

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

APLICAÇÃO DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL NA AVALIAÇÃO NUMÉRICA
DA POTÊNCIA HIDROPNEUMÁTICA DE UM DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA
OSCILANTE COM REGIÃO DE TRANSIÇÃO TRAPEZOIDAL OU SEMICIRCULAR E
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TURBINA NO FORMATO ELÍPTICO

por

Yuri Theodoro Barbosa de Lima

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 14 de Dezembro de 2016.

APLICAÇÃO DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL NA AVALIAÇÃO NUMÉRICA
DA POTÊNCIA HIDROPNEUMÁTICA DE UM DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA
OSCILANTE COM REGIÃO DE TRANSIÇÃO TRAPEZOIDAL OU SEMICIRCULAR E
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TURBINA NO FORMATO ELÍPTICO

por

Yuri Theodoro Barbosa de Lima

Matemático

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Aprovada por:

Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Endres, IPH/UFRGS

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes, IFPR

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 14 de Dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jorge e Terezinha, pelo exemplo de conduta que sempre me deram desde a infância e pelo apoio dado em toda essa jornada, pois sem eles não seria possível.

Aos meus amigos de longa data Antônio, Affonso, Lucas, João, Douglas e Nilson que desde o início ouvem minhas explicações sobre energia das ondas atentamente e tentam entender o que eu estudo. Muito obrigado pelo apoio pessoal.

Aos meus amigos que fiz durante essa etapa de estudos Tiago, Andrés, Luciano, Aline, Gustavo, Roberta, Emanuel, Flávio, André e todos outros que comigo dividiram as alegrias e aflições de todas disciplinas e prazos.

Ao meu orientador, o professor Luiz Alberto Oliveira Rocha, pelo apoio e confiança que depositou em mim e por toda a ajuda que me deu neste período. Um grande exemplo de pesquisador e pessoa.

Ao professor Mateus das Neves Gomes por todo apoio e ajuda dados para a execução da dissertação e de todos trabalhos feitos em parceria, sendo para mim um grande exemplo de pesquisador e pessoa.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) e ao CNPq pelo suporte financeiro.

RESUMO

A conversão da energia das ondas dos oceanos em energia elétrica é uma alternativa para o problema da falta de combustíveis fósseis. Uma das possibilidades de aproveitamento é através de dispositivos cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO). No presente trabalho o objetivo é, através da modelagem computacional e do emprego do Design Construtal, maximizar a potência hidropneumática de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo CAO. São analisados diferentes eixos da restrição física, no formato elíptico, que representa a turbina, e duas formas geométricas na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO: trapezoidal e semicircular. Considerando um domínio bidimensional, as restrições para estes problemas são: Área da restrição elíptica (A_R), Área total do dispositivo (A_T) e razão entre a área da restrição elíptica e a área total (ϕ_n). Os graus de liberdade analisados são: a razão entre os comprimentos dos eixos da restrição elíptica (d_1/d_2) para o caso da restrição física da turbina, o ângulo de inclinação da parede (α) para o caso com região de transição trapezoidal, o raio (r) e H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) para o caso com região de transição semicircular. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, FLUENT[®], baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). 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 um dispositivo CAO acoplado. Os resultados obtidos indicam que, para o estudo da região de transição trapezoidal o desempenho do conversor tem aproximadamente o mesmo desempenho para todas as geometrias estudadas. A região de transição semicircular, apresenta resultados para os quais foi possível otimizar a potência hidropneumática. O estudo da turbina indica que foi possível determinar uma geometria capaz de converter a energia da onda incidente ao dispositivo, sem que ocorresse a obstrução do escoamento de ar na chaminé do dispositivo CAO. Assim, mostra-se a relação entre o método Design Construtal e o clima de ondas na definição das dimensões que maximizam a potência hidropneumática.

Palavras-chave: Design Construtal; Coluna de Água Oscilante (CAO); Regiões de Transição trapezoidal e semicircular; Restrição Elíptica; Otimização Geométrica.

ABSTRACT

The conversion of ocean's wave energy into electrical energy is an alternative for the scarcity of fossil fuels. One of the possibilities of energy use is through devices, whose operating principle is the Oscillating Water Column (OWC). In this work the aim is, through computer modeling and the Constructal Design, to maximize hydropneumatic power of a power converter device type OWC. Different axes of physical constraint with elliptical shape, representing the effect of the turbine, are analyzed. Two geometric shapes in the transition region between the hydropneumatic chamber and the chimney OWC device, trapezoidal and semicircular, are also analyzed. Considering a two-dimensional domain the restrictions for this problem are: Elliptical restriction area (A_R), Total area device (A_T) and the ratio between the area of the elliptical restraint and the total area (ϕ_n). The considered degrees of freedom are: the ratio between the lengths of the axes (d_1/d_2) of the elliptical restraint, for the turbine's physical constraint case, the inclination angle (α) of the wall for the trapezoidal transition case, and the radius (r) and H_2/l (ratio between height and length of output chimney CAO) for the semicircular transition region case. For the numerical solution, a commercial code of computational fluid dynamics, FLUENT[®], which is based on the Finite Volume Method (FVM), is employed. The multiphase model Volume of Fluid (VOF) is applied in the treatment of water-air interaction. The computational domain is represented by a wave tank with a fixed OWC device. The obtained results indicate that, for the study of the trapezoidal transition region, the performance of converter don't seems to be compensatory only by changing the geometry of the trapezoidal area. However, for the semicircular transition region, it was possible to optimize a hydropneumatic power. The study of turbine effect indicates a geometry capable of converting the energy of the incident wave to the device, without obstructing the air flow in the chimney of de OWC, showing the relationship between the Constructal Design method and the wave climate in the definition of the dimensions that maximize the hydropneumatic power.

Keywords: Constructal Design; Oscillating Water Column (OWC); Trapezoidal and Semicircular Transition Region; Elliptical Restriction; Geometric Optimization.

ÍNDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Motivação | 1 |
| 1.2 | Proposta do trabalho e objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Organização do trabalho | 4 |
| 2 | ENERGIA NOS OCEANOS..... | 6 |
| 2.1 | A Energia das Ondas do Mar..... | 6 |
| 2.2 | Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas..... | 8 |
| 2.3 | Conversor do Tipo Coluna de Água Oscilante | 11 |
| 2.4 | A Turbina Wells | 15 |
| 2.5 | Energia das Ondas no Brasil..... | 17 |
| 3 | TEORIA DE ONDAS | 20 |
| 3.1 | Teoria Linear de Ondas | 25 |
| 3.2 | Teoria não Linear de Ondas ou Ondas de 2ª Ordem de Stokes..... | 29 |
| 4 | DESIGN CONSTRUTAL E APLICAÇÕES AOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR..... | 31 |
| 4.1 | Aplicações do Design Construtal..... | 32 |
| 4.2 | Design Construtal Aplicado a Conversores de Energia das Ondas do Mar | 34 |
| 4.3 | Formulação Matemática com Design Construtal para Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo CAO..... | 40 |
| 5 | MODELO COMPUTACIONAL | 43 |
| 5.1 | Método dos Volumes Finitos..... | 45 |
| 5.2 | Método <i>Volume of Fluid</i> (VOF) | 47 |
| 5.3 | Domínio Computacional..... | 51 |
| 5.4 | Condições de Contorno..... | 52 |
| 5.5 | Geração e Discretização da Malha | 53 |
| 5.6 | Parâmetros de Solução..... | 58 |
| 5.6.1. | Solução do Sistema de Equações | 59 |
| 5.6.2. | Função de Interpolação | 60 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.6.3. | Esquema de Discretização | 60 |
| 5.6.4. | Avaliação do Gradiente..... | 61 |
| 5.6.5. | Acoplamento Pressão-Velocidade | 62 |
| 5.6.6. | Discretização temporal..... | 63 |
| 5.7 | Linhas e Pontos de Monitoramento | 64 |
| 5.8 | Verificação e Validação do Modelo Numérico | 69 |
| 5.9 | Análise dos Graus de Liberdade | 71 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 74 |
| 6.1 | Caso com Região de Transição Trapezoidal | 74 |
| 6.2 | Caso com Região de Transição Semicircular | 79 |
| 6.3 | Caso com Obstrução Elíptica na Chaminé do Dispositivo | 83 |
| 6.4 | Resultados de $\phi = 0,0093$ | 85 |
| 6.5 | Comparação dos resultados com melhor desempenho | 91 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 94 |
| 7.1 | Propostas de continuidade do trabalho | 96 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |
| | APÊNDICE A..... | 107 |
| | APÊNDICE B..... | 110 |
| | ANEXO A..... | 115 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1 | Potência anual em kW/m de frente de onda..... | 8 |
| Figura 2.2 | Localização dos dispositivos em relação à costa. | 9 |
| Figura 2.3 | Princípio de funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas(aquaret). | 10 |
| Figura 2.4 | Representação do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante para diferentes regiões de transição..... | 13 |
| Figura 2.5 | Projeto de dispositivo CAO da Ilha de Pico. | 14 |
| Figura 2.6 | Projeto de dispositivo CAO do LIMPET. | 14 |
| Figura 2.7 | Projeto de dispositivo: CAO Migthy Whale (a), Japão e CAO Energetech, Austrália (b). | 15 |
| Figura 2.8 | Sistema de funcionamento da Turbina Wells..... | 16 |
| Figura 2.9 | Turbina: Central de Pico (a) e Central de Limpet (b). | 16 |
| Figura 2.10 | Dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica..... | 18 |
| Figura 2.11 | Usina de ondas no Porto de Pecém. | 18 |
| Figura 2.12 | Dispositivo que será instalado no Rio de Janeiro, Brasil. | 19 |
| Figura 2.13 | Funcionamento do dispositivo. | 19 |
| Figura 3.1 | Ilustração da formação de ondas numa certa região como resultado dos processos de interações e superposições | 21 |
| Figura 3.2 | Características da onda..... | 22 |
| Figura 3.3 | Comparação entre uma onda de primeira e segunda ordem. | 23 |
| Figura 3.4 | Aplicabilidade das teorias de ondas. | 24 |
| Figura 4.1 | Domínio bidimensional do dispositivo CAO com uma restrição em formato elíptico simulando a turbina. | 35 |
| Figura 4.2 | Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição trapezoidal sem restrição na chaminé do dispositivo.. | 37 |
| Figura 4.3 | Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição semicircular sem restrição na chaminé do dispositivo | 37 |
| Figura 5.1 | Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume | 49 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 5.2 | Representação da interface pelo esquema de reconstrução geométrica..... | 51 |
| Figura 5.3 | Discretização do domínio computacional do dispositivo com restrição da turbina | 56 |
| Figura 5.4 | Discretização do domínio computacional com região de transição trapezoidal. ... | 57 |
| Figura 5.5 | Discretização do domínio computacional com região de transição semicircular. . | 57 |
| Figura 5.6 | Superfícies de monitoramento no domínio computacional..... | 65 |
| Figura 5.7 | Superfícies de monitoramento no domínio computacional, região de transição trapezoidal. | 65 |
| Figura 5.8 | Superfícies de monitoramento no domínio computacional, região de transição semicircular. | 66 |
| Figura 5.9 | Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo na posição $x = 22,5$ m... | 70 |
| Figura 5.10 | Variação de r e H_2/l | 72 |
| Figura 5.11 | Variação de d_1/d_2 | 72 |
| Figura 5.12 | Variação de α | 73 |
| Figura 6.1 | Resultados da potência hidropneumática (a), vazão mássica (b) e pressão (c) para o caso com região de transição trapezoidal variando o ângulo de α utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais..... | 77 |
| Figura 6.2 | Variação da pressão (a) e vazão mássica (b) em relação ao tempo para o pior e melhor desempenho do caso com região de transição trapezoidal..... | 78 |
| Figura 6.3 | Topologias da velocidade na direção y (m/s) e fases água e ar, para a fase de descompressão e compressão para o caso de melhor desempenho com região de transição trapezoidal | 78 |
| Figura 6.4 | Resultados da potência hidropneumática (a), vazão mássica (b) e pressão (c) para o caso com região de transição semicircular variando o raio r e a razão H_2/l utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais.. | 81 |
| Figura 6.5 | Relação entre pressão e vazão mássica para o caso com região de transição semicircular. | 82 |
| Figura 6.6 | Variação da pressão em relação ao tempo para o caso com pior e melhor desempenho referente à região de transição semicircular | 82 |
| Figura 6.7 | Topologias da velocidade na direção y (m/s) e fases água e ar, para a fase de descompressão e compressão para o caso de melhor desempenho com região de transição semicircular. | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.8 Representação esquemática da restrição física na saída do dispositivo CAO em formato elíptico.. | 84 |
| Figura 6.9 Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_1/d_2 para o caso com restrição física no formato elíptico utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais.. | 88 |
| Figura 6.10 Variação da vazão mássica (a) e pressão (b) em relação aos diferentes valores de d_1/d_2 , o qual representa a restrição física no formato elíptico utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais | 89 |
| Figura 6.11 Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_1 (a) e d_2 (b) para a restrição física no formato elíptico | 89 |
| Figura 6.12 Variação da pressão (a) e vazão mássica (b) em relação ao tempo para o pior e melhor desempenho do dispositivo CAO com restrição no formato elíptico..... | 90 |
| Figura 6.13 Topologia da velocidade na direção y (m/s) e fase água e ar na (a) Compressão e (b) descompressão para o caso com restrição elíptica de $\phi = 0,0093$ | 91 |
| Figura 6.14 Variação da potência em relação aos diferentes valores de ϕ_n para os casos que apresentam a geometria que otimiza a potência convertida. | 93 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 5.1 Dimensões do problema e clima de ondas..... | 52 |
| Tabela 5.2 Parâmetros de simulação adotados. | 64 |
| Tabela 6.1 Variação geométrica da região de transição trapezoidal. | 75 |
| Tabela 6.2 Variação geométrica da região de transição semicircular. | 79 |
| Tabela 6.3 Variações geométricas da restrição $\phi = 0,0093$ | 86 |
| Tabela 6.4 Configuração geométrica dos casos de melhor desempenho para todos ϕ_n estudados. | 92 |
| Tabela B.1 Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para o caso em que a região de transição é trapezoidal. | 110 |
| Tabela B.2 Resultado para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para o caso em que a região de transição é semicircular. | 110 |
| Tabela B.3 Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0093$ | 111 |
| Tabela B.4 Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0210$ | 111 |
| Tabela B.5 Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0210$ | 111 |
| Tabela B.6 Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0327$ | 112 |
| Tabela B.7 Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0327$ | 112 |
| Tabela B.8 Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0364$ | 112 |
| Tabela B.9 Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0364$ | 113 |
| Tabela B.10 Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0369$ | 113 |
| Tabela B.11 V Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0369$ | 113 |
| Tabela B.12 Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para os melhores casos de cada ϕ_n | 114 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|---------|--|
| AMG | Algebraic Multigrid |
| CAO | Coluna de Água Oscilante |
| COPPE | Instituto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em engenharia |
| CPU | <i>Central Processing Unit</i> |
| EDP | Equação Diferencial Parcial |
| MDF | Método das Diferenças Finitas |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MVF | Método dos Volumes Finitos |
| NITA | <i>Non-Iterative Time Advancement</i> |
| PISO | <i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i> |
| PRESTO | <i>Pressure Staggering Option</i> |
| PROMECA | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SIMPLE | <i>Semi Implicit Linked Equations</i> |
| SIMPLEC | <i>Semi Implicit Linked Equations Consistent</i> |
| TD-MC | Terfenol-D Magnético Cilindrico |
| UDF | Função Definida pelo Usuário (<i>User Defined Function</i>) |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| VOF | <i>Volume of Fluid</i> |
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

| | |
|-------------|---|
| A | Amplitude, m |
| A_E | Área de entrada da câmara hidropneumática, m ² |
| A_R | Área da restrição elíptica, m ² |
| A_T | Área total, m ² |
| A_{Tran} | Área da região de transição, m ² |
| C | Celeridade, m/s |
| d_1 | Eixo horizontal, m |
| d_2 | Eixo vertical, m |
| E_{CAO} | Energia absorvida pelo dispositivo CAO, J |
| g | Aceleração da gravidade, m/s ² |
| h | Profundidade da água, m |
| H | Altura, m |
| H_T | Altura total, m |
| H_1 | Altura da câmara hidropneumática, m |
| H_2 | Altura da chaminé, m |
| H_3 | Profundidade de submersão, m |
| H_4 | Altura da região de transição, m |
| J | Variável de grandeza física qualquer, m |
| k | Número de onda, m ⁻¹ |
| l | Comprimento da chaminé, m |
| L | Comprimento da câmara hidropneumática, m |
| L_T | Largura Total, m |
| m | Massa, kg |
| \dot{m} | Vazão mássica, kg/s |
| \dot{m}_e | Vazão mássica na fronteira leste, kg/s |
| \dot{m}_n | Vazão mássica na fronteira norte, kg/s |

| | |
|-------------|---|
| \dot{m}_s | Vazão mássica na fronteira sul, kg/s |
| \dot{m}_w | Vazão mássica na fronteira oeste, kg/s |
| n | Número de volumes, m |
| P | Pressão, Pa |
| P_d | Pressão dinâmica, Pa |
| P_e | Pressão estática, Pa |
| P_{hid} | Potência hidropneumática, W |
| P_{inc} | Potência da onda incidente, W |
| r | Raio, m |
| t | Tempo, s |
| T | Período da onda, s |
| T_w | Período considerado na análise da eficiência, s |
| u | Componente da velocidade na direção horizontal, m/s |
| U_R | Número de Ursell, adimensional |
| v | Velocidade, m/s |
| \vec{v} | Vetor velocidade do escoamento, m/s |
| V_{ar} | Velocidade do ar na chaminé, m/s |
| v_i | Velocidade na direção y, m/s |
| w | Componente da velocidade na direção vertical, m/s |

Símbolos Gregos

| | |
|-------------------------|--|
| α | Ângulo de inclinação da parede na transição trapezoidal, ° |
| α_{ar} | Valor nominal da fração volumétrica na fase ar |
| $\alpha_{\acute{a}gua}$ | Valor nominal da fração volumétrica na fase água |
| β | Variável de ajuste da função de interpolação temporal |
| λ | Distância entre duas cristas ou cavas consecutivas, m |
| η | Elevação da superfície livre, m |
| ρ | Massa específica, kg/m ³ |
| ρ_{ar} | Massa específica do ar, kg/m ³ |

| | |
|---|---|
| μ | Viscosidade, kg/ms |
| ϕ | Função potencial de velocidade |
| ϕ_n | Razão entre a área da restrição elíptica e a área total |
| ε | Eficiência, % |
| $\left(\begin{smallmatrix} \bar{\tau} \end{smallmatrix} \right)$ | Tensor das tensões |
| ω | Frequência, 1/m |

Subscritos

| | |
|---|-------------------------------|
| e | Leste |
| i | Número de volumes de controle |
| n | Norte |
| P | Ponto de interesse |
| s | Sul |
| w | Oeste |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Uma vez que o consumo de energia tem aumentado consideravelmente ao longo das últimas décadas, associado ao fato de que os métodos tradicionais de geração de energia (especialmente os ligados à queima de combustíveis fósseis) estão causando impactos ambientais, a busca por novas fontes de energia tem sido intensificada [Clément et al., 2002].

O aumento da população mundial, o crescimento do consumo de energia, a maior conscientização em relação aos recursos ambientais e a diminuição dos combustíveis fósseis, propicia a busca por fontes alternativas de energia. Atualmente, um dos grandes desafios é suprir a demanda energética mundial. Neste sentido existem muitas discussões sobre geração e consumo de energia elétrica [ANEEL,2008].

Assim, um dos maiores desafios para o desenvolvimento tecnológico atualmente passa pelo equilíbrio entre a inovação e a sustentabilidade dos recursos utilizados para mantê-la.

Dos legados deixados pela Revolução Industrial, ocorrida entre o final do século XVIII e o início do século XIX, um dos principais, provavelmente, foi a profunda mudança no modo de vida do homem. As transformações ocorridas desde então vão muito além da substituição do esforço humano pela força das máquinas. E as máquinas permitem que uma sociedade rural e manufatureira venha a se tornar uma sociedade globalizada e altamente tecnológica [Krüger, 2003].

Com o passar dos anos, diversos estudos científicos passaram a alertar a respeito das consequências ao meio ambiente, relacionadas às emissões de gás carbônico (CO₂), decorrente do uso de combustíveis fósseis.

O surgimento das primeiras iniciativas no sentido de diversificar as fontes usadas para a produção de energia que, reforçadas pela perspectiva da sustentabilidade dos recursos, direcionaram as ações para o uso de fontes alternativas, remete à conscientização da população mundial em relação aos impactos ambientais causados pelas formas tradicionais de obtenção de energia.

Deste modo, enquanto a energia proveniente de fontes convencionais, como gás, carvão e petróleo, estão geograficamente mais concentradas, a energia renovável tem potencial de implementação significativa, grande parte dos países têm pelo menos um abundante recurso renovável, e ainda, muitos apresentam um grande portfólio de recursos [IEA, 2014].

Entre os benefícios que pode oferecer a energia renovável estão: menor impacto ambiental, incluindo as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes locais, segurança energética e desenvolvimento econômico estratégico [EREC, 2014].

Neste sentido, muitos países estão investindo em pesquisas e exploração de novas formas de energia. Algumas possibilidades são: energia solar, energia eólica e energia dos oceanos. E uma dessas fontes de energia que tem merecido destaque é a transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica [Cruz e Sarmiento, 2004].

Diversas soluções têm surgido para o aproveitamento da energia das ondas. Porém, atualmente, nenhuma delas ocupa uma posição consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características dos locais de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores [Chozas e Soerensen, 2009].

Entende-se que são muitas as variáveis que definem qual dispositivo conversor utilizar. Portanto, devem-se conhecer os conversores com detalhes, bem como o clima de ondas (período, comprimento de onda, amplitude...) da região em que se pretende instalar um dispositivo, para com isso, testar as diferentes opções e, até mesmo, propor novas tecnologias de conversão. Em função disso, a investigação numérica é importante pois, através dela, é possível realizar o estudo do dispositivo, aplicando o clima de ondas da região de interesse e, assim, verificar seu desempenho, extrair informações e um referencial teórico para a construção do conversor selecionado para uma região.

1.2 Proposta do trabalho e objetivos

No presente trabalho é abordado o princípio de funcionamento de um dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). O principal objetivo desta dissertação é, através da simulação computacional, através do método de busca exaustiva e do emprego do Design Construtal, maximizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, ou seja,

maximizar a potência hidropneumática convertida no dispositivo CAO submetido a ondas incidentes regulares na escala real.

São propostos dois estudos complementares nesta pesquisa. Primeiramente, estuda-se a geometria da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo conversor, onde se tem a forma trapezoidal ou a forma semicircular, não excluindo o estudo de outras formas geométricas em pesquisas posteriores. Desta maneira é possível analisar qual a influência que a região de transição possui sobre o escoamento do ar pelo interior do dispositivo CAO. O segundo estudo tem por objetivo analisar diferentes eixos da restrição física no formato elíptico que otimizam a potência hidropneumática do conversor. Este formato de restrição representa a turbina (toma-se o cuidado para não ocorrer a interrupção do escoamento de ar na chaminé do dispositivo), como estudado em Gomes, 2014, o qual apresenta uma pesquisa do estudo da turbina na chaminé de um dispositivo conversor do tipo CAO.

Dentre os objetivos específicos podemos citar:

- Contribuir para o desenvolvimento de uma revisão bibliográfica sobre o estudo de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO e o uso do Design Construtal na otimização geométrica dos mesmos;
- Verificar a geração da onda no domínio computacional comparando o caso numérico e analítico;
- Aplicar o método Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, para a otimização geométrica do dispositivo conversor;
- Verificar outras configurações geométricas da restrição elíptica as quais sejam diferentes das estudadas por Gomes, 2014;
- Simular numericamente diferentes configurações geométricas de região de transição em formato trapezoidal e semicircular;
- Simular numericamente diferentes configurações da restrição em formato elíptico, variando seus eixos;
- Selecionar as configurações geométricas que apresentam o melhor desempenho para a potência hidropneumática, sem que ocorra total obstrução do escoamento de ar para o caso da restrição física da turbina;

Os objetivos específicos citados, representam um roteiro de trabalho para assim se obter os resultados com as simulações numéricas para os diferentes casos estudados.

Com os estudos realizados, empregando o Design Construtal associado ao método de busca exaustiva, foi possível obter uma recomendação teórica tanto para a restrição elíptica que representa a turbina, como para os diferentes formatos geométricos da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO. Estas informações possibilitarão a construção de dispositivos e turbinas de forma otimizada, caracterizando, assim, a aplicabilidade deste trabalho.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho proposto foi organizado em 7 (sete) capítulos, 2 (dois) apêndices e 1 (um) anexo.

No capítulo 1 é apresentada a motivação para o estudo de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, a proposta de estudo e objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de energia das ondas do mar e das diferentes tecnologias de conversão da mesma em energia elétrica, bem como dos diferentes princípios de funcionamento dos conversores de energia das ondas, destacando o tipo coluna de água oscilante. É apresentado, também, um estudo referente à turbina do tipo *Wells* e, por fim, é exposta a situação dos estudos de conversores de energia das ondas do mar no Brasil.

No capítulo 3 realiza-se uma revisão sobre a teoria de ondas oceânicas, abordando-se a teoria linear e a teoria não linear de ondas.

No capítulo 4 apresenta-se a definição de Design Construtal, algumas das aplicações na engenharia, medicina, biologia entre outras áreas do conhecimento e uma revisão dos trabalhos desenvolvidos empregando Design Construtal. Faz-se também uma revisão das pesquisas que contemplam a utilização do método Design Construtal, associado com métodos de otimização, na busca do melhor desempenho dos conversores de energia das ondas e, também, uma revisão dos trabalhos envolvendo Design Construtal e conversores do tipo Coluna de Água Oscilante. Além disso, é apresentada a formulação matemática com o método já citado para conversores do tipo CAO.

No capítulo 5 é apresentada a modelagem computacional do problema estudado. Discutem-se as etapas da simulação numérica, a geração de malhas, o modelo *Volume of Fluid* (VOF), o método dos Volumes Finitos (MVF) e os métodos numéricos de solução das equações de conservação. Aborda-se, também, a verificação e validação da onda gerada e apresenta-se um esquema da variação dos graus de liberdade estudados neste trabalho.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos. O mesmo está dividido em três partes. A primeira parte apresenta a análise de um conversor do tipo CAO com região de transição em formato trapezoidal entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo conversor. Na segunda parte tem-se, também, a análise de um conversor do tipo CAO, mas a geometria da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo é em formato semicircular. Na terceira parte faz-se um estudo sobre a restrição física em formato elíptico que representa a turbina conversora de energia.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões da dissertação e algumas propostas de continuidade do trabalho. O Apêndice A apresenta os trabalhos publicados como resultado das pesquisas desenvolvidas durante o mestrado e o apêndice B apresenta as tabelas das configurações geométricas dos casos simulados e os resultados das simulações efetuadas. O Anexo A apresenta a Função Definida pelo Usuário (UDF), que descreve as equações para a velocidade das ondas de entrada no domínio computacional baseadas na Teoria não linear de ondas.

2 ENERGIA NOS OCEANOS

Atualmente são muitas as discussões a respeito de energia, em especial a energia elétrica, tanto no que diz respeito à questão de consumo quanto à transformação e geração da mesma. A importância da energia elétrica é um fato cada vez mais em destaque, pois a tecnologia está cada vez mais inserida nos lares através, por exemplo, dos eletrodomésticos (televisão, rádio, computador, entre outros) [Gomes, 2010].

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.

Na dinâmica evolução das energias renováveis, a indústria de energia dos oceanos é apenas emergente. Apesar deste tipo de tecnologia ser relativamente nova e ainda não ser economicamente competitiva em comparação com fontes de energia mais maduras, como a energia eólica ou hidroelétrica, o interesse das instituições governamentais e da indústria tem sido crescente. Comparados com os recursos eólicos, solar e hídrico, pode-se dizer que os oceanos são fontes não exploradas de geração de energia. Contudo, um importante aspecto da energia dos oceanos é sua alta densidade de energia, a maior entre todas as fontes de energia renováveis existentes [Clemente et al., 2002]

2.1 A Energia das Ondas do Mar

O oceano é uma enorme fonte de energia renovável com potencial para satisfazer uma porcentagem importante do abastecimento de eletricidade mundial. Ele cobre um pouco mais de 70% da face da terra, tornando-se assim o maior coletor e armazenador de energia solar [Les Duckers, 2004].

As ondas são a manifestação final do transporte desta energia, que passa do sol, para o vento e, por sua vez, para a água. Estas podem viajar por milhares de quilômetros sem perdas

significativas de energia. No entanto, ao atingirem águas de pouca profundidade, a velocidade se reduz, o comprimento de onda diminui e a altura aumenta, o que se traduz na rebentação da onda, na proximidade da linha de costa. As maiores perdas de energia se devem aos efeitos de fundo e, desta forma, apenas uma fração da energia chega à costa. A onda transporta energia cinética e potencial gravitacional, que dependem fundamentalmente da sua altura e período [Dean e Dalrymple, 1991].

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 períodos elevados (7 a 10s) excedem normalmente os 50kW por metro de frente de onda [Cruz e Sarmiento, 2004].

A exploração da enorme reserva energética das ondas representa um domínio de inovação. 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 extremamente atrativo se considerarmos que o valor global da energia das ondas encontra-se em torno de 2TW, valor este que é equiparável à potência elétrica média anual consumida mundialmente [Cruz e Sarmiento, 2004].

Esta distribuição de energia mundial apresenta-se de modo irregular pelo globo terrestre, como pode ser verificado na Figura 2.1, 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 100kW/m de frente de onda. Valores considerados significativos para exploração variam de 20 a 70kW/m e ocorrem principalmente em latitudes moderadas e altas. No sul do Brasil, tem-se disponível em torno de 30kW/m, sendo, portanto, uma alternativa de fonte de energia importante para a região [Gomes, 2014; Davyt, 2012].

