

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

*CONSTRUCTAL DESIGN* DE DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS  
ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO COLUNA DE ÁGUA  
OSCILANTE

por

Mateus das Neves Gomes

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, Agosto de 2014.

*CONSTRUCTAL DESIGN* DE DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS  
ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO COLUNA DE ÁGUA  
OSCILANTE

por

Mateus das Neves Gomes  
Mestre em Modelagem Computacional

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Aprovada por:

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera, UFPR

Prof. Dr. Ivoni Carlos Acunha Junior, IFRS

Prof. Dr. Adriane Prisco Petry, UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, agosto de 2014.

*“Ambição é o caminho para o sucesso.  
Persistência é o veículo no qual se chega lá.”*  
(Bill Eardley)

*Dedico este trabalho a minha família e aos meus amigos que me apoiaram nessa trajetória.*

*Dedico este trabalho especialmente a minha adorada Amanda e aos meus queridos pais*

*Izabel Cristina e Marcos Vinicio.*

## AGRADECIMENTOS

À minha namorada Amanda, pelo amor incondicional, por compreender as minhas dificuldades, por entender os muitos momentos de ausência e acima de tudo por me incentivar na realização deste trabalho.

A meus pais, Izabel Cristina e Marcos Vinicio, pelo carinho, por todo o apoio e incentivo, por entenderem os muitos momentos de ausência e por terem me guiado no caminho bem e possibilitarem meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu irmão Rafael por todo o apoio, incentivo e por entender os muitos momentos de ausência.

Aos meus avós, Margarida e Augusto, pelo carinho, apoio, incentivo e por entender os muitos momentos de ausência.

Ao meu sogro Luiz Carlos pelo apoio e incentivo e a minha sogra Izabel pelo apoio, incentivo e contribuição neste trabalho.

À minha cunhada Sabrina, ao meu cunhado Charles Vinicius e à minha afilhada Bianca pelo apoio, incentivo e por sempre estarem presentes.

À minha cunhada Bethânia pelo apoio, incentivo e por estar ao lado da Amanda neste período de ausência.

Aos meus primos Willian e Pietra pela acolhida em Porto Alegre.

Ao meu orientador, professor Luiz Alberto Oliveira Rocha, pelos ensinamentos, pelo incentivo, amizade, confiança e pelo exemplo profissional a ser seguido.

Aos meus grandes amigos, professores Elizaldo Domingues dos Santos e Liércio André Isoldi, pelos ensinamentos, incentivo, amizade, confiança e pela parceria profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande Sul por todo apoio e suporte prestados.

Ao Instituto Federal do Paraná, em especial ao diretor geral do Campus Paranaguá, professor Roberto Teixeira Alves, por possibilitar que mesmo no exercício das minhas funções como docente pudesse concluir este trabalho.

Aos meus grandes amigos do IFPR Paranaguá, professores, Cristiano, Emilio, Euclides, Fabiano, Hércio, Ricardo, Sérgio, Siedro e Tiago pelo apoio, incentivo, por compartilharem as angústias e por tornarem as semanas mais divertidas.

Aos meus colegas da área da matemática do IFPR Paranaguá, professores, Ana Paula, Carmem Lúcia, João do Carmo, Loriete, Roberta, Tiago e Wellington pelo apoio, incentivo e por entenderem e colaborarem nos momentos de ausência.

Aos meus alunos bolsistas do IFPR Paranaguá, Aluizio, Aron, Beatriz, Cristina, Kamylla, Leandro, Luana e Murilo pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus alunos do IFPR Paranaguá com quem adquiri muito conhecimento.

Aos membros da banca, professores, Adriane Prisco Petry, Ivoni Carlos Acunha Junior e Marcelo Risso Errera pelo tempo dispensado, sugestões e críticas apresentadas a esta tese.

E a todos que direta ou indiretamente, colaboraram para a conclusão deste trabalho

## RESUMO

### *CONSTRUCTAL DESIGN* DE DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

O presente trabalho apresenta um estudo numérico bidimensional sobre a otimização da geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. O objetivo principal é, através da modelagem computacional de um dispositivo cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO) e do emprego de *Constructal Design*, maximizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. Essa técnica é baseada na *Teoria Constructal*. O aspecto inédito deste trabalho, em relação aos estudos disponíveis na literatura, é o fato de levar em conta o clima de ondas de uma dada região e, a partir disso, dimensionar o dispositivo de modo que ele tenha um desempenho otimizado. Para tanto, foi empregado o método *Constructal Design*, os graus de liberdade empregados são:  $H_1/L$  (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo CAO). A relação  $H_2/l$  (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é considerada um parâmetro fixo. Foram realizados estudos levando em conta uma onda em escala de laboratório e um espectro de ondas real. Foi também realizado um estudo sobre a influência da perda de carga da turbina através de uma restrição física. Para a solução numérica foi empregado um código comercial de dinâmica dos fluidos computacional, FLUENT<sup>®</sup>, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). A geometria e a geração a malha foi realizada no software GAMBIT<sup>®</sup>. O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado. Os resultados obtidos mostram que é possível estabelecer uma razão de  $H_1/L$  ótimo, conhecendo-se o clima de ondas, ou seja, o recomendável é que esta razão seja igual a quatro vezes a altura da onda dividido pelo comprimento da onda incidente.

Palavras-chave: Energia das Ondas do Mar, Coluna de Água Oscilante, *Constructal Design*, *Volume of Fluid*, Modelagem Computacional.

## ABSTRACT

### CONSTRUCTAL DESIGN OF AN OSCILLATING WATER COLUMN DEVICE FOR THE CONVERSION OF WAVE OCEAN ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY

The present work presents a two-dimensional numerical study about the geometric optimization of an ocean Wave Energy Converter (WEC) into electrical energy. The main goal is, through computational modeling of a device whose operating principle is the Oscillating Water Column (OWC) and from employment Constructal Design, to maximize the conversion of energy of ocean waves into electricity. This technique is based on Constructal Theory. The inedited aspect of this work comparing to the available studies is that it takes into account the wave climate of a given region to design the device so that it achieves optimum performance. Constructal Design is employed varying the degrees of freedom  $H_1/L$  (ratio between the height and length of OWC chamber) and  $H_3$  (lip submergence). While the relation  $H_2/l$  (ratio between height and length of chimney) is kept fixed. Studies were performed considering a wave on a laboratory scale and a spectrum of real waves. Yet a study of the influence of the turbine pressure losses was performed using a physical constraint. For the numerical solution it is used the Computational Fluid Dynamic (CFD) commercial code FLUENT<sup>®</sup>, based on the Finite Volume Method (FVM). The geometry and mesh generation was performed in GAMBIT<sup>®</sup> software. The multiphasic Volume of Fluid (VOF) model is applied to tackle with the water-air interaction. The computational domain is represented by an OWC device coupled with the wave tank. The results show that it is possible to establish a relationship of  $H_1/L$  optimum, if the wave climate is know. It is recommended that this ratio be equal to four times the height of the wave divided by the length of the incident wave.

Keywords: Wave energy, Oscillating Water Column, Constructal Design, Volume of Fluid, Computational modeling.

# ÍNDICE

|  | Pág.      |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. MOTIVAÇÃO .....   | 1         |
| 1.2. PROPOSTA DO TRABALHO E OBJETIVOS .....  | 4         |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....   | 5         |
| <b>2. ENERGIA DAS ONDAS DO MAR .....</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO .....  | 8         |
| 2.2. CONVERSOR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) .....  | 10        |
| 2.3. MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CONVERSORES TIPO CAO .....   | 13        |
| 2.4. OTIMIZAÇÃO DE CONVERSORES TIPO CAO .....  | 17        |
| 2.5. MODELAGEM DA PERDA DE CARGA DA TURBINA EM UM DISPOSITIVO CAO .....  | 19        |
| <b>3. CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO A SISTEMAS DE CONVERSÃO DE<br/>ENERGIA DAS ONDAS DO MAR .....</b>                            | <b>21</b> |
| 3.1. TEORIA CONSTRUCTAL .....  | 21        |
| 3.2. CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO A PROBLEMAS DE ENGENHARIA .....   | 22        |
| 3.3. CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO AO CONVERSOR TIPO CAO .....   | 24        |
| 3.4. FORMULAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS<br>ONDAS DO MAR ATRAVÉS DO CONSTRUCTAL DESIGN ..... | 26        |
| <b>4. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO .....</b>   | <b>29</b> |
| 4.1. TEORIA DE ONDAS OCEÂNICAS .....   | 29        |
| 4.2. DOMÍNIO COMPUTACIONAL .....   | 36        |
| 4.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....   | 37        |
| 4.4. GERAÇÃO DA MALHA .....  | 38        |
| 4.5. MODELO VOLUME OF FLUID .....  | 40        |
| 4.6. MODELO NUMÉRICO .....   | 42        |
| 4.6.1. <i>Método dos Volumes Finitos</i> .....   | 43        |
| 4.6.2. <i>Programas GAMBIT e FLUENT</i> .....  | 46        |
| 4.6.3. <i>Discretização do modelo VOF</i> .....  | 46        |
| 4.6.4. <i>Algoritmos de solução</i> .....  | 48        |
| 4.6.5. <i>Esquemas de discretização: Funções de Interpolação</i> .....   | 50        |
| 4.6.6. <i>Acoplamento pressão-velocidade</i> .....   | 52        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.6.7. Esquemas de avanço no tempo.....  | 53         |
| 4.6.8. Solver – Multigrid Algébrico(AMG).....  | 54         |
| <b>5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....</b>   | <b>57</b>  |
| 5.1. VARIÁVEIS DE INTERESSE .....  | 58         |
| 5.2. VERIFICAÇÃO DA GERAÇÃO DA ONDA .....  | 61         |
| 5.3. VALIDAÇÃO CONSIDERANDO O DISPOSITIVO CAO .....  | 63         |
| <b>6. RESULTADOS .....</b>   | <b>67</b>  |
| 6.1. APLICAÇÃO DE <i>CONSTRUCTAL DESIGN</i> A UM CONVERSOR TIPO CAO EM ESCALA DE LABORATÓRIO .....   | 67         |
| 6.2. APLICAÇÃO DE <i>CONSTRUCTAL DESIGN</i> A UM CONVERSOR TIPO CAO EM ESCALA REAL                   |            |
| 73   |            |
| 6.2.1. Onda $T = 5 \text{ s}$ ( $V_E = 37,6 \text{ m}^3$ ) .....                                     | 76         |
| 6.2.2. Onda $T = 6 \text{ s}$ ( $V_E = 48,5 \text{ m}^3$ ) .....                                     | 86         |
| 6.2.3. Onda $T = 7 \text{ s}$ ( $V_E = 60 \text{ m}^3$ ) .....                                       | 89         |
| 6.2.4. Onda $T = 8 \text{ s}$ ( $V_E = 71 \text{ m}^3$ ) .....                                       | 91         |
| 6.2.5. Onda $T = 9 \text{ s}$ ( $V_E = 81,8 \text{ m}^3$ ) .....                                     | 93         |
| 6.2.6. Onda $T = 11 \text{ s}$ ( $V_E = 103 \text{ m}^3$ ) .....                                     | 95         |
| 6.2.7. Onda $T = 12 \text{ s}$ ( $V_E = 113,3 \text{ m}^3$ ) .....                                   | 97         |
| 6.2.8. Análise no espectro de onda.....  | 101        |
| 6.3. METODOLOGIA PARA CONSIDERAR NO MODELO COMPUTACIONAL A PERDA DE CARGA CAUSADA PELA TURBINA ..... | 106        |
| 6.4. OTIMIZAÇÃO DE UM DISPOSITIVO CAO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA TURBINA                           |            |
| 120  |            |
| <b>7. CONCLUSÕES.....</b>  | <b>126</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>129</b> |
| <b>ANEXO A – UDF PARA AGERAÇÃO DE UMA ONDA NO FLUENT COM PERFIL DE VELOCIDADES LINEAR.....</b>       | <b>142</b> |
| <b>ANEXO B – METODOLOGIA JOU.....</b>  | <b>144</b> |
| <b>ANEXO C – DIMENSÕES DAS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS SIMULADAS .....</b>                             | <b>146</b> |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|         |  |
|---------|--|
| AMG     | Multigrid Algébrico  |
| CAO     | Coluna de Água Oscilante   |
| CFD     | Dinâmica dos fluidos computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ) |
| CPU     | <i>Central Processing Unit</i>   |
| EDP     | Equação Diferencial Parcial  |
| JOU     | Extensão <i>journal</i> (Arquivo de script)                                |
| MM      | Metodologia Móvel  |
| MDF     | Método de Diferenças Finitas   |
| MEF     | Método de Elementos Finitos  |
| MVF     | Método dos Volumes Finitos   |
| NITA    | Avanço não iterativo no tempo  |
| P&D     | Pesquisa e desenvolvimento   |
| PISO    | <i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>                       |
| RMS     | <i>Root Mean Square</i>  |
| SIMPLE  | <i>Semi IMPlicit Linked Equations</i>                                      |
| SIMPLEC | <i>Semi IMPlicit Linked Equations Consistent</i>                           |
| UDF     | Função definida pelo usuário ( <i>User Defined Function</i> )              |
| UFRGS   | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                                  |
| VOF     | Método volume de Fluido ( <i>Volume Of Fluid</i> )                         |
| 2D      | Bidimensional  |
| 3D      | Tridimensional   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas

|                |  |
|----------------|--|
| $A$            | Amplitude da onda [m]  |
| $A_i$          | Área de cada volume [m <sup>2</sup> ]                          |
| $C$            | Celeridade [m/s]   |
| $C_A$          | Constante de ajuste  |
| $C_T$          | Comprimento do tanque de ondas [m]                             |
| $d_l$          | Diâmetro da restrição física [m]                               |
| $E$            | Erro numérico  |
| $E_{CAO}$      | Energia absorvida pelo dispositivo CAO [J]                     |
| $g$            | Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]                    |
| $h$            | Profundidade do clima de ondas [m]                             |
| $h_{lm}$       | Perda de carga localizada                                      |
| $H$            | Altura da onda [m]   |
| $H_m$          | Altura média de elevação da superfície livre na câmara CAO [m] |
| $H_T$          | Altura do tanque de ondas [m]                                  |
| $H_1$          | Altura da câmara CAO [m]                                       |
| $H_2$          | Altura da chaminé da câmara CAO [m]                            |
| $H_3$          | Profundidade de submersão da câmara CAO [m]                    |
| $k$            | Número de onda [1/m]   |
| $k_p$          | Coeficiente de perda   |
| $\vec{k}$      | Vetor unitário normal a superfície livre                       |
| $l$            | Diâmetro da chaminé de saída do dispositivo CAO [m]            |
| $L$            | Comprimento da câmara CAO [m]                                  |
| $L_1$          | Largura da câmara CAO [m]                                      |
| $L_T$          | Largura do tanque de ondas [m]                                 |
| $m$            | Coordenada normal no fundo do mar                              |
| $\dot{m}$      | Vazão mássica [kg/s]   |
| $\dot{m}_{qp}$ | Transferência de massa da fase $q$ para a fase $p$ [kg/s]      |

|                |  |
|----------------|--|
| $\dot{m}_{pq}$ | Transferência de massa da fase $p$ para a fase $q$ [kg/s]        |
| $N$            | Vetor unitário normal ao fundo do mar                            |
| $p$            | Pressão [Pa]   |
| $p_d$          | Pressão dinâmica [Pa]  |
| $p_e$          | Pressão estática [Pa]  |
| $p^*$          | Pressão estimada [Pa]  |
| $p'$           | Pressão corrigida [Pa]   |
| $P$            | Pressão (média RMS) [Pa]   |
| $P_{hid}$      | Potência Hidropneumática [w]                                     |
| $P_{inc}$      | Potência da onda incidente [w]                                   |
| $q(t)$         | Vazão volumétrica [m <sup>3</sup> /s]                            |
| $R1$           | Número de volumes na região acima da superfície livre            |
| $R2$           | Número de volumes na região da superfície livre                  |
| $R3$           | Número de volumes na região abaixo da superfície livre           |
| $R4$           | Número de volumes por cada comprimento de onda                   |
| $t$            | Tempo [s]  |
| $T$            | Período da onda [s]  |
| $u$            | Componente da velocidade na direção horizontal [m/s]             |
| $U$            | Valor do erro estimado   |
| $U_f$          | Fluxo de volume através da face                                  |
| $U_R$          | Número de Ursell [adimensional]                                  |
| $v$            | Velocidade [m/s]   |
| $\vec{v}$      | Vetor velocidade do escoamento [m/s]                             |
| $V$            | Vetor velocidade [m/s]   |
| $V_E$          | Volume de entrada da câmara do dispositivo CAO [m <sup>3</sup> ] |
| $V_T$          | Volume total do dispositivo CAO [m <sup>3</sup> ]                |
| $x$            | Posição espacial [m]   |
| $z$            | Posição vertical [m]   |
| $w$            | Componente da velocidade na direção vertical [m/s]               |

#### Letras gregas

|          |                    |
|----------|--------------------|
| $\alpha$ | Fração volumétrica |
|----------|--------------------|

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\alpha_{\text{ÁGUA}}$ | Fração volumétrica completa de água                            |
| $\alpha_{\text{AR}}$   | Fração volumétrica completa de ar                              |
| $\alpha_{qf}$          | Valor nominal da fração da $q$ -ésima fração de volume         |
| $\Delta p$             | Variação da pressão [Pa]                                       |
| $\varepsilon$          | Eficiência [%]   |
| $\eta$                 | Elevação da superfície livre [m]                               |
| $\lambda$              | Comprimento da onda incidente [m]                              |
| $\mu$                  | Viscosidade [kg/ms]  |
| $\rho$                 | Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]                          |
| $\tau$                 | Tensor de tensões [N/m <sup>2</sup> ]                          |
| $\Pi$                  | Coefficiente de potência                                       |
| $\phi$                 | Função potencial   |
| $\phi_i$               | Campo variável   |
| $\phi_n$               | Solução numérica   |
| $\phi_1$               | Área da câmara de entrada do dispositivo CAO [m <sup>2</sup> ] |
| $\phi_2$               | Área total do dispositivo CAO [m <sup>2</sup> ]                |
| $\Phi$                 | Coefficiente do fluxo de massa                                 |
| $\Psi$                 | Coefficiente de pressão  |
| $\omega$               | Frequência circular da onda [1/m]                              |

#### Super-índices

|       |   |
|-------|---|
| $n$   | Índice de tempo do passo anterior       |
| $n+1$ | Índice para etapa (atual) do novo tempo |

#### Sub-índices

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| ( ) <sub>máx</sub> | máximo               |
| ( ) <sub>o</sub>   | Otimizado uma vez    |
| ( ) <sub>o,o</sub> | Otimizado duas vezes |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 – Distribuição do potencial energético da energia das ondas em kW por metro de onda (FONTE: CENTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, 2002)..... | 3  |
| Figura 2.1- Esquema de funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas. ....   | 9  |
| Figura 2.2- Esquema de funcionamento de um sistema CAO.....  | 11 |
| Figure 2.3 – (a) Projeto da câmara CAO da Ilha do Pico (Wave Energy Center, 2011); (b) Projeto da câmara CAO do Limpet (Wavegen, 2011).....            | 12 |
| Figura 3.1- Representação esquemática do domínio computacional 2D.....   | 25 |
| Figura 4.1 – Etapas da simulação numérica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica.....                             | 29 |
| Figura 4.2 – Características elementares da onda.....  | 30 |
| Figura 4.3 – Aplicabilidade das teorias de ondas (CHAKRABARTI, 2005).....  | 33 |
| onde $\phi$ é uma função potencial, $\eta$ é a elevação da superfície livre, e $\vec{k}$ é o vetor unitário normal,.....                               | 34 |
| Figura 4.4 -Malha definida através do número de volumes por característica da onda. ....   | 39 |
| Figura 4.5 – Parâmetros do multigrid algébrico. ....   | 55 |
| Figura 4.6– Otimização do tempo de processamento em função dos parâmetros de suavização. ....  | 56 |
| Figura 5.1 - Sondas de medição no domínio computacional.....   | 58 |
| Figura 5.2 - Elevação da superfície livre em $x= 50$ m com time-step $T/500$ . ....  | 62 |
| Figura 5.3 - Elevação da superfície livre em $x= 1,0$ m.....   | 63 |
| Figura 5.4 - Amplitude relativa na câmara CAO, adaptado de Liu et. al (2011). ....   | 64 |
| Figura 5.5 –Pressão do ar no interior da câmara CAO, adaptado de Liu et. al (2011).....  | 65 |
| Figura 5.6 –Velocidade do ar chaminé de saída da câmara CAO, adaptado de Liu et. al (2011). ....   | 65 |
| Figura 6.1 - Representação esquemática das variações geométricas testadas para a onda de laboratório.....  | 69 |
| Figura 6.2–Comportamento da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ .....  | 70 |
| Figura 6.3 – Potência máxima (RMS) para cada $H_1/L$ em relação a $H_3$ para $T = 0,8$ s.....  | 71 |
| Figura 6.4 – Comparação transiente da vazão mássica do pior e do melhor caso.....  | 72 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 6.5 – Otimização geométrica de $H_1/L$ em relação a $H_3$ .....  | 73 |
| Figura 6.6 - Representação esquemática das variações geométricas testadas para cada um dos períodos. ....                                   | 75 |
| Figura 6.7 - Comportamento para a onda com $T = 5$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ . ....  | 76 |
| Figura 6.8 - Comportamento para a onda com $T = 5$ s da média RMS do fator de amplificação. ....  | 77 |
| Figura 6.9 – Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 5$ s. ....                   | 78 |
| Figura 6.10 – Comportamento transiente da elevação da superfície livre no interior da câmara CAO.....                                       | 80 |
| Figura 6.11 – Representação esquemática da movimentação de ar na câmara CAO.....  | 80 |
| Figura 6.12 – Comportamento transiente da pressão para $T = 5$ s. ....  | 82 |
| Figura 6.13 – Comportamento transiente da vazão mássica para $T = 5$ s. ....  | 83 |
| Figura 6.14 – Distribuição da velocidade na compressão e descompressão para $H_3 = 9,50$ m e $H_1/L = 0,13460$ . ....                       | 83 |
| Figura 6.15 – Análise da perda localizada para a variação de $H_1/L$ considerando $H_3 = 9,50$ m. ....                                      | 85 |
| Figura 6.16 - Comportamento transiente da pressão para a variação de $H_1/L$ quando $H_3 = 9,50$ .....<br>.....                             | 86 |
| Figura 6.17 - Comportamento para a onda com $T = 6$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ .....  | 87 |
| Figura 6.18 – Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 6$ s. ....                  | 88 |
| Figura 6.19 - Comportamento para a onda com $T = 7$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ .....  | 89 |
| Figura 6.20 – Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 7$ s. ....                  | 90 |
| Figura 6.21 - Comportamento para a onda com $T = 8$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ . .... | 91 |
| Figura 6.22 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 8$ s. ....                  | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.23 - Comportamento para a onda com $T = 9$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ .....   | 93  |
| Figura 6.24 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 9$ s. ....   | 94  |
| Figura 6.25 - Comportamento para a onda com $T = 11$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ .....  | 96  |
| Figura 6.26 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 11$ s. ....  | 97  |
| Figura 6.27 - Comportamento para a onda com $T = 12$ s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ .....  | 98  |
| Figura 6.28 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e $H_1/L$ ótimo correspondente em função de $H_3$ para $T = 12$ s. ....  | 99  |
| Figura 6.29 - Comportamento transiente da pressão para a variação de $H_1/L$ quando $H_3 = 9,25$ m. ....   | 100 |
| Figura 6.30 - Comportamento da média RMS da pressão máxima e da vazão mássica para cada um dos casos analisados. ....  | 101 |
| Figura 6.31 – Topologia do campo de velocidades para: (a) $T = 5$ s, $t = 27$ s, $H_1/L = 0,1345$ e $H_3 = 9,50$ e (b) $T = 12$ s, $t = 62,40$ s, $H_1/L = 0,0199$ e $H_3 = 9,25$ . .... | 102 |
| Figura 6.32 - Comportamento da eficiência para os casos ótimos e os piores casos em cada um dos períodos analisados. ....  | 103 |
| Figura 6.33 – Recomendação numérica para $(H_1/L)_o$ . ....  | 104 |
| Figura 6.34 – Recomendação numérica para $(H_3)_o$ . ....  | 105 |
| Figura 6.35 – Potência hidropneumática máxima (RMS), duas vezes, e $H_1/L$ ótimo, duas vezes, correspondente em função de $H_3$ para o espectro. ....                                    | 106 |
| Figura 6.36 - Representação esquemática da restrição física na saída do dispositivo CAO: (a) Restrição A – Corpo rombudo, (b) Restrição B – Corpo elíptico. ....                         | 107 |
| Figura 6.37 - Variação da potência em relação ao diâmetro da restrição física. ....  | 111 |
| Figura 6.38 – Comportamento transiente da vazão mássica para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B. ....   | 111 |
| Figura 6.39 – Comportamento transiente da pressão para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B. ....   | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.40 – Comportamento transiente da potência para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B.....  | 112 |
| Figura 6.41 -Variação do fator de amplificação ( $H_m/H$ ) em relação ao diâmetro da restrição. ....  | 113 |
| Figura 6.42 – Comportamento transiente da potência para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B.....  | 114 |
| Figura 6.43. Campo de velocidades na direção y considerando o diâmetro $d_1= 1,5176 m$<br>:RESTRICÇÃO 1, (a) T =25s,(c) T =27s,(e) T =29 s;RESTRICÇÃO 2 (b) T =25s, (d) T =27s,(f) T =29s. .... | 116 |
| Figura 6.44 - Variação da pressão em função do período da onda.....   | 118 |
| Figura 6.45 - Relação coeficiente de vazão mássica em função do coeficiente de pressão. ...   | 119 |
| Figura 6.46 - Curva do coeficiente de potência $\Pi$ em função do coeficiente de pressão $\Psi$ para turbina <i>wells</i> considerando a Restrição A e a Restrição B. ....                      | 120 |
| Figura 6.47 - Comportamento para a onda com $T = 5 s$ da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ considerando uma restrição física.....                     | 121 |
| Figura 6.48 - Otimização geométrica de $H_1/L$ em relação a $H_3$ para $T = 5 s$ considerando uma restrição física.....   | 122 |
| Figura 6.49 – Comportamento transiente da pressão para $T = 5 s$ considerando uma restrição física. ....  | 124 |
| Figura 6.50 – Comportamento transiente da vazão mássica para $T = 5 s$ considerando uma restrição física.....   | 124 |
| Figura 6.51 - Comportamento para a onda com $T = 5 s$ da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade $H_1/L$ e $H_3$ considerando uma restrição física.....                     | 125 |
| Figura B.1– Metodologia .jou. ....  | 144 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 6.1- Características da onda e do tanque de ondas em escala de laboratório. ....                      | 67  |
| Tabela 6.2. Características do espectro de onda real e do tanque de ondas em escala real.....                | 74  |
| Tabela 6.3. Influência da quantidade água e ar no desempenho da câmara CAO.....                              | 81  |
| Tabela 6.4 - Dimensões da restrição física. ....   | 109 |
| Tabela 6.5. Resultados para a variação do diâmetro da restrição física – Restrição A. ....                   | 109 |
| Tabela 6.6 - Resultados para a variação do diâmetro da restrição física – Restrição B. ....                  | 110 |
| Tabela 6.7 - Resultados para a configuração geométrica submetida ao espectro de ondas –<br>Restrição A. .... | 117 |
| Tabela 6.8 - Resultados para a configuração geométrica submetida ao espectro de ondas –<br>Restrição B. .... | 117 |
| Tabela C.1 - Variações da geometria do dispositivo CAO em escala de laboratório.....                         | 146 |
| Tabela C.2. Variações da geometria para $T = 5s$ e $VE = 37,5 m^3$ .....                                     | 146 |
| Tabela C.3 - Variações da geometria para $T = 6 s$ e $VE = 48,5 m^3$ . ....                                  | 147 |
| Tabela C.4 - Variações da geometria para $T = 7 s$ e $VE = 60 m^3$ . ....                                    | 147 |
| Tabela C.5 - Variações da geometria para $T = 8 s$ e $VE = 71 m^3$ . ....                                    | 148 |
| Tabela C.6- Variações da geometria para $T = 9 s$ e $VE = 81,8 m^3$ . ....                                   | 148 |
| Tabela C.7 - Variações da geometria para $T = 11 s$ e $VE = 103 m^3$ . ....                                  | 149 |
| Tabela C.8 - Variações da geometria para $T = 12 s$ e $VE = 113,3 m^3$ . ....                                | 149 |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

As fontes de energia não renováveis dividem-se em combustíveis fósseis e energia nuclear. Os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), têm sido os protagonistas do impulso industrial desde a invenção da máquina a vapor. Deles depende a maior parte da indústria e do transporte na atualidade, alcançando quase 90% da energia comercial empregada no mundo. Entretanto, eles são classificados como fontes de energia não renováveis, pois quantidades que necessitam de milhões de anos para se formarem são consumidas em minutos, fazendo com que as reservas destes combustíveis estejam diminuindo. Já a energia nuclear tem importante repercussão ambiental, uma vez que a indústria nuclear produz resíduos radioativos perigosos que duram milhares de anos, cujo armazenamento definitivo gera graves riscos. As fontes de energia renováveis, como a eólica e solar, por exemplo, se renovam ilimitadamente de forma natural, não utilizam um recurso finito como um combustível fóssil ou uma substância radioativa e, além disso, geralmente causam menos impactos ambientais (Echarri, 2009).

No âmbito das discussões sobre a questão energética, aprofundada pelo cenário internacional de escassez do petróleo e pelas mudanças no clima, ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis, surgem pesquisas e estudos técnicos, econômicos e de impactos socioeconômicos e ambientais de empreendimentos de fontes de energia renováveis voltados para o desenvolvimento de alternativas na conversão de energia: a partir de matéria orgânica de origem animal e vegetal, a biomassa; a partir da força dos ventos, a chamada energia eólica; através da captação da luz do sol, a energia solar; a partir de pequenas centrais hidroelétricas, as quais atendem a demandas em áreas periféricas ao sistema de transmissão; pelo movimento de ondas e marés, entre outras (Pacheco, 2006).

O principal obstáculo que dificulta a utilização das fontes de energia renováveis é o fator econômico, pois normalmente o processo de conversão tem um custo mais elevado em relação aos combustíveis fósseis e a energia nuclear. Entretanto, se analisarmos por outro ponto de vista, não é tão evidente que as fontes de energia tradicionais sejam mais baratas, pois se incluirmos o custo para o suposto saneamento ambiental da contaminação que

provocam ou o custo para diminuir seus danos ambientais, o preço da energia, obtida com carvão, gás, petróleo ou urânio, seria bem mais elevado (Echarri, 2009).

O mundo precisa de energia limpa e com um baixo custo que permita o crescimento econômico sem prejudicar o meio ambiente. Nesta busca por fontes alternativas, o Brasil apresenta um diferencial em relação a outros países, pois a sua biodiversidade, permite a conversão de energia por vários meios. Estas fontes de energia renováveis podem e devem ser utilizadas de forma sustentável, de maneira tal que resulte em um mínimo impacto ao meio ambiente. O desenvolvimento tecnológico tem permitido que, aos poucos, elas possam ser aproveitadas, quer como combustíveis alternativos quer na produção de calor e de eletricidade (Pacheco, 2006).

A energia contida nos oceanos pode ter diferentes classificações, conforme as diferentes origens possíveis. As mais relevantes são, sem dúvida, a energia das marés (fruto da interação dos campos gravitacionais da lua e do sol); a energia térmica dos oceanos (consequência direta da radiação solar incidente); a energia das correntes marítimas (cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés) e, finalmente, a energia das ondas (que resulta do efeito do vento na superfície do oceano). Esta última forma de energia pode ser considerada uma forma de energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros em alto mar, sem perda de energia. A energia das ondas apresenta-se particularmente atrativa para ilhas ou países com extensas faixas costeiras, assim como o Brasil. (Cruz e Sarmiento, 2004). Em regiões costeiras, a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2m) e de período elevado (7 a 10s) excedem normalmente os 50kW por metro de frente de onda (Cruz e Sarmiento, 2004).

As ondas oceânicas são formadas a partir da ação dos ventos sobre a superfície do mar. Estas ondas propagam-se em alto-mar até encontrar águas mais rasas, próximas à terra. Elas possuem energia cinética que pode ser convertida em outro tipo de energia aplicada às necessidades do cotidiano. A energia das ondas se destaca por ser uma fonte renovável de qualidade, pois se apresenta sob forma mecânica, podendo ser convertida em eletricidade.

A exploração da reserva energética das ondas representa um domínio de inovação, onde muito ainda está por fazer. Em teoria, se fosse possível equipar os litorais do planeta

com conversores energéticos, as centrais elétricas existentes poderiam ser desativadas. O valor do recurso energético proveniente dos mares torna-se atrativo se considerarmos que o valor global da potência das ondas é aproximadamente 2TW, valor este que é equiparável à potência elétrica média anual consumida mundialmente (Cruz e Sarmiento, 2004). Este valor global apresenta-se distribuído de modo irregular pelo globo terrestre, conforme pode ser verificado na Fig. 1.1, sendo sua avaliação estimada em termos de potência por comprimento de frente de onda (kW/m). A potência média das ondas é maior em regiões de grandes latitudes e está entre 40 e 100 kW/m de frente de onda. No sul do Brasil, tem-se disponível em torno de 30 kW/m, sendo, portanto uma alternativa importante de fonte de energia para a região.

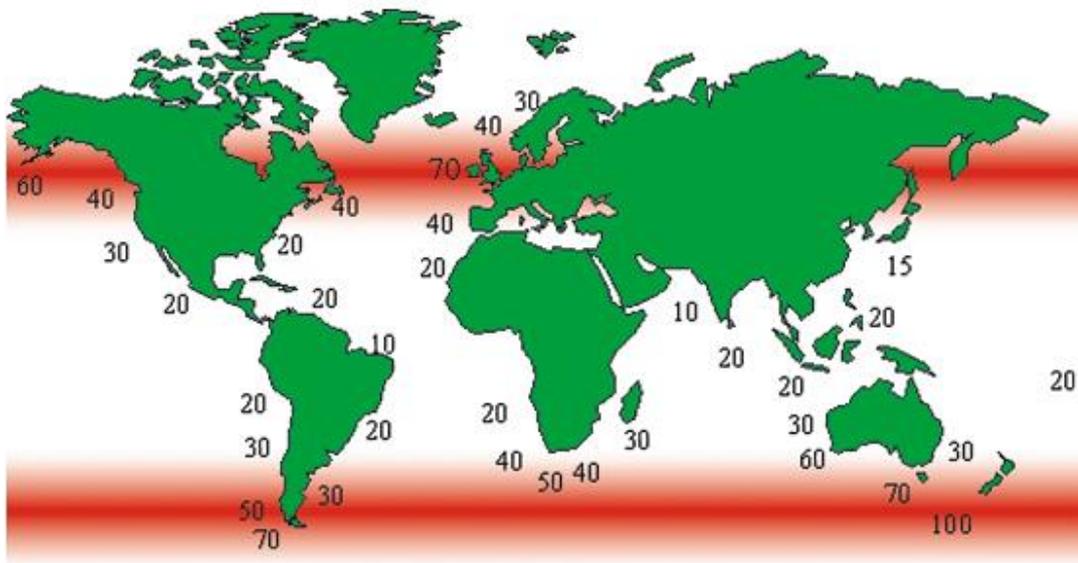


Figura 1.1 – Distribuição do potencial energético da energia das ondas em kW por metro de onda (FONTE: CENTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, 2002).

Pelo fato das ondas marítimas ao se deslocarem, possuírem a capacidade de carregar consigo grande quantidade de energia, países como Suécia, Dinamarca, Portugal, Irlanda, Japão e EUA, a partir da crise do petróleo de 1973, despertaram para o interesse em investimentos em programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em relação à conversão de energia a partir das ondas do mar. Existem projetos relacionados ao desenvolvimento de equipamentos de conversão de energia das ondas.

Atualmente, existem diferentes soluções capazes de converter a energia das ondas. Estas tecnologias não são concorrentes, situação que poderá ser alterada no futuro, assim como não é correto afirmar que estas serão as únicas soluções possíveis, dado o interesse neste domínio e a permanente entrada de novas ideias, empresas e outras instituições nesta área de pesquisa.

Tendo em vista a necessidade, atual e futura, da utilização de fontes renováveis de energia, e considerando o potencial energético da costa brasileira, o conhecimento de como ocorre a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica é fundamental para que tal tecnologia possa ser utilizada de forma plena e sustentável. Uma das formas de desenvolver conhecimento é através da simulação numérica, que é uma ferramenta que possibilita estudar os dispositivos de conversão de energia, de modo que estes possam ser corretamente construídos, testados e utilizados de maneira otimizada na conversão de energia elétrica na região sul do Brasil.

## **1.2. Proposta do trabalho e objetivos**

O objetivo principal desta tese é, através da simulação computacional de um dispositivo do tipo CAO, e a partir do emprego de *Constructal Design*, maximizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica considerando o princípio de coluna de água oscilante. O aspecto inédito deste trabalho, em relação aos estudos disponíveis na literatura, é o fato de levar em conta o clima de ondas de uma dada região e, a partir disso, dimensionar o dispositivo de modo que ele tenha um desempenho otimizado. É possível ainda destacar que não existem estudos sobre o emprego de *Constructal Design* aplicado a dispositivos conversores de energia das ondas do mar. Sendo, portanto, um campo a ser explorado.

Para a modelagem computacional é empregado o modelo multifásico *Volume of Fluid* de Hirt e Nichols (1981) que vem sendo utilizado para a simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas mar em energia elétrica do tipo CAO, como em: Liu et al. (2008a), Gomes (2010) e Ramalhais (2011). O modelo VOF consiste na solução das equações de Navier-Stokes, de uma equação de transporte e da equação da conservação da massa com um termo fonte (fração volumétrica), que são resolvidas através do código computacional,

FLUENT, baseado no Método dos volumes Finitos. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo conversor acoplado ao mesmo.

Na etapa de pré-processamento é necessário representar o domínio computacional, informar as condições de contorno e também discretizar o domínio (geração da malha). Para tanto é utilizado o software GAMBIT (gerador de malhas). A etapa de processamento é desenvolvida no software FLUENT (Código de Dinâmica dos Fluidos Computacional). Ao final de cada caso simulado são gerados arquivos de dados para posterior análise (Pós-processamento).

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Desenvolver uma metodologia de *Constructal Design* para aplicação em dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO;
- b) Aplicar a metodologia *Constructal Design* para otimização geométrica, através da simulação numérica, de dispositivos CAO em escala de laboratório;
- c) Aplicar a metodologia *Constructal Design* para otimização geométrica, através da simulação numérica, de dispositivos CAO em escala real;
- d) Analisar e otimizar, através da simulação numérica, utilizando *Constructal Design*, o desempenho de um dispositivo CAO ao longo de um espectro de ondas real;
- e) Testar e desenvolver uma forma de considerar a influência da perda de carga causada pela turbina ao escoamento de ar pelo dispositivo CAO;
- f) Analisar e otimizar, através da simulação numérica, utilizando *Constructal Design*, considerando a influência da perda de carga, um dispositivo do tipo CAO em escala real;

Pelo que foi exposto, estima-se que este trabalho tem grande aplicabilidade, uma vez que é obtida uma recomendação teórica, através do *Constructal Design*, que possibilitará a construção de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica de forma otimizada.

### **1.3. Organização do trabalho**

O texto está organizado da seguinte maneira:

## Capítulo 2: Energia das ondas do mar

Este capítulo consiste de uma revisão sobre as diferentes tecnologias de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, bem como dos diferentes princípios de funcionamento destes conversores. É dada uma atenção especial ao dispositivo cujo princípio de funcionamento é de coluna de água oscilante (CAO), objeto de estudo deste trabalho. Ainda, apresenta-se o estado da arte da modelagem computacional de conversores do tipo CAO, estudos relacionados à otimização de dispositivos CAO e sobre diferentes formas de considerar a influência da perda de carga da turbina.

## Capítulo 3: Constructal Design aplicado à energia das ondas do mar

Aqui são abordados tópicos referentes à *Teoria Constructal* que fundamenta a metodologia *Constructal Design*. Algumas aplicações de *Constructal Design* em problemas de engenharia são apresentadas. Alguns aspectos de trabalhos em estágio inicial envolvendo a utilização de *Constructal Design* aplicado em energia das ondas do mar são, também, abordados. Por fim, é proposta uma formulação de aplicação de *Constructal Design* em dispositivos do tipo CAO, possibilitando a otimização de dois graus de liberdade:  $H_1/L$  (relação entre altura e comprimento da câmara CAO) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo CAO).

## Capítulo 4: Modelo Matemático e Numérico

Neste capítulo são abordados aspectos referentes a todo o processo de modelagem computacional de um dispositivo do tipo CAO. Uma breve revisão sobre teoria de ondas oceânicas é feita. São discutidos detalhes do domínio computacional, das condições de contorno e da geração da malha. É apresentado o modelo VOF, bem como detalhes da discretização das equações através do método de volumes finitos. Uma breve discussão sobre o acelerador de convergência Multigrid Algébrico é apresentada.

## Capítulo 5: Verificação e validação do modelo numérico

Neste capítulo são apresentadas as variáveis de interesse deste trabalho, bem como são apresentadas expressões para o cálculo de potência da onda incidente, potência hidropneumática e eficiência. É realizada a verificação da geração da onda em escala de laboratório e real. Uma validação do modelo numérico, considerando o comportamento do ar no interior da câmara CAO, também é discutido, neste capítulo.

## Capítulo 6: Resultados

O capítulo dos resultados está dividido em quatro partes. Numa primeira, são apresentados e discutidos alguns resultados referentes à otimização geométrica de um dispositivo CAO, utilizando *Constructal Design*, em escala de laboratório. A segunda parte é dedicada à discussão da aplicação de *Constructal Design* considerando um espectro de ondas em escala real. Para ambas as situações são analisados e otimizados dois graus de liberdade: a relação  $H_1/L$  (relação entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo). Na terceira parte é testada e discutida uma metodologia que considera a influência da perda de carga da turbina no escoamento de ar através de uma restrição física. Por fim, é realizado um estudo de otimização de um dispositivo CAO empregando *Constructal Design* e considerando a influência da turbina através de uma restrição elíptica.

## Capítulo 7: Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões da tese e algumas propostas de continuidade deste trabalho.

## 2. ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

Um dos desafios da atualidade está em suprir a demanda energética do mundo. São muitas as discussões a respeito de energia elétrica, no âmbito da conversão 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).

O consumo global de energia em 2011 foi de aproximadamente  $1,6 \times 10^7$  MW, o que representa aproximadamente 60% a mais do que o consumo de energia em 1980 (Zabihian e Fung, 2011). Além disso, a principal fonte de energia para suprir essa demanda é derivada de combustíveis fósseis.

Os países, ultimamente, têm investido na exploração de novas fontes de energia e, em especial, nas chamadas fontes renováveis. E uma dessas que tem merecido destaque é a conversão da energia contida nos oceanos em energia elétrica. Segundo Cruz e Sarmiento (2004), a energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que gera diferentes classificações.

### 2.1. Tecnologias de Conversão

O critério de classificação adotado para dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, na maioria das referências, está relacionado com a distância do dispositivo em relação à costa. Agrupando-os, desta forma, em dispositivos costeiros (*onshore*), com acesso por terra; dispositivos próximos da costa (*nearshore*), em profundidade de 8 a 20 m e dispositivos afastados da costa (*offshore*), em profundidades acima de 25 m (Cruz e Sarmiento, 2004).

Outra classificação está associada ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem, três classes principais de conversores de energia das ondas (Cruz e Sarmiento, 2004), que são: Coluna de Água Oscilante (CAO), Corpos Flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*), e galgamento. Na Fig. 2.1 pode ser observado esquematicamente, o princípio de funcionamento destes dispositivos conversores de energia das ondas do mar mencionados. Esta classificação não encerra a possibilidade de existirem

outros tipos de dispositivos que nela não se encaixem. Um exemplo é o dispositivo que utiliza uma placa horizontal em conjunto com uma turbina, ambos submersos (Carter, 2005).

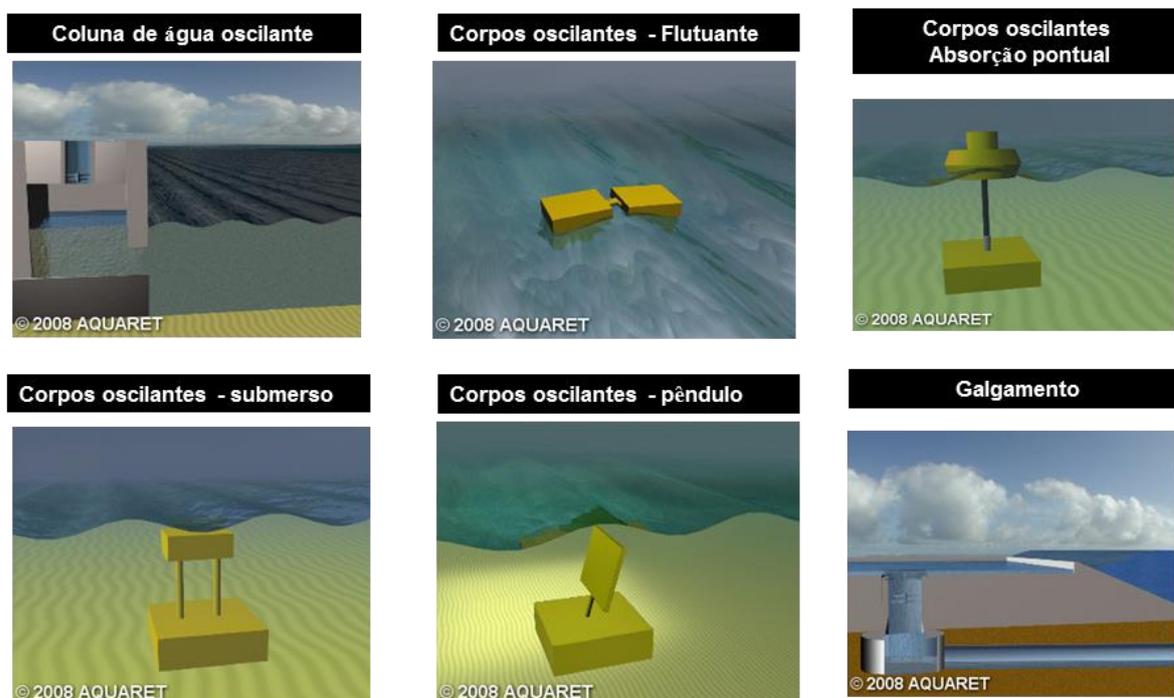


Figura 2.1- Esquema de funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas.<sup>1</sup>

Em relação aos sistemas de conversão de energia das ondas, os equipamentos utilizados podem ser turbinas de ar, turbinas de água ou sistemas hidráulicos acoplados a geradores elétricos. Em todos os casos, os equipamentos somente são eficientes numa banda de potências cujo limite superior é dado pela potência nominal do equipamento e o inferior por uma fração deste valor, que depende do tipo de equipamento.

Os conversores do tipo corpos flutuantes são dispositivos onde a passagem da onda provoca oscilações, através desse movimento a energia da onda é convertida em eletricidade. Nos de absorção pontual (*point absorbers*), o flutuador se move verticalmente ou em torno de um eixo em relação a uma estrutura fixa no fundo do mar. Nos conversores do tipo progressivo (*surging devices*), seus componentes possuem movimento em relação a sua própria estrutura devido à incidência das ondas, gerando energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Iahnke, 2010).

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.aquaret.com/>. Acesso em 15/01/2010.

Já com relação aos dispositivos de galgamento, existem diferentes modelos (*Sea Wave*, *Wave Plane* e *Wave Dragon*), porém todos baseados no direcionamento das ondas oceânicas incidentes para uma rampa e um reservatório (posicionado em um nível acima ao do mar) que armazena a água que galgou esta rampa. Então, aproveitando a energia potencial dessa água armazenada, a mesma é devolvida ao oceano após passar por turbinas (semelhantes às utilizadas em hidrelétricas de baixa queda), onde ocorre a conversão em energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Iahnke, 2010).

De acordo com Brossard et al. (2009) placas submersas horizontais são estruturas comumente usadas na engenharia costeira para diferentes aplicações. Uma destas aplicações é sua utilização na conversão da energia das ondas do mar em elétrica. Para isso, é aproveitado o movimento de circulação da água sob a placa que surge quando as ondas oceânicas passam sobre a mesma (Carter, 2005). A velocidade da água sob a placa ocorre nas direções positiva e negativa, alternadamente. Então, este fluxo alternado de água é usado para o acionamento de uma turbina hidráulica, instalada abaixo da placa submersa. Este tipo de turbina tem como característica manter o mesmo sentido de rotação, independentemente da direção do escoamento (Orer e Ozdamar, 2007).

Maiores detalhes a respeito das diferentes tecnologias de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica podem ser encontrados em Iahnke (2010) e Falcão (2010).

## **2.2. Conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)**

Os dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) são estruturas de concreto ocas, parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como mostra a Fig. 2.2. De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), o processo de conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura, o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do 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 no interior da "câmara de ar".

Conforme Ramalhais (2011), existem três tipos de turbinas que podem ser utilizadas em dispositivos do tipo CAO: Wells, Impulso e Denniss-Auld. Para aproveitar os movimentos opostos, normalmente, utiliza-se a turbina do tipo Wells, que possui a propriedade de manter

o sentido de rotação, independentemente do sentido do escoamento. É acionada pela diferença de pressão nas etapas de compressão e descompressão. O grupo turbina/gerador é o responsável pela conversão de energia elétrica (Cruz e Sarmento, 2004;Nielsen et al., 2006;Twidell and Weir, 2006; Gomes, 2010).

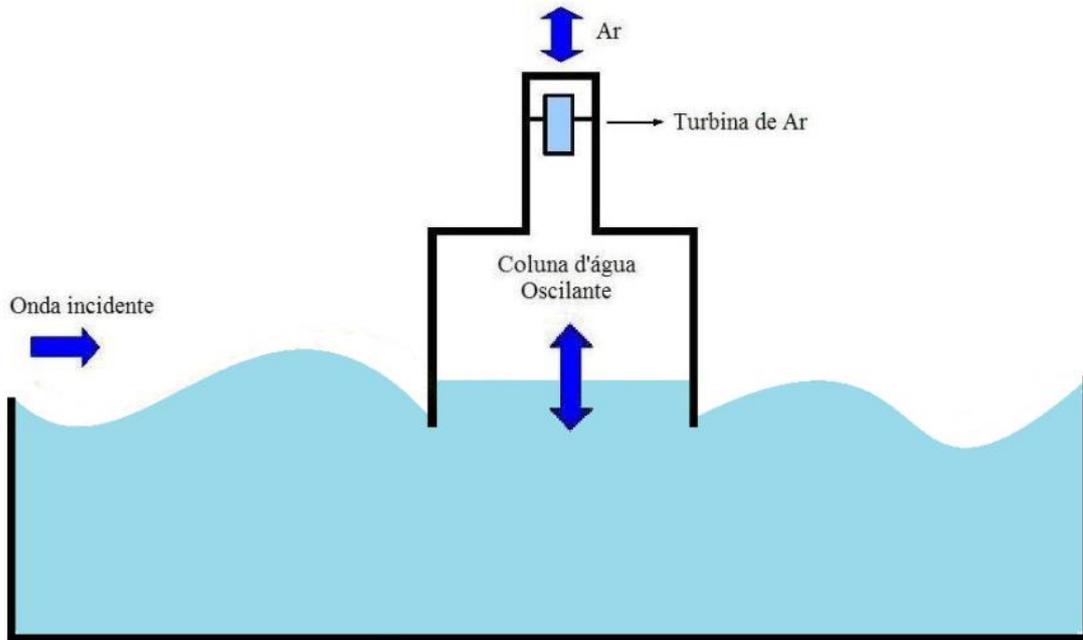


Figura 2.2- Esquema de funcionamento de um sistema CAO.

