

COMPARAÇÃO DOS MODELOS VOF E EULERIANO PARA UM ESCOAMENTO HORIZONTAL DE AR-ÁGUA NO PADRÃO ESTRATIFICADO

Kauê Almeida da Cruz*

Prof. Dr. Fabio Suguimoto Kenji**

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço ***

* UTFPR-CP, kaue16cruz@utfpr.edu.br

** UTFPR-CP, fksuguimoto@utfpr.edu.br

*** UTFPR-CP, mlourenco@utfpr.edu.br

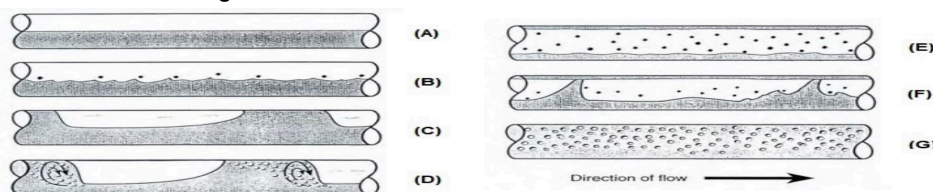
Resumo: Os escoamentos bifásicos são de grande importância na indústria petrolífera, pois ocorrem durante o transporte de petróleo bruto e gás natural. A investigação desses escoamentos é essencial para aumentar a eficiência e reduzir os custos das operações de extração. Entre os principais parâmetros analisados está a fração de vazio, que indica a proporção do volume ocupado pelo gás em relação ao volume total. Os padrões de escoamento mais comuns em tubulações horizontais incluem: Estratificado, Ondulado, Slug, Plug, Anular, Disperso e Bolhas. Este trabalho tem como objetivo identificar a fração de vazio, de um escoamento estratificado em um tubo horizontal de 2 metros de extensão e 26 mm de diâmetro, utilizando ar e água como fluidos, através de simulações no software Ansys Fluent. Serão utilizadas duas abordagens: o modelo Volume de Fluido (VOF), capaz de identificar os padrões de escoamento por meio do rastreamento das fases, e o modelo Euleriano, que determina os parâmetros considerando que cada fase é contínua. Os dados de entrada incluem velocidade, pressão e temperatura dos fluidos. Os resultados mostraram um erro de aproximadamente 12 % do VOF e experimental, e para o Euleriano de 11%. Tendo uma diferença de menos 1% entre os modelos.

Palavras-chave: escoamento bifásico. VOF. Euleriano. CFD.

1. Introdução

O escoamento bifásico, caracterizado pelo fluxo simultâneo de duas fases, como ar e água, é amplamente encontrado em setores industriais como o petrolífero e o nuclear. As interações entre as fases e com as superfícies das tubulações levam à formação de diversos padrões de escoamento, como estratificado (A), ondulado (B), bolha alongada (C), slug (D), anular (E) e bolhas dispersas (G) (SHOHAM, 2006), mostrado na Figura 1, os quais podem causar aumento na perda de carga e comprometer a eficiência operacional. Tradicionalmente, análises experimentais eram utilizadas para estudar esses fenômenos, porém apresentavam limitações quando aplicadas a diferentes condições de operação (BORGES, 2020). Nesse contexto, a simulação numérica por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tornou-se uma alternativa eficaz, proporcionando maior precisão na previsão do comportamento bifásico. Dentre os modelos numéricos disponíveis, destacam-se o modelo Euleriano e o Volume de Fluido (VOF) (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017), sendo este último mais apropriado para a representação da interface entre os fluidos. Este trabalho propõe o uso do modelo VOF e Euleriano com submodelo para avaliar a fração de vazio, no padrão estratificado em um fluxo horizontal de água e ar. As simulações foram conduzidas utilizando o software comercial Ansys Fluent, reconhecido por sua robustez em análises de escoamentos multifásicos.

Figura 1. Padrão de Escoamento Horizontal



Fonte: (SHOHAM, 2006).

2. Metodologia e Materiais

A modelagem matemática do escoamento bifásico gás-líquido requer a aplicação das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e, em alguns casos, energia. Neste estudo, como se considera um escoamento isotérmico, foram utilizados apenas os modelos de transporte de massa e momento nos modelos numéricos (BORGES, 2022). O modelo Volume de Fluido (VOF) é adequado para capturar interfaces entre fluidos imiscíveis, determinando a fração volumétrica de cada fase dentro do volume de controle, representada nas equações 1 e 2 (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017).

