ENERGIA DAS ONDAS DO MAR: MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO

SILVANA LETÍCIA PIRES IAHNKE[1], MATEUS NEVES GOMES[2], LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI[3], LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA[4]

Resumo – Este trabalho apresenta um breve estudo sobre energia das ondas do mar bem como a modelagem computacional de um dispositivo do tipo galgamento. A simulação foi realizada através do software de Dinâmica dos Fluidos Computacional FLUENT®, tendo sido empregado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), para representar adequadamente a interação entre água e ar. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo, na geração da onda, a diferença máxima entre os resultados numéricos e a solução analítica, em torno de 4.6%. Foi observado também, que o conhecimento da altura da onda, aliado ao projeto adequado da rampa, são fatores que determinam a ocorrência do galgamento.

Palavras – Chaves: energia das ondas; dispositivo de galgamento; modelo *volume of fluid* (VOF)

ENERGY FROM THE SEA: COMPUTATIONAL MODELING OF AN OVERTOPPING DEVICE

[1] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: prof.sille@gmail.com
[2] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: mateusufpel.gomes@gmail.com
[3] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. Dr. do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: liercioisoldi@furg.br
[4] Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. PhD. do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional. Email: laorocha@gmail.com

Abstract – This work presents a brief study about the wave energy as well as a computational modeling of an overtopping device. The numerical simulation was performed with the FLUENT® Computational Fluid Dynamic software code, employing the multiphase Volume of Fluid (VOF) model. The obtained results showed a satisfactory agreement between the numerical and analytical solutions, being the maximum difference calculated for the wave generation of approximated 4.6%. It was also observed that the knowledge of the wave height and an adequate ramp design are factors that determine the overtopping occurrence.

Keywords – wave energy; overtopping device; Volume of Fluid (VOF) model

I. INTRODUÇÃO

Desde o inicio da vida em sociedade, o homem procura fontes de energia que possam ser geradas continuamente, ou armazenadas para serem consumidas nos momentos de necessidade. Contudo, as fontes de energia da natureza estão se esgotando e sua exploração excessiva está gerando desequilíbrios ambientais muito graves. Percebe-se também em [1], que os combustíveis fósseis ainda configuram como a principal fonte de energia utilizada na atualidade, mesmo sendo recursos não-renováveis e sua queima altamente poluente. Essa realidade coloca então em foco a necessidade de investir em fontes renováveis de energia, que garantam sua oferta, sem que ocorram crises energéticas.

A mudança é algo que se torna imprescindível para que a espécie humana possa sobreviver e quanto mais cedo isso for percebido, melhores serão as chances de serem superadas as dificuldades que o planeta vem enfrentando. Como os oceanos possuem um enorme potencial energético, cerca de 10 TW (sendo aproximadamente 2 TW atribuído a energia das ondas), comparável ao consumo

total de eletricidade do planeta [2], seu aproveitamento pode realmente contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia elétrica.

Nesse contexto, observa-se que o Brasil, país de extensa área litorânea (em torno de 8500 km), possui uma boa localização geográfica para o aproveitamento da energia das ondas do mar [3]. De acordo com Estefen et al [4] o sul do país é um dos melhores pontos para a instalação de uma usina de ondas. Nesse local uma estimativa sobre os dados de ondas medidos ao largo da costa, pelos altímetros do satélite TOPEX/Poseidon, indicou que a potência média anual, obtida na zona de maior latitude, entre Porto Alegre e Rio Grande, seria em torno de 33 KW/m.

Os dispositivos para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica podem ser classificados tanto pela sua localização como pelo seu princípio de funcionamento, da seguinte forma:

A.Classificação de acordo com a Localização

Em relação à profundidade, os dispositivos podem ser classificados em:

1) Dispositivos costeiros (Onshore): aqueles que possuem acesso por terra, também conhecidos como dispositivos de primeira geração;

2) Dispositivos Próximos da Costa (Nearshore): instalados em profundidades de até 20 m, também conhecidos como dispositivos de segunda geração;

3) Dispositivos Afastados da Costa (Offshore): instalados em profundidades maiores que 20 m, também conhecidos como dispositivos de terceira geração;

B.Classificação de acordo com o Princípio de Funcionamento:

1) Coluna de Água Oscilante (CAO): é uma estrutura parcialmente submersa, em que a passagem das ondas provoca, respectivamente, um aumento e uma diminuição do nível da água em seu interior gerando uma compressão e descompressão do ar que se encontra dentro desse compartimento, passando o mesmo por uma turbina que aciona um gerador, gerando assim, energia elétrica.

2) Corpos Oscilantes: são dispositivos em que a passagem da onda provoca oscilações, sendo a energia extraída desse movimento. Eles ainda podem ser

classificados em corpos flutuantes, os quais são estruturas que podem ser de absorção pontual ou progressivos, e em corpos submersos.

3) Dispositivos de Galgamento (Overtopping Device): são equipamentos que encaminham as ondas através de rampas para um reservatório que se encontra em um nível acima do mar. A água armazenada é devolvida ao mar após passar por turbinas, semelhantes às utilizadas em hidrelétricas de baixa queda, acionando um gerador, produzindo então energia elétrica.