Uma desvantagem do dispositivo CAO são as grandes dimensões de concreto da estrutura, o que torna o custo mais elevado (KhaligheOnar, 2010). Uma vantagem de utilizar um dispositivo CAO para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica é a velocidade do ar aumentada pela redução da área na seção transversal próximo à turbina, assim como o movimento lento das ondas para uma rotação rápida sem engrenagem mecânica (Twidell e Weir, 2006). Outra importante vantagem é o movimento das partes mecânicas, isto é, a turbina e o gerador não ficam em contato direto com a água (Khaligh e Onar, 2010).

A câmara CAO é o dispositivo mais avançado em quantidade e duração de protótipos testados no mar, tendo inclusive algumas centrais piloto instaladas. Um destes projetos que se destaca é a Central piloto da Ilha do Pico nos Açores (Portugal), apresentada na Fig. 2.3a. O local escolhido para a instalação da central piloto foi Porto Cachorro, costa noroeste da ilha

do Pico, no arquipélago de Açores. O arquipélago apresenta condições propícias para aproveitamento da energia das ondas, quer pela sua localização numa zona onde existe um elevado recurso energético, quer pelo fato de não existir uma plataforma continental responsável pela dissipação de energia das ondas por atrito no fundo, característica das ilhas vulcânicas (Cruz e Sarmiento, 2004). O local foi selecionado por revelar, simultaneamente, uma boa exposição às direções dominantes da agitação marítima (noroeste), fácil acesso por terra e águas moderadamente profundas (entre 6 a 10 m). A central da ilha do Pico possui uma potência instalada de 400 kW e foi construída no período de 1995 a 1999. A central foi inserida numa reentrância da costa, com nível médio de 8 m de profundidade. Sua câmara apresenta dimensões de 12 m x 12 m e 30° de inclinação na parede frontal em relação à vertical.



(a)



(b)

Figure 2.3 – (a) Projeto da câmara CAO da Ilha do Pico (Wave Energy Center, 2011); (b) Projeto da câmara CAO do Limpet (Wavegen, 2011).

Outro projeto de dispositivo CAO é a Central do LIMPET na ilha de Islay (Escócia), apresentada na Fig. 2.3b. 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).

### 2.3. Modelagem Computacional de conversores tipo CAO

A modelagem computacional procura simular fenômenos físicos utilizando uma sistemática que envolve engenharia, matemática e ciência da computação. O fenômeno físico em estudo é representado por um sistema de equações diferenciais. O sistema de equações é aproximado por um método de discretização. Finalmente os resultados da simulação numérica são comparados com o fenômeno físico em estudo (Devloo, 2005).

Para obter uma solução numérica é necessário usar um método de discretização que aproxime as equações diferenciais através de um sistema de equações algébricas, solucionável computacionalmente. As aproximações são aplicadas a pequenos domínios no espaço e/ou no tempo e, então, a solução numérica gera resultados em localizações discretas no espaço e no tempo (Ferziger e Peric, 1997).

Neste trabalho o modelo computacional é desenvolvido no software FLUENT, que utiliza como método de discretização o Método dos Volumes Finitos (MVF). O domínio computacional, composto pelo conversor acoplado a um tanque de ondas, é construído e discretizado no software GAMBIT. Além disso, para uma interação mais realística entre água, ar e dispositivo, o modelo *Volume of Fluid* (VOF) é adotado (Hirt e Nichols, 1981).

O método *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981), vem sendo empregado na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Este modelo é indicado para escoamentos multifásicos, ou seja,

escoamentos nos quais existe uma interface bem definida entre dois ou mais fluídos imiscíveis, que neste caso são a água e o ar. O modelo VOF consiste basicamente na solução das equações de Navier-Stokes e uma equação da conservação da massa com termo fonte (fração volumétrica). Existem estudos relacionados à aplicação desse método na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, onde as equações governantes são resolvidas através do Método dos volumes Finitos, Versteeg e Malalasekera (1999), utilizando o código comercial FLUENT. A seguir apresentam-se as principais publicações que utilizam esse modelo.

- Em Horko (2007) é apresentado o estudo numérico de um dispositivo coluna de água oscilante, em específico da parede frontal do dispositivo chamada de “*lip*”. Utilizando o modelo VOF para reproduzir a interação da onda com o dispositivo, são testadas diversas formas geométricas e dimensões de *lip*.
- Em Conde e Gato (2008) é analisado o escoamento do ar pelo interior de uma câmara coluna de água oscilante equipada com duas chaminés. A metodologia utilizada consiste em, de acordo com uma função senoidal aplicada à parte inferior do dispositivo CAO, variar a entrada e saída de ar na câmara.
- Em Marjani et al., (2008) é feito um estudo completo do sistema de coluna de água oscilante semelhante ao da ilha do Pico em Portugal, incluindo a modelagem da turbina. A técnica empregada é semelhante à utilizada por (Conde e Gato, 2008).
- Em Liu et al. (2008a) é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante. São estudados casos com diferentes geometrias de dispositivos CAO e, também, com diferentes características de ondas. Foram estudados casos tanto *2D* como *3D*, onde é observada a elevação de água no interior do dispositivo CAO. O modelo empregado é o VOF.
- Em Liu et al. (2008b) é apresentada a modelagem computacional *2D* de um dispositivo do tipo de galgamento utilizando o modelo VOF para um domínio bidimensional.
- Em Gomes et al. (2009a) aborda-se um tipo de equipamento que funciona segundo o princípio de coluna d'água oscilante (CAO), onde é proposta a modelagem computacional *3D* de uma câmara deste tipo, utilizando o modelo VOF. Foi feito um estudo, a fim de se obter a vazão mássica em diferentes regiões no interior do dispositivo.

- Em Gomes et al. (2009f) é apresentado um estudo comparativo entre uma metodologia empregada por Conde e Gato (2008) e Marjani et al. (2008), onde somente o escoamento do ar pelo dispositivo coluna de água oscilante (CAO) é considerado, com a metodologia utilizada por Liu et al. (2008a) baseada no modelo VOF que representa, além do escoamento do ar pela coluna de água oscilante (CAO), a incidência da onda no dispositivo. Os resultados mostram que o modelo VOF representa o fenômeno de forma realista.
- Em Gomes et al. (2009c, 2009e, 2009i) é apresentada a modelagem computacional de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) submetido ao clima de ondas da costa da cidade de Rio Grande. A simulação numérica foi realizada utilizando-se o pacote FLUENT® e empregando-se o modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) na geração da onda e na interação da mesma com o conversor. Os resultados obtidos demonstram a potencialidade da região em gerar energia elétrica a partir da energia das ondas do mar, através do conversor tipo CAO.
- Em Gomes et al. (2009b, 2009d, 2009h) são apresentadas duas diferentes metodologias numéricas de geração de ondas regulares de gravidade num tanque de ondas. Foram realizadas simulações numéricas da geração de ondas através do pacote FLUENT®, empregando-se o modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) para reproduzir a propagação da onda no tanque. São analisadas duas metodologias para a geração de ondas regulares que poderão ser utilizadas, principalmente, no estudo de dispositivos para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica.
- Em Gomes et al. (2009g) é realizada a otimização do comprimento de um dispositivo de conversão de energia das ondas do mar do tipo coluna d'água oscilante, de modo que se possa ter um aproveitamento ótimo da energia contida na onda incidente em sua passagem pelo dispositivo CAO. O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) também foi empregado neste estudo.
- Em Gomes et al. (2010b) é apresentado um procedimento para análise da eficiência de dispositivos do tipo CAO. As discussões são voltadas a parâmetros geométricos de tal dispositivo. Foram realizados testes *2D* e *3D* empregando-se o modelo multifásico Volume of Fluid (VOF).

- Em Gomes et al. (2010a) é feito um estudo semelhante ao realizado em Gomes et al. (2010b), porém aplicado ao clima de ondas da cidade de Rio Grande.
- Em Gomes (2010) é apresentado um estudo detalhado semelhante aos apresentados em Gomes et al. (2009a, 2009b, 2009c, 2009d, 2009e, 2009f, 2009g, 2009h, 2009i) e em Gomes et al. (2010a, 2010b).
- Em Iahnke et al. (2009a, 2009b, 2009c), Iahnke et al. (2010) e Iahnke (2010) são apresentados resultados da modelagem computacional 2D do princípio de funcionamento de um dispositivo de galgamento empregando o método VOF.
- Em Conde et al. (2010) e Conde et al. (2011) apresentam-se resultados da aplicação de dois códigos numéricos de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo CAO. Um dos códigos (FLUINCO) é baseado na técnica dos elementos finitos e o outro (FLUENT) na técnica dos volumes finitos, com o modelo VOF. Os trabalhos apresentam a validação destes códigos para este tipo de escoamento. O caso simulado corresponde a um modelo simplificado, testado experimentalmente, e que permitiu realizar a validação dos modelos numéricos.
- Em Liu et al. (2011) é apresentado um estudo semelhante ao de Liu et al. (2008a), realizando a comparação de resultados numéricos 2D e 3D com resultados experimentais. Para a modelagem numérica é utilizado o modelo VOF.
- Em Ramalhais (2011), com o recurso da modelagem numérica, foi estudado o comportamento de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante (CAO), exposto a ondas de diferentes períodos. Foi observada a influência das suas características geométricas, nomeadamente do seu comprimento, na resposta do sistema. Verificou-se, também, os efeitos causados pela introdução de diferentes turbinas, para um estado de mar característico e utiliza-se um método prático e versátil para simular a perda de carga introduzida no dispositivo. Para tal, recorre-se ao código comercial (FLUENT), comercializado atualmente pela ANSYS, que utiliza uma técnica de volumes finitos para resolver as equações *Reynolds Average Navier Stokes*.
- Em Teixeira et al. (2013), um dispositivo do tipo CAO, em escala real, é investigado numericamente. É realizada uma comparação entre um código de elementos finitos (FLUINCO) e um código de volumes finitos (FLUENT). Por fim, é realizada uma investigação a respeito da geometria da câmara CAO e da relação característica da turbina que possibilita o melhor desempenho do dispositivo.

A tendência é que cada vez mais as pesquisas utilizem a modelagem computacional para analisar os dispositivos conversores de energia das ondas do mar, uma vez que, atualmente, a simulação numérica é uma ferramenta fundamental na execução de um projeto de engenharia com estas características. Neste contexto, é possível verificar que, nos trabalhos de CFD aplicados à energia das ondas, os pesquisadores têm buscado empregar o modelo VOF nas simulações numéricas, devido a sua capacidade de tratar adequadamente a interação entre água e ar, tanto na geração das ondas, como no comportamento do dispositivo.

#### **2.4. Otimização de conversores tipo CAO**

Conforme o abordado na seção anterior, no que diz respeito à modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, diversos trabalhos já foram desenvolvidos nestes últimos anos. Alguns desses, inclusive, relacionados à otimização desses dispositivos, com destaque para Horko (2007), Liu et al. (2008a), Gomes et al. (2009g), Liu et al. (2011), Ramalhais (2011) e Teixeira et. al (2013). A seguir são destacados trabalhos que tiveram como objetivo otimizar a geometria de dispositivos do tipo CAO.

- Em Tseng e Huang (2000) a importância da geometria da câmara é também destacada, num estudo experimental que tem como objetivo encontrar regimes de grande movimento de amplificação dentro da câmara, especialmente aqueles relatados para ocorrência de ressonância.
- Em Weber e Thomas (2001) é apresentada uma investigação preliminar da importância do *design* de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, com relação à otimização global de suas dimensões e suas propriedades de conversão de potência. O domínio considerado é bidimensional (2D). É utilizado um domínio de frequências para profundidades de água finita para descrever o comportamento do sistema. Técnicas de otimização global foram empregadas para determinar a eficiência máxima com relação a cinco parâmetros livres do design: submersão da barreira frontal (*lip*), comprimento da câmara, altura da câmara acima da superfície livre, diâmetro e velocidade rotacional para o design de uma classe especial e turbina. O espectro de ondas, semelhante ao da Ilha do Pico, foi utilizado para representar as condições de mar.

- Em Dizadji e Sajadian (2011) é realizado um estudo experimental, em escala de laboratório, de vários designs geométricos de sistemas do tipo CAO, com o objetivo de investigar e otimizar o dispositivo, a fim de transformar o máximo possível de energia.
- Em Zhang et al. (2012) um método numérico, baseado em duas fases com correção global da massa e método de contorno imerso, é desenvolvido para simular a interação da onda com uma câmara semi submersa. Os resultados numéricos obtidos para várias condições de onda são comparados com resultados experimentais. O efeito das várias condições de onda, profundidade de submersão, espessura da parede frontal da câmara CAO, geração de vórtices na região de entrada da câmara CAO e características da câmara CAO na eficiência do dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, são investigados.
- Em Senturk e Ozdamar (2012) foi realizada uma análise teórica de um dispositivo do tipo CAO. É mostrado que algumas variações geométricas dos parâmetros do problema em questão possibilitam obter melhorias na curva de eficiência dos dispositivos CAO.
- Em Bouali e Larbi (2013) são discutidos os efeitos da geometria e das dimensões de um dispositivo do tipo CAO na eficiência do dispositivo. A principal proposta deste estudo é otimizar a geometria e as dimensões do conversor de energia, para obter a máxima potência disponível, considerando uma onda progressiva com período e comprimento constante. Os resultados das simulações mostram que o tamanho da câmara, a profundidade de submersão e a orientação da parede frontal do dispositivo tem um impacto significativo na performance do dispositivo.

De acordo com o que foi apresentado, é possível observar que diversos estudos relativos à otimização já foram desenvolvidos. Entretanto, nenhum deles considera simultaneamente o modelo *volume of fluid* (considerado mais realista) e o clima de ondas predominante para o desenvolvimento do projeto do dispositivo. Deste modo, percebe-se a relevância da proposta do presente trabalho.

## 2.5. Modelagem da perda de carga da turbina em um dispositivo CAO

Nos últimos anos, a comunidade científica, que desenvolve pesquisa relacionada com a modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, tem se preocupado em agregar ao modelo computacional o efeito da perda de carga no escoamento do ar. Esse efeito é ocasionado pela turbina de ar localizada na chaminé de saída do dispositivo CAO (vide Fig. 3.1).

- Uma possibilidade de representar a perda de carga da turbina no dispositivo CAO é através de um meio poroso como em Marjani et, al. (2006) e Marjani et, al. (2008). Foi incluída no modelo uma relação linear entre perda de carga e a vazão mássica de modo a representar a influência da turbina. Isso foi realizado considerando um domínio com meio poroso na região da turbina. A introdução da característica da turbina no FLUENT é obtida ajustando um meio poroso a área da turbina. Esse ajuste é feito considerando uma relação linear entre pressão e vazão mássica. Para este meio, a perda de carga é modelada pela Lei de Darcy.
- Em Horko (2007), existe a tentativa de introduzir uma perda de carga no escoamento, não sendo realista a geometria apresentada, pois corresponde apenas a uma abertura estreita, da largura da câmara da CAO, no topo do dispositivo. A malha não estruturada nas proximidades desta abertura é muito distorcida e os elementos são exageradamente estirados.
- Nos dois estudos numéricos tridimensionais realizados por Liu et al. (2009a) e Liu et al. (2009b) verifica-se que, enquanto no primeiro os autores utilizam uma malha pouco refinada, particularmente na zona de movimento da superfície livre, e elementos muito irregulares na zona de conexão da chaminé, no segundo os autores integram um modelo de turbina original, onde a perda de carga característica é feita com a redução da secção da chaminé. A fim de estudar os efeitos da perda de carga ocasionada pela turbina, os experimentos utilizam uma turbina de impulso e uma placa de orifício. A simulação numérica utiliza o orifício e o meio poroso para validar os resultados com resultados experimentais e ainda considera um caso de câmara CAO com uma placa de orifício. O tanque numérico de ondas é baseado no modelo Volume of fluid, onde é analisada a elevação da onda, variação da pressão no interior da câmara CAO e velocidade do ar na chaminé. Os efeitos da turbina no sistema integrado e a interação

entre a elevação da onda, variação de pressão e velocidade são investigados. Esta metodologia implica na criação de uma nova malha e na calibração da área da secção para um novo modelo de turbina.

- Em Ramalhais (2011) observam-se os efeitos causados pela introdução de diferentes turbinas para um estado de mar característico, e utiliza-se um método prático e versátil para simular a perda de carga introduzida no dispositivo. Numericamente, o modelo da turbina é construído usando uma *UDF (User Define Function)*, onde se define a vazão volumétrica média na secção da turbina e a partir da intensidade da velocidade calcula-se a perda de carga resultante. Esta perda de carga é imposta na secção da turbina como condição de fronteira. A simulação de uma turbina pode ser obtida apenas com a introdução de uma restrição de diâmetro variável (consequentemente perda de carga variável) no topo da CAO. No entanto, a turbina foi modelada introduzindo a sua curva característica, pois assim é possível testar diferentes turbinas, no mesmo dispositivo, para um determinado estado de mar e sem alterar o domínio de cálculo. Ainda, em Ramalhais (2011), considerou-se o estado de mar variável. No entanto, a metodologia apresentada pode ser utilizada no sentido inverso, ou seja, o estado de mar é conhecido e se adequa à geometria da CAO e da turbina para obter a potência máxima. Essa ideia vai de encontro com a proposta dessa tese.
- No trabalho de Corvelo (2011) o objetivo foi a otimização, análise e comparação do desempenho de uma central de energia das ondas do tipo CAO, ora equipada com dois grupos turbo-eléctricos com turbinas do tipo Wells (em paralelo), ora com dois grupos com turbinas de ação. Um dos objetivos deste trabalho, além da análise do funcionamento global da central, foi encontrar os diâmetros dos dois tipos de turbinas que maximizam a energia produzida anualmente. As análises são realizadas por meio de simulações computacionais no domínio do tempo, através de vários programas desenvolvidos para o efeito, em linguagem MATHEMATICA 5.0.

### 3. CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO A SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

#### 3.1. Teoria Constructal

Uma lei da Física é uma declaração concisa que resume um fenômeno que ocorre na natureza. O campo da *Lei Constructal* iniciou 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 e flocos de neve ao *design* animal e ao *design* em árvore da bacia do rio Amazonas (Bejan e Lorente, 2013).

De acordo com a *Lei Constructal* um sistema vivo possui duas características universais: ele flui (é um sistema em desequilíbrio termodinâmico), que 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).

A *Teoria Constructal* foi desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013). De uma maneira geral, explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo, 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 tempo. Este princípio é a lei 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, 2000; Bejan e Lorente, 2006; Bejan e Lorente, 2008; Beyene e Peffley, 2009; Bejan e Zane, 2012; Miguel, 2013).

Os sistemas em geral são similares. Isso é possível verificar através do *design* (empregando a *Lei Constructal*). A aplicação da *Lei Constructal* permite descrever o conhecimento através da evolução, direção, propósito e *design*. A direção da evolução é a facilidade do fluxo. O *design* que observamos na natureza, forma e estrutura dos rios, animais, cidades, etc., é a manifestação da tendência da natureza em gerar forma e estrutura para facilitar o acesso do fluxo. A *Lei Constructal* identifica o fenômeno tão antigo quanto o próprio universo, mas não reconhecido até agora. Permite-nos não somente descrever, mas também prever a evolução de todos os sistemas de fluxo. A *Lei Constructal* captura a

tendência central na natureza, e com isso, proporciona um melhor fluxo. Usando essa lei é possível reformular processos de forma orgânica e dinâmica para gerar *designs* melhores. Porém, existe o aparecimento das imperfeições nos sistemas. A redistribuição das imperfeições em sistemas de fluxo complexo é obtida fazendo mudanças na arquitetura do fluxo. Isso vale para desenhos animados e inanimados (Bejan e Zane, 2012).

Segundo a *Teoria Constructal* a forma redonda dos tubos, a forma das seções transversais dos rios e a maneira como as veias se interligam para atingir o coração são determinadas por um princípio, isto é, existe uma direção para onde os sistemas abertos (vivos) caminham, sempre com o objetivo de melhorar o desempenho.

O *Constructal Design* é um método empregado para a obtenção de formas geométricas ótimas de sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo. De acordo com este método, o fluxo é maleável e a geometria é deduzida a partir de um princípio de maximização do desempenho global. 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, um objetivo (uma grandeza a ser otimizada: vazão mássica, potência, energia, etc), graus de liberdade (parâmetros geométricos que podem variar durante o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização).

### **3.2. Constructal Design aplicado a problemas de engenharia**

Os processos de otimização multi-objetivo tem sido tema de grande preocupação da comunidade científica, após o desenvolvimento de ferramentas numéricas que permitem tratar simultaneamente a análise de tensões, assim como o escoamento do fluido e a transferência de calor. Citam-se alguns trabalhos importantes sobre o tema:

- Lorente e Bejan (2002) destacam um processo de otimização da estrutura interna de uma parede vertical, buscando atender dois requisitos: isolamento térmico e resistência mecânica. O trabalho mostra que o número de cavidades de ar pode ser otimizado de modo que a resistência térmica total da parede é máxima, enquanto que a rigidez mecânica é máxima. Afirma, ainda, que o número de aberturas de ar pode ser otimizado quando a rigidez global é especificada, além de determinar que

o número de aberturas de ar é maior quando aumenta o efeito da convecção natural e a rigidez diminui.

- Gosselin et al.(2004) apresenta uma forma de otimização que leva em consideração a transferência de calor e a resistência mecânica (essas duas funções são consideradas desde o início do projeto). Neste trabalho, é demonstrado que formas e estruturas de vigas podem ser otimizadas para enfrentar ataques térmicos. Fundamentalmente, o trabalho defende que podem ser combinadas várias funções a fim de se obter um projeto multi-objetivo e, assim, um melhor desempenho na resistência mecânica frente à transferência de calor. O autor ainda destaca a possibilidade de realizar tarefas multi-objetivas em outros projetos de CFD (“*Computational Fluids Dynamics*”).
- Beyenne e Peffley (2009) desenvolveram um estudo que inicialmente consistiu em compreender o movimento propulsor adaptativo das barbatanas dos peixes ou das asas dos pássaros, fazendo uma analogia com os conceitos da *Teoria Constructal*. Após, tais conceitos foram usados no projeto de turbinas para baixos números de Reynolds.
- Kim et al. (2011) apresentam um estudo em que as principais características de um gerador de vapor podem ser determinadas com base no método *Constructal Design*. O gerador tem a liberdade de se transformar e, assim, é otimizado colocando os componentes certos nos lugares corretos.
- Azad e Amidpour (2011) empregam uma nova abordagem com *teoria constructal* para projetar o casco e um trocador de calor de tubo. O objetivo é otimizar tanto o casco como o trocador de calor pela redução do custo total, através da *teoria constructal*. São usados algoritmos genéticos para otimizar a função objetivo, que é o custo do casco e do trocador de calor. Os resultados indicam uma redução superior a 50 % nos custos do trocador de calor.

Percebe-se uma boa possibilidade de utilização dos conceitos de teoria Constructal aplicados na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, procurando-se otimizar aspectos ligados a geometria dos dispositivos conversores da energia das ondas em energia elétrica e campos de velocidade, propiciando, assim, que se tenha o melhor aproveitamento possível da energia contida na onda. Outros estudos relacionados à otimização geométrica de problemas de mecânica dos fluidos e

transferência de calor podem ser vistos nos livros texto de Bejan (2000) e Bejan e Lorente (2008)

### 3.3. Constructal Design aplicado ao conversor tipo CAO

No campo da engenharia, *Constructal Design* tem sido predominantemente empregado para a otimização geométrica de problemas na área de mecânica dos fluidos e transferência de calor (Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2013). No entanto poucos trabalhos são encontrados na literatura envolvendo a aplicação do *Constructal Design* em conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica.

Em Lopes et al. (2011) e Rocha et al. (2013) foi empregado *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé ( $l$ ) e o comprimento da câmara CAO ( $L$ ). Na Fig. 3.1 é possível verificar cada um dos graus de liberdade indicados. Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório e, tanto o comprimento da câmara CAO ( $L$ ) quanto a 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 resultado principal indica que a razão “ótima” é quando  $(l/L)_o = 0,6$ . O principal objetivo foi maximizar a vazão mássica de ar na chaminé de saída do dispositivo CAO. O mesmo princípio foi empregado para a otimização geométrica de um dispositivo do tipo galgamento em Machado et al. (2011) e Rocha et al. (2013). Nestes trabalhos, o grau de liberdade adotado foi a razão entre a altura da rampa e o seu comprimento e o objetivo foi maximizar a quantidade de água introduzida no reservatório do dispositivo. Em ambos os estudos, os resultados indicaram que a metodologia *Constructal Design* pode ser usada de maneira satisfatória para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar.

Além disso, em Gomes et al. (2012b) foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre otimização geométrica, utilizando *Constructal Design*, de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo CAO *offshore* em um domínio bidimensional, onde  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara CAO) foi variada e  $H_2/l$  (razão entre a altura e o diâmetro da chaminé) foi mantido constante. A área da câmara do dispositivo CAO ( $\phi_1$ ) e a área total do dispositivo CAO ( $\phi_2$ ) foram mantidos constantes, sendo estas as restrições do

problema, conforme o *Constructal Design*. Para essa análise foi considerado um clima de ondas regular em escala de laboratório, com período  $T = 0,8$  s e comprimento de onda  $\lambda = 1,0$  m. A recomendação teórica a respeito da geometria ideal foi definida por  $(H_1/L)_o = 0,84$ , que é aproximadamente dez vezes mais eficiente do que a pior geometria ( $H_1/L = 0,14$ ). É importante destacar que neste estudo a profundidade de submersão da câmara CAO  $H_3$  é mantida fixa.

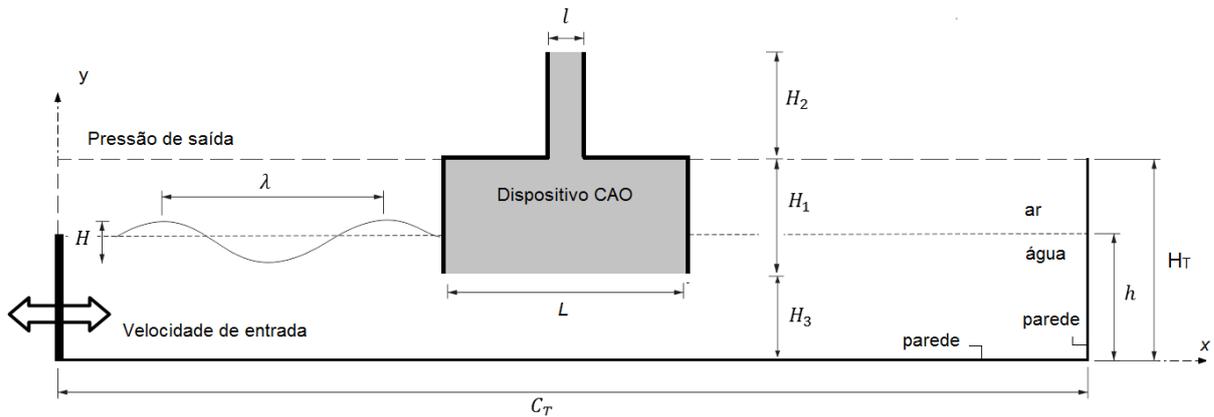


Figura 3.1- Representação esquemática do domínio computacional 2D.

A estratégia aplicada em Gomes et.al (2012b) foi estendida para uma onda com período  $T = 5$  s, ou seja, uma onda com características reais. Em Gomes et. al (2013a) além do grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) a profundidade de submersão da câmara CAO ( $H_3$ ) também foi otimizada. Os resultados apontaram uma recomendação teórica sobre a geometria da câmara CAO que maximiza a eficiência do dispositivo CAO. A maior eficiência obtida (cerca de 40%) é obtida quando  $(H_1/L)_o = 0,13$  e  $H_3=9,50$  m. Por outro lado, a configuração geométrica com o pior desempenho (cerca de 4,40 %) é obtida quando  $H_1/L=0,03$  e  $H_3=9,00$  m. Ou seja, o melhor caso apresenta uma eficiência cerca de dez vezes maior em relação ao pior caso.

Em Gomes et al. (2013b), empregando o método *Constructal Design*, é realizada uma comparação entre a localização dos dispositivos CAO, considerando o mesmo no meio de um tanque de ondas (o que representa o caso CAO - *offshore*) e em uma segunda localização considera-se o equipamento no final do tanque de ondas (o que representa o caso CAO - *onshore*). O grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara do

dispositivo de coluna de água oscilante) foi variado, enquanto os graus de liberdade:  $H_2/l$  (razão entre a altura da câmara e o comprimento da chaminé) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo CAO) foram mantidos fixos. As áreas da câmara e total do dispositivo CAO ( $\phi_1$  e  $\phi_2$ , respectivamente) são mantidas constantes, sendo as restrições geométricas do problema. Foi empregada uma onda com características regulares e com dimensões em escala real. O objetivo foi otimizar a geometria do dispositivo visando maximizar sua potência absorvida para um clima de ondas específico. Os resultados conduziram a uma recomendação teórica sobre a geometria ótima da câmara, ou seja, a geometria que maximiza a potência do dispositivo. O melhor desempenho foi obtido para um dispositivo com a configuração *offshore* para uma razão ótima de  $H_1/L = 0,13$ . Outra observação importante é que, em ambas as configurações (*onshore* ou *offshore*), o emprego do *Constructal Design* possibilitou a otimização geométrica do dispositivo. Contudo, o efeito da razão  $H_1/L$  sobre a potência do dispositivo foi diferente para as duas localizações estudadas.

Em Oliveira et al. (2012), foi aplicado *Constructal Design* para otimizar as dimensões da câmara de ar de um dispositivo do tipo CAO. A proposta de otimização foi investigar a relação  $H_1/L$ , onde  $H_1$  é a altura e  $L$  é o comprimento da câmara CAO, que possibilita extrair a máxima potência disponível na onda incidente.

Em Santos et al. (2014) é abordado um dispositivo conversor de energia das ondas do mar cujo princípio de funcionamento é o galgamento. Um estudo numérico é realizado para otimizar geometricamente, empregando *Constructal Design*, o conversor submetido a diversas profundidades relativas.

Por tudo isso é evidente a aplicabilidade de *Constructal Design* em problemas relacionados à otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, onde, com algumas redistribuições geométricas (imperfeições do problema), é possível obter resultados que conduzem a melhores desempenhos.

### **3.4. Formulação para otimização de dispositivos conversores de energia das ondas do mar através do Constructal Design**

A proposta deste trabalho é analisar numericamente o efeito da variação da geometria de uma câmara CAO considerando um espectro de onda com características reais, variando-se o período, o comprimento da onda e, conseqüentemente, a celeridade da mesma. Busca-se

assim, obter uma recomendação teórica para a geometria do dispositivo do tipo CAO que possui a maior eficiência na transformação de energia das ondas do mar em energia elétrica. Considera-se para isso, a reprodução do estudo realizado em Gomes et. al. (2013a) para outros períodos de ondas reais, configurando assim um espectro de onda. Este é o diferencial desta proposta, em relação aos demais trabalhos que envolvem a aplicação de *Constructal Design* em energia das ondas do mar.

Dessa forma são variados os seguintes graus de liberdade:  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) e  $H_3$  (profundidade de submersão da câmara CAO). A relação  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantida constante. O volume de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $V_E$ ) e o volume total do dispositivo CAO ( $V_T$ ), respectivamente, são mantidos constantes e são as restrições geométricas do problema. De acordo com Bejan e Lorente (2008), estes volumes devem ser mantidos constantes, pois através deles ocorre escoamento com volume finito. Em geral, os sistemas tendem a possuir o maior volume possível a fim de cumprir com o propósito ao qual se destinam. Entretanto, isto não é possível porque o sistema muitas vezes precisa ser transportado e nesse caso ele precisa ter o menor peso possível (menor massa, menor volume). Assim, desse balanço, se conclui que o sistema precisa ser finito e é resultado do balanço dessas duas tendências.

Os volumes  $V_E$  e  $V_T$ , respectivamente, são descritos por, respectivamente:

$$V_E = H_1 L L_1 \quad (3.1)$$

$$V_T = V_E + H_2 l L_1 \quad (3.2)$$

A dimensão  $L_1$  é mantida constante e igual a um, de modo que o problema é considerado bidimensional. A partir da Eq. (3.1) é possível obter equações que determinam as dimensões para o comprimento ( $L$ ) e para a altura ( $H_1$ ) da câmara CAO, respectivamente:

$$L = \left[ \frac{V_E}{\left(\frac{H_1}{L}\right) L_1} \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$H_1 = L \left( \frac{H_1}{L} \right) \quad (3.4)$$

E a partir da Eq. (3.2) é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro ( $l$ ) e a altura ( $H_2$ ) da chaminé da câmara CAO, respectivamente:

$$l = \left[ \frac{V_T - V_E}{\left( \frac{H_2}{l} \right) L_1} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$H_2 = l \left( \frac{H_2}{l} \right) \quad (3.6)$$

Vale destacar que a relação  $H_2/l$  é mantida constante,  $H_2/l = 3.0$ , para todas as simulações realizadas.

O objetivo é sempre levar em consideração o clima de ondas para a variação da geometria do dispositivo CAO. Assim, como critério para a definição da restrição do volume de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $V_E$ ) considera-se a situação inicial em que o comprimento do dispositivo CAO ( $L$ ) é igual ao comprimento da onda incidente ( $\lambda$ ) e que a altura do dispositivo CAO ( $H_1$ ) é igual à altura da onda incidente ( $H$ ). Para determinar a restrição do volume total do dispositivo CAO ( $V_T$ ) é definido que  $V_E$  representa 70 % de  $V_T$ .

As funções objetivo a serem consideradas ao longo deste trabalho são a média RMS das seguintes grandezas: vazão mássica, pressão e potência hidropneumática.

## 4. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

Neste capítulo são discutidos aspectos relacionados à modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Na Fig. 4.1 é possível verificar através de um esquema o caminho a ser percorrido até a conclusão de uma simulação numérica em energia das ondas do mar.

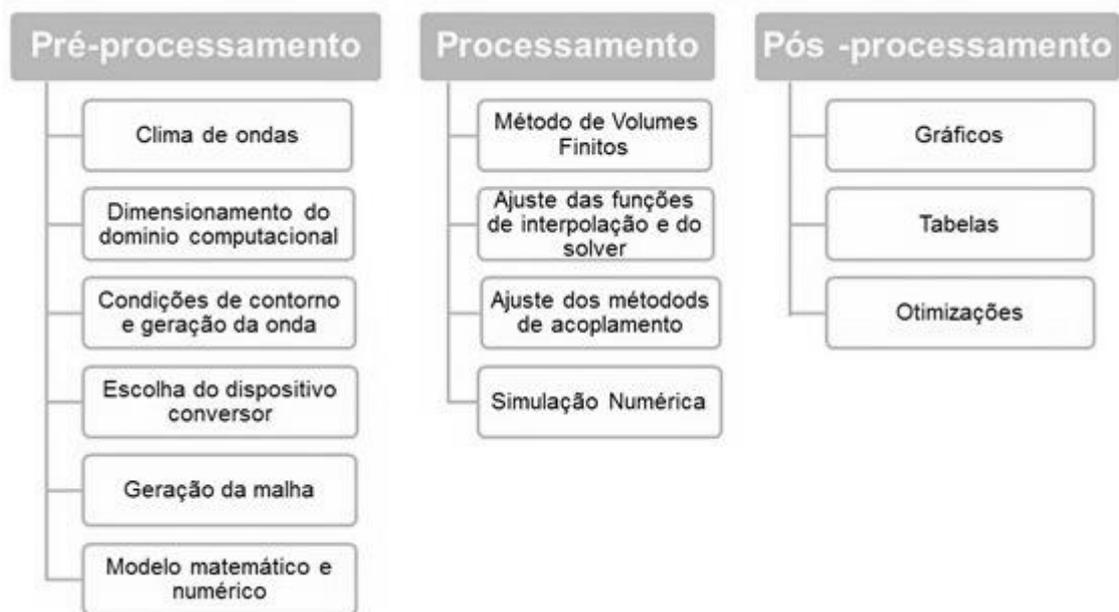


Figura 4.1 – Etapas da simulação numérica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica.

### 4.1. Teoria de ondas oceânicas

As ondas na superfície livre de líquidos existem devido à tendência natural de permanecer no estado de equilíbrio. Quando um objeto é largado num tanque de água, um distúrbio é criado e forma a onda de superfície. Os movimentos subsequentes na superfície são resultado da ação da gravidade fazendo com que a água retorne a sua posição sem distúrbio. Uma vez que estas ondas são resultado da gravidade elas são chamadas de ondas de gravidade (McCORMICK, 1973).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), outro fator que pode causar um distúrbio na superfície livre é a ação dos ventos. Eles afirmam, ainda, que as ondas podem ocorrer de todos os tamanhos e formas, dependendo da magnitude das forças que agem sobre a água.

As ondas oceânicas são formadas pela superposição de diferentes ondas, justificando o seu comportamento aleatório e de difícil representação matemática. Porém, grandes ondas em uma série de ondas aleatórias podem ser determinadas na forma de ondas regulares, podendo, então, ser descritas através de teorias determinísticas (CHAKRABARTI, 2005).

Desta forma, descrever ondas no oceano é de grande complexidade, uma vez que elas são produto de diversas interações e superposições. Os principais fatores que influenciam na agitação marítima são as ondas gravitacionais, as marés, os ventos, as tempestades e os deslocamentos de gelo ou de terra. (CARNEIRO, 2007).

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. Porém, ao longo deste trabalho, utilizam-se as ondas regulares para o estudo numérico dos conversores de energia do tipo CAO. Na Fig. 4.2, é possível observar as principais características das ondas regulares.

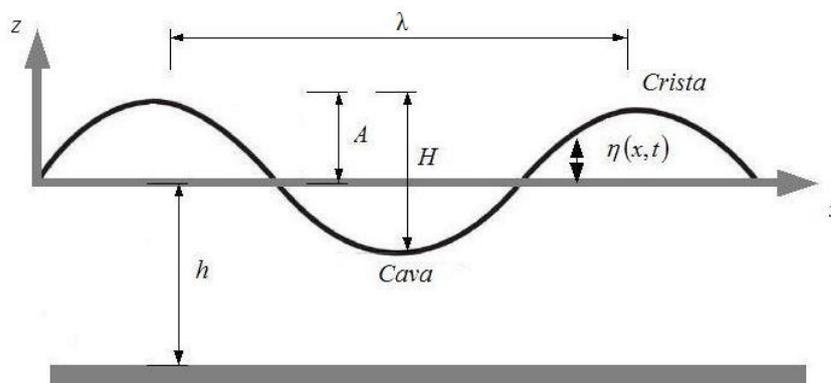


Figura 4.2 – Características elementares da onda.

Considerando a Fig. 4.2, são apresentados os principais elementos de uma onda:

- **Profundidade ( $h$ ):** é a distância do fundo do mar até o nível médio da água (superfície livre).
- **Crista:** é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água.
- **Cavado:** é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o plano do nível médio da água.
- **Amplitude ( $A$ ):** é a distância entre a crista e a superfície livre da água ou a distância entre o cavado e a superfície livre da água.
- **Altura ( $H$ ):** é a distância entre as cristas e cavas sucessivas.
- **Elevação da superfície livre ( $\eta$ ):** representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água.
- **Comprimento ( $\lambda$ ):** é a distância entre duas cristas ou cavados sucessivos e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\lambda = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (4.1)$$

- **Período ( $T$ ):** é o tempo necessário para a forma da onda percorrer um ciclo completo, no caso um comprimento de onda.
- **Celeridade ( $C$ ):** representa a velocidade de propagação da crista da onda, e pode ser calculada por:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (4.2)$$

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

- Declividade ( $H/\lambda$ )
- Profundidade relativa ( $h/\lambda$ )
- Altura de onda relativa ( $H/h$ )

- Número de Ursell ( $U_R = \lambda^2 H/h^3$ )

A teoria de ondas mais simples é a teoria linear de ondas, também conhecida como teoria de Airy. Essa teoria é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas. Teorias não lineares conseguem obter uma representação mais próxima das ondas reais, permitindo 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).

A solução de Stokes é formalmente válida para  $kh < 1$  e  $H/\lambda \leq 1$ , sendo  $k=2\pi/\lambda$  o número de onda (CEM, 2002). Em termos do número de Ursell, o limite de aplicação é  $U_R < 26$  (DEAN e DALRYMPLE, 1991).

A teoria linear de ondas é a mais simples de todas as teorias e pode ser aplicada a um conjunto muito particular de ondas que não existem na natureza. Porém, esse modelo é útil para a compreensão de muitos fenômenos e na solução de um grande número de problemas reais (CARNEIRO, 2007).

Todas as ondas, gravidade, acústica ou eletromagnética, obedecem a uma forma de equação de onda. A variável dependente em cada caso está relacionada com o fenômeno físico e com as condições de contorno. Em geral, a equação da onda e as condições de contorno podem ser lineares ou não lineares. Sabendo que a água é incompressível e assumindo um escoamento irrotacional, uma onda de superfície deve satisfazer a forma linear especial da equação da onda, conhecida como Equação de Laplace. A solução da equação de Laplace é obtida quando submetida a condições de contorno lineares (McCORMICK, 1973).

Conhecendo-se os parâmetros  $h$ ,  $H$  e  $T$  e com a ajuda do gráfico apresentado na Fig. 4.3 pode-se selecionar qual teoria de ondas deve ser aplicada.

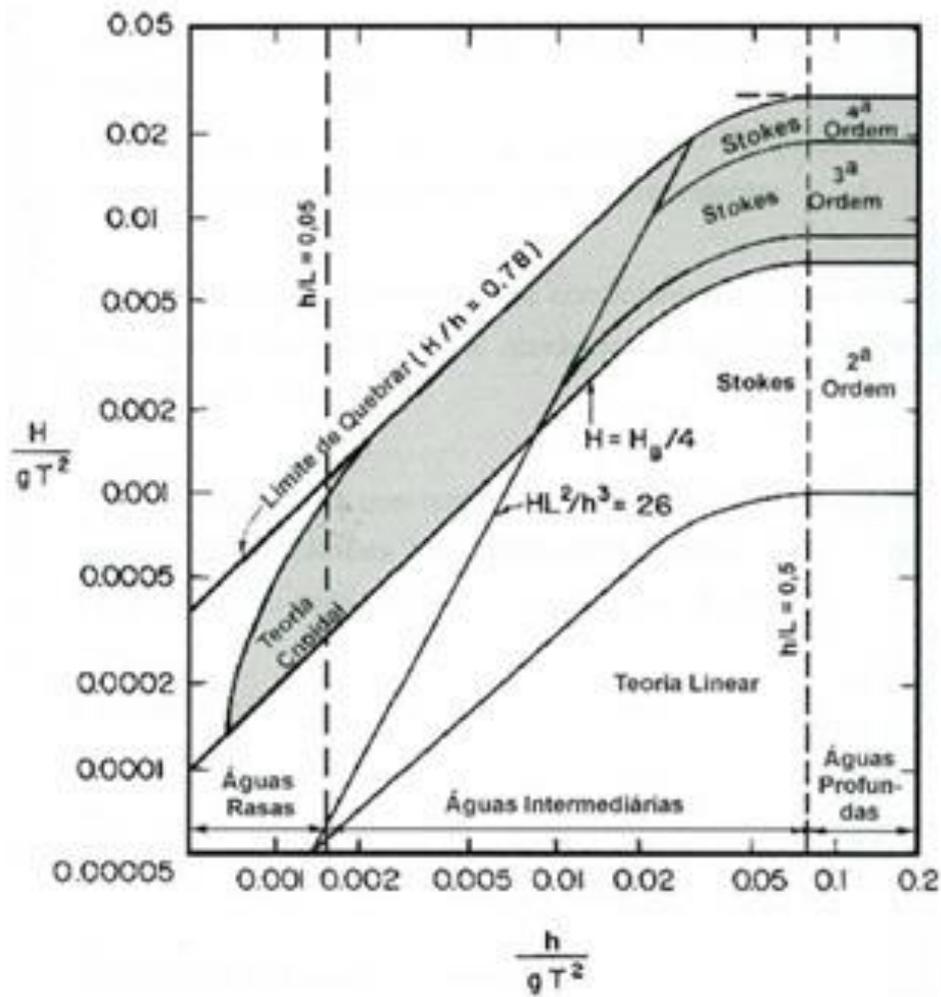


Figura 4.3 – Aplicabilidade das teorias de ondas (CHAKRABARTI, 2005).

As ondas de gravidade na água devem satisfazer basicamente às três seguintes condições de contorno:

- 1) **Condição Cinemática da superfície livre:** partículas de água não podem atravessar a superfície livre. Para satisfazer esta condição, a velocidade da partícula deve ser igual a velocidade normal na superfície livre. Matematicamente temos a seguinte condição:

$$V|_{z=\eta} \approx \frac{\partial \eta}{\partial t} \vec{k} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \vec{k} \quad (4.3)$$

onde  $\phi$  é uma função potencial,  $\eta$  é a elevação da superfície livre, e  $\vec{k}$  é o vetor unitário normal,

2) **Condição dinâmica da superfície livre:** a pressão na superfície livre é zero para alguma posição  $x$  e algum tempo  $t$ . Consiste basicamente em aplicar a Equação de Bernoulli à superfície livre e obtém-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2}V^2 = 0 \quad (4.4)$$

onde  $\phi$  é uma função potencial,  $g$  é a gravidade,  $\eta$  é a elevação da superfície livre e  $V$  a velocidade.

A segunda condição de contorno pode ser linearizada utilizando a condição de linearização dinâmica dada por:

$$\eta = -\frac{1}{g} \left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{z=\eta} \quad (4.5)$$

3) **Condição do fundo:** o fundo pode ser considerado como um plano horizontal e impermeável. Matematicamente, em  $z = -h$ .

$$V \cdot m = \frac{\partial \phi}{\partial N} = 0 \quad (4.6)$$

onde  $m$  é a coordenada normal no fundo do mar e  $N$  é o vetor normal unitário exterior.

Estamos lidando com um fluido contínuo dentro da onda, portanto a equação da continuidade é satisfeita. Se o escoamento for irrotacional, a velocidade pode ser representada por uma função potencial, assim é possível escrever a equação da continuidade da seguinte forma:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4.7)$$

Onde uma solução para a Eq. (4.7) e que satisfaça às condições de contorno apresentadas fornece o seguinte potencial de velocidades:

$$\phi = \frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (4.8)$$

A partir da Eq. (4.8) são obtidas as seguintes componentes para a velocidade:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{Agk}{\omega} \frac{\cosh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (4.9)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{Agk}{\omega} \frac{\sinh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (4.10)$$

onde  $u$  é a componente na direção  $x$  da velocidade e  $w$  é a componente na direção  $z$  da velocidade.

É possível ainda destacar uma equação que descreva o movimento da superfície livre:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (4.11)$$

Uma teoria de ondas não linear é a Teoria de Stokes, que consiste em assumir que as propriedades do movimento das ondas, como o potencial de velocidades, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. A mesma se aplica para alturas de onda maiores em águas relativamente profundas. Nesta teoria o potencial de velocidades é obtido através de uma série de potências do tipo:

$$\phi = \varepsilon \phi_1 + \varepsilon^2 \phi_2 + \varepsilon^3 \phi_3 + \dots \quad (4.12)$$

A solução contendo o termo de primeira ordem  $\phi_1$  representa a teoria linear. A expansão até o segundo termo  $\phi_2$  representa a teoria de Stokes de 2ª ordem e assim por diante.

Diferentemente do que ocorre na teoria linear, a trajetória de uma partícula, quando são consideradas teorias não lineares, não descreve uma órbita fechada. Esse comportamento se aproxima ainda mais do comportamento de ondas reais com o movimento de correntes marítimas, indicando a transferência de massa ao longo da direção de propagação da onda.

Apresenta-se a equação que descreve o movimento da superfície livre na teoria de Stokes de 2ª Ordem.

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \operatorname{senh}^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.13)$$

E também as componentes da velocidade:

$$u = Agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\operatorname{sen}^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.14)$$

$$w = Agk \frac{\operatorname{senh}(kz + kh)}{\omega \operatorname{senh}(kh)} \operatorname{sen}(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\operatorname{senh} 2k(k + z)}{\cos^4(kh)} \operatorname{sen} 2(kx - \omega t) \quad (4.15)$$

onde  $z$  é variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar. Maiores detalhes desta teoria podem ser encontrados em (McCORMICK, 1973; DEAN e DALRYMPLE, 1991).

## 4.2. Domínio Computacional

A partir do conhecimento das características principais do clima de ondas (período ( $T$ ), altura ( $H$ ) e profundidade de propagação ( $h$ )) é possível determinar o comprimento ( $C_T$ ) e a altura do tanque de ondas ( $H_T$ ) apresentado na Fig. 3.1. Não existe uma regra geral que estabeleça as dimensões do tanque de ondas, porém algumas questões devem ser consideradas. A profundidade de propagação da onda é a mesma do tanque, representada por  $h$ . Para o comprimento do tanque é preciso considerar o comprimento da onda. De acordo com Gomes et. al (2009h), é possível definir que o comprimento do tanque deva ser cinco vezes maior que o comprimento da onda. Assim, garante-se a simulação numérica da onda, sem efeitos de reflexão por um tempo razoável de propagação e sem aumentar

desnecessariamente o tamanho do domínio computacional e, por consequência, a malha, fator que influencia diretamente no esforço computacional.

Com relação à altura do tanque é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim é possível definir, conforme Gomes et. al (2009h), que a altura do tanque seja dada pela profundidade mais três vezes a altura da onda. Dessa forma, as dimensões do domínio computacional podem ser determinadas de acordo com as características da onda que será gerada.

### 4.3. Condições de Contorno

No que diz respeito ao gerador de ondas numérico (extremidade esquerda do tanque de ondas – vide Fig. 3.1), a condição de contorno empregada neste trabalho é baseada na Metodologia Função empregada em GOMES et al. (2009h). Esta metodologia consiste em aplicar na região do gerador de ondas uma variação da velocidade de entrada (*velocity inlet*) através de uma função definida pelo usuário, UDF (*User Define Function*) – vide Anexo A.1, no FLUENT. A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria linear de ondas (DEAN e DALRYMPLE, 1991; McCORMICK, 1976; CHAKRABARTI, 2005). Entretanto, existem outras duas possibilidades de geração numérica de ondas usando o software de CFD FLUENT. A primeira metodologia consiste de utilizar uma parede móvel, reproduzindo um gerador de ondas do tipo pistão, denominada Metodologia Móvel – MM (Gomes et al., 2009h). A segunda estratégia aplica a condição de contorno de geração de ondas regulares já incorporadas no pacote de dinâmica dos fluidos computacional, a partir da versão 12 do FLUENT<sup>®</sup>, e que não faz uso de códigos auxiliares.

