

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Análise CFD do efeito da geometria na separação gás-líquido (água-óleo) em dutos helicoidais

AUTORES:

Francisco Rafael M. da Mota

Daniel Juan Pagano

Agustinho Plucenio

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Santa Catarina

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

Análise CFD do efeito da geometria na separação gás-líquido (água-óleo) em dutos helicoidais

Abstract

The effect of curvature and torsion on the phase distribution on the multiphase flow in helical pipe of circular cross-section is studied numerically by the finite volume method. The present study is to contribute some knowledge of phase separation phenomena of gas-liquid turbulent flow in curved pipe and provide a basis for the development of a helical pipe partial separator. The turbulent flow development was simulated by using the $k - \varepsilon$ standard turbulence model. A finite volume method with an unstructured nonuniform mesh was employed for solving the model. Phase distribution characteristics of 3D helical pipe two-phase flow were examined under conditions of different geometrical parameters to analyze the effect of the curvature ratio and torsion on the gas phase segregation. The result showed that the separation efficiency is the function of geometrical and fluid parameters.

1 Introdução

Muitos estudos têm sido feitos sobre escoamento em dutos curvados (toroidais, helicoidais e espirais) devido ao seu interesse físico, bem como sua importância prática. Em Berger et al (1983) e Ito (1987), encontra-se um ótimo *review* dos trabalhos realizados sobre escoamentos em dutos toroidais (passo zero) datados desde 1876 até 1987.

Ao se considerar a configuração helicoidal tem-se, inevitavelmente, dois parâmetros que caracterizam o escoamento: a curvatura e a torção. Neste caso, o escoamento secundário (observado por Eustice 1910 e 1911) causado pela ação da força centrífuga devido à curvatura do duto pode ser afetado pela torção, resultando em padrões de escoamentos distintos daqueles encontrados para a configuração toroidal. A vazão ou fricção através do duto também podem ser afetadas pela torção. O escoamento secundário, observado desde uma seção transversal, para grandes valores de torção deixa de apresentar a recirculação simétrica (Dean 1927, 1928 e 1928b) sendo então caracterizado por um único vórtice. Em Rennier (2004) pode-se encontrar um levantamento dos trabalhos sobre escoamentos em dutos helicoidais.

Quanto ao regime, escoamentos monofásico ou multifásico em dutos curvados são frequentemente encontrados na indústria, por exemplo, escoamento bifásico (água-óleo) ou trifásico (gás-água-óleo) em trocadores de calor na indústria química e petrolífera.

A separação de fases ocorre em todos os tipos de dutos curvados devido às diferenças na força centrífuga, força da gravidade e efeito do escoamento secundário entre as fases. Desta maneira, algumas singularidades presente nas tubulações, como Tês e curvas, são utilizados como separadores parciais. Curvas do tipo U, se bem dimensionadas, também podem atuar como separadores parciais. Neste caso, o principal responsável pela segregação das fases é a ação da força centrífuga gerada pela curvatura do duto. A fase mais leve se desloca desde a região central em direção a parede interna do duto, enquanto a mais pesada permanece na região externa. Se apenas uma curva não for suficiente para promover a separação, pode-se usar uma sucessão de curvas, formando, assim, uma trajetória helicoidal.

Issa e Oliveira (1993) desenvolveram um método numérico para avaliar o fenômeno de separação de fases em um escoamento bifásico através de uma junção do tipo T. O mapa de contornos da fração volumétrica revelou a presença de uma bolsa com alta concentração de gás na entrada do braço lateral, concordando com os resultados obtidos em experimentos. Azzopardi (2002) usou uma junção T como

um separador parcial vapor-líquido instalado na entrada de uma coluna de destilação. Seus resultados mostraram boa concordância com Issa e Oliveira (1993).

