

## Estudo de convergência de malha para análise de escoamento gás-líquido utilizando o método GCI

### Mesh convergence study for gas-liquid flow analysis using GCI method

DOI:10.34117/bjdv8n4-645

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

#### **Pedro Henrique de Jesus Santos**

Bacharel em Engenharia Química

Instituição: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PEQ/UFS

Endereço: Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd Rosa Elze, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000

E-mail: pedrohenrique@academico.ufs.br

#### **Gideão Oliveira dos Santos**

Bacharel em Engenharia de Incêndio e Pânico

Instituição: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PEQ/UFS

Endereço: Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd Rosa Elze, São Cristóvão/SE, CEP: 49100-000

E-mail: gideoliver@academico.ufs.br

#### **Matheus de Carvalho Andrade**

Graduando em Engenharia Química

Instituição: Departamento de Engenharia Química – DEQ/UFS

Endereço: Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd Rosa Elze, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000

E-mail: horizontedeeventos@academico.ufs.br

#### **Pedro Leite de Santana**

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Departamento de Engenharia Química – DEQ/UFS

Endereço: Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd Rosa Elze, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000

E-mail: santana@academico.ufs.br

#### **Rogério Luz Pagano**

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PEQ/UFS

Endereço: Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd Rosa Elze, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000

E-mail: rpagano@academico.ufs.br

### **RESUMO**

Um importante meio de estudar escoamentos bifásicos é através do uso de softwares de fluido dinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) técnica que abrange a área de fenômenos de transporte e matemática computacional. Contudo, para garantir que tal análise seja isenta de erros de discretização, é necessário realizar um

estudo de convergência de malha. Este trabalho utiliza o método GCI proposto pela ASME para testar a convergência de três diferentes malhas em escoamento gás-líquido, obtendo resultados apropriados para a malha intermediária e a mais refinada, com GCI médio 2,03%.

**Palavras-chave:** cfd, escoamento bifásico, convergência de malha, gci.

## ABSTRACT

An important way of studying two-phase flows is through the computational fluid dynamics (CFD) software, a technique that includes knowledge of transport phenomena and computational mathematics fields. However, to ensure that such an analysis is free of discretization errors, it is necessary to perform a mesh convergence study. This work uses the GCI method proposed by ASME to test the convergence of three different meshes in gas-liquid flow, obtaining adequate results for the intermediate and more refined mesh, with an average GCI of 2.03%.

**Keywords:** cfd, two-phase flow, mesh convergence, gci.

## 1 INTRODUÇÃO

Escoamentos envolvendo mais de uma fase são muito frequentes e possuem aplicações em diversos tipos de indústrias e na natureza. O conhecimento de sua física bastante complexa é crucial para obter processos otimizados e até no desenvolvimento de novas tecnologias. Assim, diversos estudos recentes foram e continuam sendo publicados, experimentais e computacionais, visando elucidar o comportamento de escoamentos bifásicos, seus padrões de escoamento e até buscar modelos matemáticos que consigam caracterizá-los adequadamente.

Notadamente, grande parte destes estudos estão inseridos nos contextos da indústria nuclear e seus reatores e da indústria do petróleo e gás natural. Apesar disso, muitos estudos podem ser utilizados nas mais diversas aplicações industriais, como, por exemplo, reatores químicos e processos de separação.

Um exemplo é o trabalho de Guo et al. (2020), que propôs um método não invasivo e livre de radiação para identificação do padrão de escoamento, posição da interface e vazão. Já Gao et al. (2020) estudaram o escoamento de bolhas em um líquido de alta viscosidade utilizando *Bubble Tracking Velocimetry* (BTV) para aplicar em um reator coluna de bolhas, bastante utilizado no processo de conversão de matérias-primas à base de biomassa.

Com a tão frequente ocorrência de escoamentos multifásicos nas mais variadas áreas, sendo em muitos casos a regra e não a exceção, e a crescente necessidade de

conhecer os processos de forma mais realística e aprofundada, cresce também a necessidade de profissionais mais capacitados nesta área.