No final do século XVIII há o registro das primeiras patentes para o aproveitamento da energia das ondas do mar. No entanto, somente mais de um século depois, na década de 1960, que surgiram no Japão a sua primeira aplicação industrial em bóias de sinalização marítima (Bóias Comandante Y. Masuda*)*. Com a primeira crise do petróleo, em 1973, a energia das ondas chamou a atenção de vários países, que passaram a desenvolver mecanismos para a conversão dessa energia em energia elétrica. Entre 1980 e 2000 ocorreram testes no mar de diversas tecnologias de primeira geração, enquanto que as de segunda e terceira geração alcançaram essa fase com protótipos em alto mar a partir de 2000.

Na atualidade, ainda não existe uma tecnologia estabilizada para a extração da energia das ondas existindo, portanto, diversos dispositivos para o aproveitamento e conversão dessa energia. Uma das estruturas que se destaca entre as que se encontram em uma fase pré-comercial [5] é o *Wave Dragon* (WD). Esse é um conversor flutuante de energia das ondas afastado da costa classificado como do tipo galgamento. Ele foi o primeiro dispositivo localizado em alto mar a introduzir eletricidade em uma rede.

O WD consiste basicamente em dois refletores que concentram e elevam a altura das ondas incidentes, canalizando-as em uma rampa para o interior de um reservatório. A água contida temporariamente neste reservatório desce pela ação da gravidade passando por turbinas hidráulicas de baixa queda, situadas em sua região central, para a produção de energia elétrica, usando o mesmo princípio de centrais hidroelétricas, como mostrado na FIGURA 1.

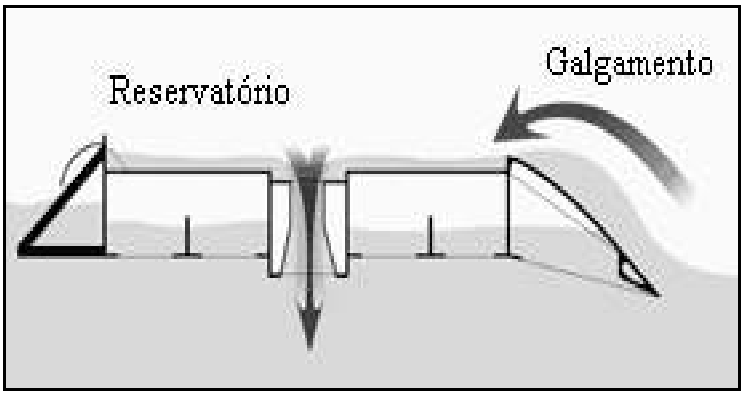

Figura 1 – *Wave Dragon:* Princípio de Funcionamento [6]

Possuindo uma potência nominal (*full scale)* entre 4 e 11 MW, o *Wave Dragon* pode ser instalado em fazendas, sendo que um parque com 7 dispositivos (aproximadamente 50–70 MW), teria um comprimento na direção da onda frontal de 3.9 km, ocupando 3.2 km^2, com uma potência relativa de 15.3 MW/km^2 [6]. Uma das principais características deste equipamento é que ele se ajusta à mudança de altura das ondas, alterando a sua própria altura flutuante. Em um clima de ondas de 33 KW/m estima-se que a produção de eletricidade seria de aproximadamente 17 GWh/ano.

A simulação numérica tornou-se uma ferramenta muito útil na investigação da propagação das ondas e do galgamento, especialmente nos últimos anos [7]. Dessa forma, o presente trabalho apresenta a simulação numérica de um dispositivo do tipo galgamento empregando o software FLUENT®, um aplicativo para a solução de problemas de Dinâmica de Fluídos Computacional (CFD), que utiliza o Método dos Volumes Finitos (MVF) para discretizar a equação da massa e da quantidade de movimento na forma diferencial para todos os pontos do volume de controle. O domínio computacional foi construído no software GAMBIT®.

Verifica-se ainda que o tema desse artigo vem sendo estudado por diversos autores ([7-11]), sendo apresentado em [7] a previsão do galgamento para várias geometrias de um conversor.

Dessa forma, desenvolveu-se nesse trabalho a simulação numérica do comportamento de um dispositivo de galgamento, com o objetivo de validar a presente metodologia através da comparação com os resultados obtidos por [7].

Com um erro relativo máximo na geração da onda menor que 5%, verifica-se que a simulação desenvolvida nesse estudo é pertinente nas aplicações de engenharia, demonstrando-se também que a altura da onda e a relação de

inclinação da rampa (R) são características que desempenham um papel importante na ocorrência do galgamento.

II. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO DISPOSITIVO DE GALGAMENTO

A. Características de Ondas de Gravidade Regulares

Nesse estudo foi utilizada a teoria linear de ondas de gravidade. A geração das ondas resulta do efeito do vento na superfície do oceano, sendo as principais características para descrever as ondas do mar: a profundidade da água onde ela está se propagando (*h*), o período (*T*), o comprimento (*L*) e a altura (*H*) da onda, esquematizados na FIGURA 2.

