MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM DISPOSITIVO DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE PARA A COSTA DE RIO GRANDE

MATEUS DAS NEVES GOMES [1], LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI[2],CLAUDIO RODRIGUES OLINTO[3], LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA[4], ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS[5],JEFERSON ÁVILA SOUZA[6]

Resumo

Este trabalho apresenta a modelagem computacional de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) submetido ao clima de ondas da costa da cidade de Rio Grande. A simulação numérica foi realizada utilizando-se o pacote FLUENT® e empregando-se o modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) na geração da onda e na interação da mesma com o conversor. O domínio computacional foi representado por um tanque de ondas acoplado ao dispositivo CAO, possibilitando analisar o seu comportamento quando sujeito a incidência de ondas regulares com características semelhantes ao clima de ondas na costa de Rio Grande. Os resultados obtidos demonstram a potencialidade da região em gerar energia elétrica a partir da energia das ondas do mar, através do conversor tipo CAO.

[1] Universidade Federal do Rio Grande (FURG).Msc., Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: mateusufpel.gomes@gmail.com
[2] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. Dr. do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: liercioisoldi@furg.br
[3] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. Dr. do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: claudioolinto@furg.br
[4] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. PhD. do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: laorocha@gmail.com
[5] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. Msc. da Escola de Engenharia. Email: elizaldosantos@furg.br
[6] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. Dr. do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: jasouza@furg.br

Palavras - chaves: Coluna da água oscilante (CAO); Energia das ondas; Volume of Fluid (VOF); FLUENT®; Modelagem Computacional

COMPUTATIONAL MODELING OF AN OSCILLATING WATER COLUMN DEVICE FOR THE RIO GRANDE COAST

Abstract

This work presents the computational modeling of a converter of wave energy in electrical energy. The converter is Oscillating Water Column (OWC) type, submitted to the wave climate of Rio Grande city. The numerical simulation was performed using FLUENT® package and employing the multiphase Volume of Fluid (VOF) model in the wave generation and in the interaction between the wave and the converter device. The computational domain was represented by a wave tank coupled with the OWC device. This domain allows the behavior analysis to be performed when the device is subjected to the incidence of regular waves. The waves were molded to represent the characteristics of the Rio Grande coast climate. Results demonstrate that the OWC converter can be successfully used to convert the Rio Grande's coast wave energy in useful electrical energy.

Keywords: Oscillating Water Column (OWC); Wave Energy; Volume of Fluid (VOF); FLUENT®; Computational Modeling

1. INTRODUÇÃO

Atualmente são muitas as discussões sobre energia, em especial a energia elétrica, tanto no que diz respeito à questão de consumo quanto à transformação e geração da mesma. Os países têm investido na exploração de novas fontes de energia, principalmente nas chamadas fontes renováveis de energia, dentre as quais, a possibilidade de transformar a energia contida nos oceanos em energia elétrica tem merecido destaque. De acordo com [1], a energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que gera diferentes classificações. As mais relevantes são, sem dúvida, a energia das marés, fruto da interação dos campos gravíticos da lua e do sol; a energia térmica dos oceanos, conseqüência direta da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés; e, finalmente, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano. Esta última pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros em alto mar, praticamente, sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 kW por metro de frente de onda.

A cidade de Rio Grande, localizada ao sul do litoral brasileiro, caracteriza-se por ser uma cidade portuária e, portanto, com um grande potencial marítimo a ser explorado. Neste contexto, uma das possibilidades seria a transformação da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica. De acordo com [2] e [3], o clima de ondas na costa de Rio Grande pode ter ondas com uma altura média entre 1,0 e 1,5 m bem como períodos entre 8 e 10 s.

