



# Design Construtal Aplicado à Avaliação Geométrica de um Conversor de Energia das Ondas de Coluna de Água Oscilante

Mauricio Moreira<sup>1\*</sup>; Roberta Fonseca<sup>1</sup>; Mateus Gomes<sup>2</sup>; Bianca Machado<sup>3</sup>; Luiz Rocha<sup>1</sup>; Elizaldo Santos<sup>1</sup>; Liércio Isoldi<sup>1</sup>

**Resumo:** O avanço na geração de energia limpa e renovável é um dos grandes desafios da engenharia moderna, com diversas tecnologias sendo desenvolvidas para otimizar o aproveitamento de recursos naturais, como o potencial das ondas do mar. Neste contexto, a influência da geometria no desempenho de um conversor de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO) por meio do método Design Construtal é investigada. O objetivo é maximizar a potência hidropneumática disponível do dispositivo, sujeito a uma onda regular em escala real. São adotadas recomendações de dimensões da câmara hidropneumática, bem como do duto da turbina e submersão do dispositivo CAO obtidas na literatura. Um aparato foi inserido na parte inferior do CAO, com a finalidade de avaliar o comportamento da potência hidropneumática em angulações de 0°, 20°, 40°, 60°, 80° e 90°, em relação à vertical deste dispositivo. Um código de dinâmica de fluidos computacional, baseado no método de volumes finitos, foi usado. O modelo multifásico de volume de fluido foi aplicado para lidar com a interação água-ar. Os resultados mostraram que a potência hidropneumática aumentou de 42,60 W em 0° para o valor máximo de 55,58 W a 80° do aparato, com uma leve redução para 54,39 W a 90°.

**Palavras-chave:** conversor de energia das ondas; coluna de água oscilante; Design Construtal; potência hidropneumática.

<sup>1\*</sup> mauriciodsm6@gmail.com

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

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

<sup>3</sup> Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS 030, 11.700 - km 92, Emboaba, Tramandaí, RS.

# 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de consumo de energia elétrica ao longo dos anos, é fundamental buscar fontes alternativas e sustentáveis para suprir essa crescente necessidade. A expansão do consumo energético, especialmente em países em desenvolvimento, exige soluções inovadoras que aliem eficiência energética e sustentabilidade ambiental (Enerdata, 2022). Nesse contexto, o aproveitamento da energia das ondas do mar surge como uma alternativa viável e promissora, capaz de converter a energia das ondas em energia elétrica, contribuindo para a diversificação da matriz energética e redução da dependência de fontes não renováveis (Gross, Leach e Bauen, 2003, e Oliveira *et al.*, 2018).

O aproveitamento da energia das ondas é realizado por meio de dispositivos conversores conhecidos como WECs (*Wave Energy Converters*). Esses dispositivos são projetados para capturar a energia cinética e potencial das ondas e convertê-las em eletricidade. Embora várias abordagens e tecnologias tenham sido propostas, até agora nenhuma tecnologia dominante se consolidou para converter a energia das ondas em eletricidade. Com base em seu princípio de funcionamento, os WECs podem ser subdivididos em três categorias principais: Coluna de Água Oscilante (CAOs), Corpos Ativados por Ondas (WABs) e Dispositivos de Galgamento (OTDs) (Oteinis, 2022; Ahamed, McKee e Howard, 2020; Drew, Plummer e Sahinkaya, 2009; e Zhang *et al.*, 2021). No presente trabalho, o enfoque será nos dispositivos CAOs, de modo que os demais não serão discutidos aqui, podendo ser encontrados nos estudos supracitados.

O Conversor de Energia das Ondas CAO é composto, fundamentalmente, por uma câmara hidropneumática conectada a um duto de escoamento de ar. A câmara está aberta na parte inferior para a superfície livre da água do mar, enquanto o duto de ar está aberto para a atmosfera. Devido à incidência das ondas na câmara, a coluna de água dentro dela realiza um movimento como o de um pistão, comprimindo e descomprimindo o ar, o que gera um escoamento alternado através do duto. Esse escoamento de ar aciona uma turbina instalada no duto, que, por sua vez, movimenta um gerador de eletricidade (Falcão e Henriques, 2015).

A eficiência desse tipo de dispositivo está diretamente relacionada ao design adequado para maximizar o aproveitamento dos fluxos de energia. Nesse sentido, o Design Construtual, que consiste na ideia central de que a forma de um sistema deve ser projetada de maneira a facilitar os fluxos de energia, levando em conta as interações entre estes fluxos (Bejan e Lorente, 2008), apresenta uma abordagem teórica relevante. A aplicação do Design Construtual aos WECs, em particular aos CAOs, pode otimizar a captação da energia das ondas ao considerar as configurações geométricas que melhor direcionam e utilizam os escoamentos de ar e água no sistema, melhorando a conversão de energia e, consequentemente, a geração de eletricidade.

Vários trabalhos empregando o Design Construtual aplicado no contexto dos dispositivos CAOs podem ser encontrados na literatura. Dentre eles, pode-se citar,

inicialmente, os estudos realizados por Lima *et al.* (2017a,b), em que em ambos foram realizadas análises numéricas para a conversão da energia das ondas do mar. Com o intuito de otimizar a forma e a configuração dos sistemas, melhorando, consequentemente, seus desempenhos, o método Design Construtal foi aplicado em ambas as investigações. Embora em ambos os artigos seja avaliada a potência hidropneumática do dispositivo, em Lima *et al.* (2017a) buscou-se entender como a geometria afeta o comportamento do sistema, enfatizando-se as análises numéricas e geométricas da região de transição do dispositivo (região entre a câmara e o duto de ar do CAO) e focando-se na interação água-ar, enquanto o segundo artigo foi focado na avaliação da eficiência energética e na conversão de energia, analisando como o design pode otimizar esta potência. Como resultados, no primeiro trabalho foram obtidos ganhos de 69,90% em relação a configurações analisadas anteriormente pelos próprios autores, enquanto no segundo o aumento da potência hidropneumática chegou a 92,14%, indicando que as variações na geometria da região de transição são cruciais para otimizar a eficiência do conversor.

