



REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ANÁLISE NUMÉRICA DA GEOMETRIA DA RAMPA DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO *ONSHORE* EM ESCALA REAL APLICANDO O DESIGN CONSTRUTAL ¹

BIANCA NEVES MACHADO², ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS², LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI², MATEUS DAS NEVES GOMES³, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA⁴

¹ Apresentado no 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO).

² Professor da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), *Campus* Rio Grande, biancamachado@furg.br, elizaldodosantos@furg.br, liercioisoldi@furg.br.

³ Professor do Instituto Federal do Paraná (IFPR), *Campus* Paranaguá, mateus.gomes@ifpr.edu.br.

⁴ Professor da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Av. Unisinos 950, São Leopoldo, RS, Brazil, laorochoa@gmail.com

Resumo: O presente trabalho propõe um estudo numérico a respeito de um conversor de energia das ondas do mar do tipo galgamento. O princípio operacional do dispositivo de galgamento consiste de uma estrutura que utiliza uma rampa para direcionar as ondas incidentes para o reservatório. A água armazenada retorna ao oceano após a passagem por uma turbina que está acoplada a um gerador de energia elétrica. O objetivo deste estudo é a aplicação do método Design Construtal, aliado a busca exaustiva, na definição da melhor forma geométrica para a rampa de modo a maximizar a vazão mássica de água que entra no reservatório. O grau de liberdade b/B foi otimizado. A restrição considerada neste estudo é manter fixo: a área total do tanque de ondas, a área da rampa e as características da onda. Para

a análise numérica do princípio de funcionamento deste dispositivo foi empregado um domínio computacional tridimensional (3D), construído e discretizado no software GAMBIT, onde o conversor é acoplado a um tanque de ondas regulares. As soluções das equações de conservação e uma equação para o transporte da fração volumétrica foram realizadas com o código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional FLUENT, que é baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). Aplica-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) no tratamento da interação água-ar. Os resultados conduziram a uma recomendação teórica sobre a geometria ótima do dispositivo de galgamento, mostrando que houve uma razão ótima $(b/B)_o = 0.38$, que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório.

Palavras-chave: Galgamento, Teoria Construtal, Análise Numérica.

NUMERICAL ANALYSIS OF RAMP GEOMETRY OF A REAL-SCALE ONSHORE OVERTOPPING CONVERTER APPLYING CONSTRUCTAL DESIGN

Abstract: The present work proposes a numerical study on a sea wave energy converter type overtopping. The operating principle of the overtopping device consists of a structure that uses a ramp to direct incident waves into the reservoir. The stored water returns to the ocean after passing through a turbine that is coupled to an electric power generator. The objective of this study is the application of the Constructal Design method, associated with the exhaustive search, in the search for the best geometric shape for the ramp in order to maximize the mass flowrate of water entering the reservoir. The degree of freedom b/B has been optimized. The constraints considered in this study are: the total area of the wave tank, the ramp area and wave characteristics. For the numerical analysis of the principle of operation of this device, a three-dimensional (3D) computational domain was built and discretized in GAMBIT software, where the converter is coupled to a regular wave tank. The solutions of the conservation equations and an equation for the transport of the volumetric fraction were carried out using the FLUENT Computational Fluid Dynamics commercial code, which is based on the Finite Volume Method (MVF). The multiphase Volume of Fluid (VOF) model is applied in the treatment of water-air interaction. The results led to a theoretical recommendation on the optimum geometry of the overtopping device, showing that there was an optimal ratio $(b/B)_o = 0.38$, which maximizes the amount of water entering the reservoir.

Keyword: Overtopping, Constructal theory, constructal design, numerical analysis

INTRODUÇÃO

Atualmente existe a necessidade de suprir a grande demanda energética a nível mundial. O aumento desta demanda de energia e o acordo de Kyoto, o qual visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa, têm aumentado o interesse pelo estudo das fontes renováveis de energia (Beels et al., 2010). Outros benefícios do emprego deste tipo de energia podem ser mencionados, por exemplo, a minimização da exploração de depósitos de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais associados (Tolmasquim, 2003).

A principal causa dos impactos ambientais está relacionada ao uso indiscriminado dos combustíveis fósseis. Independentemente do grau de desenvolvimento do país, o uso destes combustíveis, seja para geração de energia elétrica, produção de calor ou força mecânica, ainda é dominante na matriz energética da maioria das nações (Garcia, 2004). Desta forma, uma maior utilização das fontes renováveis de energia proporciona também grandes benefícios ambientais, abrindo espaço, para o desenvolvimento tecnológico e a produção de novos conhecimentos na área energética (Santos et al., 2006).

O Brasil apresenta expressiva participação das fontes renováveis na matriz energética, obtendo larga vantagem em relação aos países desenvolvidos. Enquanto nos países industrializados a participação da energia renovável atinge 6%, no Brasil o percentual alcança 46,9%. Tal fato ocorre, dentre outros fatores, da pequena utilização da energia nuclear e da significativa participação da biomassa e da hidroeletricidade na oferta total de energia no país (Assis, 2010).

