RBES
Revista Brasileira de
Engenharia e Sustentabilidade

ISSN 2448-1661
Pelotas, RS, UFPel-Ceng
https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/RBES/index
V.10, esp, p.26-34, dez 2022

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS CAO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

MOCELLIN, A. P. G.[1]; PAIVA, M. S.[1]; KOCH, A, H, S.[2]; FILHO, L, F, M, C.[1]; ISOLDI, L, A.[3]; MACHADO, B, N.[1,2].

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale - Porto Alegre, RS, Brasil.

[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus Litoral Norte - Tramandaí, RS, Brasil.

[3] Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros - Rio Grande, RS, Brasil.

Palavras-chave: coluna de água oscilante, design construtal, energia das ondas, Fluent

Resumo

Por se tratar de uma fonte renovável de energia, estudos sobre a obtenção de energia elétrica por meio da energia das ondas do mar vem ganhando destaque ao longo dos anos. Com esta motivação, o presente trabalho avalia geometricamente um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO), que é composto por uma câmara hidropneumática e um duto de ar, onde uma turbina e um gerador elétrico são acoplados. A câmara é aberta abaixo do nível da superfície livre, enquanto o duto é aberto para a atmosfera. O movimento oscilante das ondas provoca o escoamento do ar dentro desta estrutura, acionando a turbina que produz energia elétrica. Para a avaliação geométrica do CAO, utilizou-se o design construtal aliado à busca exaustiva na investigação do grau de liberdade H_1/L_1, razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática, mantendo constante a área da câmara. Considerou-se um domínio computacional bidimensional em escala de laboratório e a incidência de ondas regulares. As simulações foram realizadas no Fluent e o modelo multifásico volume of fluid (VOF) foi utilizado. A geometria ótima foi encontrada para $H_1/L_1 = 0{,}80$, atingindo eficiência 1,5 vezes superior do que a pior, $H_1/L_1 = 5{,}00$.

TÍTULO EM INGLÊS: terá a mesma normatização do título em Português.

Keywords: oscillating water column, constructal design, wave energy converter, wave energy, Fluent

Abstract

Since it is a renewable energy source, studies on obtaining electricity through the sea waves energy have been gaining prominence over the years. Thus, with this motivation, the present paper geometrically evaluates an oscillating water column (OWC) wave energy converter device, which is composed of a hydropneumatic chamber and an air duct, where the turbine and the electric generator are coupled. The chamber is open under the free surface level while the duct is open to the atmosphere. The oscillating movement of the waves causes the air to flow inside the structure, actuating the turbine that produces electrical energy. To perform a geometric evaluation of the OWC, the constructal design was used along with the Exhaustive Search to investigate the freedom degree H_1/L_1, the ratio between the height and length of the hydropneumatic chamber, keeping the chamber area constant in all tested cases. Therefore, a two-dimensional laboratory-scale computational domain was employed with the incidence of regular waves. The numerical simulations were performed on Fluent, and the volume of fluid (VOF) multiphase model was used. The optimal geometry was found for $H_1/L_1 = 0.80$, reaching an efficiency 1.5 times greater than the worst one, $H_1/L_1 = 5.00$.

Artigo Submetido dia 23/02/2023
Artigo Aceito dia 30/05/2023

INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial que, de acordo com Fontana et al. (2015), se deve ao crescimento populacional de países subdesenvolvidos e ao elevado consumo proveniente dos países desenvolvidos, aliada à busca pela redução das emissões de gases causadores do efeito estufa, acarreta a necessidade de diversificação da matriz energética. Neste contexto, o oceano apresenta-se como uma alternativa viável de fonte de energia limpa e renovável, dado seu grande potencial energético disponível em diversas formas, conforme apresentado em Cisco et al. (2020).

Dentre as formas de energias oceânicas, pode-se destacar a energia proveniente das ondas que, segundo Gunn e Stock-Williams (2012), possui um potencial global de aproximadamente 2,11 TW. O aproveitamento desse tipo de energia ocorre através de dispositivos conversores, que possuem diferentes princípios físicos de funcionamento, classificados, de acordo com Pecher e Kofoed (2017), como: coluna de água oscilante (CAO), corpos oscilantes e galgamento. Existem, ainda, outros dispositivos que não se encaixam nessas classificações, que é o caso da placa horizontal submersa (SEIBT et al., 2017).