Um setor notável na ocorrência de escoamentos multifásicos é a indústria do petróleo e gás, sendo possível citar escoamentos em reservatórios subterrâneos, em colunas de produção de poços, dutos, além de operações unitárias do tratamento primário de petróleo e do tratamento de água produzida.

Um problema recorrente para as empresas desta área é a deposição de asfaltenos em tubulações, causando restrição de área e em alguns casos entupimento, o que provoca grandes prejuízos. Para prever a ocorrência e evitar estes eventos indesejáveis, Alhosani e Daraboina (2020) provam que a modelagem matemática e simulação deve considerar o escoamento como bifásico em vez da tradicional simplificação para escoamento monofásico.

Uma grande aliada em estudos de transporte de momento, calor e massa é a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), e para estudos de escoamentos com mais de uma fase não é diferente. No ramo da indústria nuclear, “CFD é cada vez mais utilizado para relevantes investigações a respeito da segurança de reatores nucleares” (Lucas et al., 2020).

A análise de segurança de reatores nucleares costuma ocorrer em situações difíceis e muitas vezes perigosas de serem experimentadas, fazendo da CFD uma ferramenta bastante adequada para tal. Um caso envolvendo este tipo de análise é o estudo do comportamento de um escoamento bifásico anular entre um gás e uma fina camada de líquido que ocorre em *Boiling Water Reactors (BWR)*, com o intuito de prever a ocorrência de secagem do líquido (Li e Anglart, 2016).

Escoamentos bifásicos podem ser classificados de acordo com as diferentes formas de interface entre as duas fases, gerando os chamados padrões de escoamento, sendo os principais: estratificado, ondulado, anular, escoamento com bolhas e *slug*. Conhecer os efeitos de cada padrão de escoamento é de grande importância para o processo a ser analisado.

Um dos grandes desafios para uma correta simulação de escoamentos gás-líquido é a escolha de modelos matemáticos para coeficientes de troca de momento, calor e massa para completar o sistema de equações na interface, visto que não há consenso na literatura e grande parte dos modelos disponíveis são específicos para um determinado padrão de escoamento.

Neste contexto, uma metodologia que vem sendo aplicada é a inserção de um modelo algébrico baseado na densidade de área interfacial capaz de identificar a morfologia local do escoamento (bolhas, gotas ou superfície livre). Dessa forma, é possível adequar localmente os modelos matemáticos para os coeficientes de troca de momento previamente definidos (Höhne e Vallée, 2009).

Outro ponto importante para estudos CFD é garantir que a solução obtida seja independente da quantidade de pontos estabelecidos para discretização do domínio. Em outras palavras, é necessário realizar um estudo de convergência de malha para que esta não tenha influência sobre os resultados.

Neste tema, Chen et al. (2019) estudaram um escoamento horizontal gás-líquido e, para garantir a independência dos resultados com a malha, utilizaram o método do índice de convergência de malha (*Grid Convergence Index*, GCI) proposto pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME).

Como estudos CFD são comumente realizados em 3D, a discretização do domínio espacial é realizada dividindo o meio onde ocorre o escoamento em diversos elementos de volumes, que podem ter diferentes geometrias. Então, Pinilla et al. (2021) utilizaram o GCI para analisar a influência do tipo dos elementos usados na geometria (tetraédrica, hexaédrica ou poliédrica) e da quantidade de elementos da malha numa modelagem de *viscous fingering*, um padrão de escoamento comumente encontrado em meios porosos como reservatórios de petróleo. Pinilla et al. concluíram que a malha poliédrica não estruturada e a malha hexaédrica estruturada eram adequadas para a simulação.

Por fim, o propósito principal do presente trabalho foi realizar um estudo de convergência de malha, utilizando o *Grid Convergence Index*, em uma simulação 2D para possibilitar, em estudo futuro, a análise dos diferentes padrões de escoamento de um sistema gás-líquido em uma tubulação horizontal de seção transversal retangular.