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), o oceano contém o maior de todos os recursos naturais e possui um potencial energético enorme, podendo contribuir, com a energia proveniente das ondas oceânicas, de forma significativa com a crescente necessidade global de energia. A energia das ondas tem passado, nos últimos 25 anos, por um processo cíclico com fases de entusiasmo, desapontamento e reconsideração. No entanto, o persistente esforço na investigação, desenvolvimento e a experiência acumulada têm constantemente aumentado o desempenho das técnicas de obtenção de energia a partir das ondas. Isso tem levado o recurso da energia das ondas a uma maior proximidade da exploração comercial que, até agora, não tinha sido vista. De 2009 até os dias de hoje, diversos tipos de dispositivos foram desenvolvidos para extração das energias das ondas (Falcão, 2010).

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), os dispositivos atualmente existentes podem ser classificados de acordo com o princípio de conversão de energia das ondas do mar em

energia elétrica: dispositivos Coluna de Água Oscilante (CAO); dispositivos Corpos Flutuantes, podendo ser de Absorção Pontual (*Point Absorbers*) ou Progressivos (*Surging Devices*), ou dispositivos de Galgamento (*Overtopping Devices*). Podem, também, ser classificados de acordo com sua localização e são agrupados em: dispositivos costeiros (na nomenclatura inglesa: *onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*).

O presente trabalho aborda o dispositivo de galgamento mostrado na Fig. 1, cujo princípio de funcionamento baseia-se na acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar. A água acumulada quando devolvida ao mar aciona turbinas hidráulicas de baixa queda acopladas a geradores elétricos de fabricação comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado dá-se através do galgamento de uma rampa inclinada pela onda (Relatório WavEC, 2004).

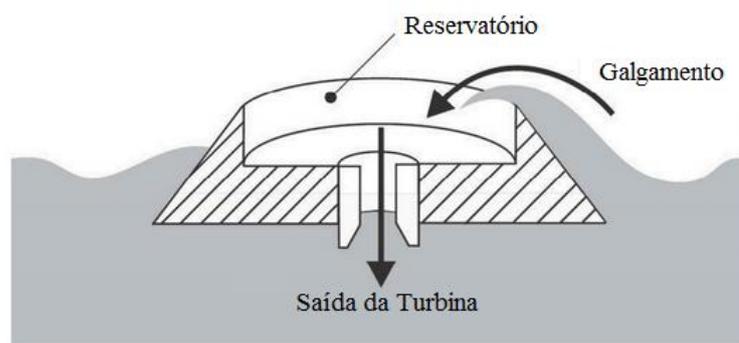


Figura 1. Princípio de Funcionamento do Dispositivo de Galgamento.

Destaca-se alguns testes com protótipos apresentados na literatura, como: Wave Dragon (WD), Wave Plane e Seawave Slote-Cone Generator (Falcão, 2010). Destaca-se, também, alguns estudos numéricos: Beels et al. (2010) realizaram estudos numéricos a fim de investigar efeitos de esteira atrás de um único dispositivo WD e, também, investigaram a influência de esteira para uma fazenda com cinco WD. Tedd e Kofoed (2009), realizaram um estudo a respeito de séries temporais de fluxos de galgamento sobre estruturas. Iahnke (2010) estudou a influência da inclinação da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento por meio de um modelo computacional bidimensional (2D). Machado et al (2011a) apresentam uma abordagem numérica de um dispositivo para conversão da energia das ondas do tipo galgamento, seu objetivo principal foi avaliar a eficiência de um modelo numérico tridimensional (3D). Machado et al. (2011b) realizaram um estudo empregando um

modelo numérico 3D do dispositivo de galgamento, afim de determinar a influência do ângulo de abertura da rampa sobre a vazão mássica de água incidente no reservatório do dispositivo. Norgaard e Andersen (2012) realizaram estudos numéricos de um único WD e de uma fazenda com diversos WD finalizando a calibração do modelo Mike21BW. Machado et al. (2011c) avaliaram a otimização geométrica da rampa de um conversor de energia do tipo galgamento através do Design Construtal (Bejan e Lorente, 2008), objetivando o aumento da quantidade de água incidente no reservatório do dispositivo. Considerou-se um clima de ondas com profundidade relativa $h/\lambda = 0,5$, no qual descreve uma zona de transição entre um clima de águas intermediárias e um clima de águas profundas. Por fim, destaca-se estudos de análises de modelos computacionais 2D de dispositivos de galgamento empregando o Design Construtal, como: Machado (2012); Dos Santos et al. (2014); Goulart (2014); Goulart et al. (2015); Martins et al. (2015a); Martins et al. (2015b); Barbosa et al. (2015).

O presente estudo tem como objetivo analisar, empregando o Design Construtal aliado a busca exaustiva, o efeito geométrico da rampa um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Para tal, foi avaliada a influência do grau de liberdade b/B , isto é, a razão entre a base superior e a base inferior da rampa trapezoidal, sobre a quantidade de massa incidente no reservatório do dispositivo de galgamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é utilizado para tratar o escoamento de uma mistura ar e água e, neste caso, também avaliar sua interação com o dispositivo. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase (Ling et al., 2001; Lv et al., 2011).

