão na região onde será inserida a turbina do dispositivo é estimada a potência instantânea do mesmo. Na Figura 6.3, a potência RMS ( $Pot_{RMS}$ ) em função do tempo apresenta ciclos alternativos em que os picos mais elevados correspondem ao escoamento para fora da turbina enquanto para os menores picos, referem-se ao escoamento para o interior da câmara do dispositivo OWC. Ainda, na fig. 6.3, quando analisado apenas o efeito da variação da geometria da câmara  $H_1/L_1$  para obtenção da maior eficiência da turbina, encontra-se, a partir deste único grau de liberdade a melhor condição geométrica, no caso, a condição em que  $H_1/L_1 = 0.4$ , que apresentou os melhores resultados em todos os instantes de tempo, excetuando-se ao intervalo de tempo próximo de  $t = 45 \text{ s}$ . Em contrapartida, a pior condição geométrica para a câmara apresentou-se para  $H_1/L_1 = 5.0$  em todo o intervalo de tempo analisado. Vale destacar aqui que a geometria ótima conduziu a uma maior quantidade de movimento na região da chaminé e maior diferença de pressão do que as demais razões de  $H_1/L_1$  estudadas.

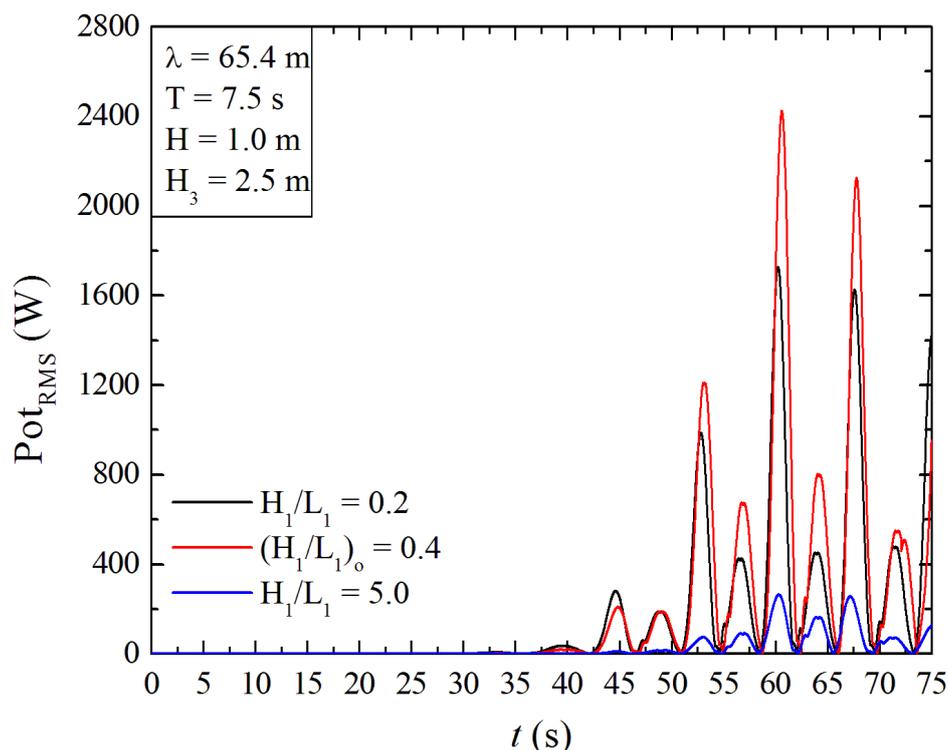


Figura 6.3 – Variação da potência RMS ( $Pot_{RMS}$ ) em função do tempo para várias razões de  $H_1/L_1$  e  $H_3 = 2.5 \text{ m}$  para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ).

Integrando-se e dividindo pelo intervalo de tempo a potência instantânea ao longo do intervalo de tempo analisado ( $37.5 \text{ s} \leq t \leq 75.0 \text{ s}$ ) obtém-se uma potência média. Os resultados desse procedimento estão sumarizados na fig. 6.4, onde é apresentado o efeito da razão  $H_1/L_1$  sobre a potência temporal média gerada na turbina do dispositivo OWC. A geometria que apresentou uma condição ótima entre os casos analisados foi  $(H_1/L_1)_o = 0.4$ , neste caso a potência uma vez maximizada foi de  $Pot_m = 240.88 \text{ W}$ . Para o extremo inferior ( $H_1/L_1 = 0.2$ ) foi obtida uma potencia de  $Pot = 206.13 \text{ W}$ , i.e., uma diferença de aproximadamente 17%. Quando comparado com a pior condição geométrica  $H_1/L_1 = 5.0$ , onde foi obtida uma potência RMS temporal média de  $Pot = 31.34 \text{ W}$ , a geometria ótima conduziu a uma magnitude de potência 7.7 vezes maior. Esses resultados evidenciam a importância da avaliação geométrica para a racionalização dos recursos energéticos, principalmente em problemas de energia das ondas do mar, onde ainda existem grandes dificuldades no processo de obtenção da energia.

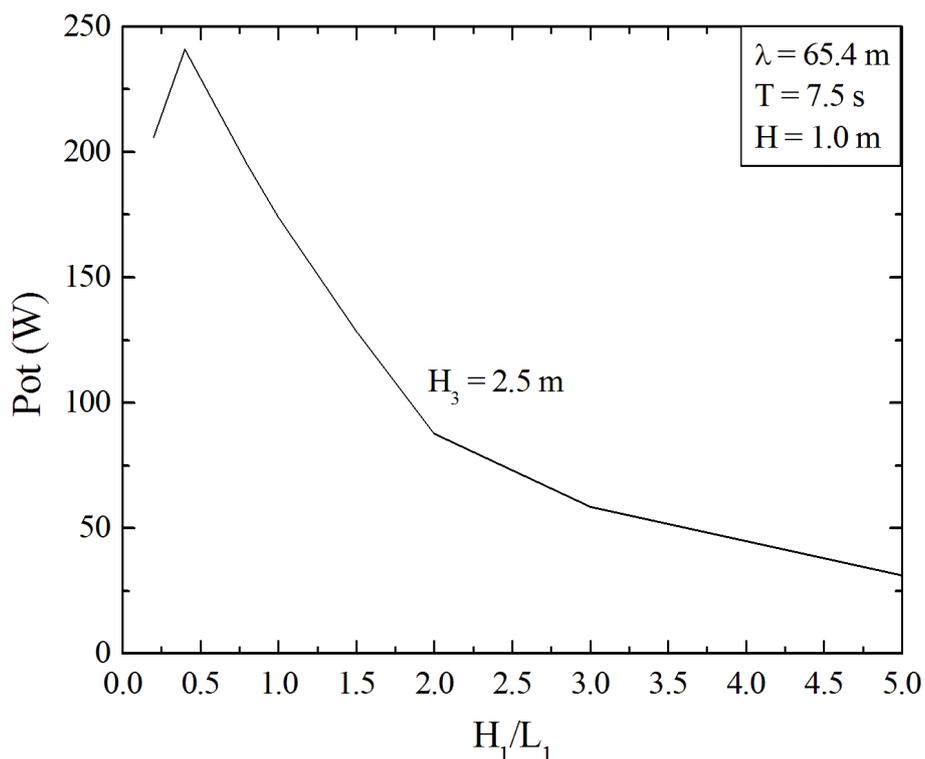


Figura 6.4 – Efeito de  $H_1/L_1$  sobre a potência RMS média no tempo para o caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0$ ) e  $H_3 = 2.5$  m.

Após realizar-se um estudo da influência da razão  $H_1/L_1$  de forma isolada sobre a potência disponível no OWC. A condição de rampa aplicada ao fundo do dispositivo OWC ( $H_2/L_2 > 0.0$ ) é avaliada com objetivo de determinar sua influência na eficiência da turbina do dispositivo OWC.

A Figura 6.5 compara a vazão mássica instantânea obtida sem a presença da rampa no final do tanque de ondas ( $H_2/L_2 = 0$ ) com a situação em que é aplicada uma rampa ( $H_2/L_2 = 0.8$ ). Em ambos os casos, o valor da borda frontal do dispositivo é  $H_3$  e a razão  $H_1/L_1$  foram mantidos fixos ( $H_3 = 2.5$  m e  $H_1/L_1 = 0.2$ ). O objetivo é avaliar apenas o efeito da rampa sobre o comportamento instantâneo da vazão mássica. Observa-se que a presença da rampa ao fundo do dispositivo OWC conduz a um aumento da vazão mássica que passa pela turbina, tanto nas regiões de picos e vales do gráfico. Esse comportamento foi verificado em praticamente todos os instantes de tempo. Nesse sentido, para  $H_3 = 2.5$  m a imposição da rampa no fundo do tanque mostrou ter influência sobre o comportamento transiente do escoamento podendo ser um parâmetro geométrico importante no dimensionamento desse tipo de dispositivo *onshore*.