Gao et al (1999) investigaram (numérica e experimentalmente) a separação líquido-sólido de um escoamento bifásico turbulento em um canal curvo. O escoamento bifásico no interior do canal curvo bidimensional (2D) foi simulado usando um esquema de acoplamento Euler-Lagrange. A distribuição das fases foi examinada sob diferentes características do escoamento e da geometria como tamanho de bolha da fase dispersa, vazão e raio de curvatura do canal. Eles concluíram que há um aumento da eficiência de separação ao aumentar a vazão e ao diminuir o raio de curvatura. Os autores concluíram também que a separação de fases é resultado da combinação dos efeitos da força centrífuga, das várias forças hidráulicas e do escoamento secundário. Sendo a força centrífuga, que promove o deslocamento das partículas desde o centro de curvatura à parede externa do canal, a principal causadora do fenômeno. Porém a força de arrasto e o escoamento secundário desempenham um papel negativo quanto a separação.

Jun et al estudaram (numérica e experimentalmente) o escoamento bifásico água-óleo no interior de um duto helicoidal, afim de desenvolverem um separador líquido-líquido que combinasse diversos princípios de separação mecânica. O método Euler-Euler e o modelo de Euler foram aplicados para conduzir as simulações numéricas. Eles concluíram que a eficiência de separação dos dutos helicoidais está em função do raio de curvatura, tempo de residência, pressão na entrada e saída do duto, diferença das densidades das fases, diâmetro da gota de líquido, etc. Também observaram que a força centrífuga é diretamente proporcional ao quadrado da vazão e inversamente proporcional ao raio de curvatura. Portanto, ao aumentar a vazão e reduzir o raio de curvatura pode-se eficientemente, melhorar o processo de separação.

Portanto, este trabalho, tem como objetivo investigar numericamente o efeito da geometria (curvatura e torção) no fenômeno de separação gás-líquido (água-óleo) e contribuir na formulação da base teórica para o desenvolvimento de um sistema de separação parcial e medição de fração de água (*water cut*).

2 Metodologia

2.1 Equações Governantes e Modelo de Turbulência

Neste trabalho, fez-se uso do modelo de formulação multifásico Euler-Euler do pacote de simulação fluidodinâmica ANSYS-CFX V.12.0. Água, óleo e gás foram considerados como fluidos isotermais, imiscíveis e incompressíveis. Para a mistura trifásica foi assumido água como fase contínua com óleo e gás sendo consideradas fases dispersas em forma de gota e bolha, respectivamente.

Desta maneira, a equação de momento para cada fase é dada por

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla(r_\alpha(\rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha)) = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla(r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)) + \sum_{\beta=1}^{N_P} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha) + S_{M\alpha} + M_\alpha \quad (1)$$

em que r_α , ρ_α and μ_α são a fração volumétrica, densidade e viscosidade da fase α (β), respectivamente. $S_{M\alpha}$ descreve as fontes de momento devido forças externas e M_α descreve a força interfacial agindo na fase devido à presença de outras fases. O termo $(\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha)$ representa a transferência de momento induzido pela transferência de massa na interfase e para o propósito deste trabalho, foi lhe atribuído valor igual a zero. A força total exercida sobre fase α devido à interações com outras fases é denominada M_α , e é dado por

$$M_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} M_{\alpha\beta} \quad (2)$$

em que $M_{\alpha\beta}$ é a transferência de momento na interfase dado às forças interfaciais atuando sobre cada fase α devido às interações com a fase β .

A equação de continuidade para o escoamento multifásico é dada por

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_P} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (3)$$

em que $S_{MS\alpha}$ as fontes de massa especificadas pelo usuário e $\Gamma_{\alpha\beta}$ representa a taxa de fluxo mássica por unidade de volume da fase β para a fase α . Desde que nenhuma transferência de massa é assumida, estes termos são igualados a zero. A soma da fração volumétrica de todas as fases deve ser igual a unidade ($\sum_{\alpha=1}^{N_P} r_\alpha = 1$). Esta equação é combinada com a equação de continuidade para se obter a equação de conservação de volume transportado e, para fases incompressíveis sem termos fonte, é simplificada em

$$\sum_\alpha r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha = 0. \quad (4)$$

Para o cálculo da turbulência utilizou-se o modelo de turbulência $k - \varepsilon$. Neste modelo, k é a energia cinética turbulenta que corresponde à variância das flutuações de velocidade, e ε é a taxa na qual esta energia é dissipada. As equações (5) e (6) representam o transporte para k e ε , respectivamente

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho U k) - \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho U \varepsilon) - \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

em que U é o vetor de velocidade, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε e σ_k são constantes do modelo, adimensionais, μ_T representa a viscosidade turbulenta e o termo P_k representa a turbulência gerada pelas forças viscosas e de campo, os quais são dados por

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$P_k = \mu_T \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_T \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (8)$$

em que C_μ é uma constante adimensional.