O conceito de fração de volume (α_q) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume dentro de um volume de controle, deve ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Consequentemente, se $\alpha_{água} = 0$ o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($\alpha_{ar} = 1$). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{ar} = 1 - \alpha_{água}$. Assim, uma equação adicional para o transporte para cada uma das fases é necessária (Ling et al., 2001; Lv et al., 2011; Gomes, 2010):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{agua})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{agua}\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Considerando um escoamento laminar e incompressível, a equação da conservação da massa para a mistura ar e água para este é dada por (Schlichting, 1979; Dos Santos et al., 2014; Goulart, 2014):

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3) e \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\mu\tau}) + \rho\vec{g} \quad (3)$$

onde: t é o tempo (s), p é a pressão estática (Pa), ρ é a viscosidade (kg/ms), e \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s^2). O termo $\overline{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), o qual para um fluido Newtoniano é dado por:

$$\overline{\tau} = \mu \left[\left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T - \frac{2}{3}\nabla\vec{v}I \right) \right] \quad (4)$$

onde I é um tensor unitário. O segundo termo do lado direito da Eq. (4) descreve as tensões desviadoras e está relacionado com a deformação volumétrica em escoamentos compressíveis. Como as velocidades obtidas no escoamento da onda (tanto na região do ar quanto da água) são baixas (número de Mach $< 0,3$), será considerado um escoamento incompressível e o termo de tensões desviadoras não levado em consideração na solução deste problema.

Vale ressaltar que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Portanto, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritos como:

$$\rho = \alpha_{agua}\rho_{agua} + \alpha_{ar}\rho_{ar} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_{agua}\mu_{agua} + \alpha_{ar}\mu_{ar} \quad (6)$$

Para a simulação numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF) (FLUENT, 2006). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão é realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método

PISO. Além disso, empregou-se os fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente.

Todas as soluções foram realizadas usando computadores com 2 processadores Intel DualCore de 2.67 GHz de clock e 8.00 Gb de memória RAM. Para reduzir o tempo de processamento das simulações foi empregada a biblioteca de passagem de mensagens - MPI (do inglês: *Message Passing Interface*) disponibilizada pelo software FLUENT (FLUENT, 2006). O tempo de cada simulação foi de aproximadamente 18 horas.

A Teoria Construtal, tem sido usada para explicar deterministicamente a geração da forma de estruturas de fluxo na natureza, tais como: bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, formas de animais, tecidos vascularizados, entre outros, com base em um princípio evolutivo de fluxo no tempo. Este princípio é a Lei Construtal do Design e Evolução: “Para um sistema de dimensões finitas, onde existe escoamento, persistir no tempo (sobreviver) ele deve evoluir de uma maneira que propicie o mais fácil acesso possível às correntes que escoam através dele” (Bejan e Lorente, 2004). Este princípio é utilizado para desenvolvimento de projetos novos em diversas áreas, entre outras, eletrônica e células de combustível (Bejan e Lorente, 2006). A lei Construtal é aplicada através do Design Construtal que é um método de avaliação geométrica empregado neste trabalho para a determinação da geometria ótima do dispositivo de galgamento. Neste trabalho, utilizou-se o Design Construtal associado à busca exaustiva, com o objetivo de otimizar a geometria da rampa de um dispositivo do tipo galgamento visando maximizar a vazão mássica de água que entra no reservatório

Quanto ao problema físico abordado neste trabalho, conforme mencionado anteriormente, é apresentada um estudo sobre o dispositivo do tipo de galgamento, utilizado para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, com domínio computacional tridimensional em escala real. Domínio este que consiste em um dispositivo do tipo galgamento situado no centro de um tanque de ondas. Além disso, foi considerado que o escoamento é transiente e ocorre no regime laminar. O movimento da onda foi gerado através da imposição de um campo de velocidades na entrada do tanque de ondas através da utilização de uma Função Definida pelo Usuário (UDF – do inglês: *User Defined Function*), ou seja, as componentes da velocidade na direção x e z são condições de contorno definidas pelo usuário e a componente da velocidade na direção y é mantida constante.

Assim, as condições de contorno de velocidade impostas na superfície de entrada do tanque de ondas são descritas através da Teoria de Stokes de 2ª ordem e podem ser observadas nas Eqs. (7) e Eq. (8).

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{8} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (7)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{8} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (8)$$

A análise consiste em encontrar a solução do escoamento de uma mistura de ar e água para diversas geometrias de rampa. Como citado anteriormente, quanto às condições de contorno na entrada do tanque de ondas, tem-se uma velocidade de entrada gerada pela imposição de um campo de velocidades. Com relação às outras condições de contorno, a região superior da superfície esquerda do tanque de ondas, bem como a superfície superior deste, possuem pressão atmosférica (superfícies tracejadas na Fig. 2 (a)). Nas outras superfícies do tanque (superfície inferior e direita) e nas superfícies do dispositivo de galgamento, as velocidades são nulas, ou seja, foi adotada a condição de contorno de não deslizamento ou impermeabilidade. No que tange às condições iniciais, considera-se que o fluido está em repouso.

Para realização deste, foram utilizadas as seguintes recomendações de Goulart, 2014 (vide Fig 2.a): características do tanque de ondas e do dispositivo de galgamento: comprimento do tanque de ondas $L_T = 327$ m, altura do tanque de ondas $H_T = 20$ m, $H_T/L_T = 0.0612$, largura da rampa do dispositivo de galgamento $L_I = 21.6931$ m, altura da rampa do dispositivo de galgamento $H_I = 3.3756$ m, $(H_I/L_I)_o = 0.34$, comprimento do reservatório do dispositivo de galgamento $L_R = 20$ m, submersão do dispositivo de galgamento $S_o = 3.5$ m. E, as características da onda: período $T = 7.5$ s, comprimento da onda $\lambda = 65.4$ m, altura da onda $H = 1.0$ m e profundidade do tanque $h = 10.0$ m. Para construção de um modelo numérico tridimensional, necessita-se trabalhar com a terceira dimensão z , perpendicular ao plano da figura. Para tal, recorreu-se então, ao estudo de Beels et al., 2010, visando a obtenção de recomendações quanto à largura (terceira dimensão) do dispositivo e, conseqüentemente, do tanque de ondas. Com isto, foram obtidas as características adicionais do tanque de ondas e do dispositivo de galgamento (vide Fig. 2 (b)): largura do tanque de ondas, $L_t = 100$ m e largura do dispositivo de galgamento, $L_D = 27.7955$ m.