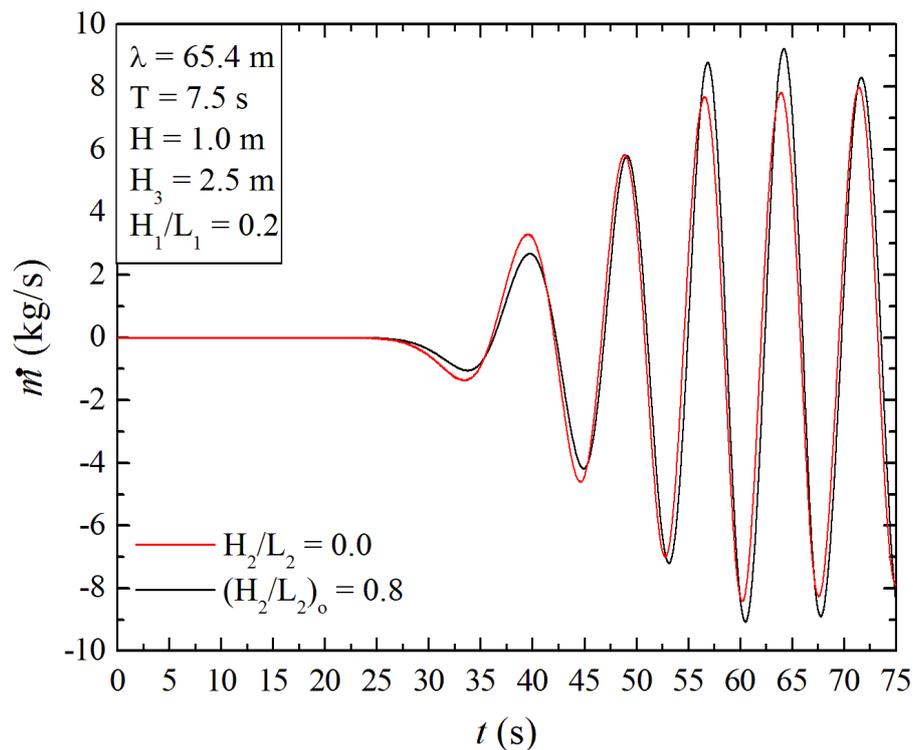


Figura 6.5 – Efeito da razão  $H_2/L_2$  sobre a vazão mássica em função do tempo para  $H_3 = 2.5$  m e  $H_1/L_1 = 0.2$ .

Para avaliar a pressão em função do tempo com a mesma razão de  $H_1/L_1 = 0.2$  e com diferentes razões de  $H_2/L_2 = 0.0$  e  $0.8$  a fig. 6.6 ilustra o comportamento transiente da diferença de pressão na região da chaminé. Semelhantemente ao que foi observado no caso sem rampa, houve um comportamento oscilante na diferença de pressão. Contudo, a magnitude não foi semelhante nas regiões de picos e vales. As magnitudes nos picos foram sensivelmente maiores as obtidas nos vales. Ressalta-se que a influência desta rampa, conforme fig. 6.6 acontece em condições de pico, quando a crista da onda está atuando na câmara do dispositivo OWC, aumentando a magnitude do campo de pressão. Na condição de vale, quando a cava da onda incide sobre a câmara do dispositivo OWC, a influência da rampa apresenta-se desprezível sobre a variação de pressão no interior da câmara, quando comparado à condição sem rampa. Dessa forma, nas regiões onde a diferença de pressão é pequena no caso sem rampa, a imposição da rampa não conduz a um aumento no desempenho do OWC.

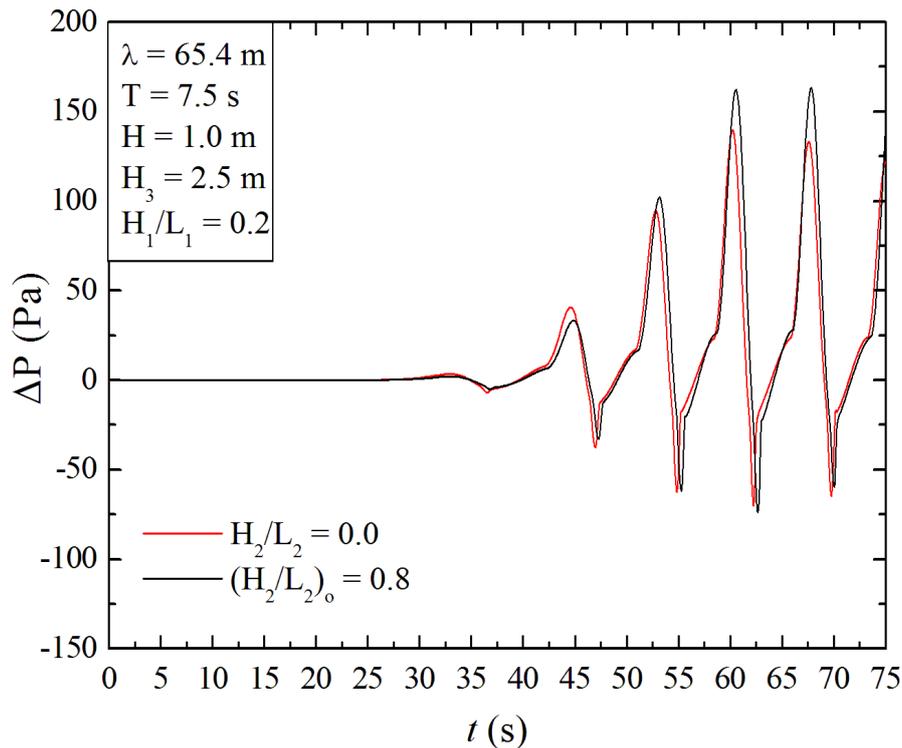


Figura 6.6 – Efeito da razão  $H_2/L_2$  sobre a diferença de pressão na câmara e saída da chaminé ( $\Delta P$ ) em função do tempo para  $H_3 = 2.5$  m e  $H_1/L_1 = 0.2$ .

A Figura 6.7, quando comparado a condição de rampa com razão ótima para  $H_2/L_2 = 0.8$  com a condição de ausência de rampa ( $H_2/L_2 = 0$ ) ao fundo do dispositivo OWC, percebe-se que a rampa aumenta o desempenho do dispositivo. A inserção da rampa mostrou-se benéfica para o caso estudado, i.e., para  $H_3 = 2.5$  m e  $H_1/L_1 = 0.2$ . Em uma comparação com o efeito de  $H_1/L_1$  sobre a potência RMS instantânea no OWC, fig. 6.3, é possível observar que a razão  $H_1/L_1$  parece ter um maior efeito sobre a potência média obtida no OWC do que a razão  $H_2/L_2$ , principalmente na comparação entre os desempenhos das melhores e piores geometrias.

Posteriormente, os resultados de potência instantânea são utilizados para obtenção das potências temporais médias. Os resultados obtidos na fig. 6.7 são repetidos para todos os casos de  $H_1/L_1$  e  $H_2/L_2$  estudados e as potências médias são sumarizadas na fig. 6.8. Conforme demonstrado na fig. 6.8, a razão geométrica da câmara de  $H_1/L_1 = 0.4$  para os casos com rampa ( $H_2/L_2 > 0$ ) e sem rampa ( $H_2/L_2 = 0$ ) conduzem a maior potência no dispositivo OWC para o caso com comprimento de borda frontal de  $H_3 = 2.5$  m.

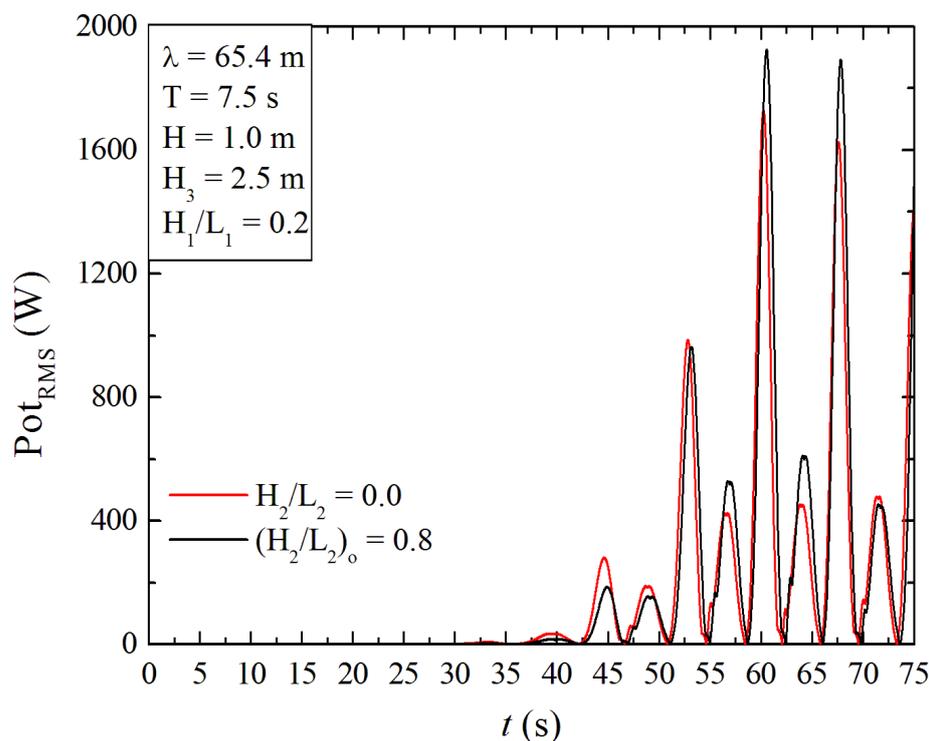


Figura 6.7 – Efeito da razão  $H_2/L_2$  sobre a potência RMS ( $Pot_{RMS}$ ) em função do tempo para  $H_3 = 2.5$  m e  $H_1/L_1 = 0.2$ .

Quando analisado o efeito das razões de  $H_2/L_2 > 0$ , fig. 6.8, observa-se que a rampa apresenta um aumento na potencia média no tempo sobre o caso sem rampa ao fundo do dispositivo OWC ( $H_2/L_2 = 0.0$ ) para todos os casos de  $H_1/L_1$ . Também é observado que as maiores variações de potência para um mesmo valor de  $H_1/L_1$  ocorrem do caso sem rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ) para o caso com razão  $H_2/L_2 = 0.1$ . Para  $H_2/L_2 > 0.2$  o incremento da potência média ocorre apenas na região onde a câmara possui uma geometria ótima, i.e.,  $H_1/L_1 \approx 0.4$ . É possível observar também que para razão  $H_1/L_1 > 1.5$  a rampa apresenta um desempenho similar e independente da razão  $H_2/L_2$ .

