

ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-ÓLEO EM DUTO FLEXÍVEL SUBMERSO

Vinicius de Sousa Melo

UFCG/CCT/DEM/REDE COOPERATIVA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL
Bolsista DTI (CNPq)

Marcelo Antonio de Figueiredo BenevidesIrineu

UFCG/CCT/DEM/Bolsista Mestrado ANP (PRH-25)

Janailson Delfino de Souza

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Maitozambuh Araújo Cadê

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Antonio Gilson Barbosa de Lima

UFCG/CCT/DEM/ Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, E-mail: gilson@dem.ufcg.edu.br;

Resumo. *O escoamento multifásico, nos dias atuais, se constitui numa das áreas de pesquisa que desperta grande interesse. Na indústria do petróleo, notadamente uma indústria de manuseio de fluidos, a ocorrência de fluxo multifásico é bastante comum nas instalações de produção, quando os fluidos existentes nos reservatórios escoam até as instalações de superfícies passando por poços, linhas de surgência e ainda risers, quando da movimentação de fluidos de campos ligados à plataformas marítimas, nas instalações de movimentação, quando os fluidos produzidos são transferidos para outras áreas por meio de dutos bifásicos. A complexidade do tema está associado a existência de arranjos diferenciados das fases presentes e como consequência, a necessidade de modelagens diferenciadas para os fenômenos de transferência interfacial dependendo do padrão de escoamento. Via de regra, a engenharia de petróleo está interessada em conhecer as perdas de carga multifásica, assim como o comportamento das fases durante o escoamento. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é simular o escoamento bifásico (gás-óleo), tridimensional, em regime permanente, em dutos flexíveis submerso, utilizando o método dos volumes finitos e o software CFX-3D. As equações governantes escolhidas no sistema de coordenadas generalizadas são resolvidas pelo método dos volumes finitos usando um arranjo de variáveis co-localizada, o esquema HIBRIDO como função de interpolação dos termos convectivos, o método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. Resultados numéricos das distribuições de velocidade, pressão e fração de vazio das fases presentes são apresentados e analisado., O estudo da distribuição de velocidade, pressão de fração de vazio das fases líquidos a e gasosa, no interior do duto permitirão aumentar a confiabilidade operacional e a vida útil da malha de dutos, prevendo a existência de vazamentos e minimizando os custos operacionais.*

Palavras-chave: escoamento bifásico, volumes finitos, CFX-3D, dutos flexíveis

1. INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico, nos dias atuais, se constitui numa das áreas de pesquisa que desperta grande interesse não só da engenharia de petróleo como também de outros ramos da ciência, a exemplo da engenharia nuclear. A ocorrência de escoamentos multifásicos em tubulações verticais, horizontais e inclinadas é muito comum em diversas atividades industriais, entre elas, a indústria de petróleo.

Na indústria do petróleo, notadamente uma indústria de manuseio de fluidos, a ocorrência de fluxo multifásico é bastante comum nas instalações de produção, movimentação e processamento de hidrocarbonetos de um campo petrolífero. Nos sistemas de produção, quando os fluidos existentes nos reservatórios escoam até as instalações de superfícies passando por poços, linhas de surgência e ainda risers, quando da movimentação de fluidos de campos ligados à plataformas marítimas. Nas instalações de movimentação registram-se escoamentos multifásicos quando os fluidos produzidos são transferidos para outras áreas por meio de dutos bifásicos. As unidades de processamento de óleo e gás natural experimentam tais escoamentos, quando do condicionamento dos fluidos produzidos em desidratadores, tratadores, vasos separadores, e torres de fracionamento (Neto, 1989).

Os escoamentos trifásicos de gás e líquidos imiscíveis são de importância prática considerável para a indústria de gás e petróleo. Os dutos de gás dessas indústrias geralmente contêm água e condensados de hidrocarbonetos, enquanto que os dutos de óleo podem também possuir vapor e água. Apesar da importância prática, é surpreendente como relativamente poucos trabalhos têm se dedicado ao estudo do caso de escoamento trifásico (Taitel et al., 1995).

Nos últimos anos, muitos estudos se dedicaram ao escoamento bifásico em tubulações, principalmente na indústria de petróleo. A complexidade do tema está associada à existência de arranjos diferenciados das fases presentes e como consequência, a necessidade de modelagens diferenciadas para os fenômenos de transferência interfacial dependendo do padrão de escoamento. Isto se justifica porque, o estado-da-arte no escoamento multifásico não permite resolver com exatidão todos os problemas ou limitações técnicas com ele relacionados. Via de regra, a engenharia de petróleo está interessada em conhecer as perdas de carga multifásica, assim como o comportamento das fases durante o escoamento. Neste sentido, Rao (1998) apresenta uma discussão sobre quatro modelos muito usados em predição de campos de pressão em escoamentos. O range de aplicabilidade dos modelos dependem de vários fatores como diâmetro do duto, razão gás-líquido, se apresenta água misturada entre outros parâmetros.

