

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPUTACIONAL E OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM DISPOSITIVO
CONVERSOR DA ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO
COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

LEANDRO BEHLING SCHÄFER

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre

2012

ANÁLISE COMPUTACIONAL E OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM DISPOSITIVO
CONVERSOR DA ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO
COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

LEANDRO BEHLING SCHÄFER

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Comissão de Avaliação:

Prof. Francis Henrique Ramos França

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre

2012

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Lindolfo Pieper Schäfer, e à minha mãe, Sílvia Behling Schäfer, pelo amor, pela dedicação e pelo apoio incondicional.

à minha irmã, Patrícia Behling Schäfer, pelo carinho, pelo incentivo e pelos conselhos.

ao meu orientador, Prof. Luiz Alberto de Oliveira Rocha, por ter encarado o desafio de me auxiliar no desenvolvimento desta ideia.

de uma maneira especial, ao Mateus das Neves Gomes, pelo apoio, pela atenção e pela contribuição ativa na realização e revisão deste trabalho.

ao Giuliano Massarani pela compreensão e pelo incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

aos colegas e amigos pelo companheirismo e pelos estudos em conjunto ao longo de toda a graduação.

SCHÄFER, L. B.; **Análise computacional e otimização geométrica de um dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante**. 2012. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo numérico bidimensional com a finalidade de otimizar a geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante (CAO), com base no método *Constructal Design*. Para a aplicação de tal método, são necessários um objetivo, graus de liberdade e restrições geométricas. Na presente proposta, buscou-se otimizar a razão entre a altura (H_1) e o comprimento (L) da câmara do dispositivo CAO, visando ao aumento do aproveitamento da potência da onda a ele incidente. O grau de liberdade H_1/L foi variado, enquanto que o grau de liberdade H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé do dispositivo) foi mantido fixo. A área da câmara do dispositivo CAO (A_1) e a área total do dispositivo CAO (A_2) foram mantidas constantes, constituindo-se nas restrições do problema. Empregou-se uma onda com características regulares e com dimensões em escala de laboratório. A modelagem do domínio computacional (câmara e tanque de ondas) foi feita no software GAMBIT[®], e as simulações numéricas foram realizadas com um código computacional implementado no aplicativo de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT[®], baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). No tratamento da interação água-ar, foi aplicado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Foi possível, desta forma, analisar o conversor sujeito à incidência de ondas regulares. Para fins de comparação, nove casos distintos foram analisados. O melhor caso ocorreu quando a razão H_1/L teve o valor de 0,7 e a vazão mássica, 0,33485 kg/s. Nesta configuração, o dispositivo apresentou os parâmetros H_1 e L com os valores de 0,3130m e 0,4472m respectivamente. Outro ponto destacável na análise dos casos foi a constatação de que o comprimento ideal para um dispositivo CAO situa-se na faixa de 30 a 50% do comprimento de onda incidente.

PALAVRAS-CHAVE: Coluna d'água oscilante, Análise computacional, Constructal Design, Otimização geométrica.

SCHÄFER, L. B.; **Computational analysis and geometric optimization of a wave energy converter device into electrical energy of oscillating water column type**. 2012. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

This paper proposes a two-dimensional numerical study in order to optimize the geometry of a wave energy converter into electrical energy of oscillating water column type (OWC), based on Constructal Design method. For the application of this method, a goal, degrees of freedom and geometrical restrictions are required. In this proposal, there was the aim of optimizing the ratio between the height (H_1) and length (L) of the OWC device chamber, to increase the utilization of the incident wave power. The degree of freedom H_1/L was varied, while the degree of freedom H_2/l (ratio between the height and the length of the device chimney) was kept fixed. The area of the OWC device chamber (A_1) and the total area of the OWC device (A_2) were kept constant, constituting the restrictions of the problem. The modeling of the computational domain (chamber and wave tank) was performed in the software GAMBIT[®], and numerical simulations were performed with a commercial computational fluid dynamics code, FLUENT[®], based on the Finite Volume Method (FVM). In the analysis of air-water interaction, the multiphase model Volume of Fluid (VOF) was applied. It is possible, therefore, to analyze the converter subjected to regular wave incidence. For comparison purposes, nine different cases were analyzed. The best case was verified when the ratio H_1/L had the value of 0.7 and mass flow had the value of 0.33485 kg/s. In this configuration, the device presented the parameters H_1 and L values of 0.3130m and 0.4472m respectively. Another remarkable aspect in the cases which were analyzed was the verification that the ideal length for an OWC device was located in the range of 30 to 50% of the incident wave length.

KEYWORDS: Oscillating water column, Computational analysis, Constructal Design, Geometric optimization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1. ONDAS OCEÂNICAS	2
3.2. DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR	3
3.3. POTENCIALIDADE BRASILEIRA EM ENERGIA DAS ONDAS	4
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	5
5. METODOLOGIA	5
5.1. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO DISPOSITIVO CAO	6
5.1.1. CONDIÇÕES IMPOSTAS.....	6
5.2. GENERALIDADES DO CLIMA DE ONDAS UTILIZADO.....	7
5.3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA	8
5.4. LINHAS DE MEDIÇÃO.....	9
6. COMPARAÇÃO DO MODELO	9
7. SIMULAÇÃO DOS CASOS	10
7.1. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
8. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e tecnológico traz consigo um alto consumo de energia elétrica. Para suprir essa crescente demanda de uma forma sustentável, é necessário desenvolver e ampliar tecnologias das fontes alternativas de energia. Dentre essas fontes, destacam-se estudos nas áreas de energia solar, eólica e hídricas.