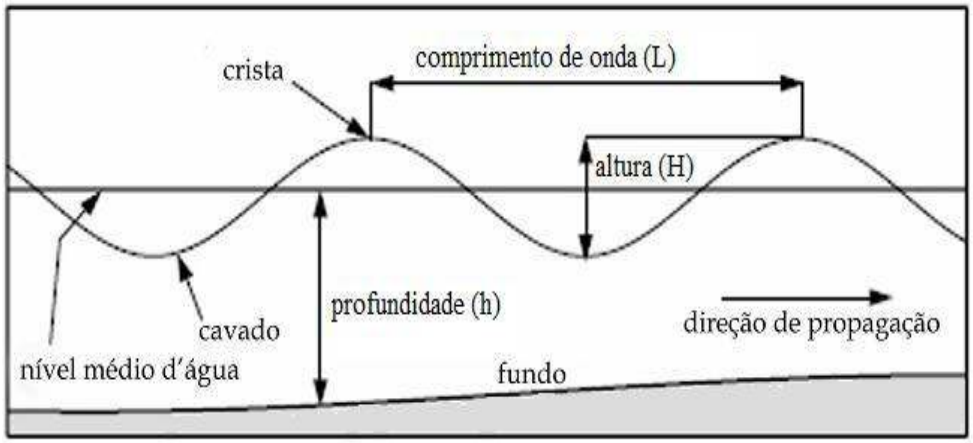

Figura 2 – Características Básicas de uma Onda [12]

As ondas de gravidade regulares podem ser vistas como um perfil senoidal que se propaga ao longo da superfície do mar, sendo seus parâmetros relacionados da seguinte forma:

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L} \tag{1}$$

onde *g* é a força da gravidade. Em águas profundas ($L < 2h$), a Eq. (1) pode ser expressa por:

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tag{2}$$

B. Modelo Numérico

O modelo numérico utilizado nesse trabalho emprega o regime laminar para o escoamento, sendo a equação governante dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla\left[\mu\left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T}\right)\right] + \rho\vec{g} + \vec{F} \tag{3}$$

com ρ a massa especifica; t o tempo, $\vec{v}$ a componente da velocidade; μ a viscosidade dinâmica; p a pressão estática; $\rho\vec{g}$ a força gravitacional; e $\vec{F}$ as forças externas.

Foi adotado também o modelo VOF, pois nesse estudo existe uma interface com duas fases (ar e água) na simulação, com o objetivo de identificar a posição da interação entre os dois fluídos imiscíveis. De acordo com [13], para cada fase adicional que for introduzida ao problema, uma variável é inserida: a fração de volume da fase na célula computacional (α_q), sendo cada fração considerada como função contínua do espaço e do tempo e sua soma igual a um.

Para todas as variáveis e propriedades os campos são compartilhados entre as duas fases e representam valores baseados na média volumétrica. Assim, as variáveis e propriedades em todas as células dadas são puramente representantes de uma das fases ou representantes de uma mistura de fases. Temos três situações possíveis, com q representando a fase:

- $\alpha_q = 0$, a célula contém somente ar;
- $\alpha_q = 1$, a célula contém somente liquido;
- $0 < \alpha_q < 1$, a célula contém a interface entre os fluídos.

Dessa forma, com base no valor local de α_q, as propriedades e variáveis adequadas são atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio, sendo o monitoramento da interface para a fração de volume de uma (ou mais) fases realizado por:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)=S_{\alpha_q}+\sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp})\right] \quad (4)$$

com $\dot{m}_{qp}$ a massa transferida da fase *q* para a fase *p* e $\dot{m}_{pq}$ a massa transferida da fase *p* para a fase *q*. Segue ainda que o termo S_{α_q} é zero para o modelo VOF, sendo porém, para a fase primária empregada a equação a seguir:

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q = 1 \quad (5)$$

C. Validação do Tanque Numérico

As ondas empregadas nesse estudo foram produzidas por um gerador do tipo pistão, localizado no lado esquerdo do tanque de ondas bidimensional, FIGURA 3, sendo as condições de contorno utilizadas descritas na TABELA 1.