Conforme [1], para realizar tal conversão de energia existem diversas tecnologias que podem ser classificadas da seguinte forma:

- Dispositivos costeiros (on-shore);
- Dispositivos próximos da costa (near-shore);

- Dispositivos afastados da costa (off-shore);

Outra forma para classificar os equipamentos de conversão de energia das ondas é com relação ao seu princípio físico de funcionamento:

- Coluna de água oscilante, CAO (OWC - Oscillating water column);

- Corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (Pointer Absorbers) ou progressivos (Surging Devices);

- Galgamento (Overtopping devices);

Neste trabalho foi abordado o princípio de funcionamento de um dispositivo tipo CAO, onde sua modelagem computacional foi desenvolvida. Realizou-se um estudo com a finalidade de observar o comportamento desse conversor quando submetido à incidência de ondas com características compatíveis com o clima de ondas da costa de Rio Grande. Para isso, considerou-se que o conversor tipo CAO está disposto em um tanque de ondas no qual, com o emprego do modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) – como em [4], [5] e [6] – foi possível a simulação numérica da geração de ondas regulares com características semelhantes às existentes na região costeira de Rio Grande, possibilitando observar a incidência dessas ondas no dispositivo CAO.

As análises realizadas dizem respeito às velocidades, pressões e fluxos de massa em regiões interiores ao conversor, sendo esta uma etapa inicial para conhecer e entender o comportamento do conversor tipo CAO quando exposto ao clima de ondas da costa de Rio Grande. A modelagem do domínio computacional (conversor e tanque de ondas) foi feita no software GAMBIT® e a simulação numérica foi realizada no aplicativo FLUENT®, considerando um modelo bi-dimensional.

2. POTENCIAL COSTEIRO DA CIDADE DE RIO GRANDE

A cidade de Rio Grande está situada no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, entre a Lagoa Mirim, a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico, onde construiu sua riqueza ao longo de sua história devido à forte movimentação industrial. Ainda hoje é uma das cidades mais ricas do Rio Grande do Sul, e a mais rica da Zona Sul do estado, principalmente devido ao seu porto (o segundo em movimentação de cargas do Brasil),

[7]. A economia da cidade esta direcionada em grande parte para o mar, como é possível observar-se na FIGURA 1, Rio Grande é uma cidade marítima por excelência.

Rio Grande tem se destacado em âmbito estadual e nacional, ao longo dos últimos anos, pois com a ampliação do canal no porto da cidade novos investimentos deram um grande impulso na economia do município. Inclusive, atualmente, um pólo naval está se desenvolvendo na cidade.



Figura 1 - Vista aérea de Rio Grande [8].

Neste contexto e considerando a busca por novas fontes renováveis de energia, Rio Grande destaca-se por possuir um grande potencial oceânico a ser explorado. Portanto neste trabalho busca-se estudar o comportamento de um dispositivo do tipo CAO aplicado às condições do clima de ondas da costa da cidade de Rio Grande.

3. DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

Os dispositivos do tipo coluna de água oscilante são, basicamente, estruturas ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como mostra a FIGURA 2. De acordo com [1], o processo de geração de eletricidade segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como conseqüência 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, devido a pressão inferior no interior da "câmara de ar". Para aproveitar estes movimentos opostos, normalmente, utiliza-se a turbina do tipo Wells, que possui a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica. A câmara CAO é o dispositivo mais avançado em quantidade e duração de protótipos testados no mar, tendo inclusive algumas centrais piloto instaladas, onde atualmente se destacam a Central piloto da Ilha do Pico nos Açores (Portugal) e a Central do LIMPET na ilha de Islay (Escócia).

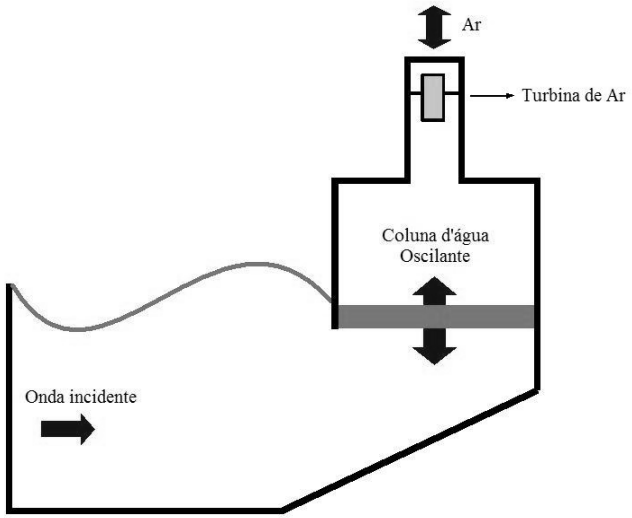

Figura 2 - Dispositivo do tipo CAO.

