



Validação e verificação de modelo numérico para simulação do princípio de funcionamento do coluna de água oscilantedo

Validation and verification of numerical model for simulation of the operating principle of the oscillating water column

S. O. Sabedra*; E. A. Pinto Jr; L. A. O. Rocha; E. D. Santos; L. A. Isoldi

Universidade Federal do Rio Grande, 96203-900, Rio Grande-RS, Brasil

**sersana@hotmail.com*

(Recebido em 05 de abril de 2023; aceito em 16 de agosto de 2023)

Inicialmente, o presente trabalho apresenta a validação de um modelo computacional axissimétrico empregando a Metodologia Ar para a simulação numérica de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), através de resultados experimentais de um escoamento turbulento sobre um degrau descendente; característica essa que se assemelha ao escoamento do ar no interior de um dispositivo CAO. Posteriormente, o modelo foi verificado com os resultados numéricos produzidos num estudo onde o escoamento de ar turbulento sobre o degrau descendente foi simulado e a validação destes também foi realizada com os dados experimentais utilizados na validação do presente estudo. O modelo que utiliza $\kappa - \epsilon$ padrão para turbulência, a *Enhanced Wall Function* como função de parede e o SIMPLE para o acoplamento pressão velocidade, atingiu um tempo de processamento de aproximadamente 30 min e apresentou um valor médio de MAE de 1,25% na validação e de 2,53% na verificação, sendo MAE a média do erro absoluto.

Palavras-chave: energia das ondas, validação, verificação.

Initially, the present work presents the validation of a computational model using the Ar Methodology for the numerical simulation of a converter of energy from sea waves into electrical energy of the Oscillating Water Column (OWC) type, through experimental results of a turbulent flow over a descending step; characteristic that resembles the flow of air inside an OWC device. Subsequently, the model was verified with the numerical results produced in a study where the turbulent air flow over the descending step was simulated and their validation was also performed with the experimental data used in the validation of the present study. The model that uses standard $\kappa - \epsilon$ for turbulence, the Enhanced Wall Function as the wall function and the SIMPLE for the pressure-velocity coupling, reached a processing time of approximately 30 min and presented an mean value of MAE of 1.25% in the validation and 2.53% in the verification, being MAE the mean absolute error.

Keywords: wave energy, validation, verification.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Jenniches (2018) [1], a transição do sistema global de energia elétrica para matrizes baseadas em fontes renováveis é uma das principais tendências da atualidade, uma vez que, além de reduzir a emissão de gases poluentes gerados pelo atual modelo, permite não somente a diversificação da produção energética como também sua descentralização. Ao mesmo tempo, a extração de energia das ondas do mar apresenta-se como uma possível alternativa frente ao aumento da demanda por energia elétrica, pois seu recurso global é de aproximadamente 32.000 TWh/ano em alto mar [2].

Diversas tecnologias têm sido propostas para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, porém, ainda não existe uma tecnologia consolidada. O conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), dentre as tecnologias propostas, é uma das mais promissoras. Estes dispositivos têm sido estudados por diversos autores, devido a sua robustez e simplicidade, características essenciais para a extração de energia em um ambiente tão hostil como o mar. Cabe destacar que uma grande parte dos protótipos de conversores de energia das ondas implantados no mar e que efetivamente geraram eletricidade são dispositivos CAO [3].

O princípio de funcionamento dos conversores CAO pode ser modelado computacionalmente através da Metodologia VOF, Metodologia Pistão ou Metodologia Ar. A Metodologia VOF,

utiliza o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) para simular um canal de ondas onde o conversor é inserido, considerando a interação das fases água e ar na geração das ondas que incidem no dispositivo CAO [4, 5]. Já a Metodologia Pistão baseia-se no fato de que o movimento da superfície da água no interior do conversor CAO pode ser tratado como um pistão plano movendo-se verticalmente. Essa metodologia, utiliza malha móvel e dispensa o canal de onda [5, 6]. Por fim, a Metodologia Ar, assim como a Metodologia Pistão, considera somente o conversor e o escoamento de ar em seu interior. Porém, nessa abordagem, o escoamento de ar é reproduzido através de uma equação senoidal, representando a variação da velocidade vertical do escoamento de ar causada pelo movimento da superfície da água na entrada do domínio [7, 8].