A influência da rampa na melhora da potencia média se torna mais efetiva para razão  $H_1/L_1 = 0.4$  e  $H_2/L_2 = 0.8$ , obtendo-se valor de  $Pot = 331.57$  W. A geometria da câmara que apresentou uma condição ótima ( $H_1/L_1 = 0.4$ ) para uma condição sem rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ) conduz a um valor de potência média de  $Pot = 240.88$  W. Dessa forma, a implantação da forma geométrica de rampa ao fundo do dispositivo elevou a eficiência da potência disponível em 37,7%.

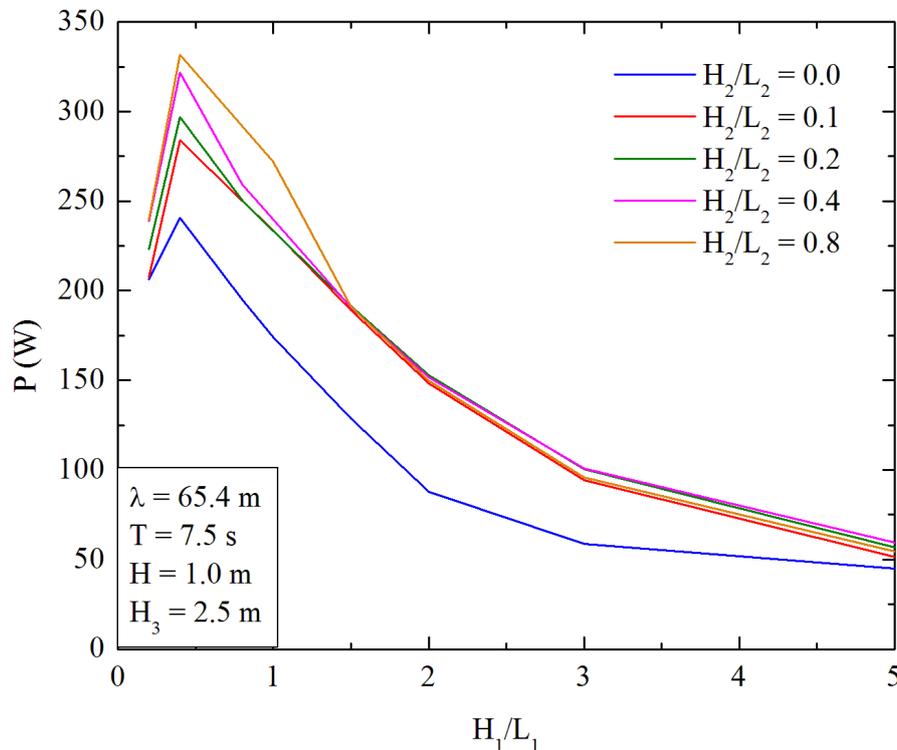


Figura 6.8 – Efeito de  $H_1/L_1$  sobre a potência média no tempo para vários valores de  $H_2/L_2$  e  $H_3 = 2.5$  m.

Apresenta-se, na fig. 6.9 a condição de crista de onda incidente ao dispositivo OWC com razão geométrica ótima da câmara  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e influenciado por uma rampa ao fundo do dispositivo com razão  $H_2/L_2 = 0.05$ . Uma vez que a elevação da rampa é muito pequena não há uma elevação significativa do nível da água no interior da câmara. Na Figura 6.10 pode ser visualizado o campo de velocidades do escoamento de ar no interior da câmara. Para o instante de tempo mostrado é possível observar que há uma maior variação na intensidade do escoamento na região de elevação da superfície livre da onda, no canto esquerdo da câmara.

A Figura 6.11 apresenta a incidência de uma crista de onda no dispositivo OWC para uma razão de área da câmara  $H_1/L_1 = 0.4$  e razão de área de rampa  $H_2/L_2 = 0.2$  provocando a elevação do nível de água no interior da câmara, conseqüentemente, forçando o ar pela turbina em direção a atmosfera e aumentando levemente a magnitude do campo de velocidades que passa pela chaminé da turbina (fig. 6.12).

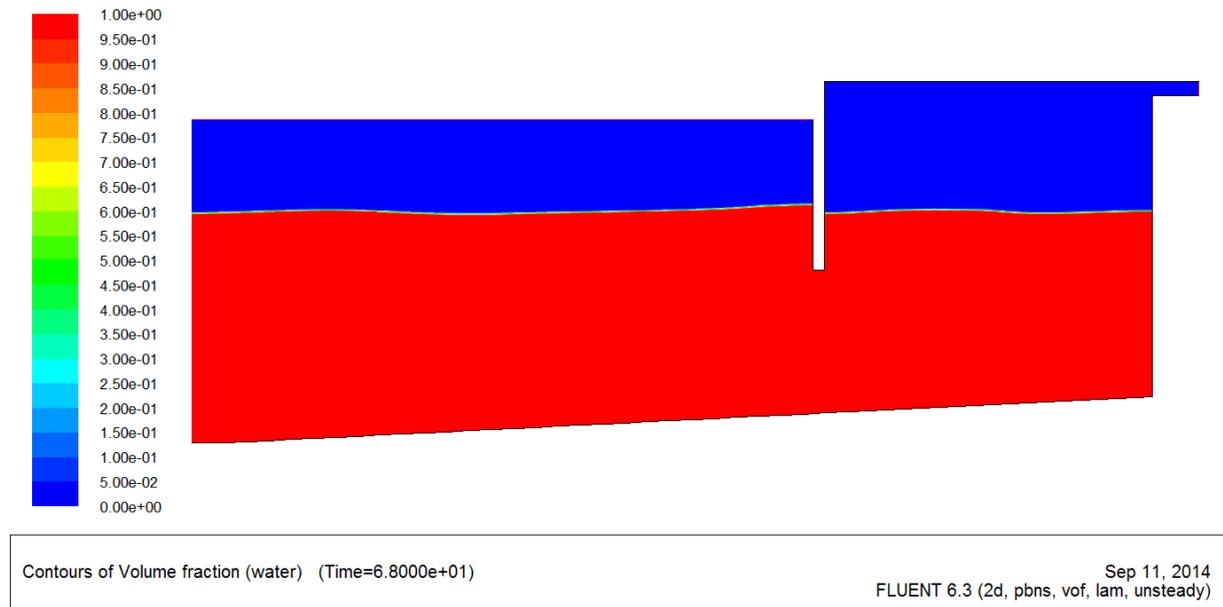


Figura 6.9 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.05$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 2.5$  m.

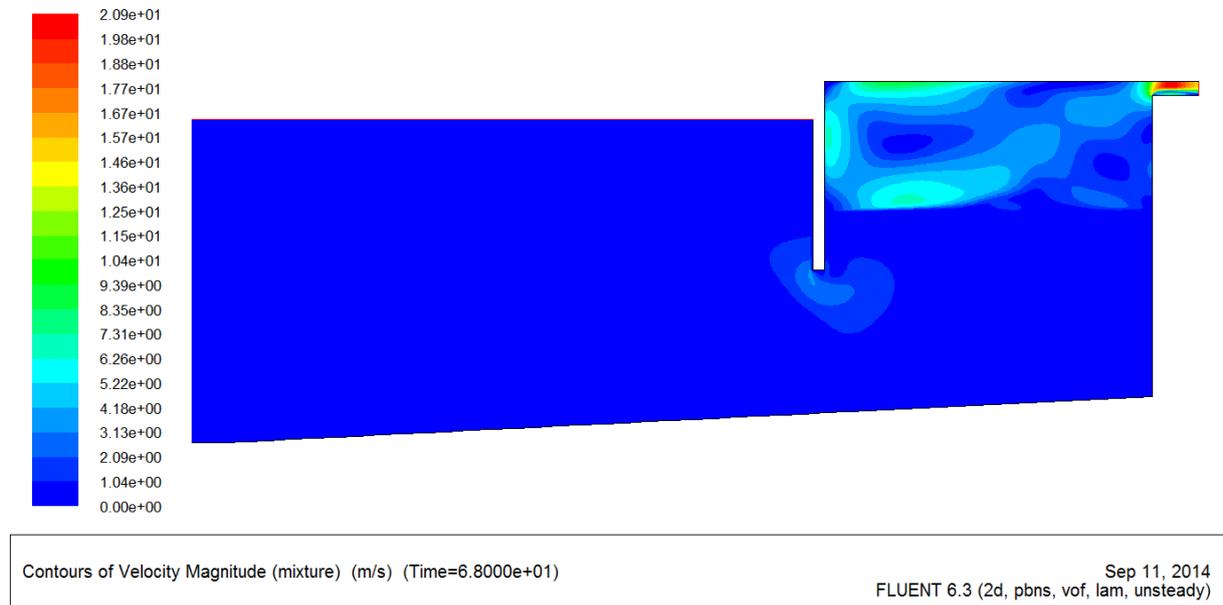


Figura 6.10 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.05$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 2.5$  m.