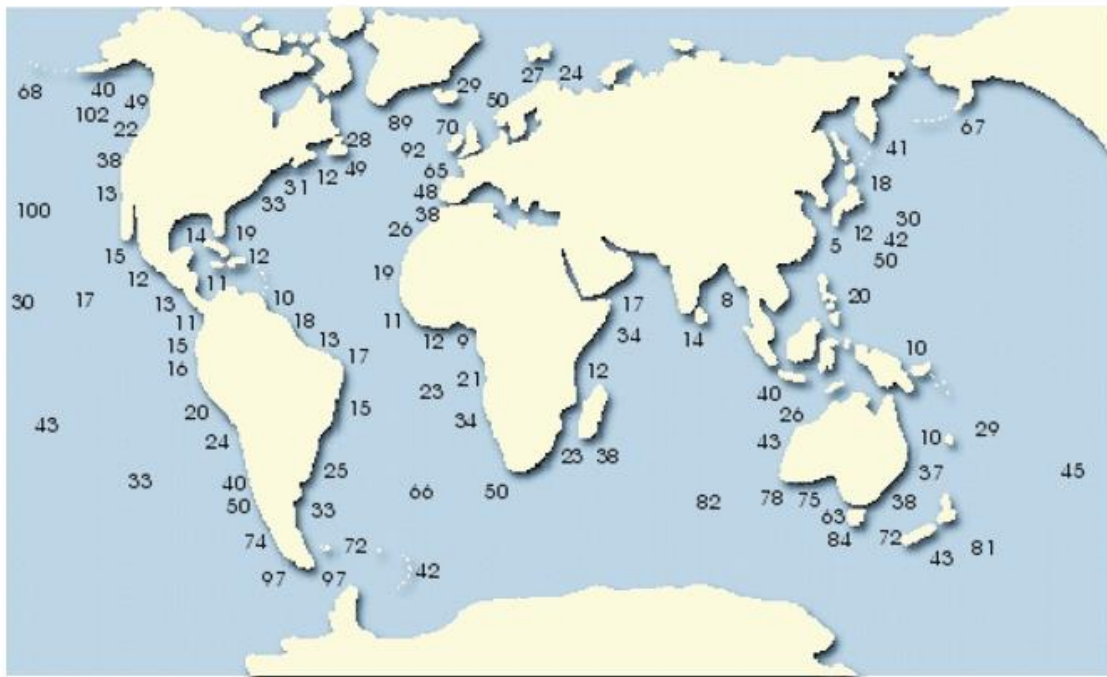


Figura 2.1 – Potência anual em kW/m de frente de onda.

(FONTE: cavity.ce.utexas.edu/kinnas/COURSES/ce358/part2_14.html)

2.2 Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas

Atualmente há uma variedade de dispositivos e muitas formas de converter a energia das ondas em energia elétrica, o que é característico de uma tecnologia não estabilizada, ao contrário da energia eólica (onde todos os equipamentos são muito semelhantes). Estas tecnologias não são concorrentes, situação que pode ser alterada no futuro, tal como não será correto afirmar que estas serão as únicas soluções possíveis, dado o crescente interesse nessas tecnologias e a permanente entrada de novas ideias, empresas e outras instituições [Cruz e Sarmiento, 2004].

O aproveitamento da energia das ondas envolve processos hidrodinâmicos consideravelmente complexos do ponto de vista da sua formulação teórica, tanto pelos fenômenos decorrentes da interação entre a água e o equipamento, como difração e radiação de ondas, como pela própria natureza aleatória do fenômeno de geração das ondas. Por esta razão, a concepção e o desenvolvimento de equipamentos capazes de converter essa energia é uma tarefa bastante complexa [Falcão, 2010].

Existem inúmeros projetos em vários estágios de desenvolvimento. A classificação dos equipamentos, embora não seja consensual, pode ser feita em função de diferentes características, tais como o seu princípio de funcionamento [Cruz e Sarmento, 2004; Falcão, 2010], a sua localização e a sua geometria [Paredes, 2008].

A maioria das referências adota como critério de classificação a localização do dispositivo em relação à costa. Agrupando-os desta forma em dispositivos costeiros (*onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*) [Cruz e Sarmento, 2004].

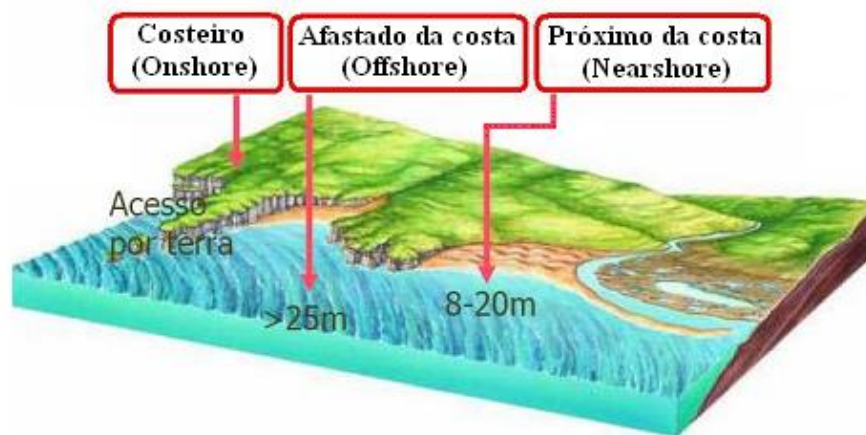


Figura 2.2 – Localização dos dispositivos em relação à costa (Gomes, 2010).

Os dispositivos costeiros (*onshore*) possuem acesso por terra, são classificados como de primeira ordem. Estes dispositivos apresentam fácil acesso para construção, instalação e manutenção, além de estarem próximos aos centros consumidores da energia gerada, permitindo assim a fácil distribuição. Porém, o potencial energético é menor em comparação aos outros dispositivos citados, pois as ondas que chegam à costa interagem com o fundo do oceano e, conseqüentemente, têm a sua energia reduzida. Os mais desenvolvidos utilizam o princípio de Coluna de Água Oscilante CAO (OWC- *Oscillating Water Column*).

Em contrapartida, os dispositivos próximos da costa (*nearshore*), classificados como de segunda ordem, aproveitam algumas vantagens das instalações sobre a costa, como uma distância aceitável para o transporte e distribuição da energia produzida. Também vale ressaltar que eles estão em uma região de maior potencial de ondas.

Por fim, os dispositivos em alto mar (*offshore*), classificados como de terceira ordem, aproveitam os altos potenciais de energia presente nas ondas em mar aberto. No entanto, apresentam dificuldades para a sua manutenção e instalação, além da grande distância para o transporte da energia gerada [Gomes, 2010].

Outra classificação possível está associada ao princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas do mar. Assim, existem, três classes principais de conversores de energia das ondas, que são: Coluna de Água Oscilante (CAO), Corpos Flutuantes, podendo ser de absorção pontal (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*), e galgamento [Cruz e Sarmiento, 2004; Aquanet].

A Figura 2.3 apresenta esquematicamente algumas tecnologias existentes classificadas de acordo com o princípio de funcionamento.

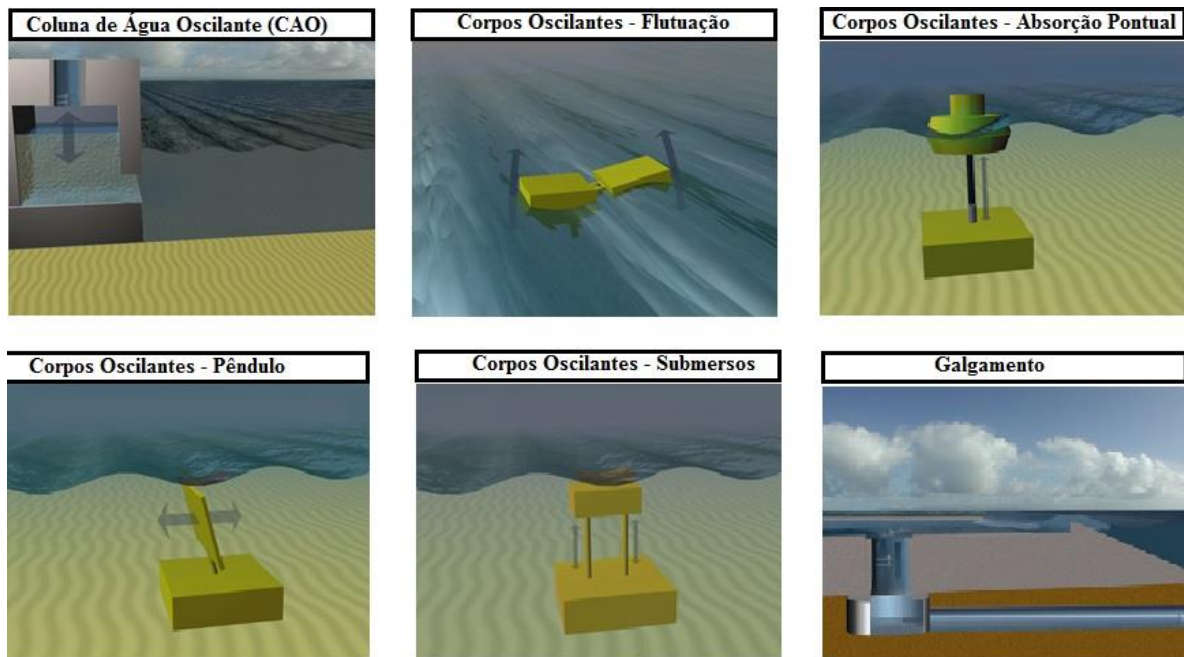


Figura 2.3 – Princípio de funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas (Aquanet, 2015).

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. Estes equipamentos oscilam relativamente a uma referência fixa ou a outras partes do equipamento. O movimento relativo do dispositivo pode ser utilizado para comprimir o fluido

de trabalho e acionar uma turbina ou utilizar um gerador linear [Davyt, 2012]. Nos dispositivos 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 movimentos em relação a sua própria estrutura devido à incidência das ondas, gerando energia elétrica [Cruz e Sarmiento, 2004; Iahnke, 2010].

Os dispositivos do tipo galgamento apresentam 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 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 (semelhante às utilizadas em hidrelétricas de baixa queda), onde ocorre a conversão em energia elétrica [Cruz e Sarmiento, 2004; Iahnke, 2010].

Uma etapa importante no desenvolvimento de sistemas de conversão de energia das ondas é a realização de experimentos, geralmente realizados com um modelo em escala. Um modelo em escala pode representar tanto uma parte do equipamento como o equipamento inteiro e permite a avaliação de características específicas do seu funcionamento real, desde que suas dimensões sejam definidas por um fator de escala [McCormick, 1981].

No caso de modelos para estudo de escoamento de fluidos, esta escala é determinada por um critério de similaridade, o qual consiste em um fator de escala que permite estabelecer uma relação entre aspectos fluidodinâmicos do modelo e aspectos reais do escoamento. O uso de um critério de similaridade, no entanto, não altera o fato de que os modelos (numérico ou de laboratório) são construídos com base em simplificações do caso real. Um dos critérios mais utilizados em modelos de estudo de engenharia costeira é o Número de Froude que estabelece uma relação entre as forças de inércia e as forças de gravidade [Hughes, 1993].

2.3 Conversor do Tipo Coluna de Água Oscilante

O equipamento de extração de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante, provavelmente, seja o mais estudado até o momento, tanto de forma teórica quanto experimental e, é um dos poucos a chegar ao estado de instalação em escala real.

Os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante são estruturas ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água, como pode ser observado na Figura 2.4, para as diferentes regiões de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo. O processo de geração de eletricidade segue duas fases. Quando uma onda entra na estrutura, o ar, que se encontrava dentro, 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” [Cruz e Sarmiento, 2004]. Para ter o aproveitamento desses sentidos opostos, normalmente são utilizadas turbinas do tipo *Wells*, as quais apresentam a propriedade de manterem o mesmo sentido de rotação das suas pás, independente do sentido do escoamento. O conjunto turbina e gerador é o responsável pela geração de energia elétrica [Cruz e Sarmiento, 2004].

Segundo Ramalhais (2011), os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante são um dos mais estudados e promissores, devido à sua simplicidade de construção e versatilidade, podendo ser utilizado como sistema *onshore*, *nearshore* e *offshore*, utilizando-se do mesmo princípio de funcionamento.

Apesar de o princípio de funcionamento ser o mesmo, existem algumas diferenças importantes entre as duas classes (*onshore* e *offshore*), como a reflexão em dispositivos *onshore* e a influência do fundo. Do ponto de vista analítico, ambos os problemas apresentam desafios consideráveis para o seu estudo. Neste sentido, diversos aspectos relacionados ao problema do dispositivo CAO *offshore* podem ser resolvidos de forma similar a problemas anteriormente estudados relacionados à área da engenharia naval, enquanto que o dispositivo CAO *onshore* representa um problema relativamente novo [Davyt, 2012].

Mesmo o princípio de funcionamento de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante sendo simples, a construção de um modelo que descreva o seu funcionamento de uma forma fiel está longe de ser uma tarefa fácil. É importante no projeto destes dispositivos, conhecer a potência incidente e as forças que atuam sobre eles. Assim, é possível adequar a geometria do equipamento à quantidade de energia que se pretende extrair.

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 que a

turbina e o gerador não ficam em contato direto com a água [Khaligh e Onar, 2010]. Uma desvantagem do dispositivo CAO são as grandes dimensões de concreto da estrutura, o que torna o custo da construção mais elevado [Khaligh e Onar, 2010].

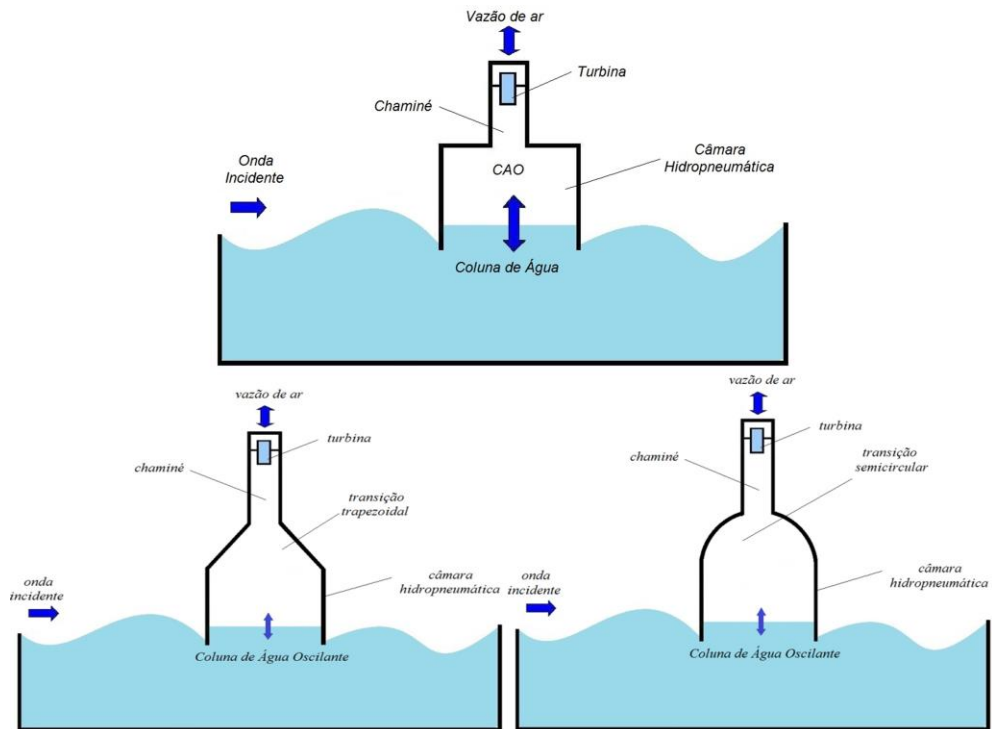


Figura 2.4 – Representação do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante para diferentes regiões de transição (Gomes, 2014; Lima et al., 2015b).

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), a qual pode ser vista na Figura 2.5. O local escolhido para a instalação da central piloto foi Porto Cachorro, costa noroeste da ilha do Pico, no arquipélago do Açores. O arquipélago apresenta condições propícias para o aproveitamento da energia das ondas. A sua localização é numa zona onde existe um elevado recurso energético, 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 Sarmento, 2004].

Outro projeto de dispositivo *onshore* do tipo CAO é a Central do LIMPET na ilha de Islay (Escócia), o qual pode ser visto na Figura 2.6. A central LIMPET é a primeira a ser

explorada comercialmente no mundo, tem capacidade de 500kW e fornece energia elétrica a quatrocentas famílias da região.



Figura 2.5 – Projeto de dispositivo CAO da Ilha de Pico. (Save Pico Powerplant, 2015)

Existem também alguns dispositivos *offshore*: o conversor *Mighty Whale* localizado no Japão, que pode ser visto na Figura 2.7a, e o *Energetech* localizado na Austrália, que pode ser visto na Figura 2.7b.



Figura 2.6 – Projeto de dispositivo CAO do LIMPET. (Wavegen, 2015)



Figura 2.7 – Projeto de dispositivo: CAO Mighty Whale, Japão (a); CAO Energetech, Austrália(b). (Barreiro e Gil, 2008)

2.4 A Turbina *Wells*

Segundo Ramalhais, 2011, existem três tipos de turbinas que podem ser utilizadas em dispositivos do tipo CAO: *Wells*, Impulso e Denniss-Auld. A Turbina *Wells* foi inventada por A. A. *Wells*, em 1976, especificamente para ser utilizada com dispositivos de extração de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante [Raghunathan, 1995].

Outros tipos de turbina podem ser utilizadas, mas geralmente necessitam elementos auxiliares complexos, sendo em geral preferidas as turbinas do tipo *Wells*. Dentre as desvantagens da turbina *Wells* pode-se citar as suas baixas características de partida necessitando muitas vezes de um motor auxiliar de partida [Davyt, 2012].

A turbina *Wells* faz mover o eixo do gerador elétrico sempre no mesmo sentido de rotação, independente da direção do escoamento, como pode ser visto na Figura 2.8. É acionada pela variação de pressão e funciona na compressão e descompressão provocada pela onda incidente ao dispositivo.

Existem algumas variações onde a turbina de Pico (Figura 2.9a), por exemplo, possui guias que direcionam o escoamento. A Figura 2.9b mostra a turbina instalada na central de Limpet.

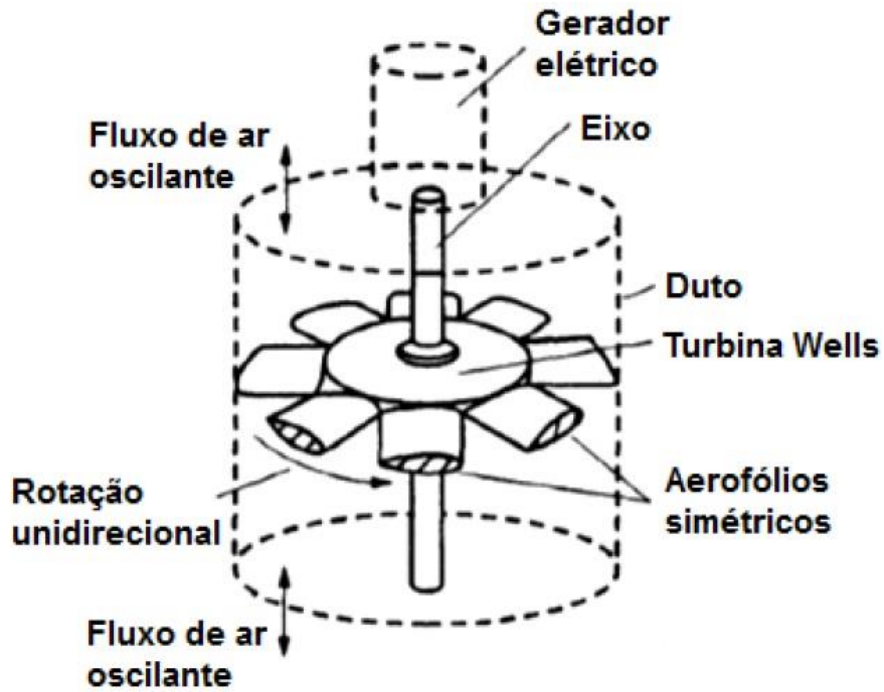


Figura 2.8 – Sistema de funcionamento da Turbina *Wells*. (Watterson e Raghunathan, 1996)



(a)



(b)

Figura 2.9 – Turbina: Central de Pico (a) e Central de Limpet (b). (Wavegen, 2015)

2.5 Energia das Ondas no Brasil

Estimativas da potência de geração de energia elétrica a partir da energia das ondas do mar na costa brasileira estão ao redor de 114GW. Além disso, é possível converter cerca de 20% desse potencial em energia elétrica, o que significa 17% da capacidade instalada no país [Estefen, 2012]. De forma geral, as regiões brasileiras com melhor potencial de energia das ondas são as regiões sul e sudeste, mas existem lugares, como o estado do Ceará, que recebem os ventos alísios constantemente.

O Brasil tem um dos dispositivos de ponta na área de conversão de energia das ondas (vide Figura 2.10), ele foi desenvolvido pelo Instituto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro [COPPE, 2015].

Em 2012 foi instalada no Porto de Pecém, a 60 quilômetros de Fortaleza, uma usina de ondas (Figura 2.11) que tem uma capacidade de 100kW. A conversão de energia é feita através dos flutuadores na base de braços mecânicos instalados no quebra-mar. O sistema é composto por dois módulos, cada um deles formado por uma boia com 10 metros de diâmetro e um braço mecânico de 22 metros de comprimento. As ondas fazem com que os braços se movimentem na direção vertical. Esse movimento gera uma força utilizada para impulsionar a água por tubos. Isso cria uma grande pressão na câmara hiperbárica, o que faz movimentar a turbina ligada a um gerador que produz eletricidade [COPPE, 2015].

Além disso, a COPPE está trabalhando no desenvolvimento e construção de um protótipo *offshore* (Figura 2.12), para geração de energia elétrica na cidade do Rio de Janeiro. A usina será instalada a 14 quilômetros da praia de Copacabana, próximo da Ilha Rasa, com capacidade instalada de 100kW. Ficará a uma profundidade de 20 metros e, em sua capacidade máxima, a eletricidade gerada pode abastecer o equivalente a 200 casas residenciais [Planeta COPPE, 2015].

A geração de energia se dará a partir da movimentação vertical de um flutuador de 11 metros de altura e 4,5 metros de diâmetro, impulsionado pelas ondas do mar. O flutuador é guiado por uma coluna central, com fundação no leito marinho, e a sua movimentação será transformada em movimento rotativo no gerador, utilizando um sistema mecânico que integra o flutuador e gerador (Figura 2.13) [Planeta COPPE, 2015].



Figura 2.10 – Dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica.
(COPPE, 2015)



Figura 2.11 – Usina de ondas no Porto de Pecém. (Tractebel, 2015)

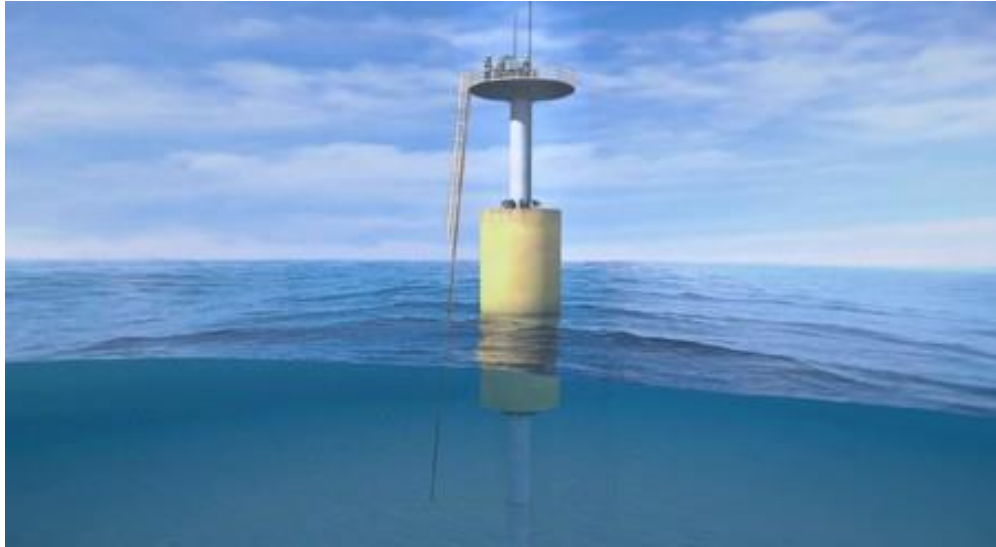


Figura 2.12 – Dispositivo que será instalado no Rio de Janeiro, Brasil. (Planeta COPPE, 2015)



Figura 2.13 – Funcionamento do dispositivo. (Planeta COPPE, 2015)

3 TEORIA DE ONDAS

O interesse pelo estudo da teoria da mecânica das ondas vem de mais de um século. Iniciou-se com a teoria linear de ondas por Airy (1801-1892), continuando depois com as teorias de ordem superior de Stokes (1819-1903) e teoria de ondas longas de Boussinesq (1842-1929). No entanto, apenas durante a segunda guerra mundial houve a necessidade de estudar mais profundamente os efeitos da interação entre as ondas e estruturas fixas ou flutuantes. A partir daí, assistiu-se a uma crescente aposta na pesquisa do comportamento das ondas (principalmente devido à exploração de petróleo *offshore*) através de estudos analíticos, ensaios em canais, tanques de onda e, também, mais recentemente, recorrendo à modelagem numérica [Ramalhais, 2011].

O mecanismo pelo qual são geradas as ondas, pela ação do vento, ainda não está totalmente compreendido. Trata-se, provavelmente, da ação de oscilações da pressão atmosférica de período curto, combinadas com a ação do vento. Quando a superfície de um corpo de água é perturbada na direção vertical, a força da gravidade atua para retornar a superfície à sua posição de equilíbrio. A massa de água retornando possui inércia, o que faz com que ela passe a posição de equilíbrio, estabelecendo uma oscilação na superfície. A oscilação perturba a superfície adjacente, causando a propagação da onda [Sorensen, 2006]. A este tipo de onda denomina-se de onda de gravidade.

As ondas do mar são influenciadas por diversos fatores que resultam em diferentes formas e tamanhos de ondas, dependendo da magnitude e intensidade de atuação dos mesmos sobre a água [Dean e Dalrymple, 1991]. Dentre estes, enumera-se quatro principais: o movimento de corpos na superfície, a ação dos ventos, abalos sísmicos e as forças gravitacionais exercidas pelo sol e pela lua, cada um ocasionando diferentes movimentações da superfície marítima [McCormick, 1981].

A superposição de diferentes ondas forma as ondas oceânicas, justificando o seu comportamento aleatório e de difícil representação matemática, especialmente devido às não linearidades envolvidas e às características tridimensionais. 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 [Carneiro, 2007]. A Figura 3.1 ilustra esse fenômeno.

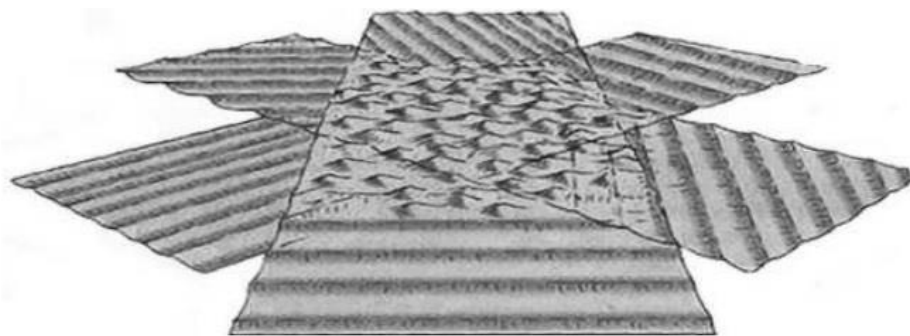


Figura 3.1 – Ilustração da formação de ondas numa certa região como resultado dos processos de interações e superposições. (Carneiro, 2007)

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 [Gomes, 2014]. A teoria de ondas de Airy (também chamada de teoria linear ou de pequena amplitude) é considerada a mais simples, ela permite representar as ondas como oscilações regulares [U.S. Army, 1973], essa teoria é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento de onda [Carneiro, 2007]. Já a teoria de Stokes, por sua vez, se aplica a ondas mais altas em águas relativamente profundas. Nesses modelos, as ondas são formadas pela soma de pequenas ondas regulares com altura e períodos diferentes [Gomes, 2014].

Outras teorias não lineares permitem uma melhor representação das ondas em situações não previstas pela teoria linear, especialmente quando há interação da onda com o fundo (águas rasas) e quando as ondas são mais altas [Carneiro, 2007].

A partir da teoria linear, as ondas do mar podem ser vistas como um perfil senoidal que se propaga ao longo da superfície do mar. Os principais parâmetros para descrever as ondas são seu período (T), que é o tempo necessário para duas cristas sucessivas passarem por um determinado ponto e altura (H) (ver Figura 3.2), além da profundidade (h) na qual elas se propagam [Dean e Darlymple, 1991].

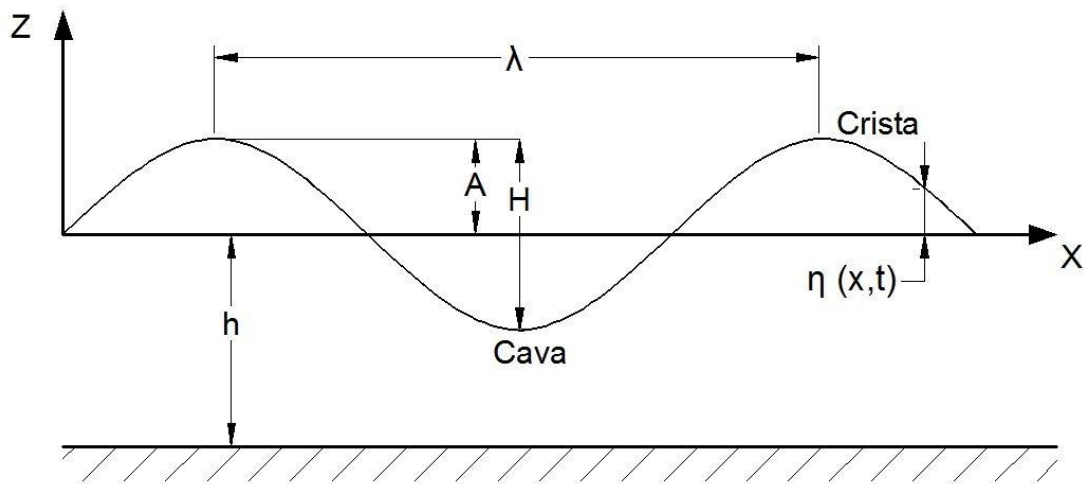


Figura 3.2 – Características da onda. (Adaptado de Dean e Darlymple)

Outros parâmetros podem ser determinados teoricamente a partir dos já citados. O comprimento de onda é a distância entre duas cristas ou cavas sucessivas (λ) e a altura (H) é a distância vertical entre a cava e a crista da onda.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3.1)$$

A elevação da superfície (η) é a posição da superfície livre em relação ao seu nível médio e a amplitude da onda (A) é a máxima elevação em relação ao nível médio. A velocidade da onda, ou celeridade (C), é definida como:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (3.2)$$

A crista é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água. Já o seu revés, a cava, é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o mesmo plano do nível médio de água.