Oddie et al. (2003) estudaram, experimentalmente, o escoamento multifásico, gás-água, óleo-água e óleo-gás-água em um duto transparente de 11 m de comprimento em diferentes inclinações, e obtiveram resultados concernentes à perda de carga e tipos de escoamento. Além destes, outros trabalhos na área de escoamento multifásico podem ser citados tais como: Neto (1993), Badie et al. (2000), Abdul-Majeed (1996), Ouyang et al. (2002), Valko et al. (2002), Lahey, Jr. et al. (2000), Abdul-Majeed et al. (2000).

Visando dar uma contribuição na área de escoamento de fluidos petrolíferos (petróleo e gás), o presente trabalho tem como objetivos: modelar matematicamente o escoamento isotérmico de petróleo e gás em um duto (linha flexível) irregular; simular a distribuição de velocidade, pressão e fração de vazio dos fluidos ao longo de uma linha de produção, usando o software CFX[®] 3D.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática para descrever o escoamento de um fluido monofásico no interior de dutos irregulares é constituída pelas seguintes equações (CFX-User Manual, 1997):

❖ Equação geral da advecção-difusão:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \phi_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha \phi_\alpha - \Gamma_\alpha \nabla \phi_\alpha)) \\ &= r_\alpha S_\alpha + \sum_{\beta=1}^{N_p} c_{\alpha\beta} (\phi_\beta - \phi_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\dot{m}_{\alpha\beta} \phi_\beta - \dot{m}_{\beta\alpha} \phi_\alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

onde $\mathbf{U} = (u, v, w)$ é a velocidade do fluido, ρ é a densidade do fluido, Γ é o coeficiente de difusão e S é termo fonte, \dot{m} é o fluxo de transferência massa interfásica. O termo $c_{\alpha\beta}(\phi_\beta - \phi_\alpha)$ descreve a transferência inter-fásica de ϕ entre as fases α e β . Os parâmetros $c_{\alpha\alpha}=0$, $c_{\alpha\beta} = c_{\beta\alpha}$, conseqüentemente a soma sobre todas as fases de todos os termos de transferência inter-fásicos é nula. Os termos $\dot{m}_{\alpha\beta} \phi_\beta - \dot{m}_{\beta\alpha} \phi_\alpha$ só surgem se a transferência de massa inter-fase estiver presente.

❖ Equação da continuidade:

A equação de continuidade é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\dot{m}_{\alpha\beta} - \dot{m}_{\beta\alpha}) \quad (2)$$

❖ Equação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha \otimes \mathbf{U}_\alpha - \mu_\alpha (\nabla \mathbf{U}_\alpha + (\nabla \mathbf{U}_\alpha)^T))) \\ &= r_\alpha (B - \nabla p_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} c_{\alpha\beta}^{(d)} (\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha) + F_\alpha + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\dot{m}_{\alpha\beta} \mathbf{U}_\beta - \dot{m}_{\beta\alpha} \mathbf{U}_\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

A soma das frações de vazão é unitária:

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha = 1 \quad (4)$$

Utiliza-se o mesmo campo de pressão para todas as fases.

$$p_\alpha = p_1 = p \quad 2 \leq \alpha \leq N_p \quad (5)$$

Visando simplificar o modelo e a solução das equações governantes, as seguintes considerações foram assumidas: escoamento laminar; tridimensional; incompressível; isotérmico; regime permanente; propriedades termo-físicas constantes; sem existência de força de corpo.