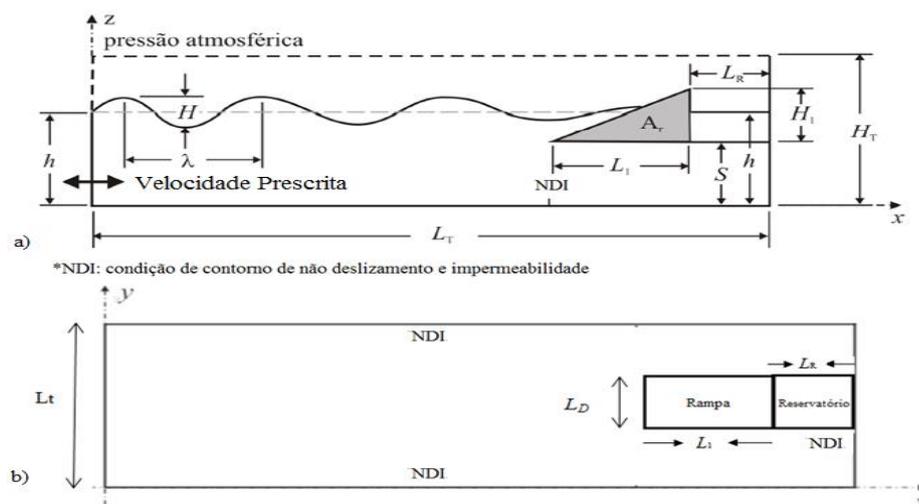


Figura 2. Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real: (a) vista lateral (adaptado de Goulart, 2014) e (b) vista superior.

No âmbito do Design Construtal a otimização do problema está sujeita a duas restrições, ou seja, a restrição da área total do tanque de ondas:

$$A = H_T L_T \quad (9)$$

e a restrição da área da rampa:

$$A_r = \frac{(B+b)L_r}{2} \quad (10)$$

onde B é a base inferior do trapézio formado pela rampa, b é a base superior do trapézio formado pela rampa e L_r é a altura ou distância entre as bases do trapézio (mantida constante).

Na Figura 3 é possível observar as formas que a geometria do dispositivo recebe conforme as variações de b/B . Vale destacar que as geometrias apresentadas elucidam a transformação sofrida pela geometria ao longo do processo de otimização geométrica. A rampa sofre variação no tamanho de suas bases, fazendo com que o restante do dispositivo sofra variações de modo a se adaptar ao tamanho das bases.

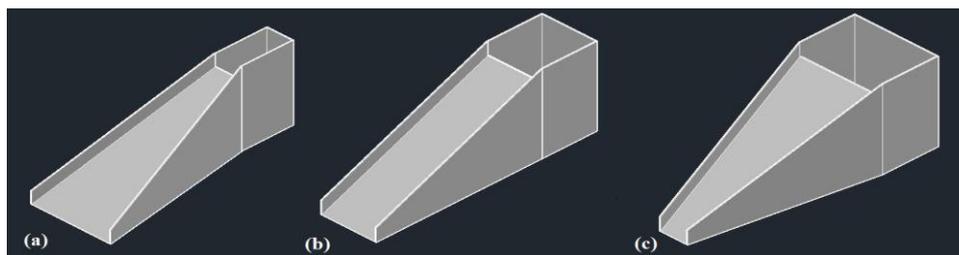


Figura 3. Ilustração das variações sofridas pela geometria do dispositivo de galgamento ao longo do processo de otimização geométrica: (a) $b/B < 1$; (b) $b/B = 1$, (c) $b/B > 1$.

Quanto ao domínio computacional, subdividiu-se em duas regiões, a primeira região é constituída por um volume localizado à montante e na parte superior do tanque de ondas, onde foi empregada uma malha regular constituída por hexaedros de dimensão $\Delta x = 1.00$ m. E, a segunda região é o volume onde se encontra o dispositivo de galgamento, empregou-se uma malha tetraédrica com a mesma dimensão empregada na outra região. Computando os volumes empregados em ambas as regiões do domínio computacional, empregou-se em torno de 1100000 elementos de malha. Esta divisão objetivou a obtenção de uma malha com maior refinamento na região do dispositivo, onde os gradientes de velocidades são mais intensos. Para a discretização temporal empregou-se um passo de tempo de $\Delta t = 0.05$ s. O tempo total de simulação foi de $t = 100.00$ s.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado anteriormente, este problema também consiste em encontrar numericamente a solução para várias geometrias do dispositivo de galgamento (rampa e reservatório) inserido em um tanque de ondas regulares, em escala real, vale destacar, que uma verificação deste estudo é apresentada em Machado, 2012. O objetivo é encontrar o valor da geometria b/B (razão entre a base superior e a base inferior da rampa do dispositivo) que maximiza a massa de água no reservatório. Foram mantidos constantes os graus de liberdade estudados por Goulart, 2014: $(H_1/L_1)_o = 0.34$ e $S_o = 3.5$ m. A área total do tanque de ondas, Eq. 9, e a área da rampa do dispositivo de galgamento, Eq. 10, também foram mantidas constantes e são as restrições geométricas do problema. Em suma, o processo de otimização numérica consiste na simulação de diversas geometrias com diferentes razões de b/B .