A câmara CAO é o dispositivo mais avançado em quantidade e duração de protótipos testados no mar, tendo inclusive algumas centrais piloto instaladas, onde atualmente se destacam a Central piloto da Ilha do Pico nos Açores (Portugal) e a Central do LIMPET na ilha de Islay (Escócia).

4. DOMÍNIO COMPUTACIONAL

O domínio computacional utilizado na simulação numérica consiste basicamente de uma câmara do tipo CAO disposta no final de um tanque de ondas, conforme é possível observar na FIGURA 3.

A metodologia empregada baseia-se no modelo VOF, que permite simular computacionalmente o comportamento do ar no interior da câmara CAO, de uma forma muito próxima à realidade, pois por ser multifásico permite a observação de como ocorre a interação entre água e ar em todo o domínio computacional.

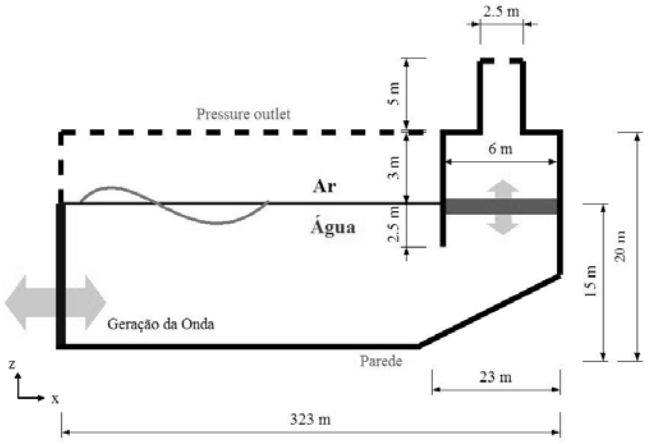

Figura 3 - Representação esquemática do domínio computacional .

Na FIGURA 3 ainda é possível observar que no fundo do tanque de ondas existe uma inclinação de 23o que atenua parcialmente os efeitos de reflexão da onda, reproduzindo os efeitos de uma praia, contribuindo para a câmara CAO apresentar um comportamento muito próximo ao de um pistão.

4.1. Condições de Contorno

Como é possível observar na FIGURA 3, na parte superior do tanque de ondas, denominada de pressão de saída, é aplicada a condição de contorno de pressão atmosférica e na condição de contorno denominado parede é considerada uma velocidade nula. No que diz respeito ao gerador de ondas, é imposta a condição de contorno semelhante a utilizada em [5] e [6], que consiste em aplicar ao mesmo uma velocidade de entrada (velocity inlet) através de uma função definida pelo usuário (UDF – User Defined Function), ou seja por meio de um código escrito na linguagem C que reproduz a variação de velocidades na região de entrada do tanque de ondas de acordo com as seguintes equações:

$$u = Agk\frac{\cosh\left(kz+kh\right)}{\omega\cosh\left(kh\right)}\cos\left(kx-\omega t\right)+A^2\omega k\frac{\cosh 2k\left(k+z\right)}{sen^4\left(kh\right)}\cos 2\left(kx-\omega t\right) \quad (1)$$

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

onde: A é a amplitude da onda, g é a aceleração da gravidade, k é o número de onda que é dado por $k = 2\pi/L$ sendo L o comprimento da onda, h é a profundidade, ω é a freqüência que é dada por $\omega = 2\pi/T$ sendo T é o período da onda, x é a posição, t representa o tempo e z é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar. As Eq. (1) e a Eq. (2) baseiam-se na Teoria de Stokes de 2a ordem para ondas de superfície. Detalhes a respeito desta teoria podem ser encontrados em [9].