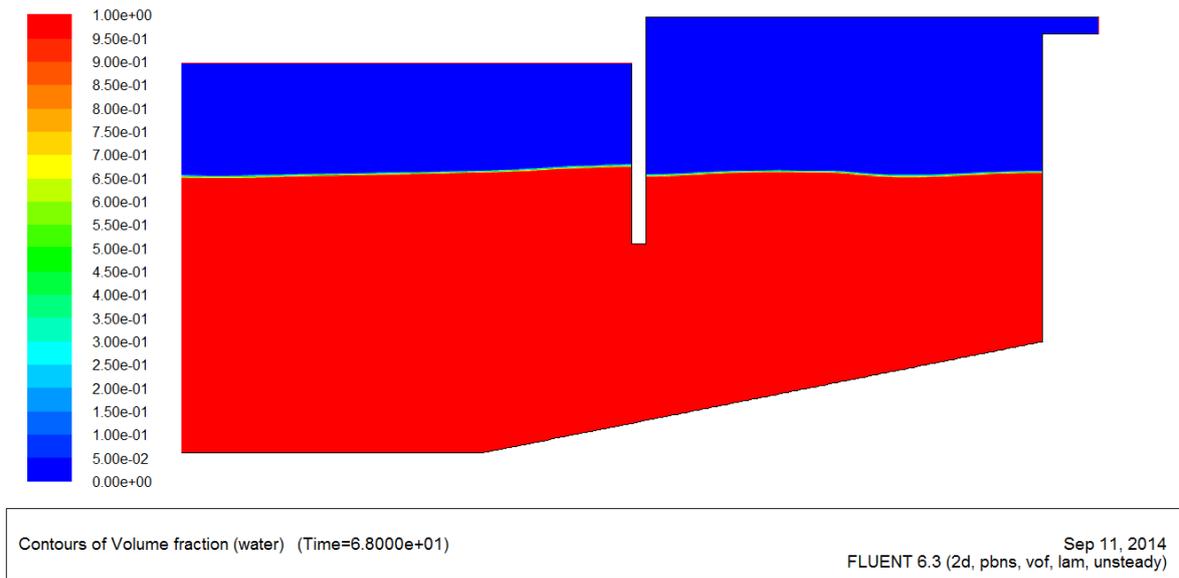


Figura 6.11 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.2$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 2.5$  m.

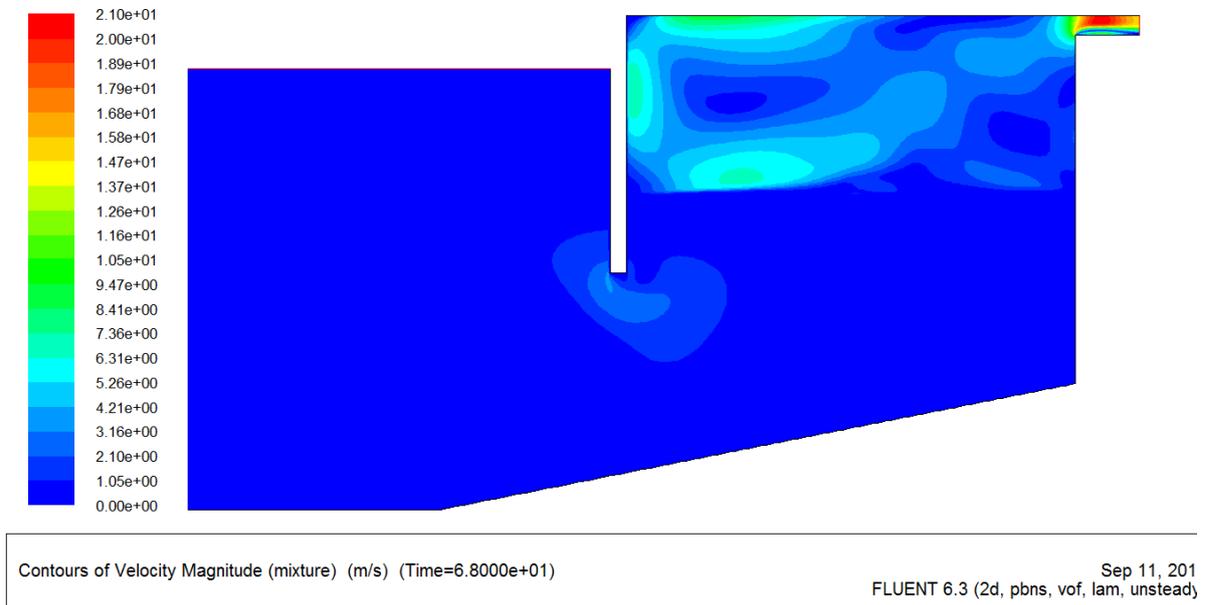


Figura 6.12 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.2$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 2.5$  m.

Para o caso onde a geometria da câmara e da rampa foram otimizadas, i.e.,  $(H_2/L_2)_o = 0.8$  e  $(H_1/L_1)_{oo} = 0.4$  no campo de frações volumétricas, fig. 6.13, é possível observar uma elevação mais significativa na superfície livre da água dentro da câmara do

OWC. Com relação ao campo de velocidades, fig. 6.14, um padrão semelhante ao obtido para as razões  $H_2/L_2 = 0.05$  (fig. 6.10) e  $H_2/L_2 = 0.2$  (fig. 6.12) é observado neste caso. Contudo, as magnitudes do campo de velocidades possuem um incremento com relação aos casos anteriores.

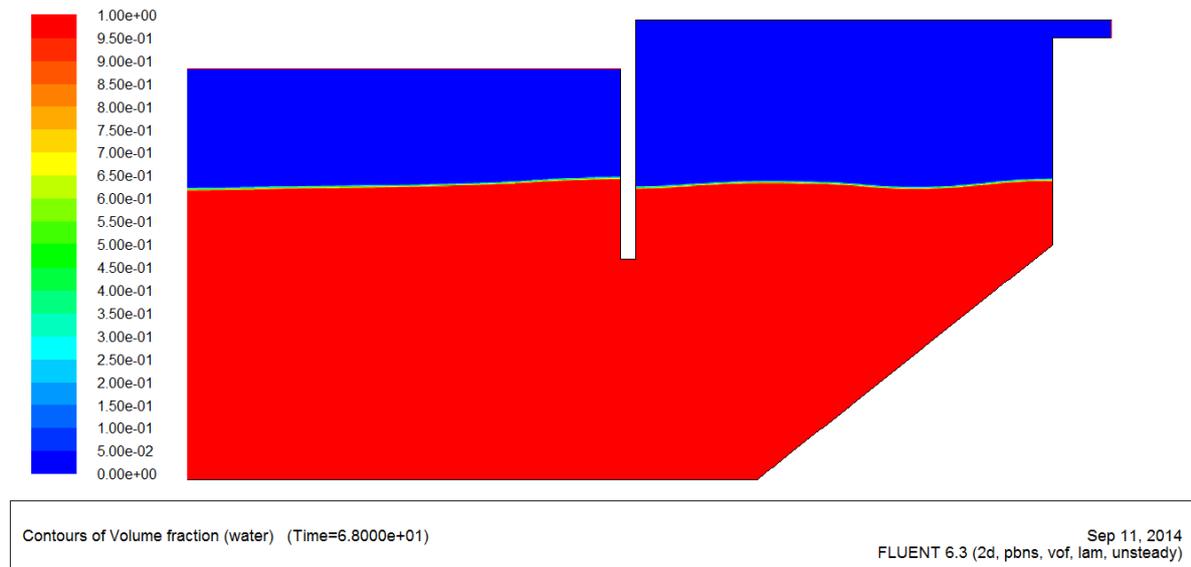


Figura 6.13 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.8$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 2.5$  m.

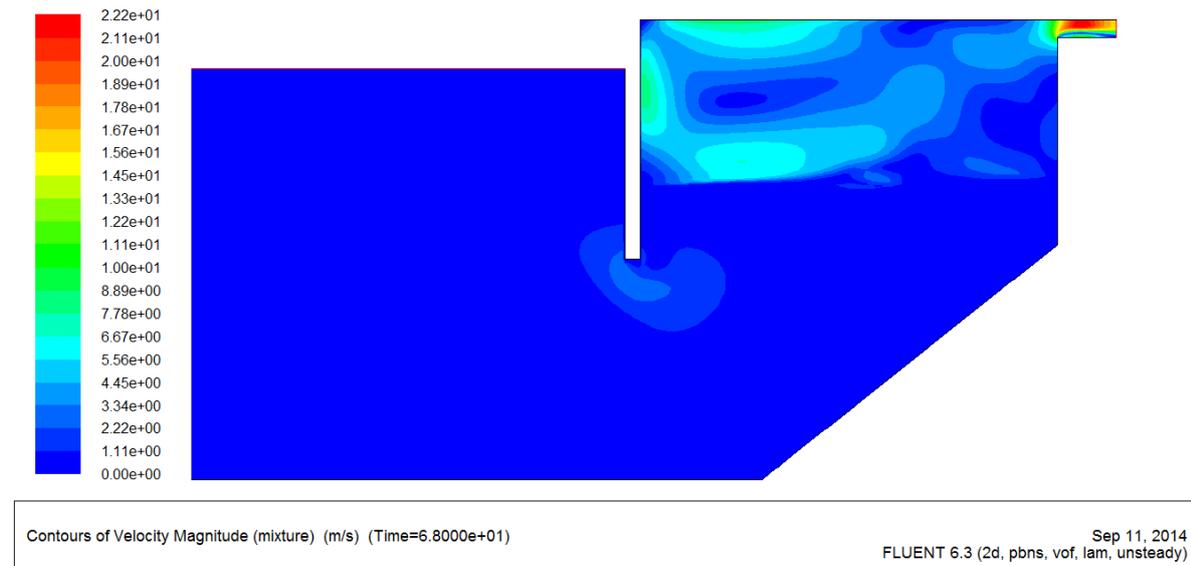


Figura 6.14 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.8$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 2.5$  m.

Com o objetivo de avaliar o efeito do comprimento da borda frontal ( $H_3$ ) sobre a potência disponível no dispositivo OWC, o mesmo estudo de otimização realizado para  $H_3 = 2.5$  m foi repetido para  $H_3 = 5.0$  m. A Figura 6.15 mostra o efeito de  $H_1/L_1$  sobre a potência disponível média para várias razões de  $H_2/L_2$ . Para o caso sem rampa, o efeito de  $H_1/L_1$  sobre  $Pot$  é semelhante para os dois valores de  $H_3$  estudados. Contudo, a razão ótima muda de  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  no caso com  $H_3 = 2.5$  m para  $(H_1/L_1)_o = 1.0$ , mostrando que a geometria ótima da câmara sofre influência do comprimento da borda frontal. A máxima potência obtida para um dispositivo com ausência de rampa ( $H_2/L_2 = 0$ ) aconteceu quando o caso  $H_3 = 5.0$  e  $H_1/L_1 = 1.0$ , obtendo-se valor de  $Pot = 145.1$  W. Se comparado com a potência máxima obtida para o caso de  $H_3 = 2.5$ , também com ausência de rampa, a potência sofreu uma queda de 39.7%.

