

Avaliação de um sistema de tomada de força hidráulico para conversão de energia ondomotriz **Evaluation of a hydraulic power take-off system for wave energy conversion**

Gelson Luiz Carneiro^{1*}, Renato de Arruda Penteado Neto¹

RESUMO

Diante das diversas fontes de energias renováveis disponíveis na natureza, a conversão de energia ondomotriz (WEC – *Wave Energy Converter*) tem se destacado, visto o potencial no mundo e as tecnologias atuais que permitem que os custos de implantação, operação e manutenção sejam reduzidos. Dentro destas tecnologias, a utilização de sistemas de tomada de força (PTO – *Power Take-Off*) hidráulicos apresenta bons resultados para os diversos tipos de localização dos parques de geração, sejam os mais afastados ou mais próximos da costa. Para o projeto destes sistemas de WEC, diversos modelos computacionais podem ser utilizados. Através da utilização do software MATLAB e sua ferramenta de simulação Simulink, elaborou-se um modelo de simulação para um PTO hidráulico, que permite diversas parametrizações para simulação funcional. Sua validação foi realizada através de um modelo reduzido ensaiado em um tanque de ondas, nas instalações do Lactec. Através das simulações e testes do circuito hidráulico no tanque de ondas, os resultados obtidos indicam a possibilidade de conversão de até 18,06 W de potência pelo PTO para uma onda com potência média disponível de 40,32 W/m.

Palavras-chave: Energia renovável; Conversão de energia ondomotriz; Tomada de força hidráulica.

ABSTRACT

Faced with the various sources of renewable energy available in nature, wave energy conversion (WEC - *Wave Energy Converter*) has stood out, given the potential in the world and current technologies that allow deployment, operation and maintenance costs to be reduced. Within these technologies, the use of hydraulic power take-off systems (PTO - *Power Take-Off*) presents good results for the different types of the generation parks location, whether the furthest or closest to the coast. For the design of these WEC systems, several computational models can be used. Using the MATLAB software and its Simulink simulation tool, a simulation model was developed for a hydraulic PTO, which allows several parameterizations for functional simulation. Its validation was carried out through a reduced model tested in a wave tank, at Lactec's facilities. Through simulations and tests of the hydraulic circuit in the wave tank, the results obtained indicate the possibility of converting up to 18.06 W of power by the PTO to a wave with an average available power of 40.32 W/m.

Keywords: Renewable energy; Wave energy converter; Hydraulic power take-off.

¹ Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec)

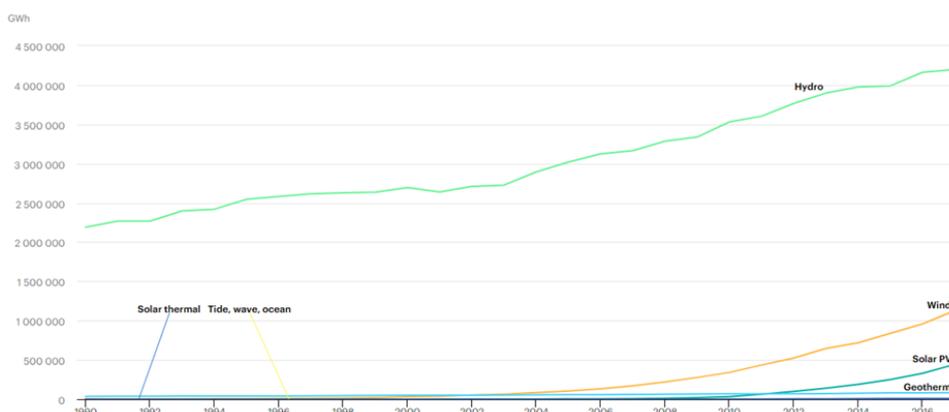
*E-mail: carneiro.gelson@gmail.com

INTRODUÇÃO

No mundo todo, assim como no Brasil, são muitos os desafios para a implementação de sistemas e políticas que assegurem o desenvolvimento sustentável, em especial os que tratam de fontes alternativas para a geração de energia elétrica. Anualmente, novos impactos ambientais, sociais e econômicos se apresentam quanto à utilização de sistemas de energias renováveis em comparação aos sistemas de energia convencionais. Isto proporciona novos desafios de pesquisas e avanços tecnológicos voltados à utilização de energias renováveis como uma alternativa segura e viável para a geração de energia elétrica.

Segundo informações da IEA (2020), a matriz energética mundial é extremamente dependente da geração de energia elétrica a partir de fontes convencionais. Conforme é apresentado na Figura 1, pode-se verificar a composição da matriz energética mundial em relação à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Figura 1 - Geração de energia a partir de fontes renováveis



Fonte: IEA (2020).

Uma destas fontes renováveis é a energia elétrica obtida a partir da energia marinha. Neste meio, são diversas as possíveis fontes de energia. Uma delas é a energia das marés, proveniente da interação dos campos gravitacionais da Lua e do Sol. Outra é a energia térmica dos oceanos, proveniente da radiação solar incidente. Existe também a energia das correntes marítimas, proveniente dos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés. Por fim, a energia das ondas, proveniente do efeito do vento na superfície dos oceanos.