5. MODELO NUMÉRICO

Como já foi dito, a metodologia empregada baseia-se no modelo VOF, que permite simular computacionalmente o dispositivo do tipo CAO acoplado ao tanque de ondas, observando a interação entre água e ar de uma forma muito próxima à realidade, conforme em [10].

Com o VOF é possível modelar dois ou mais fluidos, resolvendo um único conjunto de equações para a quantidade de movimento e localizando a fração volumétrica de cada um dos fluídos ao longo do volume. A formulação VOF baseia-se no fato de que as duas ou mais fases são impenetráveis. Para cada fase adicional acrescentada ao modelo, a fração volumétrica é calculada no volume. Em cada volume de controle, a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios calculados no volume, contanto que a fração volumétrica de cada uma das fases seja conhecida localmente. Assim, as variáveis e propriedades em um determinado volume representam uma das fases ou uma mistura de fases, dependendo dos valores da fração do volume. Em outras palavras, se a q-ésima fração volumétrica do fluído é denotada como α_q, então as três seguintes condições são possíveis:

- $\alpha_q = 0$: o volume está vazio (do q-ésima fluido);

- $\alpha_q = 1$: o volume está cheio (do q-ésima fluido);

- $0 < \alpha_q < 1$: o volume contém a interface entre o q-ésima fluido e um ou mais fluidos;

O modelo numérico empregado consiste basicamente na equação da continuidade para a fração de uma ou mais fases:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q\right) + \nabla\left(\alpha_q \rho_q \vec{v_q}\right) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^{n}\left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}\right)\right] \tag{3}$$

onde: $\dot{m}_{qp}$ é a transferência de massa da fase q para a fase p, $\dot{m}_{pq}$ é a transferência de massa da fase p para a fase q e $S_{\alpha q}$ é o termo fonte que neste caso é zero.

E também da equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \vec{v}\right) + \nabla\left(\rho \vec{v}\vec{v}\right) = -\nabla p + \nabla.\left[\mu\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{T}\right)\right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{4}$$

onde: p é a pressão estática, $\rho \vec{g}$ é a força gravitacional , $\vec{F}$ são forças externas, μ é a viscosidade.

6. VALIDAÇÃO DA PRESENTE SOLUÇÃO

Para validar a metodologia empregada nesta pesquisa, utilizou-se uma estratégia que consiste em gerar a onda no tanque de ondas e observar sua variação na superfície livre da água, ou seja, a amplitude da onda, para posteriormente comparar com a equação analítica para a variação da superfície livre da água em um dado ponto do tanque de ondas, que é definida da seguinte forma:

$$\eta = A\cos\left(kx - \omega t\right) + \frac{A^2 k \cosh\left(kh\right)}{4\, sen h^3\left(kh\right)}\left[2 + \cosh\left(2kh\right)\right]\cos 2\left(kx - \omega t\right) \tag{5}$$

Cabe destacar que foi gerada uma onda com características iguais a utilizada no estudo de caso do presente trabalho, conforme a Tabela 1, mostrando assim a

eficiência e a capacidade do modelo VOF em gerar ondas com características previamente desejadas.

Tabela 1 - Características da onda utilizada.

Características	Valores
Período (T)	10.0 s
Altura (H)	1.5 m
Comprimento (L)	109.0 m
Profundidade (h)	15.0 m

Na FIGURA 4 apresenta-se graficamente a comparação da onda numérica gerada neste trabalho com a onda analítica obtida pela Eq. (5). É importante destacar que estes resultados foram reproduzidos em um tanque de ondas com mesmas dimensões ao apresentado na FIGURA 3.