Algumas dessas características devem ser levadas em conta na determinação da teoria de ondas a ser aplicada, sendo as principais: a altura de onda (H), o comprimento de onda (λ)

e a profundidade da água (h). Essas características compõem os seguintes fatores adimensionais:

- Declividade (H/λ)
- Profundidade relativa (h/λ)
- Altura relativa da onda (H/h)
- Número de Ursell ($U_R = \lambda^2 H/h^3$)

A partir da teoria de segunda ordem de Stokes podem ser representadas ondas com cristas mais altas e cavas mais achatadas, como é visto na Figura 3.3. Outro fenômeno que se apresenta 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 [Gomes, 2010].

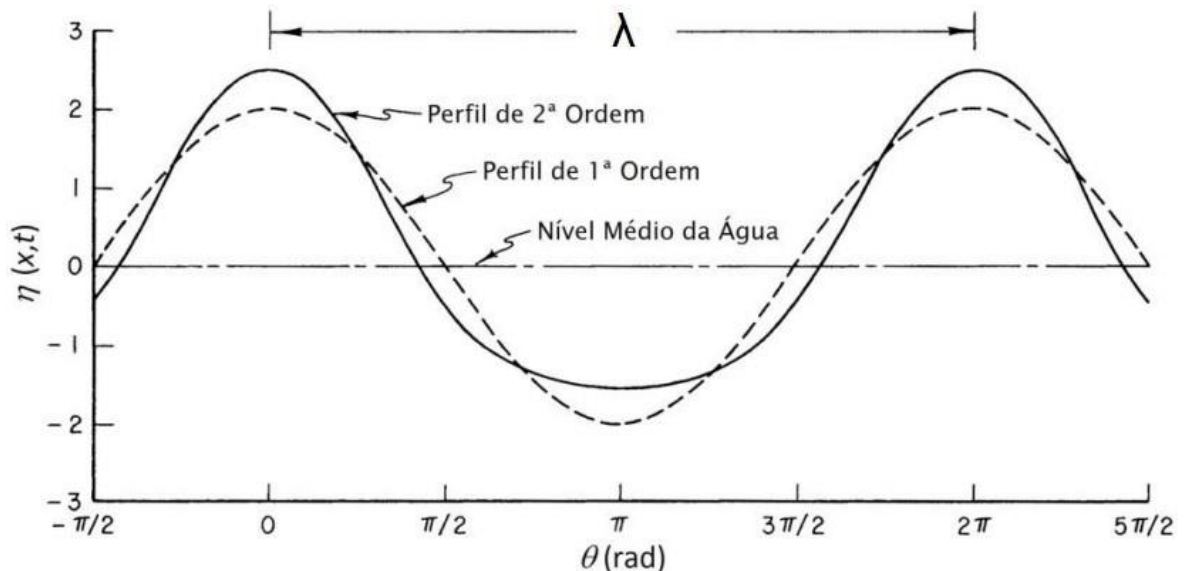


Figura 3.3 – Comparação entre uma onda de primeira e segunda ordem. (Seibt, 2014)

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].

Um recurso comumente usado para determinar qual teoria de ondas deve ser usada é apresentado no gráfico da Figura 3.4. Conhecendo-se os parâmetros h , H e T escolhe-se a teoria que melhor se adapta ao problema.

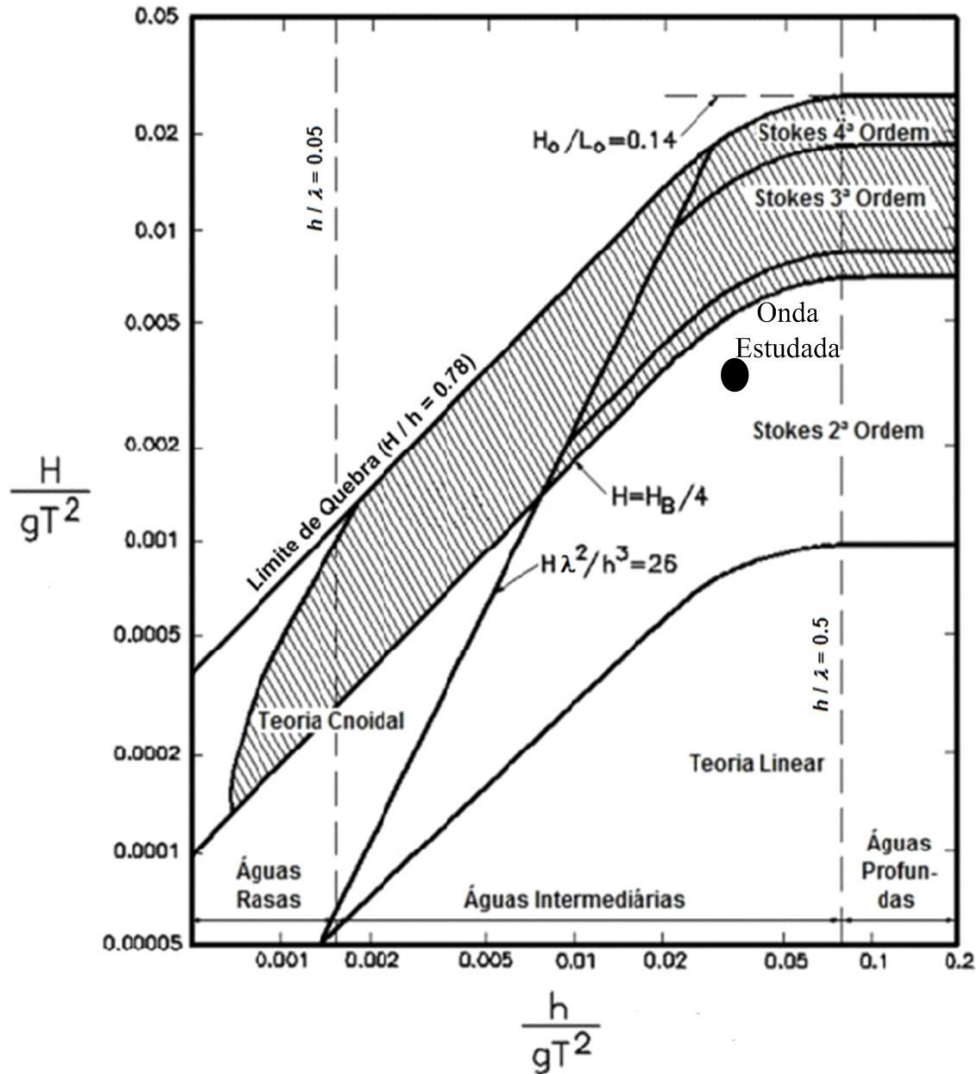


Figura 3.4 – Aplicabilidade das teorias de ondas. (Adaptado de Seibt, 2014)

Destaca-se o fato que a escala do gráfico da Figura 3.4 é definida com base no sistema métrico inglês. Sendo assim, as características da onda medidas em metros devem ser convertidas para pés (1,00 m = 3,28 pés). Da mesma forma, o valor da aceleração da gravidade (g) deve ser considerado como 32,20 pés/s². Para a onda estudada neste trabalho com período de $T = 5$ s, altura de $H = 1$ m e profundidade de $h = 10$ m, tem-se os referidos valores aproximados de $H/gT^2 = 0,0041$ e $h/gT^2 = 0,041$, caracterizando assim uma onda de segunda ordem.

3.1 Teoria Linear de Ondas

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].

O caráter linear implica que as ondas não se afetam entre elas, enquanto viajam juntas por toda a superfície de água. A Teoria Linear é conhecida como a teoria de ondas de Airy e a onda harmônica envolvida é, por conseguinte, chamada de onda de Airy. Teoria linear de ondas de gravidade e superfície tem sido a teoria básica das ondas oceânicas por cerca de 150 anos [Espinel, 2015].

As ondas propagam-se num fluido viscoso sobre um fundo irregular com permeabilidade variável. No entanto, na maioria dos casos é aceitável considerar os efeitos viscosos desprezíveis, uma vez que estes existem apenas nas camadas limite muito finas perto da superfície e do fundo. É também razoável considerar que o escoamento é irrotacional (não há movimento relativo entre as partículas de fluido) [Ramalhais, 2011].

Para a teoria de ondas linear, ainda é possível assumir algumas simplificações adicionais [U.S. Army, 1973]:

- O fluido é homogêneo e incompressível (massa específica constante).
- Desconsidera-se a tensão superficial do fluido.
- Desconsidera-se o efeito de coriolis.
- A pressão sobre a superfície livre do fluido é constante e uniforme.
- O fundo é horizontal, fixo e impermeável.
- A amplitude da onda é pequena e sua forma é invariável no tempo e no espaço.
- As ondas são planas (bidimensionais).

A teoria linear de ondas admite certas simplificações, sendo assim, o conjunto de equações básicas que a constitui é formado pelas equações de balanço usuais em mecânica de fluidos. Assim a Equação da continuidade é definida como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

A solução das equações de mecânica de fluidos é feita através do conceito da função do potencial de velocidade $\phi = \phi(x, y, z, t)$, o qual é definido como uma função onde as derivadas parciais são iguais às velocidades das partículas de água.

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.4)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3.5)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.6)$$

Assim, substituindo-se os valores descritos nas Equações (3.4), (3.5) e (3.6) na Equação (3.3), transforma-se a equação da continuidade em equação de Laplace,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.7)$$

A linearização das equações de quantidade de movimento nas direções x , y e z , respectivamente, ficam.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + gz \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0 \quad (3.10)$$

onde o termo gz representa a força do peso na direção z e não altera o significado da equação para x e y , pois quando é feita a derivação o termo desaparece. Segundo as Equações de (3.7) até (3.10) a soma dos termos entre parênteses demonstra que não é função de x , y e z . Portanto, pode ser uma função que depende do tempo $f(t)$ e igual a 0, para assim se obter a equação de Bernoulli,

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = 0 \quad (3.11)$$

As condições de contorno na teoria linear de ondas estão relacionadas aos movimentos das partículas da água (condição de contorno cinemática) e as forças que atuam sobre elas (condições de contorno dinâmicas).

Adicionando a Equação (3.7) as condições de contorno, temos:

- a) Condição de contorno cinemática de fundo considerando rígido e impermeável, no mar as partículas do fundo não podem cruzar o contorno sólido. Matematicamente, em $z = -h$, tem-se:

$$w = \frac{\partial\phi}{\partial z} = 0 \quad (3.12)$$

onde w é a componente da velocidade na direção vertical.

- b) Condição de contorno cinemática da superfície livre, em $z = 0$:

$$\frac{\partial\phi}{dz} = \frac{\partial\eta}{\partial t} \quad (3.13)$$

- c) Condição de contorno dinâmica da superfície livre (equação de Bernoulli aplicada na superfície livre, onde a pressão atmosférica é adotada como nula):

$$p = 0 \text{ em } z = 0 \quad (3.14)$$

sendo p a pressão na superfície da água, a equação de Bernoulli na superfície $z = \eta$ é dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0, \text{ em } z = 0 \quad (3.15)$$

onde g (m/s²) é a aceleração da gravidade.

Assim, segundo McCormick, 1973, a solução da Equação (3.15) é:

$$\phi(x, z, t) = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (3.16)$$

onde h é a profundidade (m), H é altura da onda (m), g é a aceleração da gravidade (m/s²), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m⁻¹), ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (rad/s), x é a coordenada que representa a direção principal (m), t é o tempo (s) e z é a coordenada normal (m).

Isolando η na Equação (3.15), obtém-se:

$$\eta = \frac{-1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \text{ em } z = 0 \quad (3.17)$$

Logo, das Equações (3.16) e (3.17) decorre que a elevação da superfície livre é:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.18)$$

Da definição da função potencial de velocidade, temos que as velocidades horizontal e vertical sob a onda são dadas por:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \frac{\omega \cosh k(h+k)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (3.19)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \frac{\omega \sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.20)$$

3.2 Teoria não Linear de Ondas ou Ondas de 2ª ordem de Stokes

Stokes, 1847, utilizando o método das perturbações para solucionar o problema de contorno da onda, desenvolveu uma teoria para ondas de amplitude finita que ele utilizou até a segunda ordem. Borgman e Chappellear, 1958 estenderam a equação até a terceira ordem e Skjelbreian e Hendrickson, 1961 até a quinta ordem.

Basicamente a teoria de Stokes consiste em assumir que as propriedades do movimento da onda, tais como o potencial de velocidade, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. Portanto, quanto mais alto o número de termos incluídos na série, melhor é a aproximação das propriedades atuais da onda [Stokes, 1847].

Diferente 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 [Gomes, 2010].

Assim, a expressão do potencial de velocidade obtida a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, é descrita como [McCormick, 1973]:

$$\phi = \frac{H}{2} c \frac{\cosh(kh + kz)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{3\pi c}{4\lambda} \frac{\cosh(2kh + 2kz)}{\sinh^4(kh)} \sin(2kx - 2\omega t) \quad (3.21)$$

onde C é celeridade, dada por:

$$C = \left[\frac{g}{k} \tanh(kh) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

Derivando a Equação (3.21) em relação a u e w , é possível encontrar as respectivas componentes para a velocidade de propagação da onda como [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.23)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3.24)$$

A equação para a superfície livre é descrita como:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (3.23)$$

onde z é a variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar. A teoria de segunda ordem de Stokes apresenta, razoavelmente, bons resultados, quando a relação profundidade comprimento de onda é maior que 1/10, o qual na prática abrange a maioria das aplicações de engenharia [Gomes, 2010]. No presente trabalho, é adotada uma onda que se enquadra na teoria de Stokes de 2ª ordem.

4 DESIGN CONSTRUTAL E APLICAÇÕES AOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

A Teoria Construtal foi enunciada por Adrian Bejan em 1996 [Bejan, 1997]. A partir da constatação de que o *design* das estruturas naturais é um fenômeno físico que ocorre em sistemas de grande e pequeno porte como os flocos de neve, os raios, rios, tecidos vivos vasculares, o tráfego das cidades, a difusão de novas ideias sobre o mundo, pensando na ideia de um grafo onde cada pessoa é um vértice do mesmo, entre outros. Esta teoria se baseia na lei Construtal “*Para um sistema finito onde há escoamento persistir no tempo (sobreviver) sua configuração deve mudar no tempo de tal forma que forneça acesso fácil às suas correntes*”, isto é, o seu *Design* deve se modificar conforme o tempo passa, para que o escoamento não cesse (morra) [Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013].

A Teoria Construtal permite entender o *design* dos escoamentos que ocorrem na natureza, como resultado da evolução no tempo visando o acesso mais fácil, rápido e com o menor consumo de energia. Para que haja esta evolução, é preciso que o sistema possua liberdade para evoluir e consiga superar as imperfeições (irreversibilidades) impostas pelo sistema.

A lei Construtal propõe uma forma de explicar como o *design* na natureza ocorre: “*Tudo o que escoar, evolui ao longo do tempo: a geração de design (evolução) e evolução são fenômenos universais*”. Isto é, a evolução dos sistemas que escoam não tem uma intenção definida, uma vez que cada sistema é único. Em vez disso, eles evoluem porque estão dirigidos pela Lei Construtal. Isto acontece da mesma forma que na lei da gravidade, onde as coisas devem se deslocar em direção ao centro do planeta com a mesma aceleração [Bejan, 2012].

A utilização da Lei Construtal para a melhoria das configurações utilizadas na engenharia e na organização do movimento é chamada de Design Construtal. A Teoria Construtal, abrange uma gama de processos físicos como pode ser visto em Bejan e Zane, 2012. Através da Lei Construtal é possível determinar o formato de objetos encontrados na natureza e no campo da engenharia e, para estes casos, a melhor forma de conectar um ponto a uma área e vice versa é através do formato de árvore (*tree-shape*), onde esta configuração

geométrica se vê, em maior parte, em trabalhos de otimização térmica e geométrica de processadores de computador [Bejan e Lorente, 2008].

A natureza oferece exemplos de como a configuração ideal para os sistemas de fluxo distribui as irreversibilidades naturais como o atrito e transferência de calor entre dois meios com diferenças finitas de temperaturas. Mudanças no *design* dos leitos de rios, de forma a movimentar a água mais e mais facilmente, bifurcação de veias no corpo dos animais, a fim de otimizar o escoamento sanguíneo nos tecidos, nos pulmões, entre tantos outros, são exemplos de configurações que poderiam ser citadas. Somente a evolução do corpo humano já nos exhibe um quadro gigantesco de exemplos que poderíamos observar assim como aplicações em áreas de engenharia ou mesmo organização social.

Um dos usos da lei Construtal é reformular, através da teoria construtal, a evolução como um processo dinâmico que gera melhores *designs*. Os melhores *designs* são levados a superar as imperfeições e facilitar o escoamento de massa usando energia.

A utilização do Design Construtal permite a obtenção da geometria ótima reduzindo a resistência global de suas correntes internas. Através da utilização de funções multi-objetivos, é possível analisar uma determinada configuração que atenda de maneira mais eficiente a imposição de mais de um objeto [Bejan e Lorente, 2008]. Estas configurações, muitas vezes, aproximam-se do chamado animal *design*, ou seja, tem o seu formato próximo ao encontrado na natureza- não por mimetismo- e sim pela aplicação das leis da física na obtenção da geometria ótima [Bejan e Zane, 2012].

4.1 Aplicações do Design Construtal

O Design Construtal tem sido predominantemente empregado na otimização geométrica de problemas na área de mecânica de fluidos e transferência de calor [Rocha et al., 2013]. Atualmente, encontram-se uma gama razoável de trabalhos na literatura envolvendo a aplicação do Design Construtal em conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, dentre eles destacam-se Gomes, 2010, Lopes, 2012, Gomes et al., 2012a, Gomes et al., 2013a, Gomes, 2014, Goulart, 2014, Letzow, 2014, Espinel, 2015, Lima et al., 2015a, Lima et al., 2015b, Dumont et al., 2016, Lima et al., 2016a, Lima et al., 2016b, Lima et al., 2016c, Machado, 2016, Plamer, 2016, Plamer et al., 2016, Martins, 2016.

A Teoria Construtal tem sido aplicada no *design* de inserções de materiais de alta condutividade para resfriamento dos sistemas de geração de calor (num volume de tamanho fixo com duas regiões: uma região com material de condutividade baixa e uma segunda região com material de condutividade alta que é usado para conduzir o calor gerado ao exterior), com o objetivo de minimizar a resistência do fluxo de calor [Souza e Ordóñez, 2013].

Biserni et al., 2007, utilizam a Teoria Construtal para otimizar a geometria de uma cavidade em forma de H que é introduzida em uma parede condutora sólida. O objetivo é minimizar a resistência térmica global entre o meio sólido e a cavidade.

Azad e Amidpour, 2011, empregam uma nova abordagem com Teoria Construtal 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 Construtal.

Em Lorenzini et al., 2012, utiliza-se da teoria Construtal para otimizar a geometria de uma cavidade em formato de T que é inserida em uma parede condutora sólida.

Isoldi et al., 2013, apresentam um estudo para obter a geometria ótima que minimiza a concentração de tensões ao longo de uma placa plana ou suportar a mais alta carga de deformação na mesma.

Em redes de distribuição de água potável [Bieupoude et al., 2013], a Teoria Construtal é empregada para otimizar o uso da energia minimizando a potência de bombeamento (através da otimização da geometria da rede), a qual é uma questão crítica em países em desenvolvimento.

Em Zhang et al., 2015, os autores investigam a alta temperatura característica de fluxo de sal fundido e de transferência de calor em trocadores de calor de remo (nome mais geral de secadores de remo), utilizando a ideia de Lei Construtal e métodos computacionais em dinâmica de fluidos (CFD).

Morega et al., 2015, utilizam o Design Construtal na otimização de um motor linear de tamanho pequeno que utiliza um Terfenol-D (materiais magnetostrictivos que são utilizáveis em dispositivos) núcleo magnético cilíndrico (TD-MC).

Dogaru, 2015, mostra como a Teoria Construtal é utilizada em uma área distinta da engenharia. O estudo do autor tem como objetivo analisar o mesmo período irreversível biunívoco de mercadorias idênticas entre diferentes regiões, isto é, analisar o trânsito de uma mesma mercadoria, mas entre cidades diferentes.

Em Chiavazzo et al., 2015, é utilizada a minimização da geração de entropia para interpretar o comportamento dos animais, em particular, onde as fêmeas das aranhas *meta menardi* escolhem para colocar seus ovos, ou casulos, a fim de minimizar a irreversibilidade termodinâmica.

A quantidade de trabalhos relacionando Design Construtal e modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar vem aumentando consideravelmente. É possível notar a busca pela otimização de aspectos ligados à geometria dos dispositivos conversores, tendo assim o melhor aproveitamento possível da energia contida na onda incidente ao dispositivo. 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.

4.2 Design Construtal Aplicado a Conversores de Energia das Ondas do Mar

As aplicações do Design Construtal envolvendo conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica vêm se mostrando cada vez mais presente em editoriais científicos, onde é perceptível o aumento de publicações envolvendo esses dois assuntos. O Design Construtal é um método que recentemente tem sido aplicado com sucesso na modelagem numérica de conversores de energia das ondas do mar, tanto para conversores do tipo CAO quanto conversores do tipo Galgamento, para aprimorar seu desempenho e geometria.

Para aplicar o Design Construtal na otimização geométrica de um sistema físico é necessário, basicamente, uma função 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) [Bejan e Lorente, 2008].

A função objetivo nos estudos desenvolvidos em conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica tem sido, normalmente, maximizar a potência hidropneumática. Os graus de liberdade e restrições do problema são definidos segundo o dispositivo conversor a ser aprimorado.

Em Lopes et al., 2012, foi empregado Design Construtal 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). Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório e, tanto o comprimento da câmara CAO (L) quanto à altura da câmara (H_1), foram mantidos constantes, enquanto que o diâmetro de saída da chaminé (l) foi variado, possibilitando a variação do grau de liberdade l/L . Na Figura 4.1 é possível verificar os graus de liberdade indicados.

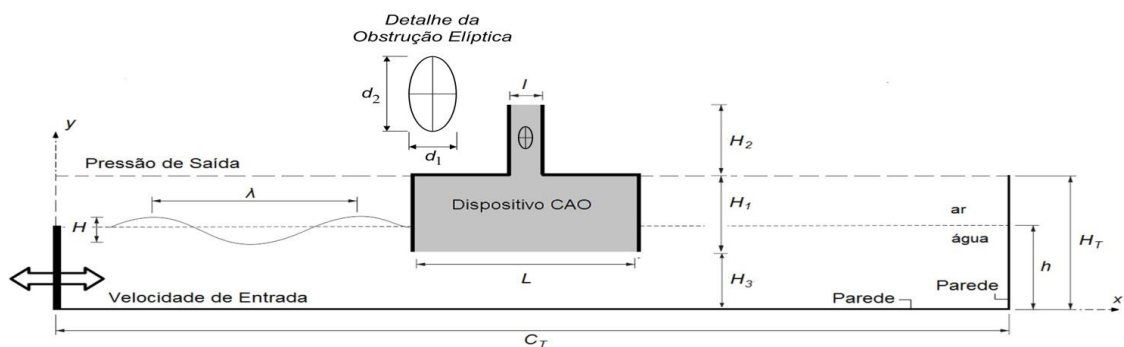


Figura 4.1 – Domínio Bidimensional do Dispositivo CAO com uma restrição em formato elíptico simulando a turbina (Lima et al., 2015a).

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

Em Gomes et al., 2012b, foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre otimização geométrica, utilizando Design Construtal, 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 comprimento da chaminé) foi mantido constante. Os resultados mostram a utilidade do método ao melhorar a potência hidropneumática cerca de 10 vezes entre a melhor e a pior geometria simulada.

Em Gomes et al., 2013a, é empregada uma onda na escala real com período de 5s. Os graus de liberdade H_1/L e H_3 (profundidade de submersão) são variados e otimizados. Os resultados apontaram uma recomendação teórica sobre a geometria da câmara CAO que

maximiza a eficiência do dispositivo conversor. A diferença entre o estudo utilizando uma onda em escala real e uma em escala de laboratório decorre dos critérios que são adotados para assim conseguir adaptar um problema real a um tanque de ondas de laboratório.

Enquanto em Gomes et al., 2013b, empregando Design Construtal, é realizada uma comparação entre a localização *offshore* e *onshore* para o dispositivo CAO, submetido a uma onda na escala real. O grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara do dispositivo de coluna de água oscilante) foi variado.

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 Design Construtal, o conversor submetido a diversas profundidades relativas.

Em Espinel et al., 2014a, é variado H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e em Espinel et al., 2014b, são variados H_1/L e H_2/l para determinar as dimensões ótimas da câmara e a chaminé do dispositivo CAO, respectivamente, para maximizar a potência hidropneumática, para um comprimento de onda e período que descreve uma onda regular em escala real.

Em Gomes, 2014, é realizado um estudo numérico bidimensional sobre a otimização da geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica, empregando Design Construtal, levando em consideração o clima de ondas de uma dada região e, a partir disso, dimensionar o dispositivo de modo que ele tenha um desempenho otimizado. No mesmo trabalho também foi feito uma investigação sobre a influência da perda de carga da turbina através de uma restrição física.

Em Espinel, 2015, é tratada a maximização da potência hidropneumática convertida em um dispositivo do tipo coluna de água oscilante (CAO), o método Design Construtal é aplicado para aprimorar a geometria e a profundidade de submersão do dispositivo.

Em Lima et al., 2015a, o autor busca, através da modelagem computacional e do emprego do Design Construtal, analisar diferentes eixos da restrição física, no formato elíptico, que representa a turbina. Assim é possível maximizar a conversão de energia e esta restrição pode ser vista no detalhe da Figura 4.1.

Em Lima et al., 2015b, utiliza-se o Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, para obter a geometria que apresenta o mais alto desempenho em relação a potência hidropneumática considerando diferentes formas da região de transição entre a câmara

hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO. As formas geométricas analisadas são no formato trapezoidal e semicircular. A geometria para estes dois problemas, podem ser vistas nas Figura 4.2 e Figura 4.3.

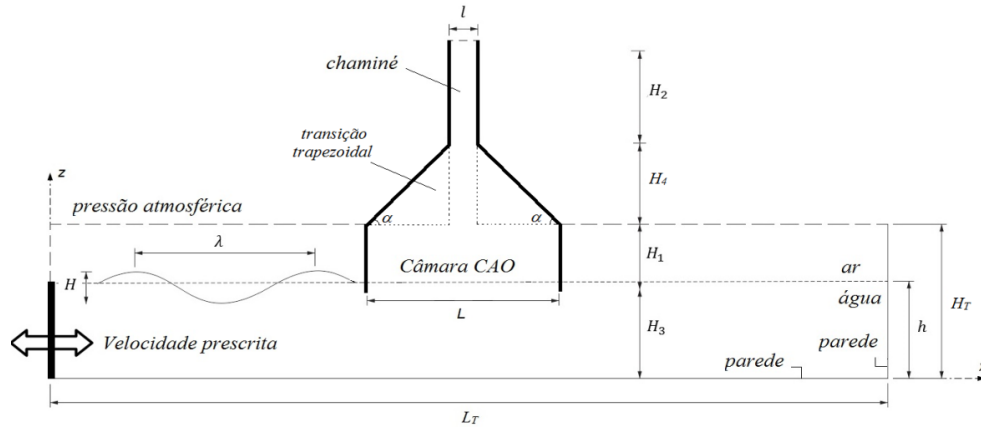


Figura 4.2 – Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição trapezoidal sem restrição na chaminé do dispositivo.

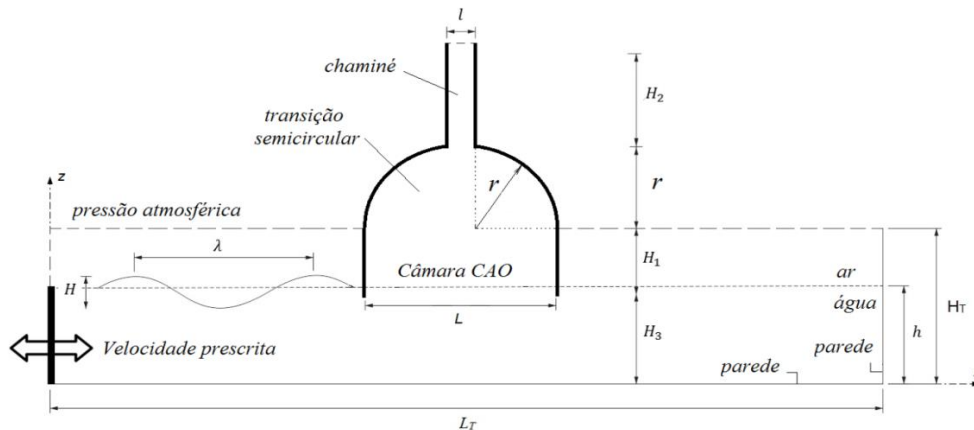


Figura 4.3 – Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição semicircular sem restrição na chaminé do dispositivo.

Em Gomes et al., 2015, é realizado um estudo numérico da onda incidente em dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, foi considerado um dispositivo no formato trapezoidal. Para o caso de otimização geométrica, o Design Construtal foi utilizado para avaliação dos parâmetros geométricos ótimos referentes à otimização da potência hidropneumática no dispositivo. Os resultados mostram a importância da geometria para o melhor desempenho dos dispositivos estudados.

Em Lima et al., 2016a, os autores seguem os estudos realizados nos trabalhos feitos no ano anterior mas agora variando mais graus de liberdade, como o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO (α) e a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo (H_2/l), os graus de liberdade H_1/L (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo) são mantidos constantes. Os resultados obtidos concordam com os encontrados no trabalho anterior e ainda pode-se obter uma recomendação teórica acerca de mais graus de liberdade.