Gomes *et al.* (2018) realizaram um estudo numérico para investigar a influência da geometria no desempenho através da análise da relação entre a altura do dispositivo e o seu comprimento em diferentes condições. Como abordagem de otimização, o objetivo principal foi maximizar a potência hidrodinâmica média quadrática ( $Pot_{RMS}$ ) do dispositivo, o qual foi submetido a ondas regulares de diferentes períodos em escala real. Os resultados mostraram que a forma otimizada pode levar a uma  $Pot_{RMS}$  cerca de 11 vezes superior à obtida com a forma menos eficiente. Além disso, foi identificado que a relação ótima entre a altura e o comprimento do conversor foi quatro vezes maior que aquela entre a altura e o comprimento da onda incidente.

Já Picanço *et al.* (2019) buscaram otimizar o dispositivo com formato de duplo trapézio. A escolha por esta geometria especificamente foi devido às suas características aerodinâmicas e hidrodinâmicas. Foram utilizadas na pesquisa simulações numéricas para avaliar a eficiência do dispositivo sob condições de ondas regulares, com o objetivo de identificar a configuração geométrica capaz de maximizar a conversão de energia. Os resultados mostraram que, para a onda com período de 7,5 s, o dispositivo apresentou o melhor desempenho, com uma potência hidropneumática cerca de 1200 vezes maior em comparação ao pior resultado obtido, evidenciando o fato de que certas adaptações na geometria podem resultar em uma melhor captura de energia.

Maciel *et al.* (2023) exploraram a otimização do dispositivo juntamente com uma metodologia capaz de gerar ondas aleatórias de um estado do mar real, em que os dados espectrais marinhos são convertidos em séries temporais de elevação da superfície livre, as quais são processadas e convertidas em componentes de velocidade orbital das partículas de água. A potência hidropneumática disponível (a qual refere-se à quantidade de energia que pode ser extraída de um sistema que combina ar e água, por exemplo) foi medida em valores que superaram o desempenho de geometrias menos eficientes, destacando a importância da adaptação ao estado do mar. No trabalho foi sugerido que a

implementação de designs adaptativos, que considerem as condições específicas do ambiente marinho, podem melhorar significativamente a viabilidade econômica e a técnica dos conversores de energia de ondas.

Lima *et al.* (2024) analisaram a otimização geométrica do dispositivo com cinco câmaras acopladas. Foram explorados diferentes arranjos e formas das câmaras, focando na dinâmica do escoamento e na interação com as ondas. Os resultados demonstraram que a geometria das câmaras tem influência direta na performance do conversor, de modo que foram identificadas configurações que otimizaram a captação de energia das ondas, em que o melhor desempenho alcançado representou uma melhoria de 98,6% em comparação com o pior caso analisado.

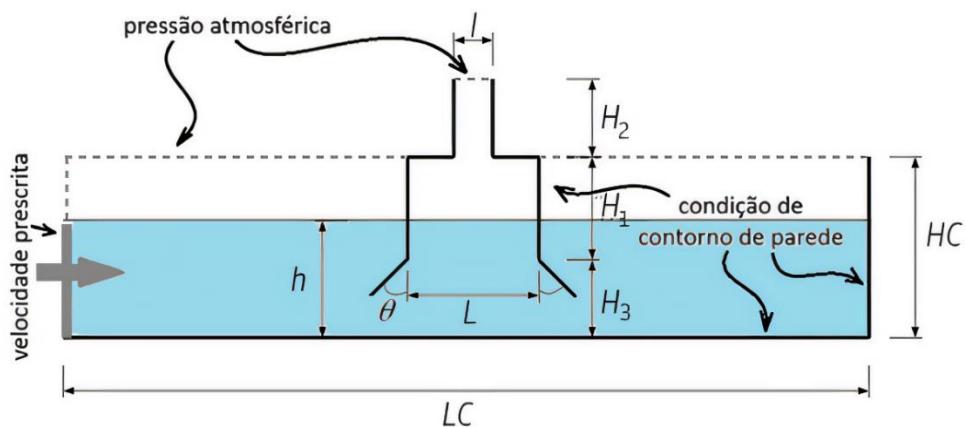
Por fim, todos estes estudos reforçam a relevância do Design Construtual na busca de um melhor aproveitamento das condições ambientais reais, uma vez que a aplicação do método conduziu a soluções capazes de aumentar a eficiência dos sistemas. Vários outros trabalhos usaram de modelagem computacional para investigar o comportamento de dispositivos do tipo CAO e, assim, propor melhorias nos sistemas de conversão de energia, porém empregando metodologias diferentes do Design Construtual. Dizadji e Sajadian (2011), Senturk e Ozdamar (2012), Zhang, Zou e Greaves, (2012), Bouali e Larbi (2013) e Letzow *et al.* (2017) são alguns exemplos de autores que também estudaram os dispositivos de coluna de água oscilante, porém com outras metodologias de otimização.