O presente estudo aborda o conversor de energia das ondas do tipo CAO, que possui o princípio físico de funcionamento baseado no movimento das ondas incidentes, que provocam a pressurização e despressurização do ar dentro de sua estrutura, que é composta por uma câmara hidropneumática e um duto. O movimento oscilatório das ondas faz com que o ar tenha sua passagem forçada pelo duto, ativando a turbina, que é acoplada a um gerador elétrico, produzindo assim, energia (PECHER; KOFOED, 2017; SCARPARO et al., 2017).

O design construtal, que se baseia na teoria constructal, foi desenvolvido por Adrian Bejan (BEJAN, 2000) e tem sido utilizado na otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas (SEIBT et al., 2017; GOMES et al., 2018; DE LIMA et al., 2021; MARTINS et al., 2022). Para sua aplicação, definem-se restrições, graus de liberdade e, no mínimo, um indicador de performance. Então, os graus de liberdade são variados, respeitando as restrições, definindo assim as diferentes configurações geométricas possíveis que formam o espaço de busca para a análise. Essas geometrias são então avaliadas, visando maximizar (ou minimizar) o indicador de performance (DOS SANTOS et al., 2017).

Em particular, pode-se observar estudos de modelos numéricos bidimensionais que, através da modelagem computacional, utilizam o design construtal, aliado à busca exaustiva, na avaliação geométrica de dispositivos do tipo CAO submetidos à incidência de ondas regulares: De Lima et al. (2017) determinaram a geometria, em escala real, que maximiza a potência hidropneumática de um dispositivo CAO que utiliza uma geometria trapezoidal na região de transição (região entre a câmara e o duto de ar do CAO); Gomes (2014) considerou um modelo computacional em escala de laboratório, onde a razão entre a altura e o comprimento da câmara do CAO e a profundidade de submersão do CAO foram otimizadas; Letzow et al. (2017) encontraram as dimensões ótimas para a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do dispositivo CAO, em escala real, considerando dois valores para o comprimento da borda frontal (parede frontal submersa da câmara hidropneumática).

Face o exposto, o presente trabalho baseia-se na geometria do dispositivo CAO proposta por Letzow et al. (2017) a fim de avaliar a geometria ótima quando o dispositivo CAO é submetido a uma onda em escala de laboratório. Para tanto, o design construtal, aliado à busca exaustiva, foi aplicado a um dispositivo CAO de forma a avaliar o grau de liberdade H_1/L_1 (relação entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) visando maximizar o aproveitamento da energia contida nas ondas incidentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Modelagem matemática e computacional

O presente estudo numérico foi realizado por meio do Fluent, um software de dinâmica de fluidos computacional baseado no método dos volumes finitos (MVF). O modelo multifásico

volume of fluid (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981), foi utilizado para o tratamento da interface das fases, assim como em Letzow et al. (2017), Gomes et al. (2018), De Lima et al. (2021), entre outros.

No VOF o conceito de fração volumétrica (α) é utilizado para a representação das fases que, neste caso, são a água e o ar. A soma das fases em cada volume deve ser sempre igual a 1, assim, os volumes que apresentam valores de αar_água entre 0 e 1 contém a interface entre água e ar, neste caso α_ar=1-αar_água. No modelo VOF, um único conjunto de equações é resolvido. Logo, a fração volumétrica é considerada, ao longo do domínio computacional, através da equação de transporte. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), o modelo é composto pela equação da continuidade:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{v}) = 0 \qquad (1)$$

equação de transporte da fração volumétrica:

$$\partial(\alpha)/\partial t+\nabla.(\alpha\vec{v})=0 \qquad (2)$$

e equação da quantidade de movimento:

$$\partial/\partial t\,(\rho\vec{v})+\nabla.(\rho\vec{v})\,\vec{v}=-\nabla p+\nabla.(\mu\bar{\bar{\tau}})+\rho\vec{g}+S \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m³), t é o tempo (s), $\vec{v}$ é o vetor velocidade do escoamento (m/s), p é a pressão estática (N/m²), μ é a viscosidade (kg/(m·s)), $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor de deformações (N/m²), $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade (m/s²) e S é o termo fonte, que representa a dissipação de energia quando aplicada a praia numérica, dada por (LISBOA et al., 2017):

$$S = -\left[C_1\rho V + \frac{1}{2}C_2\rho|V|V\right]\left(1-\frac{z-z_{fs}}{z_b-z_{fs}}\right)\left(\frac{x-x_s}{x_e-x_s}\right)^2 \quad (4)$$

onde C1 e C2 são os coeficientes de amortecimento linear (s-1) e quadrático (m-1), respectivamente; V é o módulo da velocidade do fluido no ponto analisado (m/s); z é a posição vertical; z_{fs} e z_b são as posições verticais da superfície livre e do fundo (m), respectivamente; x é a posição horizontal (m); x_s e x_e são as posições de início e de fim da praia numérica (m), respectivamente. Os coeficientes de amortecimento, seguindo as recomendações de Lisboa et al. (2017), são definidos como $C_1 = 20$ s-1 e $C_2 = 0$ m-1.

Geração das Ondas

Conforme mencionado, neste estudo é considerada a geração de ondas regulares. As características das ondas simuladas foram obtidas de Machado (2016) e podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características da onda simulada

Característica	Nomenclatura	Medida
Altura	H (m)	0,18
Comprimento	λ (m)	1,20
Período	T (s)	0,88
Profundidade	h (m)	0,60

De acordo com Chakrabarti (2005), estas ondas são classificadas como Stokes de 2ª ordem e a velocidade de propagação nas direções horizontal (u) e vertical (w), podem ser descritas, respectivamente, por (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$u = Agk\frac{\cosh(kz + kh)}{\omega\cosh(kh)}cos(kx-\omega t) + A^2\omega k\frac{cosh[2k(h+z)]}{sen^4(kh)}cos[2(kx-\omega t)] \quad (5)$$

$$w = Agk\frac{senh(kz+kh)}{\omega\, senh(kh)}sen(kx-\omega t) + A^2\omega k\frac{senh[2k(h+z)]}{cos^4(kh)}sen[2(kx-\omega t)] \quad (6)$$

onde A é a amplitude (m); e k é o número de onda

(m^{-1}), dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (7)$$

sendo λ o comprimento da onda (m); e ω a frequência angular da onda (Hz), dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad (8)$$

sendo T o período da onda (s). Ainda, a elevação da superfície livre é descrita por (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$\eta = A\cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4\,senh^3(kh)}[2 + \cosh(2kh)]\cos[2(kx - \omega t)] \qquad (9)$$

Domínio Computacional

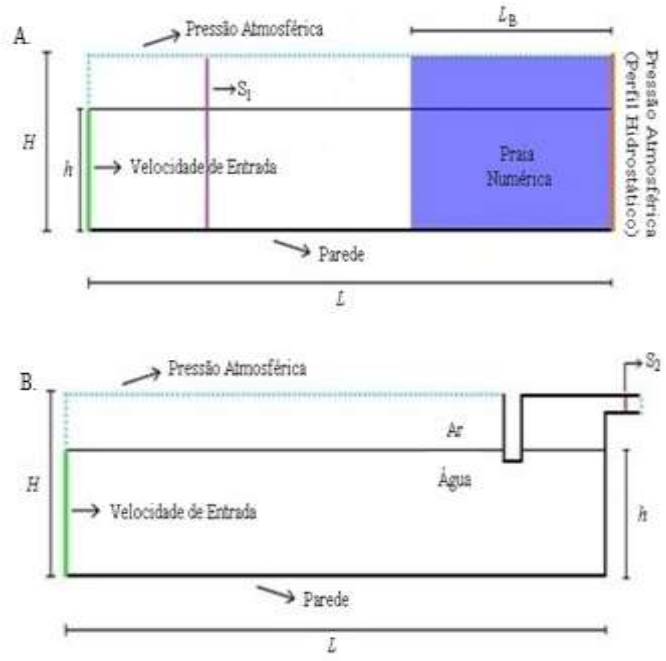
O presente trabalho objetiva avaliar a geometria de um dispositivo CAO em escala de laboratório. Deste modo, foi considerado um canal de ondas com $L = 6{,}00$ m, seguindo a recomendação de Gomes et al. (2012b), que indica que o canal de ondas deve ter um comprimento igual a 5 vezes o comprimento das ondas que serão geradas; além disso, foram adotadas a altura $H = 1{,}00$ m e a profundidade $h = 0{,}60$ m.