As seguintes condições de contorno foram usadas:

- $\Rightarrow u = v = 0$ e $w = w_0 = 0,065 \text{ m/s}$ em $z = 0$ para $\forall (x, y)$;
- $\Rightarrow u = v = w = 0$ para $\forall (x, y) / x^2 + y^2 = R^2$;
- \Rightarrow condição de contorno parabólica na saída do duto;
- $\Rightarrow r_\alpha = 0,15$, fração de vazão da fase gasosa;

3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

Para geração da malha numérica e solução numérica das equações governantes utilizou-se o software CFX[®] 3D versão 4.4. Trata-se de um simulador comercial para resolução numérica de problemas envolvendo mecânica dos fluidos e transferência de calor. O software emprega a metodologia de volumes finitos (Maliska, 1995) utilizando malhas estruturadas, porém com flexibilidade de adaptação a geometrias complexas através do uso de coordenadas generalizadas e a possibilidade de resolução com a metodologia de multidomínios. Além de resolver as equações de Navier-Stokes em três dimensões, o software possui uma extensa quantidade de modelos para diferentes aplicações que vão desde escoamentos turbulentos até modelos para escoamentos em meios porosos, combustão e escoamentos multifásicos, entre vários outros. Uma outra característica interessante do código computacional é que permite a inclusão de novos modelos ou modificação dos já implementados, sejam estes para a consideração de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos, através de sub-rotinas em linguagem FORTRAN. Isto torna o software adequado para pesquisa científica, possibilitando testar diferentes modelos matemáticos, analisar influência de determinados parâmetros, etc., sem ser necessário o árduo trabalho de implementação numérica das equações de Navier-Stokes ou modelos matemáticos amplamente conhecidos na literatura (CFX-User Manual, 1997).

Para a obtenção da solução do problema, utilizou-se o esquema HÍBRIDO de interpolação para os termos convectivos e método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. Um critério de convergência de 10^{-8} kg/s foi usado para a massa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Malha Numérica

Todo o trabalho foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, do Departamento de Engenharia Mecânica, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. A máquina utilizada para a simulação do escoamento foi um Pentium IV de 1.7 Ghz, com 512 MB RAM e HD de 40 Gb.

A Figura (1) ilustra detalhes da malha utilizada, que contém 250000 elementos, e 292083 pontos nodais obtidos após vários refinamentos.

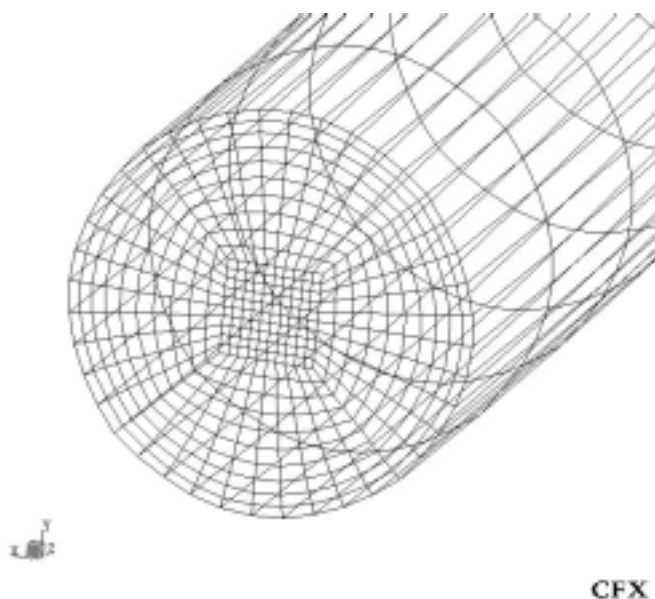


Figura 1. Vista da secção transversal da malha numérica.

4.2. Resultados Numéricos

Neste estudo, o número de Reynolds foi de aproximadamente 20 (escoamento laminar). Foram utilizadas propriedades dos fluidos conforme a Tab. (1). O duto usado tem um comprimento de 50 m e diâmetro de 0,15 m. O formato da extensão do duto foi admitido como sendo uma catenária com uma distância horizontal entre o topo e a base de 17,5 m e uma distância vertical de 44 m. A Fig. (2) ilustra o formato do duto e a distribuição de pressão ao longo do mesmo.

Tabela 1. Propriedades físicas das fases usadas na simulação.

Propriedade	Valor	Fonte
ρ (óleo)	900 kg/m ³	Incropera e DeWitt (2002)
μ (óleo)	0,5 N.s/m ²	-----
ρ (gás)	1,2 kg/m ³	Incropera e DeWitt (2002)
μ (gás)	0,000018 N.s/m ²	Incropera e DeWitt (2002)
Φ (diâmetro da bolha de gás)	5 mm	
Fração de vazio	0,15	

Nesta simulação foi utilizado um tempo de CPU de $3,954 \times 10^5$ s, sendo realizadas 20000 iterações, com um fluxo de massas de 0,864 kg/s para a fase líquida e de 0,0002034 kg/s para a fase gasosa. Um $\Delta P = 2031,59$ Pa foi necessário para deslocar a mistura bifásica de óleo e gás em todo o trecho do duto, sem considerar os efeitos da gravidade. Levando-se em consideração este efeito deve-se adicionar a este valor, um ΔP equivalente ao peso da coluna do fluido (hidrostática, com densidade média ponderada pela fração de vazio) para a altura considerada. Considerando o escoamento monofásico completamente desenvolvido em duto reto (White, 1991), uma perda de carga de $\Delta P = 2311,11$ Pa teria sido obtida. Isto corresponde uma diferença de 279,52 Pa que deve ser atribuída a uma modelagem mais completa usada neste trabalho.