Em Lima et al., 2016b, os autores variam a geometria da região de transição no formato trapezoidal, mas utilizando mais graus de liberdade que os trabalhos anteriormente realizados. Os graus de liberdade estudados foram o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO (α), a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo (H_2/l) e a profundidade de submersão do dispositivo (H_3). Os resultados obtidos e comparados com os trabalhos anteriores forneceram a recomendação teórica necessária para assim se construir um conversor de energia das ondas do tipo CAO, com a região de transição no formato trapezoidal.

Em Dumont et al., 2016, os autores realizam o estudo da região de transição semicircular variando graus de liberdade que não foram estudados nas pesquisas anteriores referenciadas pelo mesmo, onde os graus de liberdade analisados foram o raio (r) e a razão entre o comprimento e a altura da câmara hidropneumática do dispositivo conversor (H_1/L). Os valores encontrados para o raio condizem com os encontrados na investigação anterior validando assim esse grau de liberdade e estabelecendo um referencial teórico acerca do outro grau de liberdade estudado.

Em Lima et al., 2016c, os autores apresentam um estudo numérico bidimensional sobre a região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo conversor do tipo Coluna de Água Oscilante no formato semicircular. O objetivo é maximizar a potência hidropneumática, considerando uma geometria semicircular na região de transição do dispositivo CAO, situada entre a câmara hidropneumática e a chaminé. Os resultados são comparados através do valor de potência hidropneumática obtido para as diferentes configurações geométricas da região de transição. O Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, foi empregado para definir a geometria que maximiza a potência hidropneumática. Os graus de liberdade estudados foram o raio (r), a razão entre altura e

comprimento da chaminé de saída da câmara CAO (H_2/l) e a razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO (H_1/L). Os graus de liberdade analisados se diferenciam dos estudados nas pesquisas anteriores, onde assim se obteve um referencial teórico mais apurado do que o encontrado anteriormente.

Em Plamer, 2016, é estudado um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, onde o objetivo era avaliar a influência da razão entre o volume de entrada da câmara hidropneumática e o volume total da câmara. Este estudo se utiliza do método Design Construtal para avaliar a geometria que conduz ao melhor desempenho. Conclui-se que, o que contribui na maximização da vazão mássica é a relação (H_1/L) e a pressão é influenciada pela razão entre o volume de entrada e o volume total.

Em Martins, 2016, o autor utiliza o Design Construtal na otimização geométrica de um dispositivo de galgamento, indicando que a diminuição do período conduz a uma diminuição da potência disponível.

Em Machado, 2016, a autora faz um estudo, utilizando Design Construtal, para um dispositivo de galgamento em que o método é utilizado para definição da melhor forma para a rampa presente no dispositivo de modo a maximizar a massa de água que entra no reservatório, conduzindo a uma maior geração de energia elétrica.

Por tudo isso é evidente a aplicabilidade do Design Construtal em problemas relacionados à otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, onde, variando-se a geometria, é possível obter resultados que conduzem a melhores desempenhos em termos da potência hidropneumática, que, costumeiramente, é o objetivo de problemas envolvendo conversores de energia das ondas do tipo CAO. Assim, a partir das recomendações teóricas estabelecidas pelos trabalhos que aqui foram apresentados é possível estabelecer os parâmetros que serão usados na presente pesquisa.

4.3 Formulação Matemática com Design Construtal para Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo CAO

A proposta deste trabalho é, através do estudo numérico bidimensional e do emprego do Design Construtal, analisar diferentes eixos da restrição elíptica na região da chaminé do dispositivo (Ver Figura 4.1) e, em outra abordagem, considerar diferentes formas geométricas na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO na forma trapezoidal e semicircular (Ver Figura 4.2 e Figura 4.3). Estas duas análises têm, como função objetivo, maximizar a potência hidropneumática convertida em um dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), obtendo-se assim uma recomendação teórica para a geometria do dispositivo que possui a maior eficiência na conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica.

Considera-se um clima de ondas na escala real com período de 5s e comprimento de onda de 37,6m. Estes valores seguem a recomendação teórica encontrada por Gomes, 2014, referente ao período e comprimento de onda que melhor se adequam ao problema estudado. Quatro graus de liberdade são aprimorados para os diferentes casos investigados: d_1/d_2 (razão entre o comprimento dos eixos da restrição elíptica) para o estudo da restrição física da turbina em formato elíptico, α (ângulo de inclinação da parede) para o estudo da região de transição trapezoidal, r e H_2/l (raio e razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO, respectivamente) para o estudo da região de transição semicircular. No estudo da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo os graus de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO) são mantidos fixos e iguais a $H_1/L=0,1346$, $H_3=9,50$ m. Estes valores são referentes às recomendações teóricas obtidas por Gomes, 2014. Para o caso da região de transição trapezoidal, a razão H_2/l também é mantida constante com valor $H_2/l=3,0$.

As restrições do problema (ou parâmetros constantes) são a área da restrição elíptica (A_R), a área total do dispositivo CAO (A_T), representada pela soma da área da câmara hidropneumática e da chaminé do dispositivo, a razão entre a área da restrição elíptica e a área total (ϕ_n) e a área de entrada da câmara hidropneumática (A_E), representada pela área da câmara hidropneumática, as quais são definidas como:

$$A_R = \frac{d_1 d_2 \pi}{4} \quad (4.1)$$

$$A_T = A_4 = H_1 L + H_2 l \quad (4.2)$$

$$\phi_n = \frac{A_R}{A_T} \quad (4.3)$$

$$A_E = H_1 L \quad (4.4)$$

A escolha destes parâmetros se dá através da definição do que se deseja otimizar com o método Design Construtal associado ao método de busca exaustiva.

A partir da Equação (4.4) pode-se conhecer o valor do comprimento L e a altura H_1 da câmara CAO:

$$L = \left(\frac{A_E}{H_1} \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (4.6)$$

E com a Equação (4.2) calcula-se os valores para o comprimento l e altura H_2 da chaminé do dispositivo CAO:

$$l = \left(\frac{A_T - A_E}{H_2} \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l} \right) \quad (4.8)$$

Assim, o raio (r) da região de transição é também variado, e calculado por:

$$r = \left(\frac{L-l}{2} \right) \quad (4.9)$$

onde L é calculado através da Equação (4.5).

Ao variar o ângulo de inclinação (α) é possível dimensionar a geometria do dispositivo CAO através da seguinte relação:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{H_4}{l} \quad (4.10)$$

Os valores de d_1 e d_2 são definidos da seguinte forma: d_1 segue as recomendações obtidas por Gomes, 2014, e d_2 é calculado através da definição da área da restrição em questão, uma vez que a mesma se mantém fixa varia-se d_2 de forma a manter a área da elipse constante para todos os casos investigados.

Para definir os valores iniciais da geometria e os valores das áreas do dispositivo CAO, são consideradas as características da onda incidente. Um critério é adotado para a definição da restrição da área de entrada da câmara do dispositivo CAO (A_E). Considera-se a situação inicial em que o comprimento do dispositivo CAO (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ) e que a altura do dispositivo CAO (H_I) é igual à altura da onda incidente (H) (Gomes, 2014).

Para determinar a restrição da área da câmara hidropneumática somada à área da chaminé (A_T), é definido que A_E representa 70 % de A_T , ou seja: $A_T = 1,43 A_E$. Neste estudo tem-se que $A_E = 37,6 \text{ m}^2$ (igual ao comprimento de onda) e $A_T = 53,76 \text{ m}^2$.

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

5 MODELO COMPUTACIONAL

O uso de métodos numéricos para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, devido ao 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 simulações de problemas de engenharia e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas são outros fatores motivadores para o uso da metodologia numérica ou computacional [Maliska, 2004].

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

A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é a análise dos sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e reações químicas, por meio de simulações computacionais. Esta ferramenta é aplicada em muitas áreas industriais e não industriais como: aerodinâmica de aeronaves e veículos, plantas de energia com motores de combustão interna ou turbinas de gás, engenharia marinha, engenharia ambiental, hidrologia, oceanografia, meteorologia, engenharia biomédica. O CFD tem como vantagens: a redução substancial de tempo e o custo de novos *designs*, a habilidade para estudar sistemas onde é difícil ou impossível fazer experimentos, a capacidade de estudar sistemas com condições perigosas e, além disso, não tem limite no nível de detalhamento dos resultados [Versteeg e Malasekera, 2007].

Através dessa ferramenta trabalha-se com a discretização do campo de solução do problema e aplicação de um método numérico que permita encontrar de forma adequada à solução do mesmo. Este método de solução aproxima as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento da forma diferencial 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].

De uma maneira geral, os pacotes comerciais de CFD apresentam sofisticadas interfaces aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados [Gomes, 2014]. Para tanto, foram empregados no presente trabalho os *softwares* GAMBIT e FLUENT que constituem um pacote comercial para CFD da empresa ANSYS®.

O *software* GAMBIT é um programa para a construção e discretização de domínios numéricos para cálculo computacional e o FLUENT é um programa baseado no Método dos Volumes Finito [Versteeg e Malalasekera, 2007], para a modelagem de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas.

Estudos que utilizam a modelagem computacional, normalmente, são divididos em três etapas, de acordo com o estudo desenvolvido: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

No pré-processamento, tem-se a introdução do problema no programa de CFD e na subsequente transformação destas informações em uma forma adequada para a solução do problema, assim o pré-processamento é responsável pelos seguintes procedimentos: definir a geometria da região de interesse (domínio computacional), onde foi utilizado o *software* GAMBIT, dividir o domínio em um número finito de subdomínios ou elementos (geração da malha), selecionar o fenômeno físico e/ou químico que será modelado, definir as propriedades do fluido e aplicar condições de contorno e iniciais apropriadas, onde foi empregado o *software* FLUENT.

No processamento, são resolvidas as equações que compõe o modelo do problema, onde foi empregado o *software* FLUENT. Existem três métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais: o Método de Elementos Finitos (MEF), o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Volumes Finitos (MVF). Os três métodos seguem os seguintes passos: aproximação das variáveis de fluxo desconhecidas através de funções simples, discretização das equações presentes no problema e solução das equações algébricas. A diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método [Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1999].

No pós-processamento ocorre à coleta dos resultados obtidos após os cálculos e a análise dos dados pela plotagem de gráficos e topologias, o *software* FLUENT é utilizado

para obter esses resultados, como também foram utilizadas planilhas eletrônicas que permitiram o manuseio dos dados com mais facilidade.

A modelagem computacional realizada no presente trabalho foi desenvolvida empregando o Método dos Volumes Finitos. Para cada variação dos graus de liberdade é desenvolvida a malha, a solução numérica e o processamento dos resultados para determinar a potência, a vazão mássica e a pressão dos problemas estudados. O tempo de processamento de cada simulação é de aproximadamente 4 horas, num computador com processador Intel Core i7 com 8.0Gb de RAM, utilizando processamento em série.

5.1 Método dos Volumes Finitos

A tarefa do método numérico é transformar uma equação diferencial, definida num domínio, em um sistema de equações algébricas. Para isso as derivadas da função existente na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. Transformar as derivadas em termos que contêm a função significa integrar a equação diferencial, e as diversas maneiras de fazê-lo são o que caracteriza o tipo de método numérico [Maliska, 2004].

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 esse 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].

O *software* escolhido para desenvolver esta pesquisa foi o *Ansys Fluent*, o qual é baseado no método numérico dos Volumes Finitos (MVF). O método dos Volumes Finitos foi originalmente desenvolvido como uma formulação especial de Diferenças Finitas. A preferência por este método 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, a qual é a representação da conservação da propriedade em nível de ponto [Maliska, 2004].

O Método dos Volumes Finitos (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 essa fronteira, 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 principal vantagem do Método dos Volumes Finitos é que a discretização espacial é feita diretamente no espaço físico. Assim não há problemas com transformação de sistemas de coordenadas, como ocorre na discretização do Método das Diferenças Finitas (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 e por garantir a conservação local da propriedade do fluido para cada célula do volume de controle. É interessante notar que sob certas condições, o MVF pode ser equivalente ao MDF, ou até mesmo ao Método dos Elementos Finitos (MEF) de baixa ordem, devido às suas propriedades [Blazek, 2001].

Quando os esquemas numéricos empregam a forma conservativa, é assegurada também a conservação global da propriedade do fluido para todo o domínio computacional. Um sistema na forma conservativa ou divergente é aquele em que na equação diferencial os fluxos estão dentro do sinal da derivada e, na primeira integração, aparecem os fluxos nas fronteiras do volume elementar, equivalente, dessa forma, ao balanço.

Existem duas maneiras de encontrar as equações aproximadas de um problema através do MVF. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, e a segunda, é a de integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa [Maliska, 2004].

Os processos são equivalentes, pois basta lembrar que, para deduzir as equações diferenciais que representam os fenômenos físicos é necessário primeiro realizar um balanço em um volume finito, fazendo-se, em seguida, o processo de limites para obter a equação diferencial. A dedução do Método dos Volumes Finitos pode ser encontrada em diferentes bibliografias de mecânica de fluidos computacional como Maliska, 2004, Patankar, 1980 e Fox, 2004.

5.2 Método *Volume of Fluid* (VOF)

A metodologia VOF consiste em reproduzir a interação entre os fluidos envolvidos na simulação numérica do dispositivo do tipo CAO, que são o ar e a água neste caso. A mesma é considerada mais realística se comparada com outras metodologias como a metodologia ar, pois se mostra capaz de representar além da interação entre o ar e a água, a interação destes fluidos com a estrutura do conversor. Validações e verificações desse modelo numérico, aplicado a energia das ondas do mar, e principalmente, a dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em Horku, 2007, Liu et al., 2008a, Liu et al., 2008b, Gomes, 2010, Ramalhais, 2011, Liu et al., 2011, Gomes et al., 2012b, Gomes, 2014, Espinel, 2015, Lima et al., 2015a, Lima et al., 2015b, Dumont et al., 2016, Lima et al., 2016a, Lima et al., 2016b e Lima et al., 2016c.

O método *Volume of Fluid* (VOF) [Hirt e Nichols, 1981] é utilizado neste trabalho. A partir do conceito de fração volumétrica, o método VOF permite a representação 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 de fração volumétrica (α). Define-se a fração volumétrica como sendo uma variável contínua no espaço e no tempo, que representa a presença de um fluido no interior do volume de controle.

Em cada volume de controle, a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária, de forma que se têm três possíveis situações. As células ou volumes de controle, com valores de $\alpha_{\text{água}}$ entre 0 e 1, contém 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 ($\alpha_{\text{água}} = 1$).

As restrições associadas ao modelo VOF são:

- Usar com o modelo *pressure-based* (vide seção 5.6)
- Todos os volumes de controle (ou células) estão cheios de uma fase ou uma mistura das duas fases.

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.1)$$

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha) + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (5.2)$$

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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (5.3)$$

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

O método VOF não calcula explicitamente a posição da superfície livre entre os fluidos. Esta é determinada pela discretização da fração volumétrica na região de interface entre os dois fluidos onde há valores α entre 0 e 1 (Figura 5.1).

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):

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (5.4)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (5.5)$$

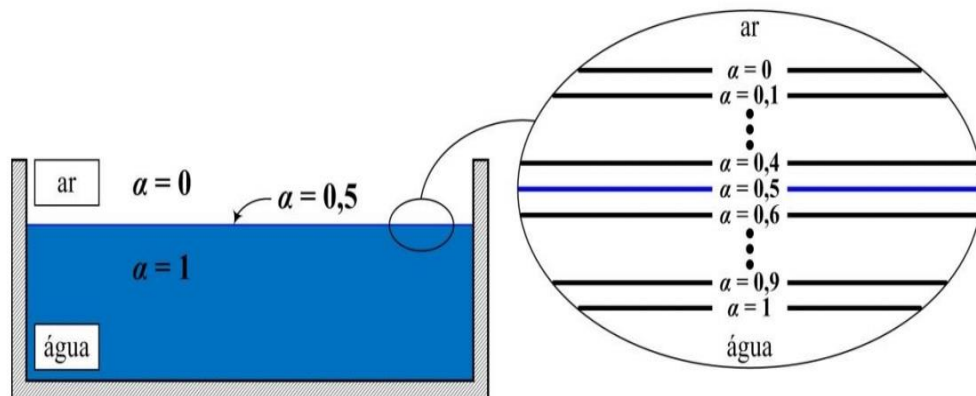


Figura 5.1 – Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume (adaptado de De Brito, 2010).

A equação da fração volumétrica pode ser discretizada no tempo de forma explícita ou implícita. No método implícito de discretização utilizam-se esquemas de interpolação de diferenças finitas para obterem-se os fluxos em todos os volumes, incluindo os próximos a interface [Fluent, 2009].

Na abordagem explícita utilizam-se esquemas de interpolação de diferenças finitas aplicados aos valores da fração de volume que foram computados no passo de tempo anterior. 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 sejam computados e balanceados 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 (*Geo-reconstruct*) e *donor-acceptor* [Gomes, 2010].

Na abordagem de reconstrução geométrica (Figura 5.2), 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. Assume-se que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear 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 da reconstrução geométrica é o cálculo da 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 na célula. O segundo passo é calcular o montante de advecção de cada uma das fases, através da representação de cada interface computadorizada linearmente e das informações sobre a distribuição de velocidades normal e tangencial na face. O terceiro passo é calcular a fração de volume em cada célula, utilizando o balanço dos fluxos calculados durante a etapa anterior [Gomes, 2010].

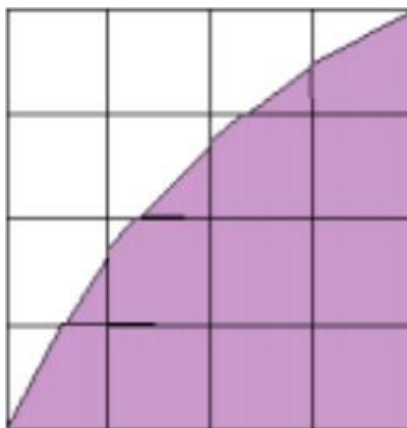


Figura 5.2 – Representação da interface pelo esquema de reconstrução geométrica.

5.3 Domínio Computacional

A representação do princípio de funcionamento dos três diferentes casos estudados do dispositivo CAO presentes neste trabalho necessitam da utilização da modelagem computacional. Na modelagem computacional de um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado, alguns aspectos, como comprimento da onda e a altura da onda a ser gerada, devem ser levados em conta, pois de acordo com as dimensões dessas características definem-se as dimensões do tanque de ondas. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam, esquematicamente, um tanque de ondas com o dispositivo CAO, acoplado bem como algumas características.

O esquema do domínio computacional bidimensional apresentado, nas figuras já citadas, é composto pelo dispositivo CAO inserido em um tanque de ondas. As dimensões do dispositivo são a altura da câmara (H_1), profundidade de submersão do dispositivo (H_3), a altura da chaminé (H_2), comprimento da chaminé (l) e comprimento da câmara (L). O caso da restrição da turbina têm d_1 e d_2 como sendo os eixos da elipse. Para o caso trapezoidal, temos a altura da região de transição H_4 e, para o caso semicircular, temos r como sendo a altura da região de transição. Para representar o problema numa escala adequada no domínio computacional é necessário o conhecimento de algumas características do clima de ondas, como: período (T) e altura (H) para a onda gerada, com uma profundidade ou nível de água (h), assim o comprimento (C_T) e a altura (H_T) do tanque de ondas podem ser definidas utilizando estes parâmetros citados [Gomes et al., 2012b]. 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 (λ). É recomendável que o comprimento do tanque seja, aproximadamente, 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.

Com relação à altura do tanque, é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim, é possível definir que a altura mínima do tanque seja dada pela profundidade mais três vezes a altura da onda. A onda considerada neste trabalho segue uma escala real. As características da onda, tais como, a altura e o período, foram definidos levando-se em conta as características das ondas no Brasil. É importante destacar que a dimensão H_3 , considerada um grau de liberdade, esta relacionada ao quanto o dispositivo CAO está submerso em relação à superfície livre e neste estudo foi mantida fixa e igual a $H_3 = 9,5$ m, com base nos estudos feitos em Gomes, 2014.

As dimensões do tanque e as características da onda são apresentadas na Tabela 5.1 que segue:

Tabela 5.1 - Dimensões do problema e clima de ondas.

| Dimensões | Valores |
|-----------------------------------|---------|
| Período da onda (T) | 5 s |
| Comprimento da onda (λ) | 37,6 m |
| Altura da onda (H) | 1 m |
| Profundidade (h) | 10 m |
| Comprimento do tanque (C_T) | 188 m |
| Altura do tanque (H_T) | 13 m |
| Profundidade da CAO (H_3) | 9,5 m |

5.4 Condições de Contorno

No problema em consideração, a onda incidente no dispositivo conversor é gerada no lado esquerdo do tanque de ondas, como pode ser visto nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. A condição

de contorno empregada neste trabalho é baseada na Metodologia Função utilizada em Gomes, 2014. Esta metodologia, desenvolvida em Horko, 2007, consiste em aplicar ao gerador de ondas uma velocidade prescrita (*velocity inlet*) através de uma função definida pelo usuário (UDF) desenvolvida por Gomes et al., 2009 (Anexo A).

A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2ª ordem. A onda utilizada é classificada como de alta ordem. Entretanto, a influência dos termos de alta ordem é negligenciada, sem perda significativa [McCormick, 1976; Dean & Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005].

É importante ressaltar que, de acordo com a classificação proposta por Chakrabarti (2005), se a onda em consideração for linear serão utilizadas na UDF a Equação (3.19) e a Equação (3.20). Por outro lado, se a onda for considerada de segunda ordem, o que é o caso do trabalho em questão, será utilizado, na UDF, para reprodução do perfil de velocidades, a Equação (3.23) e a Equação (3.24).

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior do tanque e da saída da chaminé do dispositivo CAO, é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (*pressure outlet*) (vide superfície tracejada nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3). Nas demais superfícies do tanque de ondas: superfície inferior e superior lateral direita é imposta uma condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula (*wall*). Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade $h = 10,0$ m.

5.5 Geração e Discretização da Malha

Uma malha gerada de forma correta, respeitando-se as concentrações de volumes no local requerido pelo problema físico, evitando-se elementos distorcidos e com variação suave de espaçamento entre os elementos, não é uma tarefa fácil de realizar. É necessário, portanto, conhecer os métodos de geração de malhas para escolher o que mais se adéqua ao problema estudado [Maliska, 2004].

A solução de um problema de escoamento (avaliando velocidade, pressão, temperatura) numa malha é definida nos nós dentro de cada célula. A aproximação de uma solução em CFD é governada pelo número de células no domínio computacional (na malha). Na maioria

das vezes, um maior número de células garante uma maior exatidão na solução. A precisão e o custo em termos de capacidade do *hardware* e tempo de simulação dependem do refinamento da malha. As malhas ótimas são frequentemente não estruturadas, refinadas em áreas onde ocorrem variações significativas de ponto a ponto e mais grossas em regiões com pouca mudança [Versteeg e Malasekera, 2007].

Existem algumas classificações para o tipo de malha utilizada em trabalhos de CFD. As malhas, basicamente, são definidas como estruturadas e não estruturadas.

O método de malhas estruturadas utiliza um padrão regular e repetido. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros ou triangulares em 2D e elementos tetraédricos ou hexaédricos em 3D. A utilização da malha estruturada possibilita um bom controle na sua construção, bem como um maior nível de precisão dos esquemas numéricos [De Brito, 2010]. Embora a topologia de elementos seja fixa, a malha pode ser moldada para sofrer alterações como torcer ou esticar. Geradores de malhas bem estruturados utilizam equações elípticas sofisticadas para aperfeiçoar a forma da malha automaticamente, buscando a uniformidade e ortogonalidade [Santos, 2008].

A principal vantagem sobre outros tipos de malhas é que a malha estruturada permite a condensação ou a dispersão de pontos nas regiões com gradientes diferenciados do fluxo da grandeza a estudar. Malhas estruturadas possuem um número constante de volumes vizinhos, o que após a discretização das equações da origem a um sistema de equações algébricas, que por sua vez possui uma matriz de coeficientes diagonal. Matrizes diagonais possuem alto índice de esparsidade. Dependendo do método de resolução do sistema linear, somente os elementos não-nulos da matriz serão manuseados, influenciando grandemente na taxa de convergência e no tempo de simulação [Maliska, 2004].

O método de malhas não estruturadas utiliza um conjunto arbitrário de elementos para preencher o domínio computacional e o arranjo dos elementos não apresenta um padrão fixo. Este tipo de malha utiliza triângulos e quadriláteros em 2D, e tetraedros, hexaedros e prismas em 3D. O uso da malha não estruturada permite gerar mais facilmente malhas em torno de geometrias complexas [De Brito, 2010].

Em discretizações não estruturada, podem-se ter diferentes números de vizinhos para cada volume, originando matrizes com banda diagonal variável, o que exige métodos mais elaborados para a solução de sistemas lineares [Maliska, 2004].

A vantagem de métodos de malha não estruturada é que eles se moldam facilmente a geometrias complexas, por apresentarem número ímpar de pontos de amarração, habilitando a solução destes problemas em um período relativamente curto de tempo [Santos, 2008].

A principal desvantagem de malhas não estruturadas é a falta de controle do usuário sobre a disposição da malha, que se limita a definir os limites e tamanhos dos volumes da malha. Além disso, simulações utilizando malhas não estruturadas demandam mais tempo e memória computacional do que as malhas estruturadas [Santos, 2008]. Outra desvantagem da malha não estruturada é a geração de matrizes que não são predominantemente diagonais, dificultando, assim, a sua inversão e, por consequência, a convergência.

Neste estudo, a malha utilizada é bidimensional ou 2D e estruturada, por tratar-se de uma geometria simples, além da possibilidade de se obter maior precisão nos resultados. A proposta utilizada para a geração da malha foi adotar a metodologia *stretched* baseada nos estudos desenvolvidos por Barreiro, 2009, e Gomes et al., 2012a.

Essa estratégia de geração de malha pode ser estendida aos problemas de propagação de ondas regulares em tanques. Portanto, nos casos estudados neste trabalho, para a geração de malhas, 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 [Mavripilis, 1997]. Para fazer isso, o domínio computacional é dividido em três regiões.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam as malhas empregadas no presente trabalho, sendo a malha representada na Figura 5.3, a mesma utilizada em Gomes, 2014. Para as malhas dos outros dois problemas estudados, as mesmas seguem as recomendações para a geração da malha apresentadas em Gomes et al., 2012a.

Como pode ser observado nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, seguindo as recomendações de Gomes et al., 2012a, na direção vertical o tanque de ondas é dividido em três regiões, denominadas A, B e C. Para os casos apresentados neste trabalho, na região da superfície livre da água (região B) é adotado um refinamento de 40 volumes na direção vertical (o tamanho desse intervalo é equivalente a $H/20$) e com 250 volumes na direção horizontal (intervalo equivalente a $\lambda/50$). Além disso, para o caso apresentado na Fig. 5.3, 10 e 90 volumes são usados na direção vertical para a discretização espacial das regiões A e C, respectivamente. Para o caso estudado na Fig. 5.4 e Fig. 5.5 os volumes usados na direção vertical são de 10 e 60 para a discretização espacial das regiões A e C, respectivamente, de acordo com Barreiro,

2009, e Gomes et al., 2012a. Assim, as malhas criadas com as recomendações teóricas encontradas em trabalhos anteriores (Barreiro, 2009, Gomes et al., 2012a e Gomes, 2010) baseadas em testes de qualidade de malha já feitos, possibilitam um ganho no tempo de pré-processamento, uma vez que, com as recomendações teóricas já estabelecidas não se faz necessário o teste de qualidade de malha, pois os mesmos, já foram feitos nos trabalhos acima citados, e encontrando-se com recomendações geométricas.

Para completar o domínio computacional, quadriláteros com 0,1 m de lado foram utilizados na discretização do dispositivo CAO, seguindo as recomendações encontradas em Gomes, 2014. Na Figura 5.4 podem ser observados os detalhes da malha para o caso trapezoidal, enquanto que na Figura 5.5 são apresentados os detalhes da malha para o caso semicircular.

Nos itens que foram 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, onde o mesmo é capaz de tornar mais simples e intuitiva 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, 2009].

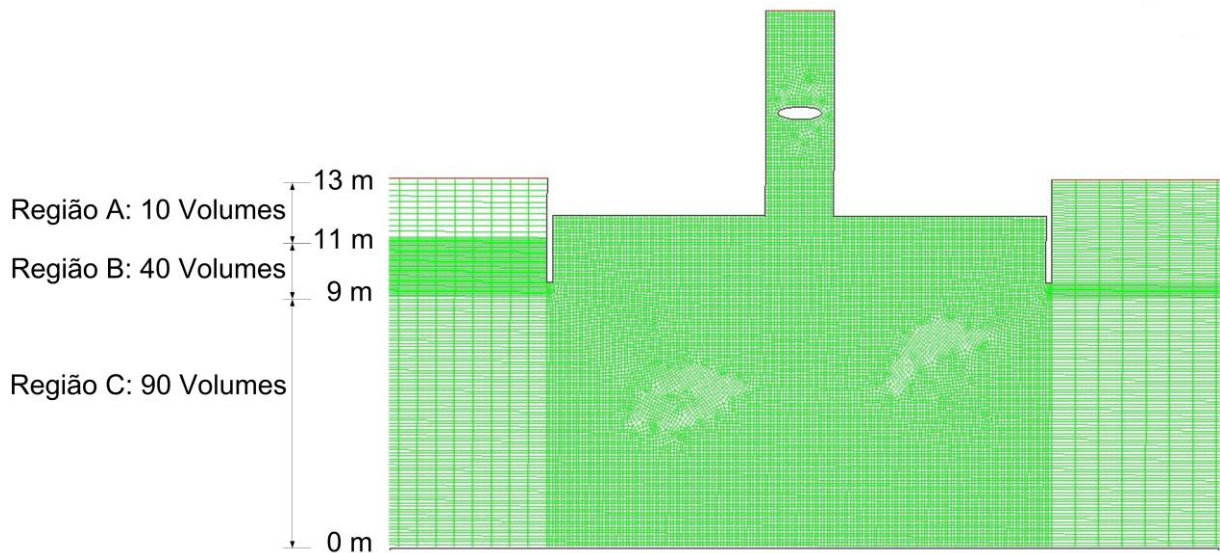


Figura 5.3 – Discretização do domínio computacional do dispositivo com restrição da turbina.