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), no âmbito geral, existem três tipos de conversores de energia das ondas em elétrica: coluna d'água oscilante (CAO), corpos flutuantes e galgamento. Validado o fato de que essas alternativas, comprovadamente, são capazes de gerar energia elétrica, depara-se com alguns aspectos negativos, como a baixa eficiência e a dependência da natureza. Porém, esses quesitos apenas justificam a necessidade de maiores esforços, por parte da comunidade política e científica, pois vive-se em um momento de crescimento acentuado e, com ele, uma crise energética iminente.

Em atenção a este fato, algumas políticas vêm sendo implementadas nas últimas décadas. A mais importante e reconhecida delas é o Protocolo de Kyoto, que estabelece como meta a redução de emissão de gases causadores do efeito estufa. Grande parte dos países, incluindo o Brasil, concordou com estas novas diretrizes, que visam à reforma dos setores de energia, bem como ao incentivo e à promoção do uso de fontes de energia renováveis.

O Brasil desenvolve ações positivas no âmbito das energias renováveis. Sua matriz energética atual, conforme site do governo federal, conta com 45,3% destas formas de energia. Em 2002, foi criado o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica). Por se tratar de um país de dimensões continentais, o Brasil conta com uma faixa litorânea de aproximadamente 8000km, na qual há um grande potencial energético das ondas do mar: cerca de 40GW apenas no litoral Sul e Sudeste, segundo a COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia). Estima-se que o valor global da energia das ondas chegue a 2TW, o que torna atrativa a análise de um dispositivo capaz de converter a energia das ondas do mar em energia elétrica. Os fatos expostos fundamentam e motivam a realização deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente estudo tem como objetivo otimizar um parâmetro geométrico de um dispositivo conversor da energia das ondas do mar do tipo coluna d'água oscilante. Uma das formas de otimização geométrica que pode ser empregada é o *Constructal Design* que é baseado na *Teoria Constructal* desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008). Essa teoria explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados entre outros) pode ser fundamentada através de um princípio do acesso aos fluxos no tempo. Este princípio é a *Lei Constructal*, que afirma que para um determinado sistema persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes do fluxo através deste sistema (Bejan e Lorente, 2008).

No campo da engenharia, *Constructal Design* tem sido predominantemente empregado para a otimização geométrica de problemas na área de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Em Lopes et al. (2011) o método constructal design foi empregado em um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO afim de otimizar a relação entre o comprimento de entrada da câmara CAO e o comprimento de saída da chaminé do dispositivo. Além desse estudo, Machado et al. (2012) aplicaram os conceitos de teoria *constructal* com a finalidade de otimizar um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrico baseado no princípio de galgamento. Ambos os trabalhos apresentam resultados que mostram a possibilidade da aplicação de *Constructal Design* em

sistemas de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. Por se tratar de um escoamento multifásico, o método *Volume of Fluid* (VOF) é utilizado. Este método vem sendo largamente empregado para a simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Validações e verificações desse modelo numérico aplicado a energia das ondas do mar, e principalmente dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em Horko (2007), Gomes et. al (2009) e Ramalhais (2011)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, serão expostos alguns conceitos e aspectos pertinentes ao estudo da energia das ondas do mar.

3.1. ONDAS OCEÂNICAS

Dentre as fontes alternativas de energia, está a energia proveniente dos oceanos. De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), a classificação dessas ondas depende da sua origem. A energia oriunda das marés é resultado da interação entre os campos gravitacionais do sol e da lua; a energia das correntes marítimas resulta da diferença de temperatura e grau de salinidade; a radiação do sol produz a energia térmica dos oceanos, e a energia das ondas é proveniente da ação do vento na superfície do oceano. O vento, por sua vez, é determinado pela incidência do sol de forma irregular na superfície terrestre.

As ondas oceânicas são resultantes de superposições de diferentes ondas, o que dificulta a representação matemática deste comportamento aleatório. Segundo Carneiro (2007), a agitação do mar é causada principalmente pela ação das ondas gravitacionais, das marés, dos ventos, das tempestades e do deslocamento de gelo e terra.

Na Fig. 3.1, Martins (2003) ilustra a formação das ondas decorrentes destes fenômenos complexos.

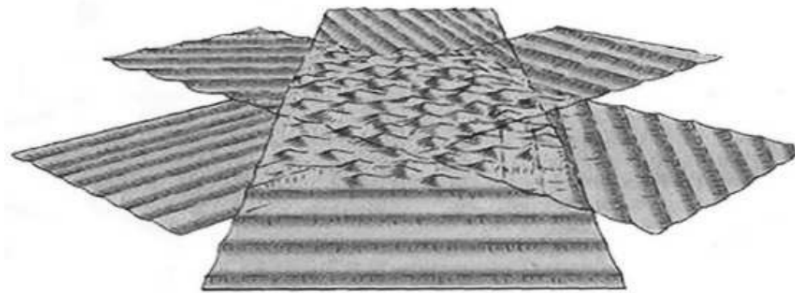


Figura 3.1: Formação das ondas oceânicas oriundas de diferentes superposições: adaptado de Martins (2003)

Em alto mar, as ondas se propagam praticamente sem perder energia. A potência por metro de frente de onda é proporcional ao quadrado do seu período e sua amplitude.

Em regiões próximas à costa, devido à redução da profundidade, a densidade de energia existente na onda diminui, em razão de perdas com a interação com o fundo do mar. Ondas oceânicas com período superior a 10s e amplitude superior a 2m podem exceder 50kW de potência gerada por metro de onda incidente.