Para os casos onde  $H_2/L_2 \neq 0.0$  (com rampa) é possível observar que, com exceção da razão ótima  $(H_2/L_2)_o = 0.8$ , a imposição de uma rampa no fundo do tanque conduziu a uma diminuição da potência disponível no dispositivo. Também pode ser visto uma diminuição na faixa de estudo de  $H_1/L_1$  para as razões de  $H_2/L_2 > 0.1$ . Esse fato está relacionado à interferência da borda frontal com a rampa, que causa uma restrição adicional ao escoamento do tanque para dentro da câmara do OWC. Os resultados também permitem observar que não há uma razão geométrica ótima de  $H_2/L_2$  para todas as faixas de  $H_1/L_1$  estudadas. Entre todos os casos estudados a potência duas vezes maximizada ( $Pot_{mm} = 163.42$  W) foi obtida para uma razão  $(H_2/L_2)_o = 0.8$  e  $(H_1/L_1)_{oo} = 0.4$ . Esse caso foi aproximadamente 3.0 vezes superior a pior geometria obtida, i.e., para  $H_2/L_2 = 0.0$  e  $H_1/L_1 = 5.0$ . Contudo, a potência duas vezes maximizada obtida para  $H_3 = 5.0$  m foi 50.7 % inferior à predita com  $H_3 = 2.5$  m, mostrando que nesse caso específico o aumento da borda frontal conduziu a uma diminuição no desempenho do dispositivo.

As Figuras 6.16 e 6.17 ilustram os campos de fração volumétrica de água e ar e campos de velocidade, respectivamente, para um instante de tempo  $t = 68.0$  s e para o caso com  $H_1/L_1 = 0.8$ ,  $H_2/L_2 = 0.05$  e  $H_3 = 5.0$  m. Enquanto isso, as Figuras 6.18 e 6.19 ilustram o caso ótimo obtido para  $H_3 = 5.0$  m, i.e.,  $(H_2/L_2)_{oo} = 0.8$  e  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e no mesmo instante de tempo dos casos ilustrados nas figs. 6.16 e 6.17. Os resultados em geral, mostram que quando a rampa cruza a borda frontal (figs. 6.16 e 6.17) há uma interferência da rampa no escoamento que passa sobre a borda, causando uma restrição ao escoamento e uma diminuição do efeito hidropneumático na câmara. Por outro lado, quando a rampa está totalmente dentro da câmara (no caso ótimo) a elevação da superfície livre começa a ocorrer dentro da câmara, além disso, a rampa não possui interferência no escoamento sob a borda frontal causando uma intensificação do movimento da superfície livre dentro da câmara e

aumentando a magnitude dos campos de velocidades do ar em todo o domínio da câmara e na chaminé.

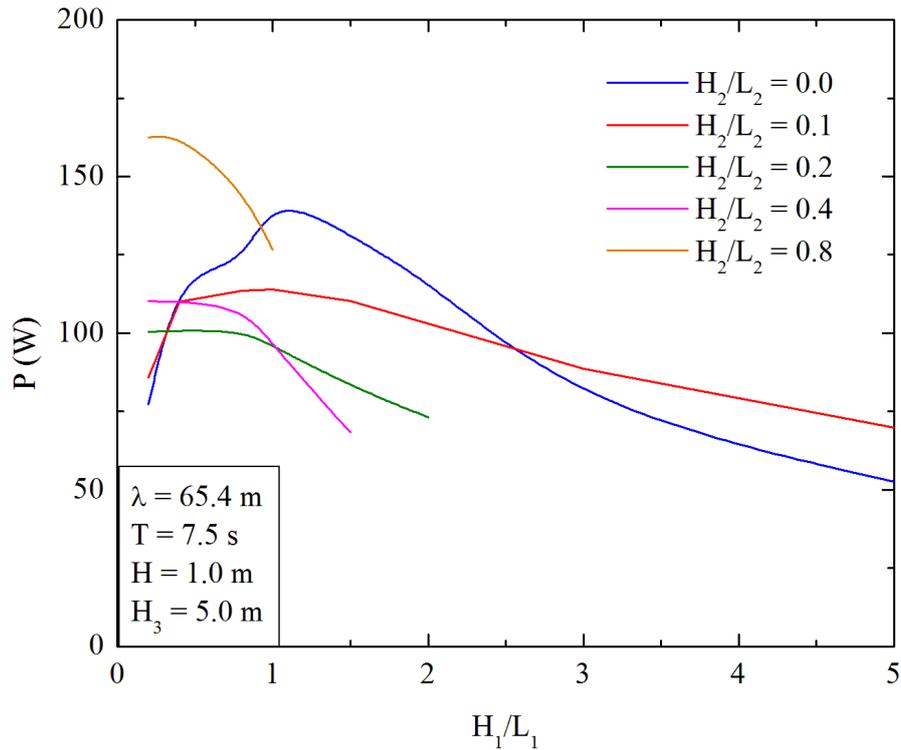


Figura 6.15 – Efeito de  $H_1/L_1$  sobre a potência média no tempo para vários valores de  $H_2/L_2$  e  $H_3 = 5.0$  m.

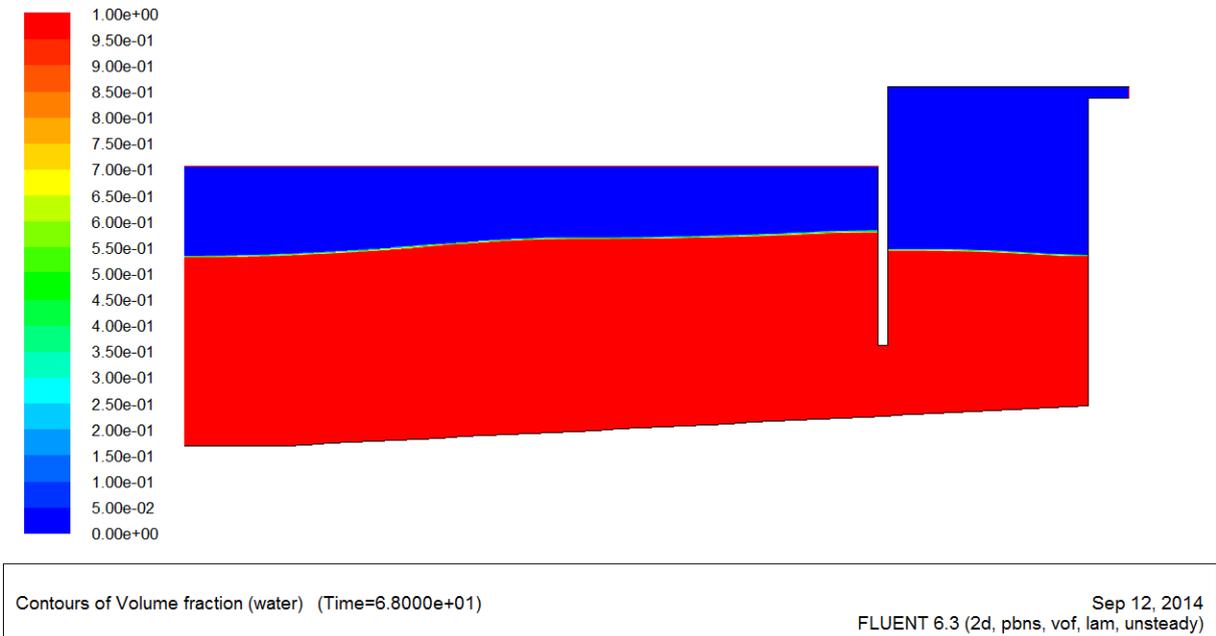
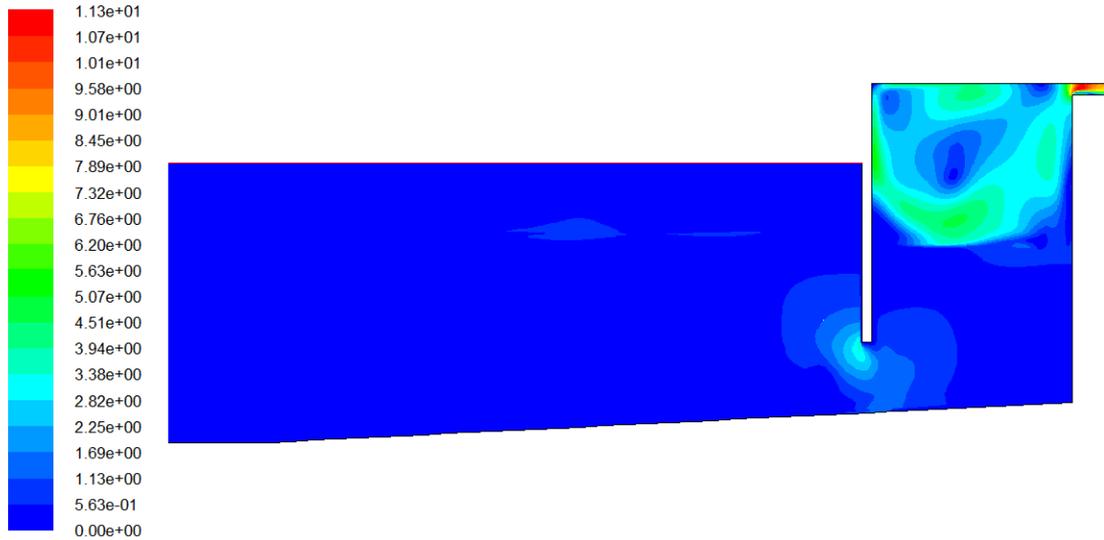


