

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO SOBRE A
HIDRODINÂMICA DE UM CONVERSOR OSCILANTE POR
TRANSLAÇÃO DE ONDAS**

VARGAS G.F.; SCHETTINI E.B. C.

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Brasil.
guilherme.fuhrmeister@ufrgs.br; bcamano@iph.ufrgs.br*

RESUMO:

Os conversores oscilantes por translação de ondas representam uma tecnologia de grande potencial no processo de conversão de energia das ondas em energia elétrica. A literatura disponível sobre os dispositivos deste tipo ainda não apresenta dados suficientes que permitam a estimativa do desempenho dos mesmos em situações reais de funcionamento, razão pela qual diversos pesquisadores e engenheiros dedicam-se ao estudo deste tipo de tecnologia. Uma das formas de analisar o funcionamento dos conversores consiste na utilização de modelagem numérica. O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da posição de instalação de um conversor oscilante por translação de ondas sobre a hidrodinâmica e consequente eficiência do mesmo. A ferramenta utilizada foi o código computacional *open source OpenFOAM* v. 4.1, juntamente com a extensão OLAFOAM, por meio de um modelo bidimensional, previamente validado, baseado na metodologia RANS de modelagem da turbulência. Os resultados obtidos mostraram que a posição de instalação modifica consideravelmente as amplitudes angulares e velocidades angulares atingidas pela placa do conversor. Menores aberturas indicam um maior grau de submergência do dispositivo, o qual é responsável por potencializar ou diminuir a eficiência do mesmo. O intervalo que abrange os graus de submergência entre 0,8 e 1,4 corresponde à faixa ideal de funcionamento de um conversor deste tipo, sendo a eficiência máxima obtida quando a placa estiver 90 % submersa.

ABSTRACT:

The oscillating wave surge converter represents one of the most efficient systems to transform the ocean wave energy into electric power. The recent papers about those kind of converters don't bring sufficient data that allow the estimation of the device performance in real operating situations, reason why several researchers and engineers are dedicated to the study of this type of technology. One way of analyzing the operation of those converters is to use numerical modeling. The main goal of the present paper is to analyze the influence of the installation position over the converter hydrodynamics and its efficiency on electric generation. To perform the study the open source code *OpenFOAM* v. 4,1 and its extension OLAFOAM were used. A previously validated two-dimensional model, based on the RANS turbulence modeling methodology, was applied. The results demonstrates that the installation position of the convertor modifies its pitch angle and its angular velocity. As the installation is near to the ocean bottom, higher is the submergence factor of the device, which is responsible to increase or decrease its the efficiency. Submergence factors higher than 0,8 and lower than 1,4 represents the ideal operating range of the converter, which best efficiency corresponds to a submergence factor equal to 0,9.

PALAVRAS-CHAVE: Energia de Ondas; *Oscillating Wave Surge Converters*; OpenFOAM; OLAFOAM; RANS.

INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir de fontes renováveis representa uma das temáticas mais relevantes da atualidade, tendo em vista o constante desenvolvimento e pesquisa em tecnologias capazes de transformar recursos naturais em eletricidade. Dentre estas, citam-se as energias eólica, solar e de biomassa como as principais energias renováveis utilizadas (International Renewable Energy Agency, 2017). Entretanto, o oceano detém um grande potencial de geração, estimado em 32000 TW/ano (Campos, 2013), o qual ainda é pouco explorado, quando comparado a outras fontes energéticas.

Dentre as formas de energia existentes no oceano, destaca-se a energia das ondas, as quais são capazes de percorrer grandes distâncias sem perdas significativas, e que possuem a capacidade de geração contínua de eletricidade (Pecher e Kofoed, 2017). A Tabela 1 mostra uma comparação entre os potenciais de geração de energia das fontes de origem oceânica, ressaltando o elevado potencial das ondas.

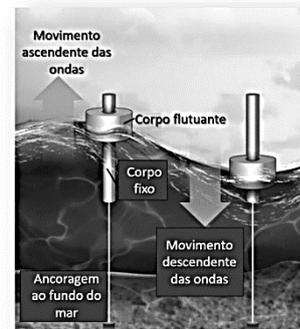
Tabela 1.- Potencial de geração das energias de origem oceânica.