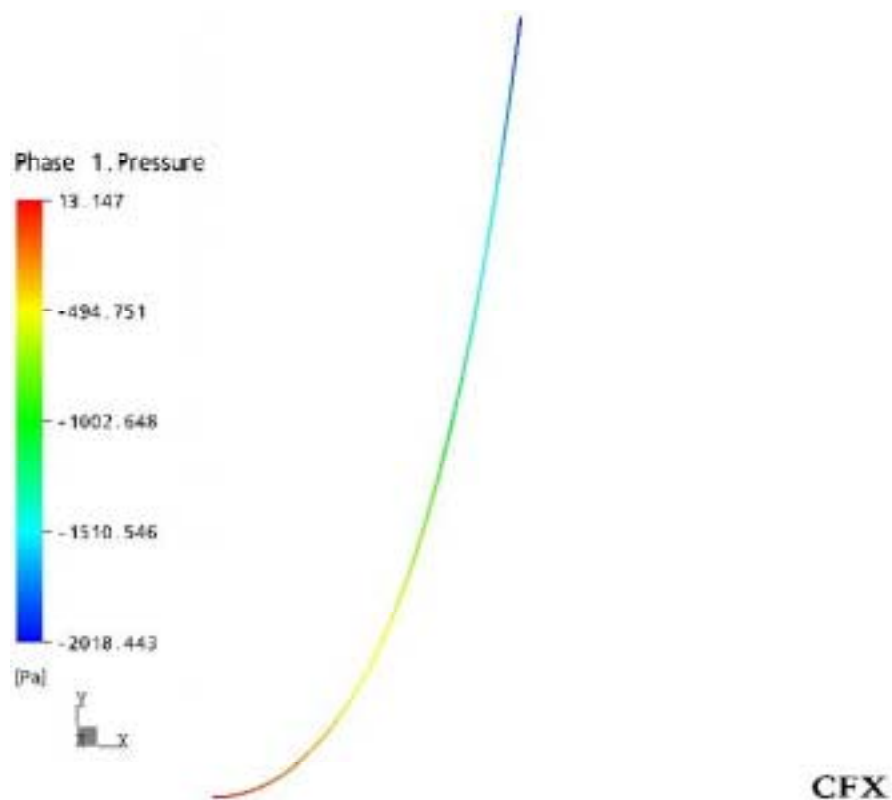


Figura 2. Campo de pressão dos fluidos (óleo e gás) ao longo do duto.

As Figuras (3a-b) ilustram os perfis de velocidade na entrada do duto para cada fase. Observa-se que o escoamento rapidamente se torna completamente desenvolvido e que a velocidade da fase gasosa adquire maior velocidade que a fase líquida. No entanto, a velocidade de deslizamento entre as fases pode ser considerada pequena.

A Figura (4) ilustra a distribuição de fração de vazio para a fase gás no mesmo trecho que o apresentado na Fig. (3). De acordo com a figura, observa-se uma simetria da fração de vazio radialmente. Tal aumento de concentração pode implicar, por conseguinte em um maior ataque corrosivo ao material do duto pelo gás, como difusão de hidrocarbonetos e fragilização da estrutura. Portanto recomenda-se estudar tal efeito e determinando qual curvatura se adequaria a uma utilização em campo, que maximize a vida útil de tais dutos, visto que são largamente utilizados e sua colocação no mar é feito por trechos em forma de catenárias ancoradas por lastros que definem sua curvatura. Por outro lado, a maior facilidade do gás, devido a sua menor densidade, para se deslocar no mesmo sentido da curvatura do duto, confirma a habilidade deste sistema para separar as fases presentes no escoamento.

