



Conversão da Energia das Ondas Via Dispositivos de Coluna de Água Oscilante: Compilado de Estudos Com e Sem Turbinas

Roberta Fonseca^{1*}; Maurício Moreira¹; Mateus Gomes²
Bianca Machado³; Luiz Rocha¹; Elizaldo Santos¹; Liércio Isoldi¹

Resumo: Embora o potencial para extrair a energia das ondas dos mares e oceanos seja grande, este recurso energético ainda é pouco explorado. A pesquisa nesta área é impulsionada pela necessidade de atender às metas de energia renovável, mas ainda é relativamente recente em comparação a outras tecnologias. Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre os dispositivos de coluna de água oscilante (OWC), que são um conhecido tipo de conversor de energia das ondas. O OWC funciona como uma estrutura submersa ou flutuante e aproveita o movimento das ondas, que cria variações de pressão dentro de uma câmara. Estas oscilações forçam a entrada e a saída de ar da câmara, acionando uma turbina, a qual gera eletricidade. Inicialmente, a pesquisa em energia das ondas concentrou-se em sistemas que incluíam turbinas; contudo, esforços recentes têm sido direcionados a estudos que, simplificada, simulam o funcionamento dos OWCs sem turbina com o intuito de determinar a potência hidropneumática disponível destes conversores. A revisão da literatura mostrou que, nos estudos sem turbina, a maioria costuma considerar ondas regulares, enquanto naqueles com turbina tende-se a analisar condições próximas das reais do ambiente marinho, buscando produzir ondas irregulares.

Palavras-chave: Conversor de energia das ondas; coluna de água oscilante; OWC com turbina; OWC sem turbina.

*robertafcollet@gmail.com

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande/Av. Itália, km 8, Rio Grande, RS.

²Departamento de Matemática, Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá, R. Antônio Carlos Rodrigues, nº. 453, Porto Seguro, Paranaguá, PR.

³Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS 030, 11700 - km 92, Emboaba, Tramandaí, RS.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o interesse no estudo de fontes renováveis de energia tem sido crescente em virtude das preocupações relacionadas à poluição ambiental e ao esgotamento dos combustíveis fósseis. Nesse sentido, a energia das ondas do mar tem recebido atenção significativa como uma alternativa promissora. Embora seja uma fonte renovável e inesgotável, o sucesso da instalação de um conversor de energia das ondas (WEC, do inglês *wave energy converter*) está diretamente relacionado à pesquisa nesta área, bem como ao estudo das implicações para o ecossistema marinho (Azzellino *et al.*, 2013). Os WECs podem ser classificados de acordo com sua localização de instalação, seu tamanho, suas características de direção das ondas ou seu princípio de funcionamento.

Ao longo dos anos, diversos tipos de WECs foram desenvolvidos para aproveitar a energia das ondas, e um dos mais promissores é o dispositivo de coluna de água oscilante (OWC, do inglês *oscillating water column*). A concepção do OWC é tipicamente atribuída a Yoshio Masuda, embora uma patente inicial tenha sido registrada em 1799 por Girard (Ross, 1995). O OWC é, portanto, um exemplo de conversor de energia das ondas, uma vez que promove o aproveitamento do movimento oscilatório da água para gerar eletricidade (Rodrigues, 2008). Por conta disso, o OWC tem sido a tecnologia mais bem sucedida na aplicação costeira de conversão de energia das ondas, visto que uma de suas grandes vantagens é a previsibilidade da geração de energia, o que ajuda a estabilizar as redes elétricas, diferentemente das fontes de energia solar e eólica, as quais são mais difíceis de se prever o comportamento (Gayathri *et al.*, 2024).

Um dispositivo OWC consiste em uma câmara oca parcialmente submersa na qual a ação de ondas externas excita a oscilação da coluna de água interna. Esta coluna de água oscilante pressuriza o ar na parte superior da câmara, induzindo o escoamento de ar através de um duto, o qual impulsiona este escoamento sobre a turbina (Simonetti *et al.*, 2017). Considerando a análise numérica aplicada aos OWCs, as ondas que incidem sobre estes dispositivos podem ser regulares – quando têm altura e período constantes, o que facilita a modelagem e a previsão dos comportamentos da água e da pressão na câmara do conversor – ou irregulares – quando apresentam variações imprevisíveis em altura e período, o que pode levar a uma performance menos eficiente se o sistema não for bem adaptado para lidar com estas flutuações. Nas próximas seções serão discutidos o princípio de funcionamento dos OWCs, a formulação matemática que governa os processos da captura de energia das ondas e produção de eletricidade, além do estado da arte com as pesquisas desenvolvidas nos últimos anos sobre o tema.

2 DISPOSITIVOS OWC

Yoshio Masuda, um oficial da marinha que realizou pesquisas no Japão na década de 1940, é considerado o pai da tecnologia moderna de energia das ondas. Ele projetou um OWC flutuante, que consistia em uma boia de navegação equipada com turbina

a ar, movida pela energia das ondas. Inicialmente, boias semelhantes às que foram amplamente distribuídas no Japão desde 1965 foram os primeiros dispositivos de energia das ondas a serem lançados com sucesso no oceano (Gayathri *et al.*, 2024). Turbinas a ar unidimensionais tradicionais foram incorporadas às boias de navegação de Masuda, exigindo um conjunto de válvulas retificadoras (ver figura 1). (Cruz e Sarmento, 2004; & Gayathri *et al.*, 2024).