É importante ressaltar que, de acordo com a classificação proposta por CHAKRABARTI (2005), se a onda em consideração for linear serão utilizadas na UDF as Eqs. (4.9) a (4.11). Por outro lado, se a onda for considerada de segunda ordem serão utilizadas na UDF para reprodução do perfil de velocidades, as Eqs. (4.13) a (4.15).

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior do tanque é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica. Nas demais superfícies do tanque de ondas: superfície inferior e superfície lateral direita são impostas uma condição de não deslizamento e impermeabilidade

com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, é considerado que o fluido está em repouso.

#### 4.4. Geração da malha

A qualidade das soluções em CFD é governada pelo número de elementos (volumes) da malha. O tempo de simulação e o esforço computacional também são dependentes do refinamento da malha, visto que uma malha de boa qualidade pode tornar os códigos de CFD mais robustos, quando bem construída, independentemente do solver de fluxo utilizado. Sendo assim, a etapa de geração da malha tem se tornado a etapa mais importante e que demanda mais tempo na análise de CFD (SANTOS, 2008).

A fase inicial de qualquer simulação numérica consiste na discretização do domínio computacional, ou seja, na geração de uma malha adequada. Conforme MALISKA (2004), quando os volumes de controle são obtidos com uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais, é possível afirmar que a discretização ou a malha resultante é estruturada, uma vez que cada volume interno tem o mesmo número de vizinhos. Por outro lado, técnicas de geração de malhas não estruturadas são inerentemente mais automáticas e mais adequadas para serem utilizadas em geometrias complexas do que as malhas estruturadas ou estruturadas em blocos. A premissa básica é que devido aos elementos poderem ser construídos aleatoriamente os mesmos preenchem mais facilmente o domínio computacional (MAVRIPILIS, 1997).

A forma mais simples de geração de malhas para a geração numérica de ondas em tanques é a discretização do domínio computacional em quadrados. Entretanto, essa estratégia pode aumentar o esforço computacional desnecessariamente e, até, inviabiliza a simulação de casos com magnitudes maiores.

Como esforço para a solução das equações de Navier-Stokes, foi necessário o desenvolvimento de técnicas de geração de malha *stretched* a fim de resolver camadas limites e outras regiões com características de alto número de Reynolds em escoamentos viscosos. A determinação adequada da camada limite, usualmente, requer malhas espaçadas de diversas ordens de magnitude e menores nas direções normais ao contorno, resultando em grandes razões de aspecto nas células dessas regiões (MAVRIPILIS, 1997).

Essa estratégia de geração de malhas pode ser estendida aos problemas de propagação de ondas regulares em tanques. Portanto, em boa parte dos casos desse trabalho, para a

geração da malha nesse estudo, foi adotada uma estratégia que tem como objetivo gerar uma malha mais refinada em determinadas regiões de interesse no domínio computacional, como a superfície livre, por exemplo. Essa metodologia é baseada na técnica de malhas *stretched* (MAVRIPILIS, 1997).

O principal objetivo de utilizar essa estratégia de geração de malha reside no fato de ser possível estabelecer o número de volumes por determinada região, conforme a Fig. 4.4. Nesta figura, R1 é o número de volumes da região acima da superfície livre, que contém somente ar. Na região da superfície livre, onde tem água e ar, o número de volumes é dado por R2. Na região abaixo da superfície livre, que contém somente água, a letra R3 representa o número de volumes e R4 é o número de volumes por cada comprimento de onda. Com esse esquema é possível definir as dimensões de cada volume da malha, dividindo a dimensão da região pelo número de volumes desejado.

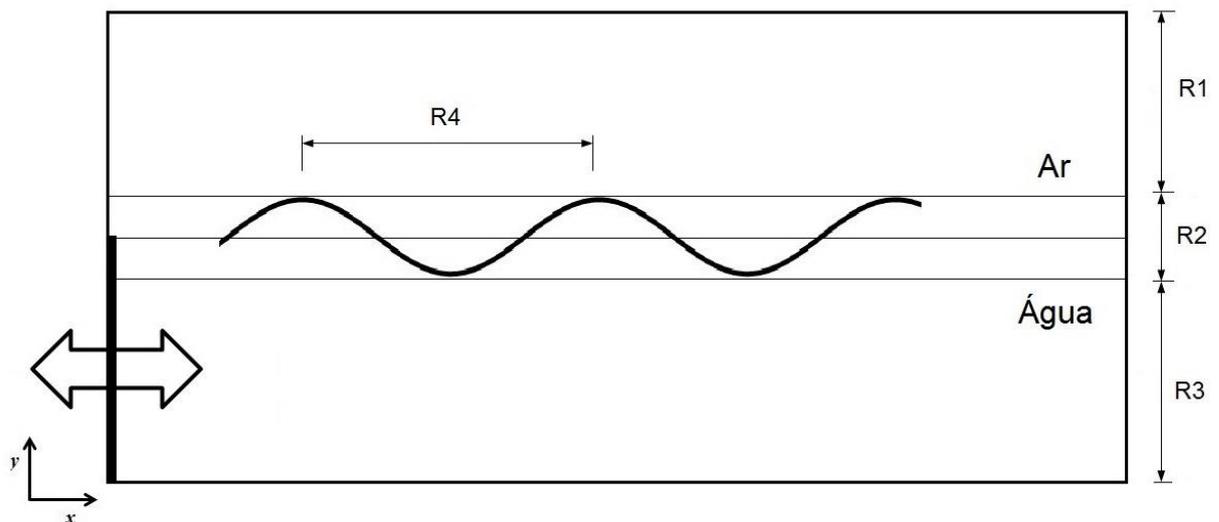


Figura 4.4 -Malha definida através do número de volumes por característica da onda.

Nos casos que serão analisados, utilizou-se o gerador de malhas GAMBIT. O GAMBIT é um programa computacional que auxilia na construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações científicas. É capaz de tornar mais simples e intuitivas as etapas de construção, discretização (geração da malha) e definição dos tipos de regiões do modelo, sendo suficientemente versátil para tratar uma ampla variedade de modelos (FLUENT, 2006).

Em BARREIRO (2009) e em GOMES et al. (2012a) é apresentado um estudo detalhado a respeito da geração de malhas do tipo *stretched* para a simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanques. A recomendação obtida em BARREIRO (2009) e em GOMES et al. (2012a) indica que, na direção vertical, o tanque deve ser dividido em três regiões denominadas *R1*, *R2* e *R3*. Na região da superfície livre da água (região *R2*) deve ser adotado um refinamento com 40 volumes na direção *y* (o tamanho desse intervalo é equivalente a  $H/20$ ) e com 50 volumes por comprimento de onda, totalizando 250 volumes, na direção *x* (o tamanho do intervalo nesse caso é equivalente a  $\lambda/50$ ). Além disso, 10 e 90 volumes devem ser usados na direção *z* para a discretização espacial das regiões *R1* e *R3*, respectivamente, de acordo com Barreiro (2009). Para completar o domínio computacional, quadrados com 0,1 m de lado podem ser utilizados na discretização do dispositivo CAO com características reais.

#### 4.5. Modelo Volume of Fluid

O método *Volume of Fluid*- VOF (HIRT e NICHOLS, 1981) é utilizado nesse trabalho. O modelo VOF vem sendo empregado para a simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Validações e verificações desse modelo numérico, aplicado à energia das ondas do mar, e principalmente, dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em HORKO (2007), LIU et al. (2008a), LIU et al. (2008b), GOMES et al (2009d), GOMES (2010), RAMALHAIS (2011), LIU et al. (2011) e GOMES et al (2012b).

O VOF é um modelo multifásico usado para a solução de escoamentos compostos de dois ou mais fluidos imiscíveis. Nesta formulação, todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito da fração de volume ( $\alpha$ ). Conseqüentemente é necessário que a soma de todas as fases em cada célula seja sempre igual a um. Neste trabalho, somente duas fases são consideradas: a água e o ar. Portanto, as células com valores de  $\alpha_{\text{água}}$  entre 0 e 1 contêm a interface entre água e ar (neste caso  $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ ). As que possuem  $\alpha_{\text{água}} = 0$  estão sem água e completas de ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1$ ); e, por sua vez, as que apresentam  $\alpha_{\text{ar}} = 0$  estão cheias de água ( $\alpha_{\text{água}} = 1$ ).

Além disso, quando o método VOF é empregado, apenas um único conjunto de equações, formado pelas equações de quantidade de movimento e de continuidade, é aplicado a todos os fluidos componentes do escoamento. Então, a fração de volume de cada fluido em cada célula (volume de controle) é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração volumétrica. Assim, o modelo é composto pela equação de continuidade:

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

Pela equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\rho \alpha_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_q \vec{v}) = 0 \quad (4.17)$$

A Eq. (4.17) pode ser reescrita para duas fases da seguinte maneira:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (4.18)$$

onde  $\dot{m}_{qp}$  é a transferência de massa da fase q para a fase p e  $\dot{m}_{pq}$  é a transferência de massa da fase p para a fase q. Por simplicidade, o termo fonte  $S_{\alpha_q}$  é zero, mas é possível empregar uma fonte de massa constante ou definida pelo usuário para cada fase. A equação da fração volumétrica não será resolvida para a fase primária. A fração de volume da fase primária será computada com base na seguinte restrição:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4.19)$$

Uma única equação da quantidade de movimento é resolvida ao longo do domínio e o campo de velocidades é compartilhado entre as fases. As equações de quantidade de movimento são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \overline{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (4.20)$$

onde:  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$  é o tempo (s),  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do escoamento (m/s),  $p$  é a pressão estática (Pa),  $\mu$  é a viscosidade (kg/ms),  $\overline{\tau}$  é o tensor de tensões ( $\text{N/m}^2$ ) e  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

Uma vez que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente (SRINIVASAN et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (4.21)$$

$$\mu = \alpha_{\text{agua}} \mu_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (4.22)$$

#### 4.6. Modelo Numérico

Três tipos de métodos podem ser empregados na solução de um problema de engenharia: experimentais, analíticos e numéricos. Cada um destes métodos apresenta vantagens e desvantagens 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 (1999), MALISKA (2004), FORTUNA (2000), VEERSTEEG e MALALASEKERA (1999), PATANKAR (1980) e TANNEHIL et al. (1997).

A metodologia empregada neste trabalho é numérica. O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, devido ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido maior 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).

Para obter uma solução numericamente aproximada, é necessário usar um método de discretização que aproxime as equações diferenciais através de um sistema de equações algébricas, que pode ser solucionado computacionalmente. As aproximações são aplicadas a pequenos domínios no espaço e/ou no tempo e, então, a solução numérica gera resultados em localizações discretas no espaço e no tempo. Assim como resultados experimentais dependem da qualidade dos equipamentos utilizados, a precisão da solução numérica é dependente da qualidade da discretização usada (FERZIGER e PERIC, 1997).

Segundo VERSTEEG e MALALASEKERA (1999), 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 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.

De uma maneira geral, os pacotes comerciais de CFD apresentam sofisticadas interfaces aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados. Para isso, estes códigos são divididos em três etapas principais: o pré-processamento, a solução e o pós-processamento.

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 são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método (MALISKA, 2004; VERSTEEG e MALALASEKERA, 1999).

Neste trabalho as simulações computacionais são realizadas através do software de CFD FLUENT que é baseado no MVF. Portanto, a seguir serão abordados aspectos relacionados: ao MVF, Softwares GAMBIT e FLUENT, discretização das equações empregadas e *solver*.

#### **4.6.1. Método dos Volumes Finitos**

O MVF é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, entretanto, ele 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 EDP's (BORTOLI, 2000; FORTUNA, 2000).

A tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Quando não é possível a solução analítica e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, a solução para um número discreto de pontos é aceita, 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).

No contexto dos pacotes comerciais o MVF é ainda o método empregado em todos aqueles com penetração industrial. A preferência é em função da robustez, devido às características conservativas do MVF. Em escoamentos de fluidos, é muito importante satisfazer aos princípios de conservação em nível discreto, pois se o que se busca com um método numérico é a solução da equação diferencial, que é a representação da conservação da propriedade em nível de ponto, parece lógico que as equações aproximadas representem a conservação em nível de volumes finitos. Dessa forma, não existe a possibilidade da existência de gerações/sumidouros de quantidades, como massa, quantidade de movimento e energia, no interior do domínio de cálculo. Por outro lado, se a conservação das propriedades é satisfeita apenas via condições de contorno, podem existir gerações/sumidouros das propriedades de origem numérica dentro do domínio, o que modificará o perfil da solução na região. Também a depuração de um programa computacional fica mais fácil quando o analista tem etapas a serem conferidas. Como no MVF os balanços de conservação devem ser satisfeitos em nível de volumes elementares, para qualquer tamanho de malha, todos os princípios de conservação podem ser conferidos em uma malha bastante grosseira. Ou seja, quase tudo pode ser feito manuseando-se poucos resultados em execuções rápidas no

computador. Em outros métodos, pode-se apenas conferir a solução com uma malha refinada, já que o conceito de balanço em volumes elementares não existe (MALISKA, 2004).

A precisão da discretização espacial depende do esquema particular com que os fluxos são avaliados. Existem várias possibilidades de definir a forma e a posição do volume na malha. É possível destacar duas aproximações básicas:

- Esquema do volume centrado: aqui as quantidades de fluxo são armazenadas no centro do volume na malha. Assim, os volumes de controle são idênticos aos volumes da malha.
- Esquema do volume no vértice: aqui as variáveis do fluxo são armazenadas no vértice da malha. O volume de controle pode ser então ou a união de todos os volumes compartilhando o vértice da malha ou algum volume centrado ao redor do vértice da malha. No caso anterior falou-se na sobreposição de volumes de controle e agora no caso de volumes de controle duais.

Discutem-se aqui as vantagens e desvantagens das formulações com volume centrado e volume no vértice, em ambos sobre a discretização espacial. A principal vantagem do método dos volumes finitos é que a discretização espacial que é feita diretamente no espaço físico. Assim não há problemas com transformação de sistemas de coordenadas, como ocorre na discretização do MDF. Comparado com o MDF, outra vantagem do MVF é a sua grande flexibilidade – pode ser facilmente implementado em malhas estruturadas ou não-estruturadas. Isso torna o método de volumes finitos particularmente adequado para o tratamento dos fluxos em geometrias complexas (BLAZEK, 2001).

Uma vez que o MVF é baseado na discretização direta das leis de conservação, massa, movimento e energia são conservados pelo esquema numérico. É interessante notar que sob certas condições, o MVF pode ser equivalente ao MDF, ou até mesmo ao MEF de baixa ordem. Devido as suas propriedades atraentes, o MVF é hoje bastante popular e bastante utilizado (BLAZEK, 2001).

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

#### 4.6.2. Programas GAMBIT e FLUENT

Neste trabalho os softwares GAMBIT (pré-processamento) e FLUENT (pré-processamento, solução e pós-processamento) são utilizados na modelagem matemática e na solução das equações governantes da simulação numérica de dispositivos para a conversão da energia de ondas oceânicas em energia elétrica do tipo CAO.

O GAMBIT é um programa computacional que auxilia na construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações científicas. É capaz de tornar mais simples e intuitivas as etapas de construção, discretização (geração da malha) e definição dos tipos de regiões do modelo, sendo suficientemente versátil para tratar uma ampla variedade de modelos (FLUENT 6.3, 2006).

O FLUENT é um programa computacional, baseado no MVF, para a modelagem de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas. Apresenta flexibilidade de malha, incluindo a capacidade de resolver problemas de escoamento usando malhas não estruturadas, geradas em geometrias complexas com relativa facilidade. É compatível com malhas do tipo bidimensional (triângulo/quadrilátero) e tridimensional (tetraedro/hexaedro/pirâmide/híbridas) (FLUENT 6.3, 2006).

#### 4.6.3. Discretização do modelo VOF

Conforme FLUENT 6.3 (2006), a Eq. (4.18), a equação da fração volumétrica, pode ser discretizada no tempo de forma explícita ou implícita. No método implícito de discretização utiliza-se esquemas de interpolação de diferenças finitas para obterem-se os fluxos em todos os volumes, incluindo os próximos a interface.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_F (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[ \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad (4.23)$$

onde:  $n + 1$  é o índice para etapa (atual) do novo tempo,  $n$  o índice de tempo do passo anterior,  $\alpha_{q,f}$  o valor nominal da fração da  $q$ -ésima fração de volume que pode ser calculada a

partir de um *upwind* de primeira ou segunda ordem,  $V$  o volume da célula e  $U_f$  o fluxo de volume através da face, com base na velocidade normal.

Uma vez que a Eq. (4.23) exige os valores da fração de volume no tempo atual (em vez de na etapa anterior como no esquema explícito), uma equação de transporte escalar é resolvida iterativamente para cada uma das fases secundárias em cada volume em cada avanço de tempo.

Na abordagem explícita utiliza-se esquemas de interpolação de diferenças finitas aplicados aos valores da fração de volume que foram computados no passo de tempo anterior.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_F (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[ \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad (4.24)$$

Esta formulação não exige uma solução iterativa da equação de transporte durante cada etapa do tempo, como é necessário para o esquema implícito. Quando o esquema explícito é utilizado para a discretização do tempo, os fluxos na face podem ser interpolados na interface utilizando um esquema de reconstrução ou usando um esquema de discretização como *upwind* de primeira ou segunda ordem. A formulação dos volumes de controle requer que o fluxo da convecção e da difusão nas faces do volume de controle seja computado e balanceado com as condições do termo fonte dentro do próprio volume de controle. No FLUENT existem dois esquemas de reconstrução para calcular o fluxo na face para o modelo VOF: reconstrução geométrica e *donor-acceptor*.

Nos esquemas de reconstrução geométrica e *donor-acceptor* é aplicado um tratamento especial aos volumes que ficam próximos à interface das duas fases. Na abordagem de reconstrução geométrica, que é empregada neste trabalho, os esquemas de interpolação padrão do FLUENT são usados para obter o fluxo nas faces sempre que um volume está completamente preenchido com uma fase ou outra. Quando o volume está 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*. No FLUENT, este esquema é o que apresenta a melhor precisão e é aplicável para malhas em geral, incluindo as não estruturadas. O esquema de reconstrução geométrica é generalizado para malhas não estruturadas. Assume-se que a interface entre dois

fluidos tem uma inclinação linear dentro de cada volume e usa-se esta forma para o cálculo da advecção do fluido através das faces do volume.

O primeiro passo no esquema de reconstrução geométrica é calcular a posição da interface linear em relação ao centro de cada volume parcialmente cheio, com base em informações sobre a fração de volume e suas derivadas no volume. O segundo passo é calcular o montante de advecção do fluido de cada uma das faces, usando a representação da interface linear e informações sobre a distribuição de velocidade normal e tangencial na face. O terceiro passo é calcular a fração volumétrica em cada volume utilizando o balanço dos fluxos calculados durante a etapa anterior.

#### 4.6.4. Algoritmos de solução

Aqui são fornecidos detalhes sobre os algoritmos de solução utilizados, pelo FLUENT, na solução das equações deste trabalho. O FLUENT permite escolher entre duas formas de solução das equações, *solver* segregado e *solver* acoplado. Neste trabalho é utilizado o *solver* segregado em todas as simulações numéricas. Conforme FLUENT 6.3(2006), usando qualquer um dos métodos, o FLUENT resolverá as equações integrais governantes para a conservação da massa e do movimento e, quando necessário, para a energia e outros escalares como a turbulência e espécies químicas. Em ambos os casos utiliza-se uma técnica baseada em volumes de controle que consiste de:

- Divisão do domínio em volumes de controle discretos que usam uma malha computacional;
- Integração das equações governantes nos volumes de controle individual para construir equações algébricas para as variáveis dependentes discretas (desconhecidas) como velocidade, pressão, temperatura e conservação de escalares;
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equação linear resultante dos valores atualizados das variáveis dependentes;
- Os dois métodos numéricos empregam um método de discretização semelhante (volumes finitos), mas a aproximação utilizada para linearizar e resolver as equações discretizadas é diferente;

De acordo com DUARTE (2006) e FLUENT 6.3(2006), no método segregado as equações governantes são resolvidas sequencialmente (segregadas uma da outra). Por causa

das não linearidades das equações governantes várias iterações devem ser realizadas até se obter a convergência. Cada iteração consiste de um incremento. A cada situação.

- As propriedades dos fluidos são atualizadas;
- As equações da quantidade de movimento são resolvidas usando valores atualizados para pressão e fluxos de massa na face;
- Desde que as velocidades obtidas em um incremento de tempo podem não satisfazer a equação da continuidade localmente, uma equação do tipo Poisson para correção da pressão é gerada a partir da equação da continuidade e das equações da quantidade de 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, assim a continuidade é satisfeita;

Quando apropriado, equações escalares como turbulência, energia e espécies são resolvidas utilizando valores previamente atualizados de outras variáveis.

Em ambos os métodos de solução, segregado ou acoplado, as equações governantes não lineares são linearizadas para se obter um sistema de equações a ser resolvido para cada volume do domínio computacional. A maneira na qual as equações governantes são linearizadas pode ser implícita ou explícita com respeito à variável de interesse (DUARTE, 2006) e (FLUENT 6.3, 2006).

No método implícito, para uma dada variável, o valor desconhecido em cada volume é calculado utilizando uma relação que inclui tanto os valores existentes quanto os desconhecidos a partir de volumes vizinhos. Por isso, cada valor desconhecido irá aparecer em mais de uma equação no sistema e estas equações devem ser resolvidas simultaneamente para encontrar os valores desconhecidos. No método explícito para uma dada variável, o valor desconhecido em cada volume é calculado utilizando uma relação que inclui apenas os valores existentes. Portanto, cada um dos valores desconhecidos aparecerá em apenas uma equação no sistema e as equações para o valor desconhecido em cada volume podem ser obtidas no tempo (DUARTE, 2006) e (FLUENT 6.3, 2005).

No método de solução segregado, cada solução governante discreta é linearizada implicitamente em relação a essa variável dependente da equação. Isso resultará em um sistema de equações lineares com uma equação para cada volume do domínio. No ponto implícito é usado um *solver* de equações lineares (Gauss Seidel) em conjunto com o acelerador de convergência, método multimalha, Mutigríd Algébrico (AMG) para resolver o

sistema de equações escalares para a variável dependente em cada volume. O método AMG será melhor discutido na seção *solver*. Por exemplo, a equação da quantidade de movimento em  $x$  é linearizada para produzir um sistema de equações no qual a velocidade  $u$  é desconhecida. A solução simultânea para este sistema de equações (usando o acelerador de convergência AMG) gera um campo de velocidades  $u$  atualizado (DUARTE, 2006) e (FLUENT 6.3, 2005).

Em resumo, a aproximação segregada resolve para um campo de uma variável simples considerando todos os volumes ao mesmo tempo. Então ele resolve para o próximo campo da variável novamente considerando todos os volumes ao mesmo tempo e assim por diante. Não existe a opção explícita para o solver segregado.

#### 4.6.5. Esquemas de discretização: Funções de Interpolação

Conforme DUARTE (2006) e FLUENT 6.3(2006), o FLUENT usa a técnica do volume de controle para converter as equações governantes em equações algébricas que possam ser resolvidas numericamente. Esta técnica consiste em integrar as equações governantes em cada volume de controle, resultando em equações discretas que conservam cada quantidade com base no volume de controle.

No modo *default*, são armazenados os valores discretos do escalar  $\phi$  no centro dos volumes. Para isso, são necessários esquemas de interpolação para se obter os valores no centro de cada volume. Pode-se optar pela escolha de quatro esquemas: *upwind de primeira ordem* ou *upwind de segunda ordem*, *power law* e *QUICK*. Sendo que neste trabalho foram utilizados os esquemas *upwind* de primeira e segunda ordem, somente estes serão apresentados.

- a) ***Upwind de primeira ordem***: Quando este esquema é utilizado, quantidades em todas as faces dos volumes são determinadas supondo que o centro do volume para um campo variável representa um valor médio ao longo de todo o volume e que mantém as características em todo o volume. Assim, quando é escolhido o *upwind* de primeira ordem, o valor  $\phi_f$  é igual ao valor de  $\phi$  na face jusante.
- b) ***Upwind de segunda ordem***: Quando é desejada uma precisão de segunda ordem, as quantidades em todas as faces do volume são calculadas utilizando uma abordagem de reconstrução linear multidimensional aproximada. Nesta

abordagem, a precisão de alta ordem é atingida através de uma expansão em série de Taylor no centro do volume. Assim quando, é escolhido o *upwind* de segunda ordem, o valor  $\phi_f$  é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \Delta\vec{S} \quad (4.25)$$

onde  $\phi$  e  $\nabla\phi$  são valores do centro do volume e seu gradiente no volume *upstream*, e  $\Delta\vec{S}$  é o vetor deslocamento a partir de um volume centróide jusante para o centróide da face. Essa formulação requer a determinação do gradiente  $\nabla\phi$  em cada volume. Este gradiente é calculado usando o teorema da divergência, o qual na sua forma discretizada é definido como:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N \text{ faces}} \phi_f \vec{A} \quad (4.26)$$

Aqui o valor na face  $\phi_f$  é calculado pela média de  $\phi$  a partir dos dois volumes adjacentes a face.

Para a solução numérica da equação da quantidade de movimento, Eq. (4.20), o campo de pressões e o fluxo de massa na face não são conhecidos e devem ser obtidos como parte da solução. Há questões importantes no que diz respeito ao armazenamento da pressão e da discretização do gradiente de pressão. O FLUENT utiliza um sistema de co-localização, segundo o qual a pressão e a velocidade são armazenadas no centro dos volumes. Entretanto, o campo da pressão e os fluxos mássicos da face não são conhecidos a priori e devem ser obtidos como parte da solução. O FLUENT utiliza um esquema em que os valores de pressão e velocidade são armazenados nos centros dos volumes. Para encontrar o valor da pressão na face, entre os volumes adjacentes, é necessário um esquema de interpolação para calcular os valores nominais da pressão no centro do volume (FLUENT 6.3, 2005).

O esquema padrão do FLUENT interpola os valores da pressão nas faces usando coeficientes da equação da quantidade de movimento. Quando há grandes gradientes nos termos fonte entre os volumes de controle, o perfil da pressão tem um gradiente elevado na

face do volume e não pode ser interpolado usando este esquema. No presente trabalho, foi utilizado o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*) que utiliza o balanço discreto da continuidade para um volume de controle inercial sobre a face para computar a pressão na face (FLUENT 6.3, 2005).

#### 4.6.6. Acoplamento pressão-velocidade

O acoplamento Pressão-Velocidade é obtido derivando uma condição adicional para a pressão através da reformulação da equação da continuidade. O FLUENT disponibiliza cinco algoritmos de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, *Coupled* e *Fractional Step*. Todos estes utilizam a solução segregada para os sistemas de equações que devem ser resolvidos, com exceção do esquema Coupled que utiliza a solução acoplada (FLUENT 6.3,2006).

A solução segregada dos sistemas de equações resolve os sistemas lineares um a um, atualizando os coeficientes. Já a solução acoplada dos sistemas de equações algébricas cria uma única matriz, envolvendo todos os coeficientes e resolvendo todas as incógnitas simultaneamente (MALISKA, 2004).

Neste trabalho são utilizados os seguintes esquemas de acoplamento pressão-velocidade:

- a) **Método SIMPLE (*Semi IMPLICIT Linked Equations*):** É um método de acoplamento pressão velocidade, desenvolvido por Patankar e Spalding (1972), largamente empregado e que dá origem a outros métodos. Inicialmente, estima-se um campo de pressão  $p^*$  e obtém-se, através das equações de conservação da quantidade de movimento, um campo de velocidades que, a priori, não satisfazem a equação da continuidade. Não faz sentido algum, alterar, aleatoriamente, o campo de pressão a fim de que, em algum momento, um campo de velocidades satisfaça a equação da continuidade. O procedimento recomendado, comumente, é estabelecer expressões de correção para as velocidades em função de gradientes de correção de pressão  $p'$ . Quando esta correção de pressão não for mais necessária, estes gradientes de  $p'$  serão nulos e a correção de velocidades será nula. Para a evolução de  $p'$ , utiliza-se a equação da continuidade, onde as equações de correção são introduzidas gerando uma equação

para  $p'$  com termo fonte envolvendo velocidades. O algoritmo SIMPLE usa uma relação de correção entre a velocidade e a pressão e garante que a conservação de massa é satisfeita.

- b) **Método SIMPLEC** (*Semi IMPLICIT Linked Equations Consistent*): O método SIMPLEC é semelhante ao SIMPLE. A diferença é que as equações da quantidade de movimento são manipuladas, de modo que no SIMPLEC as equações de correção da velocidade omitem os termos que são menos significantes do que aqueles no SIMPLE.
- c) **Método PISO** (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): O esquema de acoplamento da pressão-velocidade PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) é da família do SIMPLE, e é baseado no grau mais alto da relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade. Uma das limitações do SIMPLE e do SIMPLEC é que as novas velocidades e fluxos correspondentes não satisfazem o balanço da quantidade de movimento após a equação da correção da pressão ser resolvida. Para melhorar a eficiência deste cálculo, o algoritmo PISO possui duas correções adicionais: correção das vizinhanças e correção “*skewness*”.

#### 4.6.7. Esquemas de avanço no tempo

De acordo com FLUENT 6.3(2006), no solver segregado, o erro total de discretização do tempo é determinado pela escolha da discretização temporal (por exemplo, primeira ordem e segunda ordem) e pela forma em que as soluções são avançadas à próxima etapa (esquemas de avanço do tempo). Há duas aproximações para o esquema de avanço do tempo: iterativo e não iterativo.

No esquema iterativo, todas as equações são resolvidas iterativamente, para um determinado passo de tempo, até que os critérios de convergência sejam satisfeitos. Desta forma o avanço da solução em um passo de tempo exige iterações externas.

De acordo com FLUENT 6.3(2006), o esquema iterativo do avanço no tempo exige um esforço computacional considerável devido a um grande número de iterações externas executadas em cada passo de tempo. A idéia básica do esquema de avanço não-iterativo (NITA) é que, para preservar a precisão total no tempo, não é preciso reduzir o erro a zero, mas somente tem que fazer isto a mesma ordem do erro de truncamento. O esquema NITA

não precisa de repetições exteriores e realiza uma única iteração exterior por passo de tempo, o que acelera, significativamente, as simulações transientes.

#### 4.6.8. Solver – *Multigrid Algébrico (AMG)*

A resolução de problemas via métodos numéricos fornece a solução do problema em um número finito de pontos, denominado malha computacional. Em geral, quanto mais pontos tiver a malha, mais próximo da solução analítica estará a solução numérica. Em contrapartida, quanto mais pontos tiver a malha computacional, maior é o esforço computacional e mais tempo se leva para a obtenção da solução numérica. Neste sentido, existem métodos que trabalham com a aceleração da convergência: são os chamados métodos multimalhas. O software FLUENT<sup>®</sup> tem implementado um destes métodos: o método *Multigrid Algébrico (AMG)*. O emprego do Multigrid reduz o número de iterações e o tempo de CPU necessários para obter uma solução convergente, particularmente, quando o modelo contém um grande número de volumes de controle. Para sua utilização é necessário gerar as malhas auxiliares, transferir informações entre as malhas (operadores de prolongação e restrição), resolver os sistemas lineares em cada malha com o uso de um método iterativo e optar por um dos tipos de ciclos (sequência com que as diversas malhas são visitadas).

O Método Multigrid é composto de dois princípios básicos: princípio da suavização e princípio da malha grossa. O princípio de suavização assegura que métodos iterativos clássicos (como Gauss-Seidel, por exemplo), quando aplicados apropriadamente a problemas elípticos discretos, têm um forte efeito de suavização sobre o erro de qualquer aproximação. O princípio de malha grossa afirma que um termo de erro suave é bem aproximado em uma malha grossa. Um procedimento em malha grossa gasta menos tempo de CPU e usa menos memória computacional que um procedimento em malha fina (SUERO, 2010).

No método Multigrid Algébrico implementado no FLUENT é possível ajustar parâmetros referentes ao método. Na Fig. 4.5 são demonstrados os parâmetros que podem ser ajustados. Como é possível verificar na Fig. 4.5 são três grandes grupos de parâmetros: a) parâmetros de suavização, b) parâmetros de engrossamento e c) parâmetros relacionados aos ciclos.

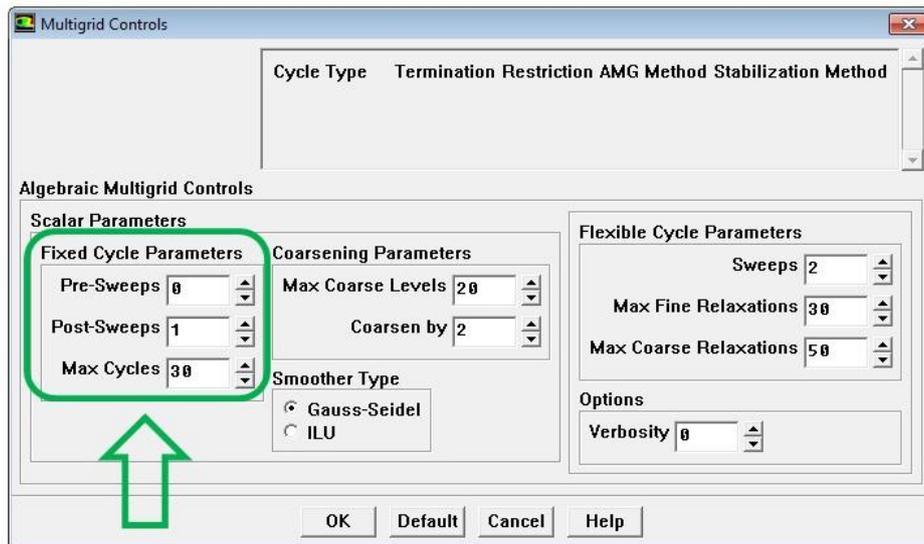


Figura 4.5 – Parâmetros do multigrid algébrico.

Na literatura não foi encontrado nenhum trabalho relacionado à análise numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica que empregue o Método Multigrid Algébrico. O FLUENT utiliza como *default* os valores que estão destacados na Fig. 4.5 para os parâmetros. Sendo assim, foi desenvolvido um breve estudo a respeito da aplicação do Método Multigrid em problemas relacionados à propagação de ondas regulares baseado no modelo VOF. A proposta consistiu em analisar os parâmetros de pré-suavização e pós-suavização (quantidade de vezes que o sistema é resolvido em cada malha) do AMG, de modo que seja possível gerar uma curva do tipo “*parâmetros de suavização x tempo CPU*”, otimizando, assim, o tempo de CPU.

Para este estudo foi considerada uma onda linear regular em escala real com período igual a 5 s, comprimento de 37,5 m, altura de 1,0 m e propagando-se a uma profundidade de 10 m. A malha adotada é do tipo *stretched*, com um refino na superfície livre de 50 volumes por comprimento de onda na direção horizontal e 20 volumes por altura da onda na direção vertical. Nas demais regiões é aplicado um estiramento progressivo. A variável de interesse é a elevação da superfície livre numa região razoavelmente próxima do gerador de ondas. O objetivo principal foi verificar com quais parâmetros de suavização o tempo de CPU da simulação numérica da propagação de ondas regulares é menor. Destacando-se que em todos os casos analisados são rodados seis períodos completos de onda.

Na Fig. 4.6 apresenta-se a variação do tempo de CPU em função dos parâmetros de suavização. Os resultados encontrados após a variação dos parâmetros de suavização indicam

uma redução de tempo superior a 50% no tempo total de simulação da propagação da onda no tanque.

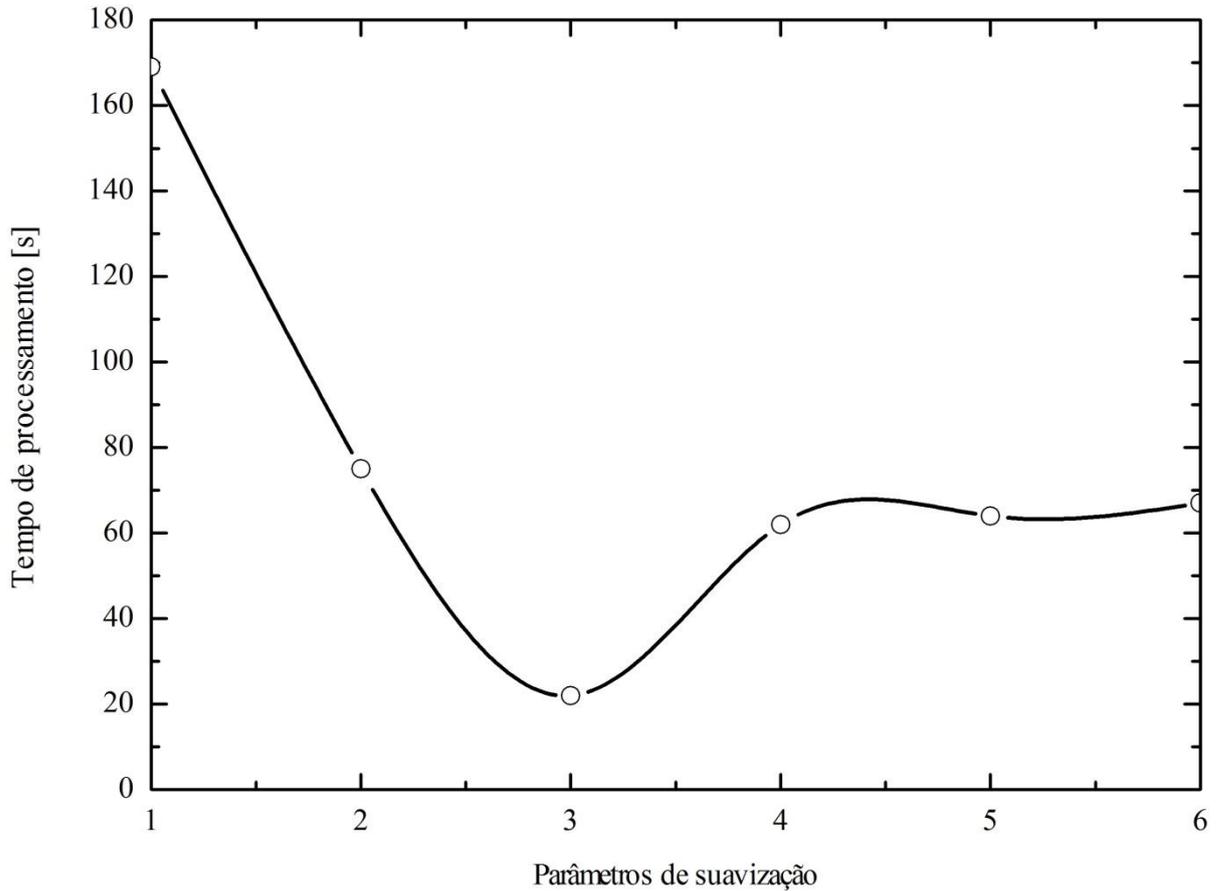


Figura 4.6– Otimização do tempo de processamento em função dos parâmetros de suavização.

O problema mostrou-se sensível à variação do número de suavizações, chegando-se a 3 como o número ideal (de pré e pós-suavização), ou seja, este é o número que resulta no menor tempo computacional. O ganho em tempo computacional, com relação ao caso considerado padrão, foi superior a 50%.

Deste modo, o Método Multigrid se apresenta como uma técnica de extrema relevância em problemas de energia das ondas do mar que se baseiam no modelo VOF. Estudos mais detalhados de outros parâmetros apresentados na Fig. 4.5 poderão conduzir a tempos de processamento menores.

## 5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Uma importante etapa na utilização de metodologias numéricas é a verificação e validação do modelo numérico empregado.

Verificação é o processo usado para quantificar o erro numérico. Ele mede o quão bem o modelo matemático é resolvido numericamente. Não tem como objetivo o fenômeno real. É um processo puramente matemático (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). Na prática, o valor verdadeiro é desconhecido, portanto, consegue-se apenas estimar o valor do erro experimental ou do erro de modelagem. A mesma situação ocorre com relação ao erro numérico: normalmente, em situações práticas, uma solução numérica é obtida porque a solução analítica é desconhecida; assim o erro numérico também tem que ser estimado.

Validação é o processo para quantificar o erro de modelagem. Ele mede o quão bem o modelo matemático representa a realidade. É um processo puramente físico (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

De forma geral, o erro numérico pode ser causado por: erros de discretização, erros de iteração, erros de arredondamento e outras fontes de erro. A principal fonte de erro é o erro de discretização (Versteeg e Malalasekera, 2007). O erro numérico ( $E$ ) é a diferença entre a solução analítica exata ( $\Phi$ ) de uma variável de interesse e a sua solução numérica ( $\phi_n$ ), ou seja (Ferziger e Peric, 1999):

$$E(\phi) = \Phi - \phi_n \quad (5.1)$$

Validações e verificações do modelo VOF aplicado à energia das ondas do mar devem ser realizadas em duas etapas. Inicialmente, deve-se verificar a geração da onda e, posteriormente é necessário validar o modelo considerando o escoamento do ar pela estrutura interna do dispositivo CAO. Maiores detalhes podem ser encontradas em HORKO (2007), LIU et al. (2008a), LIU et al. (2008b), GOMES et al. (2009), GOMES (2010), RAMALHAIS (2011), LIU et al. (2011) e GOMES et al. (2012). A seguir serão destacados alguns aspectos relacionados às variáveis de interesse analisadas ao longo do trabalho, à validação e à verificação do modelo numérico empregado.

### 5.1. Variáveis de interesse

Os estudos de caso deste trabalho, em geral, consideram as mesmas variáveis de interesse, independente da escala, laboratório ou real. Na Fig. 3.1 é apresentado o domínio computacional para os casos quando forem analisados dispositivos CAO considerados *offshore*.

Na Figura 5.1 são definidas e apresentadas as sondas de medição e suas devidas posições no domínio computacional. Nas sondas *A*, *B*, *E*, *F*, *G* é medida a elevação de água da superfície livre através de linhas. Essa medida deve ser feita considerando a opção *integral* no FLUENT® que é calculada da seguinte forma:

$$\int \phi dA = \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (5.2)$$

onde  $\phi_i$  é um campo variável, neste caso a quantidade de água em cada volume, e  $A_i$  é a área de cada volume, mas, por se tratar de uma linha, representa o comprimento de cada volume.

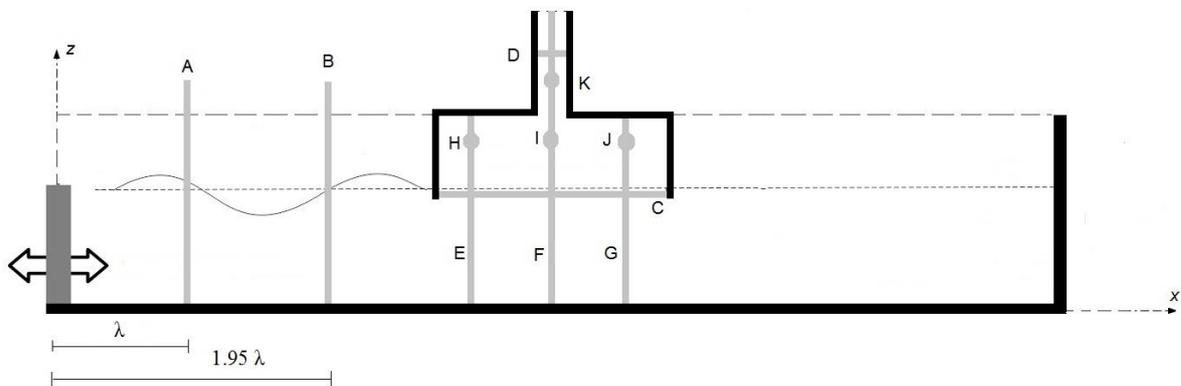


Figura 5.1 - Sondas de medição no domínio computacional.

Importante destacar que a posição das sondas *E*, *F* e *G* são variáveis, uma vez que dependem da configuração geométrica da câmara CAO. A sonda *F* fica no centro do dispositivo CAO e as linhas *E* e *G* se distribuem de forma simétrica em relação à linha de

centro. A média aritmética da elevação da superfície livre medida nessas três sondas indica a elevação de água dentro da câmara CAO.

A sonda *C* é uma linha horizontal localizada na entrada da câmara CAO e tem como função monitorar a vazão volumétrica. A sonda *D* fica no centro da chaminé da câmara CAO e mede a pressão estática através de uma média ponderada numa determinada área, no caso desse estudo nas linhas indicadas, através da seguinte expressão:

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (5.3)$$

onde  $\phi$  é chamado de campo variável que neste caso é a pressão estática  $p_e$ ,  $n$  é o número de volumes e  $A$  é a área da superfície que está sendo medida.

A pressão estática pode ser calculada através da seguinte relação para a pressão total:

$$p = p_e + p_d \quad (5.4)$$

Onde  $p_e$  é a pressão estática (Pa) e  $p_d$  é a pressão dinâmica (Pa) dada por:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5.5)$$

Na sonda *D* ainda é medido, a vazão mássica através da seguinte expressão:

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (5.6)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do ar,  $v$  a velocidade na direção  $y$  e  $A$  área da superfície que é atravessada pelo fluxo de ar.

Por fim, as sondas *H*, *I*, *J* e *K* são pontos que medem a pressão total. Para calcular os valores médios é considerada a média RMS (*Root Mean Square*), indicada para problemas transientes, dada pela seguinte equação indicada por MARJANI et. al. (2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (5.7)$$

Para avaliar a potência hidropneumática é utilizada a seguinte expressão, utilizada por DIZADJI e SAJADIAN (2011) e OLIVEIRA et. al (2012),

$$P_{hid} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (5.8)$$

onde  $P_{ar}$  é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO,  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar,  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar no duto da turbina e  $v_{ar}$  é a velocidade do ar no duto da turbina que pode ser dada por  $v_{ar} = \dot{m} / A \rho_{ar}$ .

Conforme apresentado em Zhang et. al (2012) é possível definir a eficiência hidrodinâmica de um dispositivo CAO como

$$\varepsilon = \frac{E_{CAO}}{P_{INC} T_W} \quad (5.9)$$

Onde  $E_{CAO}$  é a energia absorvida pelo dispositivo CAO, calculada por:

$$E_{CAO} = \int_0^T p(t) q(t) dt \quad (5.10)$$

Onde  $T$  é o período da onda (s),  $p(t)$  é a pressão instantânea do ar no interior da câmara CAO (Pa), e a vazão volumétrica  $q(t)$  é dada por:

$$q(t) = v(t) L L_1 \quad (5.11)$$

Onde  $v(t)$  é a velocidade instantânea vertical da superfície livre (m/s),  $L$  é o comprimento da câmara CAO e  $L_1$  é a largura do dispositivo CAO que nos casos bidimensionais é considerado igual a um.

A potência incidente ao dispositivo CAO é dada por:

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4 k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (5.12)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da água ( $998.2 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade,  $A$  a amplitude da onda,  $\omega$  a frequência da onda (1/s),  $k$  o número de onda e  $h$  a profundidade de água. E, por fim  $T_w$  é o período considerado para a análise da eficiência.

Para maiores detalhes do cálculo da eficiência de um dispositivo do tipo CAO, recomenda-se consultar HORKO (2007) e MORRIS-THOMAS, IRVIN e THIAGARAJAN (2005). Nas referências relacionadas aos dispositivos do tipo CAO existem muitos trabalhos envolvendo o cálculo da eficiência teórica em relação ao controle da pressão de um dispositivo CAO, onde se destacam BAUTISTA et al. (2009), EVANS e PORTER (1995), FALCÃO e JUSTINO (1999), FALCÃO (2002), FALNES (2004) e PERDIGÃO e SARMENTO (2003).

## 5.2. Verificação da geração da onda

Uma primeira forma de testar o modelo VOF aplicado à simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica é verificar a geração da onda com as características definidas a priori. Na simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanques de ondas, a elevação da superfície livre pode ser determinada de forma analítica através da Eq. (4.11) ou Eq. (4.13). Isso, na prática, dispensa a necessidade de estimar o erro numérico.

Por exemplo, se for adotada uma onda com  $T = 5 \text{ s}$ , para verificar a metodologia empregada, pode-se utilizar a estratégia de comparação, entre a solução analítica para a movimentação da superfície livre da água, dada pela Eq. (4.11), uma vez que essa onda é considerada linear, e a solução numérica, que consiste em gerar a onda em um tanque de ondas e observar a variação na posição da superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do tanque de ondas. Na Fig. 5.2 é apresentada a verificação da solução numérica para uma onda com  $T = 5 \text{ s}$ , realizando a comparação entre a solução numérica obtida na posição  $x = 50 \text{ m}$  do tanque de ondas e a solução analítica dada pela Eq. (4.11). De

uma forma qualitativa é possível observar, na Fig. 5.2, um comportamento semelhante entre as soluções numérica e analítica, principalmente, quando a propagação da onda se torna estável ( $t > 11$  s).

A comparação entre solução analítica e numérica quantitativamente, Eq. 5.1, indica que as diferenças máximas obtidas na crista e na cava da onda são inferiores a 5% na média, essa diferença diminui para aproximadamente 2%. Nessas análises é considerado somente o tempo onde a propagação da onda torna-se estável, ou seja, para o intervalo:  $15 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$ .

Ainda foi realizado um estudo a respeito da discretização temporal (*time-step*). Para este exemplo, uma onda com  $T = 5$  s, considerando como base o período da onda, foram analisadas as seguintes situações:  $T/100$ ,  $T/800$  e  $T/500$ . Os resultados apontaram o mesmo nível de acurácia entre as soluções numérica e analítica, com erros máximos inferiores a 5%. Nesse caso a escolha foi de utilizar um avanço no tempo (*time-step*) igual a  $T/500$ , no caso da onda  $T = 5$  s o avanço no tempo é igual a 0,01 s. Sendo assim, é possível destacar que o modelo computacional adotado neste trabalho reproduz a geração da onda de maneira adequada.

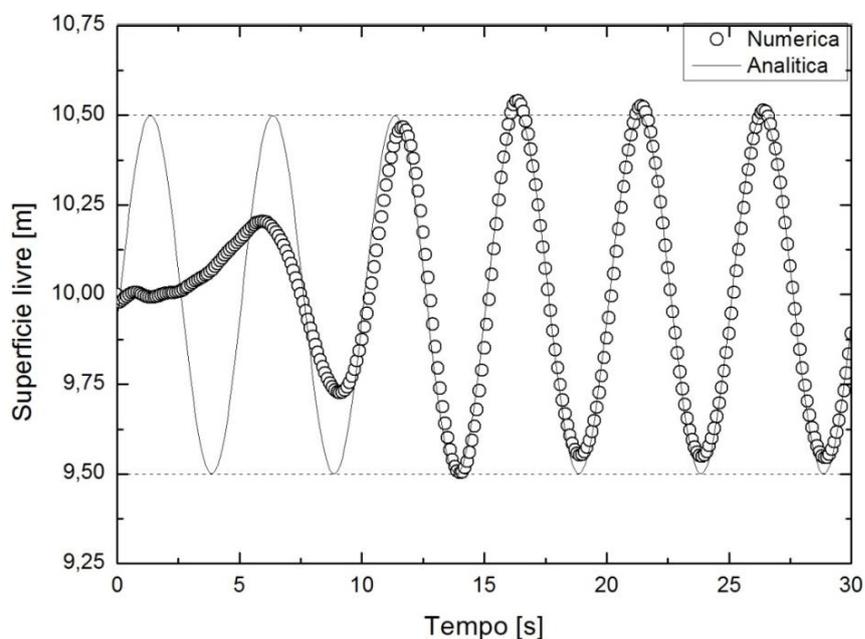


Figura 5.2 - Elevação da superfície livre em  $x = 50$  m com *time-step*  $T/500$ .