Desse modo, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto da configuração geométrica de um aparato inserido na região inferior do dispositivo CAO em seu desempenho ao se assumir uma incidência de ondas regulares em escala real. Para isso, utilizou-se uma combinação de dinâmica de fluidos computacional (CFD), método Design Construtual e técnica de busca exaustiva. Como grau de liberdade foi adotado o ângulo de inclinação do aparato, enquanto as dimensões do CAO foram mantidas constantes e iguais àquelas utilizadas por Gomes *et al.* (2018) na configuração que apresentou a maximização de  $Pot_{RMS}$  para a incidência de ondas regulares com período de 5 s. Um domínio computacional composto por um conversor CAO dentro de um canal de ondas foi construído, discretizado e simulado com o software ANSYS, utilizando o pacote CFD FLUENT. Para lidar numericamente com a interação água-ar, foi adotado o modelo multifásico de volume de fluido (VOF), conforme utilizado anteriormente em diversos trabalhos que analisaram problemas similares (Dizadji e Sajadian, 2011; Senturk e Ozdamar, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Bouali e Larbi, 2013; Letzow *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2017a,b; e Picanço *et al.*, 2019).

## 2 METODOLOGIA

Tendo em vista que o conceito de coluna de água oscilante (CAO) foi o pioneiro no desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento da energia das ondas do mar, e ainda é amplamente considerado pela comunidade de especialistas em conversão de

energia das ondas como a melhor opção disponível pela indústria (Sheng, 2022), é de fundamental importância estudar este tipo de sistema. Este tipo de configuração pode ser simulado computacionalmente, avaliando-se a interação entre a água, o ar e a estrutura do conversor CAO através de um canal de ondas onde o dispositivo é inserido, assim como foi feito em Dizadji e Sajadian (2011), Senturk e Ozdamar (2012), Zhang *et al.* (2012), Bouali e Larbi (2013), Letzow *et al.* (2017), Lima *et al.* (2017a, b) e Picanço *et al.* (2019). Com base em parâmetros como o período ( $T$ ), a altura ( $H$ ) e a profundidade de propagação da onda ( $h$ ), é possível determinar as dimensões do domínio computacional, incluindo o comprimento do canal de ondas ( $LC$ ) e a altura do canal de ondas ( $HC$ ), conforme ilustrado na figura 1.



**Figura 1:** Domínio computacional.

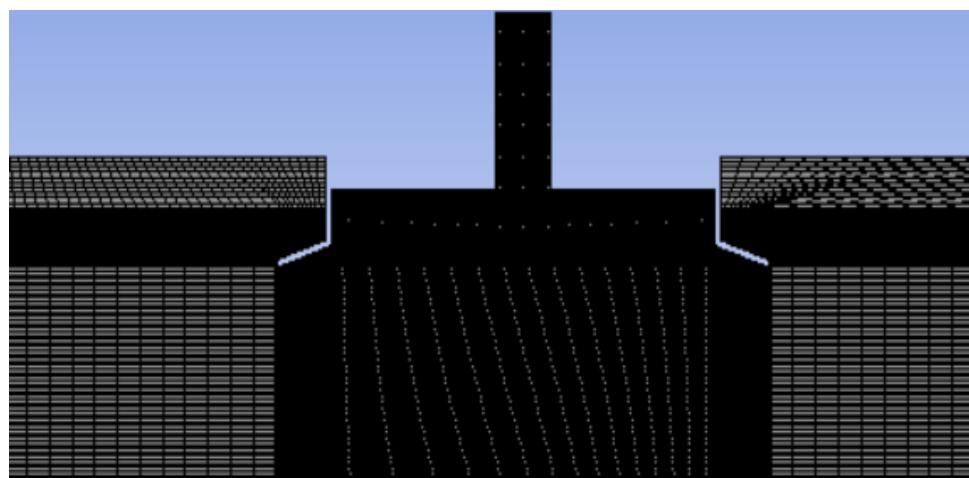
As medidas do canal foram definidas conforme aspectos considerados nos estudos de Liu, Hyun e Hong, (2011) e Ramalhais (2011), e as medidas do CAO foram baseadas nas recomendações de dimensões da câmara hidropneumática que acarretou na maximização de  $Pot_{RMS}$  em Gomes *et al.* (2018). Logo, no presente estudo, tem-se:  $h = 10$  m,  $H = 1$  m,  $HC = 13$  m,  $\lambda = 37,6$  m,  $LC = 188$  m,  $H_1 = 2$  m,  $H_2 = 6,9531$  m,  $H_3 = 9,25$  m,  $L = 18,8$  m e  $l = 2,3177$  m. Sendo:  $\lambda$  o comprimento de onda,  $H_1$  a altura da câmara hidropneumática,  $H_2$  a altura do duto da turbina,  $H_3$  a profundidade de submersão,  $L$  o comprimento da câmara hidropneumática e  $l$  o comprimento do duto da turbina. O grau de liberdade que é variado neste trabalho é o ângulo  $\theta$  do aparato, como mostrado na figura 1; o comprimento do aparato é mantido constante em 2,5 m.

Ainda na figura 1 é possível observar as condições de contorno adotadas na modelagem do problema, que seguem integralmente as recomendações adotadas por Gomes *et al.* (2018), onde uma condição de contorno de parede foi imposta na extremidade direita e no fundo do canal de ondas. Na extremidade esquerda é imposta como condição de entrada (gerador de ondas), e, na região representada por linhas tracejadas, condição de saída (saída de pressão); por fim, como condição inicial, assume-se que a água e o ar dentro do canal de ondas estão em repouso.

Uma vez construído o domínio computacional, optou-se por utilizar parâmetros de qualidade da malha previamente validados na literatura, dispensando a necessidade de um estudo específico sobre a qualidade da malha gerada para este trabalho.