Os valores de geração de energia a partir da energia marinha (maré, ondas e outras formas de geração) frente à disponibilidade do potencial das fontes renováveis ainda é muito pequeno, abaixo de 1%, equivalente a 1.044 GWh (dados coletados até 2017). Um estudo apresentado por Gunn; Stock-Williams (2012), indica que o recurso global de energia das ondas é de aproximadamente $2,11 \pm 0,05$ TW. Deste total, a América do Sul dispõe de aproximadamente 374 ± 16 GW. No Brasil, conforme estudo apresentado por Fleming (2012), o potencial teórico para o litoral brasileiro pode variar de 91 a 165 GW.

Segundo Calejo (2012) e Assis (2010), os sistemas de WEC podem ser classificados quanto à sua distância à costa: dispositivos costeiros (*shoreline* ou *onshore*); dispositivos próximos da costa (*nearshore*); dispositivos afastados da costa (*offshore*).

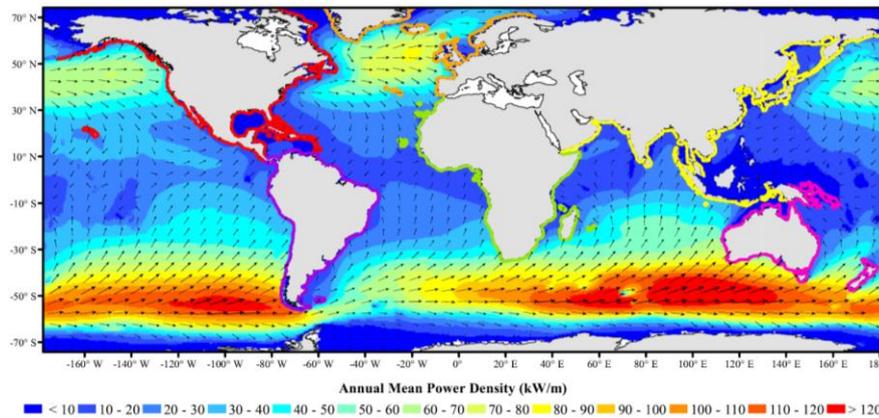
Existem muitos projetos em andamento para aproveitar a energia das ondas. Uma maneira de classificá-los, é pelo método usado para capturar a energia das ondas. Revisões técnicas sobre estes modelos são apresentadas por Hong et al. (2014) e Maria-Arenas et al. (2019). Para Khaligh; Onar (2010), a energia das ondas é uma fonte de energia renovável promissora para o futuro. Os dispositivos *nearshore*, WEC instalados próximos a costa até uma profundidade de aproximadamente 50 m, devem crescer em número de aplicações em todo o mundo.

O objetivo do trabalho realizado foi o desenvolvimento de um modelo computacional multiparâmetros visando a avaliação do comportamento hidráulico para conversão de energia ondomotriz em dispositivos flutuantes multicorpos. Os movimentos dos corpos oscilantes de um WEC são fortemente afetados pela variação de pressão. As interações entre os corpos acionados por ondas e os módulos de PTO, têm efeitos significativos na eficiência de conversão de energia do WEC. Por este motivo, fez-se a investigação do comportamento de um circuito hidráulico para melhoria da eficiência de um sistema WEC.

POTENCIAL DE GERAÇÃO NO MUNDO E NO BRASIL

A Figura 2, conforme estudo apresentado por Gunn; Stock-Williams (2012), apresenta a distribuição global da densidade média anual de energia. As setas no gráfico representam a melhor direção média, isto é, a direção das médias dos vetores de densidade de potência.

Figura 2 - Densidade média anual de potência das ondas (cor) e melhor direção média anual (→)

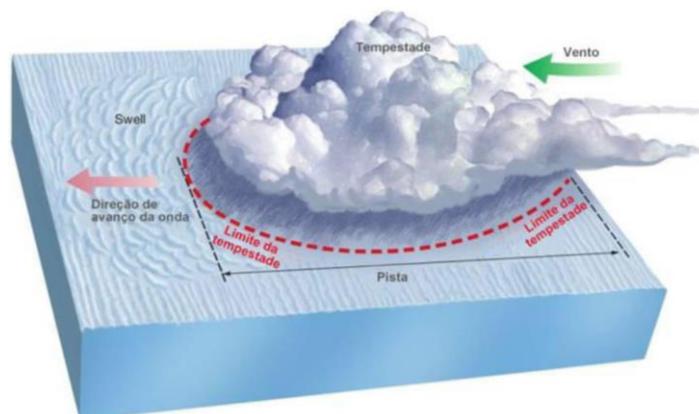


Fonte: Gunn; Stock-Williams (2012).

Nos oceanos as ondas superficiais são geradas pela interação dos ventos com a superfície. Ao soprarem paralelos à superfície, os ventos transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia acaba por gerar as ondas. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar vai depender: (i) da intensidade do vento, (ii) do tempo de atuação deste vento e (iii) da área sobre a qual está atuando, a chamada pista, como mostra a Figura 3. Sendo assim, quanto maior a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante.