Na Fig.5.3 é apresentada a verificação da solução numérica, para a onda com  $T = 0,8$  s, e realizada a comparação, Eq. (5.1), entre a solução numérica obtida na posição  $x = 1$  m do tanque de ondas, e a solução analítica dada pela Eq. (4.13). Qualitativamente, é possível observar, na Fig. 5.3, uma concordância entre as soluções numérica e analítica, principalmente quando a propagação da onda se torna estável ( $t > 2,4$  s)

A comparação quantitativa entre a solução analítica e numérica indica diferenças máximas obtidas na crista e na cava da onda são inferiores a 5%. Na média, essa diferença diminui para aproximadamente 3%. Lembrando que nessas análises é considerado somente o tempo onde a propagação da onda torna-se estável e sem efeitos de reflexão, ou seja, para o intervalo:  $3T \leq t \leq 6T$ . No caso da Fig. 5.3, onde a onda utilizada é a com  $T = 0,8$  s, esse intervalo é:  $2,4 \text{ s} \leq t \leq 4,8 \text{ s}$ .

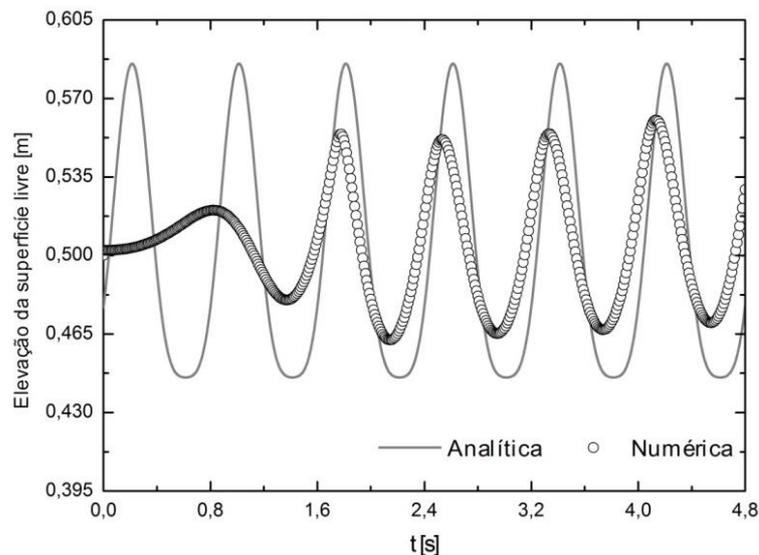


Figura 5.3 - Elevação da superfície livre em  $x = 1,0$  m.

### 5.3. Validação considerando o dispositivo CAO

Uma segunda etapa consiste em validar o modelo numérico, considerando a interação entre a água o ar e a estrutura do dispositivo CAO. Neste caso, não existem soluções analíticas disponíveis, sendo necessária a comparação de resultados numéricos com resultados de experimentos físicos.

Com o objetivo de validar qualitativamente o modelo foi reproduzido parte do trabalho de LIU et. al (2011) onde a solução numérica para a interação entre água e ar, variação de pressão e velocidade no interior da câmara CAO são comparadas com resultados experimentais. Uma vez definida a geometria a estrutura é submetida a ondas com diferentes períodos que variam de 3,5 a 8,0 s.

No presente trabalho foi reproduzido o caso 3 de LIU et. al (2011). Entretanto, foi desconsiderada a turbulência, sendo essa uma simplificação do presente modelo numérico. Na Fig. 5.4 é possível verificar uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a amplitude relativa ( $A_l/A$ ), onde  $A_l$  é a amplitude do movimento da superfície livre no interior do dispositivo CAO e  $A$  é a amplitude da onda incidente. Conforme indica a Fig. 5.4 a solução numérica do presente estudo tem um comportamento qualitativo semelhante, principalmente aos resultados experimentais, aos apresentados em LIU et. al (2011). A exceção é a amplitude relativa para  $T= 5.5$  s que está discrepante em relação às demais.

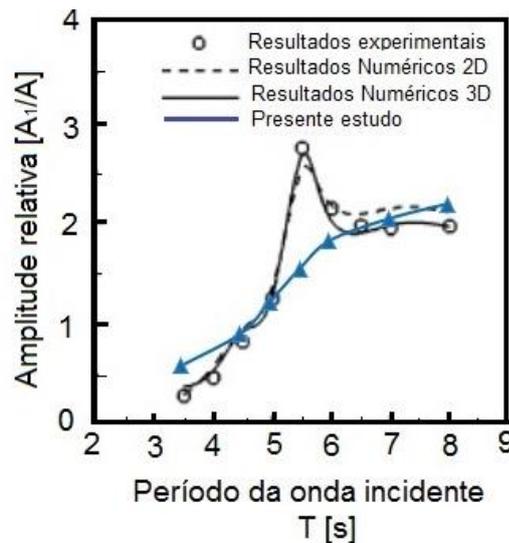


Figura 5.4 - Amplitude relativa na câmara CAO, adaptado de Liu et. al (2011).

Na Fig. 5.5 tem-se a comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a pressão máxima no interior da câmara CAO. Conforme é possível observar, os resultados obtidos no presente estudo, de forma numérica, tem o mesmo comportamento qualitativo que as demais soluções apresentadas. A mesma situação ocorre para a velocidade na chaminé de saída do dispositivo CAO. De acordo com o apresentado na Fig. 5.6, as soluções numéricas têm o mesmo comportamento qualitativo que os resultados experimentais.

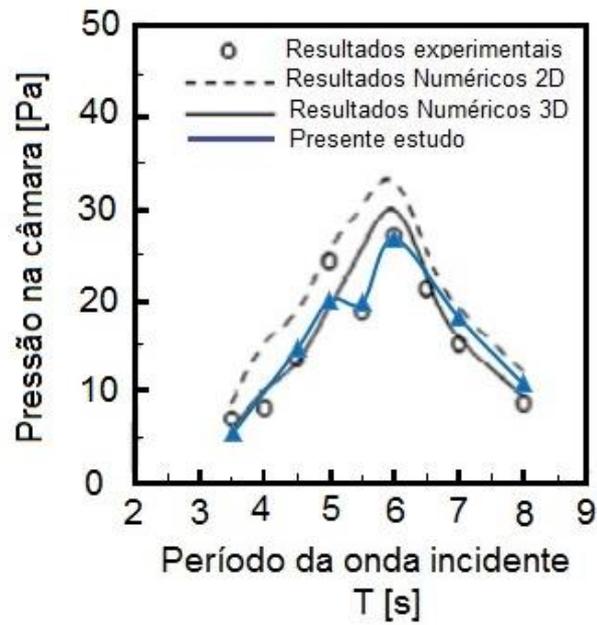


Figura 5.5 –Pressão do ar no interior da câmara CAO, adaptado de Liu et. al (2011).

Considerando os resultados apresentados na Fig. (5.4), Fig. (5.5) e Fig. (5.6) observa-se que o modelo empregado no presente trabalho representa adequadamente o comportamento do ar no interior do dispositivo CAO.

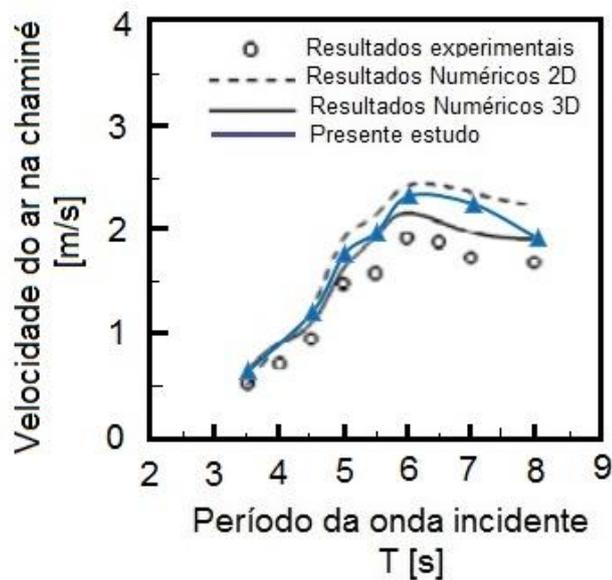


Figura 5.6 –Velocidade do ar chaminé de saída da câmara CAO, adaptado de Liu et. al (2011).

Cabe ainda destacar que o modelo matemático e numérico empregado neste trabalho considera o escoamento no regime laminar, sendo essa uma simplificação do modelo real. O número de Reynolds calculado, principalmente, na região interna a câmara CAO, é bastante elevado, configurando assim o regime turbulento. É importante salientar que na literatura referente a este tipo de escoamentos os limites de escoamento laminar e turbulento não são ainda definidos. Nos escoamentos de água e ar pela câmara CAO o que predomina é a diferença de pressão, portanto entende-se que para fins de análise do escoamento de ar a turbulência possa ser desconsiderada. Essa discussão pode ser embasada através dos resultados das Figs. 5.4 a 5.6, onde os resultados numéricos foram obtidos considerando o regime laminar e apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Aplicação de *Constructal Design* a um conversor tipo CAO em escala de laboratório

Aqui a proposta é aplicar *Constructal Design* para otimizar a geometria bidimensional de um dispositivo do tipo CAO para o melhor aproveitamento da energia presente no clima de ondas estabelecido. O objetivo é otimizar os graus de liberdade:  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) e  $H_3$  (profundidade de submersão da câmara CAO). O grau de liberdade  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantido constante. O volume de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $V_E$ ), Eq. (3.1), e o volume total do dispositivo CAO ( $V_T$ ), Eq. (3.2), também foram mantidos constantes e são as restrições geométricas do problema. As variáveis geométricas do domínio computacional podem ser observadas na Fig. (3.1).

A função objetivo é a média RMS para a potência hidropneumática calculada a partir da Eq. (5.8). Assim, é possível obter uma recomendação teórica numérica acerca da geometria do dispositivo do tipo CAO que possui a maior eficiência na transformação de energia.

O estudo foi realizado para uma onda em escala de laboratório. O clima de ondas e as dimensões do tanque de ondas são apresentados na Tab. 6.1.

Tabela 6.1- Características da onda e do tanque de ondas em escala de laboratório.

| Características                   | Valores  |
|-----------------------------------|----------|
| Período da onda ( $T$ )           | 0,800 s  |
| Altura da onda ( $H$ )            | 0,140 m  |
| Comprimento da onda ( $\lambda$ ) | 1,000 m  |
| Profundidade ( $h$ )              | 0,500 m  |
| Comprimento do Tanque ( $C_T$ )   | 5,000 m  |
| Altura do Tanque ( $H_T$ )        | 0,800 m  |
| Profundidade da CAO ( $H_3$ )     | variável |

A potência da onda incidente, calculada pela Eq. (5.12) é igual a 15,33 W, e a velocidade de propagação da onda (celeridade) é 1,25 m/s. É importante ressaltar que de acordo com a classificação proposta por CHAKRABARTI (2005) a onda adotada neste estudo é considerada de alta ordem. Entretanto, será considerada como uma onda de segunda ordem, uma vez que os termos de alta ordem pouco influenciam na modelagem da propagação da onda. Assim, as equações impostas na superfície de entrada do tanque de ondas (vide Fig. 3.1) são dadas pela Eq. (4.14) e (4.15).

Em todos os casos o grau de liberdade  $H_3$  é variado considerando as seguintes medidas:  $H_3 = 0,535 \text{ m}$ ,  $H_3 = 0,500 \text{ m}$ ,  $H_3 = 0,465 \text{ m}$ ,  $H_3 = 0,430 \text{ m}$ ,  $H_3 = 0,395 \text{ m}$  e  $H_3 = 0,360 \text{ m}$ , respectivamente.

De acordo com a formulação apresentada no capítulo 3 foram adotados os seguintes valores para as constantes do problema:  $V_E = 0,14$ ,  $V_T = 0,20$  e  $H_2/l = 3,0$ . Assim, variando o grau de liberdade  $H_1/L$ , é possível calcular as dimensões dos dispositivos CAO através das Eqs. (3.3) a (3.6). Na Fig. 6.1 é possível observar o conjunto das configurações geométricas testadas, que são realizadas para o período de onda da Tab. 6.1. Ao todo, para cada período de onda, são testadas 54 diferentes configurações geométricas. Os casos de  $H_1/L$  são variados de 1 até 9, de acordo com o período de onda considerado. Os valores de  $H_1/L$  e as dimensões geométricas empregadas nas simulações para esta onda podem ser vistas na Tab. C.1 (Anexo C).

Em todos os casos foi utilizada uma malha com volumes quadrados de  $0,01 \text{ m} \times 0,01 \text{ m}$  e um avanço no tempo (*time-step*) de  $0,001 \text{ s}$ . Considerando as características mencionadas na Tab. 6.1 e ilustradas na Fig. 3.1, define-se que o dispositivo CAO está a uma distância de  $2,00 \text{ m}$  a direita do gerador de ondas, ou seja, dois comprimentos de onda. Dessa forma, estima-se que a propagação da onda fique estável, na região do dispositivo CAO, após a geração da terceira onda, ou seja, quando  $t \geq 2,4 \text{ s}$ . Em todos os casos, foram consideradas a propagação de seis ondas ( $4,8 \text{ s}$ ).

Importante destacar que na saída da chaminé do dispositivo CAO é considerada a condição de pressão atmosférica, desconsiderando assim a perda de carga ocasionada pela turbina o que causaria um aumento de pressão no interior da câmara CAO.

Na Fig. 6.2 é possível observar o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados.

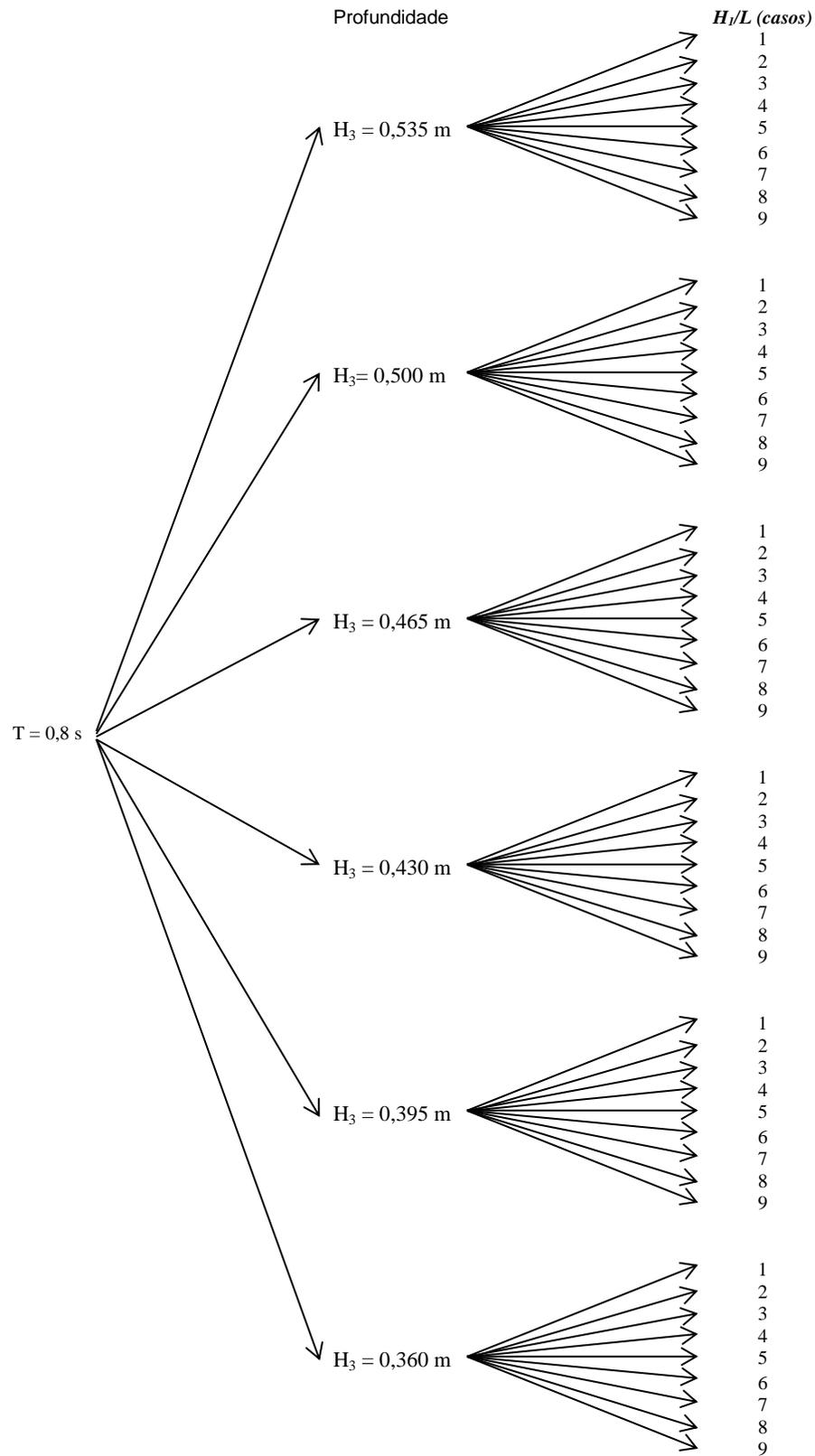


Figura 6.1 - Representação esquemática das variações geométricas testadas para a onda de laboratório.

Ainda considerando a Fig. 6.2, tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,56 < H_1/L < 0,84$ . Essa relação é equivalente a aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_0 \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ).

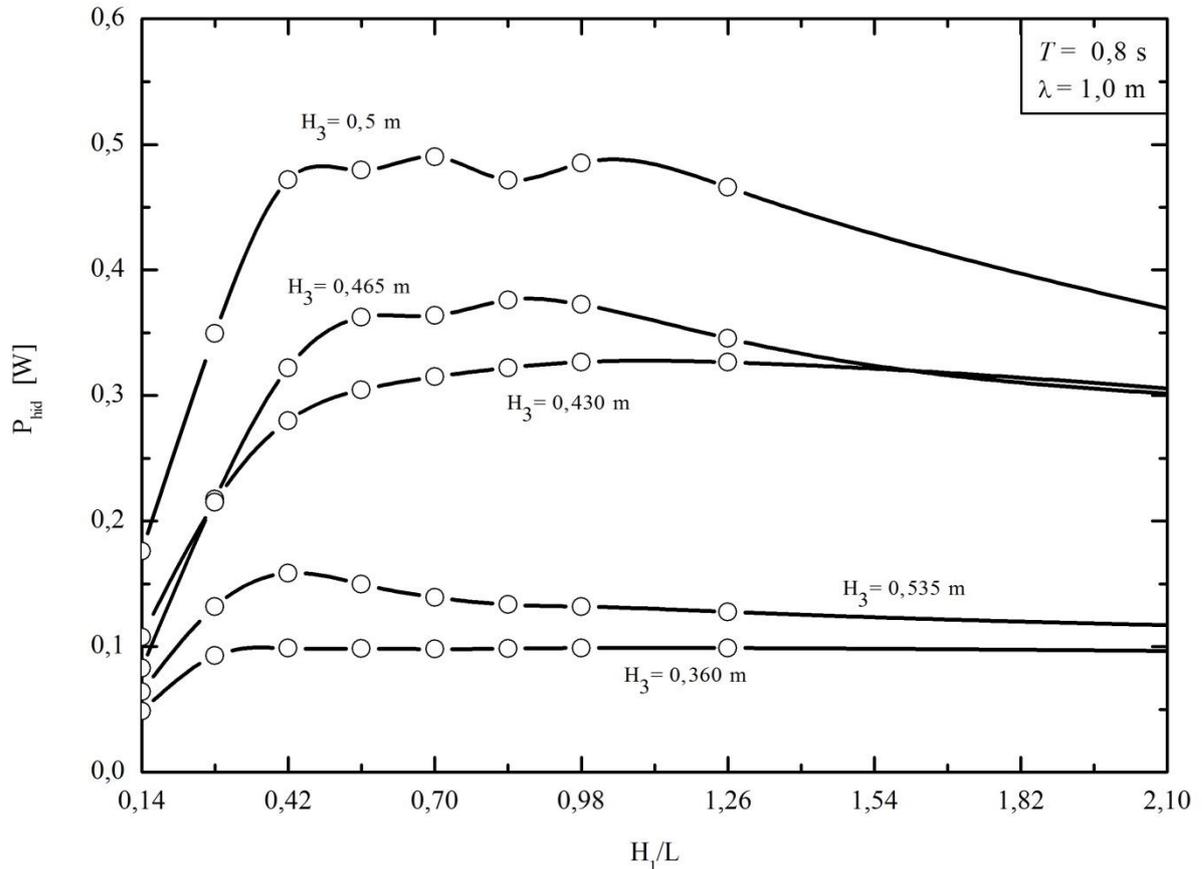


Figura 6.2—Comportamento da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

De acordo com estes resultados é possível escrever a seguinte relação:

$$\left(\frac{H_1}{L}\right)_o \cong 4 \frac{H}{\lambda} \quad (6.1)$$

Outro grau de liberdade analisado foi a profundidade de submersão da câmara CAO,  $H_3$ . Os resultados obtidos indicam que, em geral, quando  $H_3$  decresce ou cresce em relação à  $h$  o desempenho diminui, conforme é possível verificar na Fig. 6.3.

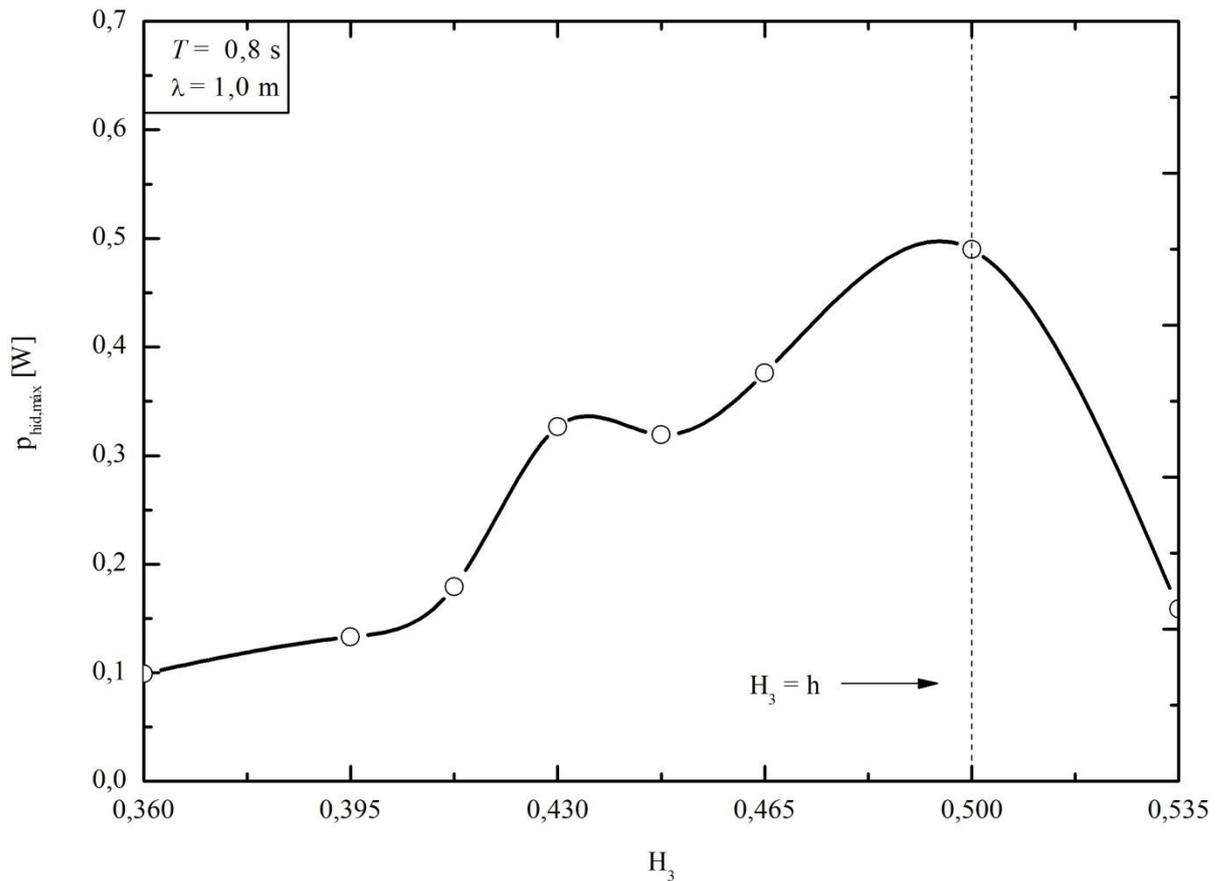


Figura 6.3 – Potência máxima (RMS) para cada  $H_1/L$  em relação a  $H_3$  para  $T = 0,8$  s.

Deste modo é possível definir a seguinte relação:

$$(H_3)_o \cong h \quad (6.2)$$

Ainda analisando a Fig. 6.3, é necessário levar em conta, por exemplo, o efeito de maré, ou seja, variação na profundidade. Deste modo, é coerente reescrever a Eq. (6.2) considerando o intervalo de submersão do dispositivo CAO em que, ainda que ocorram essas flutuações, o sistema tenha o melhor aproveitamento. Assim tem-se:

$$h - 3H/4 \leq (H_3)_o \leq h \quad (6.3)$$

Considerando as Fig. 6.2 e Fig. 6.3 o melhor caso foi obtido quando  $H_3 = 0,5$  m e  $(H_1/L)_o = 0,7$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a 0,4796 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 69,41%. O pior caso ocorre quando  $H_3 = 0,535$  m e

$H_1/L=0,14$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 0,0643 W e a eficiência é igual a 19,00 %. Pequenas variações geométricas, no grau de liberdade  $H_3$ , fazem com que a eficiência do dispositivo CAO aumente. Isso evidencia a sensibilidade geométrica do problema e a pertinência da utilização de *Constructal Design* nesse tipo de projeto.

Na Fig. 6.4 observa-se a comparação entre a vazão mássica, na região da chaminé de saída do dispositivo CAO, para o melhor e para o pior caso. Quantitativamente, considerando a média RMS, verifica-se que, no caso considerado ótimo, a vazão mássica é cerca de três vezes maior em relação ao pior caso.

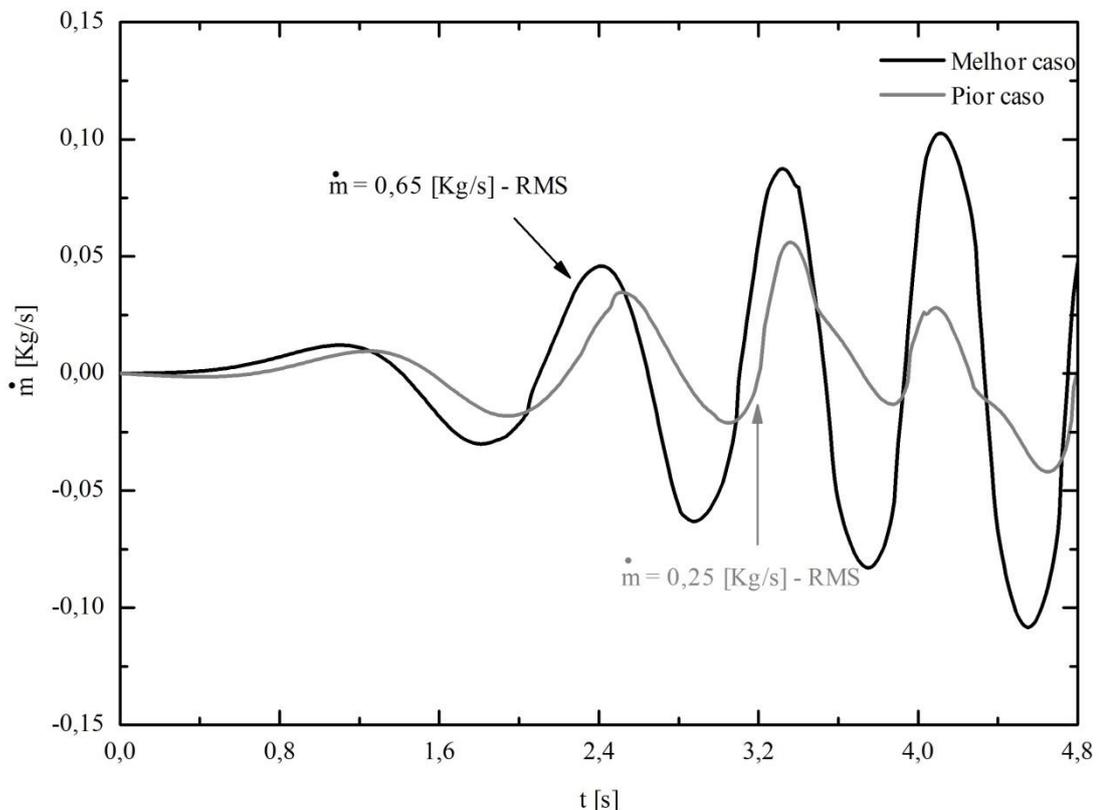


Figura 6.4 – Comparação transiente da vazão mássica do pior e do melhor caso.

Considerando somente aspectos geométricos é possível otimizar o grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ . Analisando a Fig. 6.5 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação de  $H_1/L$  entre  $0,84 < H_1/L < 1,12$ . Isso é equivalente a uma relação de  $L/\lambda \sim 0,4082$ .

Para este período de onda,  $T = 0,8$  s, foi realizado um estudo numérico com o objetivo de determinar uma geometria ótima para um dispositivo conversor de energia das ondas do

mar em energia elétrica do tipo Coluna de água oscilante (CAO). Assim, uma recomendação teórica sobre os valores do grau de liberdade  $H_1/L$  que permite obter valores de potência hidropneumática mais elevados para um dispositivo CAO, é quando  $(H_1/L)_o = 0,70$  e  $H_3 = 0,5$  m.

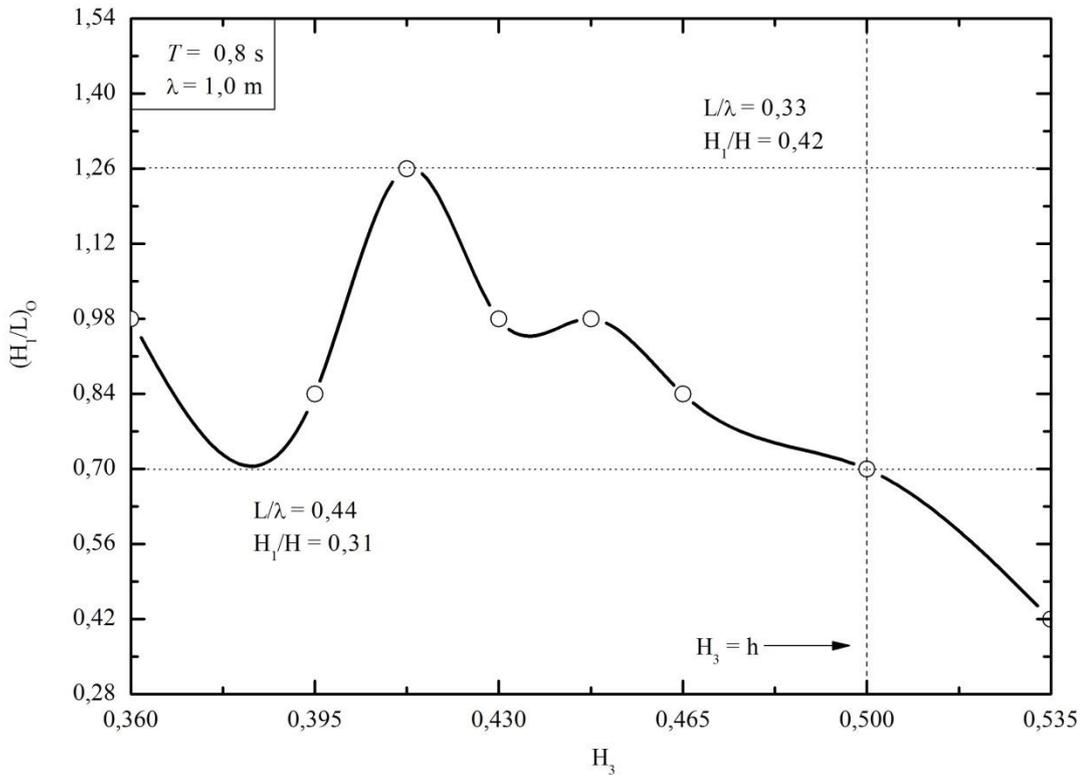


Figura 6.5 – Otimização geométrica de  $H_1/L$  em relação a  $H_3$ .

## 6.2. Aplicação de *Constructal design* a um conversor tipo CAO em escala real

Aqui a proposta é analisar numericamente o efeito da variação da geometria de uma câmara CAO considerando um espectro de onda com características reais, variando-se além da geometria, o período e o comprimento da onda. Dessa forma, são variados os seguintes graus de liberdade:  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) e  $H_3$  (profundidade de submersão da câmara CAO). O grau de liberdade  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantido constante.

O volume de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $V_E$ ), Eq. (3.1), e o volume total do dispositivo CAO ( $V_T$ ), Eq. (3.2), também foram mantidos constantes durante as simulações de ondas com mesmo período e são as restrições geométricas do problema. Os respectivos valores para estas constantes podem ser verificados na Tab. 6.2. As variáveis geométricas do

domínio computacional podem ser observadas na Fig. 3.1. A função objetivo é a média RMS para a potência hidropneumática calculada a partir da Eq. (5.8). Deste modo, pode-se determinar que a geometria de dispositivo CAO tem um melhor desempenho no aproveitamento da potência de uma onda com período fixo, é possível verificar o comportamento geométrico da câmara CAO ao longo do espectro, sendo este mais um aspecto inédito deste trabalho.

As dimensões das características do espectro de onda real e as dimensões do tanque de ondas são apresentadas na Tab. 6.2. É importante destacar que a medida  $H_3$  está relacionada à profundidade de submersão do dispositivo CAO.

Tabela 6.2. Características do espectro de onda real e do tanque de ondas em escala real.

| Período<br>( $T$ ) | $V_E$ | $V_T$ | Comprimento<br>( $\lambda$ ) | Altura<br>( $H$ ) | Profundidade<br>( $h$ ) | Comprimento do<br>Tanque ( $C_T$ ) |
|--------------------|-------|-------|------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 5,0 s              | 37,6  | 53,7  | 37,6 m                       | 1,0 m             | 10,0 m                  | 188,0 m                            |
| 6,0 s              | 48,5  | 69,2  | 48,5 m                       | 1,0 m             | 10,0 m                  | 242,5 m                            |
| 7,0 s              | 60,0  | 85,7  | 60,0 m                       | 1,0 m             | 10,0 m                  | 300,0 m                            |
| 8,0 s              | 71,0  | 101,4 | 71,0 m                       | 1,0 m             | 10,0 m                  | 355,0 m                            |
| 9,0 s              | 81,8  | 116,8 | 81,8 m                       | 1,0 m             | 10,0 m                  | 409,0 m                            |
| 11,0 s             | 103,0 | 147,1 | 103,0 m                      | 1,0 m             | 10,0 m                  | 515,0 m                            |
| 12,0 s             | 113,3 | 161,8 | 113,3 m                      | 1,0 m             | 10,0 m                  | 566,5 m                            |

Em todos os casos o grau de liberdade  $H_3$  é variado considerando as seguintes medidas:  $H_3 = 10,25\text{ m}$ ,  $H_3 = 10,00\text{ m}$ ,  $H_3 = 9,75\text{ m}$ ,  $H_3 = 9,50\text{ m}$ ,  $H_3 = 9,25\text{ m}$  e  $H_3 = 9,00\text{ m}$ , respectivamente, conforme apresentado na Fig. 6.6. É importante destacar que  $H_3$  é variado em relação à altura da onda  $H$ , que nesse estudo é igual a 1,00 m em todos os casos.

Na Fig. 6.6 tem-se uma representação esquemática das configurações geométricas testadas, que são realizadas para cada um dos períodos de onda da Tab. 6.2. Ao todo, para cada período de onda, são testadas 60 diferentes configurações geométricas. Conforme discutido no capítulo 5, em todos os casos é empregado um avanço no tempo que obedece a relação  $T/500$ . E para analisar as variáveis de interesse em geral, é considerada como tempo de estabilidade a propagação da quarta até a sexta onda incidente.

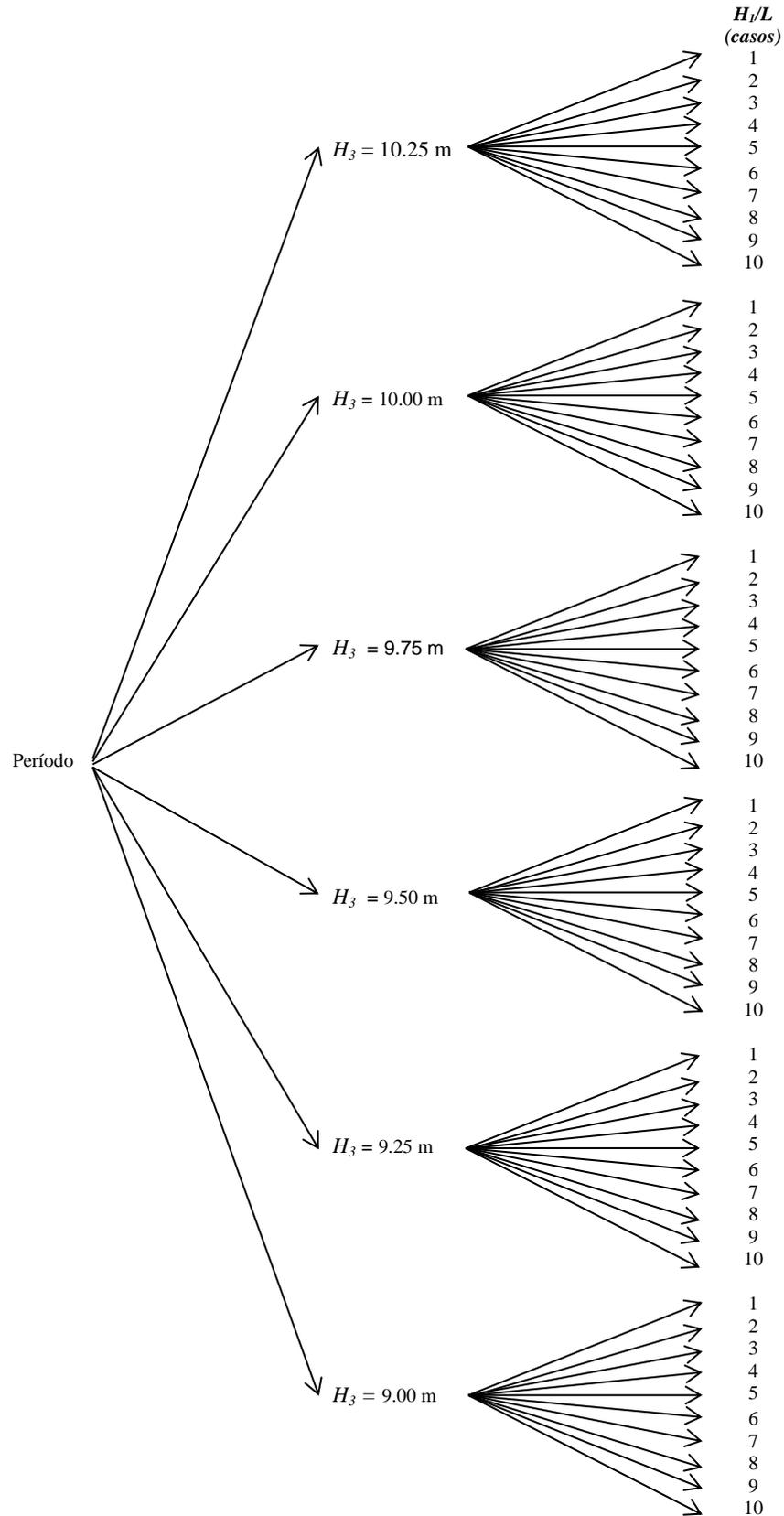


Figura 6.6 - Representação esquemática das variações geométricas testadas para cada um dos períodos.

### 6.2.1. Onda $T = 5$ s ( $V_E = 37,6$ m<sup>3</sup>)

Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda podem ser vistas na Tab. C.2 (Anexo C). Na Fig. 6.7 é possível observar o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,05 < H_1/L < 0,20$ .

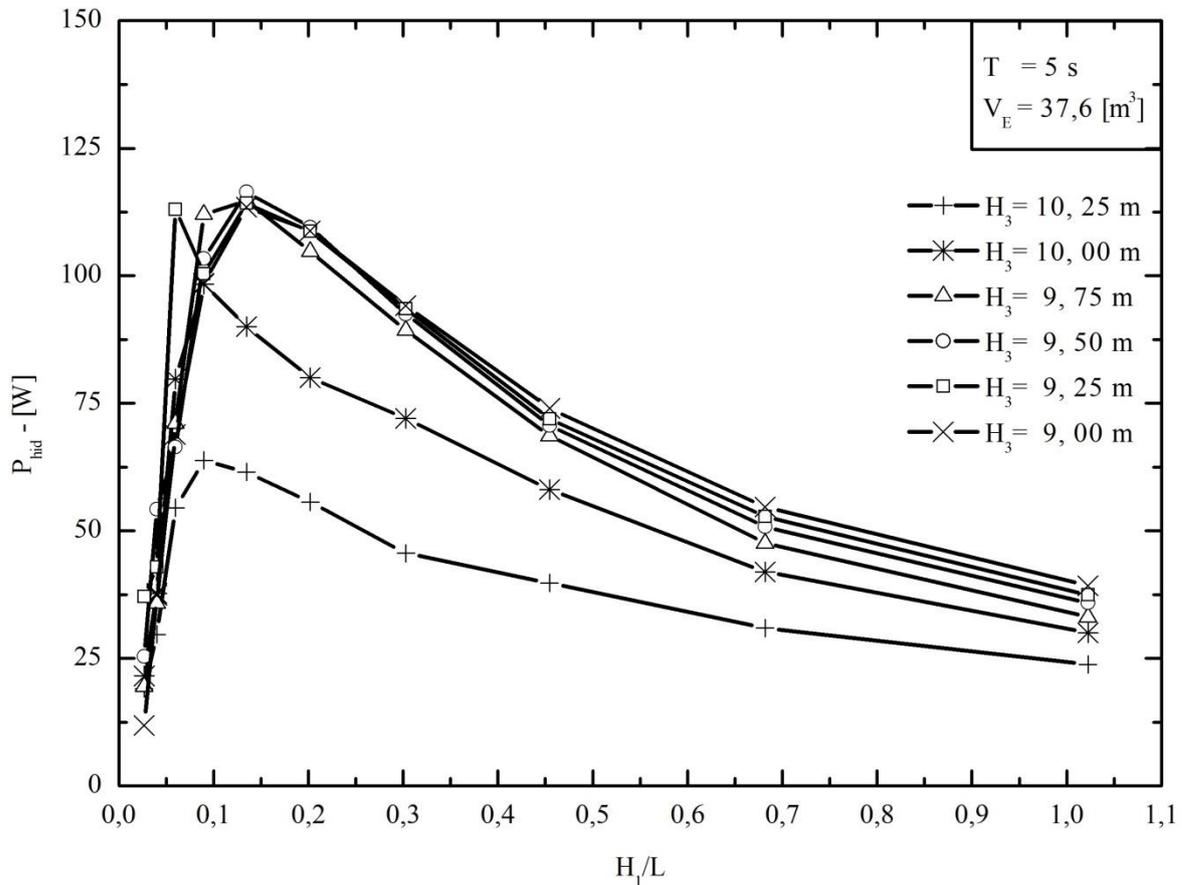


Figura 6.7 - Comportamento para a onda com  $T = 5$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

Essa relação equivale a dizer que o comprimento ótimo para o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) deve ser aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_0 \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível também verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 5$  s.

Na Fig. 6.8 apresenta-se a média RMS, para cada um dos casos em consideração desse estudo, do fator de amplificação, que é definido normalizando a altura média de elevação da superfície livre na câmara CAO ( $H_m$ ) pela altura da onda incidente  $H$ ,  $H_m/H$  (Ramalhais, 2011). Na prática o fator de amplificação permite verificar o efeito de pistão na câmara CAO. A Fig. 6.8 mostra que a média RMS do fator de amplificação tende a estabilizar no valor 0,25 a partir de um dado valor de  $H_1/L$ , nesse caso próximo a 0,2, mostrando assim a sensibilidade geométrica do problema em consideração, pois, ainda que o comprimento da câmara CAO ( $L$ ) diminua e a altura da câmara ( $H_1$ ) aumente, o efeito de pistão tende a ser constante.

Vale ressaltar que, quando a altura da onda incidente é variada, o valor do fator de amplificação, para a mesma configuração geométrica de dispositivo CAO, tende a variar também, o que não é a proposta de análise nesse estudo. Comparando os resultados apresentados na Fig. 6.7 e na Fig. 6.8, os casos ótimos ocorrem na região onde o fator de amplificação tende a estabilizar e, por consequência, apresentar o melhor efeito de pistão.

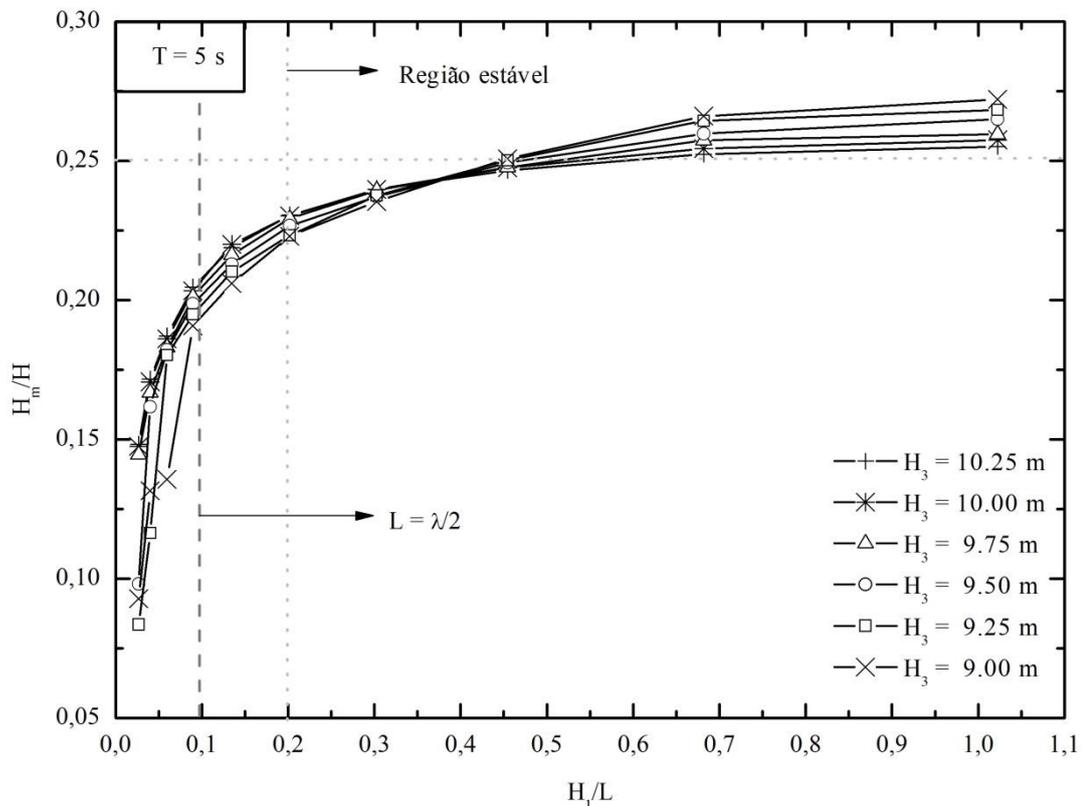


Figura 6.8 - Comportamento para a onda com  $T = 5$  s da média RMS do fator de amplificação.

Outra análise a ser realizada diz respeito à submersão do dispositivo CAO o grau de liberdade  $H_3$ . Na Fig. 6.9 é apresentada uma curva com os valores máximos da média RMS da potência hidropneumática, correspondente aos respectivos valores de  $H_3$ , extraídos da Fig. 6.7.

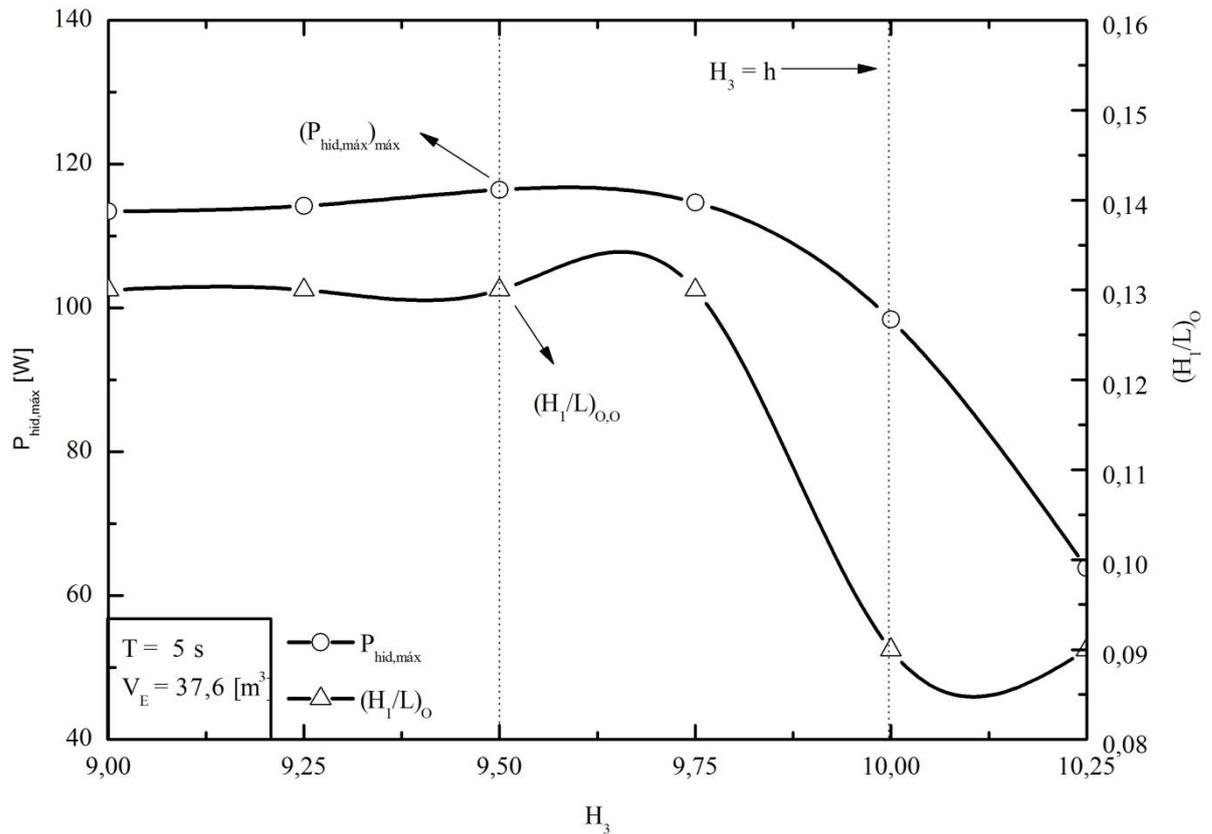


Figura 6.9 – Potência hidropneumática máxima (RMS) e  $H_1/L$  ótimo correspondente em função de  $H_3$  para  $T = 5$  s.