Destaca-se que foram considerados dois domínios computacionais: o primeiro (vide Fig. 1A) para realizar a verificação da geração da onda, composto somente pelo canal de ondas; e o segundo (Fig. 1B) para a avaliação geométrica do conversor de energia das ondas, composto por um canal de ondas com um dispositivo CAO acoplado. Deste modo, em cada domínio foi utilizada uma sonda: S_1 para monitorar a elevação da superfície livre, em $x = 1{,}00$ m (ver Fig. 1A); e S_2 para monitorar a pressão estática, velocidade do ar e vazão mássica do ar, no centro do duto do CAO (ver Fig. 1B).

Quanto às condições de contorno utilizadas, em ambos os casos, foram empregadas: pressão atmosférica (linha azul pontilhada); parede (linha contínua preta), onde as velocidades são consideradas nulas; velocidade de entrada (linha contínua verde), onde as Eqs. (5) e (6) são impostas. Ainda, no domínio computacional utilizado para verificação do modelo (Fig. 1A), foi utilizada a praia numérica (Eq. (4)) para absorção da energia das ondas, reduzindo, assim, o efeito de reflexão. Destaca-se que, conforme indicado em Lisboa et al. (2017), $L_B = 2{,}40$ m.

Conforme já mencionado, o modelo computacional considerado neste estudo baseia-se no modelo utilizado em Letzow et al. (2017). Assim, visando adaptar as medidas do dispositivo CAO, foi proposta uma relação direta definida pelo parâmetro λ/λ_r, onde λ é o comprimento de onda em escala de laboratório e λ_r é o comprimento de onda em escala real utilizado em Letzow et al. (2017), ou seja, $\lambda_r = 65{,}40$ m.

Figura 1. Representação esquemática do domínio computacional utilizado para: A. verificação da geração da onda; B. avaliação geométrica do dispositivo conversor

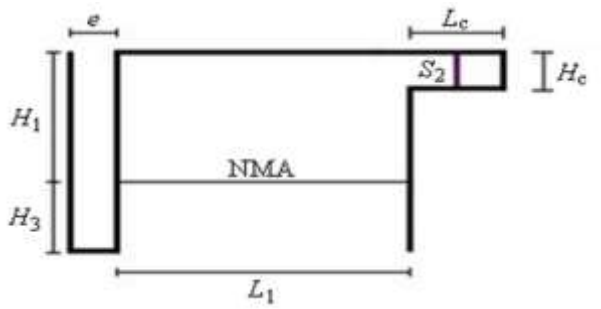


Fonte: Autores, 20XX

Desse modo, considerou-se uma câmara com espessura $e = 0{,}0092$ m e comprimento da borda frontal $H_3 = 0{,}0459$ m. Além disso, o diâmetro e comprimento do duto de ar são dados por $H_c = 0{,}0110$ m e $L_c = 0{,}0183$ m, respectivamente. As dimensões avaliadas foram: altura (H_1) e comprimento (L_1) da câmara hidropneumática. Enquanto a área da câmara foi mantida constante ($A_c = 0{,}0269$ m²) para todos os casos. A Figura 2 ilustra a geometria do dispositivo, onde NMA

refere-se ao nível médio da água.

Figura 2. Características do dispositivo CAO



Fonte: Autores, 20xx

A Tabela 2 apresenta os valores adotados para os parâmetros H_1 e L_1 no estudo.