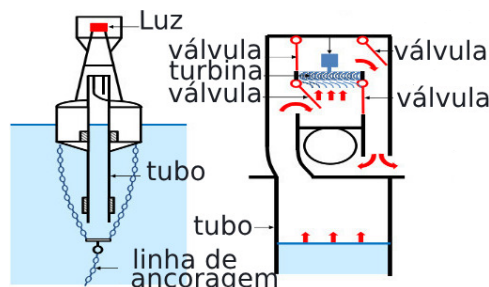


Figura 1: Esquerda: *layout* da boia de navegação de Masuda. Direita: escoamento de ar através das válvulas de retificação e da turbina. Adaptado de Gayathri *et al.* (2024).

As iniciativas de converter a energia das ondas têm raízes que remontam ao século XVII. Entretanto, foi a partir da década de 1970, em resposta à crise do petróleo, que os investimentos se tornaram mais significativos, visando a busca por fontes alternativas para atender à demanda. De modo geral, há uma variedade de dispositivos e diferentes abordagens para converter a energia das ondas em eletricidade. Esta diversidade resulta do desenvolvimento específico de cada dispositivo, visando otimizar a captura de energia de acordo com as características locais e o padrão das ondas. Os dispositivos podem ser localizados na costa (*onshore*), em áreas de águas rasas (*nearshore*) ou em regiões oceânicas (*offshore*) (Tolmasquim, 2016). A figura 2 ilustra estas possíveis configurações.

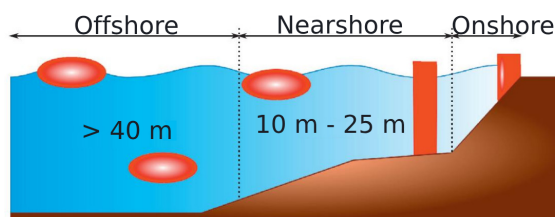


Figura 2: Profundidade dos dispositivos em relação à costa. Adaptado de López *et al.* (2013).

O OWC é projetado para capturar o movimento da água gerado pelas ondas. Basicamente, este dispositivo é formado por uma câmara hidropneumática conectada a um duto de ar. A câmara se abre abaixo da superfície da água do mar, enquanto o duto de ar está exposto à atmosfera. Com a ação das ondas na câmara, a coluna de água realiza um movimento semelhante ao de um pistão, comprimindo e descomprimindo o ar, o que gera um escoamento alternado através do duto. Este escoamento de ar ativa uma turbina localizada no duto, que, por sua vez, produz eletricidade por meio de um gerador (Falcão e Henriques, 2016). A figura 3 ilustra o princípio de funcionamento de um OWC.

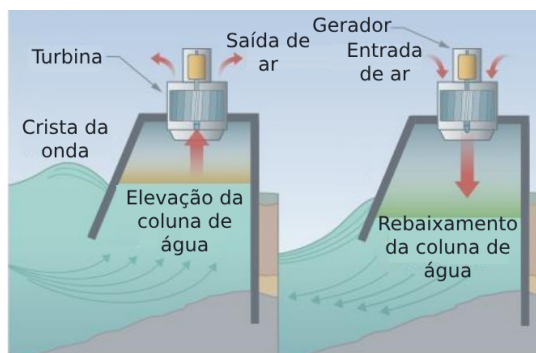


Figura 3: Funcionamento de um dispositivo OWC. Adaptado de Tolmasquim (2016).

Assume-se que as dimensões internas da câmara hidropneumática do OWC são reduzidas em relação ao comprimento das ondas que a atingem. Logo, para ondas longas, a superfície livre da água pode ser considerada suficientemente plana, podendo ser tratada como um corpo em elevação. No entanto, para ondas de comprimento curto, a superfície interna da água pode não ser considerada plana (Horko, 2007). Na presença de turbina, é possível calcular uma potência hidropneumática útil do dispositivo OWC, que corresponde à energia que pode ser convertida em eletricidade (Pinto Júnior, 2020). Entretanto, alguns estudos consideram, simplificada, o OWC sem turbina. Nesse caso, a ausência de turbina permite determinar a potência hidropneumática disponível, P_{hid} , do OWC, que é a quantidade de energia que pode ser extraída do movimento das ondas e que é expressa como (Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_{hid} = \left(p_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar}} \quad (1)$$

onde p_{ar} é a pressão do ar no duto da turbina (N/m^2), ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), v_{ar} é a velocidade do ar (m/s) e \dot{m}_{ar} é a vazão mássica do ar (kg/s). Para calcular a média de uma variável que oscila entre valores positivos e negativos, como é o caso aqui, recomenda-se empregar a raiz do valor quadrático médio, denominada média quadrática ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) (Pinto Júnior, 2020). Para valores instantâneos, esta média pode ser obtida conforme Gomes *et al.* (2018) e Letzow *et al.* (2020).