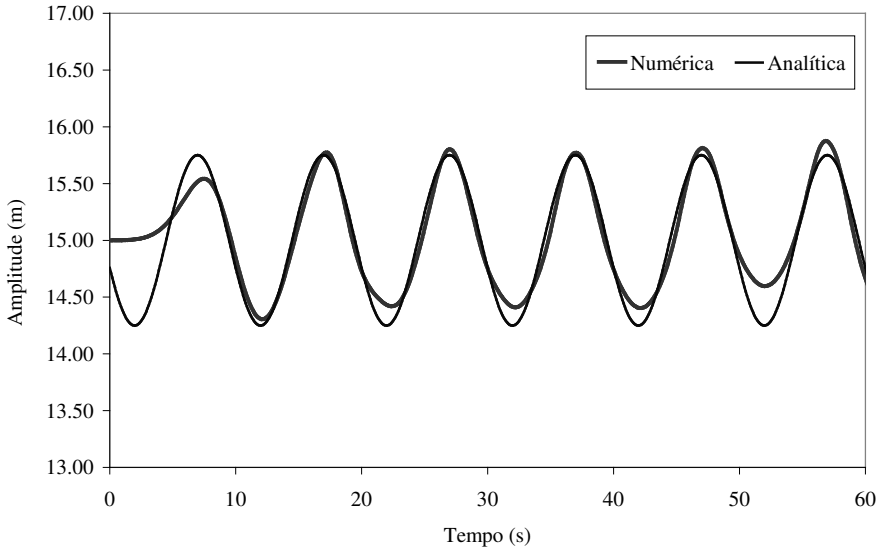

Figura 4 - Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo.

A comparação mostrada na FIGURA 4 foi realizada na posição x=50 m e observou-se uma diferença máxima de 2% entre os resultados numéricos e analíticos.

Na FIGURA 5 apresenta-se a interface ao longo de um comprimento de onda gerada no tanque de ondas através da aplicação do modelo VOF.



Figura 5 - Geração da onda com o modelo VOF

7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O estudo de caso proposto consiste em analisar numericamente e graficamente o comportamento de um dispositivo do tipo CAO quando submetido a um clima de ondas característico da cidade de Rio Grande. Para tanto foi realizada uma simulação a fim de gerar ondas com características de acordo com as apresentadas na Tabela 1. Essas características estão baseadas em [2] e [3], e representam uma média das características reais de ondas na costa da cidade de Rio Grande.

A simulação foi realizada no domínio computacional apresentado na FIGURA 3, adotando-se o regime laminar bem como o algoritmo PISO para o acoplamento da pressão-velocidade. Utilizou-se uma malha regular formada por 146,495 volumes finitos do tipo quadrado com um tamanho de 0.2 m.

A primeira análise feita foi em relação ao movimento da coluna de água no interior do dispositivo. Na FIGURA 5 é possível observar a interação entre água (cor vermelha) e ar (cor azul) no interior da câmara CAO, caracterizando as etapas de descompressão e compressão do ar.



Figura 5 - Descompressão e compressão na câmara CAO.

Como esperado, pela FIGURA 5, é possível perceber que o movimento entre água e ar no interior do conversor possui um comportamento muito semelhante ao de um pistão.

Esse movimento de pistão pode ser observado, de forma quantitativa, na FIGURA 6. Notar que após 40 s, que é o intervalo de tempo que as primeiras ondas levam para chegar até o final do tanque e incidirem no dispositivo CAO, o movimento da coluna de água oscilante estabiliza e passa a ter um comportamento bastante regular, deslocando-se aproximadamente 1.6 m acima da superfície livre da água e 1.6 m abaixo da superfície livre da água. Isso mostra um resultado satisfatório se compararmos a amplitude da coluna de água no interior do dispositivo com a amplitude da onda incidente.

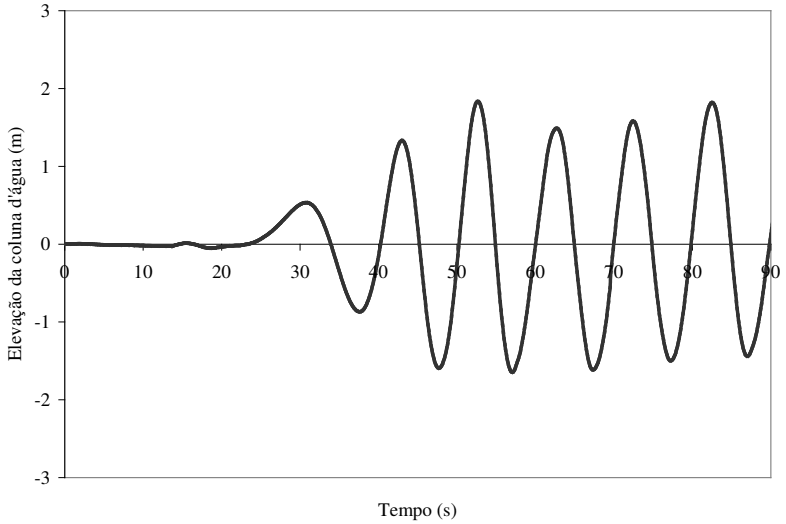

Figura 6 - Elevação da coluna de água.