## 2 METODOLOGIA

Para este trabalho, foi utilizada uma malha hexaédrica para simular o escoamento gás-líquido em um tubo de seção transversal retangular, considerando que a distância entre as paredes laterais da tubulação era suficientemente grande e não influenciava no escoamento, possibilitando uma simulação em duas dimensões. Para isso foi utilizado o *software* comercial CFX, versão 14, da Ansys Inc. disponível no Laboratório de Modelagem e Simulação (LAMSIM) do Departamento de Engenharia Química da UFS.

Figura 1: Esquema do domínio de escoamento.



Na entrada do tubo considerou-se uma lâmina de 1 mm de espessura e 15 cm de comprimento que separa as entradas dos fluidos, sendo que o gás adentra pela região acima e o líquido pela região abaixo da lâmina, conforme representado na

Figura 1. As dimensões do tubo estão apresentadas na Tabela 1. Algumas condições utilizadas na simulação estão na Tabela 2.

Tabela 1: Dimensões da tubulação.

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| Comprimento (x)       | 2,40 m  |
| Altura (y)            | 0,10 m  |
| Comprimento da lâmina | 0,15 m  |
| Espessura da lâmina   | 0,001 m |

Tabela 2: Condições utilizadas na simulação.

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| Velocidade de entrada de ar     | 5 m/s   |
| Velocidade de entrada de água   | 1 m/s   |
| Pressão relativa média na saída | 10 Pa   |
| Passo de tempo                  | 0,001 s |

Para realizar a modelagem matemática do problema, foi utilizada uma abordagem Euler-Euler baseada na média temporal de Reynolds, conforme apresentado em detalhes por Ishii e Hibiki (2006). A equação da continuidade para cada fase é representada pela Equação (1), na qual o subscrito k representa a fase líquida ou gasosa,  $\alpha$  a fração volumétrica e  $S_k$  um termo fonte de massa devido a mudanças de fase e que deve obedecer à Equação (2).

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = S_k \quad (1)$$

$$\sum S_k = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k U_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k \vec{V}_k) = -\alpha_k \nabla p_k + \alpha_k \rho_k g + \nabla \alpha_k (\tau^v + \tau_k^t) - \nabla \alpha_k \cdot \tau_{D,k} \quad (3)$$

Deendarlianto et al. (2012) apresentaram a equação da continuidade considerando  $S_k = 0$  e o balanço de momento na forma da Equação (3), sendo  $\tau^v$  a tensão de cisalhamento média (fluxo difusivo médio),  $\tau_k^t$  o tensor de Reynolds que representa o fluxo turbulento ou a tensão de cisalhamento turbulenta e  $\tau_{D,k}$  a tensão de cisalhamento na interface. Como modelo de turbulência, foi selecionado o k- $\omega$  disponível no *software*, de acordo com a Equação (4) e (5) (ANSYS, 2011).

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega U) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (5)$$

Nas equações acima,  $k$  é a energia cinética turbulenta,  $\omega$  a frequência de turbulência,  $P_k$  a taxa de produção de  $k$ ,  $P_{kb}$  e  $P_{\omega b}$  são os termos associados ao empuxo. Para modelar a tensão na interface ( $\tau_D$ ), foi utilizado o método *Algebraic Interfacial Area Density* (AIAD) seguindo procedimento proposto por Höhne e Vallée (2009) e utilizado também por Silva et al. (2018), em caso similar a este.

Neste trabalho somente a força de arrasto é considerada como importante para a troca de momento, desprezando-se as menores contribuições das forças de elevação (*lift force*) e força de dispersão turbulenta. O AIAD permitiu a aplicação de um diferente coeficiente de arrasto para bolhas, gotas ou superfície livre. Uma descrição detalhada deste método pode ser encontrada em Porombka e Höhne (2015) e não foi aqui reproduzida, visto que o foco deste estudo é a análise de convergência de malha.