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Teoria de Ondas

As ondas do oceano são geradas pela ação do vento ou por distúrbios em sua superfície, além de deslizamentos de terra, terremotos e pela atração gravitacional do sol e da lua (Tolmasquim, 2016). Embora as ondas do oceano sejam irregulares, há diversas teorias de ondas que consideram ondas regulares com o intuito de facilitar o desenvolvimento de estudos teóricos. Diferentes parâmetros podem definir as características de uma onda regular, as quais podem ser conferidas em Dean e Dalrymple (1991). Logo, para uma

representação acurada das ondas, a escolha adequada da teoria de ondas é fundamental. Os modelos que descrevem o comportamento das ondas podem ser divididos em teorias de ondas regulares (tanto lineares quanto não lineares) e em um espectro de ondas, que consiste em várias ondas regulares sobrepostas (Chakrabarti, 1987; & Carneiro, 2007). Fatores como a altura H da onda, o comprimento de onda L e a profundidade da água h devem ser levados em consideração para a determinação da teoria de ondas a ser aplicada. Entretanto, estas grandezas costumam ser avaliadas em termos dos seguintes parâmetros adimensionais: declividade (H/L), profundidade relativa (h/L), altura de onda relativa (H/h) e número de Ursell ($U_r = L^2 H / h^3$) (Carneiro, 2007).

Dentre as teorias de ondas, a mais simples é a teoria linear (também denominada teoria de Airy), que representa as ondas como oscilações regulares e cuja validade está restrita a cenários em que a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, isto é, ondas com pequena amplitude e comprimento, em grandes profundidades. Entretanto, as teorias não lineares tendem a representar as ondas de maneira mais adequada, sendo possível analisar ondas mais altas e em profundidades mais rasas. A teoria de Stokes, portanto, é aplicável a alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas. Nesta teoria, o potencial de velocidades é representado por uma série de potências em que a solução contendo o termo de primeira ordem representa a teoria linear de Airy. Expandindo-se esta série até o segundo termo, tem-se a teoria de Stokes de segunda ordem (apresentada na subseção 3.1.1, visto que esta abordagem oferece uma descrição mais acurada do comportamento das ondas em comparação com teorias mais simples). A teoria Cnoidal é adequada para descrever ondas com crista fina separadas por uma cava larga e achatada. À medida que o comprimento de onda aumenta, a teoria das ondas cnoidais reduz-se à teoria das ondas solitárias. Estas ondas não são periódicas e não possuem cavas, de modo que sua forma permanece intacta sobre a linha de água estática (Chakrabarti, 1987; & Carneiro, 2007).

A teoria linear é válida para os casos em que $U_r < 1$, as teorias não lineares para $U_r < 30$, a teoria Cnoidal para $U_r > 10$ e a teoria das ondas solitárias para $U_r \rightarrow \infty$ (Chakrabarti, 1987). Nos critérios para a determinação da aplicação de cada teoria, o comprimento de onda pode ser substituído pelo período T da onda, visto que o comprimento de onda pode ser obtido em função da profundidade e do período (Chakrabarti, 1987). Outra maneira de determinar a teoria mais apropriada é apresentada na figura 4.

3.1.1 Teoria de Stokes de Segunda Ordem

Desenvolvida por George Gabriel Stokes no século XIX, a Teoria de Stokes de Segunda Ordem afirma que a velocidade da onda inclui tanto componentes lineares quanto não lineares, refletindo a complexidade do movimento das ondas em superfícies aquáticas. Estes componentes são essenciais para a modelagem e análise do comportamento das ondas em engenharia e oceanografia (Dean e Dalrymple, 1991; & Pecher e Kofoed, 2017). Trata-se, portanto, de uma extensão da teoria linear das ondas e fornece uma descrição mais precisa das ondas em condições reais. Para se resolver o problema, as componentes

da velocidade da onda nas direções horizontal e vertical são aplicadas como condições de contorno. Estas grandezas são calculadas como (Dean e Dalrymple, 1991):

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

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

em que u e w são as componentes de velocidade da onda nas direções horizontal e vertical, respectivamente (ambas em m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²), k é o número de onda (m⁻¹), z é a posição vertical (m), ω é a velocidade angular (rad/s), x é a coordenada espacial na direção principal (m) e t é o tempo (s).

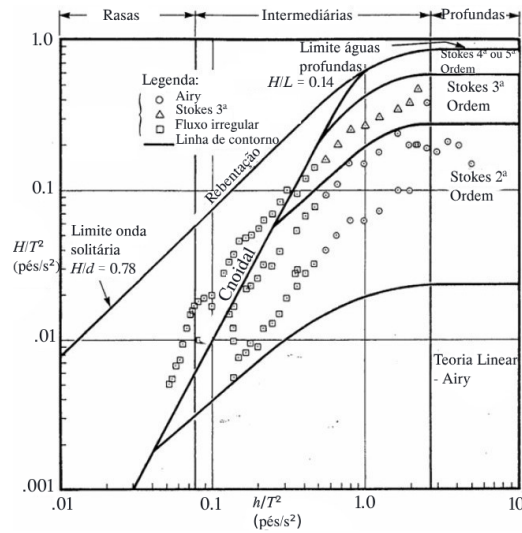


Figura 4: Diagrama de aplicabilidade das teorias de ondas. Adaptado de Chakrabarti (1987).

