

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO HORIZONTAL AR-ÁGUA UTILIZANDO O MODELO VOF


Kauê Almeida da Cruz ¹, Prof. Dr. Fabio Kenji Suguimoto ²
, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço ³


RESUMO: Os escoamentos bifásicos possuem grande relevância na indústria de petróleo, uma vez que estão presentes no transporte de petróleo bruto e gás natural, tornando assim a análise desses escoamentos necessária para melhoria e economia dos processos de extração. No escoamento bifásico dois importantes parâmetros são a fração de vazio e os padrões de escoamento. A fração de vazio é a relação do volume ocupado pelo gás em relação ao volume total já os padrões de escoamento ocorrem devido a deformação da superfície na interface de interações dos fluidos. Os padrões frequentemente encontrados no escoamento horizontal são: Estratificado, Ondulado, Slug, Plug, Anular, Disperso e Bolhas. Este artigo tem como objetivo determinar as frações de vazio, perda de carga e os padrões de um escoamento horizontal em uma tubulação de 2 metros e diâmetro de 26 mm com injeção de água e ar utilizando o software Ansys Fluent. Será utilizado o modelo VOF, pois este é capaz de representar os padrões de escoamento. Os parâmetros escolhidos para entrada de dados na simulação são: velocidade dos fluidos, pressão. Os resultados serão comparados com dados experimentais da literatura. Espera-se que o modelo VOF consiga apresentar, além da perda de carga e fração de vazio os padrões de escoamento. Com um refinamento da malha adequada os resultados devem se aproximar dos dados da literatura

Palavras-chave: CFD, escoamento bifásico, VOF.

1 INTRODUÇÃO

O escoamento bifásico, comum nas indústrias petrolífera e nuclear, envolve a interação de água e ar, resultando em padrões que podem causar perdas de carga e problemas operacionais. Embora técnicas experimentais fossem úteis, elas tinham limitações quando extrapoladas para outros cenários. A simulação numérica por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), utilizando modelos como Euleriano e Volume de Fluido (VOF), oferecem maior precisão (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). Os principais padrões de escoamento gás-líquido em tubos horizontais incluem o estratificado suave, estratificado ondulado, bolha alongada, pistonado, anular, anular ondulado e bolhas dispersas (SHOHAM, 2006), podem ser visto na Figura 1. Neste estudo, propôs-se a utilização do modelo VOF para analisar padrões de escoamento, fração de vazio e a perda de carga em um escoamento horizontal de água e ar. As simulações foram realizadas utilizando o software comercial Ansys Fluent.

¹  Coordenação de Ciência de Computação; ✉ kauecruz@alunos.utfpr.edu.br.

²  Coordenação de Engenharia Mecânica; ✉ fsuguimoto@utfpr.edu.br.

³  Coordenação de Engenharia Mecânica; ✉ mlourenco@utfpr.edu.br.

2 METODOLOGIA

Nesta seção explica o modelo VOF e equações auxiliares.

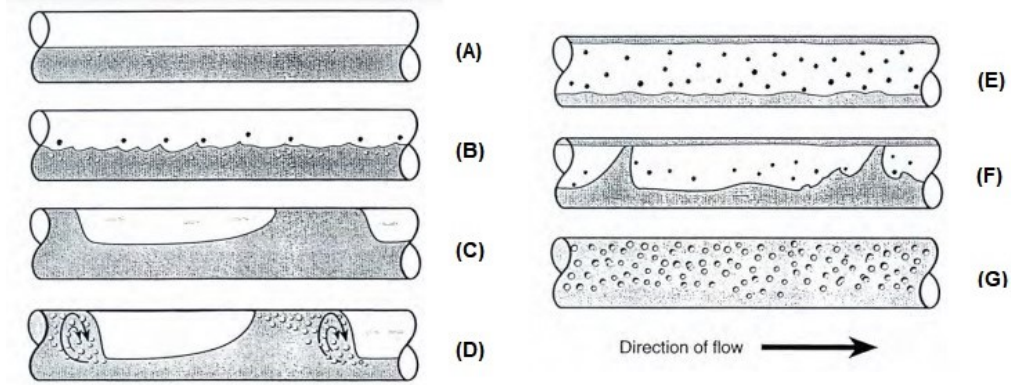


Figura 1 – Padrões de escoamento em tubos horizontais: (A) Estratificado Suave, (B) Estratificado Ondulado, (C) Bolha Alongada, (D) Pistonado, (E) Anular, (F) Anular Ondulado, (G) Bolhas Dispersas. Fonte: (SHOHAM, 2006).

2.1 Modelo matemático

A formulação para escoamento bifásico gás-líquido requer o uso das equações de transporte de massa, momento e calor (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). No entanto, conforme indicado em (BORGES, 2022), será adotada uma tubulação isotérmica neste estudo, de modo que o modelo VOF utilizara apenas as equações de transporte de massa e momento.