TIPO DE ENERGIA	POTENCIAL (TWh/ano)
Marés	300
Correntes marinhas	800
Gradientes de salinidade	2000
Gradientes de temperatura	10000
Energia das ondas	8000 a 80000

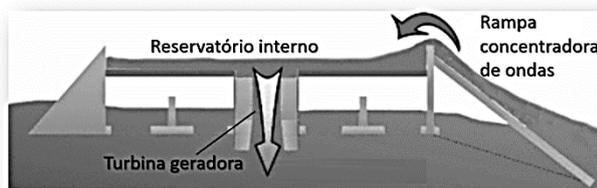
Os principais dispositivos responsáveis por converter a energia das ondas em eletricidade são os de coluna de água oscilante, de absorção pontual, de galgamento e os oscilantes por translação de ondas (Dhanak et al., 2016), que têm seus esquemas de funcionamento apresentados na Figura 1.



(a) Dispositivos de coluna de água oscilante



(c) Dispositivos de absorção pontual



(b) Dispositivos de galgamento



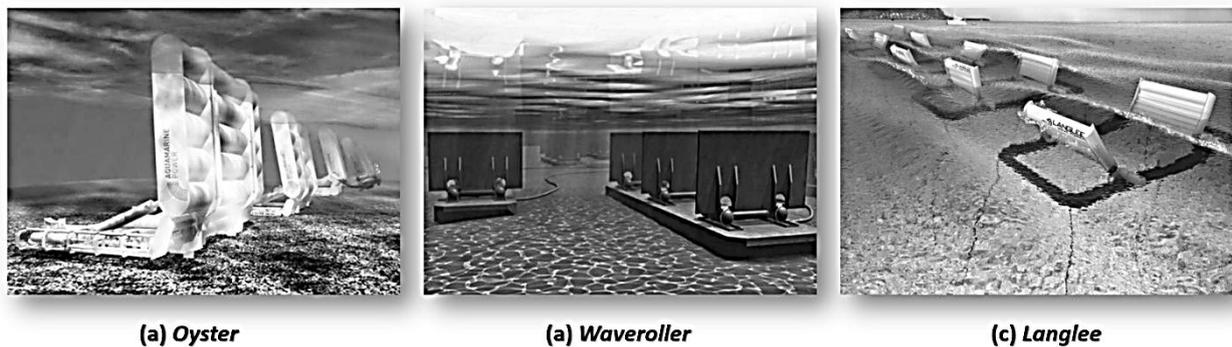
(d) Conversores oscilantes por translação de ondas

Figura 1.- Principais dispositivos conversores de energia das ondas e seus respectivos princípios de funcionamento.

Segundo Pecher e Kofoed (2017), o sistema que apresenta o maior fator de captura (37 %) é o de conversão por translação de ondas (OWSC - *Oscillating Wave Surge Converters*), seguido dos

sistemas de coluna de água oscilante (19 %), de galgamento (17 %) e de absorção pontual (16 %). Assim, os OWSC's têm sido o objeto de estudo de diversos pesquisadores e empresas internacionais, que buscam analisar e compreender o funcionamento destes conversores em função da geometria de suas placas e do clima de ondas da região onde os mesmos são instalados (Folley, 2016).

Os principais exemplos de conversores oscilantes por translação de ondas (Figura 2), que encontram-se em fase pré-comercial de desenvolvimento (Aw-Energy, 2018), são o *Oyster* (parcialmente submerso com extensão desde o fundo do oceano), o *Waveroller* (totalmente submerso) e o *Langlee* (parcialmente submerso, localizado em uma plataforma flutuante em alto mar). Estes dispositivos convertem a energia contida na componente horizontal das ondas por meio da oscilação para frente e para trás de sua placa, a qual é responsável por movimentar uma turbina interna que gera energia elétrica.



(a) *Oyster*

(b) *Waveroller*

(c) *Langlee*

Figura 2.- Principais exemplos de conversores oscilantes por translação de ondas.

Diversas variáveis como a altura e o período de onda, profundidade de instalação, geometria de placa e grau de submergência, são responsáveis por modificar a hidrodinâmica e a consequente geração de energia dos OWSC's (VARGAS, 2018). Uma forma útil de estudar o movimento destes conversores consiste na utilização de modelagem numérica computacional (CFD), que segundo Folley (2016), permite a análise das forças, dos coeficientes de amortecimento, das acelerações angulares, das amplitudes angulares atingidas, dos efeitos viscosos e dos campos de velocidade, necessários para a compreensão do funcionamento dos mesmos.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar numericamente como a dinâmica de um conversor do tipo oscilante por translação de ondas é modificada em função da sua posição de instalação, contribuindo, portando, com o dimensionamento e aplicação deste sistema de conversão em situações reais de funcionamento.