Realizada a simulação, foi efetuada a análise dos resultados sob a ótica do método GCI. A seguir está descrito o procedimento de aplicação do *Grid Convergence Index* seguindo os passos apresentados por editorial do *Journal of Fluids Engineering* da ASME (2008).

Passo 1: De acordo com a Equação (6), definiu-se o tamanho ( $h$ ) de uma célula representativa em uma malha mais grosseira, isto é, com menor número de elementos.

$$h = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_i \right]^{1/3} \quad (6)$$

sendo que  $N$  é o número total de elementos e  $\Delta V_i$  é o volume do  $i$ -ésimo elemento de volume. A Equação (6) é utilizada para cálculos tridimensionais, visto que o *software* utilizado somente realiza cálculos em três dimensões. Embora o problema considerado seja bidimensional, essa limitação foi contornada utilizando somente um elemento de volume na dimensão  $z$ .

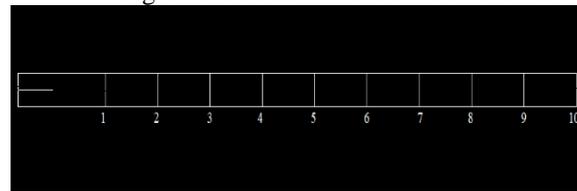
Passo 2: Selecionou-se um conjunto de três malhas com tamanho dos elementos significativamente diferentes. Para isso, foi utilizado o fator de refinamento de malha, dado pela Equação (7). O conjunto de malhas escolhido está apresentado na

Tabela 3.

$$r = \frac{h_{\text{mais grosseiro}}}{h_{\text{mais refinado}}} > 1,3 \quad (7)$$

Passo 3: Definiu-se uma variável  $\phi$  a ser analisada a partir dos resultados obtidos em cada malha. Neste trabalho foi escolhida a média da fração volumétrica na tubulação ao longo do eixo  $y$  (altura), em dez diferentes valores para o eixo  $x$  (comprimento), conforme Figura 2. O tempo utilizado para a coleta destes dados foi de 0,24 s após o início da simulação, tempo no qual o maior gradiente de fração volumétrica ficou evidenciado.

Figura 2: Pontos de análise dos resultados.



Passo 4: Dividiu-se as malhas em dois pares (malha 1 e malha 2; malha 2 e malha 3) e calculou-se a ordem aparente do método,  $p$ , através das equações a seguir:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{23})} |\ln|e_{12}/e_{23}| + q(p)| \quad (8)$$

$$q(p) = \ln \left( \frac{r_{23}^p - s}{r_{12}^p - s} \right) \quad (9)$$

$$s = \text{sgn} \left( \frac{e_{12}}{e_{23}} \right) \quad (10)$$

sendo  $e_{23} = \phi_2 - \phi_3$ ,  $e_{12} = \phi_1 - \phi_2$ , e a função  $\text{sgn}(x)$  uma função que gera o valor  $-1$ , caso  $x < 0$ , valor igual a  $0$  se  $x = 0$  e igual a  $1$  se  $x > 0$ . O valor de  $p$  foi encontrado

para cada um dos pontos, e então foi calculada a ordem aparente média, a qual foi utilizada no cálculo do GCI.

Passo 5: Calcularam-se os valores extrapolados para  $\phi$ , a partir da Equação (11).

$$\phi_{ext}^{23} = \frac{(r_{23}^p \phi_3 - \phi_2)}{(r_{23}^p - 1)}; \phi_{ext}^{12} = \frac{(r_{12}^p \phi_2 - \phi_1)}{(r_{12}^p - 1)} \quad (11)$$

Passo 6: Estimaram-se os erros relativos aproximados, Equações (12), e erros relativos extrapolados, Equações (13).