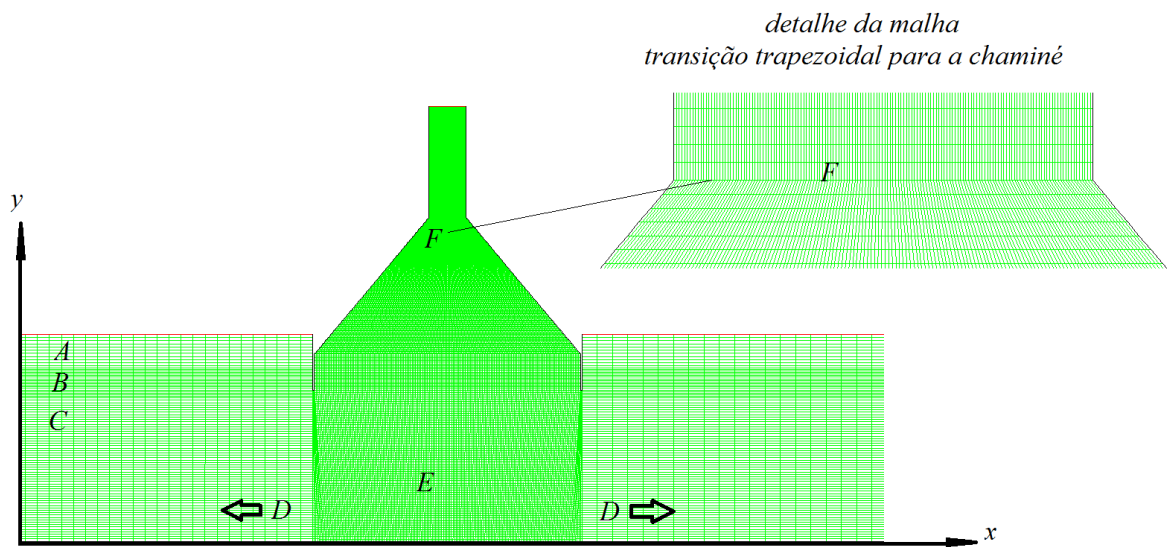


Figura 5.4 – Discretização do domínio computacional com região de transição trapezoidal.

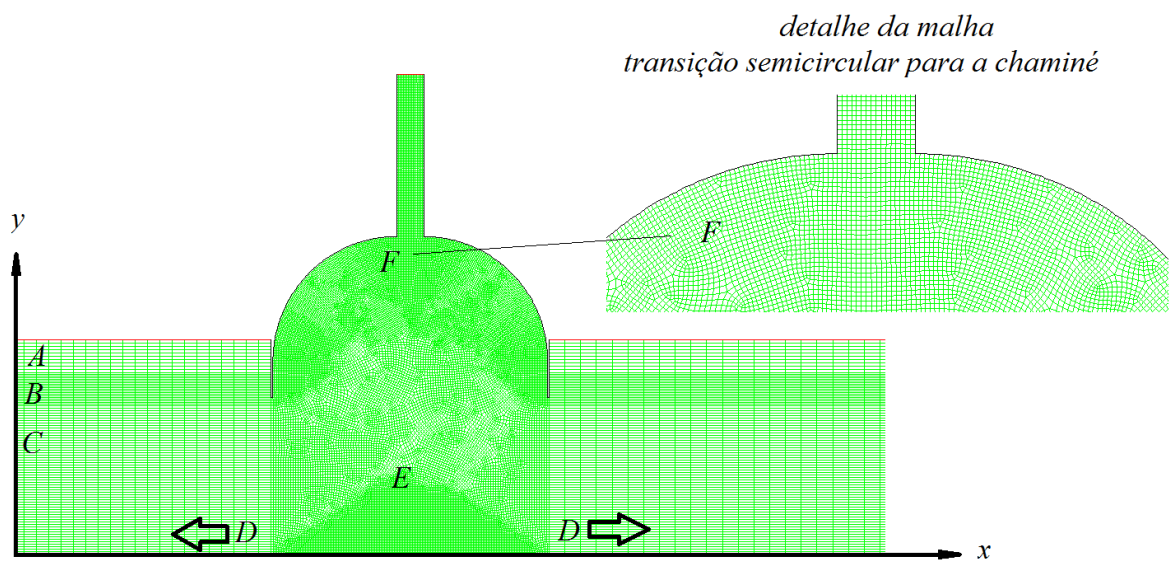


Figura 5.5 – Discretização do domínio computacional com região de transição semicircular.

5.6 Parâmetros de Solução

Com as condições de contorno e as malhas definidas para os problemas estudados, é preciso ajustar os esquemas numéricos os quais são os parâmetros que delimitam como o FLUENT soluciona as equações durante a simulação numérica.

Nesta sessão são fornecidos detalhes sobre o algoritmo de solução utilizado pelo FLUENT, na solução das equações deste trabalho. O FLUENT resolve as equações integrais para a conservação da massa e do movimento e, quando necessário, para a energia e outros escalares, como a turbulência e espécies químicas [FLUENT, 2009].

Os métodos numéricos de solução são: *Pressure-Based solver*, que é empregado para escoamentos de fluidos incompressíveis de baixa velocidade e *Density-Based Solver*, que é utilizado para fluidos compressíveis a alta velocidade. O método *VOF* está acoplado ao solver baseado na pressão. A técnica aplicada pelo método consiste em [FLUENT, 2009],

- Divisão do domínio em volumes de controle discretos usando a malha.
- Integração das equações em cada volume de controle para obter equações algébricas, para as variáveis discretas dependentes como a velocidade, pressão, temperatura, etc.
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equação linear resultante dos valores atualizados das variáveis dependentes.

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.

O algoritmo acoplado resolve um sistema de equações acoplado que compreende a equação de quantidade de movimento e a equação de continuidade. As outras equações são resolvidas de forma dissociada como no algoritmo segregado. A taxa de convergência da solução é melhor neste algoritmo, mas o requerimento da memória do computador aumenta duas vezes comparado com o algoritmo segregado, pois o sistema de todas as equações de quantidade de movimento e continuidade precisa ser armazenado para resolver os campos de pressão e velocidade [FLUENT, 2009].

No método de solução segregado, usa-se um algoritmo de solução onde as equações são resolvidas sequencialmente ou segregadas a partir de outra equação. Isso resultará em um

sistema de equações lineares com uma equação para cada volume do domínio. A solução é efetuada iterativamente até obter convergência. O algoritmo é considerado eficiente para a memória do computador, pois as equações só precisam ser armazenadas na memória uma de cada vez [FLUENT,2009].

Em resumo, 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.

5.6.1. Solução do Sistema de Equações

Para resolver o sistema de equações discretizadas, é usado o *solver* de equações lineares de ponto implícito (Gauss Seidel) junto com o método Multigrid Algébrico (AMG). O método AMG é usado para acelerar a convergência do *solver*, computando correções em uma série de níveis de malha grossa. O uso deste método reduz o número de iterações e o tempo da CPU para obter a convergência da solução, especialmente quando se tem um grande número de volumes de controle [FLUENT, 2009].

O método multigrid é composto de dois princípios básicos: princípio da suavização e princípio da malha grossa. O princípio da suavização assegura que métodos iterativos clássicos (como Gauss-Seidel, por exemplo), quando aplicados apropriadamente a problemas elípticos discretos, tem 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 [Sueró, 2010].

O AMG está caracterizado pelos parâmetros de suavização (*pré-sweeps*), os parâmetros de engrossamento (*post-sweeps*) e os parâmetros relacionados aos ciclos (*max cycles*). Em Gomes, 2014, foi desenvolvido um estudo para analisar a relação destes parâmetros e o tempo de simulação. Os resultados mostram que um valor de três para os parâmetros de pré e pós-suavização permitem obter a convergência nas simulações numéricas em menor tempo computacional.

5.6.2. Função de Interpolação

O Fluent usa a técnica do volume de controle para converter as equações pertencentes ao problema em equações algébricas que possam ser resolvidas numericamente. Esta técnica consiste em integrar as equações em cada volume de controle, resultando em equações discretas que conservam cada quantidade com base no volume de controle [Duarte, 2006].

Para a discretização da equação de quantidade de movimento, são associados valores discretos da variável no centro do volume de controle. Mas, para as faces dele, os esquemas de discretização *Upwind* de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, *Power law* e *Quick* estão disponíveis.

- *Upwind* de primeira ordem: Quando este esquema é utilizado, assume-se que o valor da variável no centro do volume de controle pode ser considerado como o valor médio de todo o volume.
- *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. A solução para as faces é obtida usando uma expansão de série de Taylor a partir da solução do centro do volume de controle.
- *Power Law*: Este método faz uma interpolação usando a solução exata da equação de convecção-difusão para uma dimensão. Logo, após fazer a integração, a equação fica em função do número de Peclet.
- *Quick*: Este esquema é baseado na média ponderada de *Upwind* de segunda ordem e em uma interpolação central da variável.

Para este trabalho foi escolhido o esquema *Upwind* de primeira ordem.

5.6.3. Esquema de Discretização

Para a solução numérica da equação da quantidade de movimento, Equação (5.3), o campo de pressão 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. 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, 2009].

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, 2009].

O esquema de discretização da fração volumétrica utiliza o esquema *Geo reconstruct*, que é utilizado neste trabalho. Ele é o esquema mais preciso e, geralmente, aplicável para malhas, incluindo as não-estruturadas. O esquema assume que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear dentro de cada célula, o que é utilizado para calcular a advecção do fluido através das faces da célula.

5.6.4. Avaliação do Gradiente

O gradiente é utilizado na discretização das equações e ele contribui na construção dos valores da variável nas faces do volume de controle. O gradiente de uma variável conhecida é empregado para discretizar os termos da convecção e difusão nas equações de conservação. Os métodos disponíveis são *Green Gauss Cell Based*, *Green Gauss Node Based* e *Least Squared Cell Based*. No método *Green Gauss Cell Based* (o selecionado) o valor da variável é tomado de uma média aritmética dos valores dos volumes de controle mais próximos. Detalhes deste método podem ser encontrados em FLUENT, 2009.

5.6.5. Acoplamento Pressão-Velocidade

Para o acoplamento pressão-velocidade foi adotado o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), cuja relação de aproximação entre as correlações para a pressão e velocidade possui um grau mais elevado que os métodos SIMPLE e SIMPLEC, pois emprega duas correções a mais do que estes: a correção da vizinhança e a correção da assimetria [Gomes, 2010].

- 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. O algoritmo SIMPLE usa uma relação de correção entre a velocidade e a pressão e garante que a conservação de massa é satisfeita. Este método é muito usado na condição de estado estável.
- 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 significativos do que aqueles no SIMPLE. Como no método SIMPLE ele é utilizado na condição de estado estável.
- Método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): O esquema de acoplamento da pressão-velocidade PISO é da família do SIMPLE, e é baseado no grau mais alto da relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade. Para melhorar a eficiência dos cálculos, o algoritmo PISO possui duas correlações adicionais: correção das vizinhanças e correção “*skewness*”. Este algoritmo é utilizado para problemas em estado transiente, que é o caso deste estudo.

Detalhes mais aprofundados dos métodos podem ser encontrados em Patankar, 1980.

5.6.6. Discretização temporal

De acordo com FLUENT, 2009, no sistema de solução segregado o erro total de discretização do tempo é determinado pela escolha da discretização temporal (isto é, primeira ordem e segunda ordem) e pela forma com que as soluções avançam à próxima etapa (esquemas de avanço do tempo). Existem duas formas de aproximação para o avanço do tempo: iterativo e não iterativo.

No esquema iterativo todas as equações são resolvidas iterativamente para cada passo de tempo até conseguir a convergência, com esse método a não-linearidade das equações está totalmente contabilizada, eliminando o erro de divisão. Desta forma, o avanço da solução em um passo de tempo exige um esforço computacional considerável devido ao grande número de iterações externas executadas em cada passo de tempo [FLUENT, 2009].

A ideia básica do esquema de avanço não-iterativo (NITA-*Non-Iterative Time Advancement*), utilizado neste trabalho, é que para preservar a precisão total no tempo, não é necessário reduzir o erro a zero, mas somente se deve 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.

Um parâmetro importante para a precisão dos resultados de uma simulação numérica é a definição do passo de tempo. O uso de valores inadequados pode provocar a perda de informações e a não convergência das soluções [Barreiro, 2009]. O passo de tempo (*time step*) empregado nas simulações desta pesquisa foi de 0,01s. O tempo total para cada simulação é de 30 s, o qual é o tempo onde à propagação da onda torna-se estável e sem efeitos de reflexão. O tempo computacional médio das simulações foi de 4 horas.

O estudo realizado tratou de um escoamento transiente e laminar, onde mesmo sabendo que as velocidades do escoamento que ocorrem no interior da câmara hidropneumática e na chaminé do dispositivo caracterizam-se por um escoamento turbulento, ainda não foi possível estabelecer um algoritmo que realize a distinção entre a velocidade de propagação do fluido nas fases água e ar, os quais são diferentes. Com o código que se possui, não é possível verificar essa diferença de velocidade e a aplicação da turbulência na condição de contorno de velocidade prescrita não reflete o verdadeiro efeito da mesma no escoamento em questão. Um

estudo de escoamentos turbulentos em dispositivos CAO tridimensionais é feito em Conde e Gato, 2008.

Na Tabela 5.2 tem-se um resumo de todos os parâmetros e esquemas numéricos empregados nas simulações deste estudo.

Tabela 5.2- Parâmetros de simulação adotados.

| Formulação | Parâmetros adotados |
|---------------------|--|
| | Transiente |
| Solução no tempo | Formulação implícita de 1ª ordem Baseado na pressão Avanço não iterativo |
| Modelo VOF | Formulação explícita |
| Controle da solução | Método de acoplamento pressão-velocidade: PISO Método de discretização da pressão: PRESTO! Formulação da quantidade de movimento: <i>Upwind</i> de 1ª ordem Esquema de discretização da fração geométrica: <i>Geo-reconstruct</i> |

5.7 Linhas e Pontos de Monitoramento

O procedimento de interpretação dos resultados obtidos através das medições realizadas pelas superfícies de monitoramento (as quais são as sondas de medição ou superfícies distribuídas no domínio computacional para salvar os dados em cada iteração) vai ser apresentado nesta sessão.

Os estudos e casos presentes nesta pesquisa consideram as mesmas variáveis de interesse, independente da geometria da região de transição ou da obstrução que se apresenta na chaminé do dispositivo. Na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 são apresentados os domínios computacionais para os casos estudados, quando são analisados dispositivos CAO *offshore*.

Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 são definidas e apresentadas às sondas de medição ou superfícies de monitoramento no domínio computacional e suas devidas posições. A posição das sondas varia proporcionalmente à variação geométrica do dispositivo.

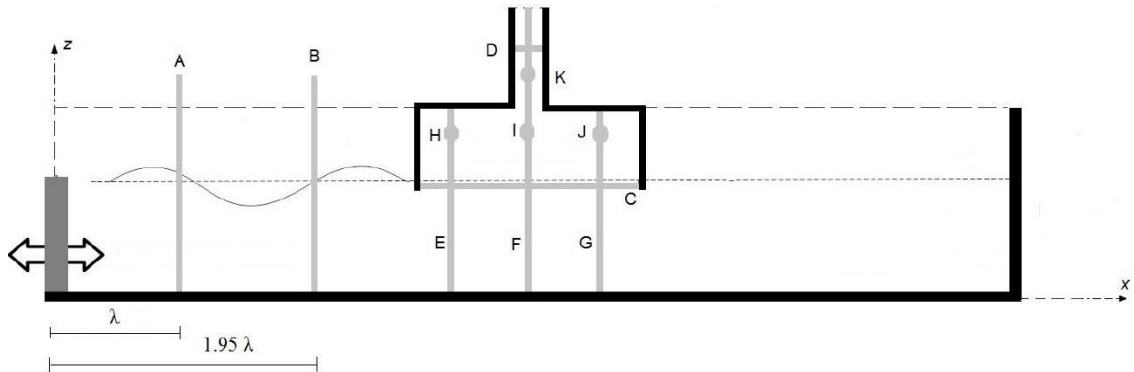


Figura 5.6 – Superfícies de monitoramento no domínio computacional [Gomes, 2014].

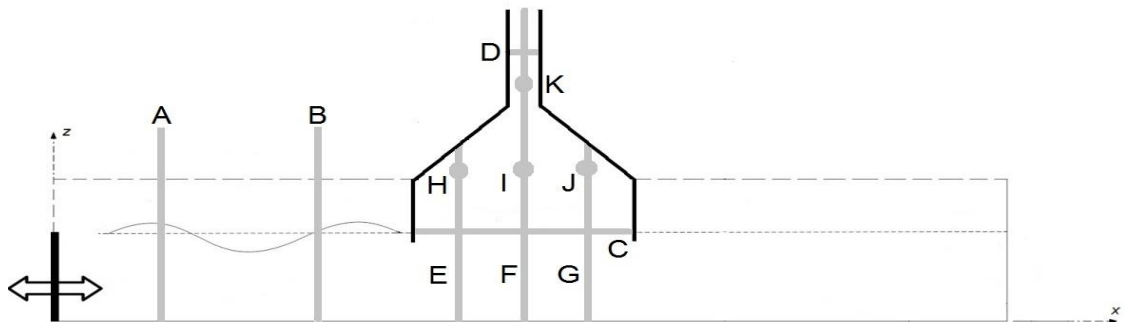


Figura 5.7 – Superfícies de monitoramento no domínio computacional, região de transição trapezoidal.

A função das linhas de monitoramento A, B, E, F e G são medir a elevação de água (superfície livre) através da seguinte integral,

$$\int \alpha dA = \sum_{i=1}^n \alpha_i |A_i| \quad (5.6)$$

onde α é a quantidade de água em cada volume e A_i é a área de cada volume (m^2), mas, por se tratar de uma linha, representa o comprimento de cada volume de controle bidimensional.

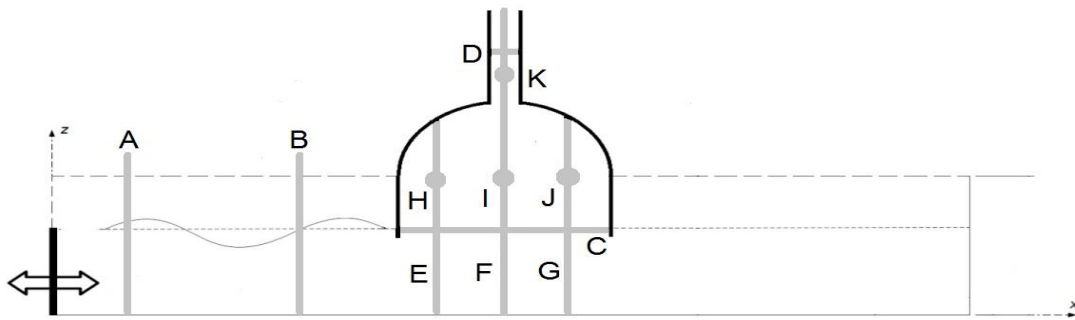


Figura 5.8 – Superfícies de monitoramento no domínio computacional, região de transição semicircular.

Importante destacar que a posição das sondas E , F , e G são variáveis, uma vez que dependem da configuração geométrica da câmara CAO. A média aritmética da elevação da superfície livre medida nestas linhas de monitoramento, indica a elevação de água dentro 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 função da linha horizontal C localizada na entrada da câmara CAO é monitorar a vazão volumétrica, dada por,

$$\int v \cdot dA = \sum_{i=1}^n v_i A_i \quad (5.7)$$

onde v representa a velocidade na direção y (m/s) e A_i a área da superfície que é atravessada pelo escoamento de ar (m²).

Na linha de monitoramento D , localizada no centro da chaminé da câmara CAO, é medida a vazão mássica,

$$\int \rho_{ar} v \cdot dA = \sum_{i=1}^n \rho_{ar,i} v_i A_i \quad (5.8)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m³).

Na linha D também é medida a pressão estática P_e ,

$$\frac{1}{A} \int P_e dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n P_{e_i} |A_i| \quad (5.9)$$

onde n é o número de volumes, P_e é a pressão estática (Pa).

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

$$P = P_e + P_d \quad (5.10)$$

onde P_d é a pressão dinâmica (Pa) dada por:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5.11)$$

Por fim, as sondas O , I , J e K são pontos que medem a pressão total.

Neste trabalho foram avaliadas a vazão mássica (na saída da chaminé), a pressão (no interior da câmara), a eficiência e a potência hidropneumática.

Os valores médios foram calculados empregando a média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) [Marjani et al, 2006]:

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (5.12)$$

onde x representa a grandeza que se deseja calcular a média RMS.

A potência hidropneumática é calculada por [Dizadji e Sajadian, 2011]:

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (5.13)$$

onde: P_{ar} é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa), ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), \dot{m} é a taxa de vazão mássica atravessando a chaminé (kg/s), v_{ar} é a velocidade do ar na chaminé (m/s) dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (5.14)$$

onde: A representa uma área em corte transversal da chaminé (m^2). Como o estudo realizado é bidimensional a terceira dimensão é considerada unitário.

Conforme apresentado em [Zhang et al., 2012] é possível definir a eficiência hidropneumática de um dispositivo CAO como:

$$\varepsilon = \frac{E_{CAO}}{P_{INC}T_W} \quad (5.15)$$

onde: E_{CAO} é a energia absorvida pelo dispositivo CAO (J), calculada por:

$$E_{CAO} = \int_0^T P(t)q(t)dt \quad (5.16)$$

onde: T é o período da onda (s), $P(t)$ é a pressão instantânea do ar no interior da câmara CAO (Pa), e $q(t)$ é a vazão volumétrica (m^3/s), dada por:

$$q(t) = v(t)LL_1 \quad (5.17)$$

sendo $v(t)$ a velocidade instantânea vertical da superfície livre (m/s), L o comprimento da câmara CAO (m) e L_1 a largura do dispositivo CAO (m), que como foi citado anteriormente é considerada unitária.

A potência da onda incidente (W) ao dispositivo CAO é dada por:

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (5.18)$$

onde ρ é a massa específica da água ($998.2kg/m^3$), g é a aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$), A amplitude da onda (m), ω a frequência da onda (s^{-1}), k o número de onda e h a

profundidade de água (m). E, por fim, T_w é o período considerado para a análise da eficiência (s). A potência da onda incidente no presente trabalho, calculada pela Equação (5.18), é igual a 5692,65W.

Para maiores detalhes do cálculo da eficiência de um dispositivo do tipo CAO, recomenda-se consultar Horko, 2007, e 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.

5.8 Verificação e Validação do Modelo Numérico

Semelhante ao que ocorre com modelos físicos, que em geral são uma representação em escala de um protótipo, os modelos computacionais, muitas vezes, são construídos em escala reduzida, também chamada de escala de laboratório [Seibt, 2014].

Esse é um recurso bastante usado para pesquisas e desenvolvimento de projetos de engenharia, sendo essencial para validação de estudos por métodos computacionais, pois os modelos físicos de laboratório fornecem dados para validação do estudo numérico. Por outro lado, as equações do modelo matemático, em sua forma analítica, proporcionam a verificação do modelo em relação à base teórica do estudo [Seibt, 2014].

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 Equação (3.18) e Equação (3.23) [Gomes, 2014].

No presente trabalho, a verificação do modelo computacional foi realizada comparando a elevação da superfície livre ao longo do tempo, numa posição específica obtida de forma numérica, com a respectiva solução analítica.

Na Figura 5.9, foram comparados os resultados numéricos com os analíticos, os quais foram obtidos pela Equação (3.23) na posição $x = 22,5\text{m}$. A verificação da solução numérica foi realizada no intervalo entre 20 e 30s onde a onda numérica está estável, ainda não há efeitos de reflexão e de forma qualitativa é possível observar um comportamento semelhante

entre as soluções numérica e analítica. A diferença relativa entre as soluções numérica e analítica foi medida instantaneamente, e a média das diferenças foi 2,61%, onde o valor mínimo obtido foi 0,0019% e o valor máximo de 5,86%. Estes resultados indicam a acurácia do modelo.

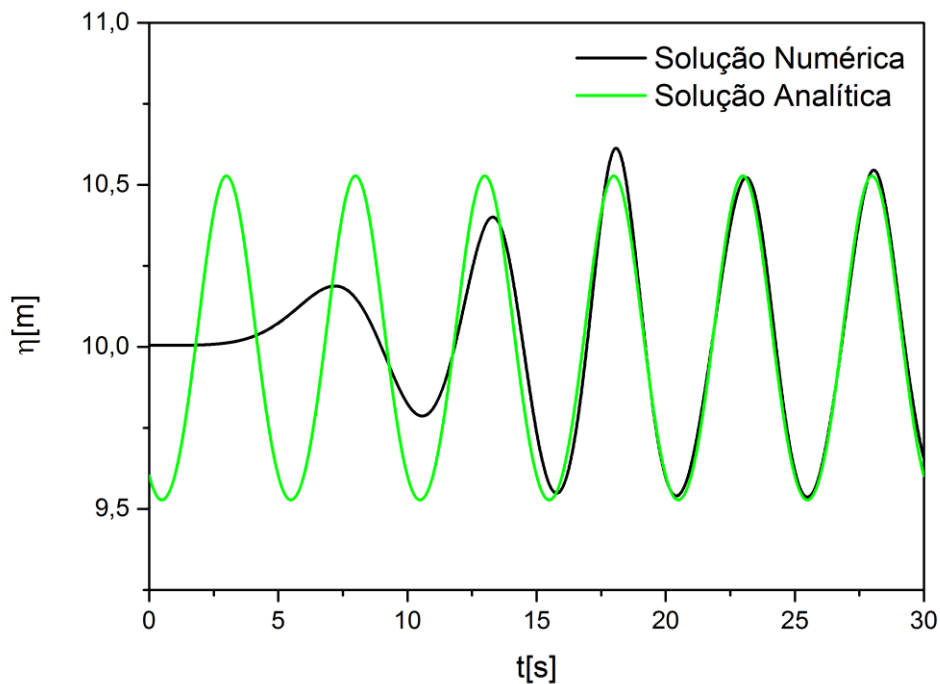


Figura 5.9 – Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo na posição $x = 22,5$ m.

Outra etapa do trabalho consiste em validar o modelo numérico, considerando a interação entre a água, o ar e a estrutura do dispositivo CAO. O processo de validação do modelo computacional consiste numa comparação dos resultados de experimentos. Em Gomes, 2014, apresenta-se um estudo onde a solução numérica para a interação água e ar, variação de pressão e da velocidade no interior da câmara CAO são comparadas com resultados experimentais e validados, comparando com o trabalho de Liu et al., 2011, para uma geometria definida do dispositivo CAO que é submetida a ondas com diferentes períodos que variam entre 3,5 e 8,0s. Os resultados da comparação indicam que as soluções numéricas para a amplitude relativa (relação entre amplitude do movimento da superfície livre no interior do dispositivo CAO e a amplitude da onda incidente), a pressão máxima no interior da câmara CAO e a velocidade na chaminé de saída do dispositivo CAO têm o mesmo comportamento qualitativo comparado com os resultados experimentais [Espinel, 2015].

Detalhes do processo da validação da modelagem computacional de conversores de energia das ondas podem ser vistos também 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., 2012b.

5.9 Análise dos Graus de Liberdade

A técnica utilizada neste trabalho foi o Design Construtal, associada ao método de busca exaustiva, com quatro graus de liberdade sendo a razão d_1/d_2 avaliado para a restrição física que representa a turbina, o raio r e a razão H_2/l da altura e largura da chaminé do dispositivo para o caso com região de transição semicircular e o ângulo α de inclinação da parede para o caso com região de transição trapezoidal. Foi encontrada a configuração ótima para os casos estudados e, assim, uma recomendação teórica acerca da geometria do dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO. Os diagramas nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 exemplificam o procedimento.

Para cada grau de liberdade analisado é calculada a potência hidropneumática, a vazão mássica e a pressão. A solução considerada ótima é a que apresenta maior potência hidropneumática. Mas, para o caso em que se apresenta a restrição da turbina, é considerado também o espaço entre as pás da mesma e a parede da chaminé do dispositivo CAO. Assim, para alguns casos da restrição elíptica, a melhor potência hidropneumática não corresponde ao melhor caso. Portanto, é analisado em conjunto com o espaçamento das hélices da turbina, para assim se atribuir a uma geometria a classificação de caso com melhor desempenho.

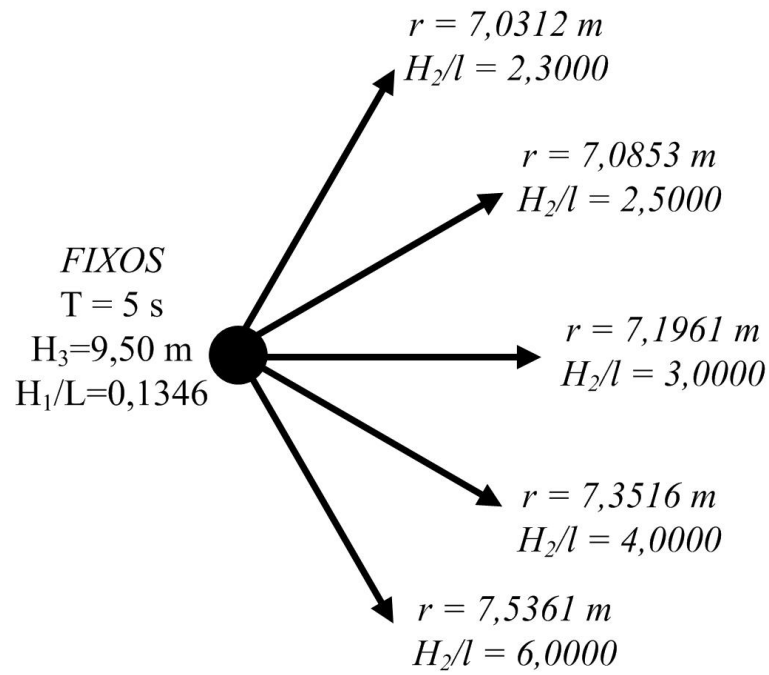


Figura 5.10 – Variação de r e H_2/l .

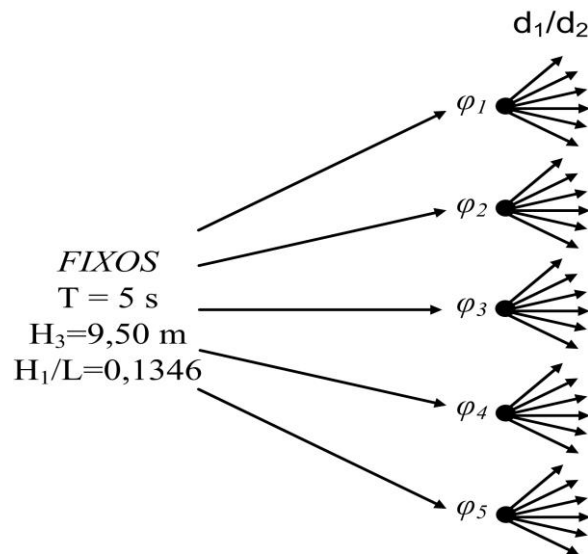


Figura 5.11 – Variação de d_1/d_2 .