METODOLOGIA

O estudo é realizado por meio do código computacional *open source* OpenFOAM v. 4.1, fundamentado na metodologia de discretização em volumes finitos e programado na linguagem C++. Este código possui uma vasta biblioteca de funções e permite ao usuário adaptá-las às suas preferências e ao problema estudado, dispondo, inclusive, de esquemas numéricos com precisão de até quarta ordem.

O escoamento é governado pelas equações de Navier-Stokes e da Continuidade que, escritas em termos médios (Cheng et al., 2003), são dadas pelas expressões a seguir:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right), \quad [1]$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad [2]$$

onde $x(i, j)$ representa as coordenadas espaciais, t o tempo, $u(i, j)$ o vetor da velocidade, g_i a aceleração da gravidade, P a pressão total, ρ a massa específica do fluido e ν a viscosidade cinemática. A expressão $\overline{u_i' u_j'}$ representa o tensor de Reynolds, que necessita da aplicação da hipótese de Boussinesq e da aplicação de um modelo de turbulência para ser solucionado (modelagem da turbulência por médias de Reynolds – RANS). Um modelo de turbulência adequado a este estudo é o κ - ω SST, recomendado para a correta modelagem do escoamento tanto em regiões próximas às paredes quanto em zonas de corrente livre (Menter et al., 2003).

A superfície livre é tratada pelo método *Volume of Fluid* (VOF), no qual um valor igual a “1” é aplicado a uma célula totalmente preenchida por água e um valor igual a “0” a uma célula composta somente por ar. A interface ar-água é identificada com o valor igual a “0,5”, que é representado por uma compressão artificial, resultando em um termo a ser adicionado à equação de transporte e que só fica ativo na região da superfície livre (OpenFOAM Foundation 2016). A extensão OLAFOAM, desenvolvida por Higuera (2016), agrega ao código principal a hidrodinâmica, a geração e a absorção de ondas, permitindo a aplicação das principais teorias de ondas (Teoria Linear, de Stokes, de onda Solitária e de Cnoidal).

O movimento de corpo rígido realizado pela placa do OWSC pode ser tratado pela seguinte expressão (Renzi et al., 2012):

$$I_m \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C_a \frac{\partial \theta}{\partial t} + R\theta = M_t, \quad [3]$$

em que I_m representa o momento de inércia de massa do dispositivo, θ a amplitude angular atingida pela placa (medido em relação a posição inicial de placa a 90° com a horizontal), C_a o coeficiente de amortecimento aplicado ao OWSC, R o momento de restauração devido ao empuxo e M_t ao momento total aplicado à placa.

Metodologia de deformação de malha para tratamento da dinâmica de corpo rígido

Um dos métodos disponíveis pelo código OpenFOAM para o tratamento da dinâmica de corpo rígido é o de deformação da malha de cálculo. Este consiste na deformação dos elementos de malha a cada instante de tempo, preservando a topologia do corpo considerado, a fim de ajustar a grade à cada posição atingida pela placa do conversor (OpenFOAM Wiki, 2016).

Esta metodologia implica na aplicação do *solver dynamicMotionSolverFvMesh*, responsável por permitir a deformação da grade de cálculo. O *solver displacementSBRStress* controla a maneira como a deformação dos elementos é realizada, sendo este responsável pela aplicação da expressão [3], necessitando de informações adicionais sobre o objeto tratado.

Domínio de cálculo e dimensões do corpo estudado

O domínio de cálculo utilizado neste trabalho, possui 12 m de extensão, 4 m de altura e 0,8 m de largura (Figura 3). A placa retangular do OWSC possui 0,4 m de altura, 0,8 m de largura e 0,08 m de espessura, e é posicionada de tal forma que seu centro de gravidade esteja distante em 6 m do início do domínio, na direção horizontal.

Condições de simulação

As fronteiras do domínio são divididas em uma entrada, duas laterais, um topo, um fundo e uma saída (Figura 3). É aplicada a condição de não-deslizamento (*noSlip*) à superfície da placa e ao fundo do domínio. Na entrada, na saída e no topo do domínio são aplicadas, respectivamente, as condições de geração de ondas, camada esponja (no intuito de absorver as ondas) e saída livre. As condições iniciais de velocidade e pressão são ambas de campo inicial interno nulo e a posição inicial de movimento da placa do conversor é a vertical (perpendicular ao fundo).