3.2. DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

Cruz e Sarmiento (2004) indicam que os dispositivos conversores da energia das ondas do mar em energia elétrica são classificados de acordo com sua proximidade da costa. A classificação adotada compreende:

- Dispositivos costeiros (*on-shore*);
- Dispositivos próximos da costa (*near-shore*): de 8 a 25m de profundidade.;
- Dispositivos instalados afastados da costa (*off-shore*): mais de 25m de profundidade.

Outra classificação proposta pelos autores é baseada no princípio físico de funcionamento:

- Corpos flutuantes: de absorção pontual ou progressivo;
- Coluna de água oscilante (CAO);
- Galgamento.

Os dispositivos costeiros apresentam vantagens importantes em termos de facilidade de acesso e ausência de sistemas complexos de transmissão da energia gerada. Contudo, apresentam algumas restrições: há um maior impacto visual e redução da potência média das ondas, em relação ao *off-shore*, devido a efeitos dissipativos da energia por frente de onda em função da rebentação e do atrito no fundo do mar.

O sistema coluna de água oscilante (CAO), apresentado na Fig. 3.2, é a tecnologia mais conhecida e com maiores avanços em pesquisas. Em um primeiro momento, foram criadas centrais deste tipo apenas na costa (*on-shore*), como a central-piloto europeia, construída na ilha do Pico, Açores; e a central LIMPET na ilha de Islay, na Escócia.

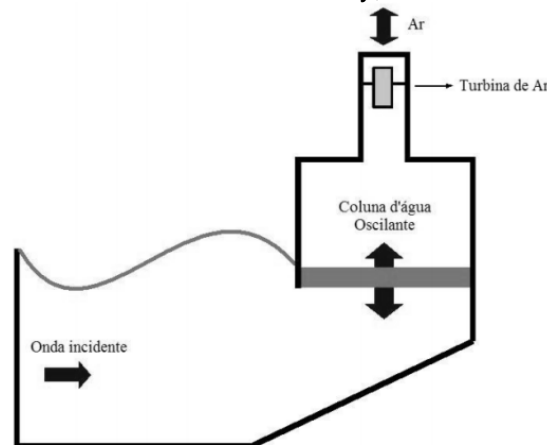


Figura 3.2: Dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna d'água oscilante (adaptado de Gomes et al., 2009)

A experiência com a construção e operação de dispositivos *on-shore* levou ao desenvolvimento do sistema em regiões *near-shore*, incorporando algumas modificações no projeto e incluindo sistemas do tipo de absorção pontual, como o projeto *AquaBuoy* (Fig. 3.3) da empresa *Finavera Renewables*.

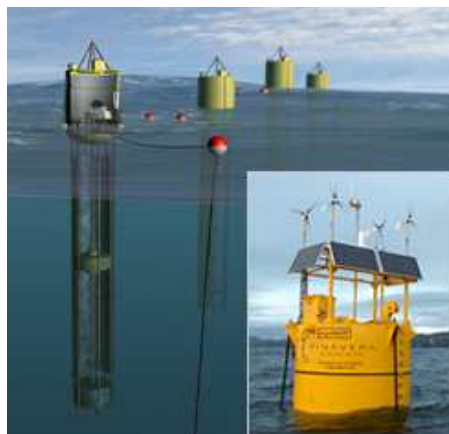


Figura 3.3: AquaBuoy – sistema conversor de energia das ondas do mar de absorção pontual (Fonte: Finavera Renewables)

Os dispositivos projetados para absorver a energia em águas profundas, como o projeto *WaveDragon*, da empresa dinamarquesa *WaveDragon Aps*, apresentado na Fig. 3.4 (do tipo galgamento), instalados afastados da costa, além de permitirem explorar mais plenamente o recurso energético, apresentam menores restrições quanto à sua localização e menor impacto visual. Esses dispositivos apresentam, no entanto, adversidades relacionadas principalmente à sua manutenção, ao transporte da energia gerada para terra e à complexidade dos processos de fixação no fundo do mar.

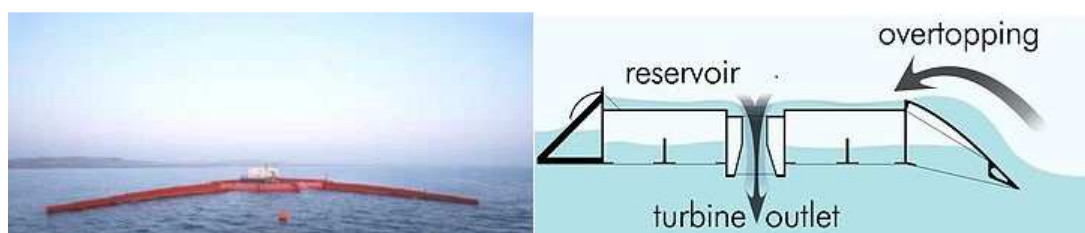


Figura 3.4: Projeto WaveDragon – conversor de energia oceânica off-shore do tipo galgamento (Fonte: www.wavedragon.net)

3.3. POTENCIALIDADE BRASILEIRA EM ENERGIA DAS ONDAS

Recentemente, foi construída no Brasil a primeira usina de ondas da América Latina. Trata-se da usina de ondas no porto de Pecém (Fig. 3.5). O projeto foi financiado pela Tractebel Energia através do programa de pesquisa e desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o apoio do governo do Ceará. Segundo a COPPE, que desenvolveu a tecnologia, o litoral brasileiro, de cerca de 8 mil quilômetros de extensão, é capaz de receber usinas de ondas que produziriam 87 gigawatts. De acordo com especialistas da COPPE, é possível converter cerca de 20% desta energia, o que equivaleria a 17% da capacidade total instalada no país.