Tabela 2. Valores de H_1 e L_1 considerados na avaliação geométrica da câmara hidropneumática do CAO

H1/L1	0,4	0,8	1	1,5	2	3	5
H1 (m)	0,104	0,147	0,16	0,201	0,232	0,284	0,367
L1 (m)	0,259	0,184	0,16	0,134	0,116	0,095	0,073

Fonte: Autores, 20xx

Com relação à discretização espacial, baseado em Gomes et al. (2012a) foi considerada uma malha do tipo stretched. Para tanto, o domínio computacional foi dividido em 3 regiões verticais, onde foram adotadas as seguintes discretizações: 60 células computacionais na região que possui apenas água; 40 células na região da superfície livre (interface ar/água); 20 células na região que contém apenas ar. Ainda, horizontalmente, o domínio computacional foi subdividido em 250 células computacionais, ou seja, 50 células por comprimento de onda. Além disso, no duto de ar do CAO foi adotada uma malha regular mais refinada, $\Delta_x = 0{,}001$ m. Quanto à discretização temporal, seguindo a recomendação de Barreiro (2009) e Gomes (2014) foi empregado um passo de tempo, $\Delta_t = T/500$, ou seja, 0,00176 s. Quanto ao tempo total de simulação, considerou-se 8,8 s de propagação de ondas no canal, o que equivale a 10 vezes o período da onda empregada (LETZOW et al., 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando verificar a qualidade das ondas geradas numericamente, empregou-se a estratégia de comparar os resultados obtidos na simulação e monitorados através da sonda S_1 (vide Fig. 1A), com a solução analítica para a elevação da superfície livre obtida através da Eq. (9). Vale destacar que a ondas obtidas analiticamente possuem as mesmas características das ondas obtidas numericamente. Para a comparação dos resultados numéricos e analíticos, utilizou-se as médias *mean absolute error* (*MAE*) e *root mean square error* (*RMSE*), definidas por Chai e Draxler (2014), como:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N} |O_i - P_i|}{N} \qquad (10)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (O_i - P_i)^2}{N}} \qquad (11)$$

onde O_i representa o valor encontrado numericamente (m); P_i representa o valor definido pela solução analítica (m); e N representa o número total de dados.

Os resultados encontrados foram $MAE = 0{,}025$ m e $RMSE = 0{,}031$ m, e consideram o intervalo de tempo $2{,}0\ \text{s} \leq t \leq 8{,}8\ \text{s}$, pois, conforme pode ser observado na Fig. 3, as primeiras ondas geradas numericamente são amortecidas, fato este, que ocorre devido à condição inicial de inércia do fluido. A partir de $t = 2{,}0$ s observa-se que as ondas geradas numericamente estabilizam-se e se assemelham às ondas obtidas analiticamente.

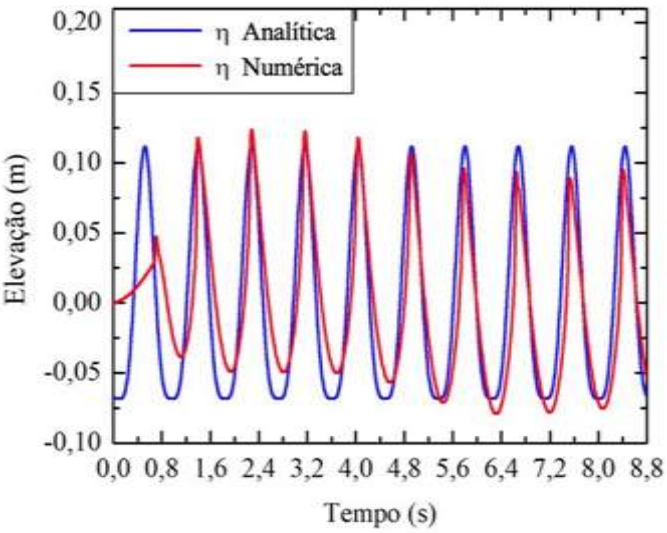


Figura 3. Verificação da onda numérica

Para a avaliação geométrica do conversor CAO, foram utilizados os resultados monitorados

pela sonda S_2 (vide Fig. 1B), a fim de averiguar a razão H_1/L_1 que maximiza a potência obtida. Visando comparar a potência teórica disponível no duto do dispositivo CAO, calculou-se a potência hidropneumática (PH), conforme indicado em Gomes et al. (2018):

$$P_H = \left(p_e + \frac{\rho {v_{ar}}^2}{2}\right)\frac{\dot{m}}{\rho} \qquad (12)$$

onde P_H é a potência hidropneumática disponível (W); p_e é a pressão estática (Pa); $\dot{m}$ é vazão mássica de ar (kg/s); e v_{ar} é a velocidade do ar (m/s).