$$e_a^{23} = \left| \frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_3} \right|; e_a^{12} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_2} \right| \quad (12)$$

$$e_{ext}^{23} = \left| \frac{\phi_{ext}^{23} - \phi_3}{\phi_{ext}^{23}} \right|; e_{ext}^{12} = \left| \frac{\phi_{ext}^{12} - \phi_2}{\phi_{ext}^{12}} \right| \quad (13)$$

Passo 7: Finalmente, calculou-se o índice de convergência de malha (GCI), para cada par analisado, conforme as Equações (14).

$$GCI_{23} = \frac{1,25e_a^{23}}{r_{23}^p - 1}; GCI_{12} = \frac{1,25e_a^{12}}{r_{12}^p - 1} \quad (14)$$

Caso o índice de convergência de malha obtido para o par formado pelas malhas 2 e 3 (as mais refinadas) não fosse satisfatório, seria gerada uma nova malha ainda mais refinada e os cálculos seriam repetidos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para execução do trabalho, foram geradas as malhas cujas características estão apresentadas na

Tabela 3. Embora a ASME recomende que o fator de refinamento de malha seja no mínimo 1,3, esta condição foi ligeiramente relaxada para o primeiro par.

Isto tornou possível encontrar uma malha adequada ao processo menor do que a que seria encontrada com o fator original, reduzindo consideravelmente o custo

computacional. O segundo par foi mantido com o fator recomendado mínimo de 1,3 para garantir que as malhas fossem suficientemente diferentes umas das outras.

Tabela 3: Conjunto de malhas selecionado.

| Malha | h (mm) | N     | r                 |
|-------|--------|-------|-------------------|
| 1     | 2,4018 | 17312 | -                 |
| 2     | 1,9636 | 31682 | $r_{12} = 1,2232$ |
| 3     | 1,5087 | 69838 | $r_{23} = 1,3014$ |

Os tempos computacionais para cada simulação não foram utilizados como parâmetros de comparação nesta discussão, uma vez que cada malha foi simulada em diferentes computadores. Contudo, a título de conhecimento, os tempos gastos foram os seguintes: 8 horas e 56 minutos (Malha 1), 15 horas e 38 minutos (Malha 2) e 3 dias, 19 horas e 24 minutos (Malha 3).

Os resultados obtidos para a fração volumétrica média para cada uma das malhas estudadas estão apresentados na Tabela 4. Os resultados dos cálculos dos erros absolutos e das frações volumétricas extrapoladas estão na Tabela 5.

Tabela 4: Frações volumétricas obtidas nas três malhas.

| Ponto | X     | Fração Volumétrica média |         |         |
|-------|-------|--------------------------|---------|---------|
|       |       | Malha 1                  | Malha 2 | Malha 3 |
| 1     | 0,375 | 0,2341                   | 0,2306  | 0,2327  |
| 2     | 0,600 | 0,1341                   | 0,1098  | 0,0922  |
| 3     | 0,825 | 0,4800                   | 0,4979  | 0,4768  |
| 4     | 1,050 | 0,9999                   | 1,0000  | 1,0000  |
| 5     | 1,275 | 0,9999                   | 1,0000  | 1,0000  |
| 6     | 1,500 | 0,9881                   | 0,9032  | 0,8562  |
| 7     | 1,725 | 0,6425                   | 0,5603  | 0,7025  |
| 8     | 1,950 | 0,7106                   | 1,0000  | 0,9998  |
| 9     | 2,175 | 0,6480                   | 0,6286  | 0,5953  |
| 10    | 2,400 | 0,2408                   | 0,1994  | 0,2127  |

Analisando as Tabelas 4 e 5, pode-se observar, que as malhas apresentaram uma convergência bastante elevada nos pontos 4 e 5, indicando que chegaram a uma solução adequada nestes pontos. Contudo, devido ao termo do logaritmo neperiano na Equação (8), para cálculo da ordem aparente p, o método GCI não funciona nestes casos. Com