Segundo Omar (2018), podemos distinguir dois tipos de ondas oceânicas causadas por ventos: as vagas e os *swells*. As ondas vagas são o resultado de vento local, que dissipam rapidamente a sua energia e altura devido à tensão de superfície da água pela qual se deslocam. Entretanto, nas ondas do tipo *swell*, a energia obtida é suficiente para que a onda atravesse várias centenas ou milhares de quilómetros, até atingir a costa.

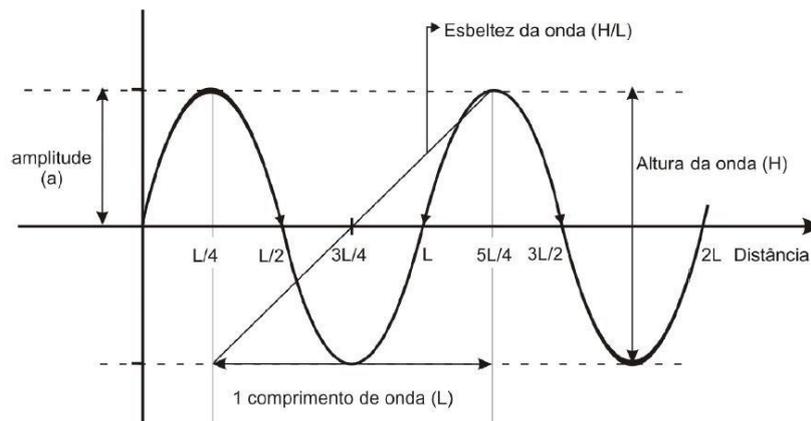
Figura 3 - Condições necessárias para a formação de ondas do tipo *swell*



Fonte: Fleming (2012).

Como pode ser observado na Figura 4, segundo Fleming (2012), as principais características de uma onda são o comprimento de onda (L), que é a distância horizontal entre duas cristas, a altura (H), que é a distância vertical entre a crista e o vale, e o período, que é o tempo de passagem de duas cristas. Outra característica importante é a esbeltez, que é a relação entre a altura e o comprimento de onda (tangente do ângulo formado por estas variáveis).

Figura 4 - Definições básicas das características de uma onda



Fonte: Fleming (2012).

De maneira simplificada, pode-se determinar o fluxo de energia, considerando a energia total da onda, ou seja, a soma da energia cinética e energia potencial da mesma, por unidade de área. Assim:

$$P = \frac{H^2 \cdot T}{2} \quad \text{Equação 1}$$

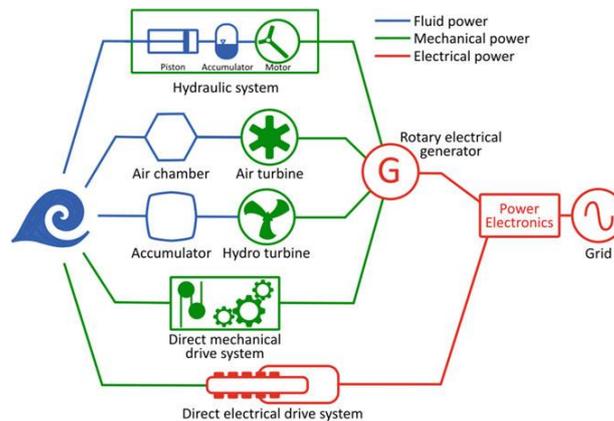
onde H é a altura da onda, em [m], T é o período da onda, em [s]. A potência média em um metro de frente de onda é representada por P , dada em [kW/m].

PTO BASEADO EM SISTEMA HIDRÁULICO MULTICORPOS

Conforme apresentado por Pecher et al. (2017), existem diversos tipos de PTO aplicáveis à WEC. Uma comparação sistemática dos diferentes tipos de PTO é uma tarefa difícil de se realizar, pois possuem características diferentes de operação e aplicação. A Figura 5 apresenta um diagrama destes diferentes caminhos para um WEC.

Quando o mecanismo de captura de energia é baseado no movimento de um corpo em resposta à interação com as ondas, como é o caso de alguns absorvedores de pontos e atenuadores, as máquinas elétricas rotativas convencionais não são diretamente compatíveis. O conversor hidráulico é frequentemente a solução escolhida para fazer a interface do conversor de energia das ondas com o gerador elétrico, uma vez que eles são adequados para absorver energia ao lidar com grandes forças em baixas frequências. Nesse caso em particular, o caminho da energia geralmente é revertido em relação ao sistema hidráulico tradicional. O movimento do corpo está alimentando energia em um motor hidráulico, que por sua vez traduz a energia em um gerador elétrico.

Figura 5 – Diagrama com diferentes caminhos de WEC em eletricidade



Fonte: Pecher et al. (2017).