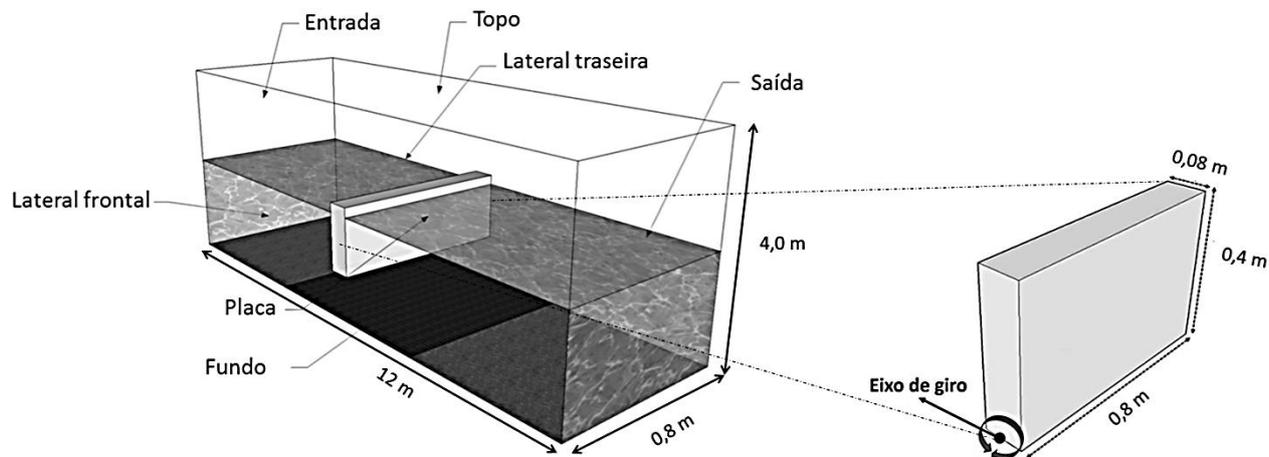


Figura 3.- Domínio e placa utilizados.

A Tabela 2 reúne as condições de contorno impostas, segundo suas nomenclaturas no código OpenFOAM.

Tabela 2.- Condições de contorno aplicadas às fronteiras do domínio segundo o código OpenFOAM.

Fronteira	Condição de Velocidade	Condição de Pressão
placa	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>
fundo a	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>
entrada	<i>waveVelocity</i>	<i>fixedFluxPressure</i>
saída	<i>waveAbsorbtion2DVelocity</i>	<i>zeroGradient</i>
topo	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>totalPressure</i>
laterais	<i>empty</i>	<i>empty</i>

Como os elementos de malha se deformam com o tempo, em função da oscilação da placa, foi utilizado um passo de tempo (Δt) variável (sendo o inicial igual a 0,01 s), a fim de garantir a convergência e a estabilidade das simulações. Os elementos de malha são quadrados de lado igual a 0,04 m nas direções vertical e horizontal, estes são alterados a cada instante de tempo para preservar a geometria do corpo em movimento.

RESULTADOS

As simulações foram realizadas considerando a ação de uma onda regular incidente de 0,12 m de altura e 2,4 s de período, assim como uma lâmina de água de 0,56 m, mantida constante para todos os casos de estudo. A massa específica e o momento de inércia adotados são, respectivamente, 620,3 kg/m³ e 0,86 kg.m².

Para a realização do estudo foram consideradas oito aberturas inferiores a , que correspondem à posição de instalação do OWSC. Cada abertura está relacionada a um grau de submergência G_{sub} (definido como a relação entre a altura submersa h_{sub} e a altura de placa h_p). Um esquema mostrando estas cinco posições é apresentado na Figura 4.

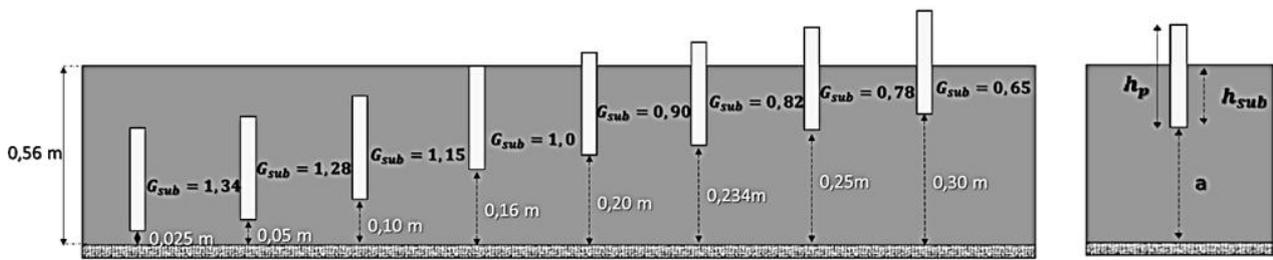


Figura 4.- Posições de instalação testadas no presente trabalho.