Outro aspecto analisado foi a distribuição das velocidades no interior da câmara CAO, pois esta avaliação é de fundamental importância, por exemplo, para a realização de um estudo de otimização geométrica do dispositivo. Então, na FIGURA 7 e na FIGURA 8 é possível observar a topologia das velocidades na direção vertical y, no interior do dispositivo CAO, em um estágio de compressão e de descompressão, respectivamente.

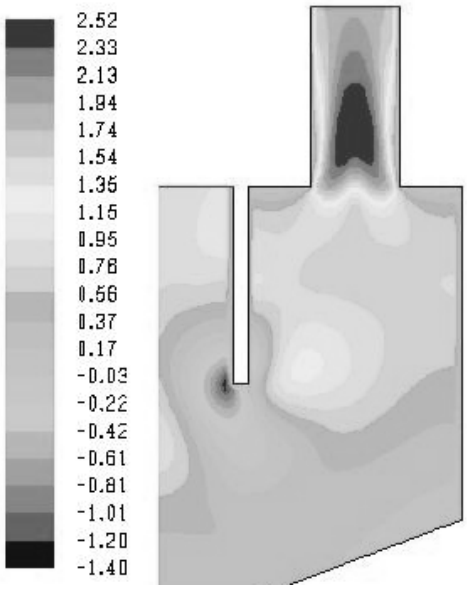

Figura 7 - Velocidades na direção y na compressão.

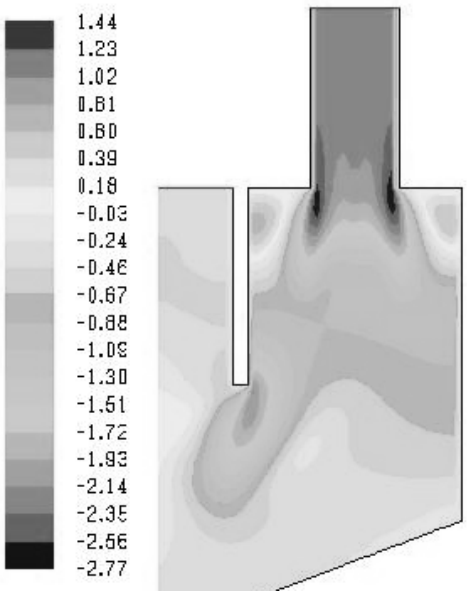

Figura 8 - Velocidades na direção y na descompressão.

Ainda é possível observar na FIGURA 7 e na FIGURA 8 que, a velocidade máxima na compressão e a velocidade mínima na descompressão são equivalentes, mostrando que o comportamento do dispositivo é semelhante para estas duas situações, porém em sentidos opostos. Então, este equipamento é capaz de converter a energia das ondas do mar em energia elétrica, através de uma turbina adequada, quando a onda incidir no dispositivo e quando a onda regressar do mesmo, conforme descrito no item 3.

Outro parâmetro que é de grande importância analisar é o fluxo de massa no duto de saída da câmara CAO, pois é nesta região que se localiza a turbina. O conhecimento do fluxo de ar nesta região possibilita o dimensionamento correto da turbina.

Na FIGURA 9 apresenta-se graficamente o comportamento do fluxo de massa em uma linha no interior do duto de saída da câmara CAO (na posição y=22 m).