Para uma amplitude da onda A (m), a elevação da superfície livre η representa a posição em relação à linha média da água, que é definida por (Dean e Dalrymple, 1991):

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

3.2 Modelo Multifásico

O problema da captura e geração de energia através das ondas do mar pode ser modelado como o escoamento de uma mistura composta por água e ar. A modelagem deste escoamento consiste na solução das equações de conservação de massa e *momentum* (Fox *et al.*, 2018). O escoamento multifásico, por sua vez, pode ser modelado através do método Volume de Fluido (VOF, do inglês *volume of fluid*), cuja aplicação está condicionada a escoamentos com duas ou mais fases imiscíveis (Blazek, 2001).

Assumindo um escoamento isotérmico, laminar e incompressível, a equação de

conservação de massa para uma mistura de água e ar é escrita como (Fox *et al.*, 2018)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

A equação de conservação de *momentum* para a mistura é dada por (Fox *et al.*, 2018)

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\mu \bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} \quad (6)$$

em que μ é a viscosidade dinâmica (kg/m.s), $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor da taxa de deformação (N/m²) e ρg são as forças de flutuabilidade (N/m³).

A fração volumétrica α pode ser computada como (Srinivasan *et al.*, 2011):

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

O método VOF não calcula explicitamente a posição da superfície livre entre fluidos, de modo que é essencial discretizar a fração volumétrica na região da interface entre os dois fluidos. Assim, as células com $\alpha_{\text{água}}$ variando de 0 a 1 englobam a interface entre a água e o ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$, onde α é a quantidade de água ou ar em cada volume). No caso das células em que $\alpha_{\text{água}} = 0$, estas são inteiramente preenchidas com ar (logo, $\alpha_{\text{ar}} = 1$); inversamente, as células com $\alpha_{\text{ar}} = 0$ são inteiramente preenchidas com água.

As propriedades físicas da região entre os dois fluidos são determinadas como médias ponderadas usando a fração volumétrica. Logo, a massa específica e a viscosidade dinâmica da mistura são computadas através das seguintes equações (Blazek, 2001):

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (8)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (9)$$

4 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

A modelagem numérica assistida por computadores na área de dispositivos conversores da energia das ondas é uma ferramenta essencial para as pesquisas, devido à sua versatilidade em identificar recomendações técnico-científicas que podem ajudar a resolver problemas. Quando comparam-se abordagens experimentais com modelos numéricos, os custos são consideravelmente maiores, além de que, em alguns casos, também pode haver riscos à segurança do projetista e desafios na reprodução das condições reais do ambiente e do funcionamento do equipamento (Maliska, 2004). Dessa forma, as simulações numéricas podem trazer grandes vantagens a este tipo de estudo, visto que auxiliam na previsão e na elaboração de modelos matemáticos com baixo custo.

Os conversores de energia das ondas ainda representam um segmento modesto, mas teoricamente significativo, do portfólio global de energia renovável. Entretanto, para que a indústria de WECs seja competitiva com a energia eólica *offshore* ou a solar, é necessário avançar no desenvolvimento de protótipos viáveis que possam ser ampliados

para implantação comercial. Para avaliar os indicadores de desempenho durante as etapas iniciais do projeto, é imperativo adotar métodos robustos e confiáveis. *Softwares* de dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês *computational fluid dynamics*), capazes de resolver as equações de Navier-Stokes ou abordar problemas de Navier-Stokes com médias de Reynolds, oferecem alternativas para lidar com não linearidades que podem representar desafios para outras abordagens. Portanto, modelar com acurácia a interface do fluido de duas fases na câmara onde o ar e a água interagem é um dos principais desafios da abordagem CFD (Gayathri *et al.*, 2024).

O *software* Fluent (ANSYS, 2021), que é parte do pacote de simulação computacional ANSYS, é amplamente utilizado para resolver problemas relacionados à energia das ondas do mar. Ele permite simular o movimento das ondas e o comportamento do escoamento de água, auxiliando na compreensão de como as ondas interagem com os dispositivos conversores de energia. Além disso, é possível modelar o desempenho de turbinas usadas nos dispositivos de conversão de energia, avaliando a sua eficiência em diferentes condições. O *software* também é eficaz na modelagem da interface entre a água e o ar, que é fundamental nos dispositivos OWC, onde a dinâmica do ar influencia a geração de energia. Através das simulações é possível otimizar o design de dispositivos conversores de energia, aumentando sua eficiência e reduzindo custos operacionais. Outra vantagem é a possibilidade de desenvolver e validar modelos teóricos através de comparações com dados experimentais. Gomes *et al.* (2018), Letzow *et al.* (2020), Haghighi *et al.* (2021), Liu *et al.* (2021), Mocellin *et al.* (2023) e Lima *et al.* (2024) são alguns exemplos de estudos numéricos sobre a captura e geração de energia das ondas utilizando o Fluent.