O sistema projetado no Ceará consiste de um flutuador e um braço mecânico que, movimentados pelas ondas, acionam uma bomba para pressurizar água doce e armazená-la num acumulador conectado a uma câmara hiperbárica. A pressão na câmara equivale à de colunas de água com altura entre 200 e 400 metros, semelhante às das usinas hidrelétricas. A

água altamente pressurizada forma um jato que movimentava a turbina. Esta, por sua vez, aciona o gerador de energia elétrica.



Figura 3.5: Usina de ondas no porto de Pecém, Ceará (Fonte: COPPE, 2012)

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Os dispositivos costeiros do tipo coluna d'água oscilante (CAO) consistem em estruturas ocas semi-submersas, com uma abertura para o mar abaixo da superfície livre da água do mar, sendo que, por essa abertura, as ondas se propagam pelo interior da central, provocando a oscilação da superfície livre.

O processo de geração de energia elétrica neste tipo de dispositivo compreende duas fases: na primeira, a onda entra, provocando a compressão do ar existente dentro dela, que flui para a atmosfera através de uma coluna que contém uma turbina à qual está acoplado um gerador elétrico; na segunda fase, com o regresso da onda ao mar, o ar passa novamente pela turbina, mas em sentido inverso, devido à pressão inferior na câmara de ar da central. Para se efetuar o aproveitamento dessas duas fases, utiliza-se normalmente uma turbina do tipo *Wells*, que permite manter o sentido de rotação, independentemente do sentido de escoamento (SANTOS, 2007).

O objetivo deste trabalho é otimizar a geometria de um dispositivo do tipo CAO para o melhor aproveitamento da energia presente no clima de ondas estabelecido. Espera-se que, caso o princípio se mostre adequado para a otimização geométrica de casos mais simplificados, o mesmo possa ser extrapolado para a otimização geométrica de dispositivos reais a serem inseridos no mar.

5. METODOLOGIA

Uma das formas de otimização geométrica baseia-se no método *Constructal Design*. Esta forma utiliza o princípio da *Lei Constructal*, que afirma que, para um sistema, de volume finito no qual haja escoamento, existir, é necessário haver uma evolução geométrica de maneira a facilitar o acesso das correntes de fluxo neste sistema (BEJAN e LORENTE, 2008). Para aplicar o método *Constructal Design* na otimização geométrica de um sistema físico, são necessários: (i) um objetivo (uma grandeza a ser otimizada), (ii) graus de liberdade (parâmetros geométricos que podem variar durante o processo de otimização) e (iii) restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização).

Este trabalho tem como objetivo otimizar a razão entre a altura (H_1) e o comprimento da câmara do dispositivo CAO (L), visando ao aumento do aproveitamento da potência da onda

incidente ao dispositivo CAO. Para analisar essa relação geométrica, algumas considerações em relação às outras dimensões devem ser adotadas: a área da câmara (A_1) e a área total do dispositivo CAO (A_2) são mantidas constantes, e a relação entre altura e comprimento da chaminé (H_2/l) é mantida fixa. As dimensões podem ser observadas na Fig 5.1.

5.1. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO DISPOSITIVO CAO

A modelagem do domínio computacional (câmara e tanque de ondas) foi feita no software GAMBIT[®], e as simulações numéricas foram realizadas com um código computacional implementado no aplicativo de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT[®], baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). No tratamento da interação água-ar, foi aplicado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado. É possível, desta forma, analisar o conversor sujeito à incidência de ondas regulares.

Para melhor compreensão, o domínio computacional é apresentado na Fig. 5.1.

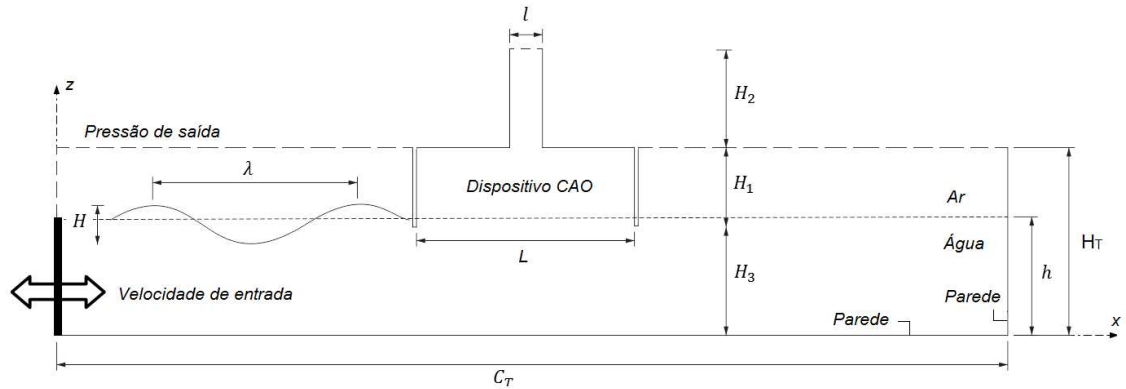


Figura 5.1: Domínio computacional esquemático do tanque de ondas

5.1.1. CONDIÇÕES IMPOSTAS

A metodologia empregada na condição de contorno no gerador de onda é a mesma utilizada em Gomes et al. (2009). Ela é baseada em uma UDF (*User Defined Function*), na qual se aplica uma velocidade de entrada que varia em função do tempo e do espaço conforme a Teoria de *Navier-Stokes* de 2ª ordem. Dado o fato de que os termos de ordem elevada influenciam de forma reduzida no que diz respeito à modelagem da propagação da onda, ela será tratada como uma onda de segunda ordem. Logo, as equações que servirão de entrada (parte inferior esquerda da Fig 5.1) são representadas por:

$$u = Agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (5.1)$$

$$w = Agk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} A^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (5.2)$$