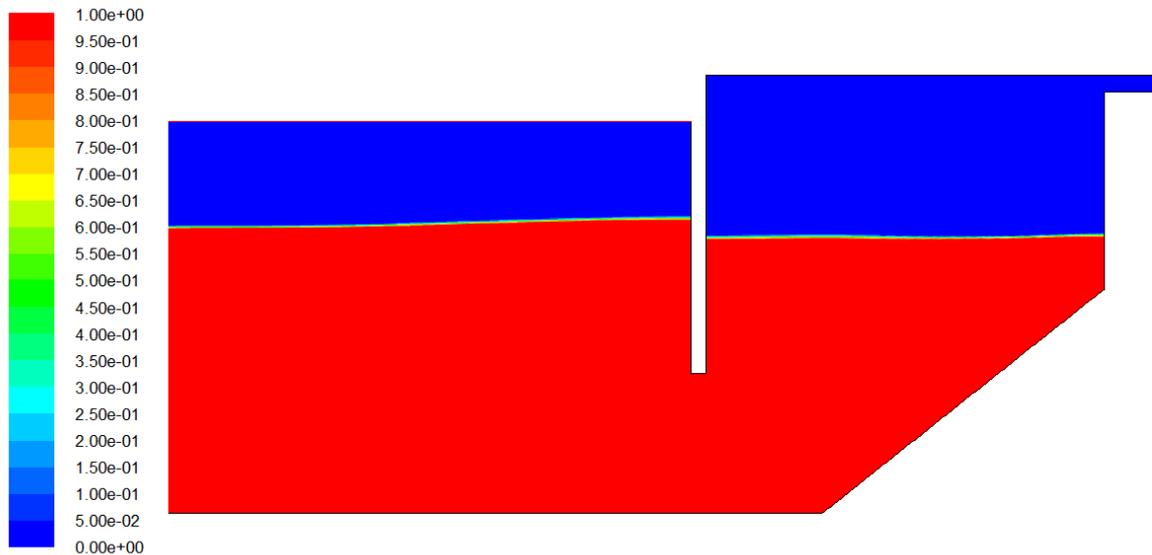
Figura 6.16 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com rampa  $H_2/L_2 = 0.05$  e  $H_1/L_1 = 0.8$  e  $H_3 = 5.0$  m.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s) (Time=6.8000e+01)

Sep 12, 2014  
FLUENT 6.3 (2d, pbns, vof, lam, unsteady)

Figura 6.17 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com rampa  $H_2/L_2 = 0.05$  e  $H_1/L_1 = 0.8$  e  $H_3 = 5.0$  m.



Contours of Volume fraction (water) (Time=6.8000e+01)

Sep 12, 2014  
FLUENT 6.3 (2d, pbns, vof, lam, unsteady)

Figura 6.18 – Fração volumétrica de água em função do tempo em um período de onda para um caso com  $H_2/L_2 = 0.8$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_3 = 5.0$  m.

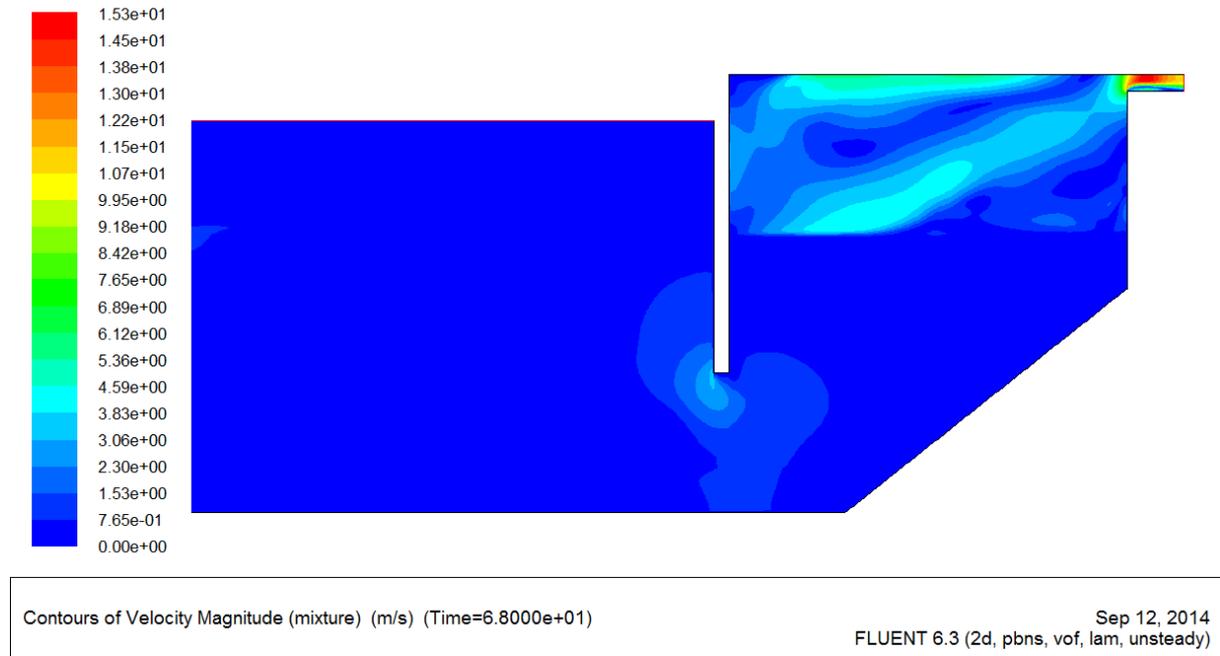


Figura 6.19 – Componente de velocidade em um período de onda para um caso com rampa

$$H_2/L_2 = 0.8, (H_1/L_1)_o = 0.4 \text{ e } H_3 = 5.0 \text{ m.}$$

Os resultados ótimos obtidos nas figs. 6.8 e 6.15 para as diversas razões de  $H_2/L_2$  e para os dois comprimentos da borda frontal ( $H_3 = 2.5 \text{ m}$  e  $H_3 = 5.0 \text{ m}$ ) são sumarizados nas figs. 6.20 e 6.21, respectivamente. Mais precisamente, a fig. 6.20 ilustra o efeito da razão  $H_2/L_2$  sobre a potência uma vez maximizada ( $Pot_m$ ) e sobre a razão  $H_1/L_1$  uma vez otimizada,  $(H_1/L_1)_o$ , para  $H_3 = 2.5 \text{ m}$ , enquanto a fig. 6.21 ilustra o mesmo efeito para  $H_3 = 5.0 \text{ m}$ .

A Figura 6.20 mostra que para  $H_3 = 2.5$  há uma razão intermediária ótima de  $(H_2/L_2)_o = 0.8$  que conduz a potência duas vezes maximizada. Os resultados também mostraram que o pior desempenho para esse caso foi obtido para o extremo inferior de  $H_2/L_2$  estudado ( $H_2/L_2 = 0.0$ ), i.e., o caso sem rampa. Com relação ao efeito de  $H_2/L_2$  sobre a geometria ótima da câmara,  $(H_1/L_1)_o$ , foi observado que há uma insensibilidade da geometria ótima da câmara com relação a geometria da rampa. Os resultados demonstram que apesar da rampa aumentar o desempenho do dispositivo, a geometria ótima da câmara não é alterada, indicando uma maior sensibilidade do desempenho do OWC com a razão  $H_1/L_1$ .

Para  $H_3 = 5.0 \text{ m}$ , fig. 6.21, o efeito de  $H_2/L_2$  sobre a potência uma vez maximizada é bastante diferente do observado para  $H_3 = 2.5 \text{ m}$ . Para o caso com maior  $H_3$  há um ponto de máximo local para  $H_2/L_2 = 0.0$  (caso sem rampa) e o máximo global é obtido para  $(H_2/L_2)_o = 0.8$ . Também pode ser observado que as razões intermediárias de  $H_2/L_2$ , que

representam casos onde a geometria da rampa pode ter interferência com a borda frontal, conduzem aos piores desempenhos do dispositivo. Com relação à geometria ótima, pode ser observado que a razão  $H_2/L_2$  passa a ter uma influência considerável sobre a geometria ótima da câmara  $(H_1/L_1)_o$ . Dessa forma, a variação de um parâmetro geométrico (neste caso  $H_3$ ) pode causar uma variação significativa no efeito das demais geometrias sobre o desempenho fluido dinâmico do escoamento na câmara do OWC.

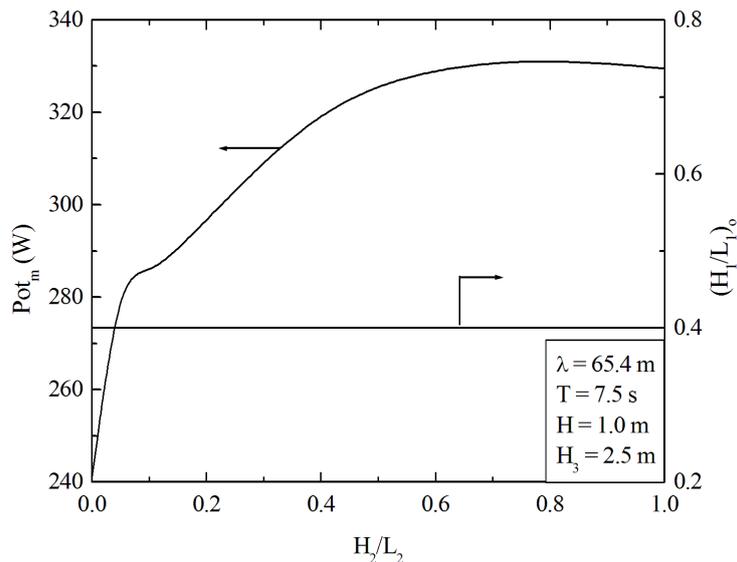


Figura 6.20 - Efeito da razão  $H_2/L_2$  sobre a potência média no tempo uma vez maximizada e suas respectivas geometrias ótimas,  $(H_1/L_1)_o$ , para  $H_3 = 2.5$  m.