Essencialmente, a análise de convergência da malha consiste na determinação de uma situação na qual o nível de refinamento não seja capaz de alterar significativamente os resultados obtidos. Logo, uma forma de se alcançar este objetivo é através da realização de simulações sucessivas de malhas cada vez mais refinadas, de modo a encontrar o cenário em que os resultados não apresentem flutuações significativas, indicando assim, a convergência da solução e confirmando que a malha é adequada para os estudos que se almeja realizar. Entretanto, por simplicidade, optou-se por empregar neste trabalho os parâmetros de discretização temporal e de refinamento da malha já validados na literatura, visto que o problema em estudo aqui é análogo àquele anteriormente estudado por Gomes *et al.* (2018), exceto pela inserção de um aparato na parte inferior do CAO. A justificativa para esta escolha é devido ao fato de que Gomes *et al.* (2018) avaliaram extensivamente os efeitos da discretização espacial do domínio e da definição do passo de tempo das simulações baseados nos já rigorosos estudos de Liu *et al.* (2007, 2011).

Assumindo as condições de contorno propostas no presente trabalho, optou-se por uma discretização espacial do domínio computacional com base na malha sugerida por Liu *et al.* (2011) e Gomes *et al.* (2018). A malha foi tratada com maior nível de refinamento em algumas regiões de interesse, como, por exemplo, na superfície livre, em que foi utilizada a técnica de malha *stretched* (Mavriplis, 1997). A discretização vertical foi imposta com 40 divisões ( $H/20$ , onde  $H$  é a altura da onda, cujo valor foi informado anteriormente) e a horizontal com 250 divisões ( $\lambda/50$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, cujo valor foi definido anteriormente). Na região acima da superfície livre foi utilizada uma discretização vertical de 10 divisões e, abaixo dela, assumiram-se 60 divisões. Por fim, na região do CAO foram adotadas células computacionais com dimensões de 0,1 m x 0,1 m. Na figura 2 é possível observar a malha gerada no domínio computacional. Para a discretização temporal, um intervalo de  $T/500$  (em que  $T$  representa o período da onda, com o valor descrito anteriormente) foi adotado, baseando-se nos estudos de Ramalhais (2011), Gomes e Rocha (2014) e Gomes *et al.* (2018).



**Figura 2:** Geração de malha do domínio computacional.

É fundamental ressaltar que, para a geração de ondas regulares no software FLUENT, as componentes da velocidade da onda nas direções horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) foram

aplicadas como condições de contorno, ou seja, entrada de velocidade prescrita, utilizando uma função definida pelo usuário (UDF) (Gomes *et al.*, 2009). Estas componentes de velocidade variam com o espaço e o tempo com base na Teoria de Stokes de Segunda Ordem, e são computadas como (Dean e Dalrymple, 1991):

$$u = \frac{H}{2} \vec{g} k \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{H^2}{4} \omega k \frac{\cosh(2k(k + z))}{\sin^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t), \quad (1)$$

$$w = \frac{H}{2} \vec{g} k \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{H^2}{4} \omega k \frac{\sinh(2k(k + z))}{\cos^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t), \quad (2)$$

em que  $k$  é o número de onda ( $\text{m}^{-1}$ ),  $z$  é a posição vertical (m),  $x$  é a coordenada espacial (m),  $\omega$  é a velocidade angular (rad/s),  $t$  é o tempo (s) e  $\vec{g}$  é o vetor da aceleração gravitacional.

Para realizar as medições das variáveis de interesse, que são pressão, velocidade e vazão mássica do ar, no modelo computacional, foi inserida uma sonda numérica, posicionada horizontalmente, localizada na metade do comprimento do duto da turbina do dispositivo CAO.

Para o dimensionamento via Design Construtual, será analisado o desempenho do CAO através da potência hidropneumática quadrada média disponível,  $Pot_{hid RMS}$  (W), para seis ângulos  $\theta$  diferentes no aparato ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  e  $90^\circ$ ), e comparados à estrutura original. Esta grandeza é definida como (Dizadji e Sajadian, 2011):

$$Pot_{hid RMS} = \left( P_{ar RMS} + \frac{\rho_{ar} \cdot v_{ar RMS}^2}{2} \right) \dot{m}_{ar RMS} \quad (3)$$

Sendo  $P_{ar RMS}$  a pressão média RMS do ar no duto da turbina do CAO (Pa),  $\rho_{ar}$  a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v_{ar RMS}$  a velocidade média RMS do ar (m/s) e  $\dot{m}_{ar RMS}$  a vazão mássica média RMS do ar ( $\text{kg/s}$ ), ambas grandezas também avaliadas no duto da turbina do CAO.

### 3 MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

Este capítulo foca na análise do escoamento de uma mistura de água e ar, utilizando equações de conservação de massa e quantidade de movimento, aplicadas através do método dos volumes finitos (MVF) (Kundu e Cohen, 2008). Para modelar esse escoamento multifásico, o método Volume de Fluido (VOF) é empregado, o qual é válido para escoamentos com duas ou mais fases imiscíveis (Ferziger e Perić, 2002).

Para um escoamento isotérmico, laminar e incompressível da mistura de ar e água, a equação de conservação de massa é dada por (White, 2006, e Schlichting, 1979):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

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

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é expressa como (Schlichting, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (5)$$

onde  $p$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho g$  são as forças de flutuabilidade ( $\text{N/m}^3$ ) e  $\bar{\tau}$  é o tensor de taxa de deformação ( $\text{N/m}^2$ ).

A interação do escoamento da mistura água-ar com o dispositivo CAO é modelada via método VOF. A fração volumétrica ( $\alpha_q$ ) foi utilizada para representar as fases ar e água dentro de um volume de controle. Estas frações são contínuas no espaço e no tempo, e sua soma dentro de um volume de controle é sempre igual a 1 (Fluent, 2006).