Onde:

A: amplitude da onda (m);
 g: aceleração da gravidade (m/s²);
 λ: comprimento da onda (m);
 K: número de onda representado por $k = 2\pi/\lambda$ (m⁻¹);
 h: profundidade (m);
 T: período da onda (s);
 ω: frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (Hz);
 x: posição espacial (m);
 t: tempo (s);
 z: variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

Têm-se, ainda, as seguintes condições:

- Porção superior esquerda do tanque, porção superior do tanque e da chaminé do dispositivo CAO: utiliza-se condição de contorno de pressão atmosférica;
- Porção inferior do tanque e lateral direita: utilizam-se condições de velocidade nula e impermeabilidade e condição de não deslizamento.
- A condição inicial é de que o fluido em t=0s se encontra em repouso.

Para comparação dos resultados numéricos, utiliza-se a seguinte equação, fornecida por McCormick (1981), que descreve o movimento da superfície livre de forma analítica:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \operatorname{senh}^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (5.3)$$

Onde:

A: amplitude da onda (m);
 λ: comprimento da onda (m);
 k: número de onda representado por $k = 2\pi/\lambda$ (m⁻¹);
 h: profundidade (m);
 T: período da onda (s);
 ω: frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (Hz);
 x: posição espacial (m);
 t: tempo (s);

5.2. GENERALIDADES DO CLIMA DE ONDAS UTILIZADO

O clima de ondas é caracterizado por altura (H), período (T) e profundidade de propagação da onda (h). Com essas informações, é possível a obtenção das dimensões do tanque de ondas da Fig 5.1.

Para se evitar o efeito da reflexão sem aumentar, desnecessariamente, o domínio computacional, utilizaram-se algumas relações: que o comprimento do tanque de ondas fosse cinco vezes maior que o comprimento da onda, que a profundidade de propagação da onda

fosse a mesma do tanque, e que a altura do tanque (Ht) fosse tal que comportasse a profundidade e três alturas de onda.

Por fim, estabeleceu-se que a parcela submersa do dispositivo CAO (H3) fosse a profundidade decrescida de 75% do valor da altura da onda. Uma simplificação do modelo é não considerar a perda de carga ocasionada pela influência da existência da turbina *Wells* no duto de saída do dispositivo CAO, o que faz com que a pressão no interior do dispositivo aumente consideravelmente.

As características gerais da onda e do tanque estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características da onda e do tanque utilizado

Características gerais do problema	Valores
Comprimento do tanque (Ct)	5,000 m
Altura do tanque (Ht)	0,800 m
Comprimento da onda (λ)	1,000 m
Altura da onda (H)	0,140 m
Período da onda (T)	0,800 s
Profundidade (h)	0,500 m
Profundidade da CAO (H3)	0,395 m

5.3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

O método *Volume of Fluid* é um modelo numérico multifásico que possibilita abordar adequadamente a interação entre água e ar no interior do tanque de ondas. Nessa formulação, a superfície livre pode ser identificada pela fração de volume (f) variável.

Tem-se que quando $f=0$, o elemento de malha contém apenas ar, e que quando $f=1$, contém apenas água. Quando $0 < f < 1$, o elemento contém a combinação de ambos os fluidos.

Conforme Gomes et al. (2009), um fluido newtoniano pode ter as equações de continuidade e *momentum* representadas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (5.5)$$

Onde:

\vec{v} : vetor velocidade (m/s);

ρ : massa específica (kg/m³);

t : tempo (s);

\vec{g} : vetor aceleração da gravidade (m/s²);

p : pressão (Pa);

$\bar{\tau}$: tensor tensão (Pa).

A fração volumétrica é modelada adicionando-se ao sistema uma equação de transporte para f tal que:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f \vec{v}) = 0 \quad (5.6)$$

5.4. LINHAS DE MEDIÇÃO

Para a obtenção de dados como elevação da superfície livre, pressão de ar e vazão mássica, utilizaram-se linhas de medição numérica. Essas linhas, posicionadas conforme a Fig. 5.2, computam os valores para a grandeza analisada ao longo do tempo. As linhas em vermelho na Fig. 5.2 registram a altura da fase água afastadas de 1 e 2m da entrada da função de velocidade (UDF), e a linha em azul registra os valores para pressão e vazão mássica na coluna do dispositivo. O software EXCEL foi utilizado para a etapa de pós-processamento.

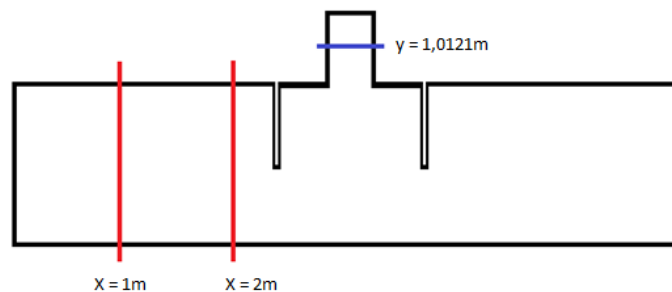


Figura 5.2: Exposição das linhas de controle para aquisição de dados no tanque

6. COMPARAÇÃO DO MODELO

Para a utilização de um modelo numérico para análises de casos complexos, faz-se necessária, primeiramente, sua validação por meio de uma comparação com um caso analítico de solução conhecida.

No presente trabalho, é proposta uma configuração de um tanque com as mesmas características do tanque a ser utilizado nas simulações. Porém, trata-se de um simples tanque sem o dispositivo CAO integrado.