Outra alternativa para a modelagem computacional é o OpenFOAM (OpenFOAM, 2018), que é um *software* gratuito e que também pode ser utilizado na área de energia das ondas do mar. Por ser um *software* de código aberto, permite a personalização de modelos e a colaboração em projetos. Ele pode ser usado para modelar e otimizar o desempenho de turbinas que geram eletricidade a partir da energia das ondas, avaliando a eficiência, além de simular o comportamento das ondas e o escoamento de água em diversas condições físicas. É capaz de simular diferentes condições ambientais, como variações de marés, correntes e temperatura, fornecendo dados importantes para a definição de design e operação dos sistemas. Foi usado por Simonetti *et al.* (2014), Iturrioz *et al.* (2015), Simonetti *et al.* (2015), Huang e Huang (2021) e Razavim *et al.* (2024) para simular o comportamento das ondas e dos dispositivos OWC.

5 ESTADO DA ARTE

Os estudos sobre a produção de eletricidade a partir das ondas do mar podem ser agrupados em: ondas incidindo sobre o OWC com turbina e ondas incidindo sobre o OWC sem turbina. As próximas subseções apresentam um compilado de estudos numéricos publicados nos últimos anos sobre a conversão da energia das ondas do mar. Embora haja estudos experimentais sobre o tema (Dizadji e Sajadian, 2011; Elhanafi e Kim, 2018;

Yu *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023; & Ulm *et al.*, 2023), estes estão fora do escopo deste trabalho e, portanto, não serão discutidos aqui.

5.1 Considerando a Turbina

Moñino *et al.* (2018) utilizaram simulações numéricas no *software* ANSYS Fluent para modelar o comportamento do OWC e avaliar o desempenho de uma turbina Wells – conhecida por sua capacidade de converter o escoamento de ar comprimido resultante das oscilações da água em energia mecânica. Assumindo o método VOF e a teoria das ondas lineares, compararam como diferentes configurações de turbina (perfil das lâminas e geometria) e distintas condições operacionais (frequência e amplitude das ondas regulares) podem influenciar a performance do sistema. Teixeira *et al.* (2020) avaliaram o desempenho de conversores de energia das ondas com turbinas Wells e de impulso com uma abordagem que combina o modelo de médias de Reynolds (RANS, do inglês *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), a teoria linear de ondas e o método VOF para simular no Fluent o comportamento do escoamento de água (representado por ondas regulares) e a interação com as turbinas. Os resultados mostraram que a performance do conjunto pode variar dependendo das condições do mar e do tipo de turbina utilizada, alcançando uma eficiência máxima de 46 % para a turbina Wells e de 44 % para a turbina de impulso.

Kim *et al.* (2021) aplicaram o método da decomposição linear – que consiste na divisão das ondas irregulares em componentes regulares menores – para modelar a conversão da energia hidropneumática dos dispositivos OWC. No artigo, o modelo multifásico e *software* empregados não foram detalhados. Baseadas na teoria linear de ondas, as simulações mostraram que o sistema OWC-WEC pode ser mais eficiente na conversão de energia quando as ondas irregulares são corretamente decompostas e analisadas, o que auxilia na definição de configurações ótimas e melhora o design do conjunto. Além disso, foi possível inferir que o método de decomposição linear é eficaz em otimizar a potência do sistema, visto que os resultados mostraram uma boa concordância com métodos de interação direta.

Cui *et al.* (2021) realizaram um estudo em que se investigou a extração de energia das ondas utilizando um conversor híbrido que combina a tecnologia de um OWC com uma boia oscilante (OB, do inglês *oscillating buoy*), que são dois dos principais tipos de conversores de energia das ondas. A análise foi realizada por meio de simulações numéricas baseadas na teoria linear de ondas, as quais modelaram o comportamento do sistema híbrido sob diferentes condições de ondas regulares e irregulares através de uma abordagem que avaliou a eficiência de conversão, a resposta dinâmica e a interação entre o OWC e a boia. O modelo para o escoamento multifásico e o *software* usado nas simulações numéricas não foram explicitados no texto. Os resultados mostraram que a integração dos dispositivos conduziu a um aumento significativo na eficiência da conversão de energia das ondas, visto que este sistema híbrido combina os pontos fortes destas duas tecnologias individualmente, oferecendo uma solução mais robusta para a geração de energia das ondas.

Mayon *et al.* (2023) investigaram o desempenho de sistemas OWC em arranjos específicos, posicionados dentro da abertura côncava de uma parede refletora parabólica e submetidos a ondas irregulares. No artigo, foram realizadas simulações numéricas no *software* OpenFOAM, acoplando o método VOF e a teoria linear de ondas, com arranjos de três e cinco câmaras de OWC para avaliar como a configuração do arranjo e a geometria da parede refletora afetam a eficiência na conversão de energia. Os resultados obtidos demonstraram que cinco câmaras oferecem vantagens em termos de eficiência em comparação com três, devido a uma melhor captura e concentração das ondas.

Assumindo a teoria linear de ondas, Cannata *et al.* (2023) avaliaram o desempenho de um OWC analisando como este opera sob ondas regulares e irregulares. As informações sobre a formulação adotada para o escoamento multifásico e o *software* utilizado foram omitidas no artigo. No caso das ondas regulares, o desempenho do OWC mostrou uma eficiência de conversão maior quando a frequência das ondas estava próxima da frequência natural do dispositivo, indicando um comportamento de ressonância favorável. Para ondas irregulares, o desempenho foi variável, visto que a eficiência da conversão de energia variou significativamente devido às flutuações na altura e no período das ondas. Além disso, o dispositivo conseguiu capturar uma quantidade razoável de energia, mas com menor eficiência comparada às condições de ondas regulares.