É aplicado a estas análises um modelo numérico bidimensional, o mesmo foi testado e validado no trabalho de Vargas (2018), permitindo o estudo de variáveis influentes no movimento do OWSC, como a amplitude angular atingida pela placa, a velocidade angular (ω) e as forças horizontais (F_x) envolvidas.

Uma verificação dos campos de velocidade, considerando as aberturas extremas de 0,025 m e 0,30 m, é mostrada na Figura 5. Nela é possível identificar que, à medida que o grau de submersão aumenta (abertura inferior diminui), maior é a magnitude de velocidades na extremidade superior da placa. Isto representa uma menor influência das velocidades nas partes inferiores da mesma, diminuindo sua amplitude de movimento, e o consequente desempenho hidrodinâmico do conversor (relacionado às maiores velocidades e amplitudes angulares atingidas pelo corpo).

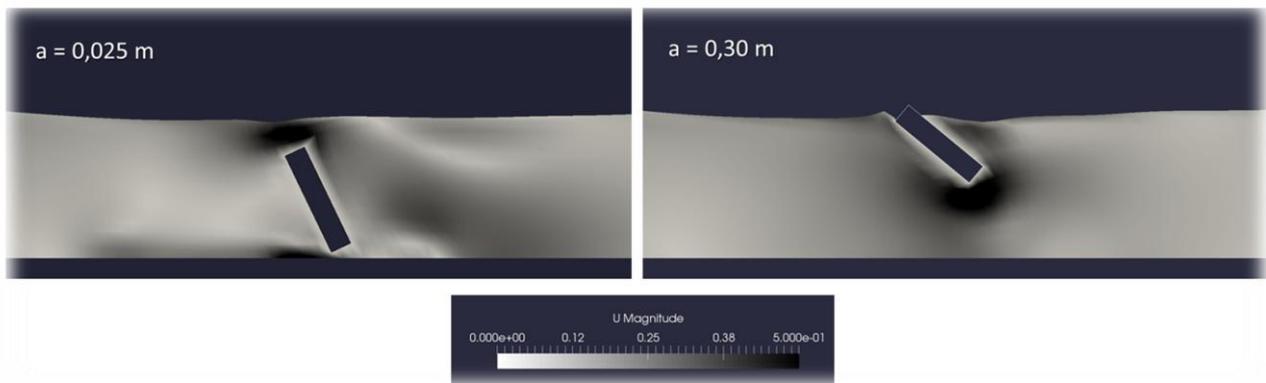


Figura 5.- Comparação entre os campos de velocidades para as posições de instalação de 0,025 m e 0,30m.

Por meio da análise das séries temporais da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal atuante (Figura 6), considerando o caso de aberturas extremas de 0,025 m e 0,30 m, identifica-se que quanto mais submerso estiver o OWSC, menor serão as magnitudes destas variáveis. Este comportamento está de acordo com o fenômeno observado nos campos de velocidade para a mesma situação (Figura 5).

São propostas as seguintes adimensionalizações para as principais variáveis analisadas, obtidas pelo teorema de Pi de Buckingham:

$$a_a = \frac{a^2}{HLG_{sub}}, \quad [4]$$

$$\omega_a = \frac{\omega}{\left(\frac{C}{H}\right)}, \quad [5]$$

$$F_{x_a} = \frac{F_x}{\rho H^2 C^2}, \quad [6]$$

em que a_a , H , L , C , ω_a e F_{x_a} representam, respectivamente, a abertura adimensional, a altura de onda, o comprimento de onda, a celeridade da onda, a velocidade angular adimensional e a força horizontal adimensional.