Para discretização do domínio computacional, utilizou-se malha quadrada estruturada com dimensão de 0,01m. O avanço no tempo adotado foi de 0,001s.

Linhas de medição para a elevação da superfície livre foram utilizadas afastadas 1 e 2m da lateral esquerda (inserção da condição de velocidade por meio da UDF) como parâmetro comparativo entre o resultado analítico e a simulação numérica.

Na Fig. 6.1., está apresentado o tanque de ondas utilizado na validação do modelo. A parcela em azul representa a fase ar e a parcela em vermelho representa a fase água.

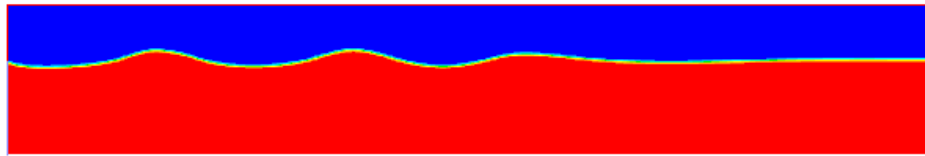


Figura 6.1: Tanque utilizado para a validação do modelo numérico mediante um clima de ondas conhecido

A Fig. 6.2. ilustra o comportamento da elevação da superfície livre ao longo do tempo para o caso analítico e numérico. Uma vez que a resposta de saída do caso da comparação assemelhou-se à resposta analítica, é possível afirmar que o modelo numérico utilizado é coerente. O erro máximo, após a propagação estável da onda ($t > 2,4s$), foi de 2,64%. Percebe-se, ainda, que as ondas estão em fase.

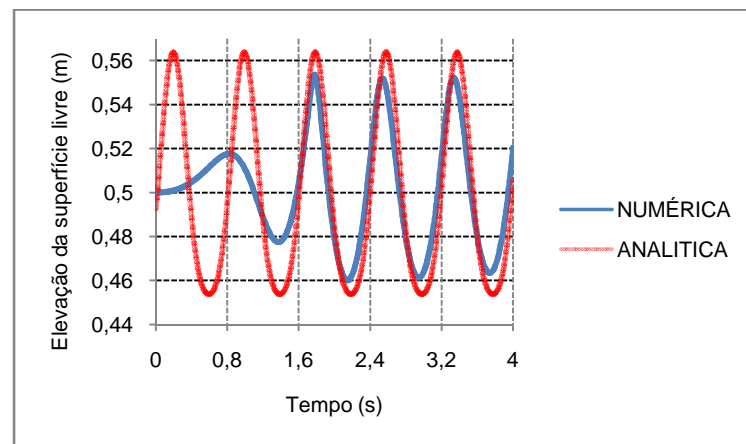


Figura 6.2: Comparativo gráfico entre o modelo numérico e resposta analítica para um tanque de ondas

7. SIMULAÇÃO DOS CASOS

Após a comparação, foi introduzido no domínio computacional o dispositivo CAO modelado conforme exposto na figura 7.1.

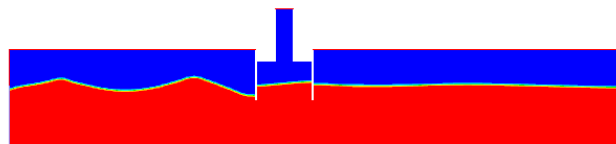


Figura 7.1: Domínio computacional para simulação do tanque de ondas com o dispositivo CAO agregado

Para a elaboração deste trabalho, duas restrições geométricas globais foram impostas: a área da entrada do dispositivo CAO (A_1) e a área total do dispositivo CAO (A_2), que são dadas respectivamente por:

$$A_1 = H_1 L \quad (7.1)$$

$$A_2 = A_1 + H_2 l \quad (7.2)$$

A razão entre a altura (H_2) e o comprimento da chaminé (l) do dispositivo foi fixada. O grau de liberdade (H_2/l) referente a essa condição tem valor arbitrado igual a 3.

Para a escolha do primeiro caso a ser analisado, foi considerado que o comprimento do dispositivo CAO (L) fosse igual ao comprimento da onda em questão (λ), ($A_1 = 0,14$). Para os demais casos, o valor do comprimento do dispositivo foi decrescido em relação ao comprimento de onda até uma proporção de 25%. Foram considerados nove casos para representar o comportamento da onda quanto à vazão mássica e à potência gerada. Os casos analisados estão representados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Casos analisados variando-se a geometria do dispositivo CAO

Caso	H_1/L	H_1 [m]	L [m]	l [m]	H_2 [m]
1	0.14	0.1400	1.000	0.1414	0.4242
2	0.28	0.1979	0.7071	0.1414	0.4242
3	0.42	0.2424	0.5773	0.1414	0.4242
4	0.56	0.2800	0.5000	0.1414	0.4242
5	0.70	0.3130	0.4472	0.1414	0.4242
6	0.84	0.3429	0.4082	0.1414	0.4242
7	0.98	0.3704	0.3779	0.1414	0.4242
8	1.26	0.4200	0.3333	0.1414	0.4242
9	2.24	0.5600	0.2500	0.1414	0.4242

Os resultados para a vazão mássica e potência foram considerados em faixas de tempo nas quais a onda já estivesse completamente estável dentro do dispositivo. O dispositivo CAO encontra-se a uma distância de 2m à direita do gerador de ondas, ou seja, dois comprimentos de onda. Dessa forma, estima-se que a propagação da onda fique estável, na região do dispositivo CAO, após a geração da terceira onda, ou seja, quando $t \geq 2.4$ s. Para os casos analisados, considerou-se a propagação de cinco ondas (4s), o que significa a ausência dos efeitos da reflexão neste espaço de tempo.