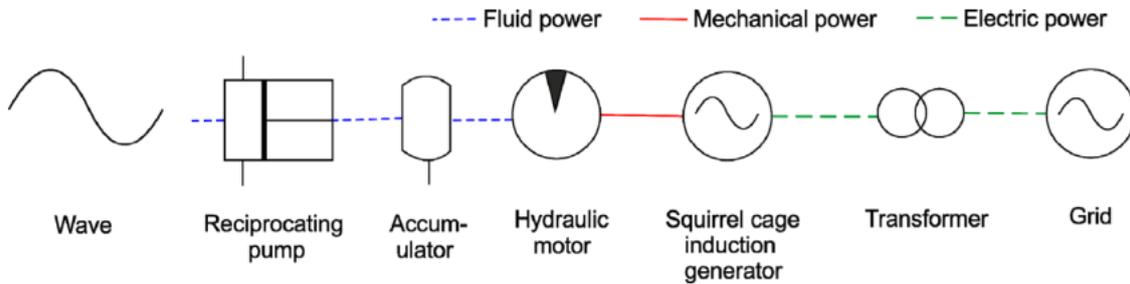
Para Hong et al. (2014), os sistemas hidráulicos são sistemas eficientes de conversão de energia que consistem em duas etapas: (i) a primeira etapa é que a energia mecânica das ondas é absorvida por um corpo flutuante e convertida em energia hidráulica através de uma unidade de compressão, que funciona de forma síncrona com o movimento do corpo flutuante e (ii) na segunda etapa, o gerador ou motor produz energia elétrica em relação à diferença de pressão resultante da unidade de compressão. Um sistema hidráulico básico é apresentado na Figura 6.

Para Maria-Arenas et al. (2019), o cálculo ótimo para determinação da potência através de um PTO, envolve a função de desempenho na forma:

$$P = \int_0^T v(t) f_{PTO}(t) dt \quad \text{Equação 2}$$

onde $v(t)$ é a velocidade do dispositivo e $f_{PTO}(t)$ é a força exercida pelo PTO e P representa a potência incidente ou, mais precisamente, a energia transportada por unidade de tempo, dada em $[W = J/s]$.

Figura 6 – Tecnologia usada em um WEC com PTO hidráulico

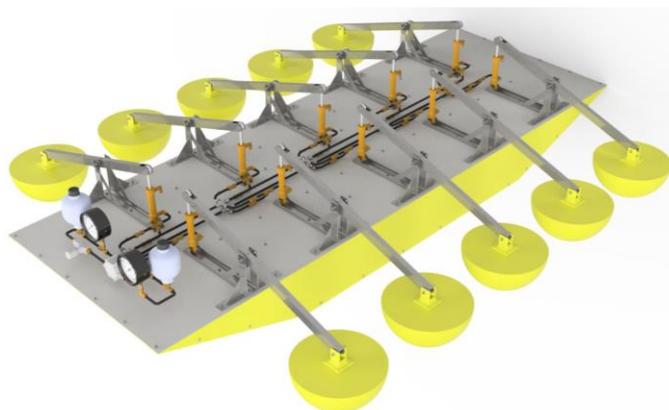


Fonte: Hong et al. (2014).

MATERIAIS

O modelo do sistema de geração de energia ondomotriz aqui considerado é baseado num modelo reduzido de uma embarcação para aplicações do tipo *nearshore*, cujo sistema de ancoragem é do tipo amarração ao fundo do mar. O modelo elaborado é composto por dez conjuntos flutuantes dispostos fisicamente de forma a manter equilibrada toda embarcação, como é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Modelo reduzido do sistema de WEC

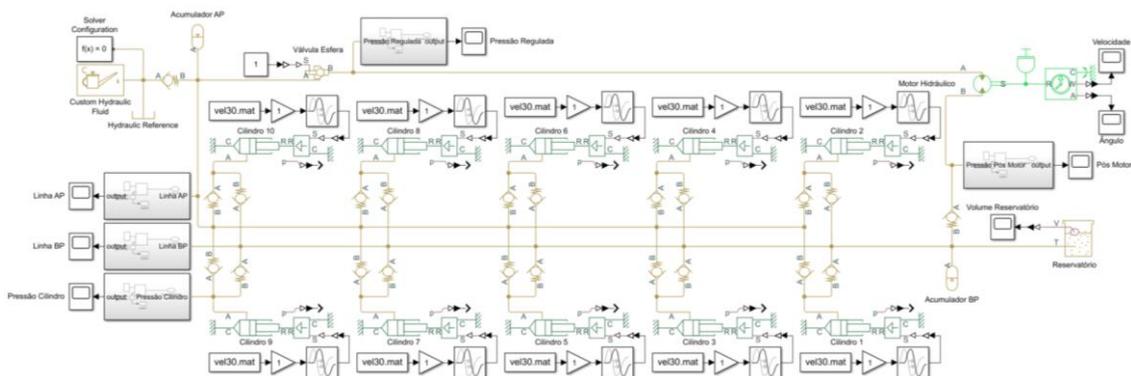


Fonte: Paludo (2021).

Os dispositivos flutuantes são conectados através de cilindros hidráulicos à um circuito hidráulico, e sua movimentação provoca a elevação de pressão deste circuito.