Na Figura 4 observa-se a potência hidropneumática obtida ao longo dos 8,80 s de propagação das ondas no canal, onde são consideradas as razões extremas $H_1/L_1 = 0{,}40$ e $H_1/L_1 = 5{,}00$ que, dentre os casos analisados, apresentaram os piores desempenhos, assim como o caso com melhor desempenho, $H_1/L_1 = 0{,}80$. Conforme recomendado por Letzow et al. (2017), para o cálculo da potência hidropneumática, considerou-se a metade final do tempo de simulação, ou seja, $t \geq 4{,}4$ s. Isso se justifica, devido à condição de contorno inicial do fluido em repouso que, conforme mencionado anteriormente, faz com que as primeiras ondas que incidem no dispositivo sejam amortecidas.

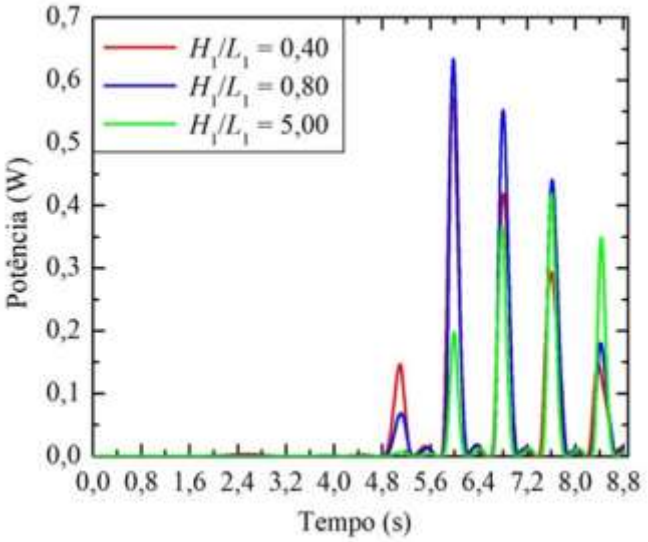


Figura 4. Potência hidropneumática obtida para o caso ótimo e para as razões extremas de H_1/L_1 avaliadas

Analisando a Fig. 4, é possível observar que a potência disponível não exibe um comportamento estável como o da onda incidente, fato que ocorre devido à reflexão causada quando as ondas atingem a parede do dispositivo que é localizada no final do canal. Destaca-se que, neste caso, a praia numérica não é considerada para o amortecimento das ondas devido à localização onshore do dispositivo CAO. Além disso, destaca-se que não houve uma razão predominante quanto aos picos de potência. No entanto, para todos os instantes onde foram obtidos os maiores picos de potência (em aproximadamente, $t = 6{,}0$; $t = 6{,}8$; e $t = 7{,}6$ s) o caso ótimo predominou.

A fim de avaliar quantitativamente as geometrias estudadas e determinar a razão H_1/L_1 ótima, que maximiza a potência obtida, foi calculada a média root mean square (RMS) (HOLTHUIJSEN, 2007):

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N} P_k^2}{N}} \qquad (11)$$

onde, P_k indica a potência instantânea calculada em cada passo de tempo.

A Figura 5, apresenta a influência do grau de liberdade avaliado sobre a potência hidropneumática média (P_{RMS}) disponível em cada H_1/L_1 avaliado.