Na Fig. 6.9 observa-se que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório, é satisfeita para este período de onda em escala real, preservando assim a aplicação da metodologia *Constructal Design* em diferentes escalas.

De acordo com os resultados apresentados na Fig. 6.7 e Fig. 6.9 é possível considerar que a geometria ótima, sendo a média RMS da potência hidropneumática a função objetivo, é quando  $(H_3)_o = 9,50$  m e  $(H_1/L)_{o,o} = 0,1346$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática, otimizada duas vezes  $((P_{hid,máx})_{máx})$ , é igual a 116,43 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 11,23%. Cabe destacar que, neste estudo de caso o modelo numérico não considera a perda de carga da turbina na chaminé da câmara CAO, o que pode

ser um fator relevante para a baixa eficiência apresentada. Por outro lado, o pior caso ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L=0,0266$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 11,88 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 8,30% , vide Fig. 6.7.

Considerando somente aspectos geométricos é possível otimizar o grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ . A partir da Fig. 6.9 pode-se indicar qual relação de  $H_1/L$  utilizar, de acordo com a submersão  $H_3$ . Uma consideração importante é que abaixo da superfície livre o recomendado é a relação  $(H_1/L)_{0,0} = 0,13$ .

Isso tudo evidencia a importância do dimensionamento do comprimento do dispositivo CAO estar relacionado com o comprimento da onda. Como podemos observar nesses primeiros resultados, uma pequena variação da geometria da entrada da câmara CAO ( $H_1/L$ ) e ou da submersão do dispositivo ( $H_3$ ), possibilita um melhor aproveitamento do sistema, o que está em consonância com a teoria *Constructal*, na qual para um sistema de fluxo evoluir, os acessos às suas correntes deve ser facilitado (Bejan e Zane, 2012).

Uma questão já abordada aqui e que deve ser tratada com detalhes no projeto de um dispositivo CAO é o fator de amplificação, ou seja, o efeito de pistão. São três os aspectos que influenciam no fator de amplificação: o comprimento da câmara CAO ( $L$ ), a altura da câmara CAO ( $H_1$ ) e a altura da onda incidente ( $H$ ). Na Fig. 6.10 é realizada uma comparação do comportamento transiente da elevação da superfície livre no interior da câmara CAO para três situações, considerando  $H_3 = 9,50$  m: a)  $H_1/L = 0,0266$  ( $L = 37,6$  m e  $H_1 = 1,0$  m), b)  $H_1/L = 0,1346$  ( $L = 16,7097$  m e  $H_1 = 2,2501$  m) e c)  $H_1/L = 1,0225$  ( $L = 6,0637$  m e  $H_1 = 6,2007$  m).

O exposto na Fig. 6.10 indica que para o caso  $H_1/L = 0,1346$ , considerado o caso ótimo, os picos de movimentação da superfície livre no interior da câmara CAO são maiores do que os atingidos quando  $H_1/L = 0,0266$ . Quantitativamente verificam-se diferenças instantâneas de até 0,20 m na elevação da superfície livre nestas situações.

Considerando a Fig. 6.10 para uma comparação entre os casos  $H_1/L = 0,1346$  e  $H_1/L = 1,0225$ , verifica-se que não existe quase diferença para elevação da superfície livre, aspecto que corrobora o fato do melhor caso ser numa região onde o fator de amplificação tende a ser estável, conforme Fig. 6.8.

Outra questão a ser abordada com os resultados da Fig. 6.10 é em relação à movimentação de ar no interior da câmara CAO. Para essa análise, será considerada a fase de compressão, ou seja, quando a crista da onda incide no dispositivo CAO. Na Fig. 6.11 é

apresentada uma representação esquemática, considerando uma elevação uniforme da superfície livre, quando a elevação da água no interior do dispositivo atinge o valor máximo.

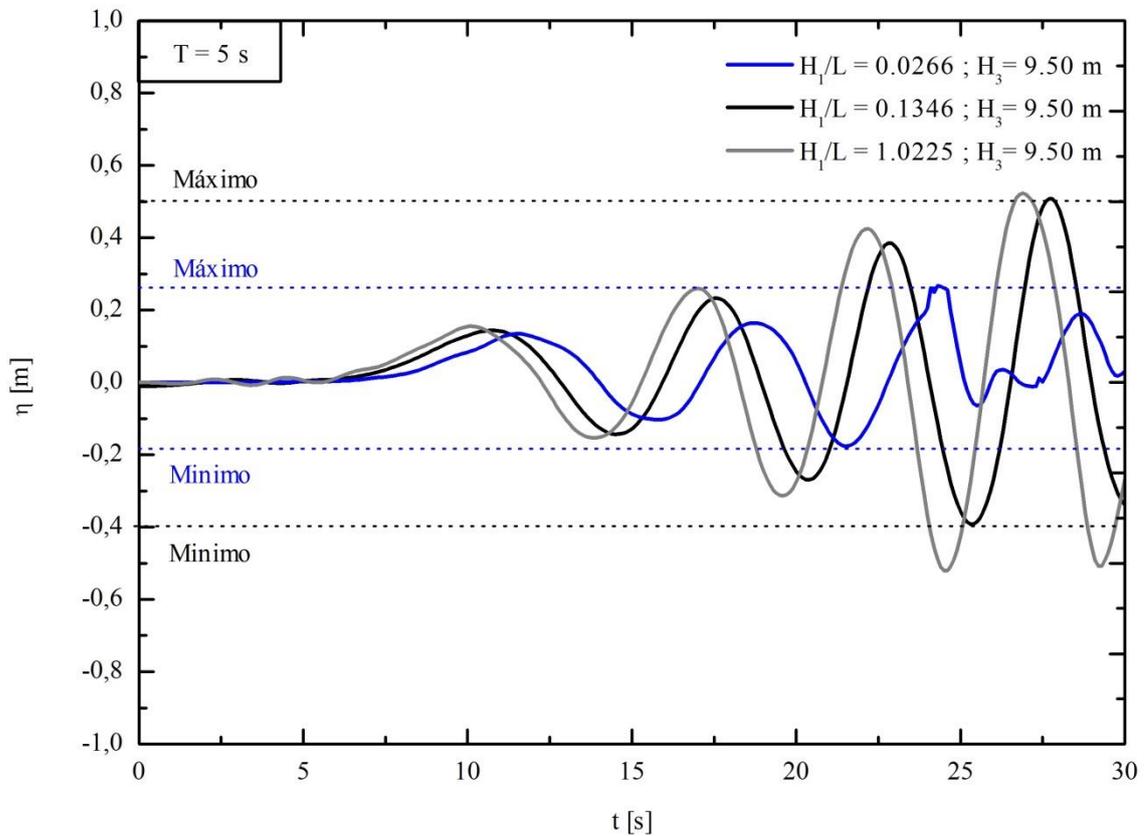


Figura 6.10 – Comportamento transiente da elevação da superfície livre no interior da câmara CAO.

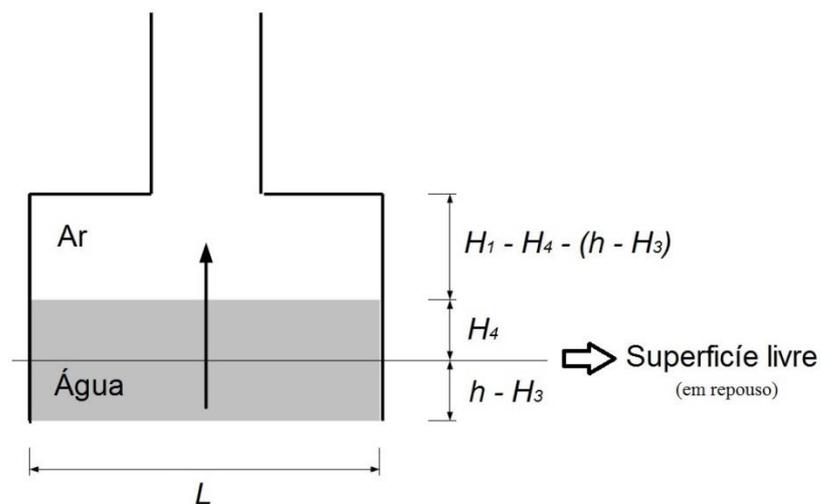


Figura 6.11 – Representação esquemática da movimentação de ar na câmara CAO.

Na Fig. 6.11 a variável  $H_4$  representa a elevação máxima em relação à superfície livre, e esse valor pode ser obtido na Fig. 6.10. Nas situações a serem analisadas tem-se  $H_3 = 9,50$  m e por consequência  $h - H_3 = 0,50$  m.

Com isso é possível calcular o volume de água e de ar no interior da câmara CAO, conforme o apresentado na Tab. 6.3. Com o aumento da relação  $H_1/L$  observa-se, da Tab. 6.3, que o volume de ar no interior da câmara CAO aumenta e o volume de água diminui. Esse aspecto corrobora as recomendações teóricas das Eq. (6.1) e Eq. (6.3). Comparando os casos 1 e 2 da Tab. 6.3 a relação a Eq. (6.1) se justifica pelo fato de que no caso 2 um maior volume de ar é forçado a entrar na chaminé da câmara CAO. Como consequência a pressão e a vazão mássica são maiores. Além disso, destaca-se que, no caso 2 da Tab. 6.3, os volumes de água e ar distribuem-se quase que igualmente em relação ao volume total da câmara CAO nesta situação.

Embora no caso 3 o volume de ar seja maior que o caso 2, verifica-se novamente que a relação da Eq. (6.1) é satisfeita, desta vez no que diz respeito a  $H_1/H$ . Isso pode ser atribuído ao fato de que no caso 3, o ar terá que subir uma altura maior do que no caso 2, sofrendo mais perdas, por exemplo, efeito das paredes.

Tabela 6.3. Influência da quantidade água e ar no desempenho da câmara CAO.

|   | $H_1/L$ | $L/\lambda$ | $H_1/H$ | $H_4$ [m] | $V_{AR}$ [m <sup>3</sup> ] | $V_{ÁGUA}$ [m <sup>3</sup> ] | Pressão<br>RMS [Pa] | Vazão mássica<br>RMS [kg/s] |
|---|---------|-------------|---------|-----------|----------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,0266  | 1,00        | 1,00    | 0,28      | 8,27                       | 29,32                        | 18,09               | 6,33                        |
| 2 | 0,1346  | 0,44        | 2,25    | 0,50      | 20,88                      | 16,70                        | 28,66               | 15,22                       |
| 3 | 1,0225  | 0,16        | 6,20    | 0,51      | 31,47                      | 6,12                         | 17,20               | 8,66                        |

Na Fig. 6.12 apresenta-se uma comparação do comportamento transiente da pressão quando  $H_3 = 9,50$  m e  $H_1/L = 0,1346$  (melhor caso) e quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,0266$  (pior caso). No melhor caso, geométrico, a distribuição pressões é simétrica e suave, fato que deve ser levado em conta num projeto futuro da turbina de ar. Por outro lado, no pior caso, existe muita perturbação no campo de pressões, apresentando um comportamento assimétrico e instável. Um dos motivos para essa instabilidade é à descontinuidade geométrica entre a

câmara CAO e o duto da chaminé da câmara CAO, medida através do parâmetro  $L/l$ . Esse fenômeno será discutido na sequência.

Considerando as mesmas situações de melhor e pior caso, na Fig. 6.13 é realizada uma comparação transiente da vazão mássica na chaminé de saída do dispositivo CAO. Assim como para a pressão, o comportamento da vazão mássica no melhor caso é simétrico e suave e tem picos maiores em relação ao pior caso.

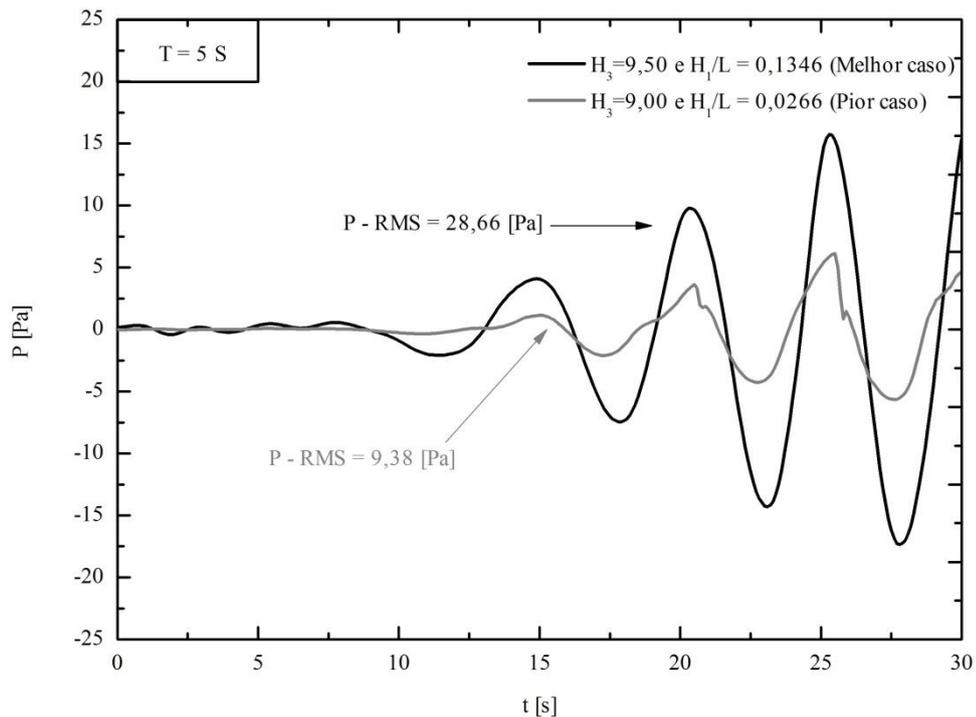


Figura 6.12 – Comportamento transiente da pressão para  $T = 5$  s.

Essa simetria pode ser verificada na Fig. 6.14, onde se apresenta os vetores velocidades e as topologias do campo de velocidades na direção  $y$  para o caso ótimo ( $H_3 = 9,50$  m e  $H_1/L=0,13460$ ). Observa-se um completo aproveitamento do campo de velocidades tanto na fase de compressão quanto na de descompressão, onde não se verificam grandes recirculações de ar na câmara CAO. A diferença entre as taxas da vazão mássica da melhor e da pior configuração chega a atingir  $2$  kg/s, vide Fig. 6.13. Durante toda a simulação, a quantidade de ar que escoam e passa pela chaminé de saída do dispositivo CAO é de aproximadamente  $7.000$  kg para o pior caso, enquanto que, no melhor caso, cerca de  $22.000$  kg de ar escoam pela chaminé.

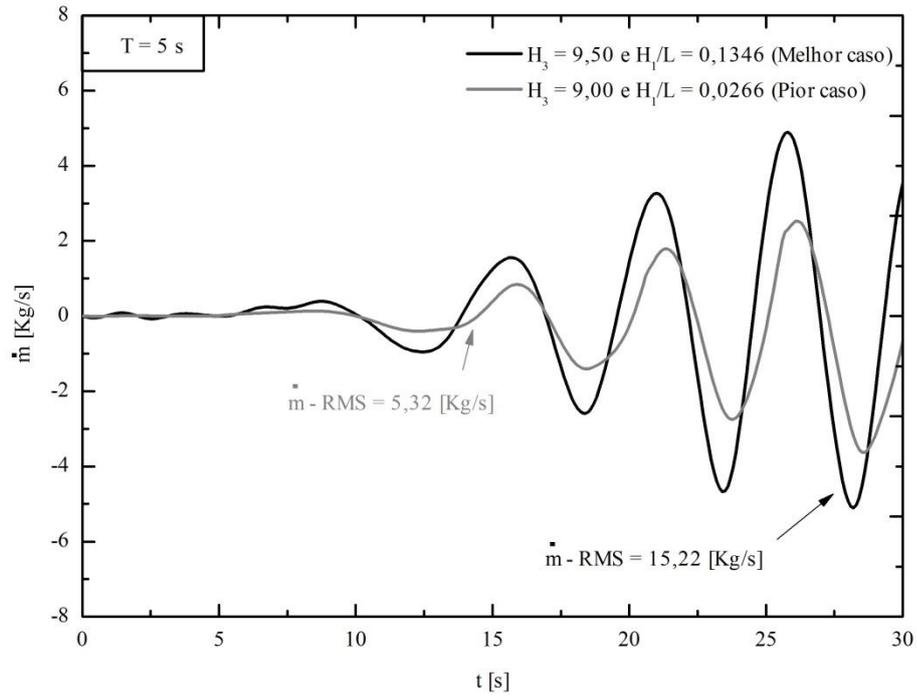


Figura 6.13 – Comportamento transiente da vazão mássica para  $T = 5$  s.

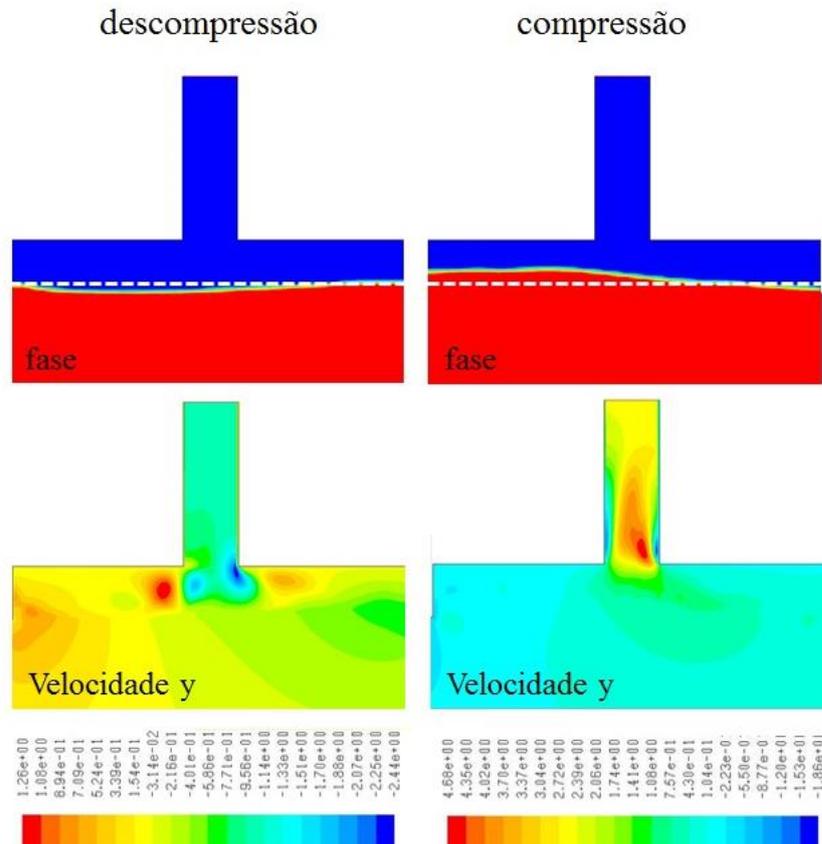


Figura 6.14 – Distribuição da velocidade na compressão e descompressão para  $H_3 = 9,50$  m e  $H_1/L = 0,13460$ .

Devido à natureza oscilatória e transiente do problema de incidência de ondas em dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO é possível verificar na Fig. 6.14 que, tanto na compressão, quanto na descompressão, existem pequenas recirculações de ar, o que não possibilita um escoamento plenamente desenvolvido.

Dependendo da configuração geométrica do dispositivo CAO, as recirculações de ar podem ser maiores ainda. Portanto, outra relação que deve ser investigada é a razão entre o comprimento da câmara do dispositivo CAO ( $L$ ) e o diâmetro da chaminé de saída da câmara CAO ( $l$ ). Através da relação  $L/l$  é possível dimensionar a “descontinuidade geométrica” entre a câmara e a chaminé do dispositivo CAO. Esta relação influencia na perda de carga ao longo do escoamento.

De acordo com Fox et. al (2010) a perda de carga total ( $h_{IT}$ ) pode ser escrita como a soma das perdas distribuídas ( $h_l$ ) com as perdas localizadas ( $h_{lm}$ ). As perdas distribuídas podem ser causadas por efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos. As perdas localizadas podem ser causadas, entre outros fatores, por variações de área.

Ao observar a geometria da câmara CAO, Fig. 3.1, ou até mesmo a Fig. 6.14, é notável a variação da área transversal (considerando a segunda dimensão constante e unitária). Deste modo tem-se uma perda de carga localizada a ser analisada.

A perda de carga localizada pode ser calculada por (Fox et. al, 2010):

$$h_{lm} = k_p \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (6.4)$$

Onde  $\bar{v}$  é a velocidade média (m/s) e  $k_p$  é o coeficiente de perda. Quando se tem a ocorrência de bordas vivas, caso deste estudo, o recomendável é utilizar  $k_p = 0,5$ .

Ainda, tratando da natureza oscilatória e transiente do escoamento de ar pelo dispositivo CAO, tem-se, aproximadamente, na metade de um período de incidência da onda no dispositivo, uma contração e, na outra metade, uma expansão. Através da Fig. 6.8 concluiu-se que o fator de amplificação tende a estabilizar para valores a partir de  $H_1/L=0,13460$  o que é equivalente a  $L/l = 7,20$  ou então  $l/L = 0,13$ . Ou seja, a partir destes valores tem-se o escoamento o mais próximo de estar desenvolvido e simétrico na compressão e na descompressão.

Na Fig. 6.15 é apresentado o comportamento da perda localizada para a variação de  $H_1/L$  considerando  $H_3 = 9,50$  m. Para tanto é considerado o primeiro período de incidência da

onda no dispositivo CAO, caracterizando na primeira metade do período uma contração ( $l/L$ ) e na segunda parte uma expansão ( $L/l$ ). Observando a situação em que se tem contração, destaca-se que, a partir de  $l/L = 0,13$  à medida que esta razão tende a 1, a perda localizada diminui assintoticamente. E o mesmo pode ser verificado para a expansão a partir de  $L/l = 7,20$ . Onde a medida que  $L/l$  tende a 1, a perda localizada diminui.

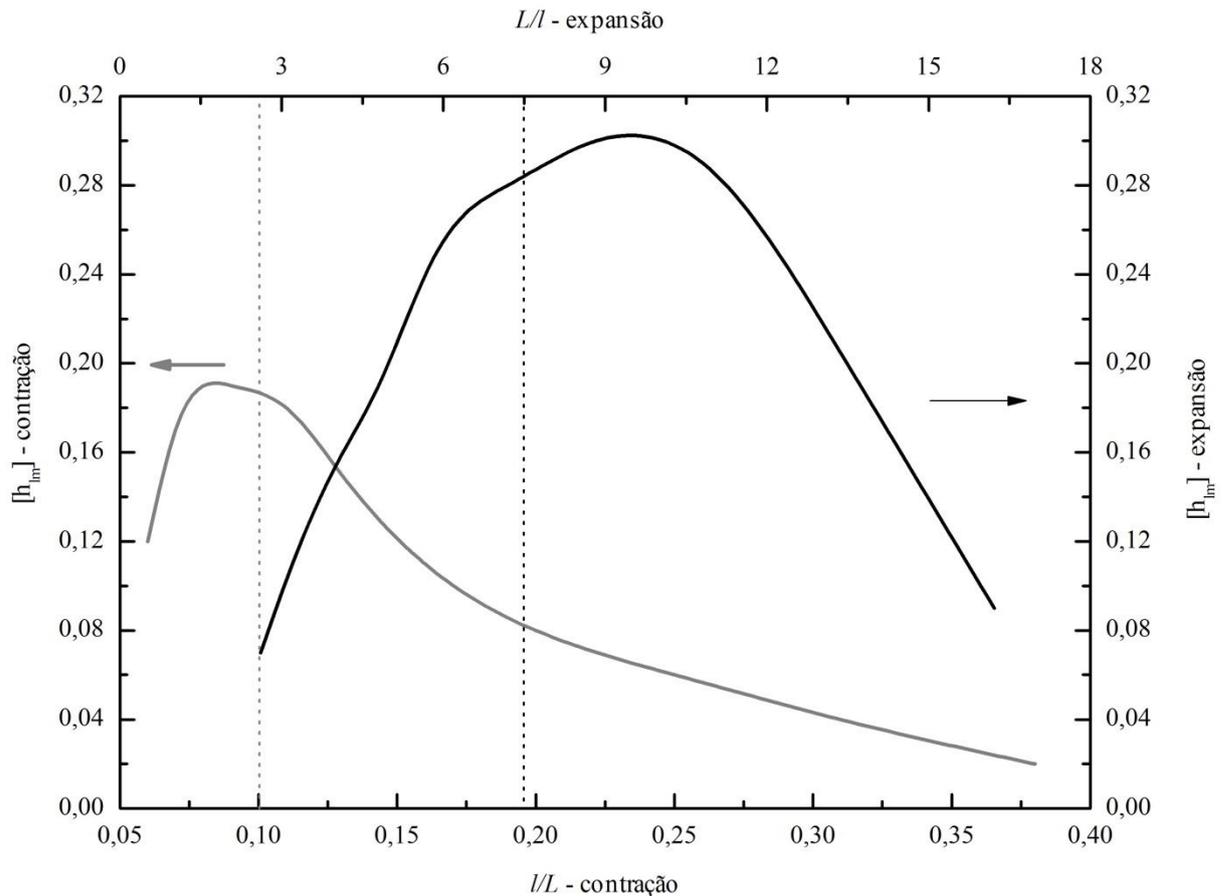


Figura 6.15 – Análise da perda localizada para a variação de  $H_1/L$  considerando  $H_3 = 9,50$  m.

Para investigar o efeito de  $L/l$  no campo de pressões na câmara CAO foi analisado o comportamento transiente da pressão para os quatro primeiros casos da variação de  $H_1/L$  (vide Tab. C.2) quando  $H_3 = 9,50$  m. Na Fig. 6.16, observa-se que à medida que  $L/l$  diminui (por consequência a descontinuidade geométrica tende a diminuir) os picos negativos de pressão deixam de existir e a distribuição de pressões tende a ficar simétrica, e isso ocorre sempre quando  $H_1/L$  tende a aumentar, ou seja, quando se tem comprimentos de câmaras ( $L$ ) menores e altura da câmara ( $H_1$ ) maiores.

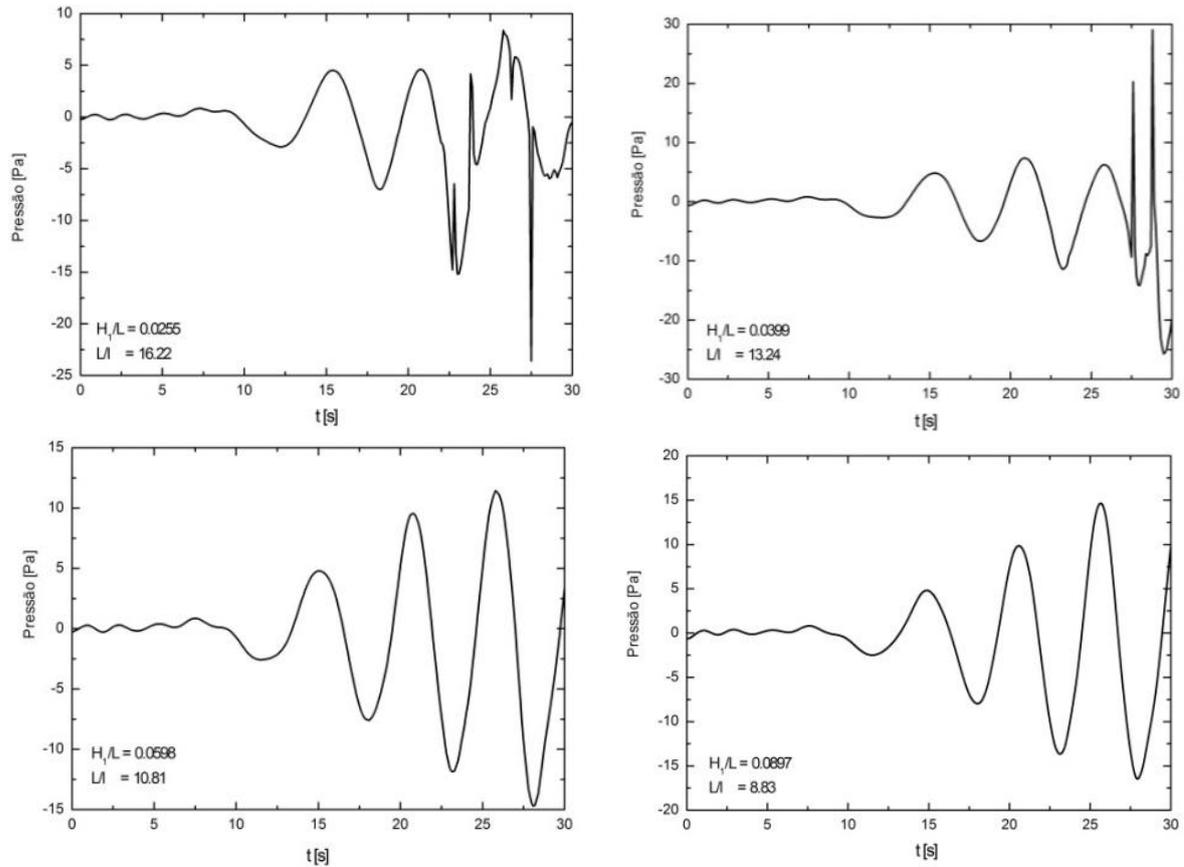


Figura 6.16 - Comportamento transiente da pressão para a variação de  $H_1/L$  quando  $H_3 = 9,50$

Nas próximas seções o mesmo estudo realizado para a onda com  $T = 5$  s será reproduzido considerando outros períodos do espectro de ondas da Tab. 6.2, de modo a verificar a recomendação geométrica para cada período de onda em consideração.

### 6.2.2. Onda $T=6$ s ( $V_E= 48,5$ m<sup>3</sup>)

Para a aplicação de *constructal design* na análise da geometria de dispositivos do tipo CAO, tem-se como ponto de partida a onda incidente na estrutura. Deste modo, com a variação do período da onda as restrições geométricas do problema também se modificam. Portanto, para o período de onda  $T = 6$  s as restrições geométricas podem ser definidas através das Eqs. (3.1) e (3.2). Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda podem ser calculadas pelas Eqs. (3.3) a (3.6) e vistas na Tab. C.3 (Anexo C).

Na Fig. 6.17 é possível observar o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores

médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,04 < H_1/L < 0,23$ . Este intervalo compreende a relação para os casos ótimos em que o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) seja aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_0 \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível também verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 6$  s.

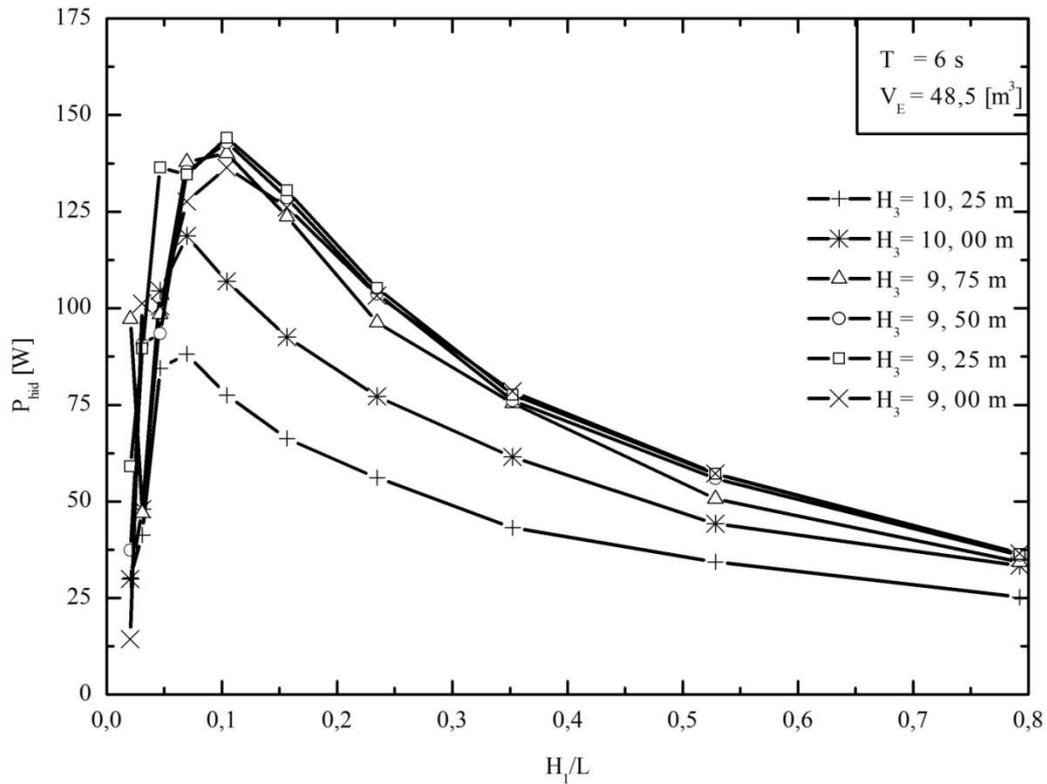


Figura 6.17 - Comportamento para a onda com  $T = 6$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

Assim como na onda com  $T = 5$  s a média RMS do fator de amplificação tende a estabilizar no valor 0,25 a partir de um dado valor de  $H_1/L$ , nesse caso próximo a 0,1.

Em relação à submersão do dispositivo CAO, ou seja, o grau de liberdade  $H_3$ . Na Fig. 6.18 é apresentada uma curva para o valor máximo da média RMS da potência hidropneumática para os respectivos valores de  $H_3$ . Na Fig. 6.18 observa-se que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório, e para a onda com  $T = 5$  s, é satisfeita para este período de onda em escala real. Preservando assim a aplicação da metodologia *Constructal Design* em diferentes períodos e escalas.

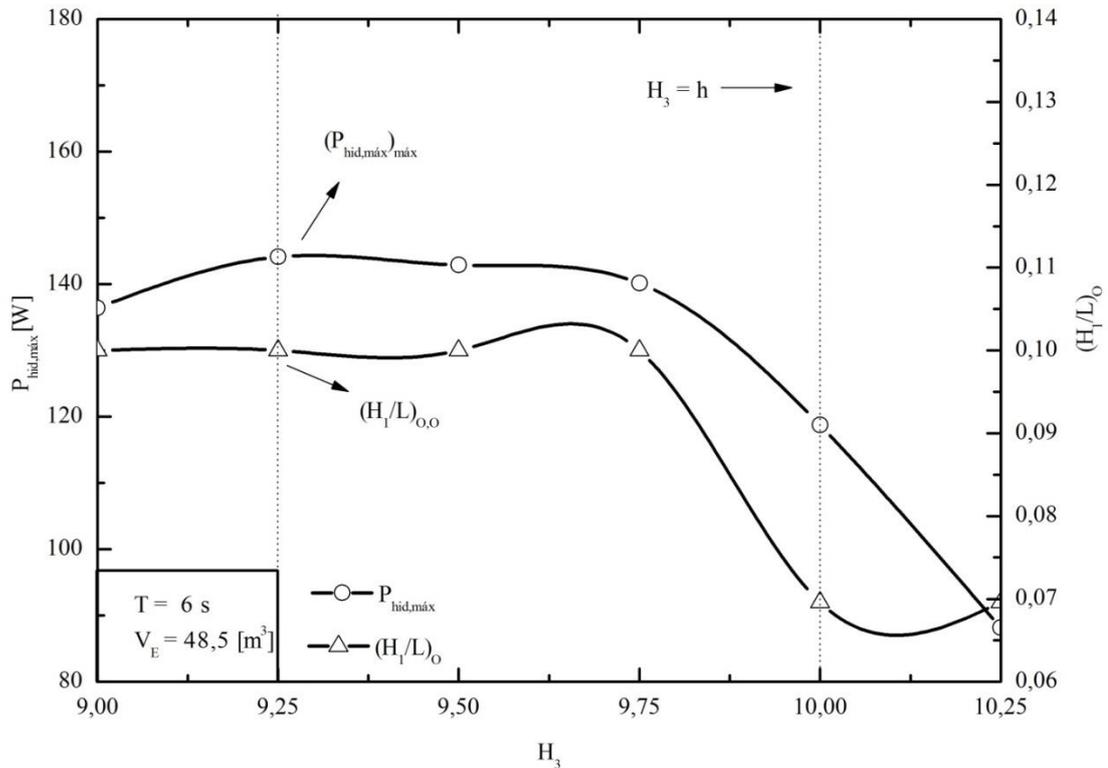


Figura 6.18 – Potência hidropneumática máxima (RMS) e  $H_1/L$  ótimo correspondente em função de  $H_3$  para  $T = 6$  s.

É importante observar que a curva da Fig. 6.18 considera somente a maior média RMS da potência hidropneumática para cada valor de submersão  $H_3$ . Ao analisar a Fig. 6.17 verifica-se que o pior desempenho, a exemplo do caso para  $T = 5$  s, ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,0266$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 14,40 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9) igual a 7,12%.

Enquanto que com os resultados apresentados na Fig. 6.18 e Fig. 6.19 a geometria ótima, sendo a média RMS da potência hidropneumática a função objetivo, é quando  $(H_3)_O = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,1044$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática, otimizada duas vezes  $((P_{hid,máx})_{máx})$ , é igual a 144,12 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 9,29%.

Geometricamente, é possível otimizar o grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ . Analisando a Fig. 6.18 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação  $(H_1/L)_{O,O} = 0,10$ . Usando essa relação o dispositivo CAO estará aproveitando o máximo da potência da onda incidente.

### 6.2.3. Onda $T=7$ s ( $V_E=60$ m<sup>3</sup>)

Para o período de onda  $T = 7$  s as restrições geométricas podem ser definidas através das Eqs. (3.1) e (3.2). Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda, podem ser calculadas pelas Eqs. (3.3) a (3.6), e podem ser vistas na Tab. C.4 (Anexo C). Na Fig. 6.19 apresenta-se o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,03 < H_1/L < 0,08$ . E este intervalo compreende a relação para os casos ótimos em que o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) seja aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_0 \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível, também, verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 7$  s.

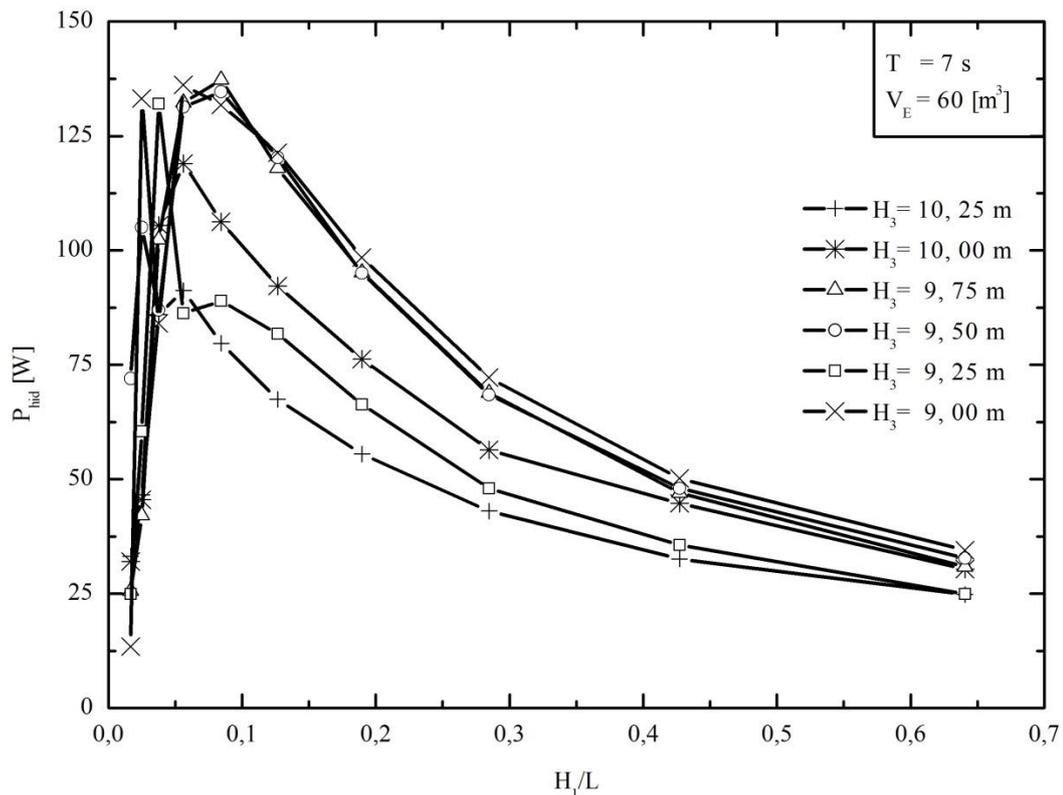


Figura 6.19 - Comportamento para a onda com  $T = 7$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

No que diz respeito à submersão do dispositivo CAO, ou seja, o grau de liberdade  $H_3$ , a Fig. 6.20 apresenta uma curva para o valor máximo da média RMS da potência

hidropneumática para os respectivos valores de  $H_3$ . Nesta figura observa-se, ainda, que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório e para as ondas com  $T = 5$  s e  $T = 6$  s, é também satisfeita para este período de onda em escala real.

Uma recomendação de geometria ótima para onda com  $T = 7$  s, de acordo com o apresentado na Fig. 6.19 e Fig. 6.20, sendo a média RMS da potência hidropneumática a função objetivo, é quando  $H_3 = 9,75$  m e  $H_1/L = 0,0844$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a 137,29 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 6,75%. E o pior desempenho ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,0167$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 13,42 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 5,06%.

Devem-se atribuir os baixos valores de eficiência hidrodinâmica, calculada pela Eq. (5.9), principalmente, à pressão no interior da câmara CAO, uma vez que a Eq. (5.10), que calcula a energia transformada no dispositivo CAO, é função da pressão. Embora nesse estudo existam perdas localizadas, como já foi destacado anteriormente, não está sendo levado em consideração o efeito da turbina que ocasiona uma pressurização no interior da câmara CAO e, por consequência, aumenta a energia transformada. Este fato será discutido mais adiante.

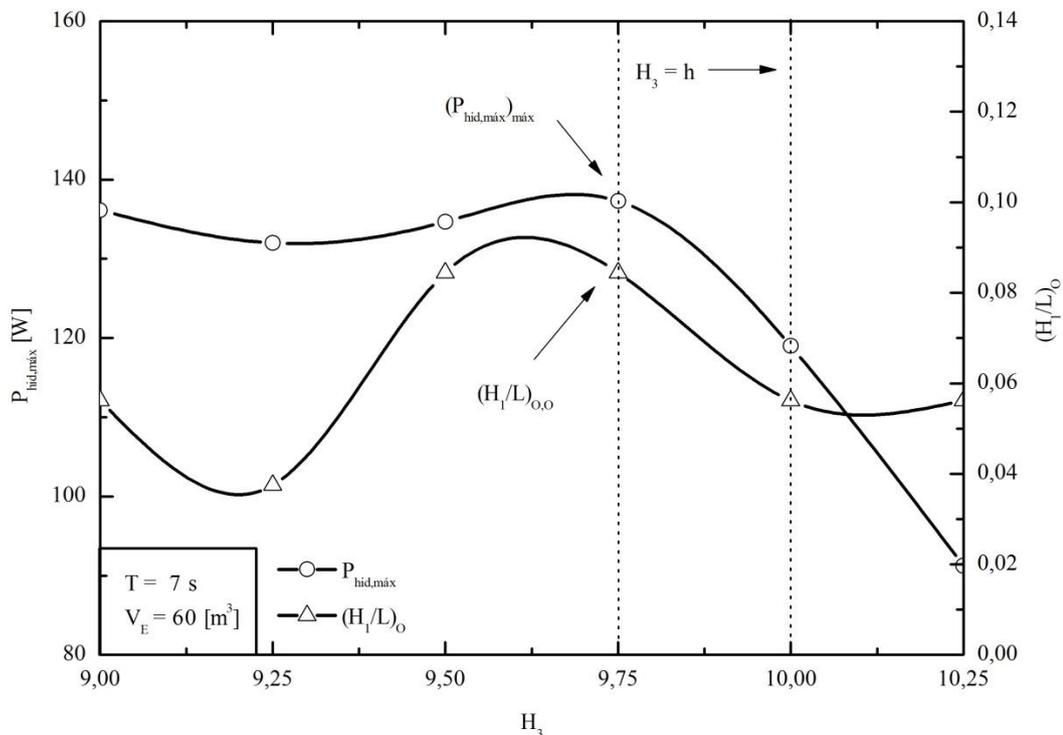


Figura 6.20 – Potência hidropneumática máxima (RMS) e  $H_1/L$  ótimo correspondente em função de  $H_3$  para  $T = 7$  s.

A otimização do grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ , analisando a Fig. 6.20 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação  $(H_1/L)_{0,0} = 0,08$ .

#### 6.2.4. Onda $T=8$ s ( $V_E = 71$ m<sup>3</sup>)

Para o período de onda  $T = 8$  s as restrições geométricas podem ser definidas através das Eqs. (3.1) e (3.2). Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda, podem ser calculadas pelas Eqs. (3.3) a (3.6), e podem ser vistas na Tab. C.5 (Anexo C). Na Fig. 6.21 apresenta-se o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,03 < H_1/L < 0,10$ .

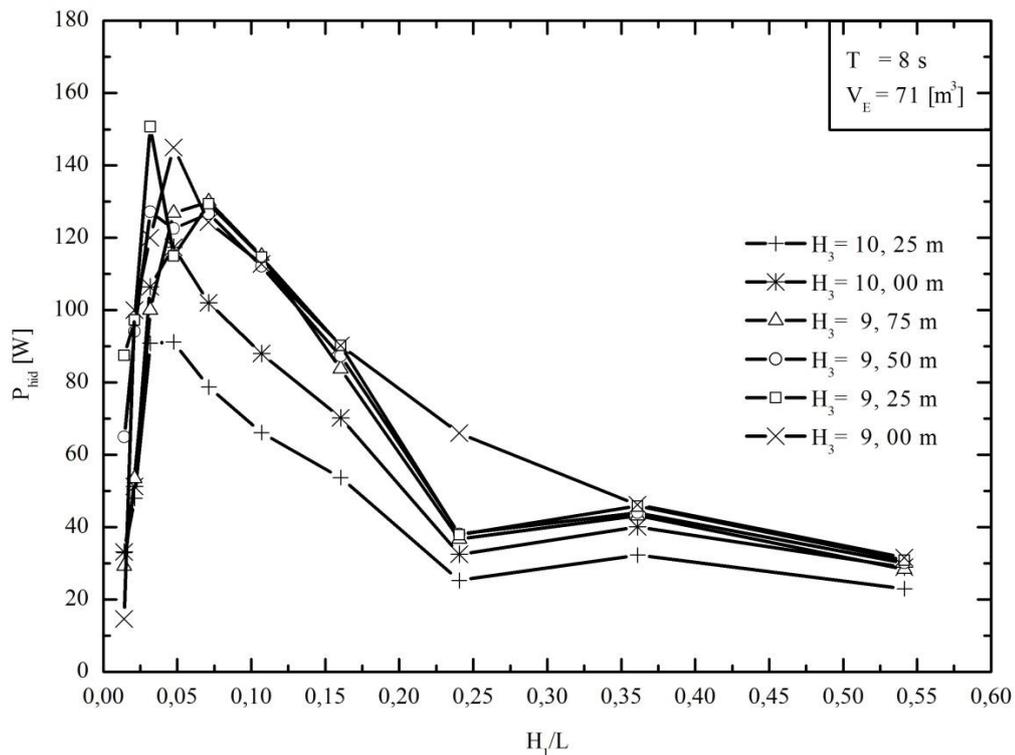


Figura 6.21 - Comportamento para a onda com  $T = 8$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

Este intervalo compreende a relação para os casos ótimos em que o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) seja aproximadamente a metade do comprimento da onda

incidente ( $LO \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível, também, verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 8$  s.

Na Fig. 6.22 é apresentada uma curva para o valor máximo da média RMS da potência hidropneumática de acordo com a variação de  $H_3$ . Observa-se que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório, e para a onda com  $T = 5$  s,  $T = 6$  s e  $T = 7$ , é também satisfeita para este período de onda em escala real. Entretanto, observa-se um bom aproveitamento quando o dispositivo está mais submerso, embora quantitativamente não seja uma diferença grande.

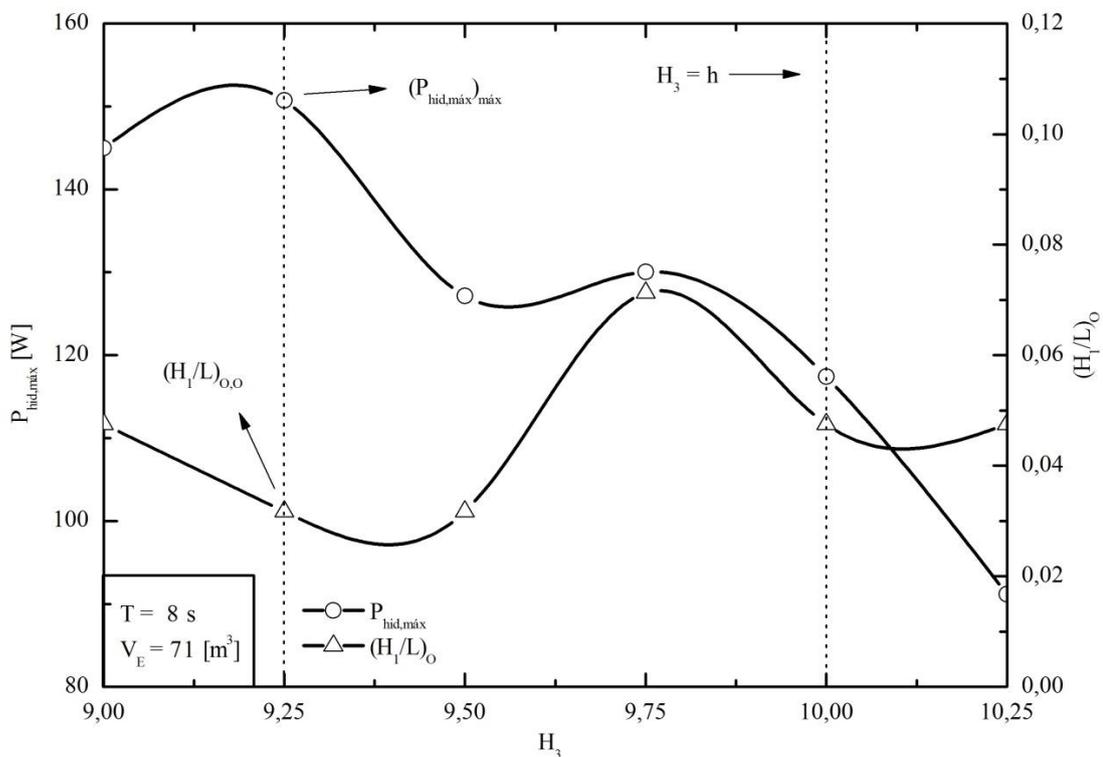


Figura 6.22 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e  $H_1/L$  ótimo correspondente em função de  $H_3$  para  $T = 8$  s.