A equação de transporte adicional para uma das frações volumétricas é (Srinivasan e Salazar, 2011):

$$\frac{\partial \rho_{aq}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_q \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

A massa específica e a viscosidade dinâmica da mistura são determinadas, respectivamente, por (Srinivasan e Salazar, 2011):

$$\rho = \alpha_{agua} \rho_{agua} + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (7)$$

$$\mu = \alpha_{agua} \mu_{agua} + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (8)$$

Para resolver as equações (4)-(8), foi utilizado o software FLUENT, que é baseado no MVF (Patankar, 1980, Issa, 1986, Perić *et al.*, 1988, Versteeg e Malalasekera, 1995, e ANSYS, 2020). Além das demais configurações descritas na tabela 1, assumiu-se, em todas as simulações numéricas, fatores de sub-relaxamento com valores de 0,3 e 0,7 para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento (equações (4) e (5), respectivamente). A escolha por estas configurações e parâmetros foi baseada em estudos anteriores que avaliaram condições similares àquelas consideradas no presente artigo (Liu *et al.*, 2007, 2011, Dizadji e Sajadian, 2011, Senturk e Ozdamar, 2012, Zhang *et al.*, 2012, Bouali e Larbi, 2013, Letzow *et al.*, 2017, Lima *et al.*, 2017a,b, Gomes *et al.*, 2018, e

Picanço *et al.*, 2019). A tabela 1 compila todas as configurações inseridas do software FLUENT para a modelagem do problema.

**Tabela 1:** Configurações do software para modelagem computacional.

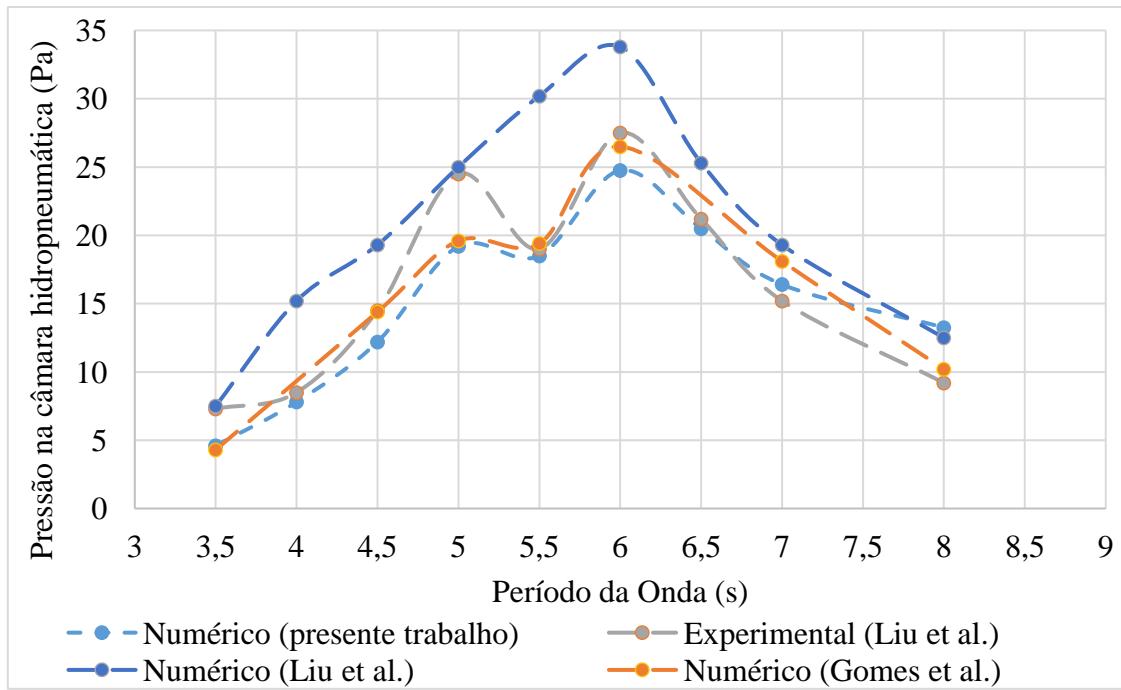
Configuração	Opção selecionada
Modelo	Modelo multifásico VOF ( <i>Volume of fluid</i> )
Função de interpolação	<i>Upwind</i> de segunda ordem
Acoplamento pressão-velocidade	PISO ( <i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i> )
Esquemas de avanço no tempo	NITA ( <i>Non-iterative time advancement</i> )
Teoria de ondas	Stokes de Segunda ordem
Regime do escoamento	Laminar
Fração de volume	Geo-construct
Vol. cont. inercial para computar a pressão	PRESTO! ( <i>PRESSure STaggering Option</i> )