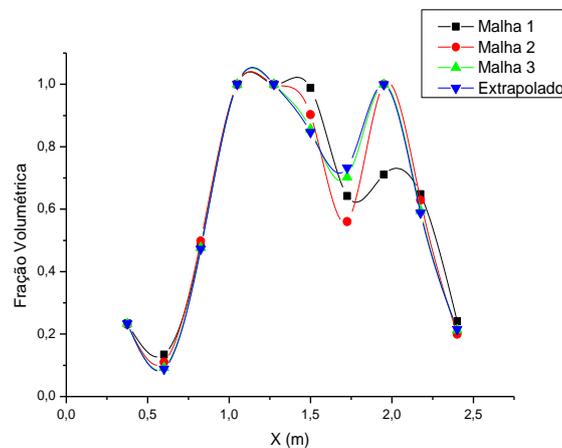
isso, para o cálculo de  $p$ , bem como do GCI médio, os pontos 4 e 5 não foram considerados.

Tabela 5: Erros absolutos e frações volumétricas extrapoladas.

| Ponto | $p_{médio} = 6,661922$ |          |                   |                   |
|-------|------------------------|----------|-------------------|-------------------|
|       | $e_{12}$               | $e_{23}$ | $\phi_{ext}^{12}$ | $\phi_{ext}^{23}$ |
| 1     | 0,0035                 | -0,0021  | 0,2294            | 0,2331            |
| 2     | 0,0243                 | 0,0177   | 0,1012            | 0,0885            |
| 3     | -0,0179                | 0,0211   | 0,5042            | 0,4724            |
| 4     | 0,0001                 | 0,0000   | 1,0000            | 1,0000            |
| 5     | 0,0001                 | 0,0000   | 1,0000            | 1,0000            |
| 6     | 0,0849                 | 0,0470   | 0,8732            | 0,8464            |
| 7     | 0,0822                 | -0,1422  | 0,5312            | 0,7322            |
| 8     | -0,2894                | 0,0002   | 1,1024            | 0,9998            |
| 9     | 0,0194                 | 0,0333   | 0,6217            | 0,5883            |
| 10    | 0,0414                 | -0,0133  | 0,1848            | 0,2155            |

Ao analisar o gráfico das frações volumétricas em relação à posição X no tubo, Figura 3, notou-se claramente um desvio mais acentuado dos resultados obtidos pela Malha 1 em pelo menos 4 pontos, enquanto a Malha 2 apresentou um desvio perceptível em apenas dois pontos.

Figura 3: Perfil da média de fração volumétrica em relação ao comprimento do tubo.



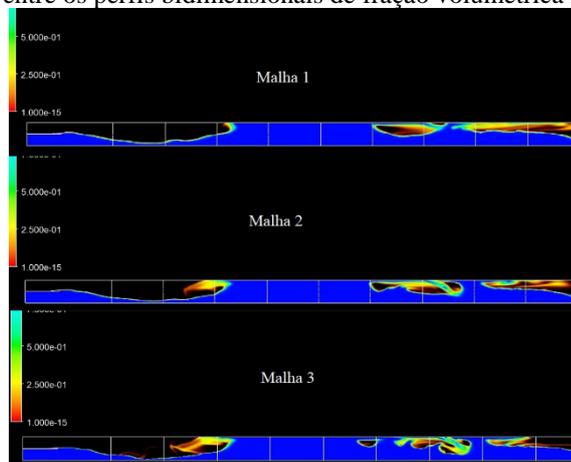
A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os erros relativos aproximados e extrapolados, além do índice de convergência de malha (GCI) para cada par analisado. Constata-se, conforme já analisado no gráfico da Figura 3, que o GCI obtido ao sair da Malha 1 para a Malha 2 foi relativamente alto em quatro pontos, sendo o valor máximo de 12,8% no ponto 8.