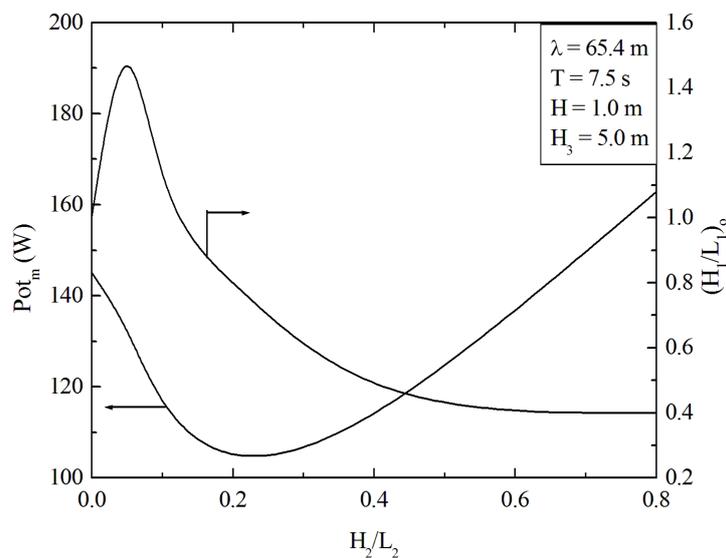


Figura 6.21 - Efeito da razão  $H_2/L_2$  sobre a potência média no tempo uma vez maximizada e suas respectivas geometrias ótimas,  $(H_1/L_1)_o$ , para  $H_3 = 5.0$  m.

## 7. CONCLUSÕES

Para este trabalho foi realizado um estudo numérico de análise e otimização com o objetivo de avaliar as geometrias que conduzem a um melhor desempenho fluidodinâmico de um dispositivo OWC *onshore* em escala real. Esta análise foi realizada através do método *Constructal Design* e considerou-se o dispositivo com área interna da câmara constante, variando se suas largura e altura, e uma rampa de área constante e inclinação variável ao fundo do dispositivo.

O problema apresenta três graus de liberdade:  $H_1/L_1$  (razão entre altura e comprimento da câmara do dispositivo OWC),  $H_2/L_2$  (razão entre altura e comprimento da rampa ao fundo do dispositivo) e  $H_3$  (profundidade frontal do *Lip*) e duas restrições geométricas (área interna do dispositivo OWC constante e a área da rampa constante). A geometria foi variada de forma a determinar a condição ótima de potência média obtida na chaminé do dispositivo, onde se é inserida a turbina do dispositivo. Para tal estudo foi resolvido um escoamento transiente de uma mistura ar-água no regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento foi obtida através do Método de Volumes Finitos. O método *Volume of Fluid* foi empregado para o tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares em um tanque de ondas e sua interação com o dispositivo. Foram utilizados os softwares GAMBIT, para a construção do domínio computacional, e FLUENT, que através do Método dos Volumes Finitos (MVF) resolve as equações governantes do problema.

Neste trabalho são obtidas recomendações teóricas sobre as formas geométricas que permitem maximizar a potência do dispositivo através do *Constructal Design*. Nas condições estabelecidas e válidas para o presente estudo, os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- a geometria foi otimizada com dois graus de liberdade variando-se as razões  $H_1/L_1$  e  $H_2/L_2$  mantendo-se fixo  $H_3$  e os parâmetros de onda ( $\lambda = 65.4$  m;  $T = 7.5$  s;  $d = 10.0$  m e  $H = 1.0$  m). Os resultados foram analisados no intervalo de tempo de 37.5 s até 75.0 s. Em todos os casos com  $H_3 = 2.5$  m, independente da razão de rampa  $H_2/L_2$ , a condição ótima de área da câmara manteve-se constante para uma razão  $(H_1/L_1)_o = 0.4$ . Todos os valores de potência média obtidos a partir da razão  $H_2/L_2 > 0.0$  foram significativamente melhorados quando comparados com a condição de ausência de rampa ( $H_2/L_2 = 0.0$ ) demonstrando ser benéfico ao conjunto;

Os resultados demonstram a importância da avaliação geométrica, bem como, a aplicabilidade e a eficiência do *Constructal Design* para a otimização de dispositivos do tipo OWC para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. A geometria ótima global obtida para  $H_3 = 2.5$  m,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $(H_2/L_2)_{oo} = 0.8$  apresentou uma potência 37.7 % maior do que a obtida para a melhor geometria sem rampa, i.e.,  $H_3 = 2.5$ ,  $(H_1/L_1)_o = 0.4$  e  $H_2/L_2 = 0.0$ . Em comparação com a melhor geometria obtida para  $H_3 = 5.0$  m,  $(H_1/L_1)_{oo} = 0.4$  e  $(H_2/L_2)_o = 0.8$ , o desempenho foi 50.7 % superior.

Também foi observado que para  $H_3 = 5.0$  m a inserção da rampa de uma forma geral causa um aumento da resistência ao escoamento, levando a uma piora no desempenho do dispositivo. Esse comportamento foi contrário ao que foi obtido para  $H_3 = 2.5$  m, onde em praticamente todos os casos a inserção da rampa conduziu a um aumento no desempenho do dispositivo OWC.

Com relação ao efeito de  $H_2/L_2$  sobre a potência uma vez maximizada ( $Pot_m$ ) e sobre a geometria ótima da câmara,  $(H_1/L_1)_o$ , o mesmo foi bastante influenciado pelo comprimento da borda frontal ( $H_3$ ). Para  $H_3 = 2.5$  m, a razão  $(H_1/L_1)_o$  foi insensível à variação de  $H_2/L_2$ , enquanto para  $H_3 = 5.0$  m foi observada uma grande variação de  $(H_1/L_1)_o$  com a razão  $H_2/L_2$ .

Para prosseguimento deste trabalho são propostas as seguintes análises:

- comparar a localização de um dispositivo de OWC levando em conta um dispositivo *offshore* (localizado no meio do tanque de ondas) com os resultados obtidos em um dispositivo *onshore* (localizado no final do tanque de ondas) realizados aqui;
- otimizar geometricamente um dispositivo OWC, adotando uma abordagem numérica tridimensional e comparar com abordagem numérica bidimensional com objetivo de avaliar a possibilidade de extrapolação de resultados obtidos em uma geometria bidimensional para geometria tridimensional;
- comparar os resultados obtidos entre a presente metodologia numérica com os obtidos com outras metodologias, como por exemplo; a implementada no software OPENFOAM;
- complementar o estudo do efeito de  $H_3$  sobre a potência disponível duas vezes maximizada,  $Pot_{mm}$ , e suas respectivas geometrias ótimas,  $(H_2/L_2)_{oo}$  e  $(H_1/L_1)_o$ ;
- testar outras restrições de área para a câmara ( $A_1$ ) e para a rampa ( $A_2$ ).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AbuBakr S. Bahaj, Generating electricity from the oceans, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, pp 3399– 3416, 2011.
- Agencia Nacional de Energia Elétrica (AANEL), 2008. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3. ed., Brasília., 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>.
- Anant, L.; Elangovan, M., CFD Simulation and validation of flap type wave-maker, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008.
- André, R. A. A., **Modelo de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal, 2010.
- Bahaj, A. S., Generating electricity from the oceans, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, pp 3399-3416, 2011.
- Barreiro, T. G., **Estudo Da Interação de uma Onda Monocromática com um Conversor de Energia**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 87 P, 2009.
- Basak, T.; The law of life: The bridge between Physics and Biology, **Phys Life Rev.** Vol. 8, pp. 249–252, 2011.
- Bello-Ochende, T.; Liebenberg, L.; Meyer, J. P.; Constructal cooling channels for micro-channel heat sinks, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 50, pp 4141-4150, 2007.
- Bejan, A., 1997, "Constructal-Theory Network Of Conducting Paths For Cooling A Heat Generating Volume", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 4, Pp. 799–816.
- Bejan, A., 1997, "**Constructal-Theory Network Of Conducting Paths For Cooling A Heat Generating Volume**", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 4, Pp. 799–816.
- Bejan, A.; Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume, **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. 40, pp. 799–816, 1997.
- Bejan, A.; **Shape and Structure, from Engineering to Nature**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- Bejan, A.; Lorente, S.; Constructal multi-scale and multi-objective structures, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 29, pp 689-710, 2005.
- Bejan, A.; Lorente, S.; **Design with Constructal Theory**. Wiley, Hoboken, 2008.
- Bejan, A.; Zane, J.; **Design in nature**. Doubleday, USA, 2012.
- Bejan, A.; Lorente, S.; Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society". **Journal of Applied Physics**, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301-20, 2013.
- Boccotti, P., Comparison between a U-OWC and a conventional OWC, **Ocean Engineering**, v. 34, pp 799-805, 2007.
- Bortoli, A. L., ; **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 136p, 2000.
- Brum, R.; **Modelagem Computacional De Trocadores De Calor Solo-Ar**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (Furg), Rio Grande, RS, Brasil, 2013.
- Bryant, N. F.; **Tsunami. The underrated hazard**. Cambridge University Press, UK, 2001.
- Carneiro, M. L.; **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Clément, A.; McCullen, P.; Falcão, A.; Fiorentino, A.; Gardner, F.; Hammarlund, K.; Lemonis, G.; Lewis, T.; Nielsen, K.; Petroncini, S.; Pontes, M. T.; Schild, P.; Sjöström, B. O.; Sørensen, H. C.; Thope, T., Wave energy in Europe: current status and perspectives, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, pp 405-431, 2002.

Chakrabarti, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.

Conde, J. M. P.; Gato, L. M. C., Numerical study of fair-flow in an oscillating water column wave energy converter, **Renewable Energy**, v. 33, pp 2637-2644, 2008.