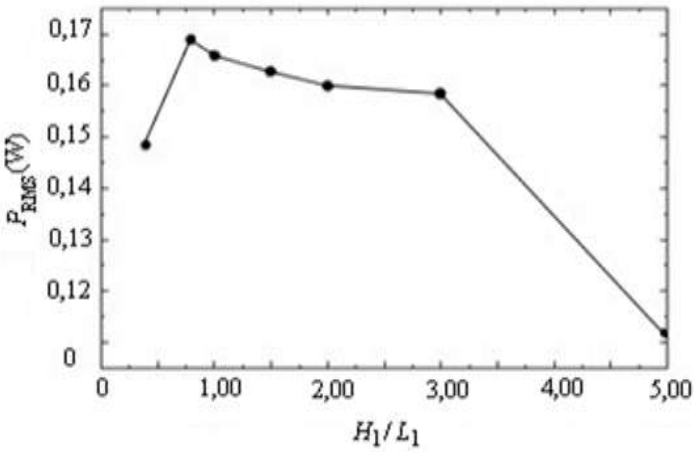


Figura 5. Potência hidropneumática média disponível em cada H_1/L_1

Conforme pode-se observar na Figura 5, as razões extremas da razão H_1/L_1 analisadas apresentaram os piores resultados. A geometria que possui a câmara mais elevada ($H_1/L_1 = 5{,}00$), representa o pior caso analisado, obtendo $P_{RMS} =$

$0{,}1116$ W, seguido da geometria de razão $H_1/L_1 = 0{,}40$, onde foi obtida uma $P_{RMS} = 0{,}1485$ W. Já a geometria ótima, aquela que maximiza a potência obtida pelo dispositivo CAO, foi obtida para $H_1/L_1 = 0{,}80$ e apresenta $P_{RMS} = 0{,}1690$ W. Destaca-se que as baixas potências observadas se devem a realização do estudo em escala de laboratório.

CONCLUSÕES

A avaliação geométrica de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO em escala de laboratório, foi realizada por meio do método design construtal associado à busca exaustiva. Para isso, estudou-se a influência do grau de liberdade H_1/L_1, ou seja, a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do dispositivo, sobre a potência hidropneumática disponível obtida pelo dispositivo.

A geometria ótima para o dispositivo CAO analisado é a de razão $H_1/L_1 = 0{,}80$. Este caso apresenta uma eficiência cerca de 1,5 vezes superior ao pior caso encontrado, o de razão $H_1/L_1 = 5{,}00$. Deste modo, mais uma vez se estabelece a aplicabilidade do método design construtal na avaliação geométrica de dispositivos CAO.

Ainda, em relação aos resultados encontrados, observou-se que, após o caso ótimo, a potência média disponível decresce à medida que o valor avaliado para o grau de liberdade H_1/L_1 cresce, comportamento semelhante ao observado em Letzow et al. (2017). Deste modo, sugere-se que em estudos futuros, seja utilizado o número de Froude, que é um adimensional que define uma relação entre forças de inércia e forças de gravidade para um escoamento (HUGHES, 1993), para avaliação do comportamento fluidodinâmico de dispositivos conversores de energia das ondas em diferentes escalas.

Além disso, visando a aplicabilidade real do dispositivo, sugere-se que, em futuros estudos, o conversor CAO tenha sua avaliação geométrica realizada considerando o clima de ondas do local onde o mesmo será instalado. Para tanto, sugere-se o uso da metodologia WaveMIMO (MACHADO et al., 2021), que permite a simulação numérica de ondas irregulares baseadas em dados de estado de mar realístico.

AGRADECIMENTOS

A. P. G. M. e M. da S. P. agradecem a CAPES (Código de Financiamento 001) por suas bolsas de mestrado. A. H. da S. K. agradece ao CNPq por sua bolsa de Iniciação Científica. L. A. I. agradece ao CNPq pela bolsa PQ1D (processo: 309648/2021-1) e à FAPERGS pelo suporte financeiro - Edital PqG (processo: 21/2551-0002231-0).

REFERÊNCIAS

BARREIRO, T. G. **Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

BEJAN, A. **Shape and structure, from engineering to nature.** Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, 7, p.1247-1250, 2014.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering.** vol. 1, Elsevier, Ilinois, Estados Unidos, 2005. 661p.