A fim de comparar o desempenho dos doze casos simulados, realizou-se o somatório de toda a massa que entra no reservatório ao longo dos 100.00 s de simulação. A Figura 4 apresenta o efeito da razão b/B sobre a quantidade total de massa de água que entra no

reservatório ao longo do tempo. É de fácil observação que há uma razão, $(b/B)_o = 0.38$, que maximiza a massa de água que entra no reservatório ao longo do tempo. A quantidade de massa de água máxima para este caso foi de aproximadamente $m_m = 115915$ kg. Em todos os casos simulados ocorreu galgamento e o caso com menor quantidade de água galgada foi $b/B = 3.00$, onde a quantidade total de água encontrada no reservatório do dispositivo de galgamento ao final dos 100.00 s de simulação foi de aproximadamente $m = 2346$ kg. Observa-se também que, com exceção do caso ótimo $(b/B)_o = 0.38$, a massa total de água galgada é inversamente proporcional ao grau de liberdade estudado, ou seja, a razão b/B . Observa-se que a curva se acentua especialmente para os valores da razão b/B maiores que 1, casos em que a vazão mássica tem decréscimo de aproximadamente 50% entre cada caso. Veja o exemplo: para o caso onde $b/B = 1.00$, a massa total é aproximadamente 75102 kg, enquanto que, para a razão $b/B = 1.22$, a massa total é aproximadamente 37551 kg.

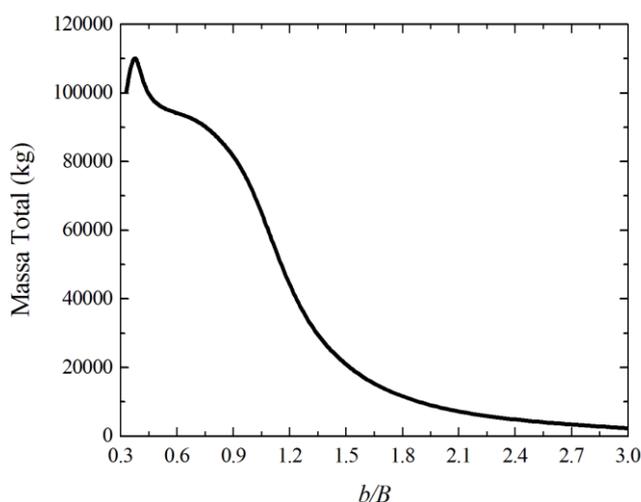


Figura 4: Vazão mássica total em função da razão b/B .

Observa-se, então, a vazão mássica (kg/s) que entra no reservatório do dispositivo de galgamento ao longo dos 100 s simulados para o caso com maior ocorrência do galgamento $(b/B)_o = 0.38$, para o caso que ocorreu uma menor vazão mássica $b/B = 3.00$, ou seja, aquele que apresenta menor quantidade de água galgada e para $b/B = 1.00$, relação onde a rampa é considerada “reta”, ou seja, o grau de liberdade onde não há influência do ângulo de abertura da rampa. Na Fig. 5 é possível avaliar o efeito da influência da razão b/B sobre a quantidade de água que galgou a rampa. Em todos os casos analisados, observa-se a ocorrência de galgamento. Na Fig. 5 também fica evidente que a razão $b/B = 3.00$ conduz aos piores resultados. Pode ser visualizado que, a partir de aproximadamente $t = 45$ s começa a ocorrer

galgamento para o caso ótimo $(b/B)_o = 0.38$, enquanto que, para os demais casos, a ocorrência de galgamento se dá a partir de aproximadamente $t = 50$ s. Após este instante de tempo, os casos apresentam um comportamento de descargas de galgamento periódico, comportamento este, também observado em Machado, 2012, Goulart, 2014, Dos Santos, 2014, entre outros. Estes casos apresentam uma periodicidade de $t = 7.5$ s, ou seja, ocorre o pico de galgamento a cada período de onda. Para o caso com menor descarga de galgamento, $b/B = 3.00$, esta visualização ficou comprometida devido ao pouco volume de água apresentado nas descargas de galgamento. É de fácil visualização que o caso ótimo, $(b/B)_o = 0.38$, apresenta picos de galgamento mais elevados que os outros dois casos apresentados ($b/B = 1.00$ e $b/B = 3.00$). Porém, curiosamente, no instante de tempo de aproximadamente $t = 97$ s (sétimo pico de galgamento apresentado) o caso de razão $b/B = 1.00$ apresenta um pico de galgamento maior.