Nesse contexto, a presente proposta tem como objetivo validar e verificar um modelo computacional axissimétrico empregando a Metodologia Ar para a simulação numérica de um conversor do tipo CAO. A validação foi realizada a partir dos dados experimentais obtidos por Driver e Seegmiller (1985) [9], enquanto a verificação foi feita através dos resultados numéricos produzidos por Conde (2007) [10]. Cabe destacar, que o formato geométrico do dispositivo CAO estudado neste trabalho, por ser simétrico, permite a aplicação da condição de axissimetria, resultando em um domínio bidimensional com degrau descendente e, em seu interior, ocorre um escoamento de ar turbulento, essas características se assemelham ao que foi estudado tanto em Driver e Seegmiller (1985) [9] quanto em Conde (2007) [10].

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Coluna de água oscilante

De acordo com Falcão e Henriques (2016) [3], entre as tecnologias existentes para a conversão da energia das ondas do mar em eletricidade está o dispositivo CAO, que é composto, fundamentalmente, por uma câmara hidropneumática e um duto onde uma turbina e um gerador elétrico são acoplados. A câmara é aberta abaixo da superfície livre da água do mar, enquanto o duto da turbina é aberto para a atmosfera. O movimento oscilante da superfície livre da água dentro da câmara, produzido pelas ondas incidentes, pode ser considerado como um movimento de pistão e faz com que o ar escoe, alternadamente, através da turbina, acionando o gerador elétrico.

2.2 Estudo experimental

Neste estudo, foi realizado um experimento de um escoamento interno de ar, turbulento, incompressível e estacionário, sobre um degrau descendente em um domínio bidimensional. A geometria do domínio, apresentada na Figura 1, bem como as condições do escoamento, são as definidas no caso C30 da Ercoftac Classic Database [11] com base nos ensaios experimentais de Driver e Seegmiller (1985) [9].

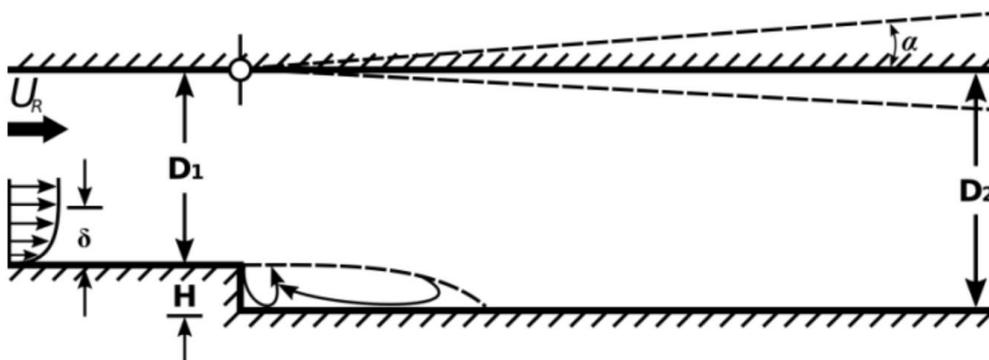


Figura 1: Geometria do escoamento sobre um degrau descendente (Fonte: Adaptado de Driver e Seegmiller [9]).

Os ensaios experimentais desenvolvidos por Driver e Seegmiller (1985) [9], foram realizados em um túnel de vento com uma seção transversal de $15,1 \times 10,16 \text{ cm}^2$ ($D_1 = 10,16 \text{ cm}$, $D_2 = 11,37 \text{ cm}$). O degrau descendente, com altura $H = 1,27 \text{ cm}$, situa-se 1 m após a seção de entrada do túnel. Nesta seção foi colocada uma faixa de folha abrasiva com 12,5 cm de comprimento em toda a largura do túnel, de forma a ser possível obter a camada limite completamente turbulenta a montante do degrau. O experimento foi realizado a uma velocidade constante de escoamento não perturbada de $UR = 44,2 \text{ m/s}$ e à pressão e temperatura ambientes, essas condições correspondem a um número de Mach, $Ma = 0,128$. A espessura da camada limite da parede foi de $\delta = 1,9 \text{ cm}$ e o número de Reynolds, $Re = 5000$ na seção situada a uma distância $4H$ a montante do degrau. Esse alto número de Reynolds foi escolhido para garantir que a camada limite fosse totalmente turbulenta a montante do degrau.