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

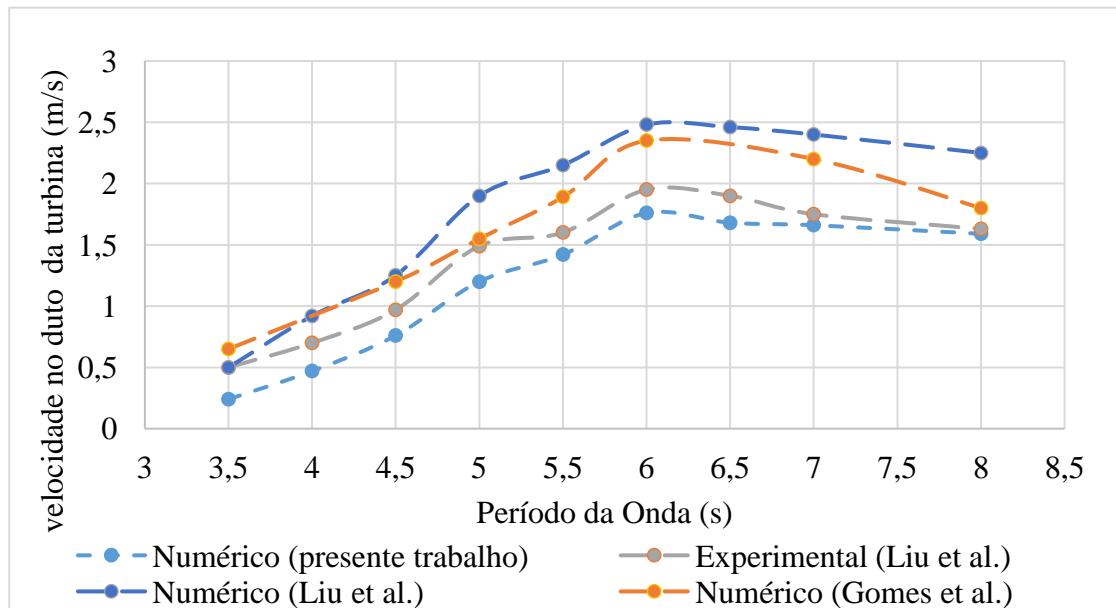
### 4.1 Validação do Modelo Numérico

A validação do modelo numérico foi realizada por meio da comparação entre a velocidade do escoamento de ar no duto da turbina e a pressão hidropneumática na câmara obtidas com o modelo proposto e aquelas previstas experimentalmente por Liu *et al.* (2007) e, numericamente, por Gomes *et al.* (2018) e Liu *et al.* (2011). A velocidade e a pressão foram avaliadas para diferentes ondas, variando o período destas no intervalo de  $3,5 \text{ s} \leq T \leq 8,0 \text{ s}$  e fixando a altura em 1 m, como pode ser visto nas figuras 3 e 4; as demais características das ondas estão descritas na seção 2. Observando ambas as figuras, percebe-se uma boa concordância entre os resultados obtidos para as duas grandezas avaliadas e os comportamentos relatados em trabalhos numéricos anteriores (Liu *et al.*, 2011, e Gomes *et al.*, 2018), bem como com os dados experimentais de Liu *et al.* (2007). Dessa forma, o modelo proposto foi considerado devidamente validado, apresentando um erro médio em relação aos resultados experimentais de 10,00% para a pressão na câmara do CAO e de 11,58% para a velocidade no duto da turbina. Esses erros médios são inferiores aos obtidos pelos resultados numéricos de Gomes *et al.* (2018) e Liu *et al.* (2011) em relação aos resultados experimentais de Liu *et al.* (2007), que foram, respectivamente, 10,87% e 26,97% para a pressão na câmara do CAO e de 20,51% e

29,47% para a velocidade no duto da turbina. É importante destacar que, para a validação do modelo, foram analisadas apenas a velocidade do escoamento de ar no duto da turbina e a pressão hidropneumática na câmara, diferentemente do caso do CAO, que foi submetido à avaliação geométrica por meio do Design Construtal. Essa limitação decorre do fato de que apenas esses dois parâmetros foram fornecidos experimentalmente por Liu *et al.* (2007).



**Figura 3:** Comparação dos resultados experimentais e numéricos das pressões medidas na câmara do dispositivo CAO.



**Figura 4:** Comparação dos resultados experimentais e numéricos das velocidades medidas no duto da turbina do dispositivo CAO.

## 4.2 Design Construtal Aplicado à Avaliação Geométrica

Como mencionado anteriormente, a proposta deste trabalho é avaliar numericamente o impacto da inserção do aparato em diferentes ângulos no CAO na potência hidropneumática quando submetida a ondas regulares com período de 5 s em escala real. Para isso, foram testadas diferentes posições do ângulo  $\theta$ , conforme mostrado na figura 1, enquanto o comprimento do aparato foi mantido constante em 2,5 m. Para este tipo de situação é possível utilizar a técnica de busca exaustiva, a fim de se obter a geometria que conduz à performance superior entre as investigadas, ou seja, testam-se todas as possibilidades geométricas estabelecidas com o Design Construtal (devido à variação do ângulo  $\theta$ ). Para o presente trabalho, optou-se por investigar a variação de seis ângulos de inclinação em relação à vertical para o aparato ( $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$  e  $90^\circ$ ). O objetivo é, portanto, maximizar a potência hidropneumática RMS disponível do conversor CAO (equação (3)).

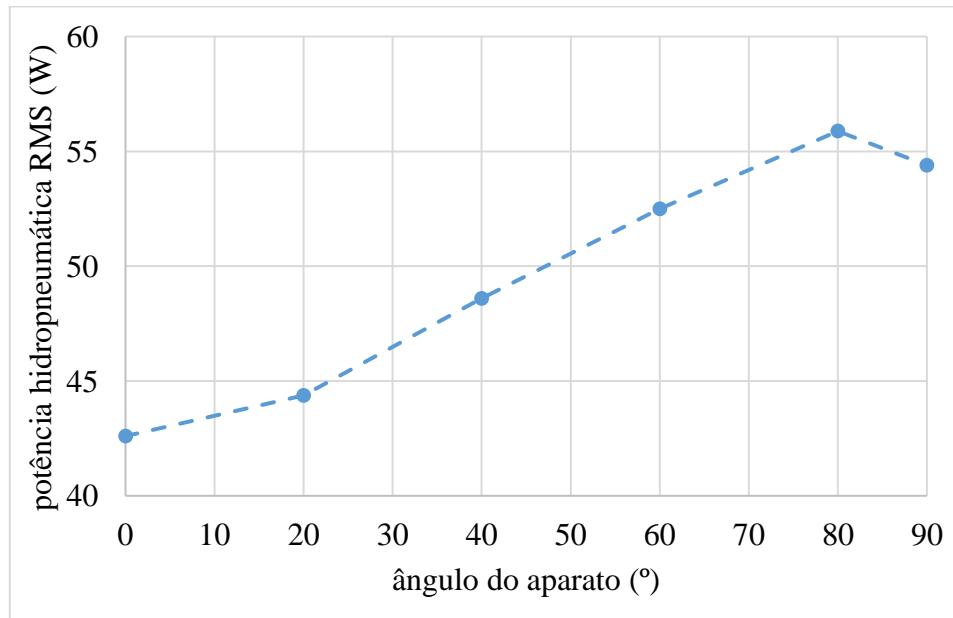
Na tabela 2 é possível observar os valores obtidos de velocidade, vazão mássica e pressão do ar no duto da turbina do dispositivo CAO, bem como a potência hidropneumática RMS disponível,  $P_{othidRMS}$ , calculada. É importante salientar que todas as medidas foram obtidas através de uma sonda numérica posicionada horizontalmente no centro do duto da turbina do CAO, permitindo a obtenção de uma média ponderada por área.