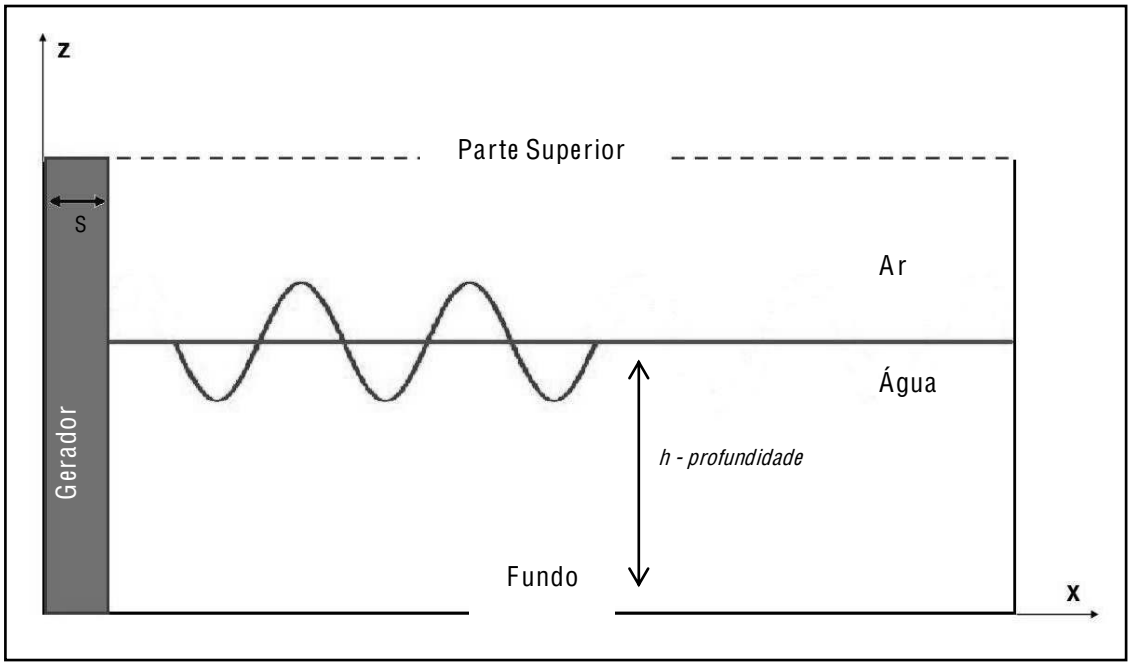

Figura 3 – Esquema Bidimensional do Tanque de Ondas

Tabela 1: CONDIÇÕES DE CONTORNO

Local	**Tipo**
Gerador	Parede (*Wall*)
Fundo	Parede (*Wall*)
Parede Lateral	Parede (*Wall*)
Parte Superior	Pressão de Saída (*Pressure Outlet*)

Para o movimento do pistão adotou-se a equação a seguir:

$$x(t) = \frac{S_0}{2}\left(1 - e^{-\frac{5t}{2T}}\right) senwt \tag{6}$$

sendo:

$$S_0 = \frac{H}{2}\left(\frac{senh2kh + 2kh}{\cosh 2kh - 1}\right) \tag{7}$$

$$w = \frac{2\pi}{T} \tag{8}$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \tag{9}$$

onde S_o representa o deslocamento máximo do batedor; w a freqüência angular, T o período da onda; t o tempo; e k o número de onda.

Para o dispositivo de galgamento, empregou-se a geometria apresentada na FIGURA 4, sendo a relação de inclinação R dada por:

$$R = \frac{h_R}{L_R} \tag{10}$$

com os valores de h_u e h_b fixados em 2 m.

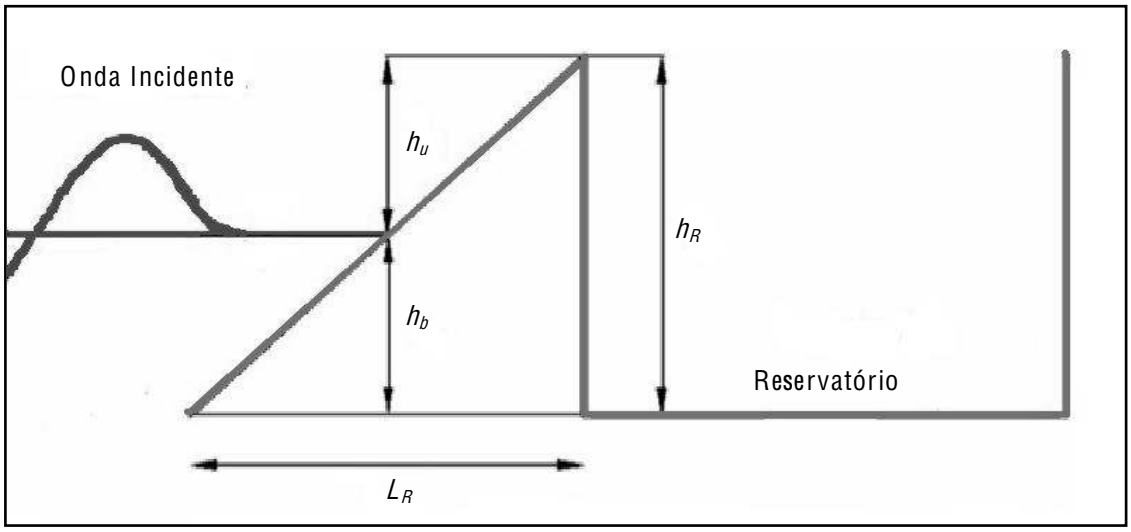

Figura 4 – Esquema Bidimensional do Dispositivo de Galgamento

Para a validação do modelo numérico empregado, utilizou-se um tanque de ondas com 200 m de comprimento e 16 m de profundidade. A onda gerada, FIGURA 5, possui período de 3.5 s, sendo o passo de tempo adotado na simulação numérica de 0.001s.