Uma recomendação de geometria ótima para onda com  $T = 8$  s, de acordo com o apresentado na Fig. 6.21 e Fig. 6.22, sendo a média RMS da potência hidropneumática a função objetivo, é quando  $H_3 = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,0317$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a 150,71 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 13,15%. E o pior desempenho ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,014$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 14,70 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 4,14%.

A otimização do grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ , analisando a Fig. 6.22 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação  $(H_1/L)_{O,O} = 0,035$ .

### 6.2.5. Onda $T = 9$ s ( $V_E = 81,8$ m<sup>3</sup>)

Para o período de onda  $T = 9$  s as restrições geométricas podem ser definidas através das Eqs. (3.1) e (3.2). Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda podem ser calculadas pelas Eqs. (3.3) a (3.6), e podem ser vistas na Tab. C.6 (Anexo C). Na Fig. 6.23 apresenta-se o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,02 < H_1/L < 0,06$ .

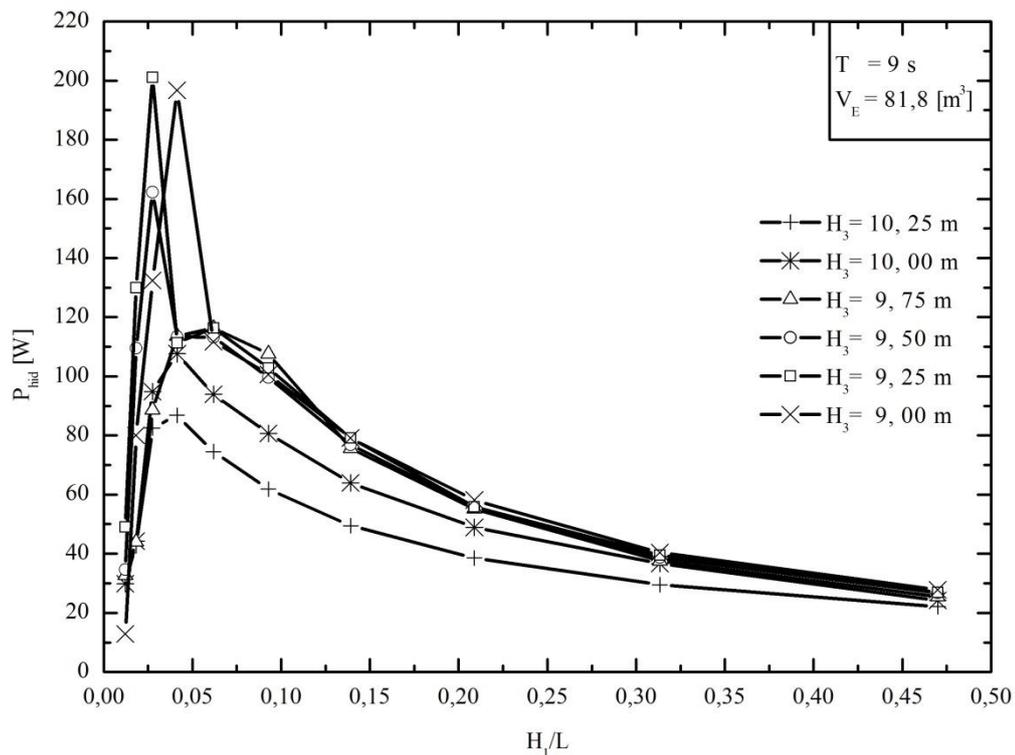


Figura 6.23 - Comportamento para a onda com  $T = 9$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

Este intervalo compreende a relação para os casos ótimos em que o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) seja aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $LO \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível, também, verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 9$  s.

Na Fig. 6.24 é apresentada uma curva para o valor máximo da média RMS da potência hidropneumática de acordo com a variação de  $H_3$ . Observa-se que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório, e para a onda com  $T = 5$  s,  $T = 6$  s,  $T = 7$  e  $T = 8$ , é também satisfeita para este período de onda em escala real. Entretanto observa-se um bom aproveitamento quando o dispositivo está mais submerso, embora quantitativamente não seja uma diferença grande.

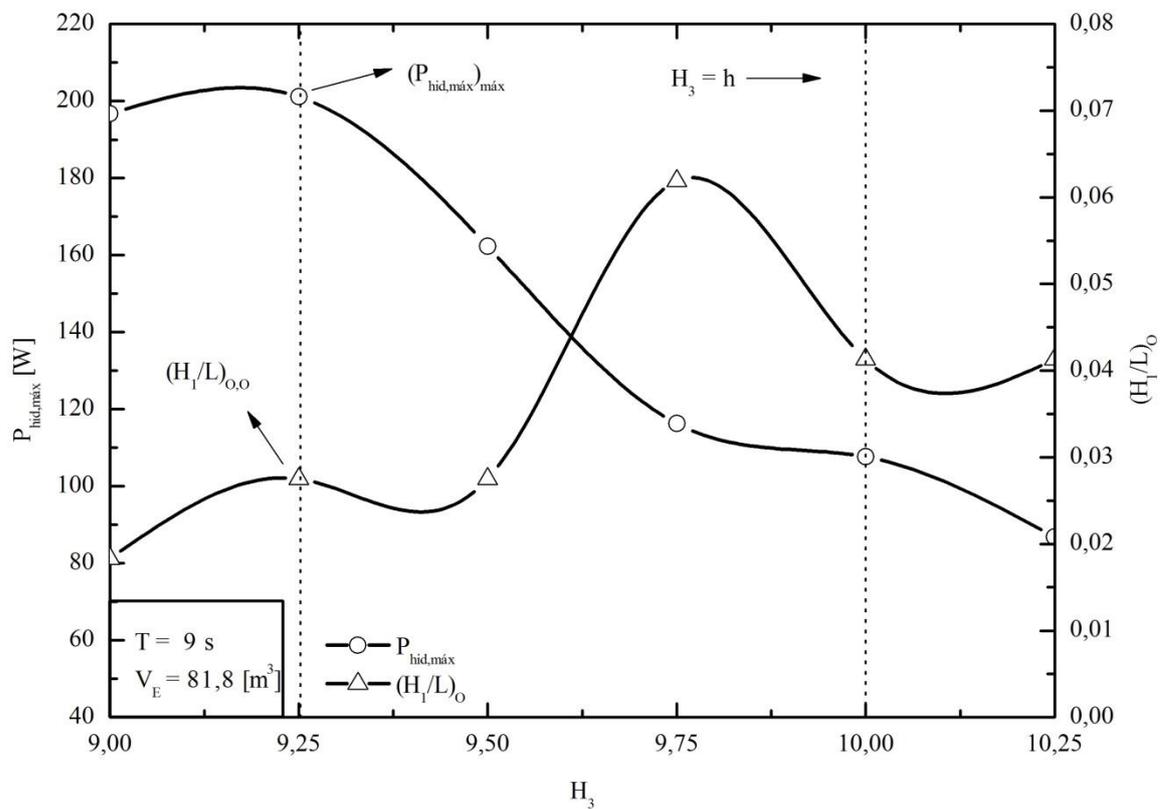


Figura 6.24 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e  $H_1/L$  ótimo correspondente em função de  $H_3$  para  $T = 9$  s.

Uma recomendação de geometria ótima para onda com  $T = 9$  s, de acordo com o apresentado na Fig. 6.23 e Fig. 6.24, sendo a média RMS da potência hidropneumática a

função objetivo, é quando  $H_3 = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,0275$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a 201,11 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 11,67%. E o pior desempenho ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L=0,0122$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 12,95 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 3,05%. A otimização do grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ , analisando a Fig. 6.29 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação  $(H_1/L)_{0,0} = 0,027$ .

### 6.2.6. Onda T = 11 s ( $V_E = 103$ m<sup>3</sup>)

Para o período de onda  $T = 11$  s as restrições geométricas podem ser definidas através das Eqs. (3.1) e (3.2). Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda podem ser calculadas pelas Eqs. (3.3) a (3.6), e podem ser vistas na Tab. C.7 (Anexo C).

Na Fig. 6.25 apresenta-se o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,01 < H_1/L < 0,04$ . Este intervalo compreende a relação para os casos ótimos em que o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) seja aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_0 \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível, também, verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 11$  s.

Na Fig. 6.26 é apresentada uma curva para o valor máximo da média RMS da potência hidropneumática de acordo com a variação de  $H_3$ . Observa-se que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório e para as ondas com  $T = 5$  a  $9$  s é também satisfeita para este período de onda em escala real. Entretanto, observa-se um bom aproveitamento quando o dispositivo está mais submerso, embora quantitativamente não seja uma diferença grande.

Uma recomendação de geometria ótima para onda com  $T = 11$  s, de acordo com o apresentado na Fig. 6.25 e Fig. 6.26, sendo a média RMS da potência hidropneumática a função objetivo, é quando  $H_3 = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,0218$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a 189,33 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 10,14 %. E o

pior desempenho ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,0097$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 12,24 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 2,55%.

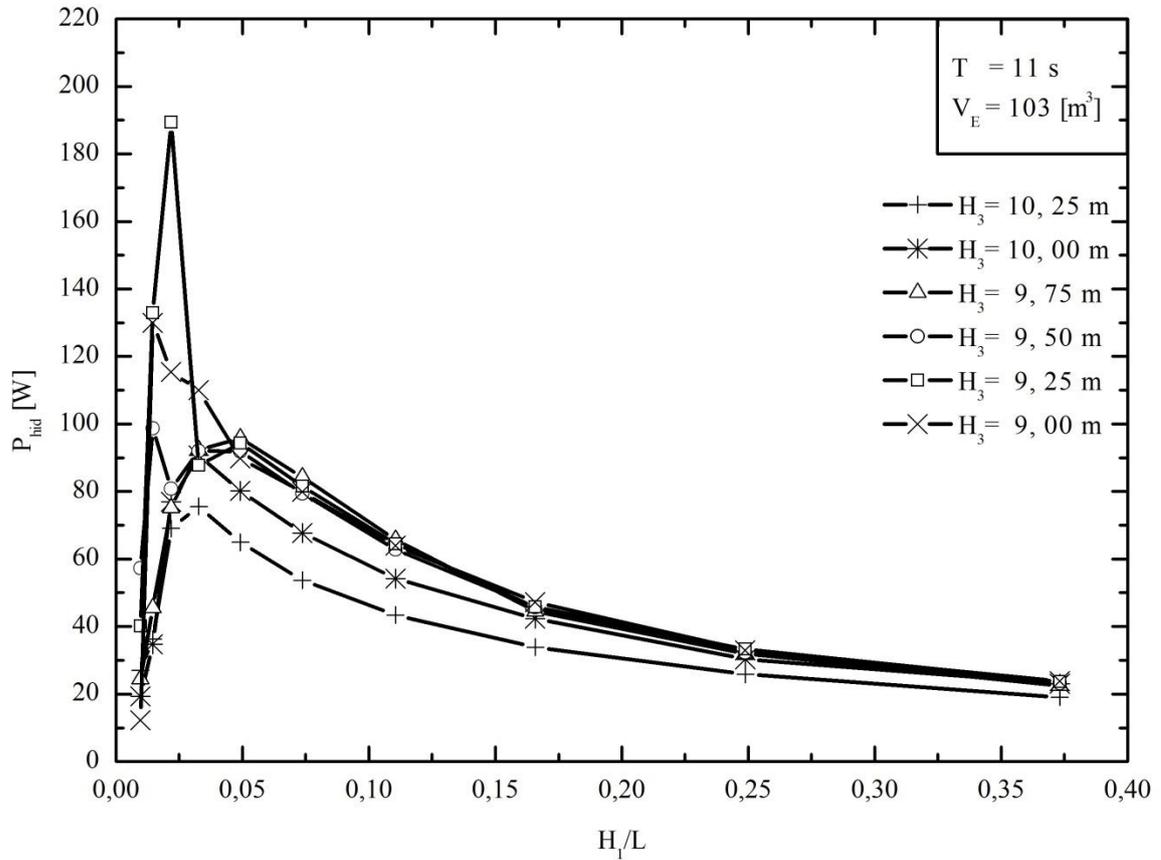


Figura 6.25 - Comportamento para a onda com  $T = 11$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

A otimização do grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ , analisando a Fig. 6.26 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação  $(H_1/L)_{0,0} = 0,022$ .



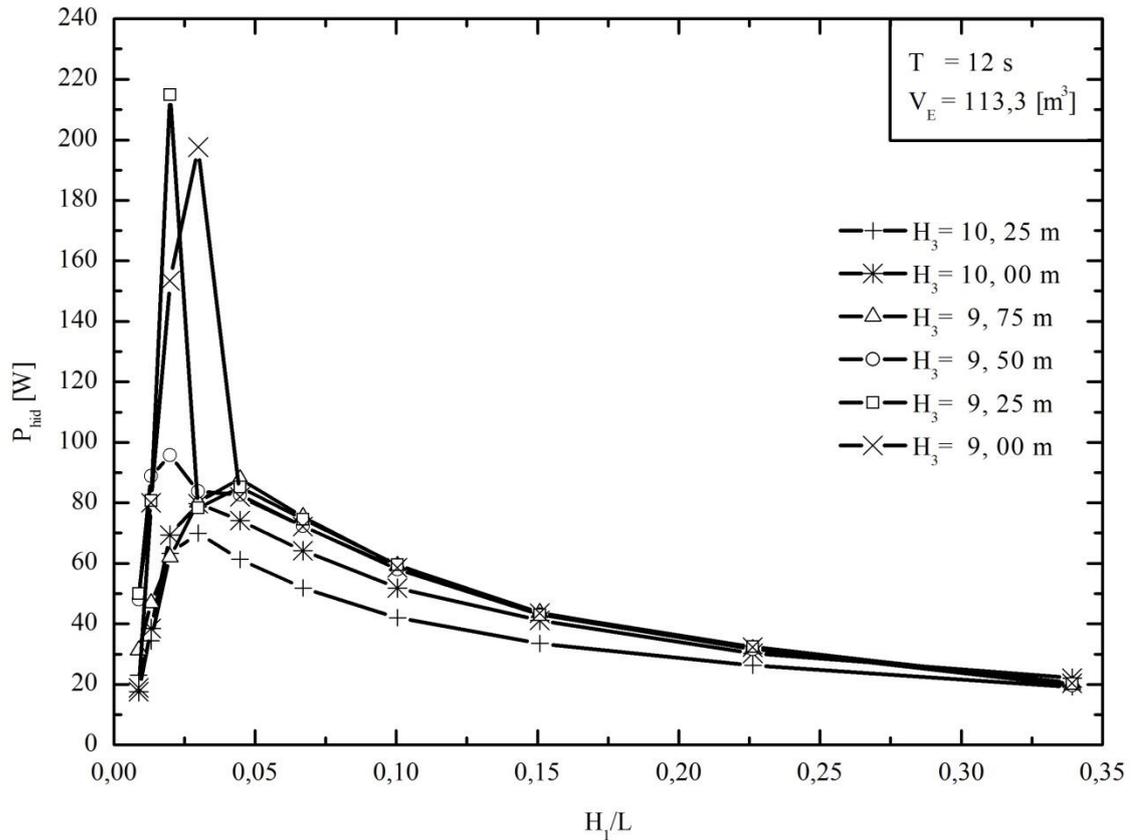


Figura 6.27 - Comportamento para a onda com  $T = 12$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$ .

Na Fig. 6.28 é apresentada uma curva para o valor máximo da média RMS da potência hidropneumática de acordo com a variação de  $H_3$ . Observa-se que a relação dada pela Eq. (6.3), indicada para o estudo realizado com a onda de laboratório, e para as ondas com  $T = 5$  a  $11$  s é também satisfeita para este período de onda em escala real. Entretanto, observa-se um bom aproveitamento quando o dispositivo está mais submerso, embora quantitativamente não seja uma diferença grande.

Uma recomendação de geometria ótima para onda com  $T = 11$  s, de acordo com o apresentado na Fig. 6.27 e Fig. 6.28, sendo a média RMS da potência hidropneumática a função objetivo, é quando  $H_3 = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,0199$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a  $214,85$  W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é  $8,51$  %. E o pior desempenho ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,0088$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a  $18,79$  W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é  $2,19$ %.

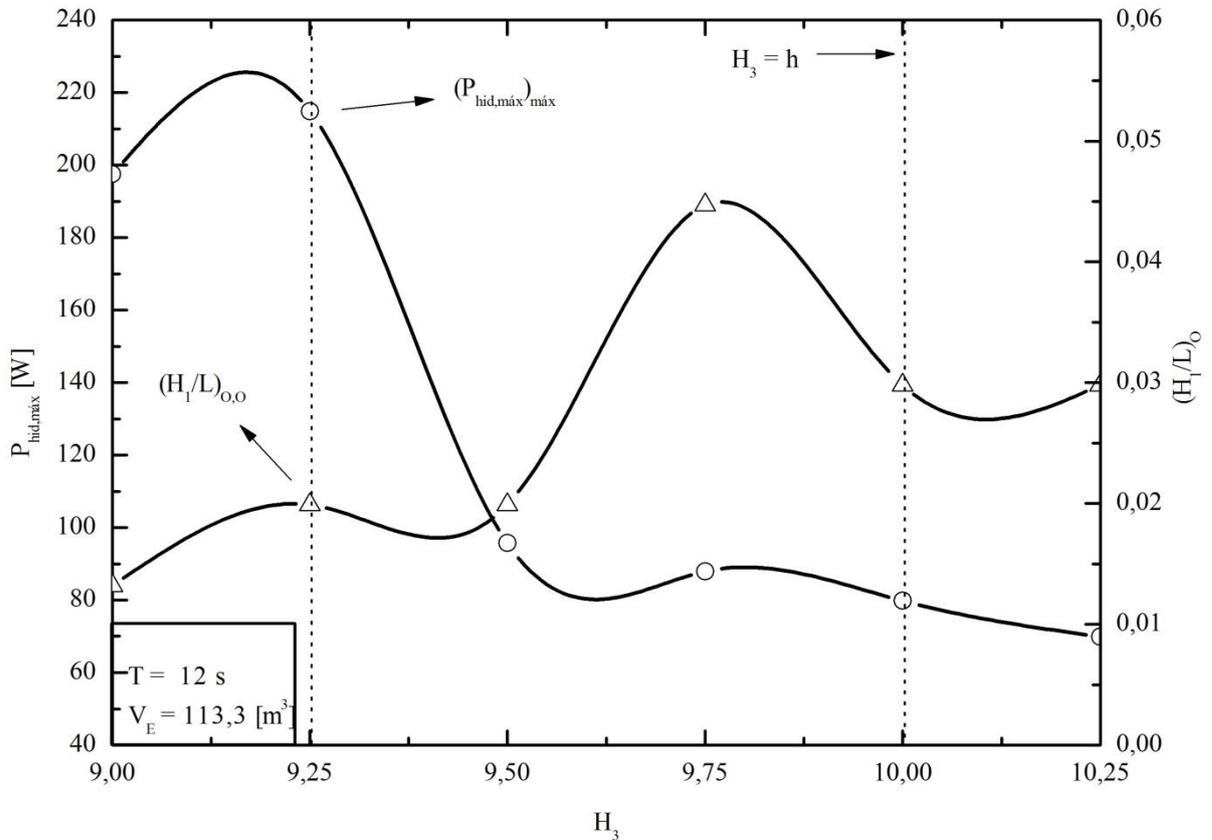


Figura 6.28 - Potência hidropneumática máxima (RMS) e  $H_1/L$  ótimo correspondente em função de  $H_3$  para  $T = 12$  s.

A otimização do grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ , analisando a Fig. 6.35 verifica-se que na região onde  $H_3$  é ótimo o recomendável é utilizar uma relação  $(H_1/L)_{0,0} = 0,019$ .

Para investigar o efeito de  $L/l$  no campo de pressões na câmara CAO foi analisado o comportamento transiente da pressão para os seis primeiros casos da variação de  $H_1/L$  quando  $H_3 = 9,25$  m (vide Tab. C.8). Na Fig. 6.29, observa-se que à medida que  $L/l$  diminui (por consequência a descontinuidade geométrica tende a diminuir) os picos negativos de pressão deixam de existir e a distribuição de pressões tende a ficar simétrica, e isso ocorre sempre quando  $H_1/L$  tende a aumentar, ou seja, quando se tem comprimentos de câmaras ( $L$ ) menores e altura da câmara ( $H_1$ ) maiores. Quando  $H_1/L$  é pequeno a altura da câmara não é suficiente

para o desenvolvimento do escoamento e principalmente para o desenvolvimento da pressão, aspecto esse que pode ser observado na Fig. 6.29.

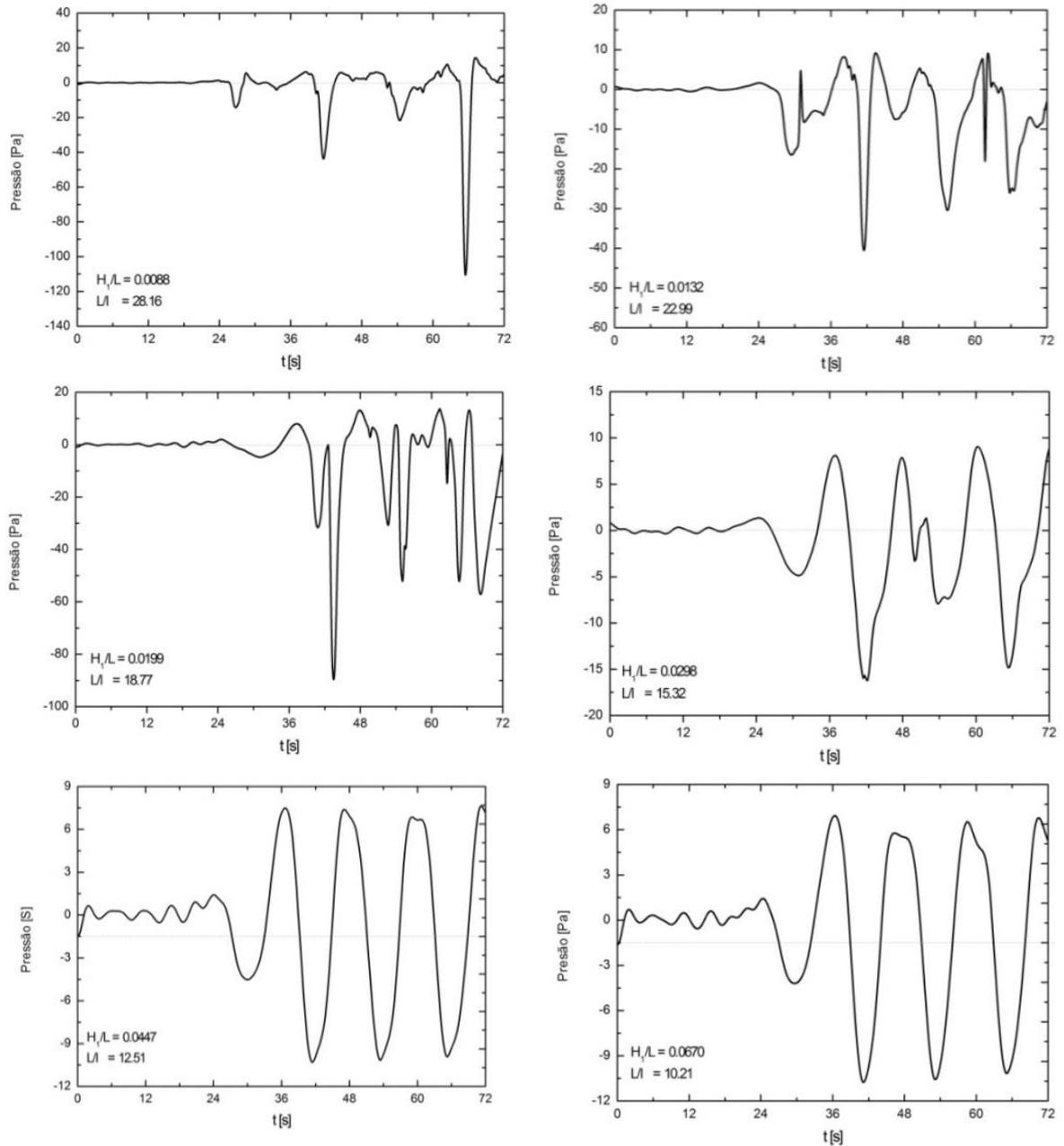


Figura 6.29 - Comportamento transiente da pressão para a variação de  $H_1/L$  quando  $H_3 = 9,25$

m.

### 6.2.8. Análise no espectro de onda

Para todos os períodos de onda apresentados na Tab. 5.2 foi realizado um estudo numérico, aplicando *Constructal Design*, a fim de analisar as características geométricas de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica cujo princípio de funcionamento é o de coluna d'água oscilante (CAO). O objetivo principal, em cada um dos períodos analisados, foi de obter uma recomendação numérica, de modo que o dispositivo tenha uma maior potência. Considerando para isso o comprimento da câmara CAO ( $L$ ) e altura da câmara CAO ( $H_1$ ), ou seja, o grau de liberdade  $H_1/L$ , bem como em relação à profundidade de submersão denominada de  $H_3$ .

Na Fig. 6.30 é apresentado o comportamento da média RMS da pressão máxima e da vazão mássica máxima para cada um dos períodos de onda analisados. É possível destacar um comportamento no intervalo  $5 \leq T \leq 8$ , onde para a vazão mássica tem-se médias RMS máxima maiores em relação ao restante do intervalo. Nestes períodos iniciais a pressão apresenta médias RMS máximas menores comparadas aos demais períodos analisados.

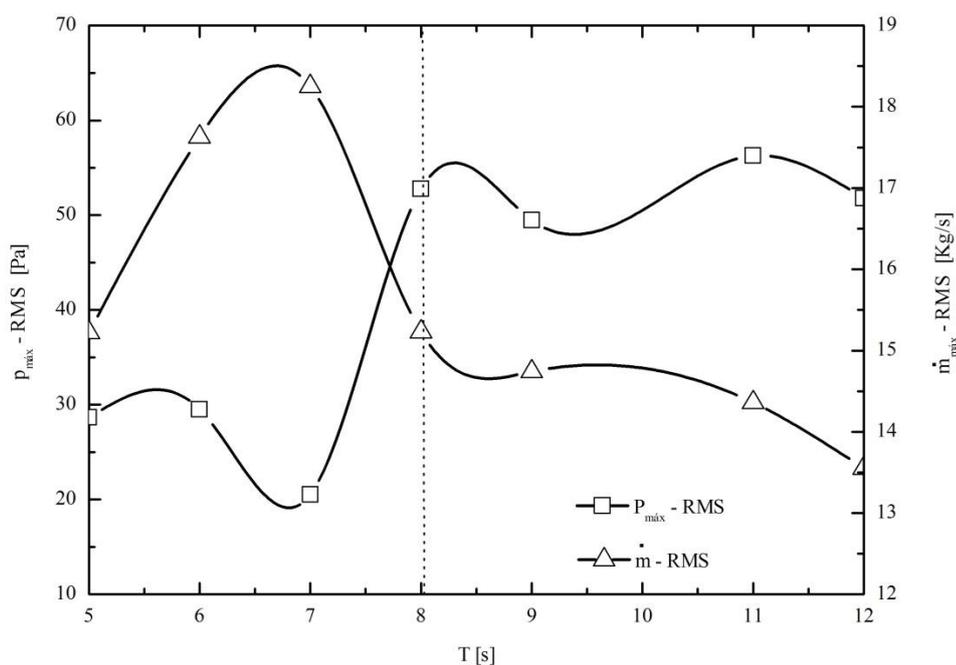


Figura 6.30 - Comportamento da média RMS da pressão máxima e da vazão mássica para cada um dos casos analisados.

Por outro lado, quando  $8\text{ s} \leq T \leq 12\text{ s}$ , para a vazão mássica tem-se médias RMS máxima menores em relação ao restante do intervalo. Neste intervalo final a pressão apresenta médias RMS máximas maiores comparadas aos demais períodos analisados.

Em relação à vazão mássica, este comportamento deve-se ao fato de que à medida em que o período da onda aumenta ocorre a formação de recirculações de ar no interior da câmara CAO. Este fato pode ser verificado através da Fig. 6.31, onde é apresentada qualitativamente a topologia do campo de velocidades para os casos ótimos da onda com  $T = 5\text{ s}$  e  $T = 12\text{ s}$ , respectivamente, considerando a fase de descompressão. Verifica-se na Fig. 6.31(a) que o campo de velocidades na chaminé de saída possui somente velocidades na direção  $y$  positivas, sem recirculações. Por outro lado, na Fig. 6.31(b), embora ocorram maiores movimentações de ar, pois a onda incidente tem comprimento e período maior, existem regiões de recirculação de ar na chaminé de saída da câmara CAO.

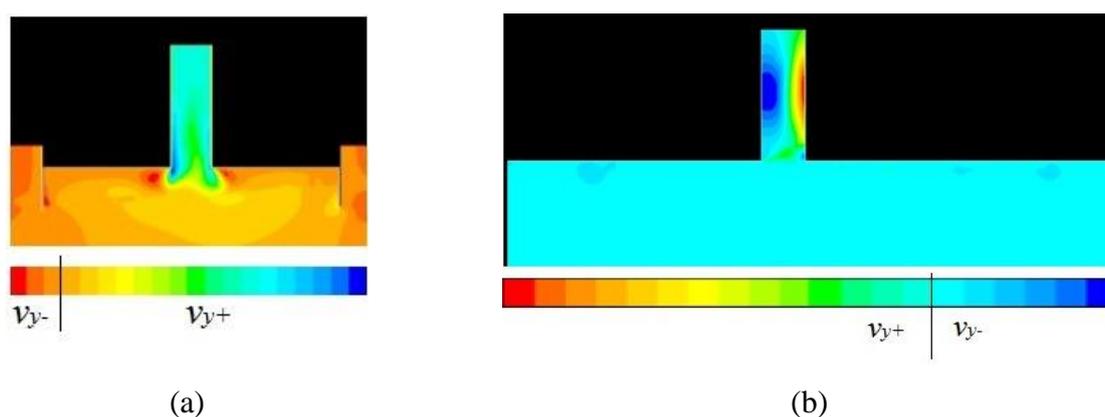


Figura 6.31 – Topologia do campo de velocidades para: (a)  $T = 5\text{ s}$ ,  $t = 27\text{ s}$ ,  $H_1/L = 0,1345$  e  $H_3 = 9,50$  e (b)  $T = 12\text{ s}$ ,  $t = 62,40\text{ s}$ ,  $H_1/L = 0,0199$  e  $H_3 = 9,25$ .

Quanto à pressão, um dos fatores que pode influenciar o comportamento apresentado na Fig. 6.30 é a descontinuidade geométrica dada pela relação  $L/l$ . Para cada um dos casos ótimos essa relação vai aumentando (vide anexo C) e quanto maior essa relação, maior são as perdas, ocasionando, assim, um aumento na pressão.

Na Fig. 6.32 é possível observar o comportamento da eficiência, calculada pela Eq. (5.9), para cada um dos casos ótimos, em cada um dos períodos analisados. A eficiência é, também, apresentada, na Fig. 6.32, para os piores casos.

Um dos fatores que deve influenciar a escolha da recomendação numérica acerca da geometria do dispositivo CAO, entre outros, é a onda predominante dentro do espectro de ondas. Por exemplo, seria mais interessante instalar o dispositivo numa região onde a onda predominante tem período  $T = 5$  s do que numa região onde o período  $T = 12$  s. Para  $T = 5$  s, como é possível verificar na Fig. 6.32, a eficiência tanto para o caso ótimo, quanto para o pior caso, são superiores do que as obtidas quando  $T = 12$  s. O ideal seria pensar num dispositivo adaptável à recomendação ótima para cada um dos períodos que compõem o espectro de ondas.

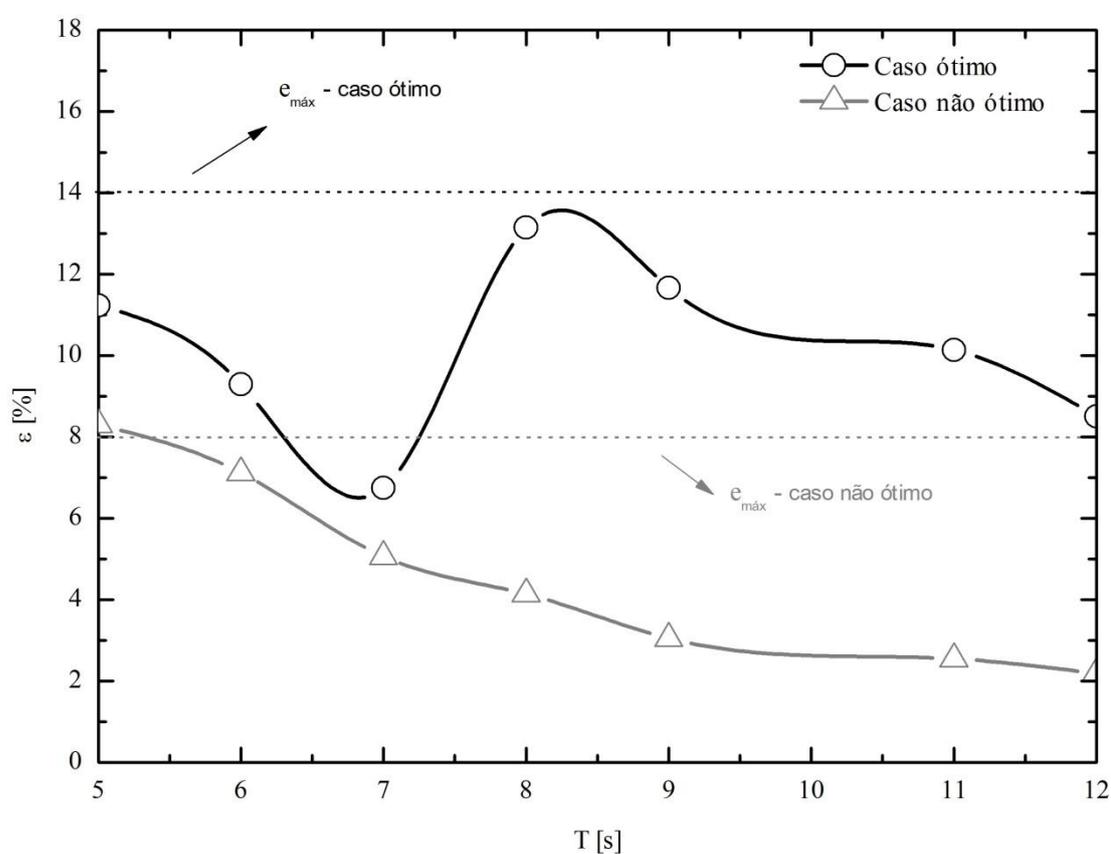


Figura 6.32 - Comportamento da eficiência para os casos ótimos e os piores casos em cada um dos períodos analisados.

Importante ressaltar que, da forma como foi empregado o método *Constructal Design*, onde para cada período de onda a restrição possui valores diferentes, uma recomendação ótima de  $H_1/L$  obtida para uma onda com  $T = 5$  s não é válida para  $T = 6$  s, ou qualquer outro período.

Deste modo, ao longo da análise dos casos ótimos, foi verificado que as recomendações ótimas obtidas para  $H_1/L$  indicaram resultados que, de alguma maneira aproximada, satisfaz a relação dada pela Eq. (6.1). Esta relação sim é aplicável para todos os períodos, pois é uma maneira de escrever a relação  $(H_1/L)_o$  de forma universal.

Na Fig. 6.33 é possível verificar essas relações. Inicialmente, tem-se uma comparação da relação dada pela Eq. (6.1), com valores calculados através dos dados da Tab. 6.2, com os valores ótimos de cada um dos períodos. Observa-se que os resultados obtidos são próximos aos calculados com a Eq. (6.1), entretanto, observam-se dois tipos de comportamento.

No intervalo de  $T = 5$  s a  $T = 7$  s, verifica-se que os valores ótimos obtidos são ligeiramente superiores aos calculados pela Eq. (6.1), deste modo o recomendável neste intervalo é empregar a seguinte relação:

$$\left(\frac{H_1}{L}\right)_o \cong 5,11 \frac{H}{\lambda} \quad (6.5)$$

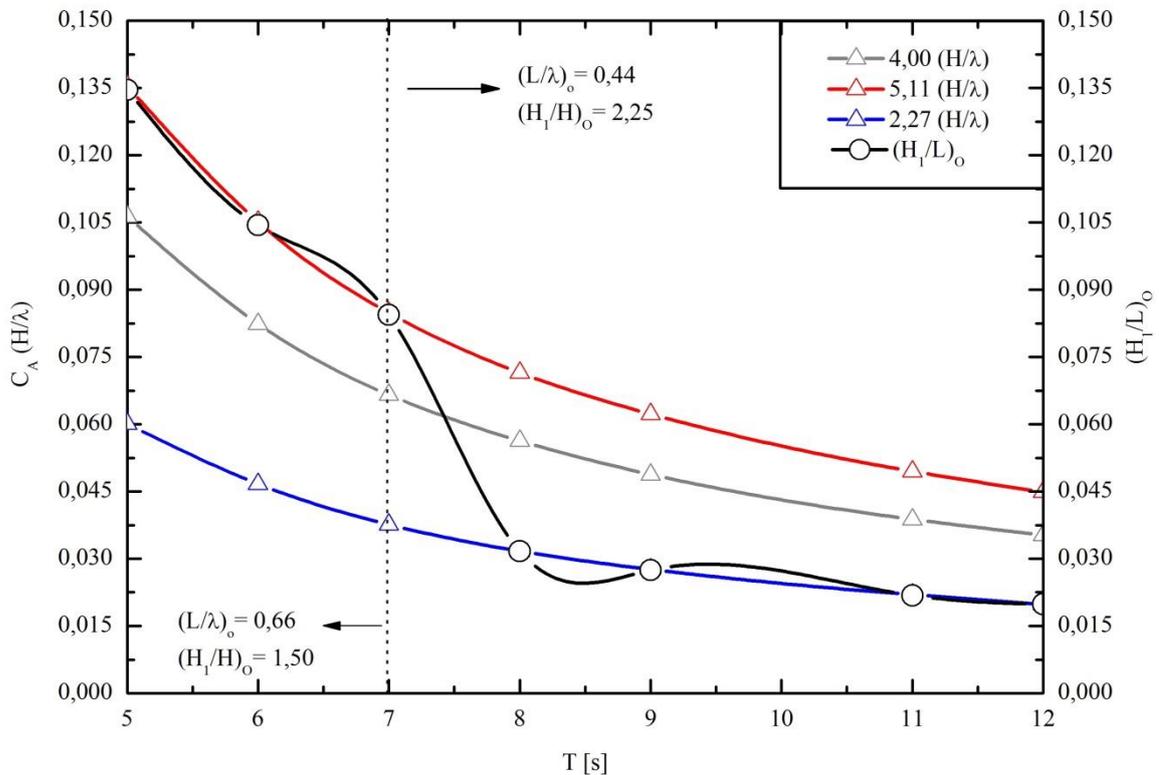


Figura 6.33 – Recomendação numérica para  $(H_1/L)_o$ .

Ainda, conforme a Fig. 6.33, no intervalo de  $T = 7$  s a  $T = 12$  s, verifica-se que os valores ótimos obtidos são ligeiramente inferiores aos calculados pela Eq. (6.1). Deste modo, o mais apropriado é empregar a seguinte relação:

$$\left(\frac{H_1}{L}\right)_o \cong 2,27 \frac{H}{\lambda} \quad (6.6)$$

Portanto, observa-se da Fig. 6.33 que a constante de ajuste  $C_A$  tem valores diferentes para diferentes intervalos de períodos de ondas.

Em relação ao grau de liberdade  $H_3$  verifica-se que em geral ao longo dos períodos analisados, conforme apresentado na Fig. 6.34, o valor ótimo de  $(H_3)_o$  satisfaz a relação dada pela Eq. (6.3). Enquanto que todos os piores casos foram obtidos quando  $H_3 = 9,00$  m.

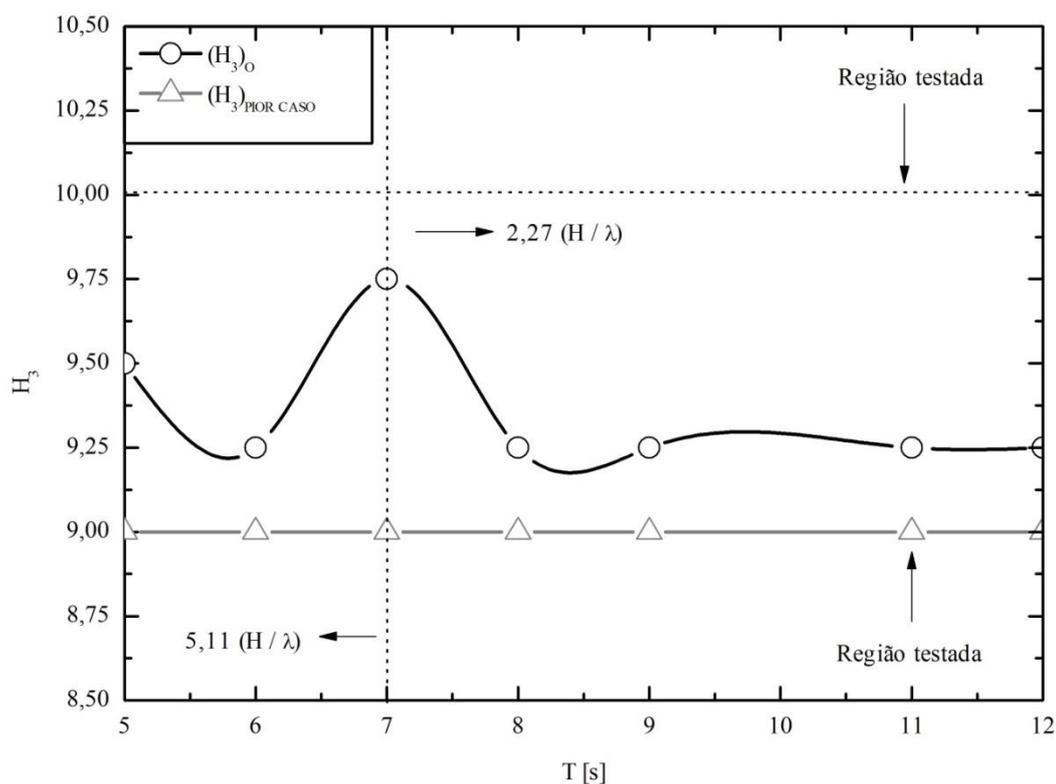


Figura 6.34 – Recomendação numérica para  $(H_3)_o$ .

Por fim, o grau de liberdade  $H_1/L$  é otimizado pela segunda vez, considerando para isso a potência hidropneumática máxima em cada um dos períodos de onda analisados, conforme apresentado na Fig. 6.35.

Cabe ressaltar, considerando a Fig. 6.35, que as relações dadas pelas Eqs. (6.1), (6.5) e (6.6) permanecem satisfeitas.

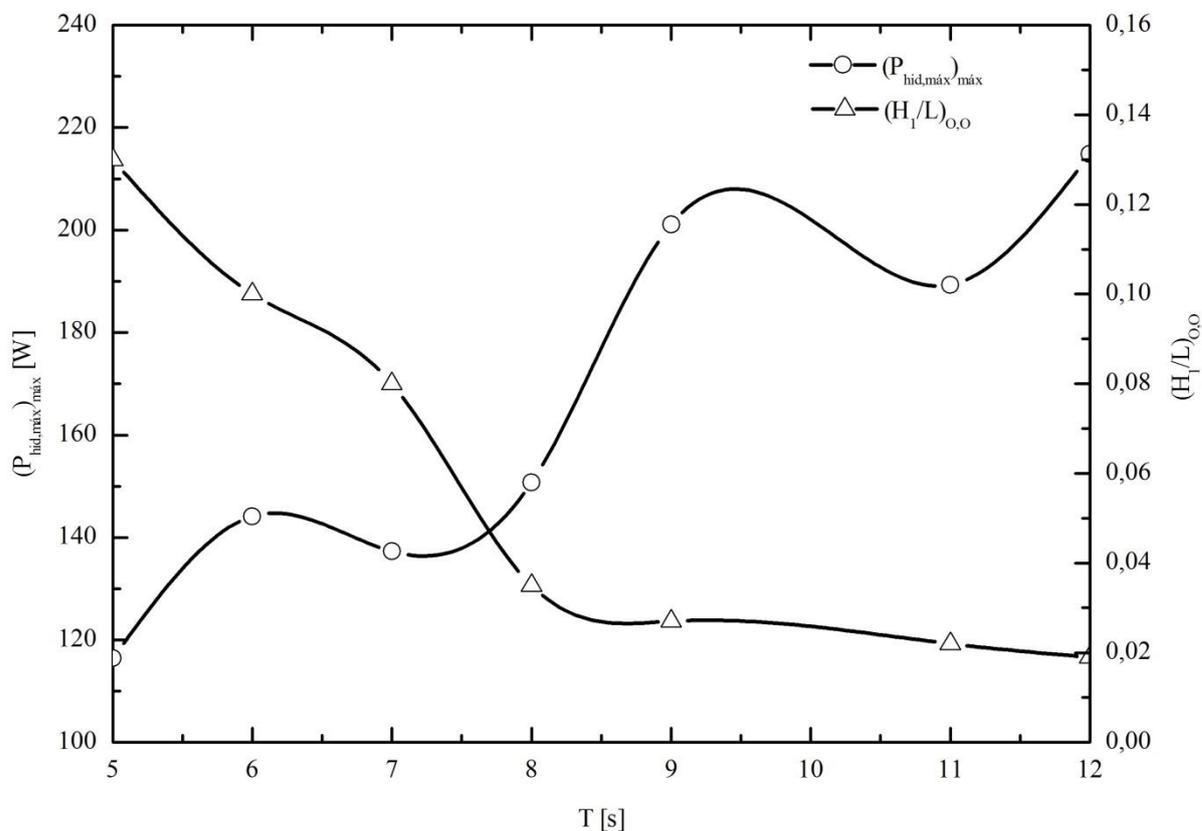


Figura 6.35 – Potência hidropneumática máxima (RMS), duas vezes, e  $H_1/L$  ótimo, duas vezes, correspondente em função de  $H_3$  para o espectro.

### 6.3. Metodologia para considerar no modelo computacional a perda de carga causada pela turbina

Este estudo tem como objetivo testar e comparar a utilização de dois tipos de restrição física na saída do dispositivo CAO, com o intuito de representar a influência da perda de carga da turbina no escoamento do ar pelo conversor. A representação esquemática do domínio computacional pode ser observada na Fig. 3.1.

Uma primeira estratégia (**Restrição A**) consiste em utilizar um corpo rombudo que represente a turbina na saída da chaminé do dispositivo CAO conforme apresentado na Fig. 6.36 (a). Entretanto, com esta estratégia, é de se esperar que a influência maior da restrição

seja durante a compressão no interior da câmara, uma vez que a geometria da restrição não é simétrica.

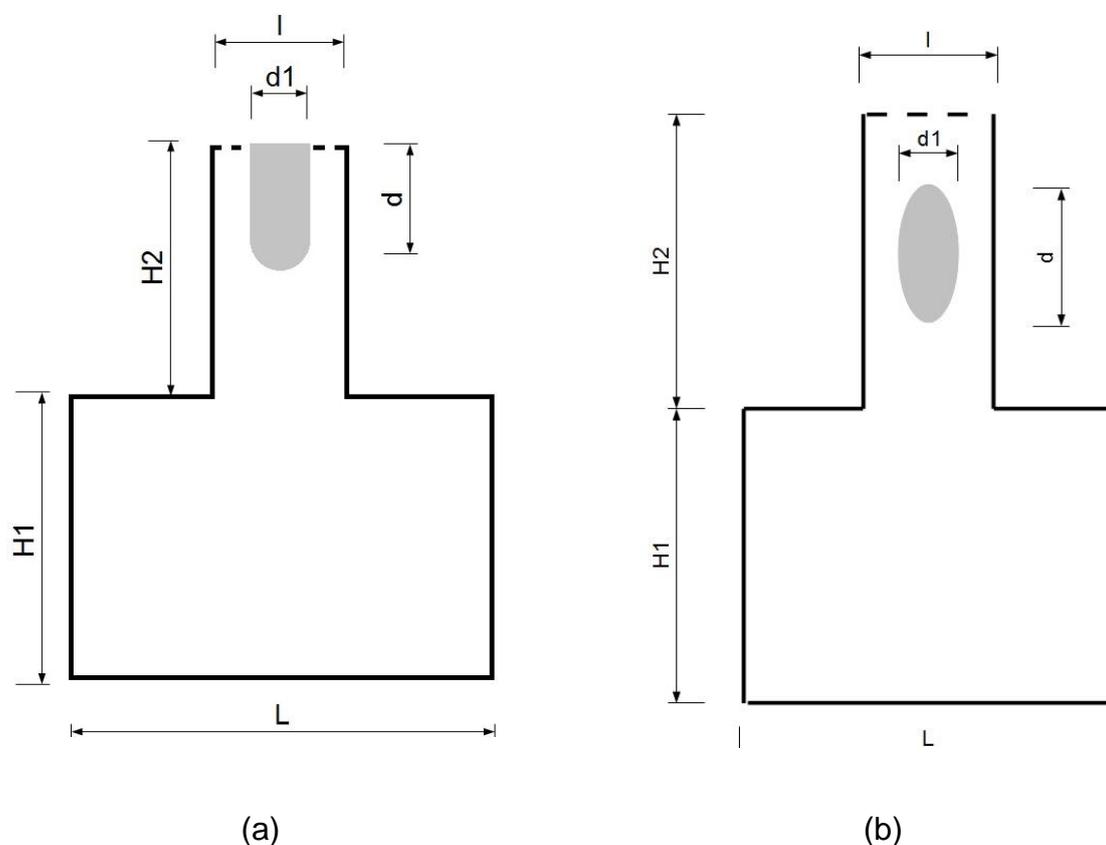


Figura 6.36 - Representação esquemática da restrição física na saída do dispositivo CAO: (a) Restrição A – Corpo rombudo, (b) Restrição B – Corpo elíptico.

Sendo assim, propõe-se um segundo tipo de restrição (**Restrição B**), na forma elíptica, conforme apresentado na Fig. 6.36 (b). A mesma é posicionada no centro da chaminé de saída do dispositivo CAO e, pelo fato de ser simétrica, oferece resistência ao escoamento tanto na etapa de compressão quanto na descompressão, representando assim o efeito da turbina de uma forma mais realística.