5.2 Não Considerando a Turbina

Utilizando o método Design Construtal, Gomes *et al.* (2018) investigaram a influência da geometria no desempenho de um conversor OWC, focando na relação entre altura e comprimento do dispositivo. Este método baseia-se na ideia de que os sistemas naturais e artificiais evoluem para facilitar a transferência de energia, o que, por sua vez, leva a um desempenho mais eficiente (Bejan e Lorente, 2008). O objetivo foi aumentar a potência hidropneumática quadrática média em condições de ondas regulares. As simulações numéricas, realizadas via Fluent combinando o método VOF e a teoria de Stokes de segunda ordem, mostraram que a configuração otimizada pode alcançar resultados até 11 vezes melhor que a menos eficiente, e que a relação ideal entre altura e comprimento do conversor era quatro vezes superior à da onda incidente.

Assumindo ondas regulares, o método VOF e a teoria linear de ondas, Letzow *et al.* (2020) avaliaram através do *software* Fluent a influência da geometria em um dispositivo OWC *onshore* em escala real associado a uma rampa submersa no mar. Foram consideradas várias geometrias para o dispositivo e a rampa, de modo a avaliar como estas variáveis influenciavam o escoamento de água e a eficiência do sistema. A análise confirmou que as geometrias do OWC e da rampa devem ser cuidadosamente projetadas para maximizar o desempenho do conjunto e mostrou que certos modelos geométricos podem levar a uma melhor eficiência na conversão de energia. Além disso, recomenda-se considerar as características geométricas da região do fundo do mar e do dispositivo em estudo, além de se explorar diferentes configurações e condições para maximizar a captura e a conversão de energia.

Haghighi *et al.* (2021) desenvolveram um estudo no *software* Fluent com ondas regulares em que o principal objetivo foi analisar e comparar o desempenho hidropneumático de um OWC com duas câmaras em relação a modelos com uma única câmara, acoplando as teorias linear de ondas e Stokes de segunda ordem. A pesquisa, a qual empregou o método VOF para descrever o escoamento multifásico, revelou que a interação entre ambas as câmaras pode otimizar o escoamento da água e a pressão, resultando em um desempenho hidropneumático mais eficaz. Entretanto, a definição do design e da configuração das câmaras são fundamentais para maximizar estes benefícios, sendo, portanto, decisivos na determinação da eficiência destes equipamentos.

Mocellin *et al.* (2023) exploraram a influência da geometria de um conversor do tipo OWC na eficiência de conversão de energia em condições de ondas irregulares realísticas, levando em conta a batimetria e adotando o método VOF via ANSYS Fluent. A potência disponível de uma onda é geralmente calculada com base na altura da onda e na sua frequência. Para ondas regulares, estes parâmetros são fixos, o que facilita o cálculo da energia. Para ondas irregulares, a potência é calculada levando em conta a distribuição de alturas e períodos, frequentemente usando espectros de ondas (como o espectro de Pierson-Moskowitz ou JONSWAP), o que resulta em uma maior complexidade no cálculo e uma variabilidade na potência disponível. A batimetria, por sua vez, é o estudo e a medição da profundidade de oceanos, rios e lagos em relação ao nível do mar. Ela fornece informações sobre a topografia do fundo marinho e é frequentemente representada em mapas usando escalas de cores ou linhas de contorno, as quais mostram as variações na profundidade (Cruz e Sarmiento, 2004; & Tolmasquim, 2016). Os resultados mostraram que ondas irregulares realistas foram geradas adequadamente em ambos os canais de onda, com e sem batimetria, e que a propagação das ondas em ambos os domínios computacionais não foi significativamente influenciada pela batimetria do canal de ondas.

Lima *et al.* (2024) avaliaram a geometria de um dispositivo OWC composto por cinco câmaras acopladas sujeitas a ondas regulares incidentes, utilizando o método Design Construtal no *software* Fluent. A teoria de ondas adotada foi Stokes de segunda ordem e o escoamento multifásico foi modelado pelo método VOF. Os resultados mostraram que a geometria do OWC tem um impacto significativo na eficiência energética, destacando que configurações específicas podem aumentar a captação de energia e permitindo otimizações que consideram as características do ambiente e as necessidades operacionais.

6 PERSPECTIVAS FUTURAS

Integrar a energia das ondas do mar com outras fontes renováveis, como a solar e a eólica, pode resultar em sistemas mais fortes e eficazes, aumentando a confiabilidade na oferta de energia. As perspectivas para a energia das ondas do mar são promissoras, com um grande potencial para enriquecer a matriz energética mundial. Graças a inovações tecnológicas e a um aumento no foco na sustentabilidade, este tipo de energia pode ter um papel crucial na transição para um futuro mais sustentável.