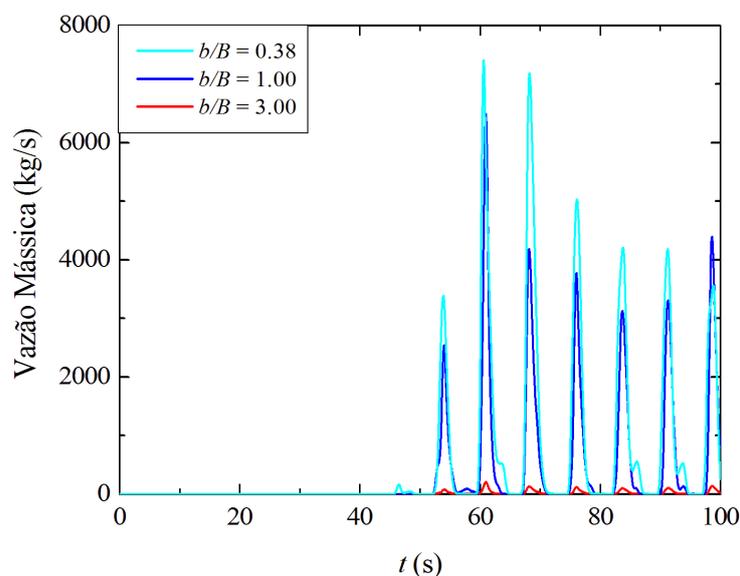


Figura 5: Vazão mássica instantânea em função do tempo para alguns casos simulados

$$((b/B)_o = 0.38, b/B = 1.00 \text{ e } b/B = 3.00).$$

Verifica-se as topologias das fases para o caso ótimo e também, para o caso com pior desempenho, $(b/B)_o = 0.38$ e $b/B = 3.00$, respectivamente. Logo, a Fig. 6 apresenta o comportamento transiente de uma onda gerada numericamente em um tanque de ondas sobre a rampa de um dispositivo de galgamento para o caso de razão ótima, $(b/B)_o = 0.38$. Destaca-se que estas topologias do comportamento da onda foram obtidas considerando um plano x-z localizado na metade do tanque de ondas ($y = 50$ m). A água é representada pela cor vermelha, enquanto o ar representado pela cor azul. As topologias das fases em função do tempo foram obtidas para os instantes de tempo $t = 10.00$ s, 20.00 s, 30.00 s e 40.00 s, 50.00

s, 60.00 s, 70.00 s, 80.00 s, 90.00 s, 100.00 s representados, respectivamente, pelas Fig. 6 (a) – 6 (j). Para os instantes de tempo iniciais, Fig. 6 (a) – 6 (c) há a formação das primeiras ondas devido à imposição do campo de velocidades na superfície de entrada do tanque de ondas, porém ainda não foi gerado um número suficiente de ondas para incidir no dispositivo de galgamento. No instante $t = 40.00$ s, observa-se que a onda ainda não conseguiu ultrapassar a rampa e permitir a entrada de água no reservatório. Em $t = 50.00$ s nota-se uma pequena quantidade de água descarregada no reservatório do dispositivo de galgamento, ou seja, a onda conseguiu superar a resistência imposta ao escoamento pela rampa. Além disso, pode ser vista a massa de água coletada no interior do reservatório, o que não havia sido observado nas topologias para os instantes de tempo anteriores (Fig. 6 (a) – (d)). Para $t = 60.00$ s e 70.00 s (Fig. 6 (f) – (g)) observa-se a ocorrência do fenômeno de galgamento e um aumento na massa de água presente no reservatório do dispositivo. Assim como nas Fig. 6 (h) – (i), onde a massa de água no reservatório do dispositivo aumenta a cada ocorrência do fenômeno de galgamento. No instante final de simulação, $t = 100.00$ s, observa-se uma ampla massa de água no reservatório do dispositivo de galgamento. Destaca-se que, diferentemente dos estudos realizados anteriormente, as topologias das fases não acusaram o fenômeno de reflexão nem o fenômeno de quebra da onda causado pelo dispositivo de galgamento neste estudo. Fenômenos estes, que levavam a uma redução significativa da quantidade de água que entra no reservatório. Dessa forma, este estudo concorda com os resultados encontrados em Goulart (2014), onde a modificação do posicionamento do dispositivo no tanque de ondas conduz ao melhor desempenho do dispositivo, ou seja, a geometria da rampa se adapta ao afundamento do dispositivo.

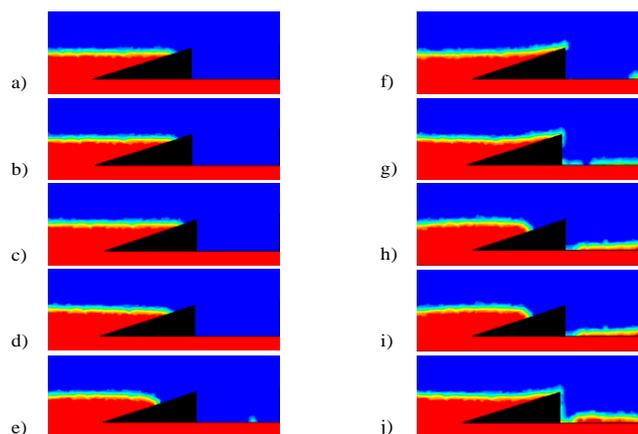


Figura 6: Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão $(b/B)_o = 0.38$ para os seguintes instantes de tempo: a) $t = 10.00$ s; b) $t = 20.00$ s; c) $t = 30.00$ s; d) $t = 40.00$ s; e) $t = 50.00$ s; f) $t = 60.00$ s; g) $t = 70.00$ s; h) $t = 80.00$ s; i) $t = 90.00$ s; j) $t = 100.00$ s.