2.3 Estudo numérico

Aborda a validação e verificação do escoamento turbulento sobre um degrau descendente. As simulações foram efetuadas com o código comercial FLUENT utilizando as equações de Reynolds e o modelo de turbulência a uma equação de Spalart-Allmaras, para o acoplamento pressão velocidade o algoritmo SIMPLEC, e os termos convectivos foram interpolados pelos esquemas UDS e/ou QUICK [10]. Para a verificação foram efetuadas simulações em três condições de acordo com a escolha dos esquemas de interpolação para o termo convectivo: A - esquema UDS nas equações da quantidade de movimento e da viscosidade turbulenta modificada; B - esquema QUICK nas equações da quantidade de movimento e da viscosidade turbulenta modificada; e C - esquema QUICK nas equações da quantidade de movimento e esquema UDS na equação da viscosidade turbulenta modificada. Com dupla precisão, foi analisada a evolução do erro conforme o decrescimento da taxa residual, sendo constatado que, para este erro ser desprezável na estimativa do erro de discretização, é necessário que o resíduo seja inferior a 10^{-5} . Já a validação foi realizada através da comparação dos perfis das componentes de velocidade e a evolução da pressão e da tensão de cisalhamento nas paredes obtidos pelas abordagens A, B e C com os resultados experimentais de Driver e Seegmiller (1985) [9].

3. MATERIAL E MÉTODOS

O emprego da Metodologia Ar na simulação numérica de um conversor do tipo CAO permite reduzir o problema a um domínio com mudança de área pelo qual ocorre um escoamento interno e turbulento de ar. A aplicação da condição de axissimetria na modelagem computacional do conversor CAO permite o uso de um domínio bidimensional com degrau descendente. Levando em conta o princípio de funcionamento do conversor, é possível empregar uma velocidade prescrita como condição de entrada no domínio para representar o movimento de pistão causado pela incidência das ondas no interior do dispositivo. Já na saída, a imposição de uma pressão prescrita é uma condição adequada, pois boa parte dos dispositivos CAO possui uma ou mais aberturas para a atmosfera, através do duto da turbina, onde a pressão é a atmosférica. Características como a forma do domínio, o escoamento e as condições de contorno foram definidos a partir do experimento desenvolvido por Driver e Seegmiller (1985) [9], sendo então empregados no processo de validação do modelo computacional proposto; enquanto os resultados numéricos de Conde (2007) [10] foram adotados para sua verificação.

Para a definição da abordagem computacional, foram feitas combinações entre dois modelos de turbulência ($k - \varepsilon$ padrão e $k - \omega$ SST), três funções de parede (*Standard Wall Function*, *Scalable Wall Function* e *Enhanced Wall Treatment*) e quatro esquemas de solução para o acoplamento pressão velocidade (SIMPLE, SIMPLEC, PISO e Acoplado), que resultou em 16 diferentes modelos computacionais (ver Tabela 1). Todas as combinações da Tabela 1 foram simuladas no software FLUENT, que é baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), e analisadas durante o processo de validação.

Tabela 1: Modelos numéricos testados.

Modelo	Modelo de turbulência	Função de parede	Acoplamento pressão-velocidade
1	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Standart Wall Function	SIMPLE
2	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Standart Wall Function	SIMPLEC
3	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Standart Wall Function	PISO
4	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Standart Wall Function	Acoplado
5	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Scalable Wall Function	SIMPLE
6	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Scalable Wall Function	SIMPLEC
7	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Scalable Wall Function	PISO
8	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Scalable Wall Function	Acoplado
9	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Enhanced Wall Function	SIMPLE
10	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Enhanced Wall Function	SIMPLEC
11	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Enhanced Wall Function	PISO
12	$\kappa - \varepsilon$ padrão	Enhanced Wall Function	Acoplado
13	$\kappa - \omega$ SST	-	SIMPLE
14	$\kappa - \omega$ SST	-	SIMPLEC
15	$\kappa - \omega$ SST	-	PISO
16	$\kappa - \omega$ SST	-	Acoplado

Além disso, em todos os modelos testados, o esquema de interpolação *Upwind* de Segunda Ordem foi empregado na discretização espacial da pressão e no tratamento dos demais termos advectivos. Já o resíduo para a solução das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, assim como do modelo de turbulência, foi adotado 10^{-6} .