Na equação (8), o segundo termo representa a contribuição das forças viscosas e o último termo, P_{kb} , representa a contribuição das forças de campo para a produção de turbulência, sendo

$$P_{kb} = \frac{-\mu_T}{\rho Pr_T} g \cdot \nabla \rho \quad (9)$$

em que g é a aceleração gravitacional e Pr_T é o número de Prandtl turbulento.

2.2 Malha, Condições de Contorno e Inicialização do Solver

Nesta investigação, considerou-se um duto helicoidal de orientação horizontal (eixo de enrolamento horizontal). Os parâmetros geométricos e a representação esquemática do duto são apresentados na Tabela 1 e Figura 1, respectivamente. O diâmetro interno e o diâmetro de curvatura do duto são representados por $2r$ e $2R_c$, respectivamente. A distância entre duas voltas adjacentes é chamada de passo, $H = 2\pi p$. Para qualquer seção transversal do duto, criada por um plano passando pelo eixo de enrolamento, a parede do duto mais próxima ao eixo de enrolamento é denominada de parede interna e a mais distante, de parede externa. A razão de curvatura (δ) e a torção (λ) do eixo do duto podem ser calculadas por

$$\delta = \frac{R_c}{R_c^2 + p^2} \text{ e } \lambda = \frac{p}{R_c^2 + p^2} \cdot$$

(10)

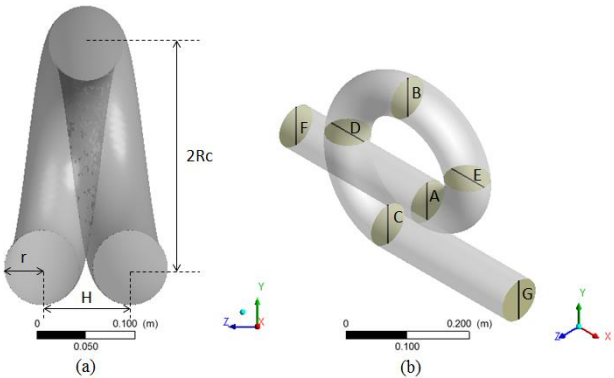


Figura 1. Configuração do duto helicoidal (a) e seções transversais para a visualização do escoamento e teste da malha (b).

Tabela 1. Parâmetros geométricos do duto helicoidal

Parâmetro Analisado	r [mm]	Rc [mm]	H [mm]	δ	λ
Raio do duto (r)	12.7, 25.4, 38.1, 50.8	114.3	90	0.0086	0.001
Raio de Curvatura (Rc)	38.1	60, 120, 180, 240, 300	90	0.003 - 0.016	0.00016 - 0.004
Passo (H)	38.1	114.3	90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 350	0.0068 - 0.0082	0.001 - 0.003

Uma vez estabelecida a geometria, o próximo passo foi discretizá-la gerando, portanto, uma malha computacional. O CFX discretiza o domínio de cálculo por meio de uma malha não estruturada. Para se obter independência dos resultados em relação a malha de cálculo, foram geradas três malhas distintas para a geometria em questão, variando-se a espessura da camada de prisma, como pode-se observar na Tabela 2. Na Figura 2 pode-se visualizar uma seção onde se nota a diferença entre as malhas. Para quantificar as diferenças entre os valores de velocidade axial obtidos para os diferentes tamanhos de malha, foram gerados 7 planos localizados ao longo do duto. Como pode ser visto na figura 1, o primeiro plano foi alocado na entrada do duto reto que antecede a curva; o segundo, na entrada da curva e os demais, distanciados entre si por um quarto de volta. Também foi alocado um plano na saída do duto reto, totalizando assim, os sete planos.