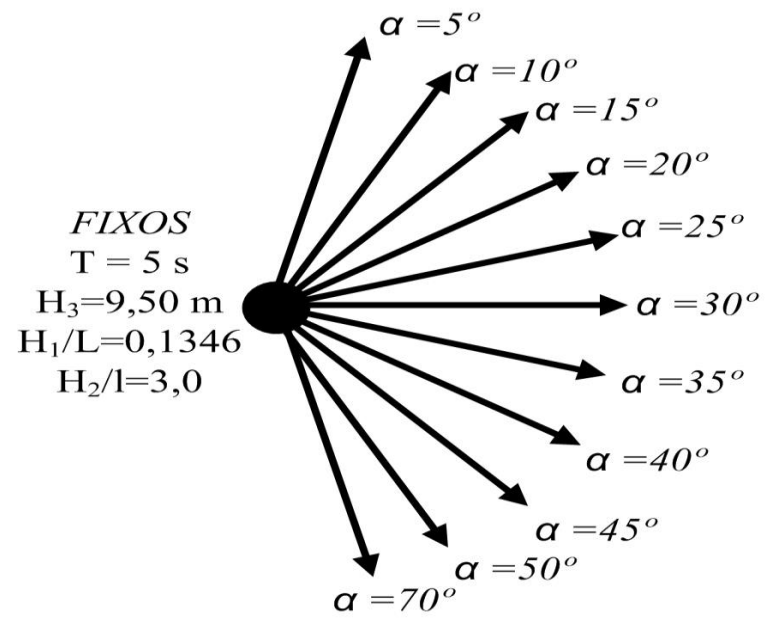


Figura 5.12 – Variação de α .

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente estudo sobre o dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, foi dividido em três análises de casos distintos, dois casos com região de transição (trapezoidal e semicircular) entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo conversor e um caso onde foi estudada a geometria da obstrução que representa a turbina, a qual se localiza na chaminé do mesmo. Cada uma das avaliações consistiu de um conjunto de simulações numéricas realizadas a partir do modelo computacional descrito anteriormente.

A proposta é aplicar Design Construtal para aperfeiçoar a geometria bidimensional de um dispositivo do tipo CAO e assim obter um melhor aproveitamento da energia presente no clima de ondas estabelecido para os três casos de configurações geométricas estudadas e determinar relações entre a onda incidente e a configuração geométrica do dispositivo conversor.

A função objetivo é o valor da média RMS para a potência hidropneumática calculada a partir da Equação (5.24). 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, mas sempre levando em conta as dimensões físicas aceitáveis para um problema real. O estudo foi realizado para uma onda em escala real. O clima de ondas e as dimensões do tanque de ondas são apresentados na Tabela 5.1.

6.1 Caso com Região de Transição Trapezoidal

O primeiro problema estudado aborda a análise geométrica da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO no formato trapezoidal. A principal justificativa para este estudo decorre da busca de diferentes geometrias, que tenham uma potência hidropneumática alta e que representem alternativas diversas na construção de dispositivos CAO *offshore*.

O grau de liberdade analisado foi o ângulo de inclinação (α) da parede da transição trapezoidal, entre a câmara hidropneumática e a chaminé. No presente estudo o grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) é mantido fixo e igual

a $H_1/L = 0,1346$, conforme indicado em Gomes, 2014. A relação H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) e a medida H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO), também consideradas graus de liberdade, são fixas e valem respectivamente $H_2/l = 3,0$ e $H_3 = 9,50$ m.

Ao todo foram analisadas onze configurações geométricas para o caso em que a região de transição é no formato trapezoidal. Na Tabela 6.1 é possível verificar as dimensões destas configurações onde os valores que se apresentam repetidos na tabela, representam os valores constantes utilizados no método Design Construtal. Todas as medidas para o caso trapezoidal foram calculadas através das Equações (4.1 - 4.10). Ainda considerando a Tabela 6.1 é possível verificar que somente o ângulo α e a altura H_4 variam.

Na Figura 6.1, são apresentados os resultados para a potência hidropneumática, a pressão e vazão mássica para os casos investigados neste trabalho, também é possível verificar estes valores na Tabela B.1.

Analisando os resultados apresentados na Tabela B.1 e na Figura 6.1 é possível verificar que a variação do ângulo α conduz a um aumento da média RMS da vazão mássica e da pressão, em consequência disso tanto a potência hidropneumática quanto a eficiência também aumenta.

Tabela 6.1 – Variação geométrica da região de transição trapezoidal.

| Casos | α [°] | H_4 [m] | L [m] | l [m] | l_1 [m] | H_1 [m] | H_2 [m] | A_{Tran} [m ²] |
|-------|--------------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|
| 1 | 5 | 0,6296 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 5,9920 |
| 2 | 10 | 1,2689 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 12,0765 |
| 3 | 15 | 1,9282 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 18,3516 |
| 4 | 20 | 2,6192 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 24,9280 |
| 5 | 25 | 3,3556 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 31,9370 |
| 6 | 30 | 4,1547 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 39,5423 |
| 7 | 35 | 5,0387 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 47,9567 |
| 8 | 40 | 6,0382 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 57,4693 |
| 9 | 45 | 7,1961 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 68,4892 |
| 10 | 50 | 8,5760 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 81,6223 |
| 11 | 70 | 19,771 | 16,7137 | 2,3215 | 7,1961 | 2,2497 | 6,9645 | 188,1726 |

Constata-se através da Figura 6.1 que para ângulos $\alpha < 45^\circ$ as variações de vazão mássica e pressão são pequenas (cerca de 7,8% para vazão mássica e 10,4% para pressão) e apresentam valores muito próximos para os ângulos testados. Já para um intervalo de $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ a influência da variação da geometria da câmara hidropneumática causa alterações significativas nos parâmetros avaliados. Considerando a Tabela 6.1 observa-se que à medida que a inclinação da região trapezoidal aumenta a área da transição também aumenta. Portanto conclui-se, neste caso, que pequenos valores de área na região de transição são propícios para o bloqueio da incidência da onda no dispositivo.

Relacionando os resultados obtidos com a fenomenologia adotada neste estudo, é possível verificar que a potência hidropneumática que otimiza o desempenho do dispositivo conversor, apresenta-se para o caso de $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ e $7,19\text{m} < H_4 < 19,77\text{m}$. Como a função objetivo é a potência hidropneumática, tem-se para $\alpha = 70^\circ$ e $H_4 = 19,77\text{m}$ a geometria que apresenta o melhor desempenho do dispositivo CAO, sendo assim $\alpha = (7h)^\circ$ e $H_4 = (\lambda/2) + H$.

Na Figura 6.2 é apresentado o comportamento transiente da pressão e da vazão mássica do ar no interior da chaminé do dispositivo CAO para as geometrias que tiveram melhor e pior desempenho. A média RMS nestes dois casos foi calculada no período estável entre 15s e 30s.

É possível ver na Figura 6.3, em que é apresentada a topologia do campo de velocidades na direção y e as fases água e ar nas cores vermelha e azul, respectivamente, que quando se tem a inclinação $\alpha = 70^\circ$ existe uma pequena região de recirculação de ar no interior do dispositivo, tanto na fase de compressão quanto na de descompressão. É possível verificar em Gomes, 2014, quando a transição da câmara CAO para a chaminé é no formato retangular ($\alpha = 90^\circ$), inevitavelmente ocorrem regiões de recirculação.

Assim o melhor desempenho foi verificado para $\alpha = 70^\circ$ com $P = 29,2\text{Pa}$, $P_{hid} = 121,1\text{W}$ e $\varepsilon = 41,5\%$; o caso com menor desempenho foi para $\alpha = 5^\circ$ com $P = 26,2\text{Pa}$, $P_{hid} = 96,4\text{W}$ e $\varepsilon = 32,8\%$. O resultado representa um aumento de 10,5% na pressão do ar na saída da chaminé, um aumento de 20,4% na potência hidropneumática e um aumento de 20,8% na eficiência do dispositivo. Assim, foi possível estabelecer uma recomendação teórica para o dispositivo CAO com a região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé no formato trapezoidal, onde na Tabela 6.1 o caso onze representa a melhor geometria para esta investigação.

Conclui-se através da Figura 6.2 que o caso com melhor e pior desempenho apresentam resultados muito próximos no caso de vazão mássica e pressão para o problema transiente. Assim, pode-se concluir que o estudo da região de transição no formato trapezoidal se mostra ineficiente, uma vez que, seus resultados não representam um ganho significativo quando comparados os casos de mais alto e baixo desempenho, sendo assim uma alternativa inviável para uma implementação efetiva da mesma.

Destaca-se que este estudo não se anula, pois o mesmo faz parte do estudo de novas formas de região de transição para uma abordagem distinta do dispositivo CAO em formato retangular e sem região de transição.

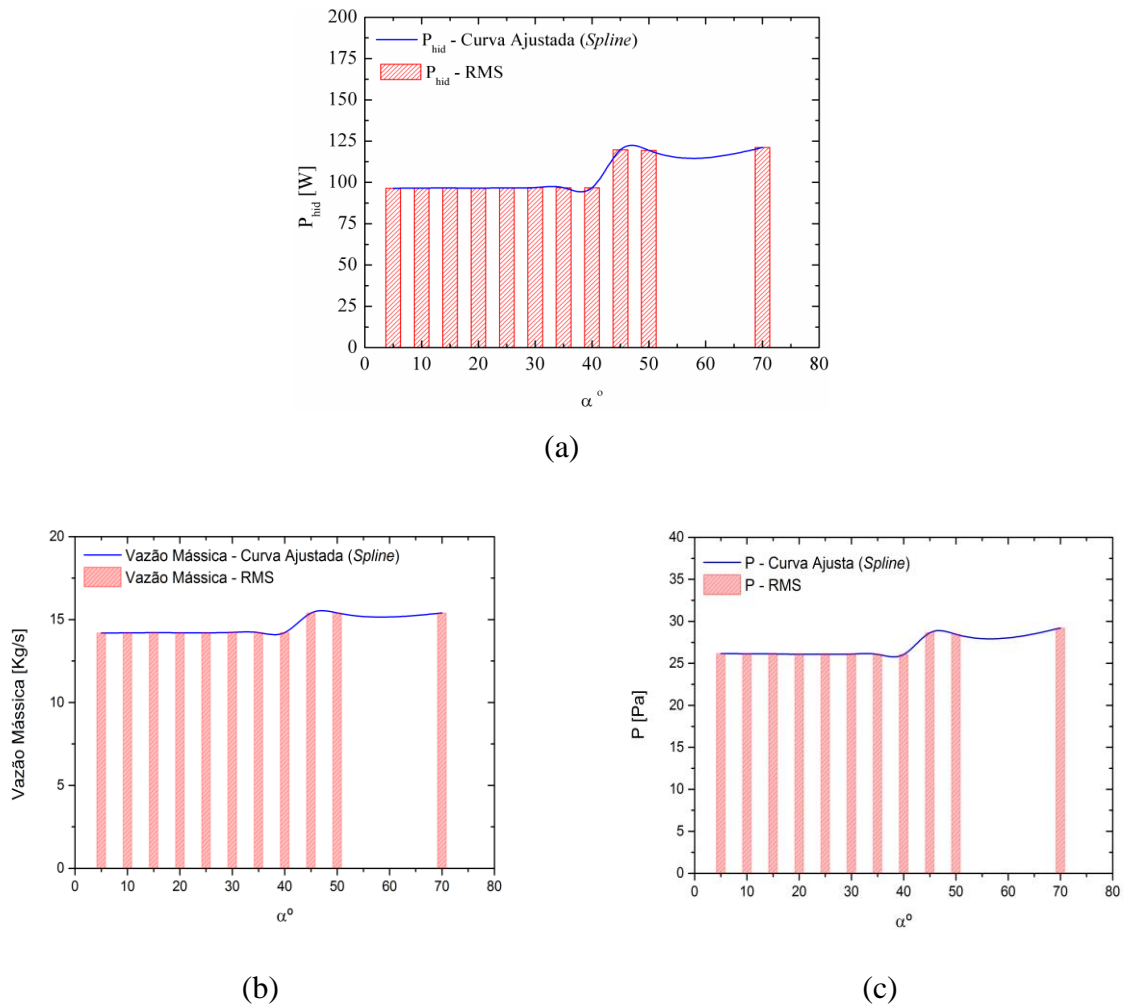


Figura 6.1 – Resultados da potência hidropneumática (a), vazão mássica (b) e pressão (c) para o caso com região de transição trapezoidal variando o ângulo de α utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais.

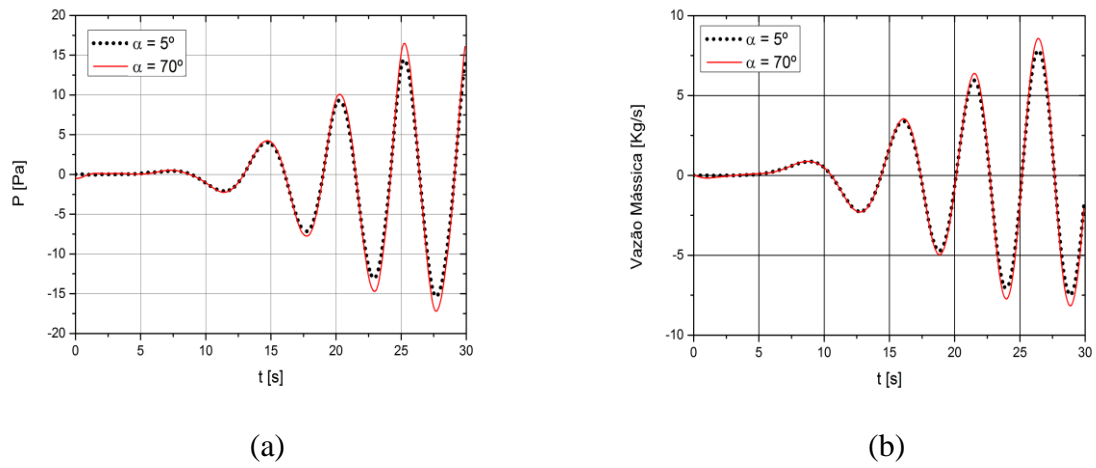


Figura 6.2 – Variação da pressão (a) e vazão mássica (b) em relação ao tempo para o pior e melhor desempenho do caso com região de transição trapezoidal.

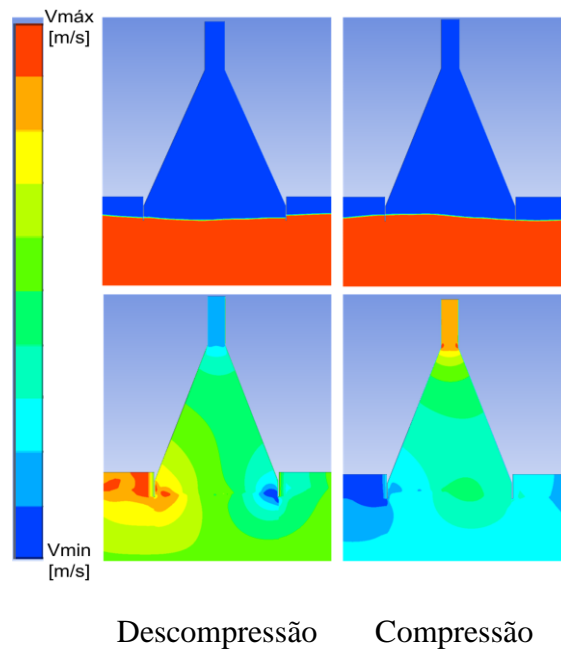


Figura 6.3 – Topologias da velocidade na direção y (m/s) e fases água e ar, para a fase de descompressão e compressão para o caso de melhor desempenho com região de transição trapezoidal.

6.2 Caso com Região de Transição Semicircular

O segundo problema proposto foi o caso com região de transição semicircular. Como o problema estudado na sessão anterior, a função objetivo continua sendo a potência hidropneumática e uma geometria que se adeque a esta potência, ou seja, que maximize a mesma. Onde se utiliza o método Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, para se obter o caso de melhor desempenho.

Os graus de liberdade considerados são raio (r) e H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO). Assim, como no caso da região de transição trapezoidal, o grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) é mantido fixo e $H_1/L = 0,1346$.

Com a variação do grau de liberdade H_2/l , é possível definir o diâmetro (l) e a altura (H_2) da chaminé de saída da câmara CAO, através da Equação (4.7) e da Equação (4.8), respectivamente. Assim o raio (r) da região de transição é também variado, e calculado pela Equação (4.9). A função objetivo permanece a mesma do problema anteriormente estudado, sendo assim considerada a média *RMS* da potência hidropneumática.

Para este caso foram analisadas cinco configurações geométricas, conforme é possível verificar na Tabela 6.2, onde se tem as dimensões das mesmas e suas geometrias foram calculadas através das Equações (4.5 – 4.9). Os valores que se apresentam repetidos, referem-se aos parâmetros mantidos constantes no método Design Construtal.

Tabela 6.2 – Variação geométrica da região de transição semicircular.

| Casos | r [m] | (H_2/l) [m] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] | A_{Tran} [m ²] |
|-------|---------|---------------|---------|---------|-----------|-----------|------------------------------|
| 1 | 7,0312 | 2,3000 | 16,7137 | 2,6513 | 2,2497 | 6,0981 | 96,2977 |
| 2 | 7,0853 | 2,5000 | 16,7137 | 2,5431 | 2,2497 | 6,3577 | 96,8745 |
| 3 | 7,1961 | 3,0000 | 16,7137 | 2,3215 | 2,2497 | 6,9645 | 98,0470 |
| 4 | 7,3516 | 4,0000 | 16,7137 | 2,0105 | 2,2497 | 8,0419 | 99,6752 |
| 5 | 7,5361 | 6,0000 | 16,7137 | 1,6415 | 2,2497 | 9,8493 | 101,5796 |

A Figura 6.4, apresentam os resultados para a vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para os casos estudados neste trabalho, os mesmos também podem ser observados na Tabela B.2 localizada no Apêndice B.

Destaca-se que com a diminuição de l , tem-se um aumento da pressão dentro da câmara hidropneumática e o limite para o mesmo encontra-se no momento em que o valor do raio cresce ao ponto da área da chaminé do dispositivo ser nula, assim inviabilizando a conversão de energia.

Considerando os resultados da Figura 6.4, observa-se que pequenas variações na dimensão do raio de transição (r) é o suficiente para causar um aumento de cerca de 20% na eficiência da configuração geométrica proposta, evidenciando a pertinência desta proposta de estudo.

Associando os resultados obtidos com a fenomenologia do problema estudado, como feito no estudo anterior, $r = 7,5361\text{m}$ e $H_2/l = 6$ representam o caso com melhor desempenho de potência hidropneumática, assim tem-se que $r \cong \lambda/5$ e $H_2/l \cong \lambda/(6H)$, como recomendação teórica encontrada.

Na Figura 6.5 é possível verificar a relação existente entre vazão mássica e pressão, onde as mesmas se mostra inversamente proporcionais, pois, quando ocorre um aumento de pressão na câmara hidropneumática, automaticamente ocorre uma diminuição no escoamento de ar na chaminé do dispositivo conversor, verificando-se uma diminuição da vazão mássica.

A Figura 6.6 apresenta o comportamento transiente da pressão do ar no interior da chaminé do dispositivo CAO para as geometrias que tiveram melhor e pior desempenho. A média RMS neste caso foi calculada no período estável entre 15s e 30s. Na Figura 6.7, é possível observar a topologia do campo de velocidades e as fases água e ar, nas cores vermelha e azul respectivamente, na fase de descompressão e compressão, para o caso cinco da Tabela 6.3. Observa-se um escoamento de ar desenvolvido e com uma pequena região de recirculação na entrada e saída da câmara hidropneumática.

Após a análise dos dados recolhidos através das simulações numéricas, constata-se que o caso com melhor desempenho foi para $r = 7,5361\text{m}$ e $H_2/l = 6$ (correspondendo a $H_2 = 9,8493\text{m}$ e $l = 1,6415\text{m}$) com $P = 52,9\text{Pa}$, $P_{hid} = 158,9\text{W}$ e $\varepsilon = 55\%$; o pior desempenho foi para $r = 7,0312\text{m}$ e $H_2/l = 2,3$ (correspondendo a $H_2 = 6,0981\text{m}$ e $l = 2,6513\text{m}$) com $P = 20,3\text{Pa}$, $P_{hid} = 86,9\text{W}$ e $\varepsilon = 29,1\%$. O resultado representa um aumento de 61,6% na pressão do ar na saída da chaminé, um aumento de 45,3% na potência hidropneumática e um aumento de 47% na eficiência do dispositivo.

De uma maneira geral é possível observar que esta variação geométrica na região de transição é pertinente, uma vez que conduz ao melhor aproveitamento da potência da onda

incidente. No presente estudo a área da região de transição foi variável, dependendo das restrições das áreas da câmara CAO e da chaminé. Sendo assim, a técnica Design Construtal se apresenta como uma ferramenta de extrema relevância no estudo de geometrias otimizadas para conversores do tipo CAO.

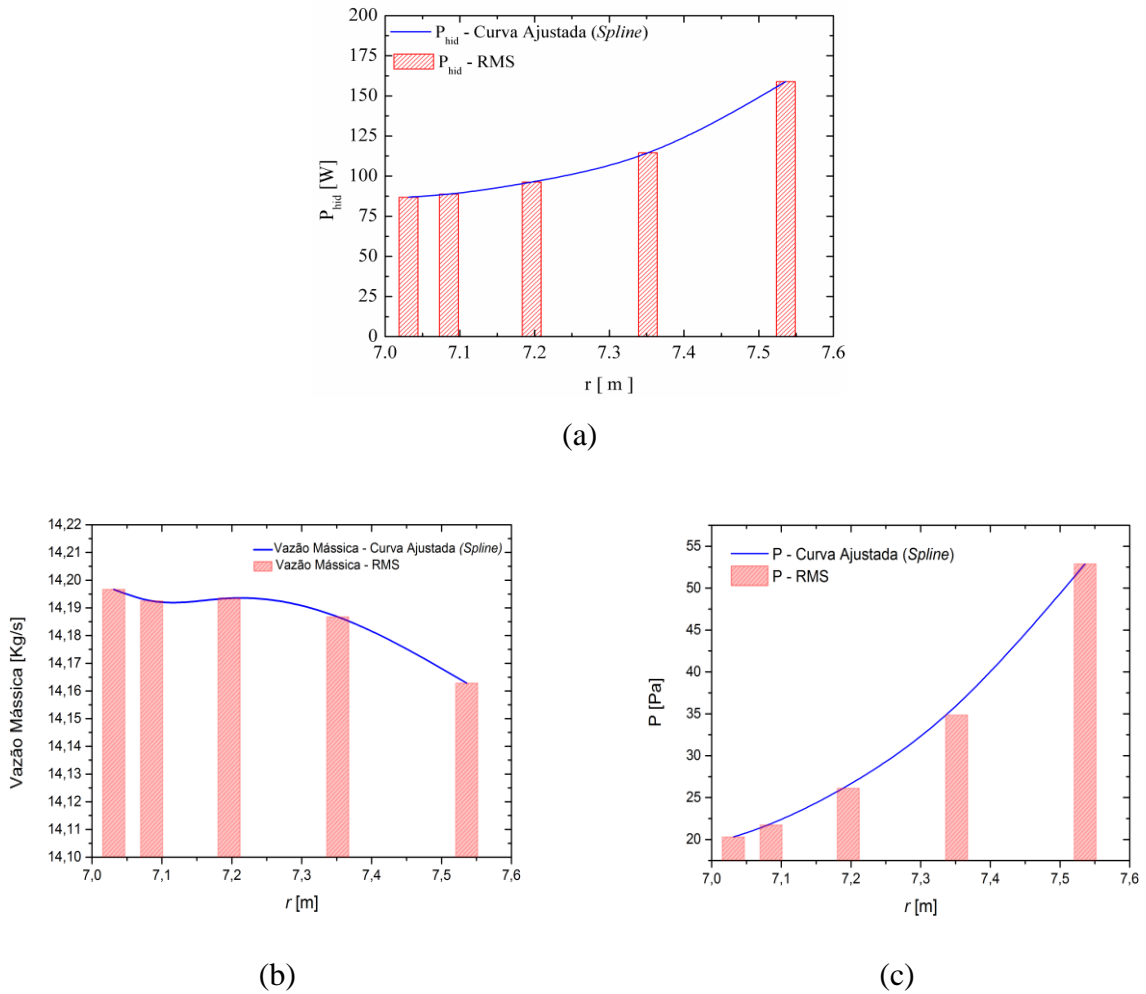


Figura 6.4 – Resultados da Potência Hidropneumática (a), Vazão mássica (b) e Pressão(c) para o caso com região de transição semicircular variando o raio r e a razão H_2/l utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais.

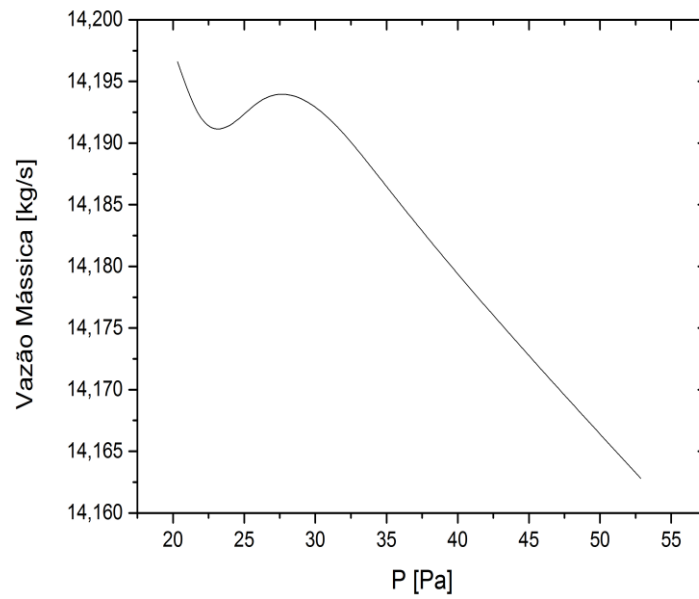


Figura 6.5 – Relação entre pressão e vazão mássica para o caso com região de transição semicircular.

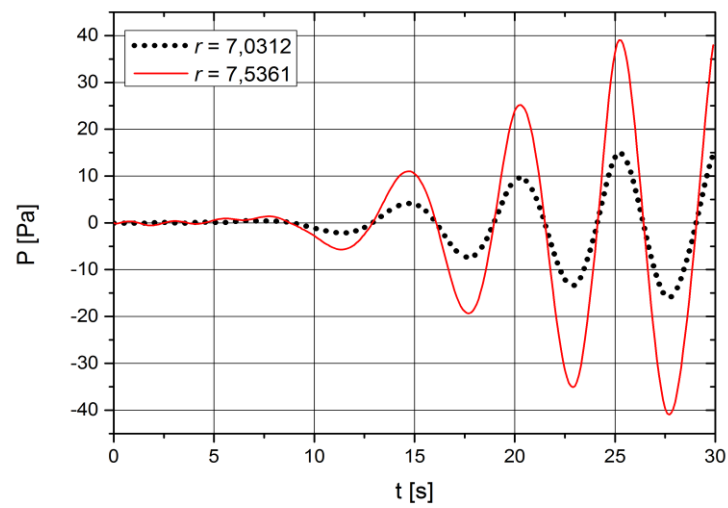


Figura 6.6 – Variação da pressão em relação ao tempo para o caso com pior e melhor desempenho referente à região de transição semicircular.

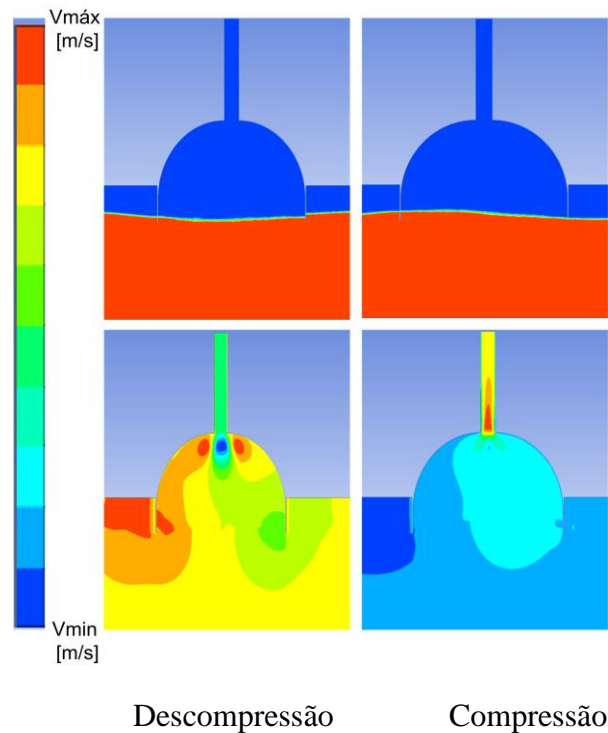


Figura 6.7 – Topologias da velocidade na direção y (m/s) e fases água e ar, para a fase de descompressão e compressão para o caso de melhor desempenho com região de transição semicircular.

6.3 Caso com Obstrução Elíptica na Chaminé do Dispositivo

O terceiro caso estudado não está relacionado com a geometria da região de transição do dispositivo CAO e sim com a obstrução referente à turbina na chaminé do mesmo. O objetivo desta seção é mostrar a análise de diferentes eixos da restrição física no formato elíptico que otimizam a potência hidropneumática do conversor CAO, tomando-se o cuidado para não ocorrer o bloqueio total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo, pois caso isso ocorra poderia acarretar no colapso da estrutura da câmara CAO, uma vez que, a pressão aumentaria a valores superiores ao suportado pela mesma.

A função objetivo é a maximização da potência hidropneumática. O grau de liberdade adotado em todas as simulações neste problema foi d_1/d_2 , que representa a razão entre os eixos da obstrução em formato elíptico (vide Figura 4.1). A escolha da obstrução em formato

elíptico se deve ao fato de a mesma ser posicionada no centro da chaminé de saída do dispositivo CAO e ser simétrica, oferecendo, assim, o efeito de uma turbina de uma forma mais realista em comparação com outros formatos de restrição apresentados por Gomes, 2014. A Figura 6.8 mostra, em detalhe, a posição da obstrução na chaminé do dispositivo.