Para manter a pressão, armazenar e recuperar energia, bem como reduzir picos de pressão, são utilizados acumuladores hidráulicos. A saída do acumulador hidráulico é conectada num motor hidráulico que, por fim, tem seu eixo acoplado à um gerador de energia elétrica. Para controle de vazão e pressão sobre o circuito hidráulico, uma válvula de controle de fluxo é utilizada. Para adequar o sentido de fluxo durante a movimentação dos cilindros hidráulicos, além da manutenção de fluido nas tubulações e câmaras destes cilindros, válvulas de retenção são utilizadas. A conversão de energia de cada conjunto flutuante se dá durante o movimento de subida que, no cilindro hidráulico, provoca o movimento de recuo de sua haste mecânica. A Figura 8 apresenta o circuito hidráulico elaborado para avaliação da conversão de energia por este sistema PTO. Este circuito hidráulico foi elaborado no software MATLAB e sua ferramenta de simulação Simulink, com suas bibliotecas Simscape e Simscape Fluids, que permitem a utilização de modelos de cilindros, válvulas, tubulações e demais componentes de um circuito hidráulico.

Figura 8 – Modelo de simulação considerado



Fonte: O autor (2021).

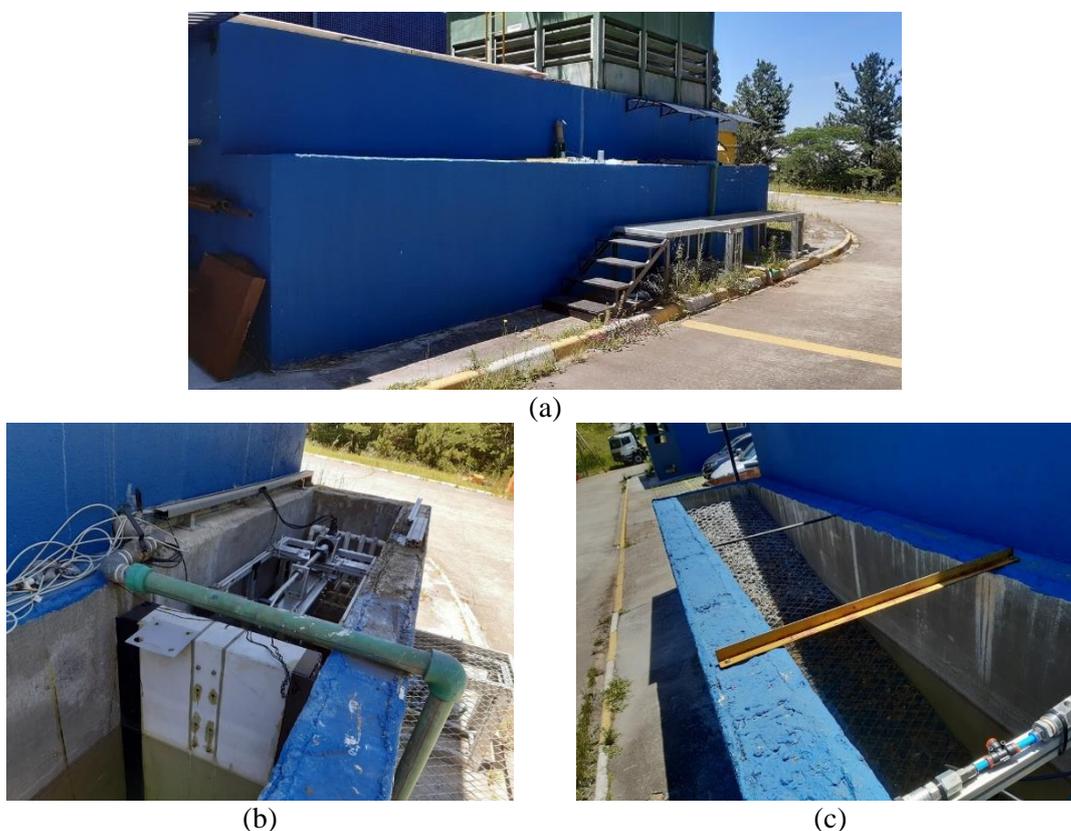
O modelo apresentado na Figura 8 permite variações de parâmetros para a maioria dos componentes hidráulicos do sistema considerado, tais como: formato de onda, atraso de tempo para cada cilindro, variações de ganho de amplitude da onda, variação da abertura da válvula de fluxo para acionamento do motor hidráulico, variação do tipo de fluido hidráulico utilizado no circuito, variação do dimensionamento da tubulação e parâmetros de perda de carga em uniões do tipo T e demais componentes, tamanho e pré-carga do acumulador hidráulico, dimensões e capacidade dos cilindros, entre outros.

Para o desenvolvimento dos testes de validação do modelo de simulação considerado, fez-se a utilização de um tanque de ondas. Um tanque de ondas é comumente utilizado para que se possa avaliar o comportamento de corpos flutuantes quando

submetidos à ação das ondas. O tanque de ondas disponível nas instalações atuais do Lactec, possui um servomecanismo capaz de movimentar uma pá telescopicamente, ou seja, com um batedor do tipo pistão, que proporciona as características de tanques costeiros.