A melhoria contínua nas tecnologias de conversão de energia, como turbinas e sistemas OWC, tem papel fundamental para aumentar a eficiência na captura de energia das ondas. Além disso, o emprego de materiais mais leves e duráveis pode aumentar a vida útil e reduzir os custos de manutenção destes dispositivos. Obviamente, a adoção de incentivos e políticas governamentais para promover a energia renovável também pode impulsionar os investimentos em projetos que envolvam a energia das ondas do mar. O desenvolvimento de métodos para minimizar o impacto ambiental das instalações de energia das ondas do mar poderá ajudar a aumentar a aceitação social e a viabilidade dos projetos. Por fim, a implementação de práticas de engenharia que respeitem os ecossistemas marinhos pode garantir que a energia das ondas do mar contribua para a sustentabilidade.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia das ondas do mar é fundamental na transição para um futuro energético mais sustentável. Com um compromisso constante com a inovação e a colaboração entre governos, setor industrial e sociedade, esta fonte de energia tem o potencial de suprir boa parte das demandas energéticas globais de forma limpa e renovável.

A revisão da literatura revelou que, na ausência de turbina, a maioria dos estudos tende a considerar cenários com ondas regulares incidindo nos dispositivos OWC. Por outro lado, nas pesquisas que são incluídas turbinas, as análises costumam simular condições realísticas do ambiente marinho, investigando o comportamento dos sistemas submetidos a ondas irregulares. Independentemente de os estudos serem com ondas regulares ou irregulares, ou ainda na presença/ausência de turbina, há um grande potencial para explorar a captura da energia das ondas do mar e a conversão desta em energia elétrica, visto que quaisquer destas abordagens auxiliam no desenvolvimento de modelos teóricos, os quais podem ser aplicados posteriormente em sistemas mais complexos. Através destes estudos, é possível não apenas avaliar a potência hidropneumática dos dispositivos OWC, abordando aspectos como eficiência e desempenho, mas também fornecem oportunidades de se testar novas tecnologias de conversão, contribuindo para inovações no setor.

AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa foi financiada pela Coordenação Pessoal de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, código de financiamento 001), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS, processo 21/2551-0002231-0) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq, processos 403408/2023-7, 307791/2019-0, 308396/2021-9 e 309648/2021-1). Todos os autores agradecem à FAPERGS e ao CNPq. R. Fonseca e M. Moreira agradecem à CAPES e ao CNPq por suas bolsas de pós-doutorado e doutorado. L. Rocha, E. Santos e L. Isoldi agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANSYS (2021). *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS Inc.
- Azzellino, A., D. Conley, D. Vicinanza, e J. P. Kofoed (2013). “Marine Renewable Energies: perspectives and implications for marine ecosystems”. Em: *The Scientific World Journal* 2013.1.
- Bejan, A. e S. Lorente (2008). *Design with Constructal Theory*. USA: Wiley.
- Blazek, J (2001). *Computational Fluid Dynamics: principles and applications*. 1st ed. Elsevier.
- Cannata, G., M. Simone, e F. Gallerano (2023). “Numerical investigation into the performance of an OWC device under regular and irregular waves”. Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 11.4, p. 735.
- Carneiro, M. L. (2007). *Desenvolvimento de sistema de controle para geração e absorção ativa de ondas em tanques de ensaios de estruturas oceânicas*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamics of offshore structures*. Illinois, USA: WIT Press.
- Cruz, J. M. B. P. e A. J. N. A. Sarmento (2004). *Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais*. Instituto do Ambiente.
- Cui, L., S. Zheng, Y. Zhang, J. Miles, e G. Iglesias (2021). “Wave power extraction from a hybrid oscillating water column-oscillating buoy wave energy converter”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, p. 110234.
- Dean, R. G. e R. A. Dalrymple (1991). *Water Wave Mechanics for engineers and scientists*. Singapore: World Scientific.
- Dizadji, N. e S. E. Sajadian (2011). “Modeling and optimization of the chamber of OWC system”. Em: *Energy* 36.5, 2360–2366.
- Elhanafi, A. e C. J. Kim (2018). “Experimental and numerical investigation on wave height and power take-off damping effects on the hydrodynamic performance of an offshore-stationary OWC wave energy converter”. Em: *Renewable Energy* 125, 518–528.
- Falcão, A. F. e J. C. Henriques (2016). “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review”. Em: *Renewable Energy* 85, 1391–1424.
- Fox, R. W., A. T. McDonald, e P. J. Pritchard (2018). *Introdução à mecânica dos fluidos*. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Gayathri, R., J.-Y. Chang, C.-C. Tsai, e T.-W. Hsu (2024). “Wave energy conversion through oscillating water columns: A Review”. Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 12.2, p. 342.
- Gomes, M. N., G. Lorenzini, L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos, e L. A. Isoldi (2018). “Constructal Design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods”. Em: *Journal of Engineering Thermophysics* 27.2, 173–190.
- Haghighi, A. T., A. H. Nikseresht, e M. Hayati (2021). “Numerical analysis of hydrodynamic performance of a dual-chamber oscillating water column”. Em: *Energy* 221, p. 119892.