3.1 Modelagem numérica e matemática

Nas simulações numéricas, efetuadas para a escolha e validação do modelo, considerou-se o caso em que a parte superior do domínio, sob o qual ocorre o escoamento, está horizontal ($\alpha = 0^\circ$, ver Figura 2) e adimensionalizaram-se as coordenadas pela altura do degrau H e as componentes da velocidade pela velocidade de entrada UR . A origem do referencial foi colocada no canto inferior do degrau, assim, considerou-se que, na horizontal, o domínio está compreendido entre $-4 < x/H < 40$ e na vertical entre $0 < y/H < 9$, como indicado na Figura 2. Esses parâmetros também foram adotados por Conde (2007) [10].

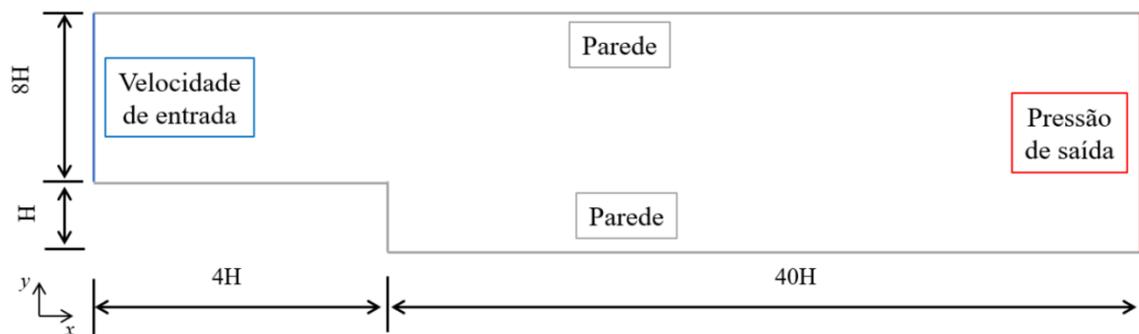


Figura 2: Dimensões do domínio e condições de contorno.

Como condição de entrada foi imposto um perfil de velocidade prescrita associado a perfis das componentes dos modelos de turbulência, sendo eles a energia cinética da turbulência e sua taxa de dissipação. Esses perfis foram obtidos através de uma regressão não-linear dos dados

disponibilizados pela Ercoftac Classic Database [11]. As equações obtidas através das regressões não lineares para as componentes de velocidade nas direções x e y são, respectivamente:

$$-0,0022956663298533 \cdot x^4 + 0,0459133265968655 \cdot x^3 - 0,330137805122879 \cdot x^2 + 1,00571172139281 \cdot x - 0,0919694758293828 \quad (1)$$

$$0,0000199245919909929 \cdot y^6 - 0,000597716715593032 \cdot y^5 + 0,00697960006443858 \cdot y^4 - 0,0399742729349031 \cdot y^3 + 0,115910848190383 \cdot y^2 - 0,156557872675175 \cdot y + 0,0771151900959383 \quad (2)$$

De forma análoga foram obtidos os perfis para a energia cinética da turbulência, κ , e sua taxa de dissipação, ε e ω respectivamente aos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$. As equações empregadas no cálculo dessas componentes são apresentadas por [12, 13], como:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (3)$$

É importante destacar, que as componentes u' e v' também foram obtidas por meio de regressão não-linear, que determinou as seguintes equações para u' e v' , respetivamente:

$$0,000516272215904262 \cdot x^6 - 0,0154881661551041 \cdot x^5 + 0,210954169937989 \cdot x^4 - 1,63772240590646 \cdot x^3 + 7,37947196589691 \cdot x^2 - 17,7222089754555 \cdot x + 17,7175125944245 \quad (4)$$

$$-0,00131192632592806 \cdot y^6 + 0,0393577896838819 \cdot y^5 - 0,452382962188429 \cdot y^4 + 2,48802763946156 \cdot y^3 - 6,52185208317185 \cdot y^2 + 6,41345480846206 \cdot y + 0,606311602601004 \quad (5)$$

já a taxa de dissipação turbulenta é dada, respectivamente, para os modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$, por:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} l} \quad (7)$$

onde C_μ é uma constante cujo valor, que para o modelo padrão é 0,09, e l é a escala de comprimento de turbulência [13].