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

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

Já o modelo Euleriano resolve as equações para cada fase separadamente, acoplando-as por uma pressão comum, representada nas equações 3 e 4 (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). Os modelos de turbulência adotado foi o SST k-omega, que combina as vantagens dos modelos k-epsilon e k-omega, sendo eficiente tanto em regiões próximas quanto distantes das paredes. Para modelar os efeitos de tensão superficial nas interfaces, foi empregado o modelo CFS (Continuum Surface Force), acoplado à equação de momento para ambos os modelos (BRACKBILL; KOTHE; ZEMACH; 1992).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i \bar{u}_i) = -\alpha_i \nabla P + \alpha_i g + \nabla[\alpha_i(\tau_i + \tau_i^t) + M_i] \quad (4)$$

A malha computacional foi gerada em geometria 2D com uma junção em T, utilizando elementos triangulares e quadriláteros, com maior refinamento nas regiões próximas às paredes para melhor resolução do gradiente. As dimensões da tubulação são 26 mm de diâmetro e comprimento de 60D, garantindo a formação estável do padrão slug (CHIDAMOIO; AKANJI; RAFATI, 2017). Foram aplicadas três condições de contorno: duas entradas com velocidade definida, uma saída com pressão fixa e paredes com condição de não deslizamento. Para garantir a estabilidade numérica, utilizou-se o critério CFL no controle do passo de tempo (GUERRERO; MUÑOZ; RATKOVICH, 2017). A solução foi obtida com o método PISO para acoplamento à pressão-velocidade, utilizando discretizações de primeira ordem no tempo e segunda ordem para os termos espaciais. O modelo de turbulência SST k-omega, junto ao esquema upwind de segunda ordem, foi usado na resolução das equações de momento e energia cinética turbulenta. A tensão superficial foi modelada com valor de 0,072 N/m, conforme a literatura.

Na Tabela 1 é apresentado o número de elementos de cada malha e as frações de vazio de cada modelo.

Tabela 1 – Dados Análise de Malhas.

Malha	Nº Elementos	Fração de Vazio (VOF)	Fração de Vazio (Euleriano)
1	11375	0,5761	0,5743
2	14547	0,5777	0,5812
3	20895	0,5860	0,5811

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 2 é mostrado o erro entre as malhas 1 e 2, malha 2 e 3 para ambos modelos.

Tabela 2 – Erro entre as malhas.

Erro	VOF	Euleriano
Malha 1 - Malha 2	0,27 %	1,18%
Malha 2 - Malha 3	1,41%	0,01%

Fonte: Autoria própria.

3. Resultados

Com o objetivo de simular e validar o caso, foram utilizados os resultados experimentais adquiridos por (COSTA, 2006). As condições de operação, velocidades superficiais da água e ar, fração de vazio α e padrão de escoamento. Representado na Tabela 3.

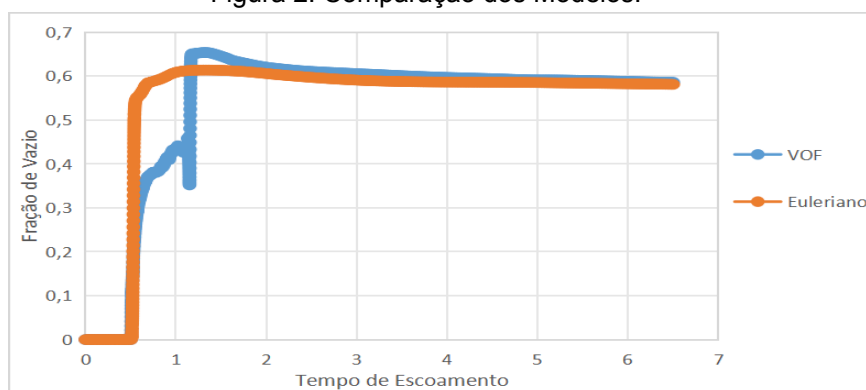
Tabela 3 – Dados Experimentais.

Jl [m/s]	Jg [m/s]	α	P (abs) [Pa]	Padrão Escoamento
0,055	0,942	0,523	101000	Estratificado

Fonte: (COSTA, 2006).