Os valores médios foram calculados por meio da média RMS, dada pela equação 7.3.

$$\bar{M} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T m^2 * dt} \quad (7.3)$$

Para avaliar a potência hidropneumática (P), é utilizada a seguinte expressão, utilizada por Dizadji e Sajadian (2011) e Oliveira (2012):

$$P = \left(P_{ar} + \rho_{ar} \frac{v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (7.4)$$

Onde:

P: Potência hidropneumática (W);

P_{ar} : pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa);

ρ_{ar} : massa específica do ar (kg/m^3);

\dot{m} : vazão mássica de ar que passa na turbina (kg/s);

v_{ar} : é a velocidade do ar no duto da turbina (m/s). Dada por $v_{ar} = \dot{m} / A \rho_{ar}$.

Para todas as simulações, foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto que a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método *presto*, e o método *geo-reconstruction* foi aplicado para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade, foi empregado o método *piso*. Fatores de sub-relaxação foram utilizados para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente. Utilizou-se, para as simulações, computador provido de processador com dois núcleos de 2,53GHz, memória RAM de 3Gb DDR3, HD SATA de 320Gb com rotação de 7200rpm. O tempo médio de simulação para cada caso foi de aproximadamente 5 horas.

7.1. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para pressão, vazão mássica e potência gerada são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Resultados das simulações para os diferentes casos estudados

Caso	H_1/L	Pressão [Pa]	Vazão mássica [kg/s]	Potência [W]
1	0.14	2,3114	0,2092	0,03444
2	0.28	3,3095	0,30884	0,07538
3	0.42	3,624	0,33466	0,0905
4	0.56	3,5871	0,3317	0,09176
5	0.70	3,6868	0,33485	0,09873
6	0.84	3,6848	0,33062	0,09803
7	0.98	3,6058	0,32231	0,09475
8	1.26	3,5311	0,31058	0,09137
9	2.24	3,3749	0,28147	0,08282

A Fig. 7.2 ilustra a curva de medição da vazão mássica nos casos estudados no sistema de onda em questão.

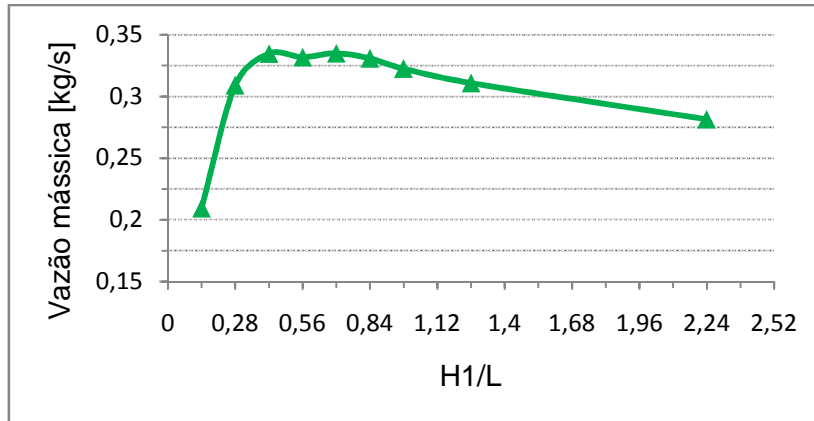


Figura 7.2: Curva da vazão mássica para os diferentes casos estudados

É possível perceber que o ponto ótimo deu-se na situação em que a razão $H1/L$ teve o valor de 0,7. Nesta configuração, os parâmetros $H1$ e L apresentaram os valores de 0,3130m e 0,4472m respectivamente. O segundo ponto de melhor eficiência ocorreu quando a razão $H1/L$ apresentou o valor de 0,84. Por meio de uma análise geral dos casos estudados, percebeu-se que a faixa compreendida entre os casos 4 e 8 forneceu os maiores valores de potência. Constatou-se, por meio desse fato, que o comprimento ideal para um dispositivo CAO situa-se na faixa de 30 a 50% do comprimento de onda incidente. Essa análise expõe a ideia de que o dimensionamento ideal de um dispositivo de coluna d'água oscilante depende das características do clima de onda ao qual será submetido. Tomando-se como referência o caso de menor eficiência ($H1/L=0,14$), a faixa citada apresenta uma vazão mássica de 48 a 60% superior.

A Fig. 7.3 ilustra a diferença entre a razão $H1/L$ entre os casos 1 e 5 no *time-step* de número 3200.

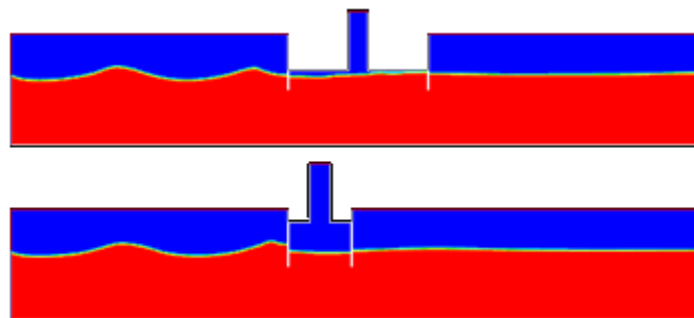


Figura 7.3: Diferença na geometria do dispositivo entre os casos 1 e 5 analisados

A Fig. 7.4 apresenta a curva da potência na simulação dos casos. É possível perceber que, a partir do valor de 0,84 para a razão $H1/L$, a potência gerada decresce de uma forma mais abrupta, e esse comportamento se mantém conforme o aumento da relação.