A Figura 9 apresenta o tanque de ondas para realização dos testes do sistema de PTO considerado. Este tanque de ondas permite a avaliação do sistema de geração de ondas (controle e mecanismo), comportamento da reflexão e absorção de ondas na região da praia, avaliação dos dispositivos flutuantes (formas e dimensões), avaliação do sistema de ancoragem e amarração do modelo considerado (Figura 7).

Figura 9 – Tanque de ondas costeiros do Lactec: (a) visão geral, (b) região do batedor, (c) região da praia



Fonte: O autor (2021).

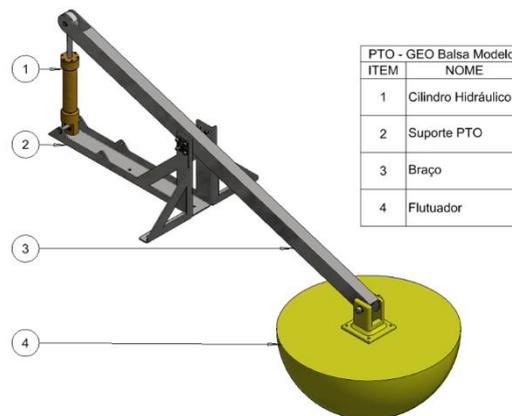
MÉTODO

O primeiro passo para avaliação do comportamento hidráulico para WEC em dispositivos flutuantes multicorpos é a validação do modelo computacional elaborado com os testes realizados no tanque de ondas. Em função de suas dimensões, o tanque de

ondas permite a realização de testes de apenas um dispositivo flutuante, contudo, o comportamento apresentado pode ser replicado para o restante do circuito hidráulico. Em função das variações de tipos de ondas, avaliam-se as pressões do fluido hidráulico produzidas durante a oscilação do corpo flutuante.

Para o procedimento de validação, foi considerado a montagem de um dos braços do sistema multicorpos do modelo reduzido da embarcação apresentada na Figura 7. A Figura 10 apresenta este conjunto do PTO e seus principais componentes.

Figura 10 – Elementos do PTO para teste



Fonte: Paludo (2021).

Com relação ao sistema de geração de onda, foram considerados os seguintes parâmetros:

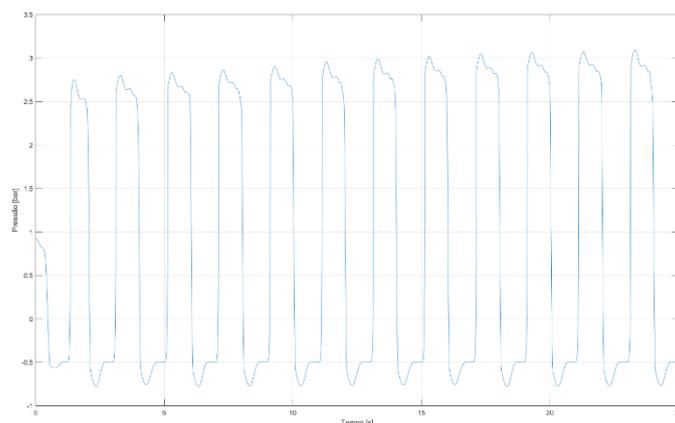
- 2 s de período;
- 240 mm de altura de onda;
- 3,4 m de comprimento de onda;
- 0,7 m de frente de onda (largura do tanque de ondas).

Com estas características de formato de onda e utilizando a Equação 1, o tanque de ondas proporciona uma potência média de onda de $P = 40,32 \text{ W/m}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 11 apresenta a pressão gerada no cilindro hidráulico durante o período de simulação, onde o valor máximo alcançado é de 3,095 bar. A elevação da pressão ocorre durante o ciclo de recuo da haste.

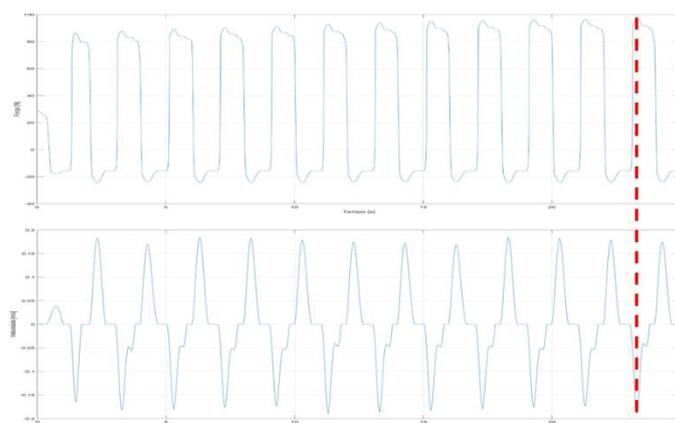
Figura 11 – Pressão gerada no cilindro hidráulico durante a simulação



Fonte: O autor (2021).

A Figura 12 apresenta, no gráfico superior, a força no cilindro hidráulico durante o período de simulação. A força máxima é de 97,1 N. Ainda na Figura 12, no gráfico inferior, é apresentado a velocidade de movimentação do cilindro hidráulico durante o período de simulação, nos cursos de avanço e recuo. A velocidade máxima é de 0,186 m/s (valor absoluto).