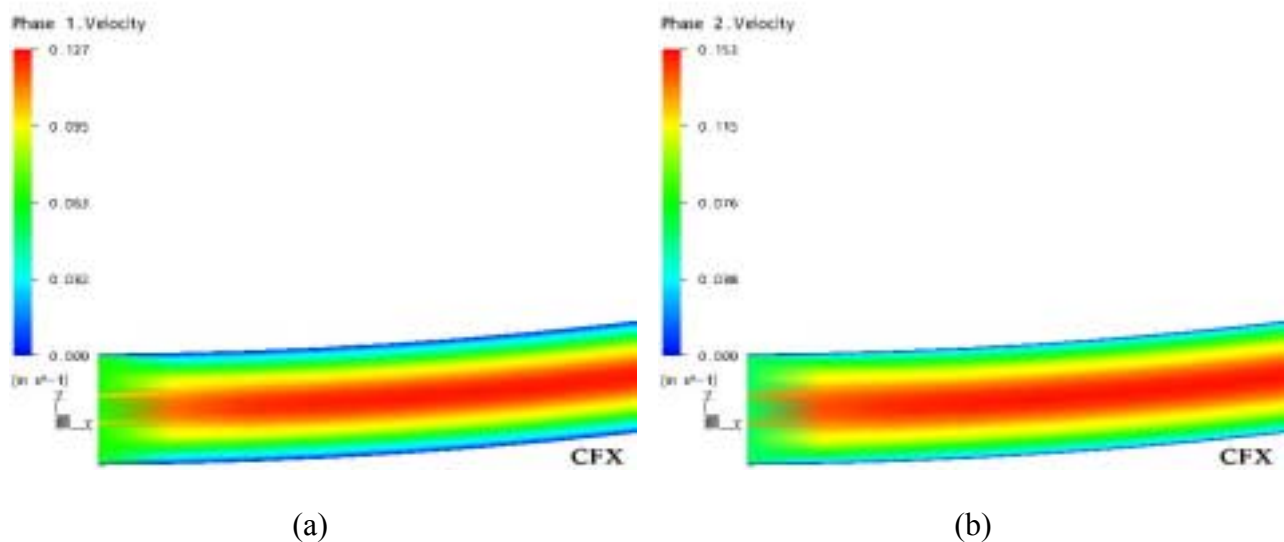


Figura 3. Distribuição da velocidade na entrada do duto. (a) óleo (b) gás.

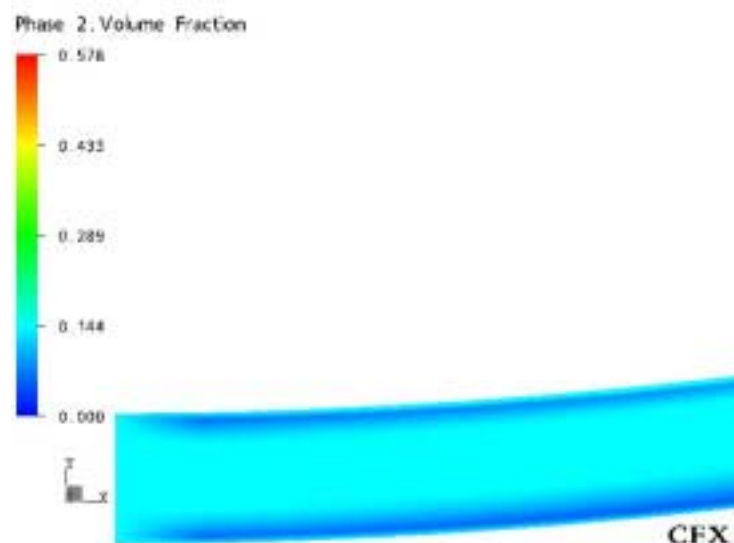


Figura 4. Distribuição da fração de vazio do gás na entrada do duto.

As Figuras (5a-b) ilustram as distribuições da velocidade do óleo e do gás na secção transversal do duto a uma altura de 20 m a partir do ponto inicial. Observa-se uma leve assimetria no campo de velocidade de ambas as fases. A Fig. (6) ilustra a distribuição de fração de vazio para a fase gás no mesmo trecho que o apresentado na Figura 6. De acordo com esta figura, o líquido se concentra na parede oposta, devido à força centrífuga, como esperado.

As Figuras (7a-b) ilustram as distribuições da velocidade do óleo e do gás na secção transversal na saída do duto. De acordo com a Fig. (7), o perfil de velocidade tende a voltar a ser aproximadamente simétrico devido ao fato do duto tender a um duto reto vertical. Comparando com a Fig. (8), verifica-se que o efeito da diminuição da curvatura do duto faz com que a fração de vazio da fase gás tenda a se distribuir simetricamente. Se o trecho do duto se tornar reto o escoamento tenderá a ficar simétrico.