Ademais, como condição de saída se impôs uma pressão prescrita de 101325 Pa, valor representativo da pressão atmosférica, enquanto nos contornos restantes foi empregada a condição de parede, ou seja, não deslizamento e impermeabilidade.

Para o cálculo do erro foi empregada a média do erro absoluto (MAE – *Mean Absolute Error*) para quantificar o erro gerado nas comparações, dada por:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{ref,i} - x_{obt,i}| \quad (8)$$

onde, n é o número total de amostras analisadas, i é o número pontual da amostra analisada, x_{ref} representa o dado de referência e x_{obt} representa o dado obtido. Com relação à malha, a mesma foi construída no software *Designer Modeler* e possui células quadrilaterais estruturadas com espaçamento uniforme na direção x onde foram inseridos 100 nós, conforme recomendado em [14]. Na vertical, existem 3 partes: a região de parede superior, inferior e região central, todas com 30 nós cada, totalizando 90 nós nesta direção. Essa estratégia de discretização das paredes foi adotada para capturar e resolver corretamente a física dos escoamentos considerando a separação da camada limite.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são comparadas as curvas das componentes de velocidade em x e y , oriundas das equações obtidas por meio de regressão não linear, com os dados experimentais de Driver e Seegmiller (1985) [9], correspondente a secção transversal $x/H = -4$.

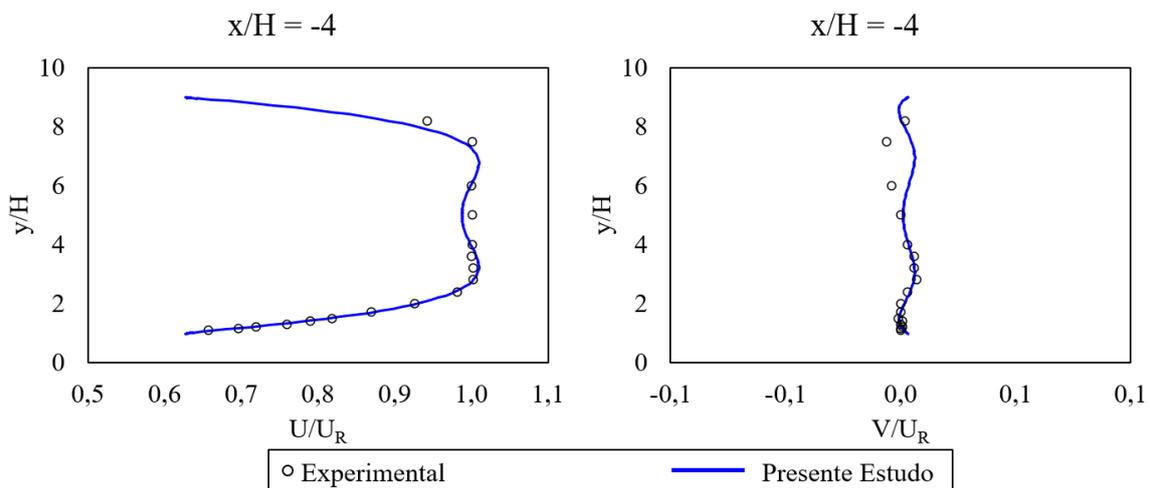


Figura 3: Componentes da velocidade na seção de entrada do domínio.

Nota-se na Figura 3 que as curvas apresentam boa concordância com os dados experimentais. Tal procedimento (aplicação de regressão não-linear nos dados experimentais) foi adotado por haver necessidade de inserir velocidade prescrita, taxa de dissipação turbulenta e energia cinética turbulenta. Para inserir velocidade prescrita, taxa de dissipação turbulenta e energia cinética turbulenta, foi criado um arquivo tipo *TableData*, com as posições dos nós da malha ao longo da direção y/H que pertence à seção transversal $x/H = -4$, juntamente com as informações de velocidade e turbulência para cada nó.