Na Figura 7 é apresentado o comportamento transiente das ondas sobre o dispositivo para o caso de razão $b/B = 3.00$, caso com menor ocorrência de galgamento. Neste caso, são avaliados os mesmos instantes de tempo do caso anterior, permitindo uma comparação qualitativa entre os dois casos apresentados até o presente momento. Para os primeiros três passos de tempo apresentados, $t = 10.00$ s, 20.00 s e 30.00 s (Fig. 7 (a) – (c)), da mesma forma que para o caso anterior, não houve galgamento. A diferença, para este caso, é que nos instantes seguintes $t = 40.00$ s e 50.00 s ainda não havia ocorrência de galgamento e também, nota-se uma menor quantidade de água na região da rampa, indicando que o galgamento que ocorrerá nos instantes seguintes conduzirá uma menor quantidade de água para dentro do reservatório em comparação com o caso de razão $b/B = 0.38$. Para este caso o galgamento ocorreu após $t = 50.00$ s, ou seja, é possível observar que o fenômeno de galgamento foi retardado devido à influência da geometria da rampa. Posteriormente, para $t = 60.00$ s (Fig. 7 (f)), a onda é capaz de vencer a resistência ao escoamento e consegue galgar a rampa. Porém, apresenta uma pequena quantidade de água no interior do reservatório, o que não foi observado para os casos anteriores. A ocorrência de galgamento é observada para os demais instantes de tempo ($t = 70.00$ s, 80.00 s, 90.00 s e 100.00 s) (Fig. 7 (g) – (j)) devido ao aumento da massa de água incidente no reservatório do dispositivo. Mas, especialmente para os instantes de tempo $t = 70.00$ s e 100.00 s, este fenômeno fica evidenciado através das imagens (Fig. 7 (g) e Fig. 7 (j)), comportamento este, semelhante ao ocorrido no caso ótimo e,

devido ao fato das descargas de galgamento ocorrerem de maneira cíclica para os casos apresentados na Fig. 7.9. Com a análise da Fig. 7, é evidente que este caso apresenta menor ocorrência de galgamento quando comparado ao caso anterior ($(b/B)_o = 0.38$).

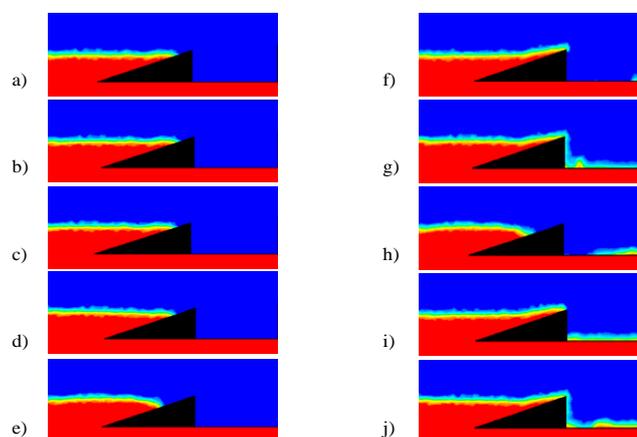


Figura 7: Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão $b/B = 3.00$ para os seguintes instantes de tempo: a) $t = 10.00$ s; b) $t = 20.00$ s; c) $t = 30.00$ s; d) $t = 40.00$ s; e) $t = 50.00$ s; f) $t = 60.00$ s; g) $t = 70.00$ s; h) $t = 80.00$ s; i) $t = 90.00$ s; j) $t = 100.00$ s.

A comparação entre as topologias das fases para os dois casos apresentados indica, de forma qualitativa, que a menor razão de b/B conduz a uma maior quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo de galgamento. Conclui-se também, que o Design Construtal, aliado a busca exaustiva, permitiu um aumento significativo no desempenho do dispositivo. Por exemplo, a quantidade de galgamento de água para a geometria ideal ($(b/B)_o = 0.38$) é aproximadamente 49 vezes maior do que a observada para a relação $b/B = 3.00$, o caso com a quantidade mínima de vazão mássica entre os casos simulados neste estudo. Estes resultados enfatizam a importância da geometria no desempenho dos sistemas onde há escoamento.

CONCLUSÕES

No presente trabalho realizou-se um estudo numérico de análise e otimização objetivando avaliar as geometrias que conduzem a um melhor desempenho de um dispositivo de galgamento. Para tal estudo foi resolvido um escoamento transiente de uma mistura ar-água no regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa e

quantidade de movimento foi obtida através do Método de Volumes Finitos. O método *Volume of Fluid* (VOF) foi empregado para o tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares em um tanque de ondas e sua interação com o dispositivo de galgamento.

Neste estudo, avaliou-se, através de um modelo numérico tridimensional, a influência da forma da rampa do dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Para tal empregou-se o Método Design Construtal aliado a busca exaustiva. Os resultados mostraram que a geometria ótima foi obtida para $(b/B)_o = 0.38$. Vale ainda destacar que, os extremos superiores da relação b/B conduziram ao pior desempenho. A quantidade de galgamento de água para a geometria ideal ($(b/B)_o = 0.38$) é aproximadamente 49 vezes maior do que a observada para a relação $b/B = 3.00$, o caso com a quantidade mínima de vazão mássica entre os doze casos simulados neste estudo.

Recomendações teóricas sobre formas geométricas ótimas, que permitem o melhor aproveitamento da energia contida na onda incidente ao dispositivo, foram obtidas com a utilização do Design Construtal aliado ao processo de busca exaustiva. Ou seja, comprovou-se, mais uma vez, a eficiência deste método para a otimização de dispositivos do tipo galgamento, utilizados na conversão de energia contida nas ondas do mar em energia elétrica.