CISCO, L. A.; KOCH, A. H. S.; CONDOTTA, M. P.; HOFSTATTER, R.; HARRAS, L. M.; OLEINIK, P. H.; PAIVA, M. S.; ISOLDI, L. A.; MACHADO, B. N. O oceano como fonte de energia: uma revisão da literatura. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 6, p.23-33, 2020.

DE LIMA, Y. T. B.; ROCHA, L. A. O; GOMES, M. N.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Aplicação do método design construtal na avaliação numérica da potência hidropneumática de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante com região de transição trapezoidal. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, p.376-396, 2017.

DE LIMA, Y. T. B.; DAS NEVES GOMES, M.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; LORENZINI, G.; ROCHA, L. A. O. Geometric analysis through the constructal design of a sea wave energy converter with several coupled hydropneumatic chambers considering the oscillating water column operating principle. **Applied Sciences**, v.11, p.8630, 2021

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. World Scientific, Singapura, 1991. v.2, 353p.

DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; GOMES, M. DAS N.; ROCHA, L. A. O. The constructal design applied to renewable energy systems. In: Eduardo Rincón-Mejía; Alejandro de las Heras. (Org.). **Sustainable Energy Technologies.** 1ed. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2017. v.1, p.63-87.

FONTANA, R. L. M.; COSTA, S. S.; SILVA, J. A. B.; RODRIGUES, A. J. Teorias demográficas e o crescimento populacional no mundo. **Caderno de Graduação-Ciências Humanas e Sociais-UNIT-SERGIPE**, v.2, p.113-124, 2015.

GOMES, M. N.; ISOLDI, L.A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, anais, 2012.

GOMES, M. N.; NASCIMENTO, C. D.; BONAFINI, B. L.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. Otimização geométrica 2D com constructal design de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante em escala de laboratório. In: V Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO), Rio Grande, 2010.

GOMES, M. N. **Constructal design de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

GOMES, M. N.; LORENZINI, G.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L.A. Constructal design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods. **Journal of Engineering Thermophysics**, v.27, p.173-190, 2018.

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, v.44, p.296-304, 2012.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v.39, p.201–225, 1981.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters.** 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, p.387, 2007.

HUGHES, S. A. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. In: Liu, P. (Ed.) **Advanced Series on Ocean Engineering**, vol. 7. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1993.

LETZOW, M.; LEVIEN, F. V.; PONS, R. P.; GOMES, M. N.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D. Avaliação geométrica da câmara de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo OWC para diferentes comprimentos da borda frontal. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.6, p.454-471, 2017.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R.; DIDIER, E. Regular and irregular wave propagation analysis in a flume with numerical beach using a Navier-Stokes based model. **Defect and Diffusion Forum**, v.372, p.81-90, 2017.

MACHADO, B. N. **Estudo numérico tridimensional de um dispositivo de galgamento para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica aplicando o método constructal design**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

MACHADO, B. N.; OLEINIK, P. H.; KIRINUS, E. P.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. DAS N.; CONDE, J. M. P.; ISOLDI, L A. WaveMIMO methodology: numerical wave generation of a realistic sea state. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v.7, p.2129-2148, 2021.

MARTINS, J. C.; FRAGASSA, C.; GOULART,

M. M.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; DAS NEVES GOMES, M.; ROCHA, L. A. O. Constructal design of an overtopping wave energy converter incorporated in a breakwater. **Journal of Marine Science and Engineering**, v.10, p.471, 2022.

PECHER, A.; KOFOED, J. P. **Handbook of ocean wave energy**. Springer Nature, Berlin, 2017.

SEIBT, F. M.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Study of the effect of the relative height on the efficiency of a submerged horizontal plate type wave energy converter applying constructal design. In: XXXVIII IberianLatin American Congress on Computational Methods in Engineering, Florianópolis. 2017.

SCARPARO, A.; LIMA, J. J.; SILVA, P. R. J.; ARAUJO, F. R. M.; CARVALHO, J. B. Fontes de energia renováveis: energia das ondas. Revista Conexão Eletrônica, v.14, p.2173-2187, 2017.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education Limited, Harlow, 2007.