Realizadas as simulações, o erro foi calculado entre a solução numérica e os dados experimentais, que foi obtido através do indicador estatístico MAE, onde a magnitude das velocidades verticais e horizontais foram monitoradas em 544 pontos espalhados pelo domínio, posteriormente calculou-se a MAE entre o resultado numérico e o experimental para cada ponto. O valor da MAE, por sua vez, foi adimensionalizado ao dividi-lo pela velocidade de referência $UR = 44,2$ m/s. Essa estratégia de adimensionalização das médias dos erros absolutos pontuais por uma velocidade de referência foi empregada porque a divisão da MAE pontual pelo valor experimental obtido em cada ponto acaba resultando em erros extremamente grandes quando empregado à valores de baixa magnitude, o que poderia influenciar de uma forma não desejável, a escolha de um modelo. Realizou-se, então, uma média dos erros de todos os pontos monitorados no domínio para cada um dos modelos, permitindo compará-los adequadamente. Através da

Figura 4 é possível comparar tanto a MAE, quanto o tempo de processamento necessário para cada um dos 16 modelos (ver Tabela 1).

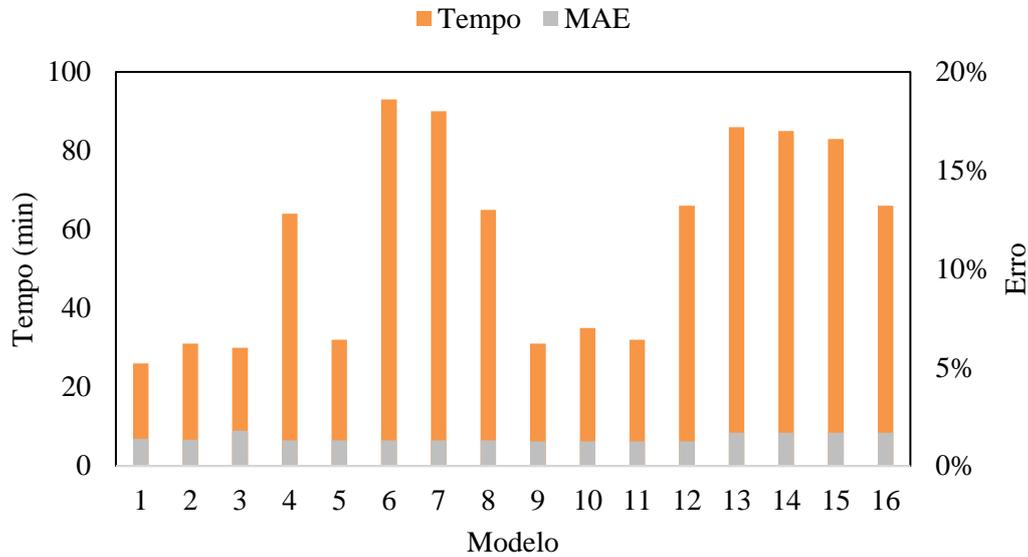


Figura 4: Comparação entre os modelos.

Nota-se na Figura 4 que os modelos 1, 2, 3, 5, 9 e 11 convergiram mais rapidamente, pois atingiram aproximadamente 30 min de tempo de processamento. É possível notar também que todos os modelos alcançaram um valor de MAE similar, abaixo de 2%. Porém, os modelos 9, 10 e 11, que ao terem seus resultados de velocidade em x e y comparados com os dados experimentais, alcançaram o menor erro (1,25%), calculado pelo indicador estatístico MAE. Então, levando em conta o menor tempo de processamento (31 min), o modelo 9 foi selecionado e adotado na etapa de verificação com o trabalho desenvolvido por Conde (2007) [10]. Os perfis de velocidade horizontal são apresentados na Figura 5, que mostra as curvas dos dados experimentais produzidos por Driver e Seegmiller (1985) [9], e dados numéricos oriundos do trabalho de Conde (2007) [10] e os dados do presente estudo (com o modelo 9) para as seções transversais de $x/H = 1, 4$ e 16 .