Tabela 6: Erros relativos e índices de convergência de malha (GCI).

| Ponto | $e_a^{12}$ | $e_a^{23}$ | $e_{ext}^{12}$ | $e_{ext}^{23}$ | $GCI_{12}$ | $GCI_{23}$ |
|-------|------------|------------|----------------|----------------|------------|------------|
| 1     | 0,015      | 0,0090     | 0,005          | 0,002          | 0,67%      | 0,24%      |
| 2     | 0,221      | 0,1915     | 0,085          | 0,042          | 9,79%      | 5,00%      |
| 3     | 0,036      | 0,0443     | 0,013          | 0,009          | 1,59%      | 1,16%      |
| 4     | 0,000      | 0,0000     | 0,000          | 0,000          | 0,00%      | 0,00%      |
| 5     | 0,000      | 0,0000     | 0,000          | 0,000          | 0,00%      | 0,00%      |
| 6     | 0,094      | 0,0549     | 0,034          | 0,012          | 4,16%      | 1,43%      |
| 7     | 0,147      | 0,2024     | 0,055          | 0,041          | 6,49%      | 5,29%      |
| 8     | 0,289      | 0,0002     | 0,093          | 0,000          | 12,8%      | 0,01%      |
| 9     | 0,031      | 0,0559     | 0,011          | 0,012          | 1,36%      | 1,46%      |
| 10    | 0,208      | 0,0625     | 0,079          | 0,013          | 9,18%      | 1,63%      |

Analisando os valores obtidos para o par formado pelas malhas 2 e 3, nota-se praticamente todos os pontos com valores de GCI menor ou igual a 5%, com exceção do ponto 7, que apresentou um GCI de 5,29%. Observa-se na Figura 4, que as malhas 2 e 3 ficaram realmente bastante parecidas, e que a exceção apresentada no ponto 7 se deve à diferença no formato da bolha que foi gerada na Malha 2 e na Malha 3. Apesar desta pequena diferença visual entre as malhas, o método GCI fornece a segurança quantitativa à avaliação de convergência de malha, que não seria possível em mera avaliação visual, qualitativa.

Figura 4: Comparação entre os perfis bidimensionais de fração volumétrica nas três malhas.



O  $GCI_{médio}^{12}$  foi de 5,75%, enquanto o  $GCI_{médio}^{23}$  foi de 2,03%, mostrando que a convergência das malhas 2 e 3 já está bastante próxima da assíntota. Dessa forma, a Malha 2, com comprimento de célula representativa de 1,9636, já está bastante adequada para o escoamento bifásico analisado neste trabalho.

Ao comparar os gráficos da Figura 5 e Figura 6, mostrando a incerteza numérica a partir de barras de erro, percebe-se como já houve grande diminuição dos erros

decorrentes da discretização numérica na Malha 2, corroborando com a conclusão de que esta malha é suficientemente refinada.

Somente em casos que necessitem de elevada exatidão, optar-se-ia pela Malha 3, mas com o custo computacional, decorrente da maior quantidade de células e nós, aumentando consideravelmente.

Figura 5: Fração volumétrica da Malha 1 com barras de erro.

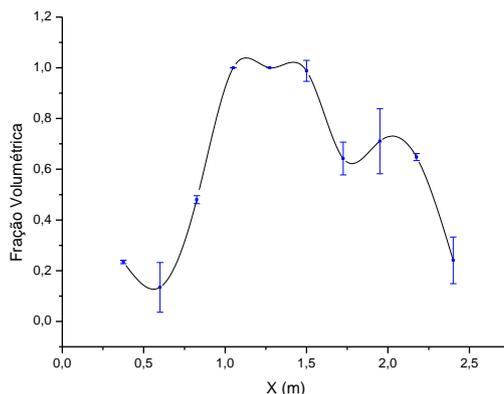
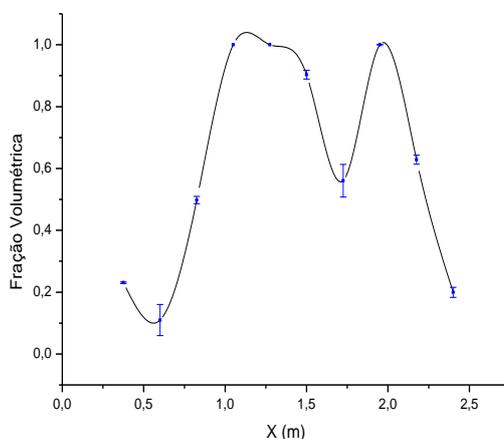