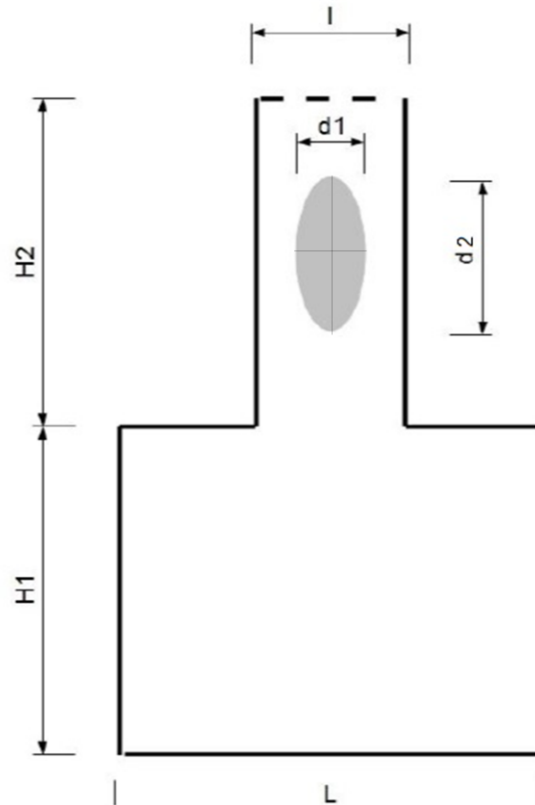


Figura 6.8 – Representação esquemática da restrição física na saída do dispositivo CAO em formato elíptico (Gomes, 2014).

A pesquisa tratou de cinco diferentes casos de ϕ_n , o qual representa a razão entre a área da restrição (A_R) e a área total (A_T) (o mesmo pode ser visto na Equação (4.3)). A escolha destes valores se deu com base nos dados utilizados por Gomes, 2014, preocupando-se em escolher valores coerentes com o tamanho de estruturas reais. Para cada valor de ϕ_n foram testadas seis dimensões de restrição física, com as características geométricas do dispositivo fixas, variando os eixos (d_1 e d_2) da restrição física e mantendo constante a área da restrição nos seis casos testados para cada ϕ_n . A dimensão d_1 representa o comprimento do eixo na direção x da elipse (o que é equivalente a dizer que é o comprimento horizontal da restrição) e

d_2 representa o comprimento do eixo na direção y da elipse (o que equivale ao comprimento vertical da restrição).

Os parâmetros, os quais, foram considerados constantes para cada simulação de ϕ_n e, assim, classificados como restrições globais, são: área da restrição elíptica (A_R), que é definida pela multiplicação dos eixos da elipse por π , a área total do dispositivo CAO (A_T), a qual se define pela soma da área da câmara hidropneumática e a área da chaminé do equipamento, e a razão da restrição elíptica e a área total (ϕ_n). As mesmas são deduzidas seguindo as Equações (4.1-4.4).

6.4 Resultados de $\phi = 0,0093$

O objetivo de analisar diferentes eixos de restrições físicas no formato elíptico que otimizam a potência hidropneumática do conversor CAO se faz pelo fato da busca de uma configuração geométrica que apresente a maior potência hidropneumática evitando o bloqueio total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo. Pois, assim, se obtém uma diminuição da vazão mássica de ar na região onde é instalada a turbina e o aumento da pressão no interior da câmara CAO. Este formato de restrição representa uma turbina do tipo *Wells*, de um formato mais próximo do real como define Gomes, 2014.

Para este estudo os parâmetros mantidos constantes em todas as simulações foram: $A_R = 0,4988\text{m}^2$ e $A_T = 53,7126\text{m}^2$, estes valores foram escolhidos com base nos dados já descritos em Gomes, 2014, onde o autor desenvolveu uma análise para a restrição elíptica, porém sem variar os dois eixos da restrição, o que é feito no presente trabalho. Como nos outros casos estudados, determina-se que a área da câmara CAO (H_1L) é de 70% da área total (A_T).

Assim, analisando o grau de liberdade d_1/d_2 é possível verificar o desempenho das diferentes configurações geométricas da obstrução elíptica, que representam a turbina, e definir qual conduz a uma maximização da potência hidropneumática sem obstruir o escoamento de ar na chaminé do dispositivo. Os valores dos graus de liberdade podem ser observados na Tabela 6.3. Os valores que se apresentam repetidos para algumas configurações geométricas, se deve ao fato de os mesmos representarem os parâmetros constantes utilizados no método Design Construtal.

A escolha dos valores da razão d_1/d_2 se da através das recomendações de Gomes, 2014, onde para cada valor de ϕ_n , manteve-se a área da elipse constante variando somente d_2 e utilizando a recomendação presente em Gomes, 2014, para os valores de d_1 .

Tabela 6.3 – Variações geométricas da restrição $\phi = 0,0093$.

| Casos | d_1 [m] | d_2 [m] | d_1/d_2 | Área [m ²] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 1,0000 | 0,6351 | 1,5745 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 2 | 1,2500 | 0,5081 | 2,4601 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 3 | 1,5000 | 0,4234 | 3,5427 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 4 | 1,7500 | 0,3629 | 4,8223 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 5 | 2,0000 | 0,3175 | 6,2992 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 6 | 2,2500 | 0,2823 | 7,9702 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |

É possível observar através da Figura 6.9 que, variando o grau de liberdade d_1/d_2 , ocorre uma diminuição da passagem de ar na saída da chaminé, fazendo com que ocorra um aumento na pressão no interior do dispositivo CAO. Da mesma forma, ocorre uma diminuição da vazão mássica, pois a área da restrição elíptica tornou menor o escoamento de ar em função de oferecer uma maior obstrução à passagem do mesmo na chaminé do dispositivo. Conseqüentemente, a potência também aumenta. Entretanto, deve-se ressaltar que a forma da restrição com configuração elíptica é mais próxima da geometria de uma turbina real e toma-se o cuidado para que o escoamento de ar não seja totalmente interrompido e ocorra o colapso da estrutura. Assim, a escolha da melhor potência hidropneumática não se dá somente pelo caso o qual apresenta o maior valor da mesma como se espera quando se utiliza o método de busca exaustiva associado ao método Design Construtal, mas, sim, dentre os casos estudados, o que apresenta a maximização da potência hidropneumática sem ocorrer uma obstrução abrupta do escoamento do ar na chaminé de saída do dispositivo CAO, como foi estudado em Gomes, 2014. Pois, com a obstrução total do escoamento de ar não haveria potência hidropneumática, uma vez que, a turbina não estaria mais em funcionamento e ocorreria o colapso da estrutura do dispositivo CAO.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é se o ideal seria perder vazão mássica e ganhar pressão ou vide-e-versa. Para responder a este questionamento tem-se que com o aumento da pressão a velocidade do ar no interior da câmara hidropneumática diminui,

uma vez que o bloqueio do escoamento de ar aumentou em relação aos outros casos estudados.

Assim, o ideal é encontrar um valor equilibrado tanto para vazão mássica quanto para pressão, mas considerando que ganhar vazão mássica se mostra mais efetivo, pois assim a turbina funciona em um regime constante, uma vez que, o escoamento de ar se mostrará maior.

Relacionando o problema estudado com a fenomenologia, obtêm-se para o caso que apresenta o melhor desempenho o valor do grau de liberdade $d_1/d_2 = 3,5427$. Assim têm-se $d_1 = 1,5000\text{m}$ e $d_2 = 0,4234\text{m}$. Para estes valores pode-se associar que: $d_1 \cong 3H/2$ e $d_2 \cong h/24$, resultando em $d_1/d_2 \cong 35H/h$.

Analisando a Figura 6.9, é possível verificar um valor que apresenta um melhor desempenho para o grau de liberdade d_1/d_2 sem ocorrer uma obstrução do escoamento, onde temos $d_1 = 1,5000\text{m}$ e $d_2 = 0,4234\text{m}$. Assim, observa-se os valores aproximados de $\dot{m} = 9,79\text{ kg/s}$, $P = 1188,44\text{Pa}$, $P_{hid} = 179,71\text{W}$ e $\varepsilon = 4,60\%$; o caso com pior desempenho foi para $d_1 = 1,0000\text{m}$ e $d_2 = 0,6351\text{m}$ com os valores aproximados de $\dot{m} = 10,37\text{ kg/s}$, $P = 1187,99\text{Pa}$, $P_{hid} = 76,18\text{W}$ e $\varepsilon = 2,36\%$. O resultado representa um aumento de 57,6% na potência hidropneumática quando comparados os casos de melhor e pior desempenho. A escolha desse valor, considerado o que apresenta o melhor desempenho, deve-se ao fato de que se levado em conta o projeto de turbina, uma vez que a mesma terá pás que precisarão se mover no interior da chaminé, entre o corpo da turbina e as paredes da chaminé. Isso reforça a escolha da restrição 3, pois fazendo a diferença entre o comprimento da chaminé (l) e eixo horizontal da restrição 3 (d_1) o resultado é de 0,8 m, ou seja, aproximadamente 34,5% da dimensão l livre. Estes valores estão de acordo com os recomendados em Gomes, 2014.

O grau de liberdade aumenta uma vez que d_2 vai diminuindo para cada caso estudado. É possível observar, na Figura 6.9, que para o maior valor da razão d_1/d_2 é encontrada a maior potência hidropneumática, mas ela não representa o caso ótimo, pois se encontra no caso em que se tem uma obstrução que impede o escoamento do ar no interior do dispositivo, uma vez que, a diferença entre o comprimento da chaminé (l) e eixo horizontal da restrição 6 (d_1) o resultado é de 0,06m, ou seja, aproximadamente 2,92% da dimensão l livre, o que atrapalharia a movimentação das pás do motor quando ocorresse o escoamento de ar pela chaminé do dispositivo. Assim, a maior potência hidropneumática é encontrada, mas é inviável para uma

efetiva implementação em um experimento real, pois afeta diretamente o desempenho do dispositivo conversor.

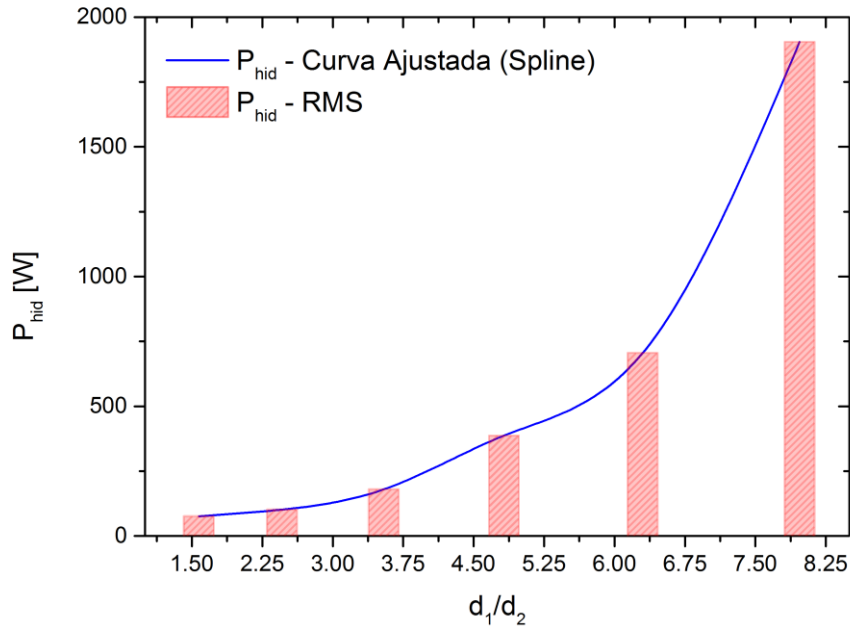


Figura 6.9 – Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_1/d_2 para o caso com restrição física no formato elíptico utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais.

Analisando os casos estudados é possível perceber um aumento da potência hidropneumática, pois como é visto na Equação (5.24) ela depende da pressão estática e da vazão mássica. Este aumento da potência se deve, essencialmente, a diminuição da vazão mássica e pelo aumento da pressão no interior da câmara CAO.

Assim, analisando o caso 3, o qual foi considerado o caso com melhor desempenho por apresentar um valor de potência hidropneumática que é coerente com uma restrição, a qual não bloqueia o escoamento de ar na chaminé do dispositivo CAO. A Figura 6.10 apresenta também os resultados obtidos para a vazão mássica e pressão para os diferentes valores do grau de liberdade d_1/d_2 .

Na Figura 6.11 é possível ver que para os valores de d_1 e d_2 que representam o grau de liberdade com melhor desempenho, observa-se uma potência hidropneumática satisfatória para um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica sem afetar diretamente o desempenho do conversor.

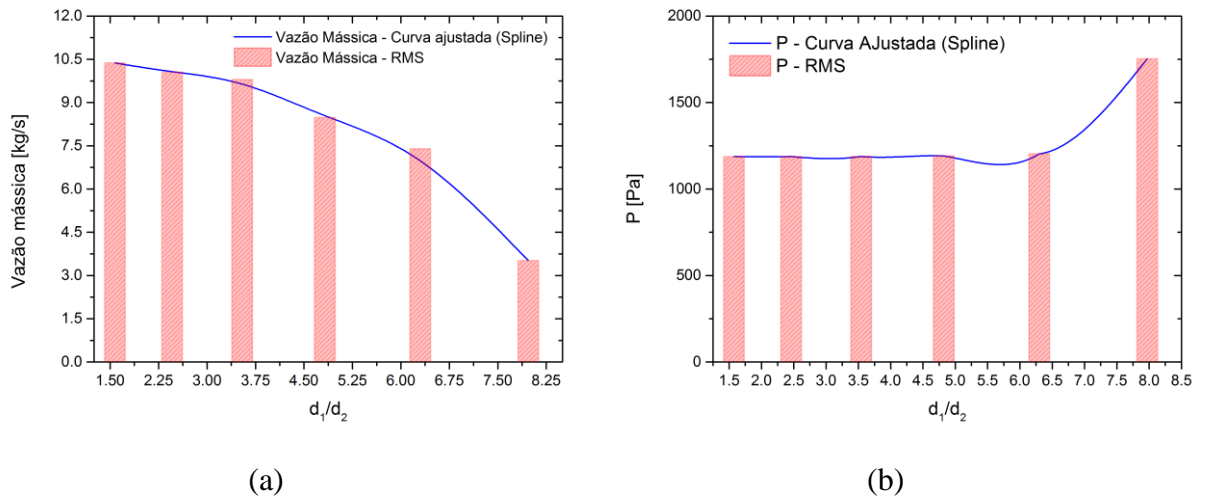


Figura 6.10 – Variação da vazão mássica (a) e pressão (b) em relação aos diferentes valores de d_1/d_2 , o qual representa a restrição física no formato elíptico utilizando uma curva ajustada por Spline e barras com valores pontuais.

Os resultados mostram que a vazão mássica tem maior influência na potência hidropneumática, pois um aumento menor da mesma compensa, inclusive, uma pequena descompressão.

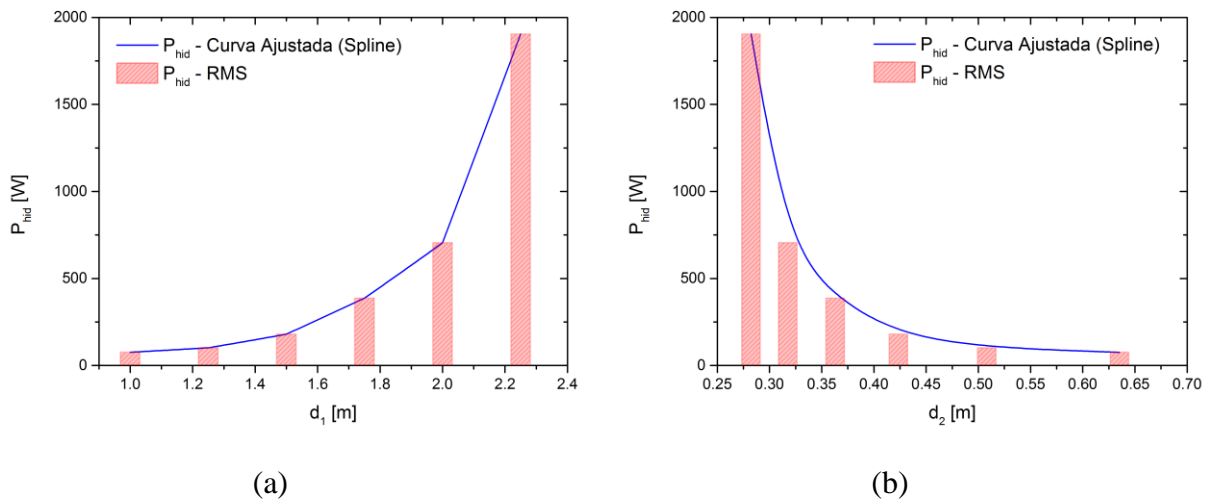


Figura 6.11 – Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_1 (a) e d_2 (b) para a restrição física no formato elíptico.

Na Figura 6.12 é apresentado o comportamento transiente da pressão e da vazão mássica do ar no interior da chaminé do dispositivo CAO para o caso em que se apresenta o melhor e o pior desempenho, apresentando assim a viabilidade da implementação de uma turbina com as características geométricas estabelecidas. A média RMS nestes dois casos foi calculada no período estável entre 15s e 30s.

A Figura 6.13, apresenta a topologia da velocidade na direção vertical no dispositivo CAO e as fases água e ar nas cores vermelha e azul, respectivamente, para o caso de melhor desempenho, mostrando assim a velocidade na etapa de compressão e descompressão e evidenciando uma pequena ocorrência de recirculações de ar no interior da câmara. É possível verificar também que não ocorre um bloqueio do escoamento de ar, uma vez que ocorre o aumento de velocidade do ar nas fases de compressão e descompressão.

Observa-se assim, o caso em que a relação d_1/d_2 , se mostra mais favorável ao escoamento de massa que escoo na compressão e descompressão.

Portanto, a aplicabilidade do método Design Construtal para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar foi verificada, como já foi observado na literatura. Os resultados mostram que com o uso do Design Construtal é possível definir uma configuração geométrica da restrição elíptica, que otimiza o desempenho do dispositivo CAO quando se tem a presente relação para $\phi = 0,0093$.

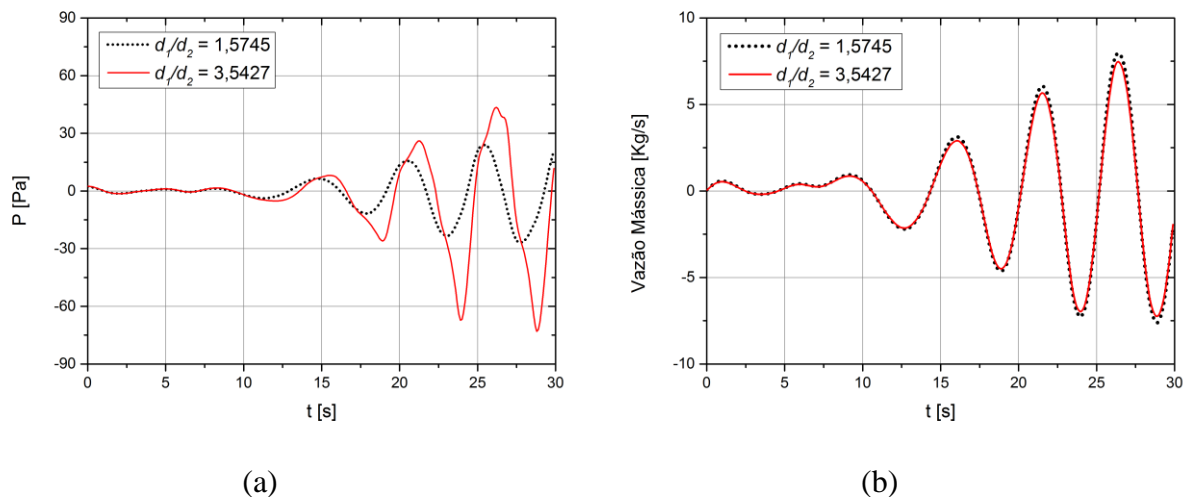


Figura 6.12 – Variação da pressão (a) e vazão mássica (b) em relação ao tempo para o pior e melhor desempenho do dispositivo CAO com restrição no formato elíptico.

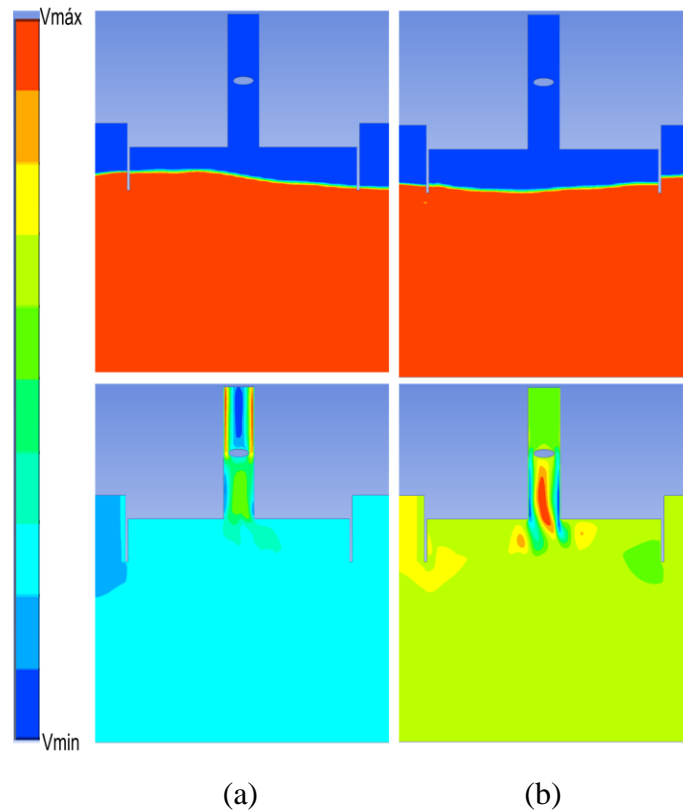


Figura 6.13 – Topologia da velocidade na direção y (m/s) e fase água e ar na (a) Compressão e (b) descompressão para o caso com restrição elíptica de $\phi = 0,0093$.

6.5 Comparação dos resultados com melhor desempenho

O procedimento usado para o estudo dos diferentes ϕ_n (0,0210;0,0327;0,0364;0,0369) analisados foi o mesmo, levando em conta uma configuração geométrica que obtivesse uma melhor potência hidropneumática sem que ocorresse uma obstrução total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo.

Em todos os casos estudados os resultados que apresentavam melhor desempenho sem obstruir a vazão de ar se encontraram nos casos 3 (Vide Apêndice B) pois se adequam a recomendação teórica já citada, onde se nota que com o aumento do valor de ϕ_n , a razão d_1/d_2 diminui, uma vez que, os valores de d_2 estão aumentando e assim, aumentando a potência hidropneumática.

Nota-se que com o aumento de ϕ_n os valores de potência hidropneumática se mantem muito próximos, mostrando uma diferença sutil. Assim, mesmo aumentando o valor de ϕ_n , o

resultado que se encontrará será muito próximo ao maior valor simulado neste trabalho. Outro aspecto que limita um maior valor de ϕ_n além dos que foram estudados nesta pesquisa é o fato de que uma maior área torna inviável a passagem de ar pela chaminé do dispositivo.

Para cada caso de restrição elíptica estudado a potência hidropneumática se mostrou maior uma vez que a pressão aumentou em decorrência do aumento de d_1 e ocorreu uma diminuição da vazão mássica pelo mesmo motivo, pois a restrição maior impediu a passagem de ar.

A Tabela 6.4 mostra as configurações geométricas dos casos de melhor desempenho. Os valores que se apresentam repetidos tem a mesma justificativa que os valores apresentados repetidos na Tabela 6.5.

Tabela 6.4 – Configuração geométrica dos casos de melhor desempenho para todos ϕ_n estudados.

| ϕ_n | d_1 [m] | d_2 [m] | d_1/d_2 | Área [m ²] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 0,0093 | 1,5000 | 0,4234 | 3,5427 | 0,4988 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 0,0210 | 1,5000 | 0,9568 | 1,5677 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 0,0327 | 1,5000 | 1,4901 | 1,0066 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 0,0364 | 1,5000 | 1,6584 | 0,9045 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 0,0369 | 1,5000 | 1,6807 | 0,8925 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |

A Tabela B.12 e a Figura 6.14 mostram os valores para potência hidropneumática, vazão mássica, pressão e eficiência para cada caso com melhor desempenho nos diferentes valores de ϕ_n estudado.

A função objetivo em todos os casos investigados é a maximização da potência hidropneumática, assim conclui-se que para o valor de $\phi_n = 0,0369$ se obtém a potência hidropneumática que apresenta o melhor desempenho. Obtendo-se uma recomendação teórica acerca dos eixos da elipse que representa a turbina do tipo *Wells*, mesmo sendo sutil a diferença das potências encontradas.

O caso que representa a potência hidropneumática com melhor desempenho dentre todos estudados é aquele que apresenta valor de $d_1 = 1,5000\text{m}$ e $d_2 = 1,6807\text{m}$, assim observa-se que $\dot{m} = 9,81\text{kg/s}$, $P = 1188,71\text{Pa}$, $P_{\text{hid}} = 184,61\text{W}$ e $\varepsilon = 5,06\%$, o pior desempenho dentre todos investigado foi para $d_1 = 1,0000\text{m}$ e $d_2 = 2,2352\text{m}$ com $\dot{m} = 10,31\text{kg/s}$, $P = 1187,96\text{Pa}$,

$P_{hid} = 75,00W$ e $\varepsilon = 2,39\%$. O resultado representa um aumento de 59,4 % na potência hidropneumática.

Seguindo as recomendações fenomenológicas, temos que $d_1 \cong 3H/2$ e $d_2 \cong h/6$, assim temos $d_1/d_2 \cong (9H)/h$.

Portanto, obteve-se uma recomendação teórica acerca das diagonais que compõem a elipse que representa a restrição física da turbina, onde o método Design Construtal se apresenta como uma alternativa altamente para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas.

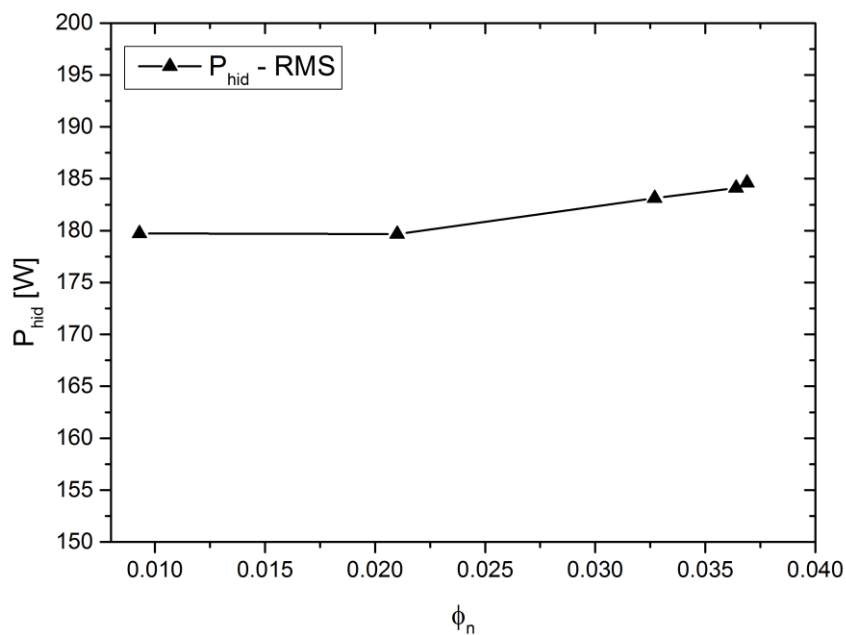


Figura 6.14 – Variação da potência em relação aos diferentes valores de ϕ_n para os casos que apresentam a geometria que otimiza a potência convertida.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho é apresentado um estudo numérico bidimensional da análise e otimização geométrica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). Através de uma abordagem empregando-se o método Design Construtal associado ao método de busca exaustiva, o intuito é aprimorar o desempenho do dispositivo conversor, maximizando a potência hidropneumática. Para executar este estudo foi realizada uma análise de dois tipos diferentes de forma geométrica na região de transição entre a câmara CAO e a chaminé de um dispositivo conversor: regiões de transição na forma trapezoidal e semicircular. Outro modelo numérico bidimensional, que também foi simulado no presente trabalho, foi o estudo da representação da turbina no dispositivo CAO, através de uma restrição física em formato elíptico. Para tanto, o método Design Construtal foi usado para definir as diversas variações das diagonais da obstrução elíptica, permitindo determinar qual combinação geométrica possibilita um melhor desempenho do sistema CAO sem que ocorra a obstrução total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo. Foram avaliados os seguintes parâmetros do conversor: pressão, potência hidropneumática, vazão mássica e eficiência.

Para a modelagem computacional foi utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) que é aplicado para representar a interação entre a água e o ar. A solução numérica é desenvolvida com o código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), Ansys Fluent versão 13, baseado no Método de Volumes Finitos. Para a geração da geometria e da malha que representam o problema foi utilizada uma técnica de construção de malhas, a qual divide a geometria refinando-a por regiões de interesse. Essa técnica é conhecida por *stretched*, que possibilita diminuir o esforço computacional nas simulações numéricas.

Um estudo de verificação 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. Leva-se em conta a incidência de ondas regulares em escala real com períodos de 5s e comprimento de onda incidente igual a 37,6m.

Foi utilizada a metodologia Design Construtal para se obter recomendações teóricas acerca da geometria dos problemas estudados que conduzem a um melhor desempenho do dispositivo. Na avaliação geométrica para a região de transição trapezoidal, o grau de

liberdade analisado foi o ângulo de inclinação (α) da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo, além de o grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) ser mantido fixo e igual a $H_1/L = 0,1346$. Para a região de transição semicircular têm-se os graus de liberdade como sendo o raio (r) e H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO). O problema da obstrução elíptica apresenta o grau de liberdade d_1/d_2 (razão entre os semi-eixos da elipse). A função objetivo, em todos os casos estudados, foi a maximização da potência hidropneumática.