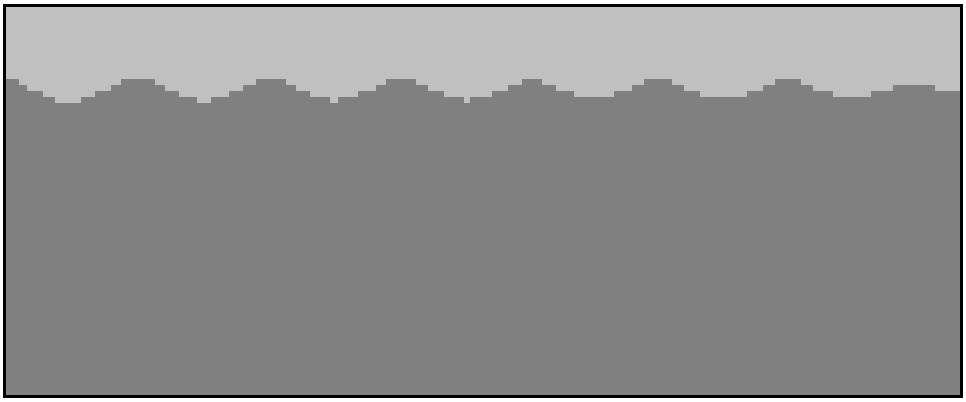

Figura 5 – Onda Gerada, $t = 23T$

Para a simulação do movimento da onda no FLUENT® foi usada uma UDF (*User-Defined Function*) escrita na linguagem C, empregando-se o modelo *Layering* para a malha móvel e o Método de Volumes Finitos (FVM) – *Non-Iterative Time Advanced (NITA) – Pressure Implicit,* com *Splitting of Operators (PISO) algorithm.* Outras informações sobre a configuração da solução são apresentadas na TABELA 2, de acordo com a nomenclatura empregada pelo software FLUENT®.

Tabela 2: CONFIGURAÇÃO DA SOLUÇÃO

Equação	**Método**
Pressure-Velocity Coupling	*PISO*
Pressure	*PRESTO*
Volume Fraction	*Geo-Reconstruct*
Momentum	*First Order Upwind*

A malha empregada é regular, com 100000 volumes finitos do tipo quadrado (espaçamento de 0.2 m), gerando a onda ilustrada na FIGURA 6, onde foi verificado que a solução numérica entra em concordância com a solução analítica após os primeiros 12 s, aproximadamente. Isto se deve ao fato de que a solução numérica necessita deste tempo para estabilizar a geração da onda.

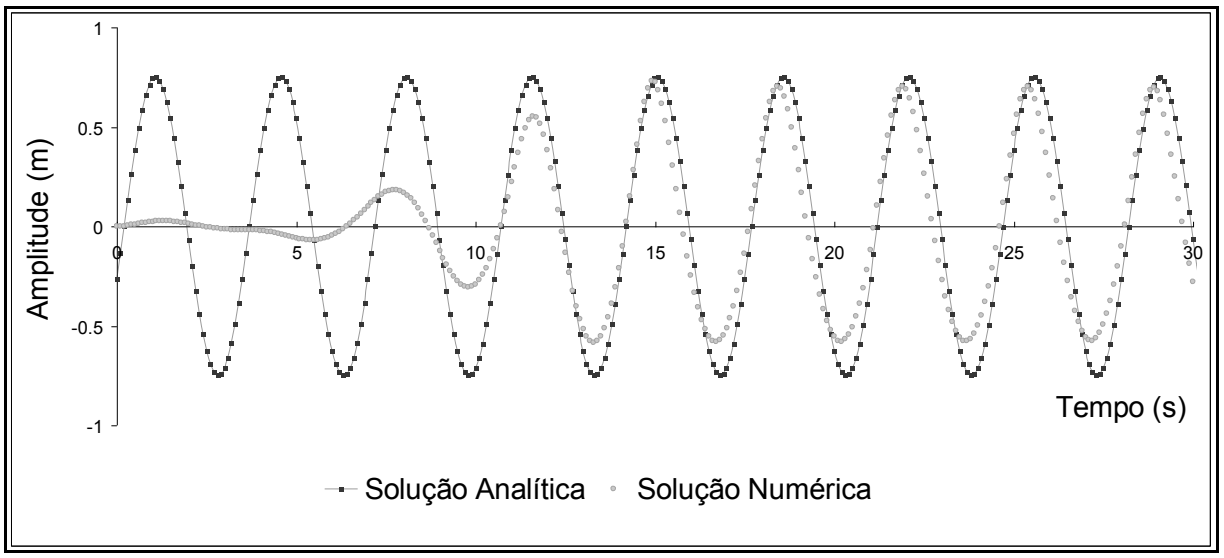

Figura 6 – Gráfico: *Amplitude x Tempo*, na posição x = 25m

Percebeu-se ainda, através do estudo de malha apresentado pela TABELA 3, que a diferença analisada através do erro relativo máximo entre a solução analítica e a numérica entre as malhas não interfere significativamente na solução, sendo esta dada por:

$$E_R = \frac{\overline{x} - x}{\overline{x}} \qquad (6),$$

com $\bar{x}$ representando a amplitude da onda obtida com a solução numérica e x a amplitude da onda obtida pela solução de referência.