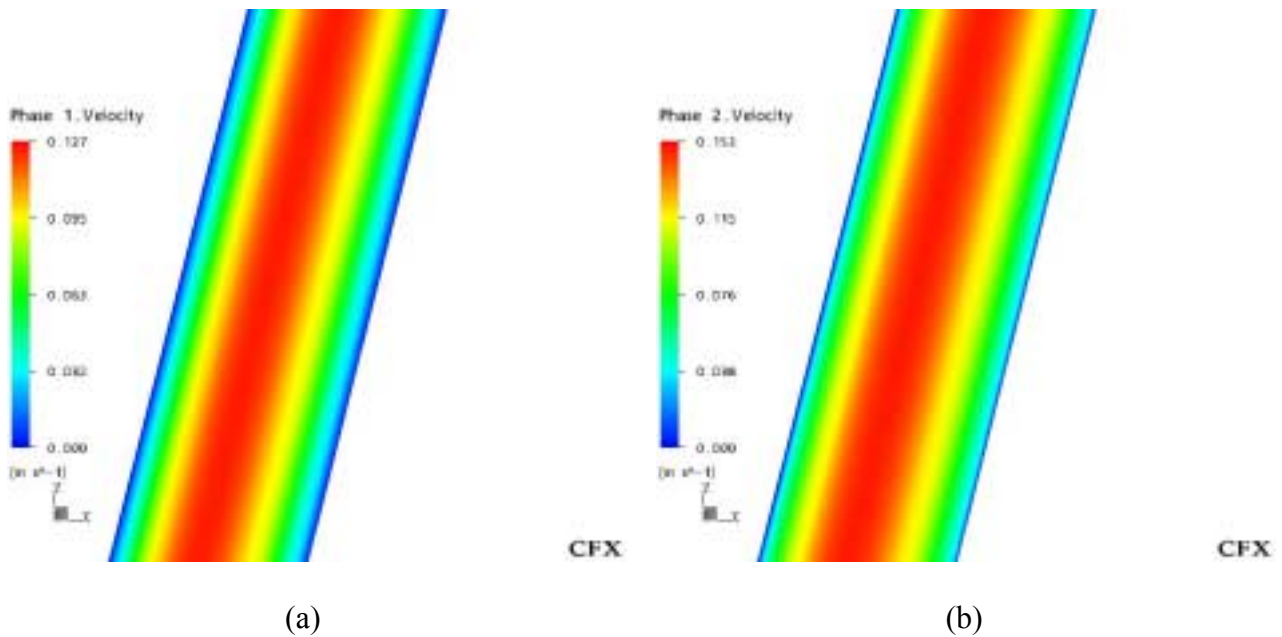


Figura 5. Distribuição da velocidade no duto a uma altura de 20 m. (a) óleo (b) gás.

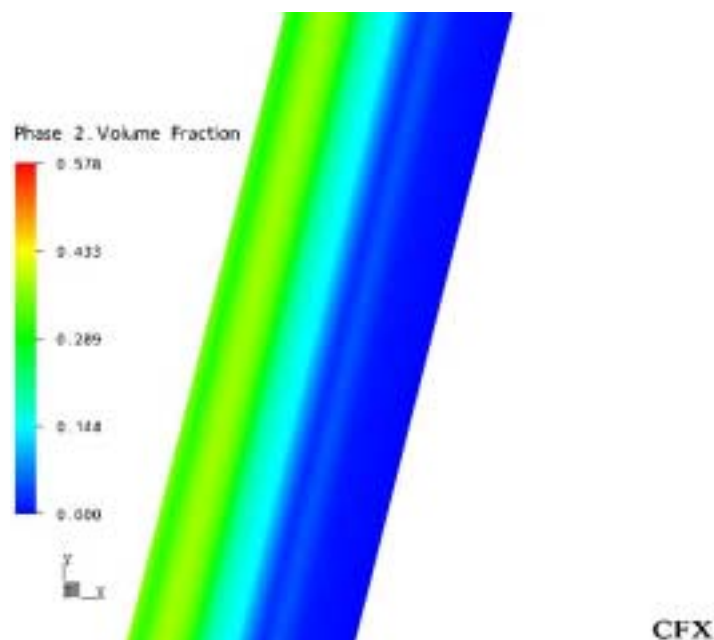


Figura 6. Distribuição da fração de vazio do gás na secção transversal do duto a uma altura de 20m.

Vale salientar, que não houve convergência para o problema aqui apresentado, quando se acoplaram na modelagem, as forças de flutuação. O tempo de máquina para obter a solução para o escoamento bifásico chegou até oito vezes o tempo de simulação para a mesma geometria de duto com escoamento monofásico.