Destaca-se a contribuição do presente trabalho para o estado da arte de dispositivos de galgamento, tendo em vista que não foram encontradas bibliografias a respeito estudos tridimensionais do mesmo. Enfatiza-se também que este estudo contribui para bibliografia pelo fato do grau de liberdade investigado restringir a estudos de domínios computacionais complexos, ou seja, a razão b/B só pode ser avaliada em um estudo tridimensional. De uma forma geral, os resultados encontrados para ambos os estudos de otimização foram promissores e encorajam a realização de novas pesquisas nesta área.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento.

REFERÊNCIAS

ASSIS, L. E. “Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Oceânicas no Litoral do Rio Grande do Sul”, **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.

BARBOSA, D.; DOS SANTOS, D. ; GOULART, M. ; SOUZA, J. ; CARVALHO, O.; DOS SANTOS, E.; ISOLDI, L. “Numerical Simulation and Solution Verification of an Overtopping Wave Energy Converter.” In: **XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, Rio de Janeiro. v. 1, 2015.

BEELS C., TROCH, P., VISCH, K. D., KOFOED, J. P. and BACKER, G. D. "Application of time-dependent mild slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters", **Renew. Energ.****35**: 1644 ~1661. 2010.

BEJAN, A. and LORENTE, S., “The constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 47, 2004.

BEJAN, A. and LORENTE, S., “Theory of generation of configuration in nature and engineering”, **J. Appl. Phys.****100**, 2006.

BEJAN, A., LORENTE and LEE, J., “Unifying constructal theory of tree roots, canopies and forests” **J. Theor. Biol.**, 2008.

CRUZ, J.; SARMENTO, A. “Energia das Ondas – Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais.” **Instituto do Ambiente**, 2004.

DOS SANTOS, E. D. ; MACHADO, B. N. ; ZANELLA, M. M. ; GOMES, M. N. ; SOUZA, J. A. ; ISOLDI, L. A. ; ROCHA, L. A. O. "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, p. 232-244, 2014.

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

GARCIA, F.H. “Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-fotovoltaico”. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

GOMES, M. N. “Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d’ água Oscilante para Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica.” **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2010.

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

GOULART, M. M.; MARTINS, J. C.; ACUNHA, I. C.; GOMES, M. N.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D. “Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths.” **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 10, p. 120-129, 2015.

IAHNKE, S. L. P. “Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento”, **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2010.

LING, L.; YONGCAN, C.; YULIANG, L. "Volume of Fluid (VOF) Method for Curved Free Surface Water Flow in Shallow Open Channel". **Department of Hydraulic Engineering**, Tsinghua University, Beijing, China, 2001.

LV, X., ZOU, Q.; REEVE, D. "Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method", **Adv. Water Resour.** 34: 1320~1334. 2011.

MACHADO, B. N., ZANELLA, M. M., LOPES, N. DA R., GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., DOS SANTOS, E. D. "Simulação Numérica de um Dispositivo de Galgamento Tridimensional para Conversão de Energia das Ondas". **XIII ENPOS**, Universidade Federal de Pelotas, 2011a.

MACHADO, B. N., ZANELLA, M. M., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., DOS SANTOS, E. D., Isoldi, L. A., ROCHA, L. A. O. "Numerical Analysis of the Ramp Shape Influence in an Overtopping Converter", **XXXII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, 2011b, Ouro Preto.

MACHADO, B. N., ZANELLA, M. M., GOMES, M. N., TEIXEIRA, P. R. F., ISOLDI, L. A., DOS SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. "Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter", **Constructal Law Conference**, Porto Alegre. 2011c.

MACHADO, B. N. "Modelagem Computacional e Otimização geométrica de um dispositivo de galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica", **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal do Rio Grande. 2012.

MARTINS, J. C.; DANTE, V. E. B.; GOULART, M. M.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. N.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D. "Constructal Design of an Onshore Overtopping Device in Real Scale for two Different Ocean Wave Periods and Different Areas of the Ramp." In: **XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, Rio de Janeiro. v. 1, 2015(a).

MARTINS, J. C.; GOULART, M. M.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; GOMES, M. N.; ROCHA, L. A. O.. "Constructal Design of an Onshore Overtopping Device in Real Scale for Different Ramp Construction Areas". In: **23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, Rio de Janeiro. v. 1. 2015(b).

NØRGAARD, J. H.; ANDERSEN, T. L. "Investigation of Wave Transmission from a Floating Wave Dragon". In proceedings of the **Twenty – second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference**, 2012.

RELATÓRIO DO WAVEC. "Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal". **Wave Energy Centre**, 2004.

SANTOS, A. L.; WEBER, L. M.; MOREIRA, T. Z. T. "A Matriz Energética Brasileira a o Aproveitamento das Fontes Renováveis", **Análise Conjuntural**, v. 28, n. 1-2, p. 18, 2006.

SCHLICHTING, H. "Boundary Layer Theory 7th edn". **Mc Graw-Hill**, Nova York, Estados Unidos, 817 p., 1979.

TEDD, J. KOFOED, J. P. “Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon”, Wave Energy Converter, **Renewable Energy**, v. 34, 2009.

TOLMASQUIM, M. “Fontes Renováveis de Energia no Brasil.” Rio de Janeiro: **Interciência: CENERGIA**, 2003.