- Horko, M (2007). *CFD optimization of an oscillating water column energy converter*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western.
- Huang, Z. e S. Huang (2021). “Two-phase flow simulations of fixed 3D oscillating water columns using OpenFOAM: A comparison of two methods for modeling quadratic power takeoff”. Em: *Ocean Engineering* 232, p. 108600.
- Iturrioz, A., R. Guanche, J. Lara, C. Vidal, e I. Losada (2015). “Validation of OpenFOAM for oscillating water column three-dimensional modeling”. Em: *Ocean Engineering* 107, 222–236.
- Kim, J.-S., K.-H. Kim, J. Park, S. Park, e S. Shin (2021). “A numerical study on hydrodynamic energy conversions of OWC-WEC with the linear decomposition method under irregular waves”. Em: *Energies* 14.6, p. 1522.
- Letzow, M., G. Lorenzini, D. V. E. Barbosa, R. G. Hübner, L. A. O. Rocha, M. d. N. Gomes, L. A. Isoldi, e E. D. dos Santos (2020). “Numerical analysis of the influence of geometry on a large scale onshore oscillating water column device with associated seabed ramp”. Em: *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics* 15.6, 873–884.
- Lima, Y. T. B., L. A. Isoldi, E. D. Santos, B. N. Machado, M. N. Gomes, C. Biserni, e L. A. O. Rocha (2024). “Study of the geometry of an oscillating water column device with five chambers coupled under regular waves through the Constructal Design Method”. Em: *Fluids* 9.4, pp. 1–20.
- Liu, Z., C. Xu, K. Kim, J. Choi, e B.-s. Hyun (2021). “An integrated numerical model for the chamber-turbine system of an oscillating water column wave energy converter”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149, p. 111350.
- Liu, Z., C. Xu, X. Zhang, e D. Ning (2023). “Experimental study on an isolated oscillating water column wave energy converting device in oblique waves”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 184, p. 113559.
- López, I., J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez de Alegría, e I. Kortabarria (2013). “Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, 413–434.
- Maliska, C. R. (2004). *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: LTC.
- Mayon, R., D. Ning, J. Xu, e L. Fu (2023). “Study on a three-chamber and five-chamber OWC array positioned in the concave opening of a parabolic reflecting wall”. Em: *Coastal Engineering*.
- Mocellin, A. P. G., R. P. Maciel, P. H. Oleinik, E. D. dos Santos, L. A. O. Rocha, J. S. Ziebell, L. A. Isoldi, e B. N. Machado (2023). “Geometrical analysis of an oscillating water column converter device considering realistic irregular wave generation with bathymetry”. Em: *Journal of Experimental and Theoretical Analyses* 1.1, 24–43.
- Moñino, A., E. Medina-López, R. J. Bergillos, M. Clavero, A. Borthwick, e M. Ortega-Sánchez (2018). “Numerical simulation of an oscillating water column problem for turbine performance”. Em: *Thermodynamics and Morphodynamics in Wave Energy*. Springer International Publishing, 45–65.

- OpenFOAM (2018). *OpenFOAM Basic Training*. OpenFOAM Found.
- Pecher, A. e J. P. Kofoed (2017). *Handbook of ocean wave energy*. Springer International Publishing.
- Pinto Júnior, E. A. (2020). *Análise geométrica de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante empregando um modelo axissimétrico e dados realísticos de estado de mar*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.
- Razavim, S. S., R Shafaghat, A. K. Kharkeshi, e J Eskandari (2024). “3D numerical modeling and geometry optimization of an oscillating water column device in Sloshing conditions using OpenFOAM and genetic algorithms”. Em: *Journal of Applied Fluid Mechanics* 17.1.
- Rodrigues, L. (2008). “Wave power conversion systems for electrical energy production”. Em: *Renewable Energy and Power Quality Journal* 1.06, 601–607.
- Ross, D. (1995). *Power from the waves*. USA: Oxford University Press.
- Simonetti, I., L. Cappiotti, H. Elsafti, e H. Oumeraci (2017). “Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study”. Em: *Energy* 139, 1197–1209.
- Simonetti, I, L Cappiotti, H Safti, e H Oumeraci (2014). “3D numerical modelling of oscillating water column wave energy conversion devices: current knowledge and OpenFOAM implementation”. Em: *Renewable Energies Offshore*. CRC Press, 497–504.
- Simonetti, I., L. Cappiotti, H. El Safti, e H. Oumeraci (2015). “Numerical modelling of fixed oscillating water column wave energy conversion devices: toward geometry hydraulic optimization”. Em: *Volume 9: Ocean Renewable Energy*. OMAE2015. American Society of Mechanical Engineers.
- Srinivasan, V., A. J. Salazar, e K. Saito (2011). “Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology”. Em: *Applied Mathematical Modelling* 35.8, 3710–3730.
- Teixeira, P. R. F., R. A. A. C. Gonçalves, e E. Didier (2020). “A RANS-VoF numerical model to analyze the output power of an OWC-WEC equipped with Wells and Impulse turbines in a hypothetical sea-state”. Em: *China Ocean Engineering* 34.6, 760–771.
- Tolmasquim, M. (2016). *Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica*. Rio de Janeiro: Interciência.
- Ulm, N., Z. Huang, e P. Cross (2023). “Experimental study of a fixed OWC-type wave energy converter with a heave plate and V-shaped channels for intermediate-water-depth applications”. Em: *Energies* 16.16, p. 5988.
- Yu, T., Q. Guo, H. Shi, T. Li, X. Meng, S. He, e P. Li (2022). “Experimental investigation of a novel OWC wave energy converter”. Em: *Ocean Engineering* 257, p. 111567.