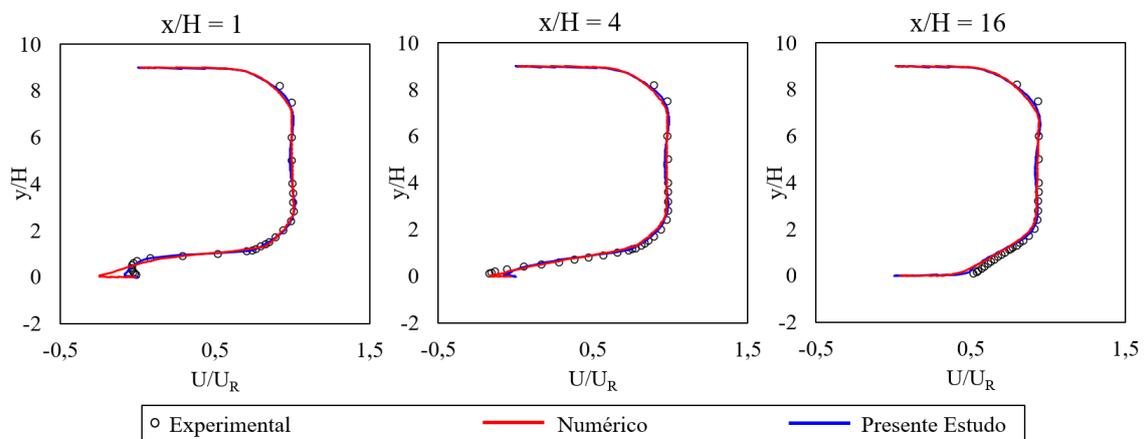


Figura 5: Comparação entre os perfis de velocidade horizontal.

É possível observar na Figura 5 uma boa concordância entre os resultados do presente estudo, obtidos com o modelo 9, quando comparados com as soluções numéricas alcançadas por Conde (2007) [10] e também com os dados experimentais [9]. Para comprovar a acurácia da verificação

foi empregado o indicador estatístico MAE entre o presente estudo e o de Conde (2007) [10], para cada seção transversal apresentada na Figura 5, e da mesma forma foi calculado o valor de MAE entre o presente estudo e os dados experimentais [9], que podem ser consultados na Tabela 2. Na Tabela 2 também consta os valores de MAE para a componente de velocidade em y para as mesmas seções transversais $x/H = 1, 4$ e 16 .

Tabela 2: MAE das componentes de velocidade do presente estudo em relação ao Experimental e Numérico.

x/H	MAE componente x		MAE componente y	
	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
1	3,63%	2,10%	0,13%	0,66%
4	2,95%	3,91%	0,19%	1,33%
16	0,04%	3,35%	0,00%	0,71%

De forma análoga ao realizado pela componente de velocidade horizontal, os resultados gerados para as componentes da velocidade vertical, nas seções transversais em que $x/H = 1, 4$ e 16 , são expostos na Figura 6.

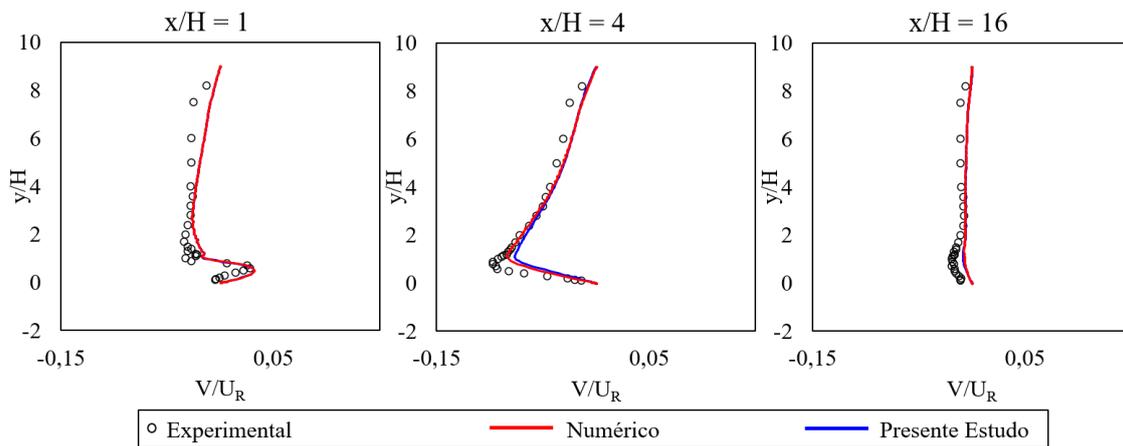


Figura 6: Comparação entre os perfis de velocidade vertical.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi realizada a validação e a verificação de um modelo computacional axissimétrico para simular numericamente um escoamento de ar turbulento em um domínio bidimensional que contém um degrau descendente. No interior de um dispositivo do tipo CAO ocorre o escoamento de ar turbulento quando se emprega a Metodologia Ar e seu formato se assemelha a um domínio bidimensional com degrau descendente quando se aplica a condição de axissimetria.