Analizando a tabela 2, nota-se que a inclinação do aparato na base do CAO influencia diretamente o desempenho do sistema, principalmente em termos da potência hidropneumática. A velocidade do escoamento, a pressão na câmara e a vazão mássica aumentam à medida que a inclinação passa de  $0^\circ$  para  $80^\circ$ , atingindo seus valores máximos nesta angulação. A partir desse ponto, em  $90^\circ$ , observa-se uma leve redução em todos os parâmetros, o que sugere que a eficiência do sistema alcança um pico na faixa de  $80^\circ$ . A potência hidropneumática RMS disponível, que reflete diretamente a capacidade de conversão de energia, segue a mesma tendência como pode ser visualizado na figura 5, começando em 42,60 W/m para  $0^\circ$  e alcançando o valor máximo de 55,58 W/m em  $80^\circ$ . Após este ponto, a potência decresce ligeiramente para 54,39 W/m em  $90^\circ$ . Este comportamento reforça a ideia de que a angulação ótima para maximizar a conversão de energia situa-se em torno de  $80^\circ$ , onde o sistema atinge a sua melhor performance.

**Tabela 2:** Valores obtidos na simulação numérica para as grandezas avaliadas.

Inclinação do aparato ( $^\circ$ )	Velocidade (m/s)	Pressão (Pa)	Vazão mássica (kg/s)	Potência hidropneumática RMS (W)
0	1,32	7,50	3,88	42,60
20	1,41	7,52	3,96	44,37
40	1,48	7,90	4,10	48,60

60	1,54	8,20	4,24	52,50
80	1,57	8,39	4,40	55,58
90	1,55	8,32	4,33	54,39



**Figura 5:** Potência hidropneumática com diferentes ângulos do aparato.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a influência da geometria no desempenho de um conversor de energia de ondas do tipo coluna de água oscilante. Os resultados mostraram que a angulação do aparato na base do conversor de energia tem um impacto significativo no desempenho do sistema, principalmente em relação à potência hidropneumática disponível. Observou-se um aumento progressivo na velocidade, na pressão, na vazão mássica e, consequentemente, na potência hidropneumática RMS disponível à medida que a angulação foi variada de 0° a 80°. A inclinação de 80° foi identificada como o ponto de maior eficiência, com uma potência máxima de 55,58 W/m, ocorrendo uma leve queda em todas as grandezas avaliadas quando o valor do ângulo atingiu 90°. Esta redução na eficiência do sistema para ângulos superiores a 80° sugere que inclinações acima deste valor geram perdas de eficiência, possivelmente devido a efeitos de dissipação de energia ou aumento da turbulência. Portanto, dentre os casos analisados, a otimização do desempenho do CAO, em termos de conversão de energia, foi alcançada com uma angulação próxima a 80°, sendo este valor o mais adequado para maximizar a potência hidropneumática disponível.

Os resultados também destacam a importância de futuras investigações para avaliar os limites do sistema e explorar como diferentes condições de operação e design

podem influenciar o desempenho geral. Portanto, em trabalhos futuros, espera-se explorar diferentes geometrias do aparato, variando não apenas o ângulo, mas também a forma e as dimensões. O objetivo desta abordagem é identificar configurações que maximizem a potência hidropneumática, otimizando a interação entre o escoamento de água, provocado pela incidência das ondas, e a dinâmica da coluna de água na câmara hidropneumática, assim como o escoamento de ar no duto da turbina.

## 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. M. Moreira e R. Fonseca agradecem ao CNPq e à CAPES por suas bolsas de doutorado e pós-doutorado. L. Rocha, E. Santos e L. Isoldi agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Ahamed, R., McKee, K., Howard, I. (2020). Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review. Em: *Ocean Engineering* 204, pp. 107248.
- Alves, J. S., Gato, L. M. C., Falcão, A. F. O., Henriques, J. C. C. (2021). Experimental investigation on performance improvement by mid-plane guide-vanes in a biplane-rotor Wells turbine for wave energy conversion. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150, pp. 111497.
- ANSYS Inc. (2020). *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS Inc.
- Bejan, A. e Lorente, S. (2008). *Design with Constructal Theory*. USA: Wiley.
- Bouali, B., Larbi, S. (2013). Contribution to Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter, Em *Energy Procedia* 36, pp. 565-573.
- Cruz, J. M. B. P., Sarmento, A. J. N. A. (2004). *Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais*. Amadora: Instituto do Ambiente.
- Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Vol. 2, Singapura: World Scientific.
- Dizadji, N., Sajadian, S.E. (2011). Modeling and Optimization of the Chamber of OWC System. Em: *Energy* 36, pp. 2360-2366.
- Drew, B., Plummer, A. R., Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. Em: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy* 223, n. 8, pp. 887-902.