Assim, o melhor ângulo de inclinação (α) que maximiza a potência hidropneumática é $\alpha = 70^\circ$ com $P = 29,2\text{Pa}$, $P_{hid} = 121,1\text{W}$ e $\varepsilon = 41,5\%$, comparado com o caso de mais baixo desempenho onde tem-se $\alpha = 5^\circ$ com $P = 26,2\text{Pa}$, $P_{hid} = 96,4\text{W}$ e $\varepsilon = 32,8\%$. O resultado representa um aumento de 10,5% na pressão do ar na saída da chaminé, um aumento de 20,4% na potência hidropneumática e um aumento de 20,8% na eficiência do dispositivo. A relação dos resultados com a fenomenologia apresenta as seguintes relações: $\alpha = (7h)^\circ$ e $H_4 = (\lambda/2)+H$. Foi possível observar que o estudo deste formato de região de transição não favorece para uma melhora do desempenho do conversor CAO, uma vez que, o caso com mais baixo e mais alto desempenho apresentam resultados muito próximos de pressão e vazão mássica na análise transiente do problema.

Em relação ao raio (r) e a razão H_2/l , os valores que maximizam a potência hidropneumática são: $r = 7,5361\text{m}$ e $H_2/l = 6$, o que corresponde a $H_2 = 9,8493\text{m}$ e $l = 1,6415\text{m}$, com $P = 52,9\text{Pa}$, $P_{hid} = 158,9\text{W}$ e $\varepsilon = 55\%$, onde comparado com o caso de menor desempenho tem-se $r = 7,0312\text{m}$ e $H_2/l = 2,3$ (correspondendo a $H_2 = 6,0981\text{m}$ e $l = 2,6513\text{m}$) com $P = 20,3\text{Pa}$, $P_{hid} = 86,9\text{W}$ e $\varepsilon = 29,1\%$. O resultado representa um aumento de 61,6% na pressão do ar na saída da chaminé, um aumento de 45,3% na potência hidropneumática e um aumento de 47% na eficiência do dispositivo. A relação dos resultados com a fenomenologia apresenta as seguintes relações: $r \cong \lambda/5$ e $H_2/l \cong \lambda/(6H)$.

O valor da razão d_1/d_2 que apresenta a maior potência hidropneumática sem ocorrer a interrupção total do escoamento de ar é $d_1/d_2 = 0,8925$, correspondendo a $d_1 = 1,5000\text{m}$ e $d_2 = 1,6807\text{m}$, com $P = 1188,71\text{Pa}$, $P_{hid} = 184,61\text{W}$ e $\varepsilon = 5,06\%$. O caso com menor desempenho se dá para $d_1 = 1,0000\text{m}$ e $d_2 = 2,2352\text{m}$ com $P = 1187,96\text{Pa}$, $P_{hid} = 75\text{W}$ e $\varepsilon = 2,39\%$. O resultado representa um aumento de 59,4% na potência hidropneumática. A relação dos resultados com a fenomenologia apresenta as seguintes relações: $d_1/d_2 \cong (9H)/h$.

Portanto, nota-se que o arranjo das geometrias empregando o método Design Construtal pode proporcionar a melhora do desempenho do dispositivo em que se emprega o método, assim obtendo uma recomendação teórica para uma possível construção dos dispositivos estudados, uma vez que, o problema em questão trata de dispositivos em escala real. Além disso, as dimensões do dispositivo são relacionadas com o clima de ondas, para que o presente modelo computacional e o método Design Construtal possam ser empregados para fornecer informações teóricas na construção do protótipo CAO e, assim, aproveitar a máxima potência da energia das ondas, em qualquer local com um clima de ondas apropriado.

7.1 Propostas de continuidade do trabalho

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

1. Para o problema com região de transição semicircular, variar os parâmetros H_1/L , H_2/l e r simultaneamente; testar outros períodos de ondas e alturas de onda; realizar a investigação do problema tridimensional.
2. Para o problema com região de transição trapezoidal variar os parâmetros H_4/l_1 e H_2/l simultaneamente, fixando H_3 e H_1/L ; variar H_4/l_1 , H_2/l e H_3 simultaneamente e realizar a pesquisa para o problema tridimensional envolvendo a região de transição.
3. Avaliar outros tipos de forma geométrica na região de transição, bem como realizar uma análise comparativa considerando a área da região de transição fixa.
4. Para o estudo da obstrução que representa a turbina, espera-se realizar um estudo do problema tridimensional e trabalhar em termos da pressão e vazão mássica para assim modelar a obstrução de forma mais próxima a um caso real, sempre observando as recomendações obtidas através do método Design Construtal.
5. Realizar um estudo de problemas tridimensionais para todas as novas geometrias propostas e avaliar a potência hidropneumática nas mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3. Ed., Brasília, 2008.

Aquanet, <www.aquanet.com>; acessado: 21/07/2015.

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

Barreiro, T. G.; Gil, L. Energia das ondas marítimas: tecnologias e a experiência portuguesa, **Anais do Clube Militar Naval**, v. 138, p. 403-422, 2008.

Barreiro, T. Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia. Portugal. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.

Barreiro, T.; Didier, E.; Gil, L.; Alves, M.. Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interacção entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas. In: Proc. III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia, Bragança, Portugal, 2009.

Bautista, E. G., Méndez, F., Bautista, O. “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, 2009.

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

Bejan, A., Shape and Structure, From Engineering to Nature. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

Bejan, A., Lorente, S., Design with Constructal Theory. Wiley, Hoboken 2008.

Bejan, A., Zane J., Design in Nature. Doubleday, USA, 2012.

Bejan, A., Lorente, S. “Constructal Law of Design and Evolution: Physics, Biology, Technology, and Society”. Journal of Applied Physics. Vol. 113, pp. 151301-1 –151301-20, 2013.

Biserni, C., Rocha, L.A.O., Stanescu, G., Lorenzini, E., “Constructal H-shaped Cavities Acoording to Bejan’s Theory” International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol 50, pp.2132-38, 2007.

Bieupoude, P., Azoumah, Y., Neveu, P., "Constructal Design of T-Shaped Water Distribution Networks". In *Constructal Law and the Unifying the Principle of Design* - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA, 2013.

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

Borgman, L. E., Chappellear, J. E. The Use of the Stokes-Struik approximation for waves of finite height. *Proceedings 6th Coastal Engineering Conference*, p. 252-281, 1958.

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

Carneiro, M. L., "**Desenvolvimento de dispositivos de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 116 p., 2007.

Cavity, <http://cavity.cae.utexas.edu/kinnas/COURSES/ce358/part2_14.html>;
acessado: 16/07/2015.

CEM – Coastal Engineering Manual. U. S. Army Corps of Engineers, Eashington, D. C., 2002.

Chakrabarti, S. K., "**Handbook of offshore engineering**", vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p., 2005.

Chozas, J. F.; Soerensen, H. C. State of the art of wave energy in Spain. In: 3rd Annual Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Montreal, QC, Canada, IEEE, p. 1-6, 2009.

Chiavazzo, E., Isaia, M., Mammola, S., Lepore, E., Ventola, L., Pugno, N., Asinari, P., "Do spiders know thermodynamics?". *Constructal Law & Second Law Conference*, Parma, Itália, 2015.

Clément, A., Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 405-431, 2002.

Conde, J. M. P., Gato, L. M. C. Numerical Study of the air-flow in an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 2637-2644, 2008.

Coppe, <<http://www.coppe.ufrj.br/>>; acessado: 28/07/2015.

Cruz, J. M. B. P., Sarmento, A. J. N. A. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**. Ed. Instituto de Ambiente, Amadora, 61 p., 2004.

Davyt D. **Análise Numérica de um Dispositivo de Extração de Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante Através de um Modelo Baseado nas Equações de Navier-Stokes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, Brasil, 2012.

De Brito, M. G. **Simulação Numérica de Tomadas de Água**. Lisboa, Portugal, 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.

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

Dizadji N., Sajadian S. E., 2011 “Modeling and optimization of the chamber of OWC system” *Energy*, Vol. 36, pp. 2360– 2366.

Dogaru, V., “Constructal law statements’ expanding between sciences – a justification for crossed flows of similar goods in economics”. *Constructal Law & Second Law Conference*, Parma, Itália, 2015.

Dos Santos, E. D., Machado, B.N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A., Isoldi, L. A., Rocha, L. A., **Numerical Study Of The Effect Of The Relative Depth On The Overtopping Wave Energy Converters According To Constructal Design**. *Defect And Diffusion Forum*, v. 348, pp. 232-244, 2013.

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

Dumont, G. B., Lima, Y. T. B., Gomes, M. N., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E., Isoldi, L.A., “Geometric and Numerical Analysis of the Semicircular Transition Region Between the Hydropneumatic Chamber and the Chimney of an Oscillating Water Column Device Using Constructal Design”. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2016), Vitória, ES, Brazil, 2016.

Espinel, M. F., Gomes, M das N, Rocha, L.A.O., Dos Santos, E., Isoldi, L.A., “Numerical Modeling and Constructal Design Applied to the Performance Improvement of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter”. 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2014), Belém, PA, Brazil, 2014a.

Espinel, M. F., Gomes, M das N, Rocha, L.A.O., Dos Santos, E., Isoldi, L.A., “Modelagem Computacional e Otimização da Conversão da Energia com Constructal Design de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante”. XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE2014), Fortaleza, CE, Brazil, 2014b.

Espinel, M. F., **Estudo Numérico Bidimensional com Aplicação de Constructal Design para a Otimização da Geometria e da Profundidade de Submersão de um Dispositivo**

Conversor das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Estefen, G. **Energia Renovável dos Oceanos**. Relatório IPCC & Atividades no Brasil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE UFRJ), 2012.

European Renewable Energy Council (EREC). <http://www.erec.org/renewable-energy/ocean-energy.html>, 2014.

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

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

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

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

Ferziger, J. H., Peric, M., “**Computational Methods for Fluid Dynamics**”, Springer, Berlin, 423 p., 1997.

Fluent Inc., *FLUENT 12.0 Theory Guide*, 2009..

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

Fox, R. W., McDonald, A. T., Protchard, P. J., “Introduction to Fluid Mechanics”, 6. ed., John Wiley & Sons, Estados Unidos, 802 p., 2004.

Gomes, M. das N., Olinto, C. R., Rocha, L. A. O., Souza, J. A., Isoldi, L. A., “Computational Modeling of a Regular Wave Tank”. *Engenharia Térmica*, Vol. 8, pp. 44-50, 2009.

Gomes, M. das N. **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 de Rio Grande, 2010.

Gomes, M. N., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., “Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques”. In Proceedings VII Congresso nacional de Engenharia Mecânica (COBEM 2012), São Luiz, 2012a.

Gomes, M. N., Nascimento C. D., Bonafini, B. L., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., “Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale”. *ReTerm*, Vol. 11, pp. 30-36, 2012b.

Gomes, M. N., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter of Real Scale. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013a.

Gomes, M. N., Waess, K. R., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., “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, Brasil, 2013b.

Gomes, M. das N. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Gomes, M. N., Bonafini, B. L., Cassel, L. F., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., Rocha, L. A.. Otimização Geométrica de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do Mar do tipo Coluna de Água Oscilante na Forma Trapezoidal. XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE, Rio de Janeiro, 2015.

Goulart, M. M., **Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande, 2014.

Hirt, C. W. and Nichols, B. D., Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comput. Phys., vol. 39, no. 1, pp. 201–225, 1981.

Horko, M. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter. Austrália. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência), Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, 2007.

Hughes, S. A. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. V. 7, World Scientific, Singapura, 550 p., 1993.

Iahnke, S. L. P. **Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal de Rio Grande, 2010.

International Energy Agency IEA. <http://www.iea.org/topics/renewables/>, 2014.

Irvin, R. J., Thiagarajan, K. P., An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column, Journal of offshore Mechanics and Arctic Engineering, p. 273 – 278, 2005.

Isoldi, L.A., Real, M.V., Correia, A.L.G., Vaz, J., Dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O., “Flow of Stresses: Constructal Design of Perforated Plates Subjected to Tension or Buckling”

In Constructal Law and the Unifying the Principle of Design - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA, 2013.

Khalihg, A. E., Onar, O. C. **Energy Harvesting: Solar, Wind and Ocean Energy Conversion Systems**. Taylor & Francis, London, 2010.

Krüger, E. L. Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental. **Revista Educação & Tecnologia**, n. 6, 2003.

Les Duckers, Mongkonthum W. **Solar Energy, Wind Energy, Hydro and Geothermal Energy: A Review of Ocean Energy Systems**. Sustainable Energy and Environment (SEE), Hua Hin, Thailand, 2004.

Letzow, M., **Avaliação Geométrica da Câmara de um Dispositivo OWC Onshore Inserido em um Tanque com Rampa Triangular em Escala Real Empregando Constructal Design**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande, 2014.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N. Análise Numérica com Constructal Design da Forma Geométrica na Região de Transição entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante.. Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015b.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Plamer, C.B.; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. Analise numerica com constructal design da forma geométrica na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo do tipo coluna de agua oscilante. Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015a.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. “Investigação Numérica e Geométrica da Região de Transição Trapezoidal entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante”. Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Brasília, DF, Brazil, 2016a.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. “Análise Numérica com Método Design Construtal da Região de Transição no Formato Trapezoidal Entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante”. VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, Rio Grande, RS, Brasil, 2016b.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. “Análise Numérica e Geométrica com Design Construtal da Região de Transição para um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)”. Anais da 7ª Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSUL), Rio Grande, RS, Brasil, 2016c.

Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., “Application of numerical wave tank to OWC air chamber for wave energy conversion”. International Offshore and Polar Engineering Conference, 2008a.

Liu, Z., Hyun, B., Jin, J. “Numerical prediction for overtopping performance of OWEC”. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 11, No.1, 35-41, 2008b.

Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., “Numerical Study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor”. China Ocean Eng., Vol. 25, 169-178, 2011.

Lopes, N., Sant’anna, F. S. P., Gomes, M. N., Souza, J. A., Teixeira, P. R., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A.,. “Constructal Design Optimization of the Geometry of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter (OWC-WEC)”. In Proceedings Constructal law conference, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil, 2011.

Lorente, S.; Lee, J.; Bejan, A. “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, 2010.

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

Martins, J. C., **Design Construtal de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real para Diferentes Áreas de Construção e Ondas Monocromáticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio Grande, 2016

Machado, B. N. Zanella, M. M., Gomes, M. N., Teixeira, P. R., Isoldi, L. A., Santos, E. D., “Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter”. In Proceedings of the Constructal Law Conference, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil, 2011.

Machado, B. N., **Estudo Numérico Tridimensional de um Dispositivo de Galgamento para Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica Aplicando o Método Constructal Design**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

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

Marjani, A. E. et al., “3D unsteady flow simulation in an OWC wave converter plant”. In Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Majorca, Spain, 2006.

McCormick, M. E. *Ocean Engineering Wave Mechanics*. Canada: John Wiley & Sons Inc., 173 p., 1973.

McCormick, M. E. **Ocean Wave Energy Conversion**. Dover Publications, Inc. Mineola, New York, USA, 256p., 1981.

Morris-Thomas, M. T., Irvin, R., Thiagarajan, K. P., “The hydrodynamics efficiency of an oscillating water column”, Proceedings of 24^o International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Grécia, 2005.

Morega, A. M., Popa, M., Morega, M., Danescu, L., P., “Shape and Structure Optimization of A Magnetostrictive Cored Actuator”. Constructal Law & Second Law Conference, Parma, Itália, 2015.

Oliveira, L., Teixeira, P.R., Santos, E. D., Isoldi, L. A. “**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, 2012.

Paredes G. **Estudo Experimental de um Sistema Offshore para Produção de Energia das Ondas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), FEUP, Portugal, 2008.

Patankar, S. V., Spalding, D. B., “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, 1972.

Patankar, S. V., “Numerical heat transfer and fluid flow”, McGraw-Hill, Estados Unidos, 1980.

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

Plamer, C. B., **Modelagem Computacional e Método Constructal Design Aplicados a um Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) Analisando a Influência em seu Desempenho da Variação da Razão entre o Volume de Entrada e o Volume Total da Câmara Hidropneumática**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio Grande, 2016.

Plamer, C. B., Lima, Y. T. B., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O., Gomes, M. N., **Modelagem Computacional e Método Constructal Design Aplicados a um Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) Analisando a Influência em seu Desempenho da Variação da Razão Entre o Volume de Entrada e o Volume Total da Câmara Hidropneumática**. Anais da 7^a Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSUL), Rio Grande, RS, Brasil, 2016.

Planeta Coppe, <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=1736>>; acessado: 28/07/2015.

Raghunathan, S. The Wells air turbine for wave energy conversion. **Progress in Aerospace Sciences**, Elsevier, v. 31, p. 335-386, 1995.

Ramalhais, R. S. **Estudo Numérico de um Dispositivo de Conversão de Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), FCT, Lisboa, 2011.

Rocha, L. A. O., Lorente, S., Bejan, A., **Constructal Law and the Unifying the Principle of Design**. Springer, New York, USA, 2013.

Save Pico Powerplant, <www.save-pico-powerplant.org>; acessado: 28/07/2015.

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

Santos, E. D., Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A, Isoldi, L.A., Rocha, L. A., “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, 2014.

Seibt, F. M., **Análise Numérica do Princípio de Funcionamento do Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG, Rio Grande, 2014.

Skjelbreia, L.; Hendrickson, J. **Fifth Order Gravity Wave Theory**, *Proceedings 7th Conference Coastal Engineering*, v.1, p. 184-196, 1961.

Sorensen, M. S. **Basic Coastal Engineering**. USA: Springer, 324 p, 2006.

Souza, J. A., Ordonez, J.C., "Constructal Design of High-Conductivity Inserts". In **Constructal Law and the Unifying the Principle of Design** - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA, 2013.

Srinivasan, Salazar, A.J., Saito. K., Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. *Applied Mathematical Modeling*, vol. 35, n. 8, pp. 3710-3730, 2011.

Stokes, G. G., **On the Theory of Oscillatory Waves**. **Transactions of the Cambridge Philodophical Society**, v. 8, p. 441-455, 1847.

Suero, R.,. **“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, 2010.

Tractebel, <www.tractebelenergia.com.br>; acessado: 28/07/2015.

Twidell, J.; Weir, T. **Renewable Energy Resources**. Taylor & Francis, London, 2006.

U, S, ARMY – Costal Engineering Research Center. Shore Protection Manual. Vol I, Books for Business, New York – Hong Kong, 445p., 1973.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Longman Scientific and Technical, 2007.

Zabihian, F.; Fung, A. S., Review of marine renewable energies: case study of Iran. **Renew. Sust. Energ. Ver.** v.15, p. 2461-2474, 2011.

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

Watterson, K. K.; Raghunathan, S. Investigation of Wells Turbine Performance using 3-D CFD. **Energy Conversion Engineering Intersociety Conference**, v.3, p. 1777-1782, 1996.

Wavegen, <<http://www.pico-owc.netq>>; acessado: 28/07/2015.

Zhang, K., Du, J., X., Zhanh, H., “Molten Salt Flow and Heat Transfer in Paddle Heat Exchangers”. Constructal Law & Second Law Conference, Parma, Itália, 2015.

APÊNDICE A – Trabalhos publicados

| <i>Título</i> | <i>Evento</i> | <i>Autores</i> | <i>Ano</i> |
|---|---------------|--|------------|
| Análise Geométrica com <i>Constructal Design</i> da Restrição da Turbina de um Dispositivo de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) | CILAMCE | Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2015 |
| Análise Numérica com <i>Constructal Design</i> da Forma Geométrica na Região de Transição entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante. | CILAMCE | Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Cândila Beatriz Plamer, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2015 |
| Investigação Numérica e Geométrica da Região de Transição Trapezoidal Entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante | CILAMCE | Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2016 |

| <i>Título</i> | <i>Evento</i> | <i>Autores</i> | <i>Ano</i> |
|--|---------------|---|------------|
| Análise Numérica e Geométrica com Design Contrutal da Região de Transição para um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) | MCSul | Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2016 |
| Modelagem Computacional e Método Design Construtal Aplicados a um Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) Analisando a Influência em seu Desempenho da Variação da Razão entre o Volume de Entrada e o Volume Total da Câmara Hidropneumática | MCSul | Cândila Beatriz Plamer Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2016 |
| Aplicação do Método Design Construtal na Avaliação Numérica da Potência Hidropneumática de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante com Região de Transição Trapezoidal | SEMENGO | Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2016 |

| <i>Título</i> | <i>Evento</i> | <i>Autores</i> | <i>Ano</i> |
|--|---------------|--|------------|
| Geometric and Numerical Analysis of the Semicircular Transition Region Between the Hydropneumatic Chamber and the Chimney of an Oscillating Water Column Device Using Constructal Design | ENCIT | Gabriel Barbieri Dumont Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos | 2016 |

APÊNDICE B – Resultados das Simulações

Tabela B.1 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para o caso em que a região de transição é trapezoidal.

| Casos | \dot{m} [kg/s] | P [Pa] | P _{hid} [W] | ϵ [%] |
|-------|------------------|---------|----------------------|----------------|
| 1 | 14,1932 | 26,1583 | 96,4316 | 32,8342 |
| 2 | 14,2024 | 26,1434 | 96,5651 | 32,8859 |
| 3 | 14,2092 | 26,1224 | 96,6089 | 32,8798 |
| 4 | 14,2069 | 26,0858 | 96,5395 | 32,8454 |
| 5 | 14,2075 | 26,0761 | 96,6624 | 32,8045 |
| 6 | 14,2265 | 26,1010 | 96,8539 | 32,9746 |
| 7 | 14,2171 | 26,0732 | 96,8045 | 32,9039 |
| 8 | 14,2169 | 26,0551 | 96,7613 | 32,8745 |
| 9 | 15,3917 | 28,6445 | 119,766 | 40,9333 |
| 10 | 15,3996 | 28,4538 | 119,415 | 40,8140 |
| 11 | 15,3968 | 29,2099 | 121,149 | 41,4627 |

Tabela B.2 – Resultado para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para o caso em que a região de transição é semicircular.

| Casos | \dot{m} [kg/s] | P [Pa] | P _{hid} [W] | ϵ [%] |
|-------|------------------|---------|----------------------|----------------|
| 1 | 14,1966 | 20,3088 | 86,9058 | 29,1286 |
| 2 | 14,1925 | 21,7276 | 88,8262 | 29,8292 |
| 3 | 14,1934 | 26,1185 | 96,3605 | 32,8570 |
| 4 | 14,1867 | 34,8516 | 114,5370 | 39,3642 |
| 5 | 14,1628 | 52,8703 | 158,8668 | 54,9677 |

Tabela B.3 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0093$.

| Casos | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência hidropneumática [W] | Eficiência [%] |
|-------|-------------------------|--------------|---------------------------------|----------------|
| 1 | 10,3746 | 1187,9366 | 76,1850 | 2,3669 |
| 2 | 10,0498 | 1187,9998 | 101,6065 | 2,8396 |
| 3 | 9,7972 | 1188,4436 | 179,7195 | 4,6009 |
| 4 | 8,4790 | 1191,1177 | 386,3708 | 9,7519 |
| 5 | 7,3958 | 1203,4793 | 705,3687 | 17,2090 |
| 6 | 3,5172 | 1752,7898 | 1904,4832 | 50,5964 |

Tabela B.4 – Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0210$.

| Casos | d_1 [m] | d_2 [m] | d_1/d_2 | Área [m ²] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 1,0000 | 1,4352 | 0,6966 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 2 | 1,2500 | 1,1482 | 1,0887 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 3 | 1,5000 | 0,9568 | 1,5677 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 4 | 1,7500 | 0,8201 | 2,0729 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 5 | 2,0000 | 0,7176 | 2,7871 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 6 | 2,2500 | 0,6379 | 3,5272 | 1,1272 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |

Tabela B.5 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0210$.

| Casos | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência hidropneumática [W] | Eficiência [%] |
|-------|-------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 10,3240 | 1187,9548 | 75,3444 | 2,3897 |
| 2 | 10,1368 | 1188,1226 | 101,9087 | 2,9957 |
| 3 | 9,8283 | 1188,6044 | 179,6608 | 4,8303 |
| 4 | 8,4790 | 1190,6687 | 339,8339 | 8,4281 |
| 5 | 6,8935 | 1207,4711 | 767,9788 | 19,5073 |
| 6 | 2,4396 | 1357,9944 | 767,0713 | 22,0839 |

Tabela B.6 – Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0327$.

| Casos | d_1 [m] | d_2 [m] | d_1/d_2 | Área [m ²] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 1,0000 | 2,2352 | 0,4474 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 2 | 1,2500 | 1,7881 | 0,6991 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 3 | 1,5000 | 1,4901 | 1,0066 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 4 | 1,7500 | 1,2772 | 1,3702 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 5 | 2,0000 | 1,1176 | 1,7895 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 6 | 2,2500 | 0,9934 | 2,2649 | 1,7555 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |

Tabela B.7 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0327$.

| Casos | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência hidropneumática [W] | Eficiência [%] |
|-------|-------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 10,3096 | 1187,9582 | 75,0082 | 2,3853 |
| 2 | 10,1299 | 1188,1425 | 102,2678 | 3,0383 |
| 3 | 9,8160 | 1188,7053 | 183,1285 | 5,0185 |
| 4 | 9,1586 | 1191,1458 | 382,5076 | 9,9926 |
| 5 | 7,4385 | 1214,3071 | 963,9991 | 25,0147 |
| 6 | 3,2789 | 1811,3340 | 2164,6720 | 61,5927 |

Tabela B.8 – Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0364$.

| Casos | d_1 [m] | d_2 [m] | d_1/d_2 | Área [m ²] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 1,1000 | 2,2615 | 0,4864 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 2 | 1,2500 | 1,9901 | 0,6281 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 3 | 1,5000 | 1,6584 | 0,9045 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 4 | 1,7500 | 1,4215 | 1,2311 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 5 | 2,0000 | 1,2438 | 1,6080 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 6 | 2,2500 | 1,1056 | 2,0351 | 1,9538 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |

Tabela B.9 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0364$.

| Casos | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência hidropneumática [W] | Eficiência [%] |
|-------|-------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 10,2442 | 1188,0360 | 83,9068 | 2,6172 |
| 2 | 10,1223 | 1188,1671 | 103,7309 | 3,0927 |
| 3 | 9,8047 | 1188,8047 | 184,1102 | 5,0648 |
| 4 | 9,1862 | 1191,2490 | 385,6092 | 10,1300 |
| 5 | 7,4284 | 1215,0446 | 971,8846 | 25,1834 |
| 6 | 3,3675 | 1887,4041 | 3365,5707 | 67,8930 |

Tabela B.10 – Variações geométricas da restrição de $\phi = 0,0369$.

| Casos | d_1 [m] | d_2 [m] | d_1/d_2 | Área [m ²] | L [m] | l [m] | H_1 [m] | H_2 [m] |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 1,1000 | 2,2918 | 0,4790 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 2 | 1,2500 | 2,0168 | 0,6198 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 3 | 1,5000 | 1,6807 | 0,8925 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 4 | 1,7500 | 1,4406 | 1,2148 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 5 | 2,0000 | 1,2605 | 1,5867 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |
| 6 | 2,2500 | 1,1205 | 2,0080 | 1,9800 | 16,7097 | 2,3176 | 2,2497 | 6,9529 |

Tabela B.11 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência de $\phi = 0,0369$.

| Casos | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência hidropneumática [W] | Eficiência [%] |
|-------|-------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 10,2425 | 1188,0492 | 84,6233 | 2,6449 |
| 2 | 10,1179 | 1188,1540 | 103,2423 | 3,0775 |
| 3 | 9,8062 | 1188,7076 | 184,6135 | 5,0624 |
| 4 | 9,1871 | 1191,1975 | 387,6652 | 10,1645 |
| 5 | 7,5096 | 1215,2579 | 982,6909 | 25,5010 |
| 6 | 3,4134 | 1945,4379 | 2541,9423 | 72,2419 |

Tabela B.12 – Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para os melhores casos de cada ϕ_n .

| ϕ_n | Vazão mássica [Kg/s] | Pressão [Pa] | Potência hidropneumática [W] | Eficiência [%] |
|----------|-------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------|
| 0,0093 | 9,7972 | 1188,4436 | 179,7195 | 4,6009 |
| 0,0210 | 9,8283 | 1188,6044 | 179,6608 | 4,8303 |
| 0,0327 | 9,8160 | 1188,7053 | 183,1285 | 5,0185 |
| 0,0364 | 9,8047 | 1188,8047 | 184,1102 | 5,0648 |
| 0,0369 | 9,8062 | 1188,7076 | 184,6135 | 5,0624 |

ANEXO A – Função definida pelo usuário (UDF)

A UDF é utilizada para a geração das ondas no domínio computacional, as equações da velocidade das ondas estão definidas pela Teoria não Linear de Ondas.

```

/*****/
/* WAVE PROFILE */
/*UDF for specifying a transient velocity profile boundary condition */
/* for a Stokes 2nd Order wave theory (origin is at seabed level) */
/*****/

#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=1.0; /*wave height*/
real D=10.0; /*waterdepth*/
real T=5.0; /*wave period*/
real L=37.6; /*wave length*/

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);
CC=sinh(k*D);
DD=cos(PI/2.0-2.0*PI*(t/T));
EE=cos(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
FF=cosh(2.0*k*D);
GG=cosh(2.0*(k*(ZZ+D)));

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

```

```
LL=D+(H*DD/2.0)+(PI*H*H/(8.0*L))*(BB/pow(CC,3.0))*(2.0+FF)*EE;
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+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)*F
GG*EE/pow(CC,4.0);
```

```
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+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)*F
F*EE/pow(CC,4.0);
```

```
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=1.0; /*wave height*/
real D=10.0; /*waterdepth*/
real T=5.0; /*wave period*/
real L=37.5; /*wave length*/
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;
MM=sinh(k*(ZZZ+D));
NN=cosh(k*D);
OO=cos(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));
WW=cos(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
VV=sin(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));
```

```

QQ=sin(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
RR=sinh(k*D);
SS=cosh(2.0*k*D);
TT=sinh(2.0*(k*(ZZZ+D)));
UU=sinh(2.0*k*D);

```

```

PP=D+(H*OO/2.0)+(PI*H*H/(8.0*L))*(NN/pow(RR,3.0))*(2.0+SS)*WW;

```

```

if(y<=D)

```

```

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*RR*VV/NN+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)*
UU*QQ/pow(RR,4.0);

```

```

else

```

```

F_PROFILE(f,thread,position)=0;

```

```

}

```

```

end_f_loop(f,thread)

```

```

}

```