Na validação o modelo 9 foi o que mais se destacou, por atingir o menor valor médio de MAE de 1,25% e o menor tempo de processamento de aproximadamente 30 min, quando comparado aos dados experimentais de Driver e Seigmiller (1985) [9]. O modelo 9 emprega o $\kappa - \varepsilon$ padrão como modelo de turbulência, a *Enhanced Wall Function* como função de parede e o SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade. Com isso este modelo computacional foi empregado na etapa de verificação, onde foi feita a comparação dos resultados das componentes de velocidade x e y , adimensionalizadas pela velocidade de referência $UR = 44,2$ m/s, que foram comparadas com os dados numéricos Conde (2007) [10], obtendo um valor médio de MAE de 2,53%.

Esses resultados indicam que o modelo computacional axissimétrico proposto foi validado e verificado para um escoamento de ar em um sentido único. Em trabalhos futuros este modelo computacional será avaliado na simulação numérica de escoamento de ar que tenha seu sentido alternado ao longo do tempo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP (Processo: 043219), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS (Processo: 21/2551-0002231-0) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processos: 307791/2019-0, 308396/2021-9 e 309648/2021-1).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Jenniches S. Assessing the regional economic impacts of renewable energy sources – a literature review. *Renew Sust Energ Rev.* 2018 Oct;93:35-51. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.008
2. Reguero BG, Losada IJ, Méndez FJ. A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability. *Appl Energy.* 2015 Jun;148:366-80. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.114
3. Falcão AFO, Henriques JCC. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renew Energ.* 2016 Jan;85:1391-424. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.086
4. Gomes MN, Lorenzini G, Rocha LAO, Dos Santos ED, Isoldi LA. Constructal design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods. *J Eng Thermophys.* 2018 May;27:173-90. doi: 10.1134/S1810232818020042
5. Marjani AE, Ruiz FC, Rodriguez MA, Santos MTP. Numerical modelling in wave energy conversion systems. *Energy.* 2008 Aug;33(8):1246-53. doi: 10.1016/j.energy.2008.02.018
6. Brendmo A, Falnes J, Lillebekken PM. Linear modelling of oscillating water column including viscous loss. *Appl Ocean Res.* 1996 Apr;18(2):65-75. doi: 10.1016/0141-1187(96)00011-9
7. Barakaz AE, Marjani AE. Water oscillation modelling inside the oscillating water column for wave energy conversion. *Int J Renew Energy Res.* 2021 Jun;11(2):826-41. doi: 10.20508/ijrer.v11i2.11886.g8205
8. Conde JMP, Gato LMC. Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter. *Renew Energ.* 2008 Dec;33(12):2637-44. doi: 10.1016/j.renene.2008.02.028
9. Driver DM, Seegmiller HL. Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow. *AIAA J.* 1985 Dec;23(2):163-71. doi: 10.2514/3.8890.
10. Conde JMP. Verificação e validação de um código numérico na simulação de escoamentos turbulentos. In: Sá JC, Delgado R, Santos AD, Rodríguez-Ferran A, Oliver J, Lyra PRM, Alves JLD, editors. *Métodos numéricos e computacionais em Engenharia.* Porto (PT): APMTAC/FEUP; 2007, p. 442-52.
11. United Kingdom. European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion - Classic Collection Database ERCOFTAC [Internet]. Manchester: DATABASE; 1985 [citado em 5 abr 2023]. Disponível em: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac>
12. Wilcox DC. *Turbulence modeling for CFD.* 3. ed. La Cañada (CA): DCW Industries, Inc.; 2006.
13. FLUENT. *User's Guide – Version 12.0.* ANSYS Inc.; 2009.
14. Kim JY, Ghajar AJ, Tang C, Foutch GL. Comparison of near-wall treatment methods for high Reynolds number backward facing step flow. *Int J Comput Fluid Dyn.* 2007 Jan;19(7):493-500. doi: 10.1080/10618560500502519