Na Figura 2 apresenta o gráfico de comparação da fração de vazio de ambos os modelos até 6,5 segundos de escoamento para a malha 3.

Figura 2. Comparação dos Modelos.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4 utilizou os dados da malha 3 para calcular o erro entre simulado e experimental. Observa-se também que a diferença entre os modelos é inferior a 1%, o que já era esperado, uma vez que o modelo Euleriano não necessita de uma malha com altos refinamentos para a previsão da fração de vazio, além de exigir menor tempo de simulação. Por outro lado, o método VOF acaba sendo mais custoso, pois demanda maior capacidade computacional e refinamentos mais precisos. Apesar disso, seu desempenho é superior na identificação dos padrões de escoamento, conforme indicado por (COSTA, 2006).

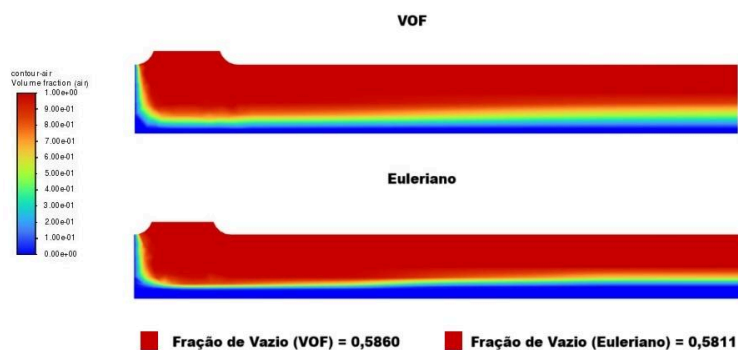
Tabela 4 – Erro entre experimental e simulado.

Erro	VOF	Euleriano
α	12,04%	11,10%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 mostra o resultado da malha 3, sendo o tipo de padrão para ambos os modelos é escoamento estratificado, de acordo com a literatura.

Figura 3. Padrão Estratificado



Fonte: Autoria própria.

4. Conclusões

A simulação numérica dos modelos VOF e Euleriano, aplicada em conjunto com os modelos propostos para o escoamento bifásico horizontal em um tubo de 26 mm, foi realizada no software Ansys Fluent utilizando uma geometria bidimensional. Os resultados foram comparados com dados disponíveis na literatura. Ambos os modelos apresentaram concordância com o padrão de escoamento estratificado. No entanto, para a fração de vazio, observou-se um erro de 12,04% no modelo VOF em relação aos dados experimentais, enquanto o modelo Euleriano apresentou um erro de 11,10%. Para análises futuras, recomenda-se implementar um método de registro do tempo de processamento das simulações e adotar estratégias para evitar interrupções durante a execução, o que contribuirá para maior confiabilidade nos resultados.

5. Referências Bibliográficas

- SHOHAM, Ovadia. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. Society of Petroleum Engineers, 2006. ISBN 978-1-61399-936-3.
- BORGES, Guilherme Martinez. *Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Ar-Água Vertical*. Cornélio Procópio, PR: [s. n.], 2020. Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica (IC) vinculado ao projeto "Estudo do Escoamento Bifásico Isotérmico Vertical", Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Orientador: Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto.
- 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.
- BORGES, Guilherme Martinez. *Simulação de Escoamento Bifásico Vertical em CFD*. Cornélio Procópio, PR: [s. n.], 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Orientador: Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto.
- BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D. B.; ZEMACH, C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*, Los Alamos National Laboratory, v. 100, p. 335–354, 1992.
- CHIDAMOIO, João; 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.
- 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, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Ph.D. Jader Riso Barbosa Junior.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, à UTFPR Campus Cornélio Procópio pelo suporte material e estrutura, Fundação Araucária pelo apoio financeiro, o qual possibilitou a realização deste trabalho. Ao orientador, Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto, pela paciência e orientação constante ao longo desta etapa acadêmica. Sua presença indo além do que era necessário, foi fundamental para a realização deste trabalho. Estendo meus agradecimentos ao Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço cujos conselhos e contribuições foram extremamente valiosos durante o desenvolvimento desta pesquisa. Aos meus pais e irmãs, agradeço profundamente pelo apoio incondicional e por sempre me proporcionarem as condições necessárias para estar aqui e seguir em frente. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada e contribuíram para minha formação até aqui.

Responsabilidade pelas Informações

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.