Tabela 3: ESTUDO DE MALHA

Espaçamento da Malha (m)	Número de Volumes	Erro Relativo Máximo (%)	Tempo Aproximado de Simulação para $t = 35T$
0.4	25000	4.6986	14 horas
0.2	100000	4.6384	21 horas
0.1	400000	4.6434	31 horas
0.05	1600000	4.6427	129 horas

Cabe destacar que a existência de uma solução analítica para o movimento da superfície livre da onda tem grande importância para a validação da onda obtida na simulação numérica. Com isso, tem-se a certeza de que a onda numérica, que será utilizada na análise do conversor de energia, está sendo gerada de forma adequada.

III. RESULTADOS

Para a simulação do galgamento, empregou-se um tanque de ondas com 300 m de comprimento e 20 m de profundidade, com a rampa localizada a 200 m do gerador. Algumas geometrias foram estudadas, sendo descritas com maiores detalhes as seguintes: a primeira, com R = 1:1, T = 4 s e H = 1 m; e a segunda, com R = 2:3, T = 6 s e H = 2 m; sendo a configuração da solução para ambos os casos indicados pela TABELA 2.

A.Geometria 1:1

Nesse caso foi empregada uma malha com espaçamento de 0.2 m, com 178405 volumes. Observa-se nas imagens (a) até (d) da FIGURA 7 que durante o processo de elevação da onda, essa não consegue passar a rampa e chegar ao reservatório, não ocorrendo, assim, o galgamento.

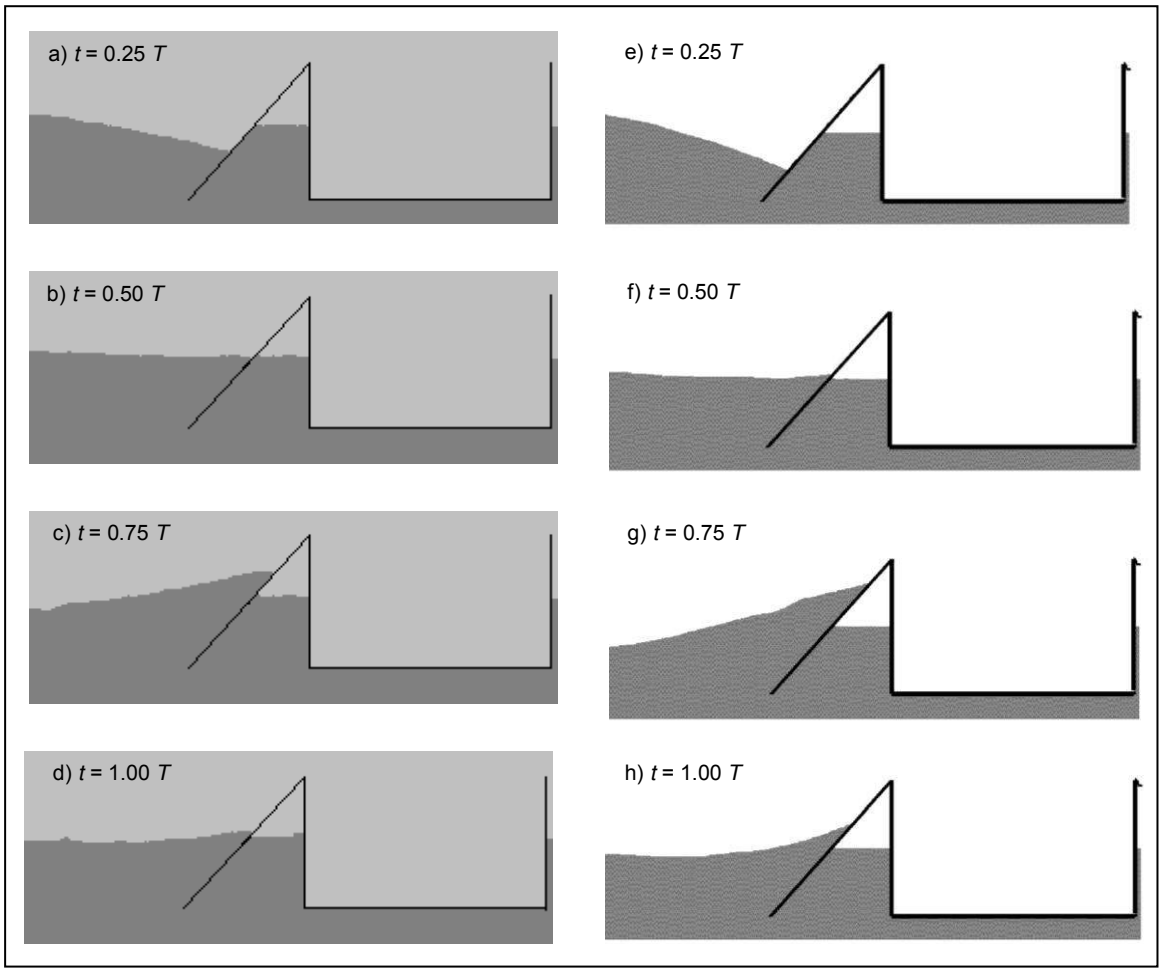

Figura 7 – Geometria 1:1 (a – d: Resultados desse estudo; e – h: Resultados de [7])

Esse efeito ocorreu também na simulação realizada em [7]. Através da análise de todas as imagens apresentadas pelas FIGURA 7 percebe-se que há uma pequena diferença entre as simulações. Considera-se que essa diferença decorra do fato da malha utilizada por [7] não ser conhecida.