Comparando-se as Figs. (3), (4) e (8) verifica-se, na entrada do duto, um acúmulo de líquido, mas que não provocou um bloqueio da tubulação. Verifica-se ainda que o padrão de escoamento é bastante diferente dos tipos mais conhecidos tais como: bolhas, bolhas dispersas, golfadas e anular estratificado, devido a baixa velocidade do escoamento.

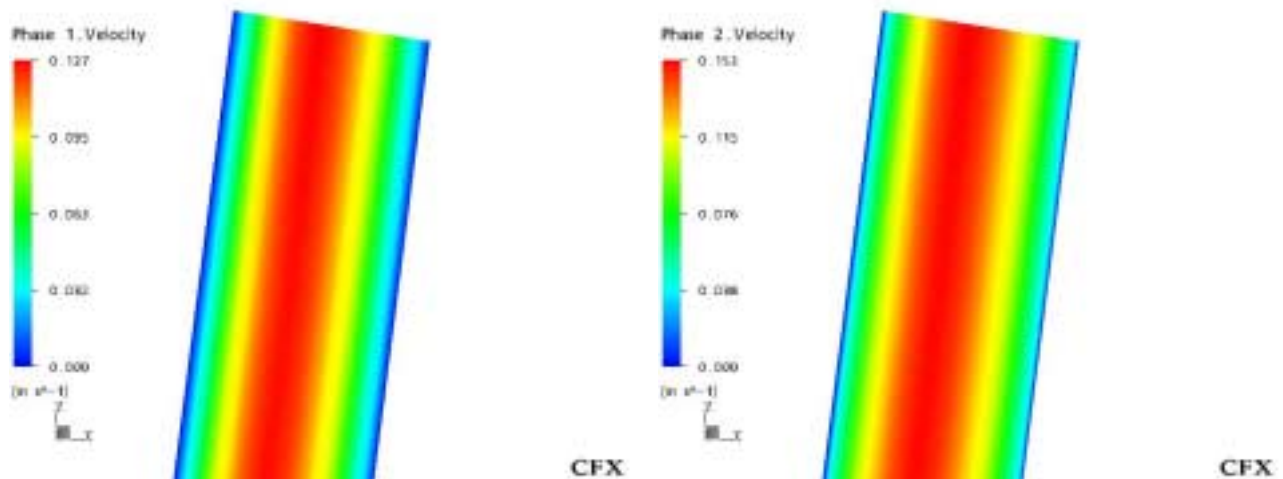


Figura 7. Distribuição da velocidade na saída do duto. (a) óleo (b) gás.

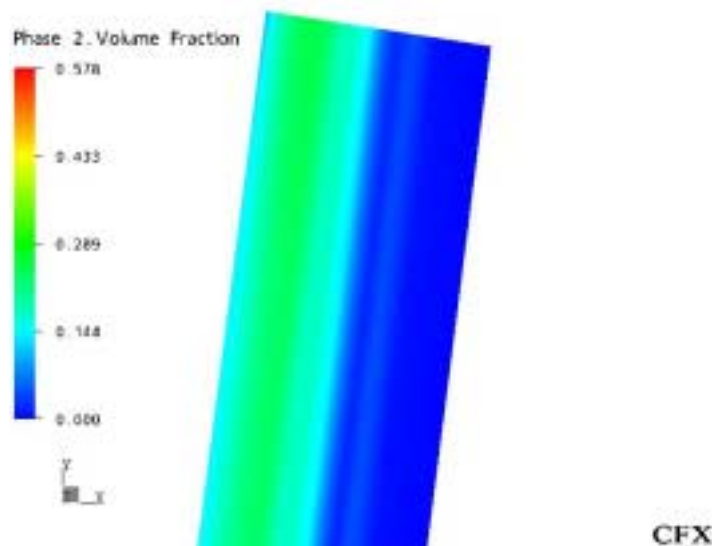


Figura 8. Distribuição da fração de vazio do gás na saída do duto.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a simulação de um escoamento bifásico (óleo-gás) em um duto em forma de catenária usando o software CFX. Dos resultados obtidos pode concluir que: o escoamento rapidamente se torna completamente desenvolvido e que a velocidade da fase gasosa é maior que a da fase líquida; o efeito de curvatura do duto distribuiu as fases presentes, de modo que