Cruz, J. M. B. P.; Sarmiento, A. J. N. A., Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, pp 61, 2004.

Dean, R. G., Dalrymple, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientist**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p., 1991.

Dizadji, N.; Sajadian, S. E., Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, v. 36, pp 2360-2366, 2011.

Dos Santos, E.; **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos não Reativos com Transferência de Calor por Convecção e Radiação Térmica em Meios Participantes**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica (PROMEC), Porto Alegre, RS, Brasil, 2011.

Dos Santos, E. D., Machado, B. N., Lopes, N. R., Souza, J. A., Teixeira, P. R. F., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O.; **Constructal Design of Wave Energy Converters**, In: L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan (Org.), **Constructal Law and the Unifying Principle of Design**, 1st Ed, Springer, pp. 275-294, 2013.

Dos Santos, E. D. ; Machado, B. N. ; Zanella, M. M. ; Gomes, M. N. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A. ; Rocha, L. A. O.; **Numerical Study Of The Effect Of The Relative Depth On The Overtopping Wave Energy Converters According To Constructal Design**. Defect And Diffusion Forum, v. 348, pp. 232-244, 2014.

Duarte, C. R.; **Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-Mg, 196 P, 2006.

Elangovan, M., Simulation of irregular waves by CFD, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011.

Falcão, A. F., The shoreline OWC wave power plant at the Azores". **4th European Wave Energy Conference**, Dinamarca, 2000.

Falcão, A. F.; Rodrigues, R. J. A., Stochastic modelling of OWC wave power plant performance, **Applied Ocean Research**, v. 24, pp 59-71, 2002.

Falcão, A. F., Wave energy utilization: A review of the technologies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, pp 899-918, 2010.

Ferziger, J. H.; Peric, M.; **Computational Methods For Fluid Dynamics**, Springer, Berlin; 1997.

FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2007.

Fortuna, A. O; **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações**, Edusp, São Paulo: Edusp, 2000.

Gomes, M. N.; **Modelagem computacional de um dispositivo coluna d'água oscilante para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**. Dissertação de Mestrado, FURG, Rio Grande, 2010.

Gomes, M. N.; Isoldi, L. A.; Santos, E. D.; Rocha, L. A. O., Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques, **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, São Luís, 2012a.

Gomes, M. N.; Nascimento, C. D.; Bonafini, B. L.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O., Two-dimensional geometric optimization of na oscillating water column converter in laboratory scale, **Thermal Engineering**, v. 11, pp 30-36, 2012b.

Gomes, M. N.; Olinto, C. R.; Rocha, L. A. O.; Souza, J. A.; Isoldi, L. A., Computational modeling of a regular water tank, Universidade do Rio Grande, 2009.

Gonçalves, A. M.; Utilização de dados de altímetro na avaliação de recursos energéticos das ondas do mar. Relatório de estágio profissionalizante. Portugal, 2003.

Goulart, M. M.; **Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento onshore em escala real empregando constructal design**, Dissertação de Mestrado, FURG, Rio Grande, 2014.

Grimmler, J. do A. M.; **Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de Coluna de Água Oscilante: Simulação Numérica e estudo geométrico**. Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande, 2013.

Heath, T.; **The Construction, Commissioning and Operation of the LIMPET Wave Energy Collector**, Wavegen, Reino Unido, 2001.

Hirt, C. W.; Nichols, B. D.; Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, vol. 39, n. 1, pp. 201-225, 1981.

Holthuijsen, Leo H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. New York: Cambridge University Press, 2007.

Horko, M; **CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter**, School of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Computing and Mathematics, Requirements for the Degree of Master of Engineering Science, The University of Western, Australia, pp. 145, 2007.

Iahnke, S. L. P. "**Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**", Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande, 2010.

Kim, Y.; Lorente, S.; Bejan, A.; Constructal multi-tube configuration for natural and forced convection in croos-flow; **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 53, pp 5121-5128, 2010.

Kofoed, J. P.; Frigaard, P.; Madsen, E. F.; Sørensen, H. C., Prototype testing of the wave energy converter wave dragon, **Renewable Energy**, v. 31, pp 181-189, 2006.

Kofoed, J. P.; Teed, J.; Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter, **Renewable Energy**, v. 34, pp 711-717, 2009.

Levien, F. V.; Pons, R. P.; **Otimização geométrica da câmara de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo OWC para diferentes comprimentos da borda frontal**; Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2014.

Letzow, M.; Tibola, L.; Isoldi, L. A.; Santos, E. D.; Rocha, L. A. O.; Optimization of the geometry of electric motors fins by means of constructal design, **Constructal Law Conference**, Porto Alegre, 2011.

Liang, X.; Yang, J.; Li, J.; Xiao, L.; Li, X., Numerical simulation of irregular wave – simulating irregular wave train, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 2010.

Ling, L.; Yongcan, C.; Yuliang, L.; Volume of fluid (VOF) method for curved free surface water flow in shallow open channel, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 2001.

Liu, Z.; Hyun B.; Jin, J.; **Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC**, Journal Of The Korean Society For Marine Environmental Engineering, v. 11, Nº 1; 2008a.

Liu, Z.; Hyun B.; Hong, K.; **Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion**. In: Proceedings Of The Eighteenth (2008) International Offshore And Polar Engineering Conference, Vancouver, Canada; 2008b.

Lopes, N. et al.; **Constructal design optimization of the geometry of an oscillating water column wave energy converter (OWC-WEC)**. In Proceedings Constructal law conference, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

López, I., Andreu, J., Ceballos, S. Alegría, I. M., Kortabarria, I.; **Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 413 – 434, 2013.

Lorenzini, G.; Rocha, L. A. O.; Constructal design of T-Y assembly of fins for an optimized heat removal; **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 52, pp 1458-1463, 2009.

Lorenzini, G.; Biserni, C; Link, F. B.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D.; Rocha, L. A. O.; Constructal Design of T-Shaped Cavity for Several Convective Fluxes Imposed at the Cavity Surfaces; **Journal of Engineering Thermophysics**, Vol. 22, N° 4, pp 309-321, 2013.

Lv, X.; Zou, Q.; Reeve, D.; Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method, *Adv. Water Resour.* Vol. 34, pp 1320-1334, 2011.

MacCormick, M.; Rehak, J.; Williams, B., An experimental study of a bidirectional radial impulse turbine for pneumatic wave energy conversion, **Mastering the Oceans through Technology**, v. 2, pp 866-870, 1992.

Machado, B. N., **Modelagem Computacional e Otimização geométrica de um dispositivo de galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**, Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande, 2012.

Mala, K.; Jayaraj, J.; Jayashankar, V.; Muruganandam, T. M.; Santakumar, S.; Ravindran, M.; Takao, M.; Setoguchi, T.; Toyota, K.; Nagata, S., A twin unidirectional impulse turbine topology for OWC based wave energy plants – experimental validation and scaling, **Renewable Energy**, v. 36, pp 307-314, 2011.

Maliska, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**; Rio de Janeiro: LTC, 2004.

Margheritini, L., Vicinanza, D. and Frigaard, P.; SSG wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, v. 34, pp 1371-1380, 2009.

Massel, S. R.; **Fluid Mechanics For Marine Ecologists**. Germany: Springer, 565p, 1999.

Oliveira, L. O. de, **Otimização das dimensões da câmara hidropneumática de um equipamento de extração de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante utilizando a metodologia constructal design**, Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2012.

Paredes, G. M., **Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

Patankar, S. V.; Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw Hill, New York, 1980.

Perdigão, J.; Sarmiento, A., Overall-efficiency optimisation in OWC devices, **Applied Ocean Research**, v. 27, pp 157-166, 2003.

Pereiras, B.; Castro, F.; Marjani, A.; Rodriguez, M. A., An improved radial impulse turbine for OWC, **Renewable Energy**, v. 36, pp 1477-1484, 2011.

Rezanejad, K.; Bhattacharjee, J.; Soares, C. G., Stepped sea bottom effects on the efficiency of nearshore oscillating water column device, **Ocean Engineering**, v. 70, pp 25-38, 2013.

Rocha, L. A. O.; Lorente, S.; Bejan, .; Tree-shaped vascular wall designs for localized intense cooling; **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 52, pp 4535-4544, 2009.

Santos, K. G., **Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro por CFD com Malhas Tridimensionais**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 110 P, 2008.

Sarmento, A. J.; Brito-Melo, A.; Pontes, M. The influence of the wave climate on the design and annual production of electricity by OWC wave power plants. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME**. Vol. 125, 2003.

Savicki, D. L.; **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil; 2007.

Schlichting, H.; **Boundary Layer Theory 7th edn**. McGraw-Hill, Nova York, USA, pp. 817 ; 1979.

Silveira, F. L.; Varriale, M. C.; Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis – Caderno brasileiro de ensino de física, 2004.

Sterling, M. J. H.; et al. Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated Into Power Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.23, n.3, p.1196-1204, August 2008.

Tannehill, J. C.; Anderson, D. A.; Pletcher, R. H.; **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, 2. Ed., Taylor & Francis, USA, 1997.

Thorpe, T. W.; A brief review of wave energy. Harwell Didcot Oxfordshire, UK, 1999. Versteeg, H. K.; Malalasekera, W.; An Introduction to Computational Fluid Dynamics – the Finite Volume Method, Longman, England, 1995.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**, Longman, Malasia, 257 p, 1995.

Zabihian, F.; Fung, A. S., Review of marine renewable energies: case study of iran, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, pp 2461-2474, 2011.

Zhang, D.; Li, W.; Lin, Y., Wave energy in China: Current status and perspectives, **Renewable Energy**, v. 34, pp 2089-2092, 2009.

Wavegen; **Islay LIMPET Project Monitoring Final Report**, Reino Unido, 37 p. Disponível em: <http://www.wavegen.co.uk>, 2002