Foram testadas algumas dimensões de restrição física, considerando as duas situações, para, assim, avaliar a relação entre a vazão mássica e a pressão no interior da câmara CAO. Nesse estudo, foi considerado um dispositivo com as características geométricas fixas, variando num primeiro momento somente o diâmetro da restrição física,  $d_1$ . Posteriormente, a estrutura é submetida a um espectro de ondas, levando em conta uma condição de restrição

pré-definida. As dimensões da geometria do dispositivo CAO são:  $H_3 = 9,50$  m;  $H_1/L = 0,1346$ ;  $L = 16,7097$  m;  $H_1 = 2,2501$  m,  $l = 2,3176$  m e  $H_2 = 6,9529$ . Essa é a geometria ótima é determinada no estudo de otimização do trabalho de GOMES et. al (2013a), considerando ondas reais, onde, além da geometria do dispositivo, a profundidade de submersão (*lip*) do dispositivo CAO é variada.

Nesta seção, as ondas utilizadas estão em escala real e suas características podem ser verificadas na Tab. 6.2. É importante destacar que as dimensões geométricas do dispositivo CAO utilizado neste estudo foram obtidas considerando a primeira onda do espectro apresentado na Tab. 6.2 ( $T = 5$  s).

Para a estratégia da **Restrição A**, a dimensão  $d_1$  representa o diâmetro da restrição e a dimensão  $d$  representa o comprimento da mesma. Já quando a **Restrição B** é utilizada  $d_1$  representa o comprimento do eixo na direção  $x$  da elipse (o que é equivalente ao diâmetro da restrição) e  $d$  representa o comprimento do eixo na direção  $y$  da elipse (o que é equivalente a dizer que é o comprimento da restrição).

Inicialmente, considerando a Onda 1 ( $T = 5$  s) do espectro de ondas da Tab. 6.2, foram testados seis diferentes diâmetros  $d_1$ , conforme a Tab. 6.4, tanto para a **Restrição A** quanto para a **Restrição B**. Lembrando que  $0 < d_1 < l$ . Para o caso da **Restrição A**, a dimensão  $d$  também é variável. Neste caso, foi sempre considerado 1 m mais o raio da restrição ( $d_1/2$ ). Já para o caso da **Restrição B** esse valor é fixo, como pode ser verificado na Tab. 6.4.

Como já era esperado, ao empregar a **Restrição A**, o simples fato de ter-se diminuído a passagem de ar na saída da chaminé (com o aumento da restrição geométrica) faz com que a pressão no interior do dispositivo CAO aumente e a velocidade na chaminé de saída aumente e, conseqüentemente, a potência também aumente, conforme apresentado na Tab. 6.5. Cabe ressaltar que os valores apresentados na Tab. 6.5 são médias do tipo RMS, calculadas num período de tempo onde a incidência das ondas no dispositivo é estável,  $15 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$ .

Da mesma maneira, quando se utiliza a **Restrição B**, com a forma elíptica, o fato de ter-se diminuído a passagem de ar na saída da chaminé (com o aumento da restrição geométrica) faz com que a pressão no interior do dispositivo CAO aumente e, conseqüentemente, a potência também aumente, conforme apresentado na Tab. 6.6. Entretanto, deve-se destacar que a forma da Restrição B é mais próxima da geometria de uma turbina, causando efeito de perda de carga similar nos dois sentidos do escoamento de ar pela chaminé do dispositivo CAO.

Tabela 6.4 - Dimensões da restrição física.

| Restrição | Restrição A |         |                | Restrição B |         |                |
|-----------|-------------|---------|----------------|-------------|---------|----------------|
|           | $d_I$ [m]   | $d$ [m] | Área [ $m^2$ ] | $d_I$ [m]   | $d$ [m] | Área [ $m^2$ ] |
| 0         | 0,000       | 0,000   | 0,0000         | 0,0000      | 0,000   | 0,0000         |
| 1         | 0,3176      | 1,1588  | 0,3968         | 0,3176      | 2,0000  | 0,4988         |
| 2         | 0,7176      | 1,3588  | 1,1220         | 0,7176      | 2,0000  | 1,1272         |
| 3         | 1,1176      | 1,5588  | 2,0985         | 1,1176      | 2,0000  | 1,7555         |
| 4         | 1,5176      | 1,7588  | 3,3264         | 1,5176      | 2,0000  | 2,3838         |
| 5         | 1,9176      | 1,9588  | 4,8056         | 1,9176      | 2,0000  | 3,0121         |
| 6         | 2,1176      | 2,0588  | 5,6395         | 2,1176      | 2,0000  | 3,3263         |

Tabela 6.5. Resultados para a variação do diâmetro da restrição física – Restrição A.

| Restrição | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência [W] |
|-----------|----------------------|--------------|--------------|
| 0         | 15,22                | 28,66        | 116,43       |
| 1         | 16,44                | 64,86        | 201,26       |
| 2         | 16,43                | 68,43        | 220,94       |
| 3         | 16,41                | 76,04        | 267,86       |
| 4         | 16,36                | 83,55        | 415,46       |
| 5         | 16,07                | 224,36       | 1.254,37     |
| 6         | 11,23                | 2.162,11     | 8.633,11     |

Na Fig. 6.37 é possível verificar o comportamento da média RMS da potência. A medida que o diâmetro da restrição,  $d_I$ , aumenta, a média da potência também aumenta. Os resultados apresentados na Fig. 6.37 mostram que o efeito da utilização da Restrição A é superior em relação ao efeito causado pela Restrição B (considerado mais realista).

Tabela 6.6 - Resultados para a variação do diâmetro da restrição física – Restrição B.

| Restrição | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência [W] |
|-----------|----------------------|--------------|--------------|
| 0         | 15,22                | 28,66        | 116,43       |
| 1         | 15,41                | 59,09        | 194,00       |
| 2         | 15,48                | 62,97        | 205,77       |
| 3         | 15,47                | 69,46        | 225,72       |
| 4         | 15,46                | 80,82        | 263,90       |
| 5         | 15,35                | 114,19       | 426,30       |
| 6         | 14,92                | 264,35       | 1348,78      |

Em relação à potência, é possível observar, na Fig. 6.37, para ambas as situações, Restrição A e Restrição B, ocorre um aumento, uma vez que a pressão aumenta consideravelmente, à medida em que o diâmetro  $d$  aumenta. Verifica-se que até o diâmetro 3, da Tab. 6.4, a potência se comporta de maneira semelhante para a Restrição A e a Restrição B, sendo o valor da potência aproximadamente 2 vezes maior na comparação do caso sem restrição. Esse aumento da potência se deve, essencialmente, ao aumento da pressão no interior da câmara CAO.

Ainda, considerando a Tab. 6.5, uma constatação a ser feita é em relação à vazão mássica. É possível observar que até a restrição 4, a média RMS da vazão mássica muito pouco varia e, a partir daí, até a restrição 6, a variação é maior. Considerando que a condição de contorno de entrada do escoamento continua a mesma, pois a onda e a configuração geométrica são as mesmas, a vazão mássica deveria se manter constante. Entretanto, tal fato ocorre porque a saída da chaminé diminui consideravelmente o que causa um amortecimento no escoamento, como pode ser verificado na Fig. 6.38 (a). Consequentemente, com o aumento do diâmetro da restrição física, a pressão e a potência aumentam fato que pode ser verificado na Fig. 6.39 (a) e Fig. 6.40 (a). Por tudo isso se entende que para esta situação uma restrição física a ser empregada seria a 4, da Tab. 6.4.

Quando a Restrição B é empregada o efeito de amortecimento não ocorre (ao menos com as dimensões de diâmetro utilizadas) conforme apresentado na Fig. 6.38 (b).

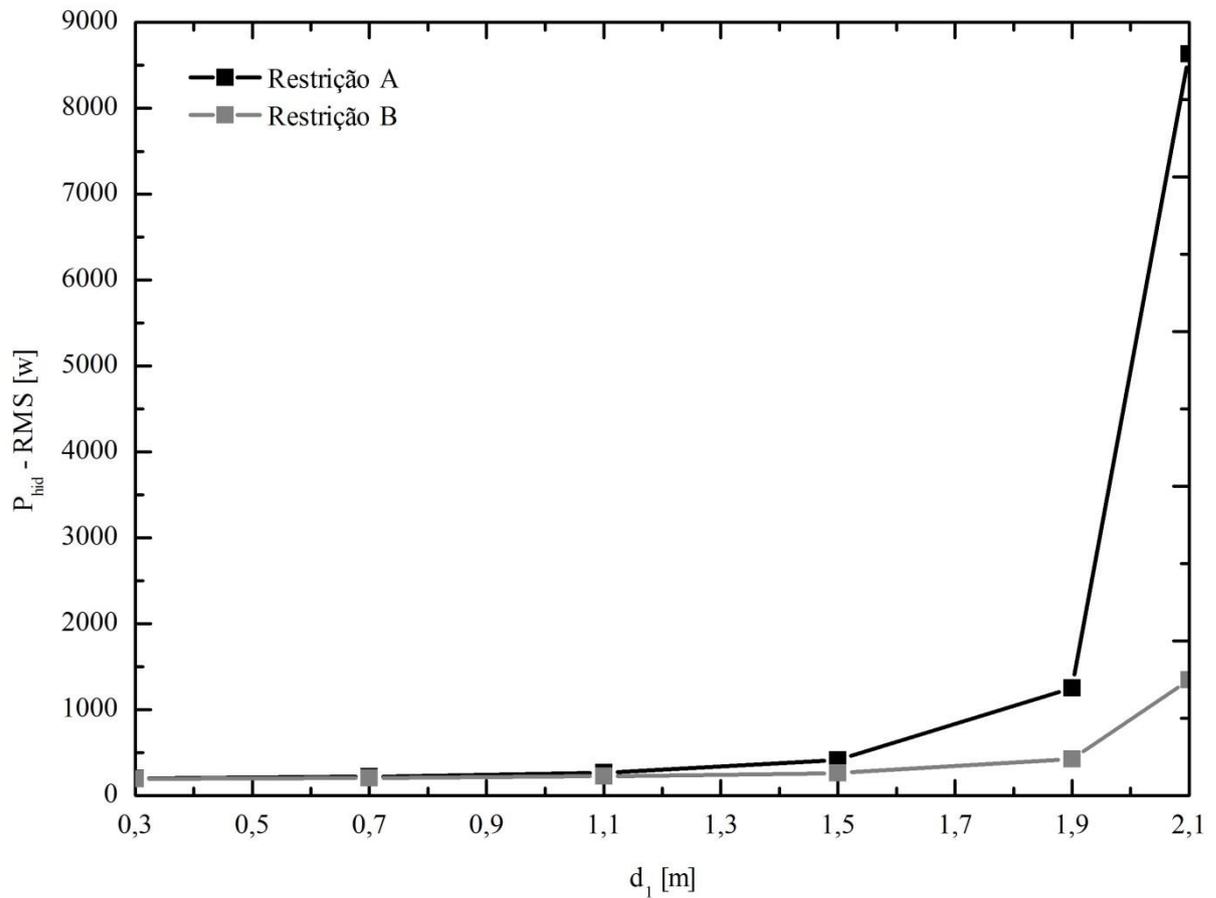


Figura 6.37 - Variação da potência em relação ao diâmetro da restrição física.

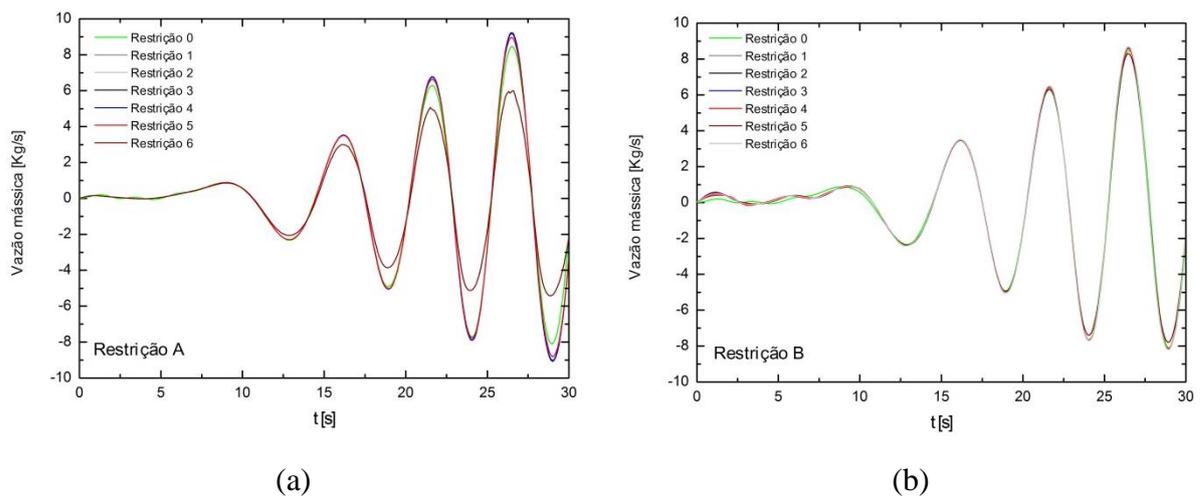


Figura 6.38 – Comportamento transiente da vazão mássica para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B.

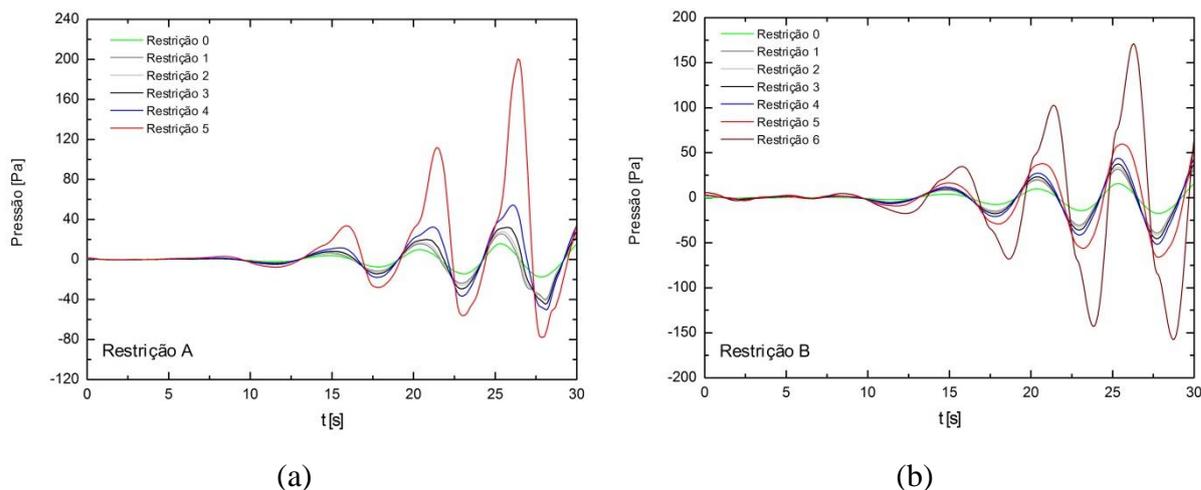


Figura 6.39 – Comportamento transiente da pressão para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B.

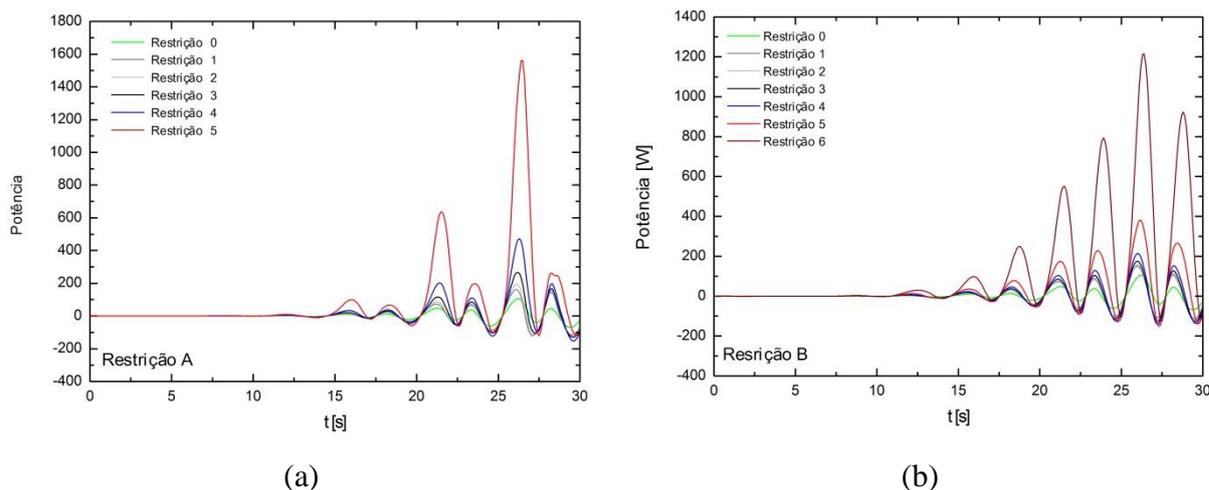


Figura 6.40 – Comportamento transiente da potência para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B.

Analisando as Fig. 6.37 e Tab. 6.6 uma pequena variação ocorre do caso 5 para o 6, com uma dimensão de restrição um pouco maior, se comparado a Restrição B. Comparando a Fig. 6.38 (b) e Fig. 6.39 (b), verifica-se que, quando emprega-se a Restrição B, a pressão se sobressai no cálculo da potência, fazendo com que esta seja maior, conforme pode ser verificado na Fig. 6.40 (b).

Na Fig. 6.41 é possível observar o comportamento qualitativo do fator de amplificação quando são usados diferentes diâmetros e diferentes formas geométricas de restrição. Com

essa análise é possível confirmar algumas das considerações iniciais. A inserção da influência da turbina ao modelo numérico faz com que o efeito de pistão aumente, o que pode ser observado qualitativamente na Fig. 6.41.

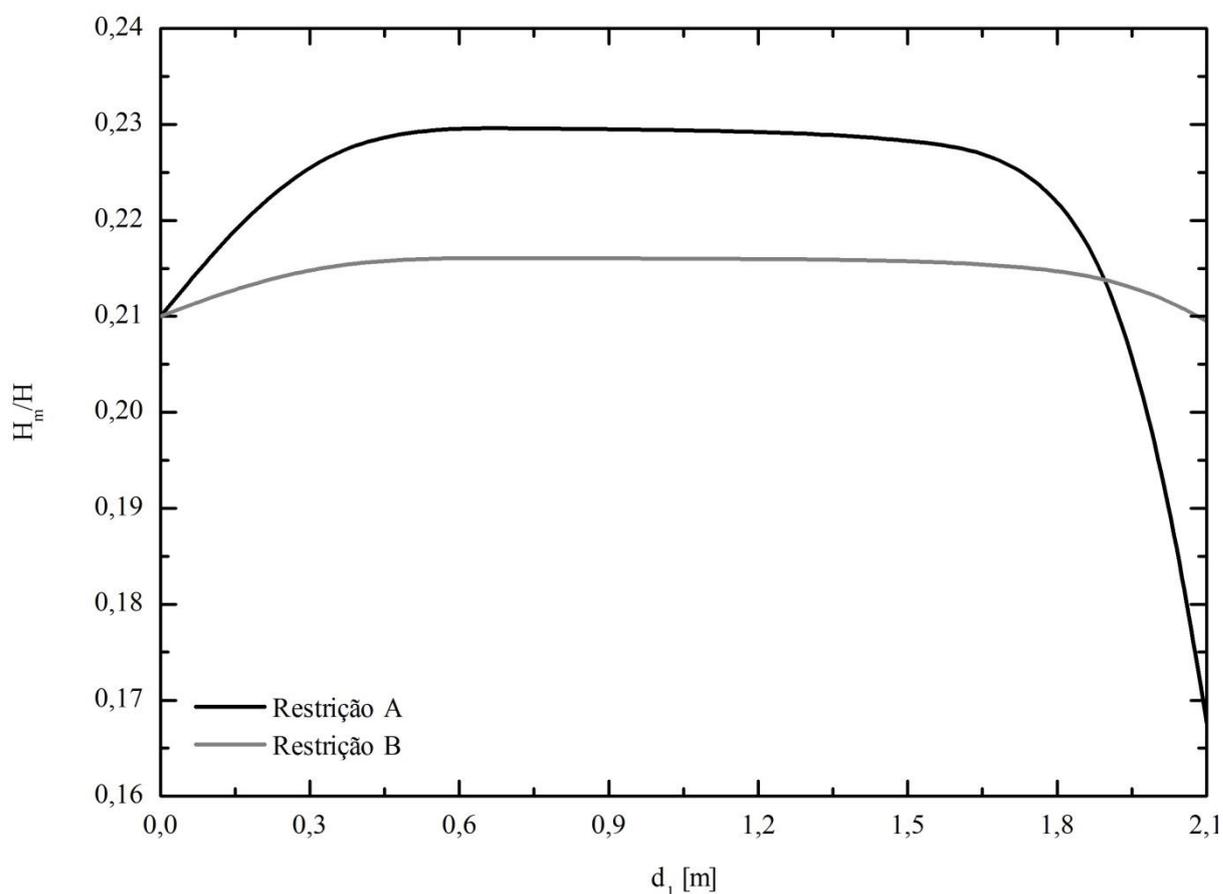


Figura 6.41 -Variação do fator de amplificação ( $H_m/H$ ) em relação ao diâmetro da restrição.

Outro aspecto que já havia sido discutido anteriormente e aqui é possível comprovar, diz respeito ao bloqueio do escoamento, quando se tem um diâmetro de restrição muito grande, como a do caso do diâmetro 6 da Tab. 6.5. Quando isso ocorre o efeito de pistão diminui consideravelmente, principalmente para o caso da Restrição A. Isso pode ser verificado tanto na Fig. 6.41 quanto na Fig. 6.42 (a) onde é possível observar o comportamento transiente da elevação da superfície livre de água no interior da câmara CAO. É importante, ainda, destacar, conforme a Fig. 6.41, que o fator de amplificação atinge uma região de estabilidade e, quando o diâmetro da restrição da turbina fica muito próximo do diâmetro da chaminé de saída do dispositivo CAO, o efeito de pistão diminui de forma

considerável. Essa análise mostra a importância de considerar o efeito de perda de carga no escoamento de ar na turbina, pois afeta diretamente o desempenho do dispositivo conversor.

Outro aspecto que, ainda, pode ser analisado, considerando o fator de amplificação, é que, quando se utiliza a Restrição A, o efeito de pistão é maior do que quando se utiliza a Restrição B, conforme apresentado na Fig. 6.42 (a) e na Fig. 6.42 (b), na forma elíptica e simétrica ao escoamento. Fato este que deve ser atribuído à simetria da Restrição 2, que causa a mesma resistência ao escoamento nos dois sentidos, diferente da Restrição 1, que fornece a maior resistência num único sentido do escoamento do ar.

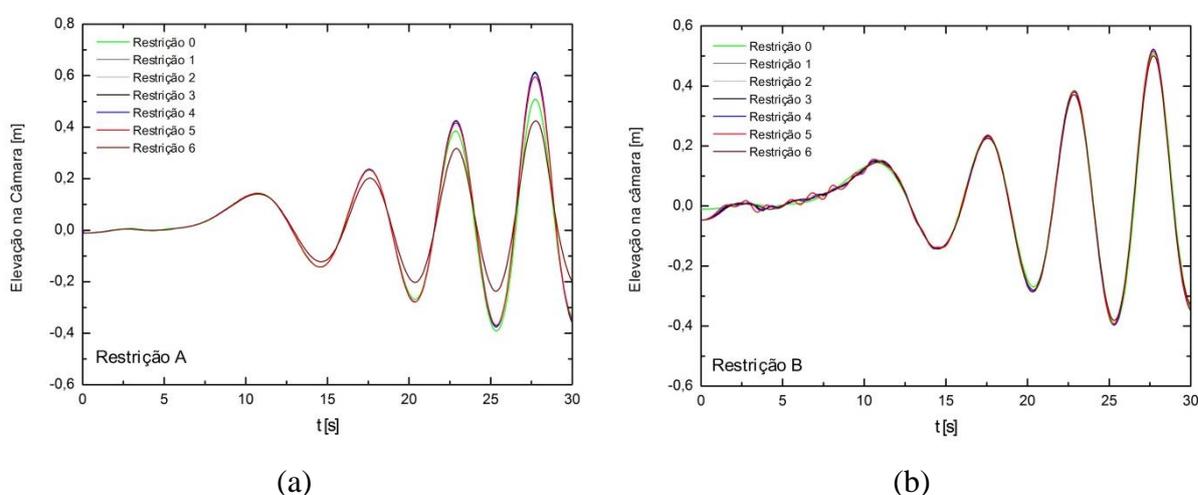


Figura 6.42 – Comportamento transiente da potência para todos os diâmetros da: (a) Restrição A, (b) Restrição B.

Sendo assim, é possível definir um diâmetro ( $d_I$ ) para a turbina que contribua significativamente para o desempenho do dispositivo CAO e, assim, projetar a mesma. Por tudo que foi discutido e apresentado, observa-se que uma variação do diâmetro da turbina pode otimizar a vazão mássica e a pressão no interior da câmara CAO. Pelos aspectos levantados, a escolha, tanto para a Restrição A, quanto a Restrição B, é pelo diâmetro  $d_I = 1,5176\text{ m}$ , caso 4 da Tab. 6.4, pois nessa situação a perda de carga da turbina é representada sem causar prejuízos ao escoamento.

Outra consideração a ser levada em conta é o projeto da turbina, uma vez que esta terá pás que precisarão se mover no interior da chaminé, entre o corpo da turbina e a parede da chaminé. Isso reforça a escolha da restrição 4, pois fazendo a diferença entre o comprimento

de saída da chaminé ( $l$ ) e o diâmetro da restrição 4 ( $d_1$ ) o resultado é 0,8 m, ou seja, aproximadamente 35 % da dimensão  $l$  livre.

Na Fig. 6.43 é possível observar qualitativamente o comportamento do campo de velocidades na direção  $y$  quando  $d_1 = 1,5176$  m para a Restrição A e a Restrição B ao longo de um período da onda incidente. É possível comparar a influência no escoamento de ar das diferentes restrições utilizadas. Por exemplo, na situação apresentada na Fig. 6.43 (a), onde se tem a fase de descompressão, observa-se um comportamento não simétrico e com recirculações de ar na chaminé de saída da câmara CAO. Por outro lado, na Fig. 6.43 (b), onde também ocorre a fase de descompressão, o escoamento de ar ocorre de forma simétrica. Para os demais casos das Fig. 6.43 (c), Fig. 6.43 (d), Fig. 6.43 (e) e Fig. 6.43 (f) ocorre o mesmo tipo de comportamento, mostrando assim o efeito que a escolha do tipo de restrição causa no funcionamento do dispositivo CAO.

São definidos três coeficientes adimensionais, para a vazão mássica, para a pressão e para a potência, respectivamente, assim como em Weber & Thomas (2001),

$$\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_a N D^3} \quad (6.7)$$

$$\psi = \frac{p}{\rho_a N^2 D^2} \quad (6.8)$$

$$\Pi = \frac{P}{\rho_a N^3 D^5} \quad (6.9)$$

onde  $P$  é a potência (W),  $p$  é a diferença de pressão (Pa),  $\dot{m}$  é a vazão mássica (Kg/s),  $\rho_a$  é a massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>),  $N$  é a velocidade de rotação da turbina wells (rad/s) e  $D$  é o diâmetro (m). Ou seja, estes coeficientes adimensionais dependem da pressão e da vazão mássica (velocidade).

Na Tab. 6.7 são apresentadas a média RMS no intervalo de tempo  $15 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$  para a pressão, vazão mássica e potência para a Restrição A. Ainda são apresentados os coeficientes adimensionais de vazão mássica, pressão e potência, calculadas pelas Eqs. (6.7), (6.8) e (6.9), respectivamente. Para o cálculo dos coeficientes adimensionais a velocidade de

rotação da turbina wells considerada é 157,1 rad/s (1500 RPM), a mesma utilizada em Weber& Thomas (2001).

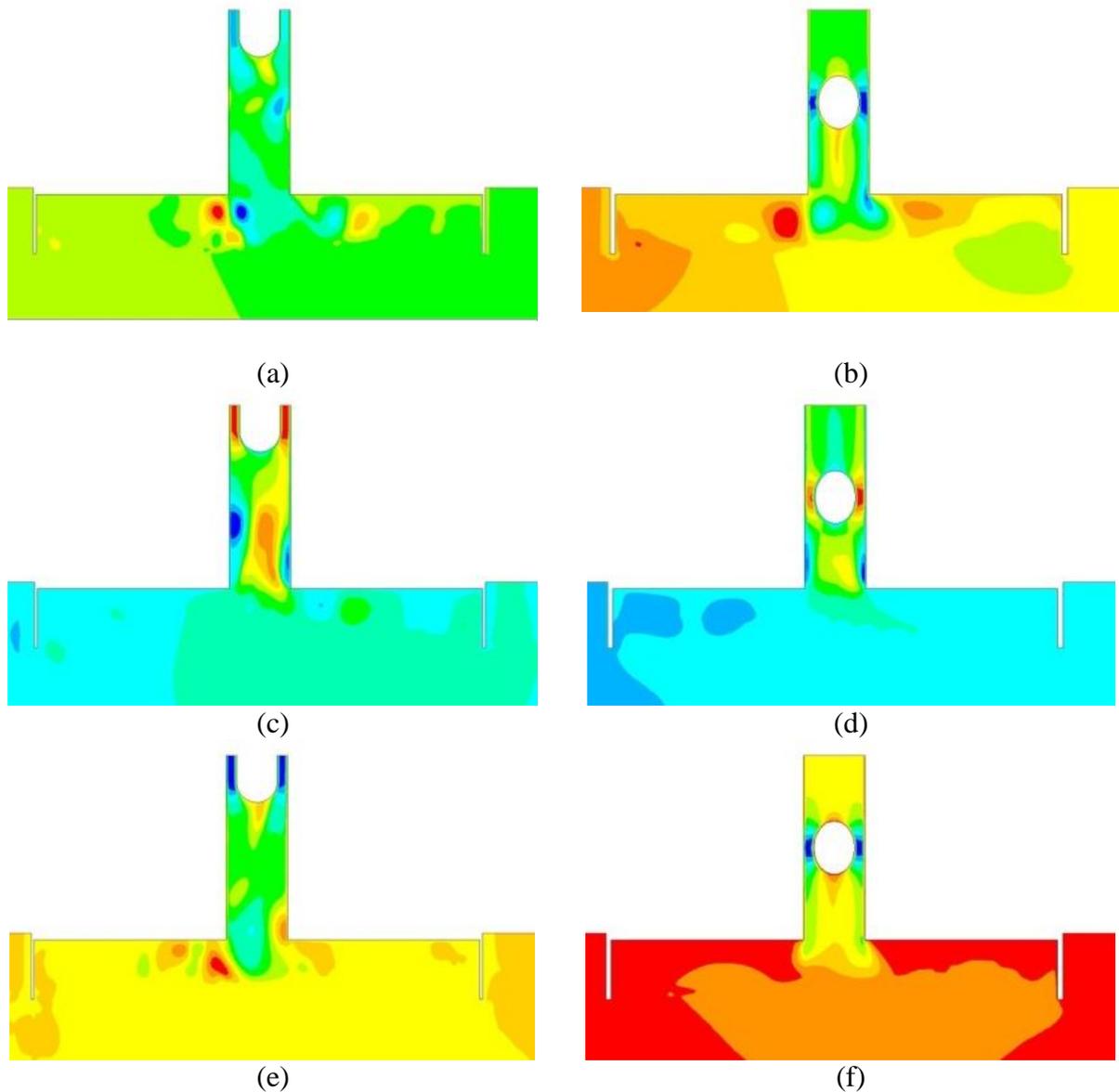


Figura 6.43. Campo de velocidades na direção  $y$  considerando o diâmetro  $d_l = 1,5176 m$ : RESTRIÇÃO 1, (a)  $T = 25s$ , (c)  $T = 27s$ , (e)  $T = 29 s$ ; RESTRIÇÃO 2 (b)  $T = 25s$ , (d)  $T = 27s$ , (f)  $T = 29s$ .

Na Tab. 6.8 são apresentadas a média RMS no intervalo de tempo  $15 s \leq t \leq 30 s$  para a pressão, vazão mássica e potência para a Restrição B. Ainda, são apresentados os

coeficientes adimensionais de vazão mássica, pressão e potência, calculadas pelas Eqs. (6.7), (6.8) e (6.9), respectivamente.

Tabela 6.7 - Resultados para a configuração geométrica submetida ao espectro de ondas –

Restrição A.

| Onda | Pressão<br>[Pa] | Vazão<br>mássica<br>[Kg/s] | Potência<br>[W] | Coeficiente do<br>fluxo de massa<br>$\phi$ | Coeficiente de<br>pressão<br>$\psi$ | Coeficiente<br>de potência<br>$\Pi$ |
|------|-----------------|----------------------------|-----------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 5    | 83,55           | 16,36                      | 415,46          | 0,0243                                     | 0,0011                              | 1,0866E-05                          |
| 6    | 82,02           | 16,81                      | 458,11          | 0,0249                                     | 0,0011                              | 1,1981E-05                          |
| 7    | 66,21           | 15,05                      | 364,07          | 0,0223                                     | 0,0009                              | 9,5221E-06                          |
| 8    | 53,85           | 13,2                       | 270,81          | 0,0196                                     | 0,0007                              | 7,0829E-06                          |
| 10   | 35,02           | 10,12                      | 144,91          | 0,0150                                     | 0,0005                              | 3,7900E-06                          |
| 11   | 28,49           | 9,10                       | 110,08          | 0,0135                                     | 0,0004                              | 2,8791E-06                          |
| 12   | 24,62           | 8,16                       | 86,84           | 0,0121                                     | 0,0003                              | 2,27127E-06                         |

Tabela 6.8 - Resultados para a configuração geométrica submetida ao espectro de ondas –

Restrição B.

| Onda | Pressão<br>[Pa] | Vazão<br>mássica<br>[Kg/s] | Potência<br>[W] | Coeficiente do<br>fluxo de massa<br>$\phi$ | Coeficiente de<br>pressão<br>$\psi$ | Coeficiente<br>de potência<br>$\Pi$ |
|------|-----------------|----------------------------|-----------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 5    | 80,82           | 15,46                      | 263,90          | 0,0229                                     | 0,0011                              | 6,9022E-06                          |
| 6    | 76,93           | 16,55                      | 283,55          | 0,0246                                     | 0,0011                              | 7,4161E-06                          |
| 7    | 60,49           | 15,04                      | 216,63          | 0,0223                                     | 0,0008                              | 5,6658E-06                          |
| 8    | 46,57           | 13,20                      | 156,24          | 0,0196                                     | 0,0006                              | 4,086E-06                           |
| 9    | 36,01           | 11,42                      | 110,61          | 0,0169                                     | 0,0005                              | 2,8929E-06                          |
| 10   | 28,99           | 10,04                      | 83,76           | 0,0149                                     | 0,0004                              | 2,1907E-06                          |
| 11   | 23,72           | 8,86                       | 65,84           | 0,0131                                     | 0,0003                              | 1,7220E-06                          |
| 12   | 20,85           | 7,97                       | 56,45           | 0,0118                                     | 0,0002                              | 1,4764E-06                          |

É possível observar, da Tab. 6.7 e Tab. 6.8, que conforme o período da onda aumenta, a pressão, a vazão mássica e a pressão diminuem assintoticamente. O mesmo fato pode ser observado em um estudo semelhante em Liu et al. (2009b).

Na Fig. 6.44 este comportamento decrescente da pressão ao longo do espectro de ondas é apresentado. Esse comportamento deixa um estudo em aberto, uma vez que aqui a configuração geométrica apresenta o melhor desempenho quando submetida à onda para a qual foi otimizada, é necessário investigar este fato para as configurações ótimas das outras ondas e verificar se este comportamento ocorrerá novamente.

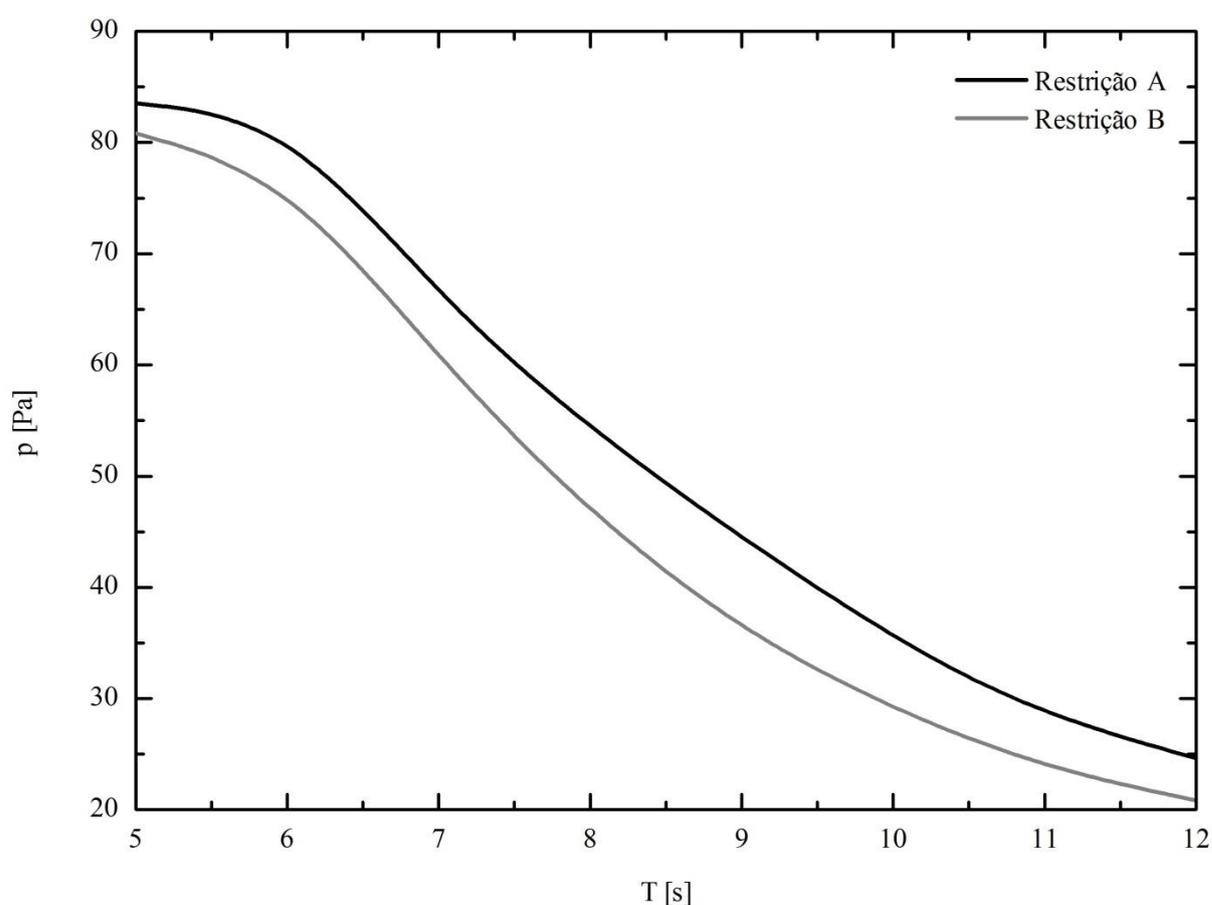


Figura 6.44 - Variação da pressão em função do período da onda.

Na Figura 6.45 apresenta-se a relação entre o coeficiente de vazão mássica pressão em função do coeficiente de pressão. Observa-se uma relação entre vazão mássica e pressão próximo do linear, característica típica de turbinas do tipo wells, Ao fazer um ajuste linear destes pontos, obtemos as seguintes equações lineares para o caso da Restrição A e Restrição B, respectivamente.

$$\Phi = 0,007509 + 14,802027 \Psi \quad (6.10)$$

$$\Phi = 0,009118 + 13,679712 \Psi \quad (6.11)$$

O erro obtido nesse ajuste é  $2,35 \times 10^{-6}$  para o ajuste da Restrição A e  $1,07 \times 10^{-5}$  para o caso da Restrição B. Verifica-se que, qualitativamente, o comportamento é semelhante ao obtido em Weber & Thomas (2001), Corvelo (2011) e Falcão & Justino (1999). Entretanto, quantitativamente, a inclinação da reta é superior. Cabe destacar que a configuração geométrica é diferente da utilizada por estes autores.

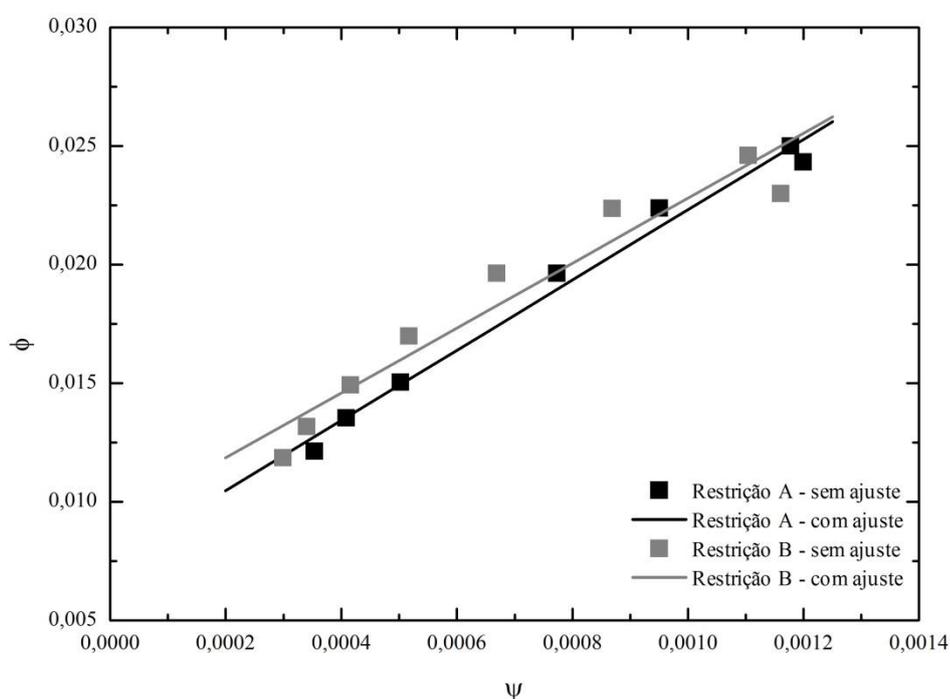


Figura 6.45 - Relação coeficiente de vazão mássica em função do coeficiente de pressão.

Outra curva que apresenta o comportamento característico da turbina wells é o coeficiente de potência em função do coeficiente de pressão, semelhante ao apresentado em Falcão & Justino (2009), que apresentam esta curva para o caso da Ilha do Pico. Na Figura 6.46 é apresentada uma curva para o coeficiente de potência em função do coeficiente de pressão. Considerando o caso da Restrição A e Restrição B, observa-se um comportamento qualitativo semelhante ao apresentado em Falcão & Justino (2009).

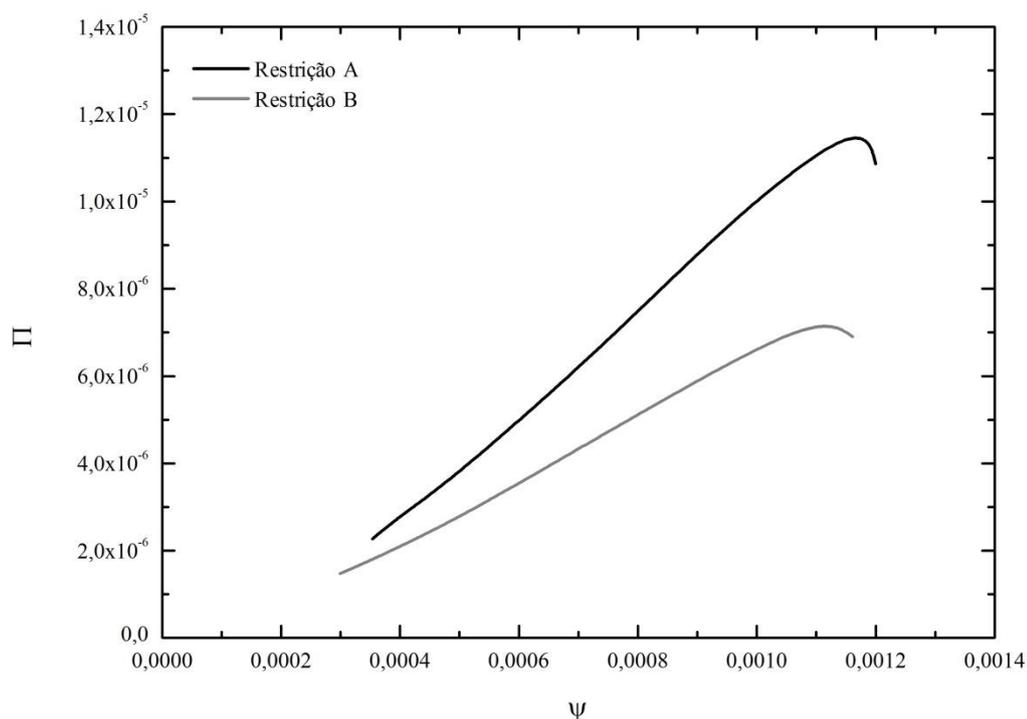


Figura 6.46 - Curva do coeficiente de potência  $\Pi$  em função do coeficiente de pressão  $\Psi$  para turbina *wells* considerando a Restrição A e a Restrição B.

Por todos estes aspectos discutidos, esta estratégia de representar a perda de carga da turbina no dispositivo CAO através de uma restrição física é relevante.

#### 6.4. Otimização de um dispositivo CAO considerando a influência da turbina

A proposta aqui é analisar numericamente o efeito da variação da geometria de uma câmara CAO, conforme o realizado em Gomes et al (2012a), e discutido no capítulo 6.2.1. Entretanto, é considerado o efeito da perda de carga da turbina, através de uma restrição física na forma de um corpo elíptico, de acordo com o discutido na seção 6.3. Dessa forma, são variados os mesmos graus de liberdade:  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) e  $H_3$  (profundidade de submersão da câmara CAO). O grau de liberdade  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantido constante. Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas para esta onda podem ser vistas na Tab. C.2 (Anexo C).

Neste estudo, foi utilizada uma restrição física na saída do dispositivo CAO, com o intuito de representar a influência da perda de carga da turbina no escoamento do ar pelo conversor. A representação esquemática da restrição elíptica pode ser observada na Fig. 6.36 (b). O corpo elíptico é posicionado no centro da chaminé de saída do dispositivo CAO e, pelo fato de ser simétrico, oferece resistência ao escoamento, tanto na etapa de compressão, quanto na de descompressão, representando, assim, o efeito da turbina de uma forma mais realística. Considerando a Fig. 6.36 (b), as dimensões da restrição física na forma de corpo elíptico são:  $d_1 = 1,5176$  m e  $d = 2$  m, ou seja, o caso 4 (Restrição B) da Tab. 6.4.

Na Fig. 6.47 é possível observar o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  são variados. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos no intervalo:  $0,05 < H_1/L < 0,20$ .

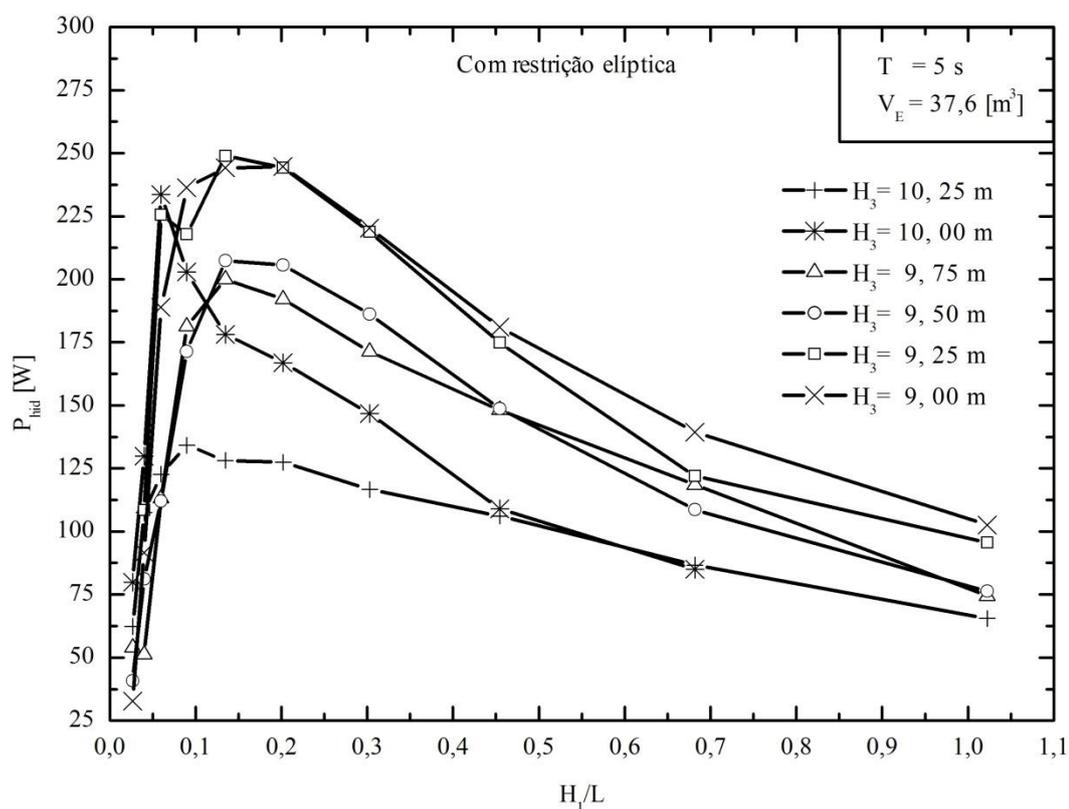


Figura 6.47 - Comportamento para a onda com  $T = 5$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  considerando uma restrição física.

Assim como o apresentado na Fig. 6.7 e discutido no capítulo 6.2.1, essa relação é equivalente a dizer que o comprimento ótimo para o comprimento de entrada da câmara CAO ( $L$ ) deve ser aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_0 \cong \lambda/2$ ) e cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,0} \cong 2H$ ). Deste modo é possível também verificar a Eq. (6.1) para a onda com período  $T = 5$  s, considerando o efeito da turbina através de um corpo elíptico.

Outra análise a ser realizada diz respeito à submersão do dispositivo CAO, o grau de liberdade  $H_3$ . Na Fig. 6.48 é apresentada uma curva para o valor máximo da média RMS da potência hidropneumática para os respectivos valores de  $H_3$ . Os resultados obtidos indicam que, em geral, quando  $H_3$  decresce, isto é, quando o dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica está mais submerso o desempenho aumenta até uma determinada profundidade, conforme é possível verificar na Fig. 6.48.