Figura 12 – Força e velocidade gerada no cilindro hidráulico durante a simulação



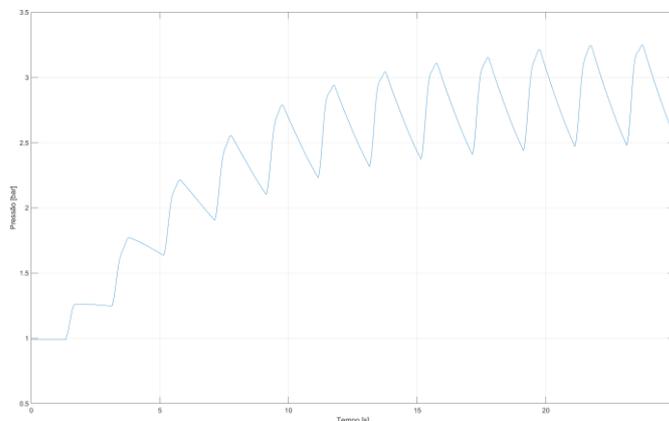
Fonte: O autor (2021).

Com base nos valores máximos de força e velocidade obtidos e utilizando a Equação 2, é possível determinar que o cilindro hidráulico considerado (Figura 10), que é o PTO deste sistema, proporciona uma potência máxima instantânea (linha vermelha tracejada da Figura 12) de $P = 18,06 W$.

A Figura 13 apresenta a pressão no acumulador hidráulico durante o período de simulação. É interessante observar o comportamento deste componente, atuando como um equalizador de pressão para a linha de alta pressão que, posteriormente, deverá ser

conectada à um motor hidráulico e, então, acoplado à um gerador elétrico, de forma a converter a energia mecânica obtida por este sistema para a energia elétrica desejada.

Figura 13 – Pressão gerada no acumulador hidráulico durante a simulação



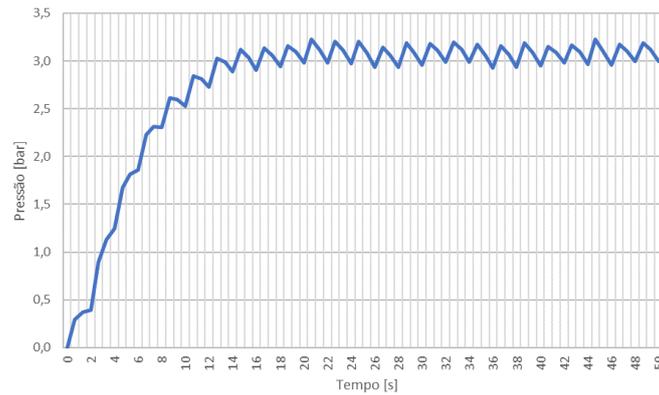
Fonte: O autor (2021).

Para o formato de onda considerado, o valor máximo alcançado é de 3,248 bar. O comportamento cíclico de elevação e decaimento se dá pelo fato de existir um circuito hidráulico fechado, ou seja, durante o período em que o cilindro avança, não é gerado pressão, porém, as partes internas do mesmo são preenchidas pelo fluido hidráulico utilizado em todo o sistema. Neste caso, quanto maior o número de cilindros trabalhando em conjunto e em momentos diferenciados de onda, há uma tendência de estabilização de pressão nesta linha de alta pressão.

A Figura 14 apresenta a pressão no acumulador hidráulico durante os testes de validação no tanque de ondas. O valor médio máximo da pressão no acumulador é de 3,225 bar. A diferença entre os resultados de simulação e validação indicam uma variação de 0,7%. Essa diferença pode ser motivada por perda de cargas dos componentes hidráulicos utilizados na montagem física, bem como desgastes prematuros dos componentes de vedação do próprio cilindro hidráulico.

A pressão no acumulador é um ponto bastante importante neste tipo de PTO, pois será responsável por armazenar e reduzir às oscilações de pressão no circuito hidráulico de alta pressão, que permitirá que o motor hidráulico opere em condições próximas às nominais. Desta forma, quando conectado à um gerador de energia elétrica, tais flutuações não provocarão oscilações de rotação e torque, de maneira que a energia elétrica final esteja dentro de níveis adequados à rede elétrica em que será conectada.

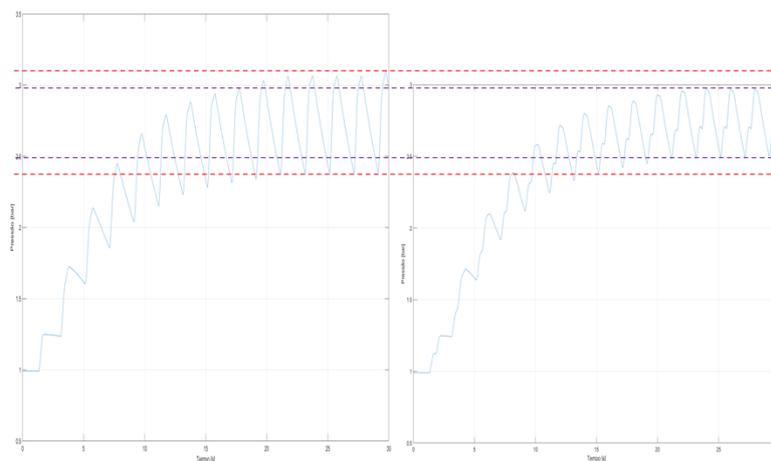
Figura 14 – Pressão gerada no acumulador hidráulico durante os testes no tanque de ondas



Fonte: O autor (2021).