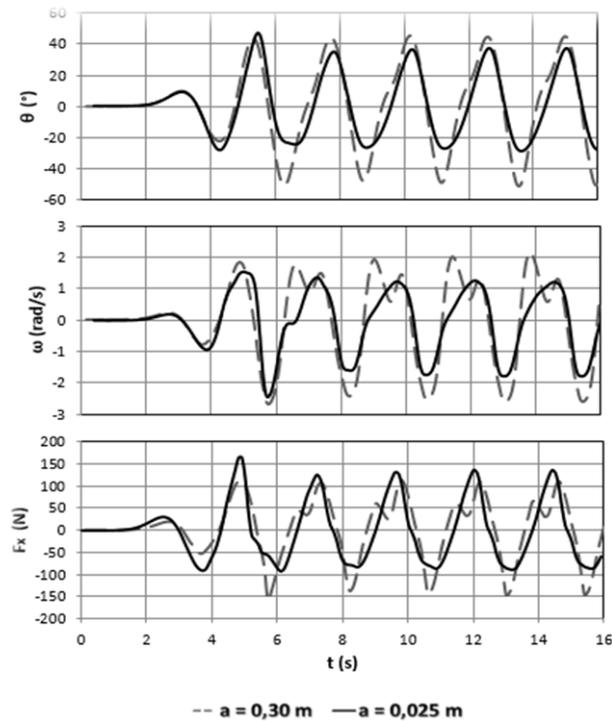


Figura 6.- Comparação entre as séries temporais de amplitude angular, velocidade angular e forças horizontais, considerando as aberturas extremas de 0,025 m e 0,30 m.

Nos gráficos da Figura 7 são plotados os valores RMS adimensionalizados da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, em função da abertura adimensional.

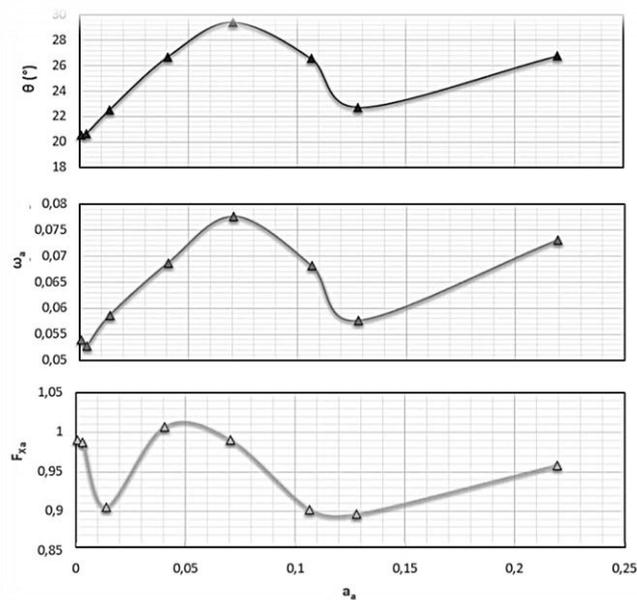


Figura 7.- Valores RMS adimensionalizados da amplitude angular, velocidade angular e força horizontal, em função da abertura adimensional.

Nestas curvas, pode ser observado um ponto de maximização destas variáveis, que ocorre entre as aberturas de 0,05 e 0,1, o qual se pronuncia um pouco mais à esquerda no caso das forças horizontais (conforme a curva inferior da Figura 7). Um aumento destas forças ocasiona um crescimento na amplitude angular atingida pela placa e, conseqüentemente, um aumento na velocidade angular da mesma. Sendo assim, pode-se dizer que estas duas variáveis são conseqüências diretas das forças atuantes, e a abertura correspondente à maximização de suas magnitudes representa a posição de instalação de maior eficiência de um OWSC. Uma abertura com valor próximo a 0,125 m corresponde a uma diminuição nas magnitudes das amplitudes angulares e velocidades angulares, relacionando-se a um decréscimo na eficiência do conversor.

Com base nestes resultados, conclui-se que a abertura adimensional de valor 0,071 corresponde ao ponto de máxima eficiência do conversor, valor este valor que está associado a um grau de submergência de 0,9. Desta maneira, assume-se que os valores de amplitude angular e velocidade angular adimensionais, correspondentes a este ponto, tenham eficiência máxima de 100 %, possibilitando criar uma curva intermediária, em função das aberturas adimensionais, com base nas eficiências obtidas para estas variáveis (Figura 8).