- Enerdata (2022). *Enerdata Global Energy Statistical Yearbook 2022*. (<https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>). 03 de julho 2024.)
- Falcão, A. F. O., Henriques, J. C. C. (2015). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. Em: *Renewable Energy* 85, pp. 1391-1424.
- Fluent Inc. (2006). *Fluent 6.3 User's Guide*. Fluent Inc.
- Ferziger, J.H., Perić, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- Gomes, M. das N., Olinto, C. R., Rocha, L.A.O., Souza, J.A., Isoldi, L. A., (2009). Computational Modeling of a Regular Wave Tank. Em: *Therm. Eng.* 8, pp. 44-50.
- Gomes, M. das N., Rocha, L. A. O. (2014). *Wave Propagation, Numerical Simulation of Regular Wave Propagation in Tanks*, Academy Publish.
- Gomes, M. N., Lorenzini, G., Rocha, L. A. O., Santos, E. D., Isoldi, L. A. (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, n. 2, pp. 173–190.
- Gross, R., Leach, M., Bauen, A. (2003). Progress in renewable energy. *Environment International* 29, pp. 105-122.
- Issa, R. I. (1986). Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting. Em: *Journal of Computational Physics* 62(1), pp. 40-65.
- Kundu, P.K., Cohen, I.M. (2008). *Fluid Mechanics*. Academic Press.
- Letzow, M., Levien, F. V., Pons, R. D., Gomes, M. D. N., Souza, J. A., Rocha, L. A. O., Isoldi, L. A., Santos, E. D. (2017). Avaliação geométrica da câmara de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo OWC para diferentes comprimentos da borda frontal. Em: *Revista Brasileira de Energias Renováveis* 6, n. 3, pp. 454-471.
- Lima, Y. T. B.; Rocha, L. A. O.; Gomes, M. N.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A. (2017a). Análise numérica e geométrica com design construtual da região de transição para um dispositivo do tipo coluna de água oscilante (CAO). Em: *Scientia Plena* 13, n. 4.
- Lima, Y. T. B., Rocha, L. A. O., Gomes, M. D. N., Santos, E. D., Isoldi, L. A. (2017b). Aplicação do método design construtual na avaliação numérica da potência hidropneumática de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante com região de transição trapezoidal. Em: *Revista Brasileira de Energias Renováveis* 6, n. 3, pp. 376-396.
- 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, pp. 1-20.
- Liu, Z., Hyun, B. S., Jin, J. Y. (2007). Numerical wave tank using two-phase VOF model. Em: *Proc. of the KOSMEE Fall Annual Meeting, Incheon, Korea: The Korean Society for Marine Environmental Engineering*, pp. 153-159.
- Liu, Z., Hyun, B., Hong, K. (2011). Numerical Study of Air Chamber for Oscillating Water Column Wave Energy Convertor. Em: *China Ocean Engineering* 25, pp. 169-178.

- Maciel, R. P., P. H. Oleinik, E. D. Santos, L. A. O. Rocha, B. N. Machado, M. N. Gomes e L. A. Isoldi (2023). “Constructal Design applied to an oscillating water column wave energy converter device under realistic sea state conditions”. Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 11, p. 2174.
- Mavriplis, D.J., (1997). Unstructured Grid Techniques. Em: *Ann. Rev. Fluid Mech.* 29, pp. 473-514.
- Oliveira, A. P. M., Fuganholi, N. S., Cunha, P. H. S., Barelli, V. A., Bunel, M. P. M., Novazzi, L. F. (2018). Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis. Em: *The Journal of Engineering and Exact Sciences* 4, n. 1.
- Oteinis, S. (2022). Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161.
- Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* (1980). New York: McGraw Hill.
- Perić, M., Kessler, R., Scheuerer, G. (1988). Comparison of Finite-Volume Numerical Methods with Staggered and Collocated Grids. Em: *Computers & Fluids* 16(4), pp. 389-403.
- Picanço, C. E. P., Oliveira, D. M., Cunha, M., Isoldi, L. A., Santos, E. D.; Rocha, L. A. O.; Gomes, M. N. (2019). Aplicação de design construtual para a análise geométrica de um dispositivo coluna de água oscilante no formato de duplo trapézio submetido a ondas regulares. Em: RIPE 5, pp. 186-194.
- Ramalhais, R. S. (2011). *Numerical Study of a Oscillating Water Converter (OWC) Wave Energy Converter*, Msc. Thesis in Mechanical Engineering, Portugal: University Nova of Lisboa.
- Schlichting, H., Boundary Layer Theory. (1979). 7<sup>a</sup> ed., New York: McGraw-Hill.
- Senturk, U., Ozdamar, A. (2012). Wave Energy Extraction by an Oscillating Water Column with a Gap on the Fully Submerged Front Wall. Em: *Appl. Ocean Res.* 27, pp. 174-182.
- Sheng, W. (2022). *Wave Energy Converters*. Encyclopedia of Ocean Engineering, Springer.
- Srinivasan e Salazar (2011). Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. Em *Applied Mathematical Modeling* 35, n. 8, pp. 3710-3730.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*. England: Longman.
- White, F.M. (2006). *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill.
- Zhang, Y., Zou, Q.P., Greaves, D. (2012). Air-Water Two-Phase Flow Modeling of Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column Device, Em: *Renewable Energy* 41, pp. 159–170.
- Zhang, Y., Zhao, Y., Sun, W., Li, J. (2021). Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, pp. 110135.