Com o modelo do circuito hidráulico validado através da comparação de pressão máxima alcançada no acumulador de alta pressão, é possível utilizar o modelo completo, com 10 conjuntos de PTO para simulações funcionais. A Figura 15 apresenta uma comparação com variações simuladas do momento em que cada lado da embarcação é atingida por uma onda: (i) no gráfico à esquerda é simulado a condição em que todos os cilindros fornecem pressão ao mesmo tempo para o circuito hidráulico de alta pressão, ou seja, sem qualquer tipo de atraso de tempo e (ii), no gráfico à direita, considera-se que há um atraso de 0,5 s entre um lado da embarcação e o outro.

Figura 15 – Pressão gerada no acumulador hidráulico durante a simulação no circuito completo



Fonte: O autor (2021).

É possível observar que em ambos os casos a pressão média no acumulador é de aproximadamente 2,75 bar, em ambos os casos. Contudo, é possível observar que a flutuação em torno deste valor é reduzida no segundo caso (limitação tracejada em roxo)

do que no primeiro caso (limitação tracejada em vermelho). Isto se deve pelo fato de que a movimentação dos cilindros durante a elevação de pressão no circuito de alta pressão está defasada, fazendo com que o sistema tenha um melhor aproveitamento do acúmulo de energia.

O resultado principal da pesquisa é a observação da possibilidade de conversão de até 18,06 W de potência pelo PTO hidráulico proposto para uma onda com potência média disponível de 40,32 W/m. Este valor de potência convertida não é constante, devido ao próprio princípio de funcionamento do sistema com PTO hidráulico. Contudo, sua utilização em conjunto, no formato de um sistema multicorpo, permite que flutuações na conversão de energia sejam minimizadas, melhorando a eficiência de todo o conjunto.

CONCLUSÕES

Baseando-se no modelo reduzido de embarcação para WEC, elaborou-se um modelo computacional onde o usuário pode configurar diversos tipos de parâmetros associados à otimização de componentes e desenvolvimento de novos dispositivos. Assim, no modelo criado, pode-se alterar, por exemplo, o diâmetro da tubulação do circuito hidráulico, perda de carga de válvulas, parâmetros do fluido hidráulico, proposição de variações construtivas de alguns componentes como o motor hidráulico, entre outros.

Para validação deste modelo computacional, testes com o PTO hidráulico foram conduzidos de forma prática, num tanque de ondas costeiras. Os resultados obtidos nestes testes foram significativos e demonstram que o modelo computacional elaborado permite desenvolver simulações do comportamento real de todo o conjunto. Além disso, de forma que os dados de entrada para a simulação sejam os mais próximos dos tipos de ondas possíveis de serem gerados num tanque de ondas, o modelo permite a integração com sistemas de simulação fluido mecânicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo Global Energia S.A. e ao programa de P&D Aneel, conforme Lei Nº 8.010/1990, pela disponibilização de recursos para o desenvolvimento do PD-06961-0009/2019, “GEO – Gerador de Energia Ondomotriz”.

REFERÊNCIAS

ASSIS, L. E. DE. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**, 2010. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CALEJO, P. J. P. **Sistema conversor de energia das ondas do mar**, 2012. Universidade de Aveiro.

FLEMING, F. P. **Avaliação Do Potencial De Energias Oceânicas No Brasil**, 2012. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/Fernanda_Pereira_Fleming.pdf>.

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

HONG, Y.; WATERS, R.; BOSTRÖM, C.; et al. Review on electrical control strategies for wave energy converting systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 329–342, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.053>>.

IEA, I. E. A. Data and statistics. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 31/5/2020.

KHALIGH, A.; ONAR, O. C. **Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems**. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

MARIA-ARENAS, A.; GARRIDO, A. J.; RUSU, E.; GARRIDO, I. Control strategies applied to wave energy converters: State of the art. **Energies**, v. 12, n. 16, 2019.

OMAR, C. **Estudo de métodos para a conversão da energia das ondas oceânicas**, 2018. Universidade de Lisboa.

PALUDO, R. **Relatório 09 - Projeto executivo de ondogerador para teste em modelo reduzido**. Curitiba, 2021.

PECHER, A.; KOFOED, J. P.; FOLLEY, M.; et al. **Ocean Engineering & Oceanography - Handbook of Ocean Wave Energy**. 1º ed. Boca Raton, USA: SpringerOpen, 2017.

Recebido em: 03/02/2022

Aprovado em: 05/03/2022

Publicado em: 07/03/2022