2.2 Modelo VOF

O modelo volume de fluido (VOF) é uma técnica usada para analisar interfaces de fluidos imiscíveis, onde a soma das frações de todas as fases é igual a 1 (PTC, 2024).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + \rho g + \nabla(\tau + \tau^t) \quad (2)$$

Sendo (P) pressão, (g) a gravidade, (u) a velocidade superficial, (τ) a tensão molecular, (τ^t) a tensão de turbulência e (ρ) densidade.

2.3 Modelo de Turbulência

O Modelo SST k - ω (*Shear Stress Transport*) une o modelo $\kappa - \omega$ padrão próximo à parede e o $\kappa - \epsilon$ em regiões distantes. Sendo κ a energia cinética e ω a taxa de dissipação (BORGES, 2022).

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (3)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma \rho}{\mu t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \alpha_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \alpha_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

Onde F_1 é função de mistura, $CD_{k\omega}$ é o termo difusivo, viscosidade μ e viscosidade turbulenta μ_t .

2.4 Modelo de tensão superficial

O modelo CFS (*continuum surface force*) é desenvolvido para modelar os efeitos da tensão superficial nas interfaces de fluidos, sendo integrado à equação de momento do modelo VOF (BRACKBILL; KOTHE; ZEMACH, 1992), sendo (σ) o coeficiente de tensão superficial e (k) a curvatura.

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (5)$$

2.5 Geração de malha

Neste estudo, foi utilizada uma geometria 2D em junção em T para analisar a fração de vazio e perda de carga em seções horizontais específicas. O método CFD exigiu uma malha composta por elementos triangulares e quadriláteros, aplicada a uma tubulação com diâmetro de 26 mm e comprimento de 60D, garantindo a estabilização do padrão pistonado (CHIDAMOIO; AKANJI; RAFATI, 2017), a malha é representada na Figura 2. Foram modeladas três condições de contorno: duas velocidades de entrada, uma pressão de saída e paredes com condição de não deslizamento, com maior refinamento próximo a essas superfícies para melhor captura dos fluxos.

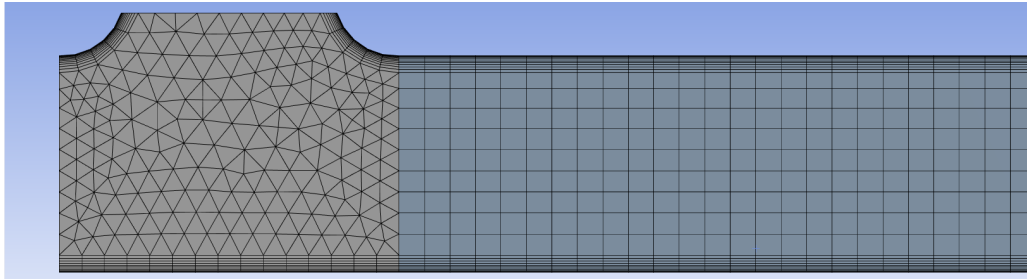


Figura 2 – Malha 2D do Tubo. Fonte: Autoria Própria

2.6 Critério de estabilidade

Para garantir a estabilidade da simulação, foi utilizado o critério CFL. Dado que o regime é transiente e o avanço das iterações depende do passo de tempo, o critério CFL foi aplicado para calcular o passo de tempo em cada caso simulado, utilizado por (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017).

$$C = u_G \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6)$$

$$u_G = (1,2 + \frac{0,8}{1 + 10e^{-8} Re_s^{2,55}}) u_M + 0,35 \sqrt{gD} \quad (7)$$

O número de Courant (C), com valor padrão da Ansys ($C = 0,25$), o passo de tempo (Δt), tamanho da célula (Δ_g), velocidade total do gás (u_G), a variável (D) representa o diâmetro do tubo, (g)

é a aceleração gravitacional, (Re) é o número de Reynolds da fase líquida e (u_M) sendo a velocidade de mistura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados experimentais obtidos de (LIMA, 2011) e (COSTA, 2016) podem ser visto na Tabela 1 e os dados obtidos da simulação aplicado o modelo VOF pode ser visto na Tabela 2, com tamanho de célula (Δ_x) , N° de Elemento da malha e passo de tempo (Δ_t) .

Tabela 1 – Dados de Escoamento

Caso	JL [m/s]	JG [m/s]	α	P (abs) [Pa]	dP/L [Pa/m]	Padrão de Escoamento	Autor
1	1,617	0,61	-	96450	580	Golfada	Lima
2	0,055	0,942	0,523	101000	-	Estratificado	Costa

Fonte: (LIMA, 2011) e (COSTA, 2016)

Tabela 2 – Dados gerados pela simulação

Caso	Δ_x [m]	N° Elemento	Δ_t	P [Pa]	α	dP/dL [[Pa/m]	Padrão de Escoamento
1	0,005	11369	0,0009	96450	-	369,107	Estratificado
2	0,005	11369	0,0009	101000	0,635	-	Estratificado

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 2 é apresenta aos resultados de ambos os casos, com número de malha, tamanho da célula e passo de tempo idênticos. Para o caso 1 com pressão de operação a 96450 Pa a perda de carga foi de 369,107 Pa/m e padrão de escoamento estratificado e para o caso 2 com pressão de operação 101000 Pa a fração de vazio foi de 0,635 e padrão estratificado.