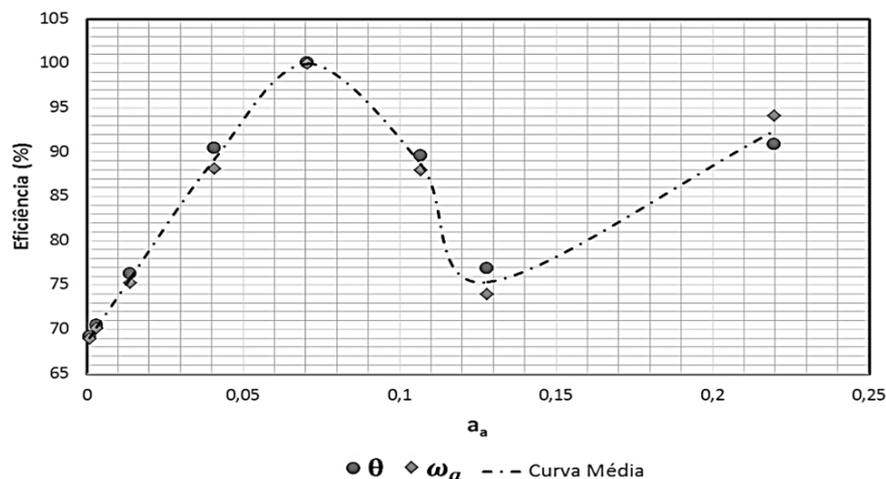


Figura 8.- Curva de eficiência média obtida com base na eficiência calculada para a amplitude angular e para a velocidade angular.

Esta curva resultante possui um formato muito similar às curvas apresentadas na Figura 7, mostrando que a eficiência cresce entre os valores de abertura de 0 e 0,071 e decresce entre os valores 0,071 e 0,13. As aberturas superiores a 0,13 correspondem a graus de submergência inferiores a 0,7, que representam os casos onde a placa do conversor está 70 % submersa ou menos. Graus de submergência próximos a zero indicam que a placa encontra-se totalmente externa à superfície da água, sendo impossível o funcionamento do dispositivo. Assim, deverá existir um grau de submergência limite, a partir do qual o OWSC não funcionará corretamente. Porém ao limitar-se o funcionamento do dispositivo para graus de submergência maiores do que 0,7 (o que corresponde a parte côncava para baixo da curva da Figura 8), garante-se uma eficiência média entre 100 % e 70 %.

Assume-se o intervalo limitado pelas aberturas adimensionais de 0 e 0,13 como a faixa ideal de funcionamento de um conversor oscilante por translação de ondas. Este intervalo corresponde, em termos de grau de submergência, à faixa aproximada de $0,8 \leq G_{sub} \leq 1,4$ (Figura 9).

Torna-se evidente que a maior eficiência de um OWSC ocorre quando seu grau de submergência encontra-se próximo a 0,9 (que corresponde a um valor de a_a igual a 0,071). Isto possibilita a estimativa de uma abertura ideal a_i de operação de um OWSC por meio da expressão [4], que pode ser reescrita em função dos valores de a_a e G_{sub} relacionados ao ponto de máxima eficiência:

$$a_i = 0,2518\sqrt{HL}. \quad [7]$$

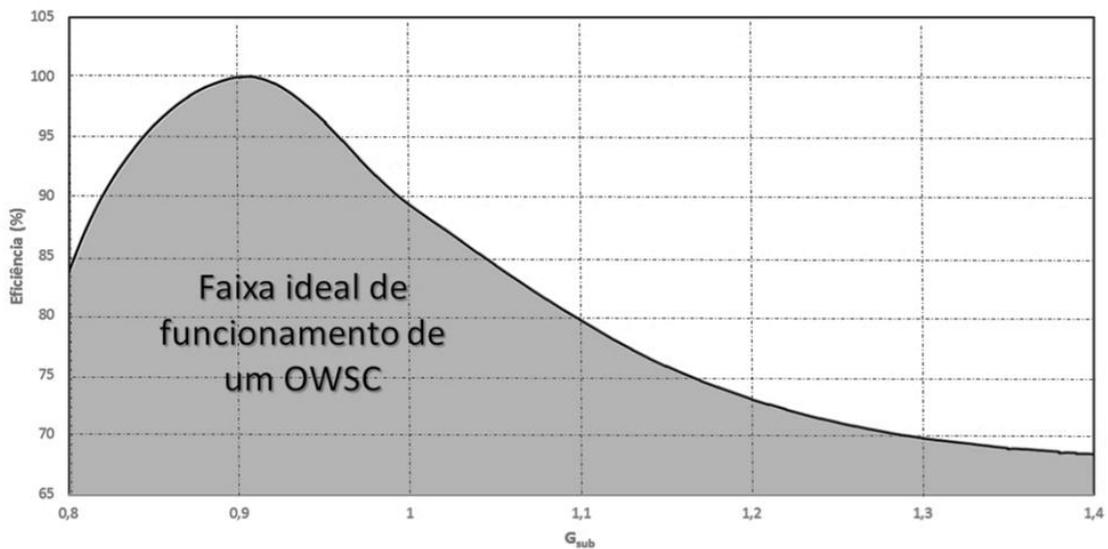


Figura 9.- Eficiência de um OWSC em função do grau de submergência de sua placa.