Segue ainda, em conformidade com [7], que a relação entre a altura da onda incidente e h_u do conversor é decisiva no processo de elevação, sendo que valores menores de R aumentam a ocorrência do galgamento, podendo isso ser observado através do estudo da próxima geometria.

B. Geometria 2:3

Nesse caso empregou-se uma malha com 0.2 m de espaçamento (179847 volumes), verificando-se nas imagens da FIGURA 8 que o processo de galgamento ocorre. Observa-se que em (a), (b) e (c) a onda incidente é bloqueada pela rampa e, consequentemente, quebra durante a subida da mesma, formando-se nesse

processo algumas bolhas de ar, fato que ocorreu também na simulação realizada por [7].

Nessa geometria a forma da descarga no reservatório da onda gerada nesse trabalho é um pouco diferente da apresentada por [7], sendo, contudo, muito próximas a quantidade da descarga do galgamento obtida em um período, sendo o resultado do presente estudo de 1.358 m^3 enquanto a apresentada por [7] de 1.336 m^3.

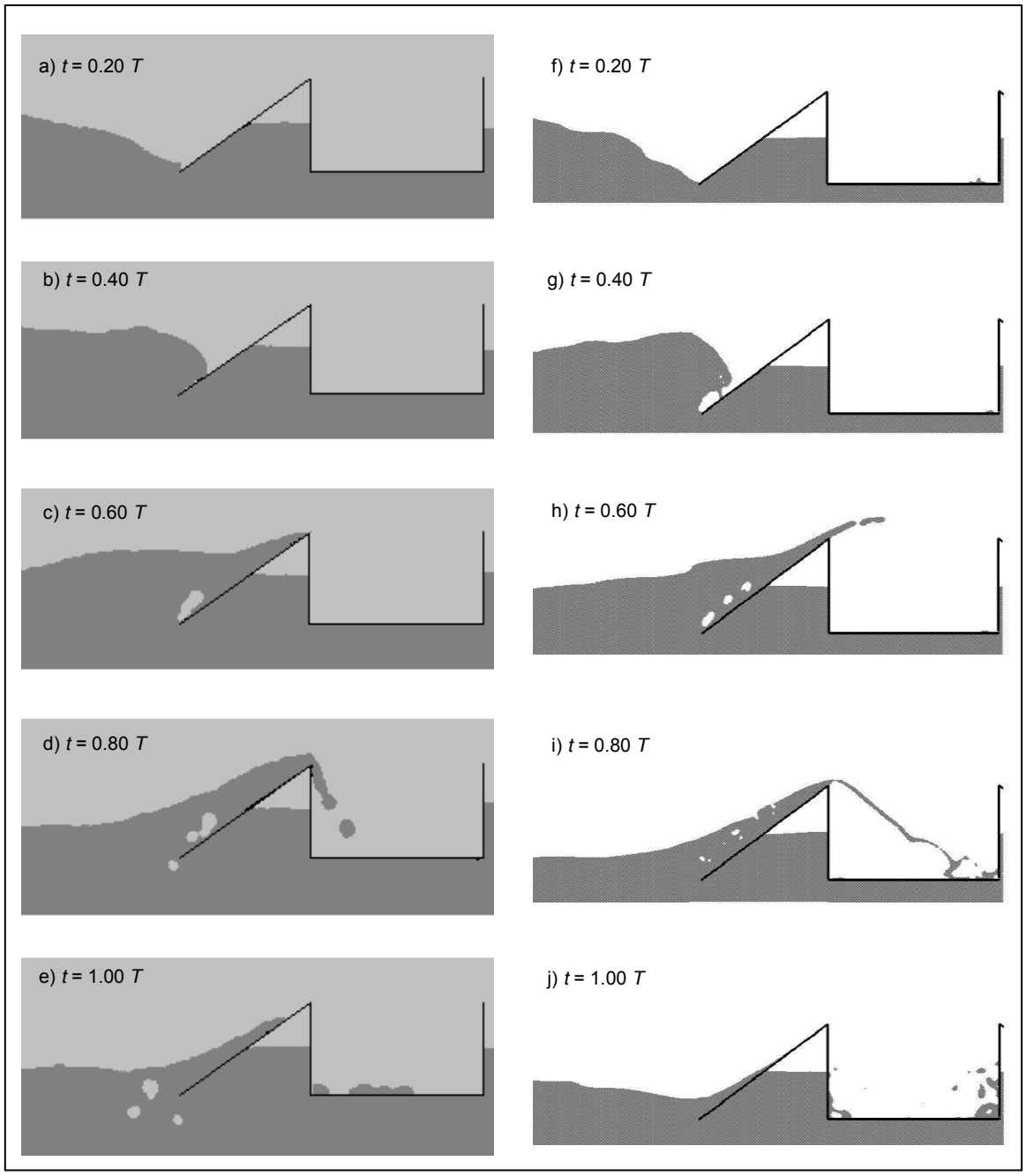

Figura 8– Geometria 2:3(a – e: Resultados desse estudo; f – j: Resultados de [7])