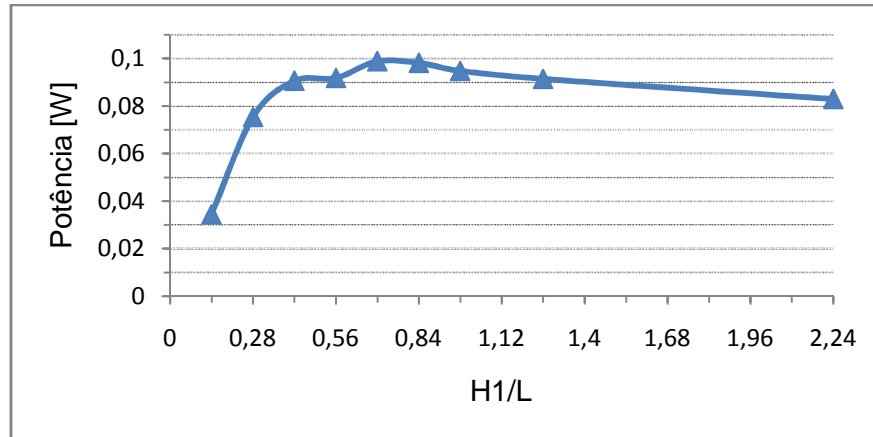


Figura 7.4: Curva da potência gerada para os diferentes casos estudados

Os resultados obtidos são promissores, pois fornecem, através da otimização de um parâmetro geométrico baseado no método *Constructal Design*, uma recomendação teórica a respeito de uma geometria de um dispositivo CAO de modo a melhorar o aproveitamento da energia existente nas ondas incidentes. Planeja-se, em um trabalho futuro, efetuar outras simulações variando-se o parâmetro que envolve a profundidade do dispositivo CAO (H3). Espera-se obter um valor de H3 otimizado para cada ponto ótimo conhecido da relação H1/L tratada neste trabalho. Expõe-se a ideia de obter a melhor geometria para uma dada condição de onda por meio da variação desses parâmetros.

Este fato cria a possibilidade de, ao se conhecerem as características das ondas no local de inserção de um dispositivo de coluna d'água oscilante, utilizar os parâmetros de forma mais adequada no que tange à obtenção da máxima vazão mássica.

8. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, analisou-se, por meio de um modelo numérico, a otimização de um dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante (CAO). Estudou-se a influência de modificações de parâmetros geométricos visando à obtenção de maior vazão mássica na coluna do dispositivo.

A partir da proposição de um modelo numérico, validado por meio de comparação com caso de resposta analítica conhecida, simularam-se casos com a razão entre a altura (H1) e o comprimento da câmara (L) do dispositivo CAO distintos.

O caso no qual foi obtida a maior vazão mássica deu-se quando a razão H1/L apresentou o valor de 0,7. Nesta configuração, o dispositivo apresentou os parâmetros H1 e L com os valores de 0,3130m e 0,4472m respectivamente. Outro ponto destacável na análise dos casos foi a constatação de que o comprimento ideal para um dispositivo CAO situa-se na faixa de 30 a 50% do comprimento de onda incidente. Essa análise permite inferir que o dimensionamento ideal de um dispositivo de coluna d'água oscilante depende das características do clima de onda imposto. Tal fato possibilita que, uma vez conhecidas as características da onda no local onde o dispositivo CAO será incorporado, seja utilizada a melhor relação dos parâmetros estudados neste trabalho (H1 e L) e, conseqüentemente, haja obtenção de ganho de potência gerada.

Aponta-se para um estudo futuro no qual seja variado o parâmetro que envolve a profundidade do dispositivo CAO (H3). Espera-se obter um valor de H3 otimizado para cada ponto ótimo conhecido da relação H1/L. Assim, conhecido o clima de ondas, é possível propor a geometria mais eficiente para um dispositivo conversor da energia das ondas do mar do tipo coluna d'água oscilante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bejan, A., Lorente, S. “**Design with Constructal Theory**”. Wiley, Hoboken. 2008.
- Carneiro, M. L. “**Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**”. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2007.
- COPPE. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Disponível em: <<http://www.coppe.ufrj.br>>. Acesso em: 12 out. 2012.
- Cruz, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A. “**Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais**”. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal, 2004.
- Dizadji N.,Sajadian S. E. “**Modeling and optimization of the chamber of OWC system**”, Energy. 2011.
- Dos Santos, S. “**Potencial energético dos oceanos**”, ISEL. 2007.
- FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2006.
- 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, v. 8, 2009.
- Horko, M.,“**Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter**”. Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália. 2007
- Lopes, N. et al. “**Constructal design optimization of the geometry of an oscillating water column wave energy converter (OWC-WEC)**”, In Proceedings Constructal law conference. UFRGS, Porto Alegre. 2012,”
- Machado, B. N. ; Zanella, M. M. ; Gomes M. das N. ; Teixeira, P. R. F. ; Isoldi, L. A. ; Santos, E. D. dos ; Rocha, L. A. O. Constructal design of an overtopping wave energy converter. UFRGS, Porto Alegre. 2011.
- Martins, J. A. de A. “**Análise de ondas em tanques de dimensões reduzidas com vistas à engenharia oceânica**”. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2003.
- McCormick, M. E. “**Ocean Energy Conversion**”, John Wiley & Sons, New York. 1981.
- Ministério de Minas e Energia – Governo Federal Brasileiro. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/spe/menu/publicacoes.html>>. Acesso em: 12 out. 2012.
- Ramalhas, R. dos S.. “**Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**”. Dissertação em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. 2011.