Figura 6: Fração volumétrica da Malha 2 com barras de erro.



#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho endossa a necessidade de aplicação de métodos para testar a convergência de malha, como o GCI, em estudos de CFD envolvendo escoamentos gás-líquido. Os resultados mostraram uma boa convergência entre as malhas 2 e 3, com uma pequena diferença no formato da bolha que foi gerada no ponto 7, a uma distância de 1,725 m da entrada da tubulação. A Malha 2, com h de 1,9636, já se mostrou adequada a realizar este tipo de simulação, com um GCI médio de 2,03% em relação à Malha 3.

Somente um caso que necessite elevada exatidão justificaria um refinamento maior da malha, e a utilização da Malha 3. O presente trabalho foi o primeiro passo para um novo estudo que está sendo realizado, desta vez com o propósito de analisar os diferentes padrões de escoamentos bifásicos e suas características.

Sugere-se ainda estudos complementares analisando malhas com diferentes geometrias dos elementos de volume de controle (tetraédrica e poliédrica) para determinar um possível comprimento de célula representativo ideal para simulação de escoamentos gás-líquido.

### **AGRADECIMENTOS**

Registra-se um agradecimento especial aos membros do Laboratório de Modelagem e Simulação e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (PEQ-UFS), bem como ao Eng. MSc. Sávio Sayanne Andrade Silva, cujo trabalho inicial deu origem a este estudo.

## REFERÊNCIAS

- Alhosani, Ahmed e Daraboina, Nagu. Modeling of asphaltene deposition during oil/gas flow in wellbore. *Fuel*, Vol. 280, 2020.
- ANSYS. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, 2011.
- Chen, Q., et al. Assessment of CFD for unheated gas-liquid flows with high void fraction. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 341, 2019.
- Deendarlianto, et al. Application of a new drag coefficient model at CFD-simulations on free surface flows relevant for the nuclear reactor safety analysis. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 39, pp. 70 - 82. 2012.
- Gao, Deyang, et al. Capturing the flow field of bubbly flows using BTV in high viscosity liquid. *Chemical Engineering Science*, Vol. 227, 2020.
- Guo, Wei, et al. Response of thermal diffusion to gas-liquid stratified/wave flow and its application in measurement. *Chemical Engineering Science*, Vol. 225, 2020.
- Höhne, T. e Vallée, C. Modelling of stratified two phase flows using an interfacial area density model. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2009, Vol. 62, 2009.
- Ishii, Mamoru e Hibiki, Takashi. *Thermo-fluid dynamics of two-phase flow*. Springer, s.l., 2006.
- Li, Haipeng e Anglart, Henryk. Modeling of annular two-phase flow using a unified CFD approach. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 303, 2016.
- Lucas, D., et al. General guideline for closure model development for gas-liquid flows in the multi-fluid framework. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 357, 2020.
- Pinilla, Andrés, et al. Modelling of 3D viscous fingering: Influence of the mesh on coreflood experiments. *Fuel*, Vol. 287. 2021.
- Porombka, P. e Höhne, T. Drag and turbulence modelling for free surface flows within the two-fluid Euler–Euler framework. *Chemical Engineering Science*, Vol. 134, 2015.
- Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, 2008.
- Silva, S. S. A., et al. Simulação de escoamento bifásico aplicando a técnica da fluidodinâmica computacional. *Scientia Plena*, Vol. 14. 2018.