Por meio do esquema mostrado na Figura 4, nota-se que a altura submersa pode ser reescrita como a diferença entre a lâmina de água h e a abertura a . Desta forma, em conjunto com a definição de grau de submergência, é possível definir uma altura de placa ideal (h_{pi}) a partir da expressão [7], que é dada por:

$$h_{pi} = \frac{h-a_i}{0,9}. \quad [8]$$

De uma forma geral, as expressões [5] e [6] podem ser utilizadas para uma estimativa da altura que a placa de um OWSC deve possuir para funcionar com alta eficiência, com base nos valores conhecidos de profundidade, de altura de onda e comprimento de onda.

CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou a modelagem numérica para verificar a influência da posição de instalação de um conversor oscilante por translação de ondas sobre a hidrodinâmica e eficiência do mesmo. As simulações foram realizadas no código computacional OpenFOAM v. 4.1, em conjunto com a extensão OLAFOAM, segundo um modelo bidimensional previamente validado.

Os resultados demonstraram que a abertura abaixo do eixo de giro da placa do conversor (em relação ao fundo do oceano) desempenha um importante fator sobre seu movimento, afetando sua amplitude angular e velocidade angular, e, conseqüentemente, sua eficiência na geração de energia. A variação desta abertura provoca uma mudança no grau de submergência da placa, sendo que, quanto maior for a abertura, menor será o grau de submergência. Estima-se que a eficiência máxima é obtida quando a placa encontra-se 90 % submersa, o que possibilita o cálculo aproximado de uma altura ótima de placa, em função da altura de onda, do comprimento de onda e da lâmina de água.

A análise dos dados permitiu concluir que um dispositivo deste tipo possui eficiência entre 65% e 100%, quando o mesmo opera com graus de submergência entre 0,8 e 1,4, sendo este intervalo o recomendado para seu dimensionamento.

REFERÊNCIAS

- AW-Energy.** (2018). “Waveroller”. Disponível em: <http://aw-energy.com/waveroller/> Acesso em: 15 mar. 2018.
- Campos, G. A. P.** (2013). “Estudo de mecanismo aplicado na geração de energia a partir de correntes oceânicas”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cheng, Y.; Lien, F. S.; Yee, E.; Sinclair, R.** (2003). “A comparison of large Eddy simulations with a standard $k-\epsilon$ Reynolds-averaged Navier–Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, Aug 2003, pp. 1301-1328.
- Dhanak, M. R.; Xiros, N.I.; Darwish, M.** (2016). *Springer handbook of Ocean Engineering*. Springer, USA.
- FOLLEY, M.** (2016). *Numerical Modelling of Wave Energy Converters: State-of-the-Art Techniques for Single Devices and Arrays*. Academic Press.
- Higuera, P.** (2016). *OLAFOAM Reference Manual*, Spain, Cantabria.
- International Renewable Energy Agency** (2017). “Renewable Energy Statistics 2017”. Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Menter, F. R.; Kuntz, M.; Langtry, R.** (2003). “Ten years of industrial experience with the SST turbulence model”. *Proceedings of the IV International Symposium On Turbulence, Heat and Mass Transfer*. New York, USA.
- OpenFOAM Foundation.** (2016). *OpenFOAM User Guide v. 4.0*.
- OpenFOAM Wiki.** (2016). “Parameter Definitions – dynamicMotionSolverFvMesh”. Disponível em: http://openfoamwiki.net/index.php/Parameter_Definitions_-_dynamicMotionSolverFvMesh. Acesso em: 08 fev. 2018.
- Pecher, A.; Kofoed, J. P.** (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Springer, USA.
- Renzi, E.; Abdolali, A.; Belloti, G.; Dias, F.** (2012). “Mathematical modelling of the oscillating wave surge converter”. *Proceedings of the XXXIII Conference of Hydraulics and Hydraulic Engineering*. Brescia, Italy.
- Vargas, G. F.** (2018). “Modelagem numérica da hidrodinâmica e geração de energia dos dispositivos oscilantes por translação de ondas”. Dissertação de mestrado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (UFRGS) Porto Alegre, Brasil.