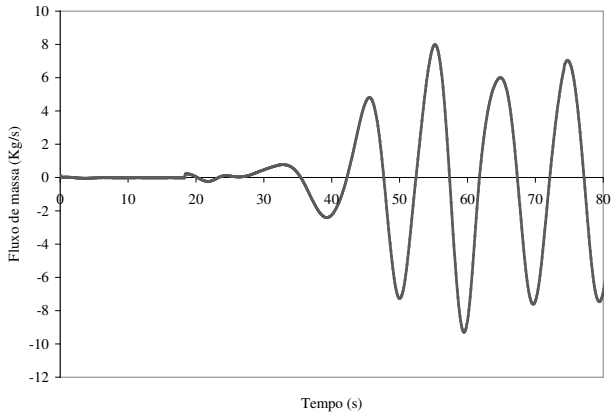

Figura 9 - Fluxo de massa em y=22 m.

E, finalmente, na FIGURA 10 é apresentado o comportamento da pressão dinâmica ao longo do tempo em duas diferentes regiões da câmara, em y =17 m e y =22 m.

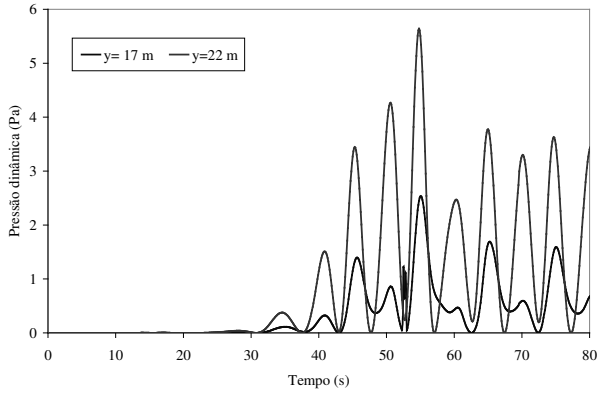

Figura 10 - Pressão dinâmica no interior da câmara.

8. CONCLUSÕES

Com base nos diversos resultados obtidos neste trabalho, onde um dispositivo do tipo CAO acoplado a um tanque de ondas foi estudado, entende-se que a modelagem computacional empregando o método VOF se apresenta como uma alternativa eficiente para analisar este tipo de conversor de energia.

Além disso, como a geração de ondas foi realizada de acordo com as características do clima de ondas existente na costa de Rio Grande, foi possível

observar a potencialidade da região em produzir energia elétrica a partir da energia das ondas do mar.

Cabe destacar que na pesquisa bibliográfica realizada não foram encontradas soluções analíticas para o comportamento do ar no interior da CAO, principalmente se este for causado por ondas incidentes ao conversor.

Assim, fica evidente a importância e a necessidade da simulação numérica tanto para definir a viabilidade de utilização do dispositivo tipo CAO em uma determinada região, como também no desenvolvimento e aperfeiçoamento de projetos destes equipamentos.

REFERÊNCIAS

[1] CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A., **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais**. Ed. Instituto do Ambiente, 2004.

[2] CUCHIARA,D; et. at., Modelagem numérica do comportamento das ondas na costa do Rio Grande do Sul. **II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, Rio Grande, 2006.

[3] STRAUCH, J.C. 1997. Monitoramento de Ondas em Rio Grande. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Vitória, ES, Brasil, 4:385-391.

[4] LIU, et. al, Aplication of Numerical Wave Tank to OWC air chamber for wave energy conversion, **In: Procedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference**, Vancouver, Canada,2008

[5] Horko, M., 2007, **CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter", Thesis of Master of Engineering Science, School of Mechanical Engineering**, The university of Western, Australia.

[6] REPALLE, N, et. al, CFD simulation of wave run-up on a spar cylinder, **In: Proceedings 16th Australasian Fluid Mechanics Conference**, Gold Coast, Australia,2007.

[7] (2009) Rio Grande virtual Acesso: http://www.riograndevirtual.com.br

[8] (2009) Rio Grande em fotos Acesso: http://www.riograndeemfotos.com.br/

[9] McCORMICK, M. E.,**Ocean engineering wave mechanics**. John Wiley & Sons,1976.

[10]Fluent Inc. FLUENT 6.2, 2005, users' guides.