o gás se concentrou em uma das paredes do duto, devido ao efeito da força centrífuga no óleo; uma perda de carga de 2031,59 Pa foi necessário para deslocar a mistura bifásica de óleo e gás com um fluxo de massas de 0,864 kg/s para a fase líquida e de 0,0002034 kg/s para a fase gasosa em todo o trecho do duto, sem considerar os efeitos da gravidade.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq, a ANP/UFCG-PRH-25, a FINEP e ao CT-PETRO, pelo apoio financeiro concedido, e aos pesquisadores referenciados que com suas pesquisas, ajudaram no melhoramento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Abdul-Majeed, G.H., 1996, "Liquid holdup in horizontal two-phase gás-liquid flow", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 15 pp. 271-280.
- Abdul-Majeed, Ghassan H.; Al-Mashat, Ali M., 2000, "A mechanistic model for vertical and inclined two-phase slug flow", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 27 pp. 59-67.
- Badie, S., Hale, C.P., Lawrence, C.J., Hewitt, G.F., 2000, "Pressure gradient and holdup in horizontal two-phase gas liquid flows with low liquid loading", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 1525-1543
- CFX-User manual. AEA Technology, United Kingdom, 1997.
- Maliska, C. R., 1995, "Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional", LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Ouyang, L., Aziz, K., 2002, "A mechanistic model for gas-liquid flow in horizontal wells with radial influx or outflux", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 20, n. 1 e2, pp. 191-222
- Neto, S. J. A., 1993, "Estudo de escoamento bifásico em gasodutos através de modelagem mecanicista", Campinas: UNICAMP, Dissertação de mestrado.
- Neto, A. S., 1993, "Two-phase transient bubble dynamics", Doctor Thesis, The Pennsylvania State University, USA, 324p.
- Rao, B., 1998, "Multiphase flow models range of applicability", CTES, L.C9870 Pozos Lane Conroe, Texas 77303.
- Oddie, G., Shi, H., Durlofsky, L.J., Aziz, K., Pfeffer, B., Holmes, J. A., 2003, "Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29, pp. 527-558,
- Lahey Jr., R. T., Drew, D. A., 2000, "An analysis of two-phase flow and heat transfer using a multidimensional, multi-field, two-fluid computational fluid dynamics (cfd) model", Japan/US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, Santa Barbara, California, June 5-8.
- Taitel, Y., Barnea, D., Brill, J. P., 1995, "Stratified three phase flow in pipes", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, n. 1, pp. 53-60.
- Valko, P. P., McCain Jr, W. D.; 2003, "Reservoir oil bubble point pressures revisited; solution gas-oil ratios and surface gas specific gravities", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 37, pp. 153- 169.
- White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow", Ed. MacGraw-Hill, Inc., New York, 614 p.

GAS-OIL TWO-PHASE FLOW IN FLEXIBLE PIPE SUBMERGED

Vinicius de Sousa Melo

UFCG/CCT/DEM/REDE COOPERATIVA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL
Bolsista DTI (CNPq)

Marcelo Antonio de Figueiredo Benevides Irineu

UFCG/CCT/DEM/Bolsista Mestrado ANP (PRH-25)

Janailson Delfino de Souza

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Maitozambuh Araújo Cadê

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Antonio Gilson Barbosa de Lima

UFCG/CCT/DEM/ Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, E-mail: gilson@dem.ufcg.edu.br.

Abstract. *Multiphase flow, in the current days, represents research areas that it wakes up great interest. In the petroleum industry, the occurrence of multiphase flow is common in the production facilities, as fluids in the reservoirs drain until the surfaces through by wells; in transport lines and risers, when fluids moves of fields linked to marine platforms, and when the fluids produced are transferred for other areas through two-phase pipeline. The complexity of the theme is associated the existence of arrangements of the present phases and the different modeling for the interfacial transfer phenomena depending on the drainage pattern. In general, the petroleum engineering is important to know the losses of pressure, as well as the behavior of the phases during the drainage. In this sense, the objective of this work is to simulate a three-dimensional two-phase flow (gas-oil), in steady state, in flexible pipe submerged, using the finite-volumes method and the software CFX-3D. The governing equations in the generalized coordinates system are solved using a co-located variables arrangement, the HYBRID scheme as interpolation function of the convective terms, the method SIMPLEC for the pressure-velocity coupling. Numerical results of the distributions of velocity, pressure and void fraction of the phases are presented and analyzed. The study of the distribution of velocity, pressure and void fraction of the liquids and gaseous phases, inside the pipe will allow increasing the operational reliability and the useful life of the pipeline, foreseeing the existence of leaks and minimizing the operational costs.*

Keywords: *two-phase flow, finite-volume, CFX-3D, flexible pipe*