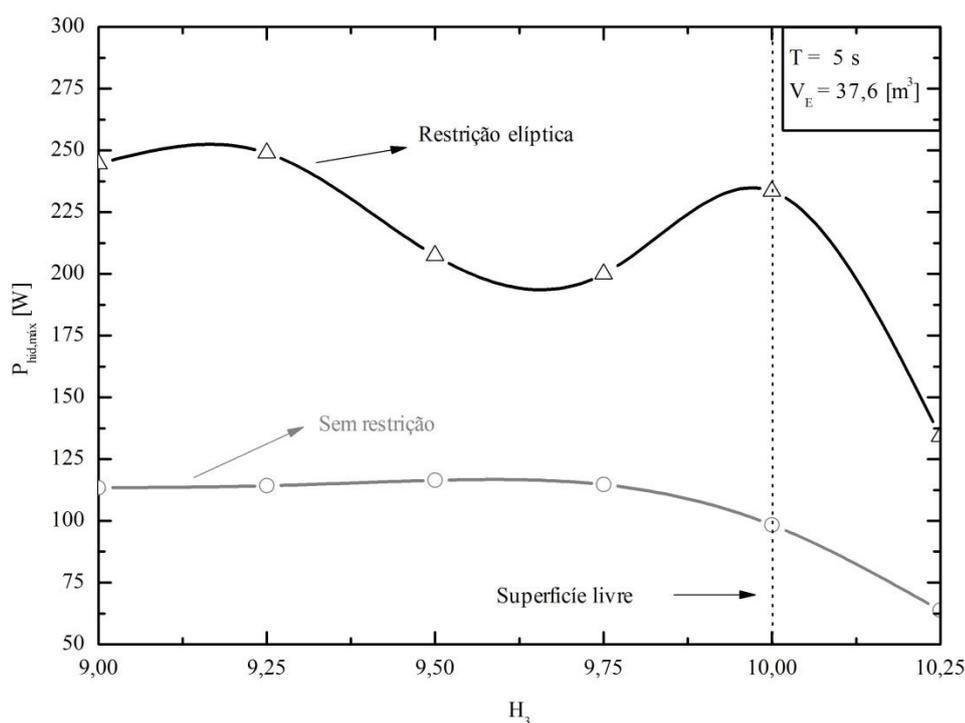


Figura 6.48 - Otimização geométrica de  $H_1/L$  em relação a  $H_3$  para  $T = 5$  s considerando uma restrição física.

Um fato importante a ser destacado da Fig. 6.48 é que o comportamento de  $H_3$  é semelhante para os casos quando não é considerada a influência da turbina no escoamento de ar e quando este fato é negligenciado. Entretanto, quando se emprega a restrição elíptica os

valores máximos RMS para a potência hidropneumática são mais elevados. Isso ocorre devido a uma maior pressurização na câmara CAO e ao aumento de velocidade na chaminé de saída do dispositivo CAO, em decorrência da restrição física.

Considerando a influência da turbina no modelo numérico, através da restrição elíptica, e os resultados apresentados na Fig. 6.47 e Fig. 6.48 a geometria ótima ocorre para  $H_3 = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,1346$ , onde a média RMS para a potência hidropneumática é igual a 249 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 29,50%. Enquanto que o pior caso ocorre quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L=0,0266$ , com a média RMS da potência hidropneumática igual a 32,71 W e a eficiência, calculada pela Eq. (5.9), é 22,72%. Verifica-se que a influência da turbina não modifica as recomendações teórico numéricas acerca da geometria ideal, obtidas no capítulo 6.2.1.

Na Fig. 6.49 apresenta-se uma comparação do comportamento transiente da pressão quando  $H_3 = 9,25$  m e  $H_1/L = 0,1346$  (melhor caso) e quando  $H_3 = 9,00$  m e  $H_1/L = 0,0266$  (pior caso). No melhor caso, ótima geometria, a distribuição de pressões é simétrica e suave, fato que deve ser levado em conta num projeto futuro da turbina de ar. Por outro lado, no pior caso, existe muita perturbação no campo de pressões, apresentando um comportamento assimétrico e instável. Um dos motivos para essa instabilidade é a descontinuidade geométrica entre a câmara CAO e o duto da chaminé da câmara CAO, medida através do parâmetro  $L/l$ .

Ao comparar os resultados apresentados na Fig. 6.49, onde a restrição na forma elíptica é empregada, com os apresentados na Fig. 6.12, onde não se considera o efeito da turbina, é possível observar um comportamento qualitativo semelhante. Entretanto, quantitativamente, percebe-se que o efeito da restrição física (vide Fig. 6.49) ocasiona uma maior pressurização na câmara CAO. No caso sem restrição (vide Fig. 6.12), tem-se que a média RMS da pressão é 28,66 Pa, para o caso geométrico ótimo, atingindo picos de 15 Pa na compressão e descompressão. Por outro lado, quando o efeito da turbina é considerado, esses valores são cerca de duas vezes mais elevados. Conforme é possível verificar na Fig. 6.49, a média RMS da pressão é 75,69 Pa, para o caso geométrico ótimo, atingindo picos de 40 Pa na compressão e descompressão.

Considerando as mesmas situações de melhor e pior caso, na Fig. 6.50 é realizada uma comparação transiente da vazão mássica na chaminé de saída do dispositivo CAO. Assim como para a pressão, o comportamento do fluxo de massa no melhor caso é simétrico e suave e tem picos maiores em relação ao pior caso.

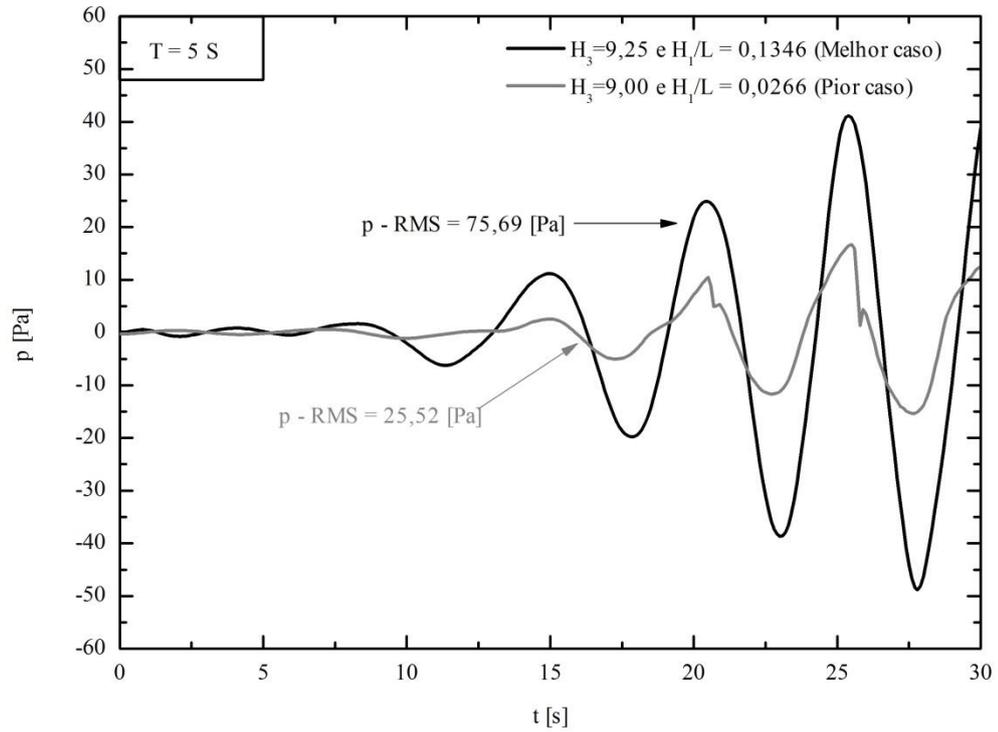


Figura 6.49 – Comportamento transiente da pressão para  $T = 5$  s considerando uma restrição física.

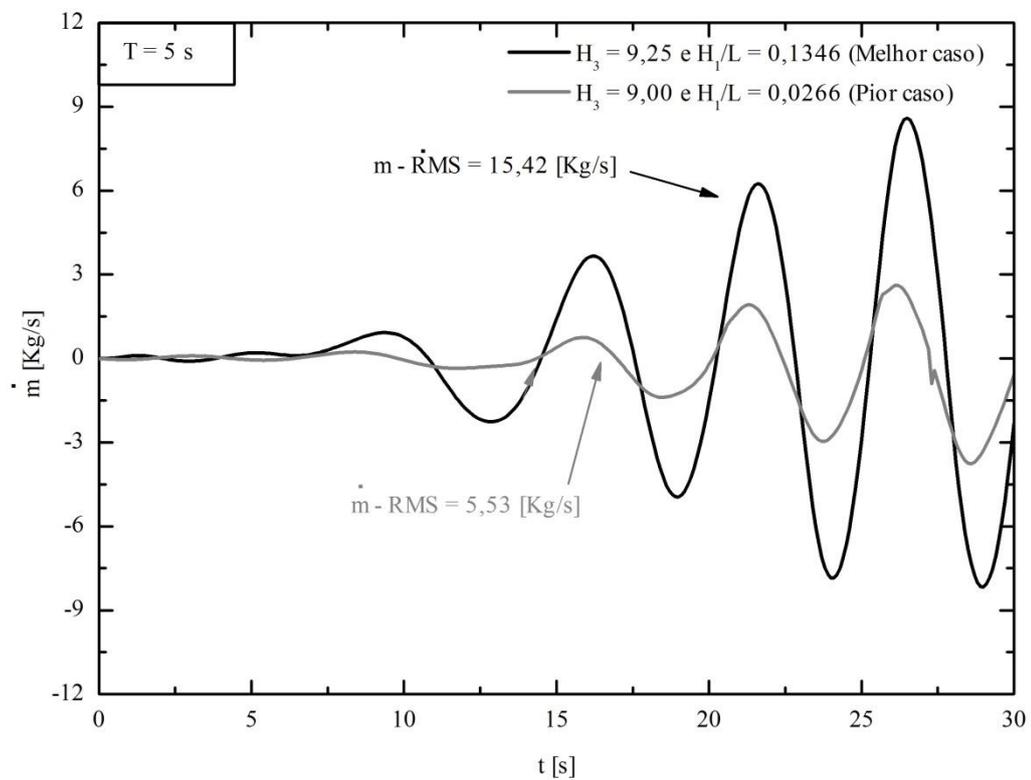


Figura 6.50 – Comportamento transiente da vazão mássica para  $T = 5$  s considerando uma restrição física.

Uma comparação quantitativa entre os resultados apresentados na Fig. 6.50 (com restrição física) com os apresentados na Fig. 6.13 indicam que, instantaneamente, quando o efeito da turbina é considerado, a vazão mássica tem valores mais elevados na compressão e na descompressão.

Considerando somente aspectos geométricos é possível otimizar o grau de liberdade  $H_1/L$ , pela segunda vez, em relação a  $H_3$ . A partir da Fig. 6.51 pode-se indicar qual relação de  $H_1/L$  utilizar, de acordo com a submersão  $H_3$ . Uma consideração importante é que abaixo da superfície livre o recomendado é a relação  $(H_1/L)_O = 0,13$ , independente da influência ou não da turbina.

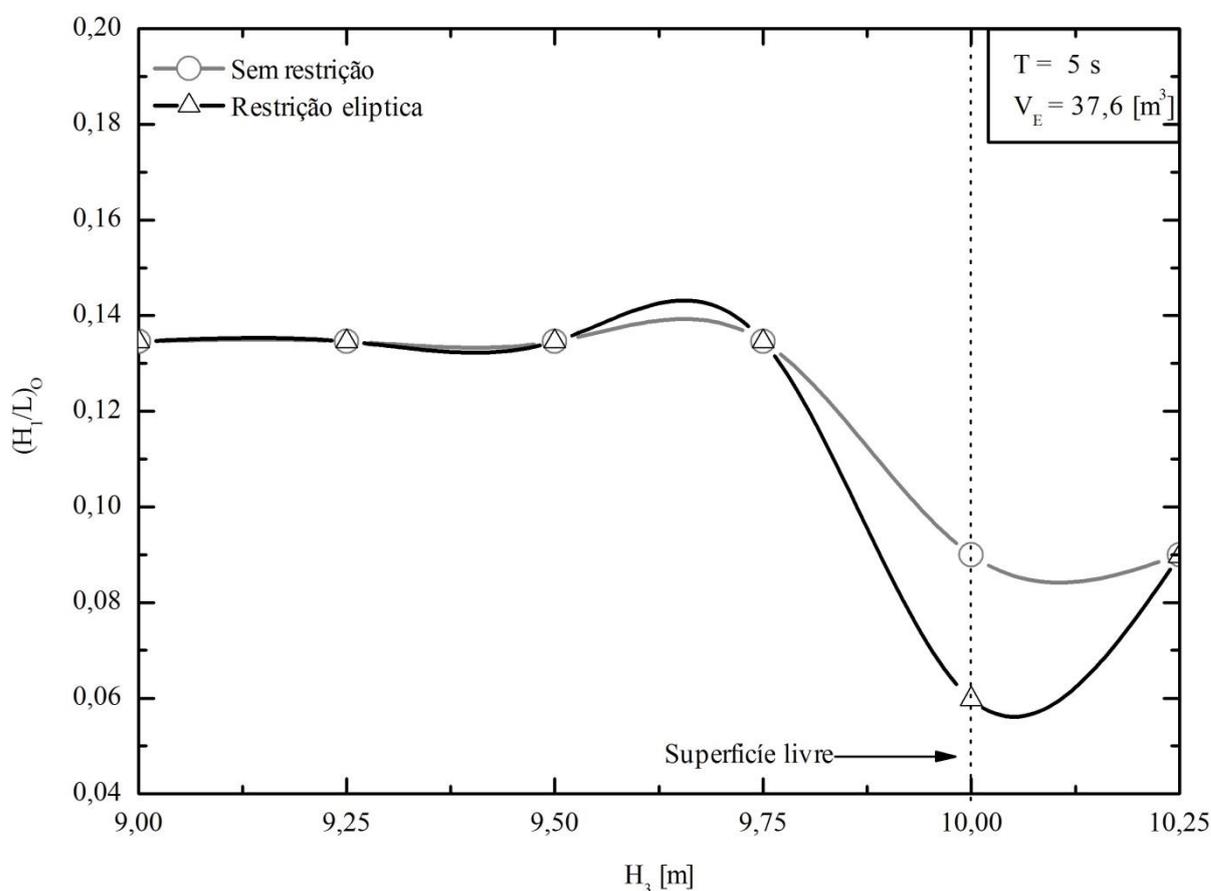


Figura 6.51 - Comportamento para a onda com  $T = 5$  s da média RMS da Potência com a variação dos graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  considerando uma restrição física.

Da Fig. 6.47 e 6.48 pode-se inferir que  $(P_{\text{hid,máx}})_{\text{máx}}$  ocorre quando  $(H_3)_O = 9,25$  m e  $(H_1/L)_{O,O} = 0,1346$ .

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo numérico de análise e otimização geométrica através de uma abordagem com *Constructal Design* de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO).

Para a modelagem computacional foi utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* que é aplicado para representar a interação entre a água e o ar, sendo que a solução numérica é obtida utilizando um código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, FLUENT®, baseado no Método de Volumes Finitos. Foi apresentada uma forma de geração de malha refinada por regiões de interesse, conhecida como malha *stretched*, que possibilita diminuir o esforço computacional nas simulações numéricas. Nesse sentido, também foi discutido um estudo sobre o avanço no tempo (*time-step*). Ainda, com o objetivo de diminuir o esforço computacional um breve estudo sobre a utilização do acelerador de convergência *Multigrid Algébrico*(AMG) foi realizado, inclusive obtendo-se uma recomendação sobre os parâmetros de suavização. Convém destacar que este tipo de análise, relacionada ao acelerador de convergência, é inédita em modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica.

Um estudo de verificação e validação do modelo numérico também foi realizado. Considerando a geração da onda a solução numérica obtida para a elevação da superfície livre foi comparada com a solução analítica indicando a eficácia do modelo numérico. Semelhantemente, comparou-se os resultados numéricos no interior da câmara CAO com resultados experimentais, obtendo-se boa concordância entre eles.

A metodologia *Constructal Design* foi aplicada no estudo de dispositivos CAO em escala de laboratório e real. Foram obtidas recomendações teóricas sobre relações geométricas de dispositivos CAO que conduzem a um melhor desempenho. Em todas as situações foi realizada a otimização geométrica de dois graus de liberdade do sistema:  $H_1/L$  (relação entre altura e comprimento da câmara CAO) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo CAO).

Considerando uma onda em escala de laboratório, as recomendações obtidas, Eq. (6.1) e Eq. (6.3), indicam que o desempenho dispositivo CAO é melhor quando o comprimento da câmara CAO ( $L$ ) é aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_o \cong \lambda/2$ ) e a altura cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,o} \cong 2H$ ).

O mesmo estudo também foi realizado considerando um clima de ondas em escala real e levando em conta um dispositivo CAO *offshore* (localizado no meio do tanque de ondas). Essa otimização foi realizada ao longo de um espectro de ondas, compreendido entre  $T= 5$  s a  $T= 12$  s e configurando, assim, uma análise realística. Foram obtidas recomendações sobre as configurações geométricas que conduzem a melhores desempenhos dos dispositivos CAO. É importante destacar que, nesse estudo, ainda não foi considerada a influência da perda de carga da turbina.

Para cada um dos períodos de onda analisados do espectro real, observou-se que as mesmas relações indicadas para a onda em escala de laboratório foram satisfeitas, Eq. (6.1) e Eq. (6.3). Na Fig. 6.40 são apresentadas correlações a serem utilizadas para que sejam determinados os valores ótimos de  $H_1/L$  em função de parâmetros da onda incidente, no caso altura ( $H$ ) e comprimento ( $\lambda$ ). Destaca-se que estes parâmetros geométricos ótimos irão contribuir para melhores desempenhos do dispositivo CAO.

Por fim, com o objetivo de tornar o modelo computacional adotado mais realístico foi realizado um estudo com o objetivo de representar o efeito da turbina no dispositivo CAO, através de restrições físicas. Considerando um corpo elíptico foi apresentado o mesmo estudo de otimização para a onda de laboratório e para o espectro de ondas real onde o efeito da turbina era desconsiderado. Deste modo, verificou-se que o efeito da turbina não altera as recomendações geométricas ótimas.

Por tudo isso, entende-se que o objetivo principal desta tese, de maximizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, considerando o princípio de coluna de água oscilante, foi atingido. Pois, com os resultados apresentados, conhecendo-se o clima de ondas de uma dada região, é possível dimensionar o dispositivo de modo que ele tenha um desempenho otimizado.

Entende-se que, como proposta de continuidade deste trabalho, alguns aspectos ainda podem ser verificados, como:

- 1) Considerar o efeito do espectro de onda real para cada uma das configurações geométricas ótimas possibilitando, assim, definir uma configuração universal e que tenha o melhor aproveitamento possível da energia da onda incidente. Ou seja, cada geometria de dispositivo CAO considerada como ótima no seu período de onda respectivo será submetida às demais ondas que compõe o espectro. Deste

modo, será possível verificar se dentre as geometrias ótimas existe alguma que possui um melhor desempenho no intervalo de períodos testados.

- 2) Aperfeiçoar a modelagem do efeito da turbina no dispositivo CAO.
- 3) Considerar estudos semelhantes variando-se a altura da onda incidente.
- 4) Considerar a otimização de outros graus de liberdade, como por exemplo,  $H_2/l$
- 5) Investigar a utilização de modelos de turbulência na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica.

Deste modo, através do emprego de *Constructal Design*, esse trabalho contribui significativamente para o projeto de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO. Pois foram obtidas as seguintes recomendações teóricas ótimas para as dimensões do dispositivo em função do clima de ondas: o comprimento da câmara CAO ( $L$ ) é aproximadamente a metade do comprimento da onda incidente ( $L_O \cong \lambda/2$ ) e a altura cerca de duas vezes a altura da onda incidente ( $H_{1,O} \cong 2 H$ ). Assim conhecendo o clima de ondas é possível definir as dimensões do dispositivo CAO de maneira otimizada.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008. “**Atlas de Energia Elétrica do Brasil**”, 3. ed., Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>.

AZAD, A. V.; AMIDPOUR, M., 2011, “ Economic optimization of shell and tube exchanger based on constructal theory”, **Energy**, vol. 36, pp. 1087-1096.

BARREIRO, T. G., 2009. “**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.

BASAK, T., 2011. “The law of life: The bridge between Physics and Biology”,**Phys Life Rev.** Vol. 8, pp. 249–252.

BAUTISTA, E. G., MÉNDEZ, F., BAUTISTA, O., 2009. “Numerical predictions of the generated work in a Air-compressiom chamber driven by a oscillating water column”, **The Open Ocean Engineering Journal**, vol. 2, pp. 7-16.

BEJAN, A. , 1997, “Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume”,**Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. 40, pp. 799–816.

BEJAN, A., 2000.“**Shape and Structure, from Engineering to Nature**”. Cambridge University Press,Cambridge, UK.

BEJAN, A., LORENTE, S., 2006, “Constructal Theory of Generation of Configuration in Nature and Engineering”. *J. Appl. Phys*, vol. 100, 041301.

BEJAN, A., LORENTE, S., 2008. "*Design with Constructal Theory*". Wiley, Hoboken.

BEJAN, A., ZANE J., 2012. "*Design in nature*". Doubleday, USA.

BEJAN, A., LORENTE, S., 2013. "Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society". **Journal of Applied Physics**, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301-20.

BEYENE, A.; PEFFLEY, J., 2009. "Constructal Theory, Adaptive Motion, and Their Theoretical Application to Low-Speed Turbine Design". **Journal of Energy Engineering**. Vol. 135, pp.112-118.

BLAZEK, J., 2001. "**Computational fluid dynamics: Principles and Applications**", Elsevier, Reino Unido, 440 p.

BORTOLI, A. L., 2000. "**Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**", Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 136p.

BOUALI, B.; LARBI, S., 2013. "Contribution to geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter". **Energy Procedi.**, V. 36, pp. 565-573.

BROSSARD, J.; PERRET, G.; BLONCE, L.; DIEDHIOU, A., 2009 "Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and submerged rectangular step in a wave flume", **Coastal Engineering**. V. 56, pp. 11-22.

CARNEIRO, M. L., 2007. "**Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas paratanque de ensaio de estruturas oceânicas**", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 116 p.

CHAKRABARTI, S. K., 2005. “**Handbook of offshore engineering**”, vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.

CARTER, R. W., 2005. **Wave Energy Converters and a Submerged Horizontal Plate**. Master Thesis, Master of Science in Ocean and Resources Engineering, University of Hawaii, Manoa, Honolulu.

CEM, 2002.**Coastal Engineering Manual**, Army Corps of Engineers. Washington, Estados Unidos.

CENTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, 2002.“**Wave Energy Utilization in Europe**”.Disponível em:<[http://wave-energy.net/Library/WaveEnergy\\_Brochure.pdf](http://wave-energy.net/Library/WaveEnergy_Brochure.pdf)>.

CONDE, J. M. P., GATO, L. M. C., 2008. “Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter”, **Renewable Energy**, vol. 33, pp. 2637-2644.

CONDE, J. M. P.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E.,2010.“**Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos**”, IV SEMENGO - Seminário e workshop de engenharia oceânica, Rio Grande.

CONDE, J. M. P.; DIDIER, E.; TEIXEIRA, P. R. F., 2011,“**Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy**”,The 21st International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE, Maui.

CORVELO, E. C. V, 2011, “**Análise e comparação do desempenho de uma central de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante equipada com turbinas de acção e**

**turbina wells**”.Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A., 2004 .“**Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos**”, Econômicos e Ambientais. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, 61 p.

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A., 1991. “**Water wave mechanics for engineers and scientists**”, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.

DEVLOO, P.R.B., 2005“**Simulação numérica -MultiCiência: A Linguagem da Ciência**”, n. 4.

DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E., 2011. “Modeling and optimization of the chambre of OWC system”.**Energy**, V. 36, pp.2360-2366.

DUARTE, C. R., 2006, “**Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 196 p.

ECHARRI, L., **Ciencias de la tierra y del medio ambiente. Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián, Universidad de Navarra.** Navarra, Espanha.  
<http://www.esi.unav.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html>

EVANS, D. V., PORTER, R., 1995. “Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device”, **Applied Ocean Research**, vol. 17, pp. 155-164.

FALCÃO, A. F. de O., JUSTINO, P. A. P., 1999. “OWC wave energy devices with air flow control”, **Ocean engineering**, vol. 26, pp. 1275-1295.

FALCÃO, A. F. de O., 2002. “Controlo of an oscillating water column wave Power plant for maximum energy production”, **Applied Ocean Research**, vol. 24, pp. 73-82.

FALCÃO, A. F. de O., 2010, “Wave energy utilization: A review of the technologies”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.V.14, pp-899-918.

FALNES, J., 2004. “**Ocean waves and oscillating system: Linear interactions including wave-energy extraction**”, Cambridge, Reino Unido, 275 p.

FLUENT 6.3, 2006. “**Documentation Manual**”. Disponível em:<<http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>>.

FERZIGER, J. H., PERIC, M., 1997. “**Computational Methods for Fluid Dynamics**”, Springer, Berlim, 423 p.

FORTUNA, A. O., 2000. “**Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações**”, Edusp, São Paulo: Edusp, 426p.

FOX, R. W; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T., 2010. “Introdução a mecânica dos fluidos”,7 ed. ,LTC,Rio de Janeiro,710p.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A. , 2009a,“**Simulação numérica 3D de um conversor de energia do tipo coluna d'água oscilante**”. XI Encontro de pós graduação - FURG, Rio Grande, p. 1-6.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A. , 2009b,“**Modelagem Computacional de um Tanque de Ondas Regulares**”. III MCSUL - Seminário Sul de Modelagem Computacional, Rio Grande, p. 112-117.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A. , 2009c,“**Modelagem Computacional de um Dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante para a Costa de Rio Grande**”. III MCSUL - Seminário Sul de Modelagem Computacional, Rio Grande, p. 118-123.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A., 2009d, “**Computational Modeling of a Regular Wave Tank**”. 3rd Southern Conference on Computational Modeling, Rio Grande, IEEE Computer Society, p. 60-65.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A., 2009e, “**Computational Modeling of an Oscillating Water Column Device for the Rio Grande Coast**”. 3rd Southern Conference on Computational Modeling, Rio Grande, IEEE Computer Society, p. 107-112.

GOMES, M. das N.; OLINTO, C. R.; ISOLDI, L. A.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O., 2009f, “ **Computational Modeling of the Air-Flow in an Oscillating Water Column System**”. 20th COBEM - International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, p. 1-10.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A., 2009g, “**Simulação Numérica e Otimização do comprimento de um dispositivo do tipo Coluna D'água Oscilante**”. 30º CILAMCE - Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, Búzios, p. 1-14.

GOMES, M. das N. ; OLINTO, C. R. ; ROCHA, L. A. O. ; SOUZA, J. A. ; ISOLDI, L. A., 2009h, “Computational modeling of a regular wave tank”. **Engenharia Térmica**, v. 8, pp. 44-50.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D. dos; SOUZA, J. A., 2009i, “Modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante para a costa de Rio Grande”. **Vetor**, v. 19, p. 58-73.

GOMES, M. das N., 2010, “**Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**”. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande.

GOMES, M. das N.; OLINTO, C. R.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D. dos; ISOLDI, L. A.. Oscillating Water Column Device Optimization based on Rio Grande City Wave Climate. IV MCSUL - Southern Conference on Computational Modeling, Rio Grande, 2010a, p. 74-79.

GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D. dos; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.. Numerical Study of the Efficiency of an Oscillating Water Column (OWC) Device. 11th PRADS - International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Rio de Janeiro, 2010b, p. 1510-1517.

GOMES, M. N., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., 2012a, **“Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques”**. In Proceedings VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2012), São Luiz.

GOMES, M. N.; NASCIMENTO, C. D.; BONAFINI, B. L.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O., 2012b, “Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter in laboratory scale”. *Engenharia Térmica*, Vol. 11, pp. 30-36.

GOMES, M. N., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., 2013a, **“Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter of real scale”**. In Proceedings 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto.

GOMES, M. N., WAESS, K. R., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., 2013b. **“Modelagem Computacional e Otimização Geométrica 2d com Constructal Design de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante em escala real – comparação onshore e offshore”**. In Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Pirenópolis, Goiás.

GOSSELIN, L.; BEJAN, A.; LORENTE, S., 2004, “Combined ‘heat flow and strength’ optimization of geometry: mechanical structures most resistant to thermal attack”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, pp.3477–3489.

HEATH, T., 2001. “**The Construction, Commissioning and Operation of the LIMPET Wave Energy Collector**”, Wavegen, Reino Unido,

HIRT, C.W., AND NICHOLS, B.D. , 1981.“Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”.**Journal of Computational Physics**, vol. 39, n. 1, pp. 201-225.

HORKO, M., 2007, “**CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter**”.Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália, 145 p.

IAHNKE, S. L. P.; GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O., 2009a,“**Energia das Ondas do Mar: Modelagem Computacional de um Dispositivo de Galgamento**”. III MCSUL - Seminário Sul de Modelagem Computacional, Rio Grande, p. 106-111.

IAHNKE, S. L. P.; GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. , 2009b,“**Energy from the Sea: Computational Modeling of an Overtopping Device**”.3rd Southern Conference on Computational Modeling, Rio Grande. IEEE Computer Society, p. 94-99.

IAHNKE, S. L. P.; GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. , 2009c,“Energia das ondas do mar: modelagem computacional de um dispositivo de galgamento”. **Vetor**, v. 19, pp. 20-36.

IAHNKE, S. L. P.; GOMES, M. das N.; SANTOS, E. D. dos; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A., , 2010,“**Modelagem Computacional de um Conversor de Energia das**

**Ondas do Mar**". IV MCSUL - Southern Conference on Computational Modeling, Rio Grande, p. 111-116.

IAHNKE, S. L. P. , 2010, "**Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para um Conversor de Galgamento**". Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande.

KIM, Y.; LORENTE, S.; BEJAN, A., 2011, " Steam generator structure: Continuous model and constructal design". International Journal of Energy Research, vol.35, pp. 336-345.

KHALIHG, A E, e ONAR, O. C, 2010, "**Energy Harvesting: Solar, Wind and Ocean Energy Conversion Systems**", Taylor & Francis, London.

LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K. , 2008a, "**Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion**". International Offshore and Polar Engineering Conference.

LIU, Z.; HYUN B.; JIN, J. , 2008b , " **Numerical prediction for overtopping performance of OWEC**". Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, v. 11, n.1, p. 35-41.

LIU Z., SHI H., HYUN B., 2009a, "**Practical design and investigation of the breakwater OWC facility in China**". Proc. 8Th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden.

LIU Z., HYUN B., HONG K., LEE Y., 2009b, "**Investigation on Integrated System of Chamber and Turbine for OWC Wave Energy Converter**". Proc. ISOPE, Osaka, Japão.

LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K. , 2011, "Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy converter". **China Ocean Eng.**, v.25, pp.169-178.

LOPES, N.; SANT'ANA, F. S. P.; GOMES, M. N.; SOUZA, J. A.; TEIXEIRA, P. R. F.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O., 2011, "**Constructal design optimization of the geometry of an oscillating water column wave energy converter (OWC-WEC)**". In Proceedings Constructal law conference, UFRGS, Porto Alegre.

LORENTE, S.; LEE, J.; BEJAN, A. , 2010 "The flow of stresses" concept: The analogy between mechanical strength and heat convection", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.53, pp. 2963–2968.

MACHADO, B.N., ZANELLA, M. M.; GOMES, M. N.; TEIXEIRA, P. R. F.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O., 2011. "**Constructal design of an overtopping wave energy converter**". In Proceedings constructal law conference, UFRGS, Porto Alegre.

MALISKA, C. R., 2004. "**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**", LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil, 453 p.

McCORMICK, M. E., 1973. "**Ocean Engineering Wave Mechanics**", John Wiley & Sons, Nova York, 179 p.

MARJANI A. EL, CASTRO F., BAHAJI M., FILALI B., 2006. "**3D Unsteady Flow Simulation in an OWC Wave Converter Plant**". ICREPQ'06. Palma de Mallorca, Spain.

MARJANI, A. E., CASTRO F., BAHAJI M., FILALI B., 2008. "Numerical modelling in wave energy conversion systems", **Energy**, vol. 33, pp. 1246-1256.

MAVRIPLIS, D. J., 1997. "Unstructured Grid Techniques". **Annual Reviews Fluid Mechanics** , Vol. 29, pp: 473-514.

MIGUEL, A. F., 2013, “Quantitative unifying theory of natural design of flow systems: emergence and evolution”, In: L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan (Eds.), *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*. Springer, New York, pp. 21-38.

MORRIS-THOMAS, M. T., IRVIN, R., THIAGARAJAN, K. P., 2005. “**The hydrodynamics efficiency of an oscillating water column**”, Proceedings of 24<sup>o</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Grécia.

NIELSEN, F. G., ANDERSEN, M., ARGYRIADIS, K., BUTTERFIELD, S., FONSECA, N., KUROIWA, T., BOULLUEC, M. LE, LIAO, S-J., TURNOCK, S. R., WAEGTER, J., 2006, “**Ocean wind and wave energy utilization**”, ISSC, Southampton.

OLIVEIRA, L., TEIXEIRA, P.R. F., SANTOS, E. D. dos, ISOLDI, L. A. 2012. “**Constructal design applied to the geometric optimization of the hydropneumatic chamber dimensions of an oscillating water column wave energy device**”, In Proceedings of the 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romania.

ORER, G.; OZDAMAR, A., 2007, “An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter”. **Renewable Energy**. V. 32, pp. 1317-1327.

PACHECO, F., 2006. “Energias renováveis, breves conceitos. Conjuntura e Planejamento”, **SEI**, Salvador, Brasil, n. 149, pp. 4-11.

PATANKAR, S. V., SPALDING, D. B., 1972, “A calculation procedure for heat mass and momentum transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows”, **International Journal of heat and mass transfer**, vol 15, pp.1787-1806.

PATANKAR, SUHAS, V., 1980, “**Numerical heat transfer and fluid flow**”, McGraw-Hill, Estados Unidos, 196 p.

PERDIGÃO, J., SARMENTO, A., 2003. “Overall-efficiency optimization in a OWC devices”, **Applied Ocean Research**, vol. 25, pp. 157-166.

RAMALHAIS, R. dos S., 2011, “**Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

ROCHA, L. A. O., LORENTE, S., BEJAN, A., 2013“**Constructal law and the unifying the principle of design**”.1 ed. ,springer-verlag.

SENTURK, U.; OZDAMAR, A., 2012, “Wave energy extraction by na oscillating water column with a gp on the fully submerged front wall”.**Applied Ocean Research**. V. 37, p. 174-182.

SUERO, R., 2010. “**Otimização de parâmetros do método multigrid algébrico para problemas difusivos bidimensionais**”. Tese de Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 168 p.

SRINIVASAN, V. SALAZAR, A.J., SAITO K., 2011,“Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology”. *Applied Mathematical Modeling*, vol. 35, n. 8, pp. 3710-3730.

SANTOS, K. G., 2008. “**Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 110 p.

SANTOS, E. D., MACHADO, B. N., ZANELLA, M. M., GOMES, M. das N., SOUZA, J. A, ISOLDI, L.A., ROCHA, L. A. O., 2014, “Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design”, *Defect and Diffusion Forum*, vol. 348, pp. 232-244.

TANNEHILL, J. C., ANDERSON, D. A., PLETCHER, R. H., 1997. “**Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**”, 2.ed., Taylor & Francis, Estados Unidos, 792 p.

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

TSENG, R. H., WU, R.-H., HUANG, C.-C, 2000, “Model study of a shoreline Wave-power system”, **Ocean Engineering**, v. 27, pp. 801-821.

TWIDELL, J., AND WEIR, T., 2006, “**Renewable Energy Resources**”, Taylor & Francis, London.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., 1999. “**An Introduction to Computational Fluid Dynamics**”, Longman, Malásia, 257 p.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., 2007, “**An Introduction to Computational Fluid Dynamics**”, Malaysia : Pearson

ZABIHIAN, F. and FUNG, A. S., 2011. “Review of marine renewable energies: case study of Iran”. **Renew. Sust.Energ.Rev.**, 15: 2461~2474.

ZHANG, Y.; ZOU, Q.P.; GREAVES, D., 2012. “Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of na oscillating water column device”. **Renewable Energy**, v.41, pp. 159-170.

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

WAVEGEN, 2011, in: [http://www.wavegen.co.uk/what\\_we\\_offer\\_limpet\\_islay.htm](http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_islay.htm).

WAVE ENERGY CENTER, 2011, in: <http://www.pico-owc.net/>

WEBER, J. W., THOMAS, G. P., 2001, “**An investigation into the importance of the air chamber design of an oscillating water column wave energy device**”, ISOPE 2001, Staranger, Norway.

## ANEXO A – UDF para ageração de uma onda no FLUENT com perfil de velocidades linear

```
#include "udf.h"

/*Definição das constantes, Propriedades da Onda e Variáveis do domínio*/

DEFINE_PROFILE(x_velocity,thread,position)
{
real PI=3.14159265; /*constant*/
real GRAV=9.81;
real H=1; /*wave height*/
real D=10; /*waterdepth*/
real T=5; /*wave período*/
real L=37.6; /*wave lenght*/

real x[ND_ND]; /*this will hold the position vector */
real y;
real AA,BB,CC,DD,EE,FF,GG,LL,ZZ,k; /*y=position vector,AA,BB, etc are temporary
stores*/
face_t f;

begin_f_loop(f,thread)
{
real t=RP_Get_Real("flow-time");
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
ZZ=y-D;
k=2*PI/L;
AA=cosh(k*(ZZ+D));
BB=cosh(k*D);
DD=cos(PI/2.0-2.0*PI*(t/T));

/* this defines the wave height (LL) at time=y */

LL=D+(H*DD/2.0);
if(y<=D) /*this defines the profile below water level=D */

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*AA*DD/BB;

else if(y<=LL) /*this stretches the velocity above mean water level */

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*BB*DD/BB;
else /*this sets the velocity above the wave height to zero*/

F_PROFILE(f,thread,position)=0;
```

```

}
end_f_loop(f,thread)
}

DEFINE_PROFILE(y_velocity,thread,position)
{
real PI=3.14159265; /*constant*/
real GRAV=9.81;
real H=1; /*wave height*/
real D=10; /*waterdepth*/
real T=5; /*wave period*/
real L=37.6; /*wave lenght*/
real x[ND_ND]; /*this will hold the position vector */
real y;
real k,MM,NN,OO,PP,FF,QQ,RR,SS,TT,UU,VV,WW,ZZZ; /*y=position vector,AA,BB, etc
are temporary stores*/

face_t f;

begin_f_loop(f,thread)
{

real t=RP_Get_Real("flow-time");
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
ZZZ=y-D;
k=2*PI/L;

NN=cosh(k*D);
OO=cos(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));

VV=sin(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));

RR=sinh(k*D);

PP=D+(H*OO/2.0);

if(y<=D)

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*RR*VV/NN;

else
F_PROFILE(f,thread,position)=0;
}
end_f_loop(f,thread)
}

```



pré-processamento é necessário representar o domínio computacional, informar as condições de contorno e também discretizar o domínio (geração da malha). Para tanto, é utilizado um código com a extensão .jou, que ao ser executado no software GAMBIT<sup>®</sup> (gerador de malhas), realiza esta etapa por completo, gerando a malha (arquivo com extensão msh) automaticamente. Para a etapa de processamento, que ocorre no software FLUENT<sup>®</sup> (Código de Dinâmica dos Fluidos Computacional), é utilizado um segundo arquivo que contém um script que ajusta os parâmetros para a simulação numérica e os executa de uma só vez. Ao final de cada caso simulado são gerados arquivos de dados para posterior análise (Pós-processamento). Com a utilização da metodologia .jou, as etapas de Pré Processamento e Processamento da simulação numérica tornam-se mais rápidas, e propiciam estudos de otimização que envolvem muitas simulações.

Esta metodologia também pode ser empregada em estudos relacionados a outros tipos de problemas.

### ANEXO C – Dimensões das configurações geométricas simuladas

Nas tabelas a seguir são apresentadas as dimensões geométricas dos dispositivos CAO analisados ao longo deste trabalho. As dimensões são calculadas com as Eqs. (3.1-3.6).

Tabela C.1 - Variações da geometria do dispositivo CAO em escala de laboratório.

| Caso | $H_1/L$ | $L$ [m] | $H_1$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] |
|------|---------|---------|-----------|---------|-----------|
| 1    | 0,14    | 1,0000  | 0,1400    | 0,1414  | 0,4242    |
| 2    | 0,28    | 0,7071  | 0,1979    | 0,1414  | 0,4242    |
| 3    | 0,42    | 0,5773  | 0,2424    | 0,1414  | 0,4242    |
| 4    | 0,56    | 0,5000  | 0,2800    | 0,1414  | 0,4242    |
| 5    | 0,70    | 0,4472  | 0,3130    | 0,1414  | 0,4242    |
| 6    | 0,84    | 0,4082  | 0,3429    | 0,1414  | 0,4242    |
| 7    | 0,98    | 0,3779  | 0,3704    | 0,1414  | 0,4242    |
| 8    | 1,26    | 0,3333  | 0,4200    | 0,1414  | 0,4242    |
| 9    | 2,24    | 0,2500  | 0,5600    | 0,1414  | 0,4242    |

Tabela C.2. Variações da geometria para  $T = 5s$  e  $V_E = 37,5 m^3$ .

| Caso | $H_1/L$ | $L$ [m] | $H_1$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0266  | 37,5969 | 1,0000    | 2,3176  | 6,9529    | 0,9999      | 16,2223 |
| 2    | 0,0399  | 30,6978 | 1,2248    | 2,3176  | 6,9529    | 0,8164      | 13,2455 |
| 3    | 0,0598  | 25,0646 | 1,5001    | 2,3176  | 6,9529    | 0,6666      | 10,8149 |
| 4    | 0,0897  | 20,4652 | 1,8372    | 2,3176  | 6,9529    | 0,5442      | 8,8303  |
| 5    | 0,1346  | 16,7097 | 2,2501    | 2,3176  | 6,9529    | 0,4444      | 7,2099  |
| 6    | 0,2019  | 13,6434 | 2,7558    | 2,3176  | 6,9529    | 0,3628      | 5,8869  |
| 7    | 0,3029  | 11,1398 | 3,3752    | 2,3176  | 6,9529    | 0,2962      | 4,8066  |
| 8    | 0,4544  | 9,09564 | 4,1338    | 2,3176  | 6,9529    | 0,2419      | 3,9246  |
| 9    | 0,6817  | 7,42656 | 5,0629    | 2,3176  | 6,9529    | 0,1975      | 3,2044  |
| 10   | 1,0225  | 6,06376 | 6,2007    | 2,3176  | 6,9529    | 0,1612      | 2,6164  |

Tabela C.3 - Variações da geometria para  $T = 6$  s e  $V_E = 48,5$   $m^3$ .

| Caso | $H_1/L$ | $L$ [m] | $H_1$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0206  | 48,5007 | 1,0000    | 2,6322  | 7,8967    | 1,0000      | 18,4259 |
| 2    | 0,0309  | 39,6006 | 1,2247    | 2,6322  | 7,8967    | 0,8164      | 15,0447 |
| 3    | 0,0464  | 32,3338 | 1,5000    | 2,6322  | 7,8967    | 0,6666      | 12,2839 |
| 4    | 0,0696  | 26,4004 | 1,8371    | 2,6322  | 7,8967    | 0,5442      | 10,0298 |
| 5    | 0,1044  | 21,5558 | 2,2500    | 2,6322  | 7,8967    | 0,4444      | 8,1893  |
| 6    | 0,1566  | 17,6003 | 2,7556    | 2,6322  | 7,8967    | 0,3628      | 6,6865  |
| 7    | 0,2349  | 14,3706 | 3,3750    | 2,6322  | 7,8967    | 0,2962      | 5,4595  |
| 8    | 0,3523  | 11,7335 | 4,1335    | 2,6322  | 7,8967    | 0,2419      | 4,4577  |
| 9    | 0,5284  | 9,5804  | 5,0624    | 2,6322  | 7,8967    | 0,1975      | 3,6397  |
| 10   | 0,7926  | 7,8223  | 6,2002    | 2,6322  | 7,8967    | 0,1612      | 2,9718  |

Tabela C.4 - Variações da geometria para  $T = 7$  s e  $V_E = 60$   $m^3$ .

| Caso | $H_1/L$ | $L$ [m] | $H_1$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0167  | 60,0000 | 1,0000    | 2,9277  | 8,7831    | 1,0000      | 20,4939 |
| 2    | 0,0250  | 48,9898 | 1,2247    | 2,9277  | 8,7831    | 0,8164      | 16,7333 |
| 3    | 0,0375  | 40,0000 | 1,5000    | 2,9277  | 8,7831    | 0,6666      | 13,6626 |
| 4    | 0,0562  | 32,6599 | 1,8371    | 2,9277  | 8,7831    | 0,5442      | 11,1555 |
| 5    | 0,0844  | 26,6667 | 2,2500    | 2,9277  | 8,7831    | 0,4444      | 9,1085  |
| 6    | 0,1266  | 21,7732 | 2,7557    | 2,9277  | 8,7831    | 0,3628      | 7,4369  |
| 7    | 0,1898  | 17,7778 | 3,3750    | 2,9277  | 8,7831    | 0,2962      | 6,0723  |
| 8    | 0,2848  | 14,5155 | 4,1335    | 2,9277  | 8,7831    | 0,2419      | 4,9582  |
| 9    | 0,4271  | 11,8519 | 5,0625    | 2,9277  | 8,7831    | 0,1975      | 4,0482  |
| 10   | 0,6407  | 9,6770  | 6,2003    | 2,9277  | 8,7831    | 0,1612      | 3,3053  |

Tabela C.5 - Variações da geometria para  $T = 8$  s e  $V_E = 71 m^3$ .

| Caso | $H_I/L$ | $L$ [m] | $H_I$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0141  | 71,0000 | 1,0000    | 3,1848  | 9,5544    | 1,0000      | 22,2934 |
| 2    | 0,0211  | 57,9713 | 1,2247    | 3,1848  | 9,5544    | 0,8164      | 18,2024 |
| 3    | 0,0317  | 47,3333 | 1,5000    | 3,1848  | 9,5544    | 0,6666      | 14,8622 |
| 4    | 0,0475  | 38,6475 | 1,8371    | 3,1848  | 9,5544    | 0,5442      | 12,1351 |
| 5    | 0,0713  | 31,5556 | 2,2500    | 3,1848  | 9,5544    | 0,4444      | 9,9083  |
| 6    | 0,1070  | 25,7650 | 2,7557    | 3,1848  | 9,5544    | 0,3628      | 8,0900  |
| 7    | 0,1604  | 21,0370 | 3,3750    | 3,1848  | 9,5544    | 0,2962      | 6,6054  |
| 8    | 0,2406  | 17,1767 | 4,1335    | 3,1848  | 9,5544    | 0,2419      | 5,3934  |
| 9    | 0,3610  | 14,0247 | 5,0625    | 3,1848  | 9,5544    | 0,1975      | 4,4037  |
| 10   | 0,5415  | 11,4511 | 6,2003    | 3,1848  | 9,5544    | 0,1612      | 3,5955  |

Tabela C.6- Variações da geometria para  $T = 9$  s e  $V_E = 81,8 m^3$ .

| Caso | $H_I/L$ | $L$ [m] | $H_I$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0122  | 81,8000 | 1,0000    | 3,4184  | 10,2553   | 1,0000      | 23,9293 |
| 2    | 0,0183  | 66,7894 | 1,2247    | 3,4184  | 10,2553   | 0,8164      | 19,5382 |
| 3    | 0,0275  | 54,5333 | 1,5000    | 3,4184  | 10,2553   | 0,6666      | 15,9529 |
| 4    | 0,0413  | 44,5263 | 1,8371    | 3,4184  | 10,2553   | 0,5442      | 13,0255 |
| 5    | 0,0619  | 36,3556 | 2,2500    | 3,4184  | 10,2553   | 0,4444      | 10,6353 |
| 6    | 0,0928  | 29,6842 | 2,7557    | 3,4184  | 10,2553   | 0,3628      | 8,6837  |
| 7    | 0,1392  | 24,2370 | 3,3750    | 3,4184  | 10,2553   | 0,2962      | 7,0902  |
| 8    | 0,2089  | 19,7895 | 4,1335    | 3,4184  | 10,2553   | 0,2419      | 5,7891  |
| 9    | 0,3133  | 16,1580 | 5,0625    | 3,4184  | 10,2553   | 0,1975      | 4,7268  |
| 10   | 0,4700  | 13,1930 | 6,2003    | 3,4184  | 10,2553   | 0,1612      | 3,8594  |

Tabela C.7 - Variações da geometria para  $T = 11$  s e  $V_E = 103$  m<sup>3</sup>.

| Caso | $H_I/L$ | $L$ [m]  | $H_I$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|----------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0097  | 103,0000 | 1,0000    | 3,8359  | 11,5078   | 1,0000      | 26,8516 |
| 2    | 0,0146  | 84,0991  | 1,2247    | 3,8359  | 11,5078   | 0,8164      | 21,9242 |
| 3    | 0,0218  | 68,6667  | 1,5000    | 3,8359  | 11,5078   | 0,6666      | 17,9011 |
| 4    | 0,0328  | 56,0661  | 1,8371    | 3,8359  | 11,5078   | 0,5442      | 14,6162 |
| 5    | 0,0492  | 45,7778  | 2,2500    | 3,8359  | 11,5078   | 0,4444      | 11,9340 |
| 6    | 0,0737  | 37,3774  | 2,7557    | 3,8359  | 11,5078   | 0,3628      | 9,7441  |
| 7    | 0,1106  | 30,5185  | 3,3750    | 3,8359  | 11,5078   | 0,2962      | 7,9560  |
| 8    | 0,1659  | 24,9183  | 4,1335    | 3,8359  | 11,5078   | 0,2419      | 6,4961  |
| 9    | 0,2488  | 20,3457  | 5,0625    | 3,8359  | 11,5078   | 0,1975      | 5,3040  |
| 10   | 0,3732  | 16,6122  | 6,2003    | 3,8359  | 11,5078   | 0,1612      | 4,3307  |

Tabela C.8 - Variações da geometria para  $T = 12$  s e  $V_E = 113,3$  m<sup>3</sup>.

| Caso | $H_I/L$ | $L$ [m]  | $H_I$ [m] | $l$ [m] | $H_2$ [m] | $L/\lambda$ | $L/l$   |
|------|---------|----------|-----------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1    | 0,0088  | 113,3000 | 1,0000    | 4,0231  | 12,0694   | 1,0000      | 28,1624 |
| 2    | 0,0132  | 92,5091  | 1,2247    | 4,0231  | 12,0694   | 0,8164      | 22,9945 |
| 3    | 0,0199  | 75,5333  | 1,5000    | 4,0231  | 12,0694   | 0,6666      | 18,7748 |
| 4    | 0,0298  | 61,6727  | 1,8371    | 4,0231  | 12,0694   | 0,5442      | 15,3297 |
| 5    | 0,0447  | 50,3556  | 2,2500    | 4,0231  | 12,0694   | 0,4444      | 12,5167 |
| 6    | 0,0670  | 41,1151  | 2,7557    | 4,0231  | 12,0694   | 0,3628      | 10,2197 |
| 7    | 0,1005  | 33,5704  | 3,3750    | 4,0231  | 12,0694   | 0,2962      | 8,3443  |
| 8    | 0,1508  | 27,4101  | 4,1335    | 4,0231  | 12,0694   | 0,2419      | 6,8132  |
| 9    | 0,2262  | 22,3802  | 5,0625    | 4,0231  | 12,0694   | 0,1975      | 5,5629  |
| 10   | 0,3393  | 18,2734  | 6,2003    | 4,0231  | 12,0694   | 0,1612      | 4,5420  |