C. Outras Geometrias

Na TABELA 4, verificou-se através de outras geometrias em conformidade com a equação que indica a probabilidade do galgamento ocorrer [10], dada por:

$$Pow = \exp\left[-\left(\frac{1}{c}\frac{Rc}{H}\right)^2\right] \tag{11}$$

onde R_c é a altura relativa livre da crista (m); H é altura da onda (m); e c uma constante que determina a propagação do galgamento, sendo o seu valor sugerido em [10] de 1.21. Note que a altura da onda é um fator determinante para a ocorrência do galgamento (TABELA 5).

Tabela 4: OUTRAS GEOMETRIAS

R	***H* (m)**	***T* (s)**	**Ocorre o Galgamento?**	**Descarga do Primeiro Galgamento Completo (m^3)**	
				Presente Estudo	**Em [7]**
2:3	2.0	6.0	Sim	1.358	1.336
2:3	1.0	6.0	Não	0.000	0.000
2:3	2.0	4.0	Sim	0.668	0.653
2:3	1.0	4.0	Não	0.000	0.000
1:1	2.0	6.0	Sim	1.167	1.194
1:1	1.0	6.0	Não	0.000	0.000
1:1	1.0	4.0	Não	0.000	0.000

Tabela 5: PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO GALGAMENTO

Altura da Onda (m)	**Probabilidade (%), com c =1.21**
H = 1	6.51
H = 2	50.51

IV. CONCLUSÕES

Na atualidade os problemas ambientais que o planeta vem enfrentando tem voltado a atenção de diversos pesquisadores para o estudo das fontes de energia renováveis. A energia das ondas do mar configura então uma fonte limpa, abundante, previsível e de localização flexível, que pode contribuir de forma significativa na matriz energética.

No presente estudo, foi feita a modelagem computacional de um dispositivo de galgamento, tendo sido observado que na geração da onda, as soluções numéricas concordaram com a solução analítica na ordem de 4,6%.

Através desse trabalho foi verificado que a descarga do galgamento é maior para valores menores da relação *R*, sendo, portanto, o conhecimento das características da onda do mar, na região onde os dispositivos de conversão de energia do tipo galgamento serão instalados, fundamental para o projeto adequado da rampa. Observa-se, ainda, que o presente modelo numérico poderá ser utilizado com sucesso para o dimensionamento correto deste tipo de conversor, podendo de fato contribuir para o desenvolvimento dessa fonte de energia.

REFERÊNCIAS

[1] Energia no Mundo – Novo. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=15043.

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

[3] CRES, Wave Energy Utilization in Europe. *Center for Renewable Energy Sources*, 2002. Disponível em: http://wave-energy.net/Library/WaveEnergyBrochure.pdf.

[4] S. F. Estefen et al. ”Energia das Ondas”. In: TOLMASQUIM, M. T. (org.). *Fontes Renováveis de Energia no Brasil.* Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. p.485 – 515.

[5] Wave Energy Centre (WavEC) – Disponível em: http://www.wavec.org/index.php/17/technologies/ .

[6]<Wave Dragon (WD) – Disponível em http://www.wavedragon.net/.

[7] Z. Liu, B. S. Hyun, J. Jin. “Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC.” *IEEE*, 2008.

[8] J. B. Shiach, C. G. Mingham, D. M. Ingran, T. Bruce. “The applicability of the shallow water equations for modeling violent wave overtopping*.” Coastal Engineering*, 51:1-15. ISSN 0378-3839, 2004.

[9] M. D. Ingran, et al. “Numerical Investigations of Wave Overtopping at Coastal Structures.” *Coastal Engineering,* 56:190-202. ISSN 0378-3839, 2009.

[10] P. J. Kofoed and J. Tedd. *“*Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon Wave Energy Converter.” *Renewable Energy*, 2008.

[11] P. Frigaard, J. P. Kofoed, M. R. Rasmussen. “Overtopping Measurements on the Wave Dragon Nissum Bredning Prototype*”. ISOPE*, 2004. Toulon, France.

[12] S. Meirelles e N. V. Carvalho. “Modelagem Computacional da Propagação de Ondas Superficiais no Oceano: Um Subsídio para a Compreensão dos Fenômenos Ópticos,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 29, n.4, pp. 555-563, 2007.

[13] Fluent Inc. FLUENT 6.2, 2005 user´s guide.