O erro entre o simulado e o experimental é mostrado na Tabela 3 é possível observar que o erro entre os resultados simulados e experimentais foram alto, 36,360% para o caso 1 e para o caso 2 um erro de 21,415%. A ausência do teste de independência de malha pode ter causado divergências e aumentado a difusão numérica. Outro fator que pode ter influenciado a um grande erro é um pequeno tempo de simulação fazendo que o regime permanente não tenha sido atingido.

Tabela 3 – Erro entre simulação e experimental

Caso	Parâmetro	Experimental	Simulado	Erro [%]
1	dP/dL	580	369,107	36,360
2	α	0,523	0,635	21,415

Fonte: Autoria Própria

A imagem 3 mostra o gráfico de contorno para ambos os casos e ambos houve padrão de escoamento estratificado.

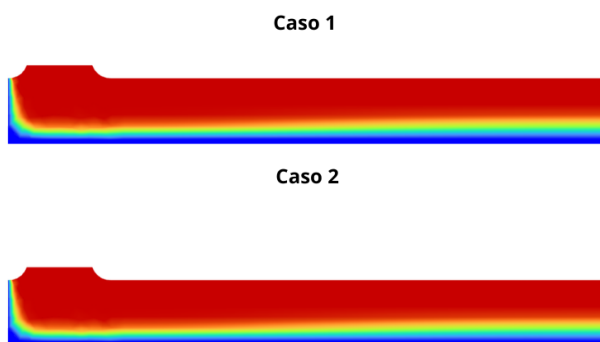


Figura 3 – Padrão de Escoamento Simulado. Fonte: Autoria Própria

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação numérica do modelo VOF, aplicada em conjunto com os modelos propostos para o escoamento bifásico horizontal em um tubo de 26 mm, foram realizada utilizando o software Ansys Fluent com geometria 2D e comparada com os dados disponíveis na literatura. Apresentou coerência para padrão de escoamento no caso 2 com estratificado e a fração de vazio teve um erro de 21,415% entre o simulado e o experimental. Já para o caso 1 o padrão de escoamento apresentou divergência com a literatura, essa apresenta golfada e o simulado estratificado, também obteve-se um erro de 36,360% para perda de carga entre o experimental e CFD. Como sugestão para análises futuras, recomenda-se realizar o teste de independência de malha, a fim de evitar que sua influência comprometa os resultados e tempos maiores de simulação para se obter o regime permanente.

REFERÊNCIAS

- BORGES, Guilherme Martinez. **Simulação de Escoamento Bifásico Vertical em CFD**. Cornélio Procópio, PR: [s.n.], 2022. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel. Orientador: Prof. Dr. Fábio Kenji Sugimoto.
- BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D. B.; ZEMACH, C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. **Journal of Computational Physics**, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, v. 100, p. 335–354, 1992. Received August 30, 1990; revised July 29, 1991.
- CHIDAMOIO, Joao; AKANJI, Lateef; RAFATI, Roozbeh. Prediction of Optimum Length to Diameter Ratio for Two-Phase Fluid Flow Development in Vertical Pipes. **Advances in Petroleum Exploration and Development**, v. 14, n. 1, p. 1–17, 2017. DOI: [10.3968/9886](https://doi.org/10.3968/9886).
- COSTA, Camilo Augusto Santos. **Estudo Numérico e Experimental da Formação de Escoamentos Gás-Líquido Intermitentes em um Tubo Horizontal**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Ph.D. Jader Riso Barbosa Junior.

GUERRERO, Esteban; MUÑOZ, Felipe; RATKOVICH, Nicolás. Comparison Between Eulerian and VOF Models for Two-Phase Flow Assessment in Vertical Pipes. **Journal of Oil, Gas and Alternative Energy Sources**, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, 2017. Received: Apr. 04, 2016; Accepted: Aug. 24, 2017. eprint: e.guerrero911@uniandes.edu.co.

LIMA, Luiz Eduardo Melo. **Análise do Modelo de Mistura Aplicado em Escoamentos Isotérmicos Gás-Líquido**. 2011. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Eugenio Spano Rosa. Disponível em: [↗](#).

PTC. **Considerações Especiais para o Método VOF**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r9.0/portuguese_br/index.html#page/simulate/cfd/SpclConsiderationsVOF.html. Acesso em setembro de 2024.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes**. Society of Petroleum Engineers: Society of Petroleum Engineers, 2006. Published: June 27, 2013; Paperback, 408 pages; ISBN-10: 155563107X; ISBN-13: 978-1555631079; Dimensions: 7 x 0.84 x 10 inches; Item Weight: 1.55 pounds. ISBN 978-1-61399-936-3.