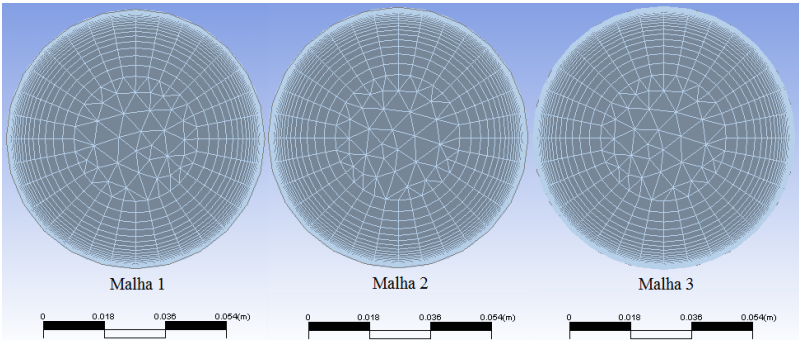


Figura 2. Visualização das malhas geradas: malha 1 (25 camadas), malha 2 (40 camadas) e malha 3 (50 camadas).

Tabela 2. Características das malhas para o teste de independência

Malha	Número total de elementos	Número total de nós	Número total de tetraedros	Número total de prismas
1	825896	377346	190696	635200
2	1207318	548756	190058	1017280
3	1461096	675746	190696	1270400

Para a comparação, foram amostrados em cada plano, 1000 pontos localizados sobre uma linha vertical coincidente com o diâmetro do duto e, a partir destes, foram calculados os Erros Quadráticos Médios

Normalizados (EQMN). Tanto a malha 1 quanto a malha 2 apresentaram EQMN menores que 0.35% ao compará-las com a malha de referência. Portanto a malha 2 foi considerada suficientemente refinada para o problema em questão, sendo, assim, utilizada em todas as simulações realizadas.

Uma vez gerada a malha, as condições de contorno para o domínio computacional foram especificadas. Estas condições definem as características físicas e operacionais do modelo nas entidades topológicas que representam seus limites. Nos contornos sólidos das geometrias, adotou-se a condição de hidraulicamente lisa (*smooth wall*) e componetes de velocidade nulos (*no slip boundary*, $u = v = 0$). Este tipo de condição é apropriado para os componentes da velocidade em paredes sólidas (Versteeg and Malalasekera, 2007). Condição de vazão mássica (*flow rate inlet*) e condição de pressão (*pressure outlet*) foram adotadas para a seção de entrada e saída, respectivamente. Na entrada, a vazão mássica, fração volumétrica e densidade para cada fase foram estabelecidas. Definiu-se a fase composta por água como fase contínua, sendo as fases compostas por óleo e por gás definidas como fases dispersas. Estas foram caracterizadas pelo diâmetro de bolha (gás) e diâmetro de gota (óleo). O escoamento multifásico na entrada do duto helicoidal foi assumido como uma perfeita mistura das fases e a composição do escoamento computada na saída foi dada pelo processo de separação.

O pacote CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ANSYS CFX-12, foi usado para resolver as equações algébricas utilizando o método de volumes finitos. A computação numérica foi considerada convergida quando a soma residual de todos os nós computados na n th iteração, R_ϕ^n , satisfaz o seguinte critério: $R_\phi^n/R_\phi^m \leq 10^{-8}$, em que R_ϕ^m denota o valor do da variável ϕ depois de m iterações.

3 Resultados e Discussão

Para se analisar a influência da curvatura e da torção na segregação da fase gasosa, foram realizadas simulações nas quais os parâmetros de análise (raio do duto, raio de curvatura e passo) tiveram seus valores variados. O plano C (saída da curva, Figura 1) foi escolhido para a visualização do escoamento e aquisição dos dados. As características impostas ao escoamento são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Características do escoamento

Parâmetro	Óleo	Água	Gás
Densidade [kg/m^3]	762.0	998.0	48.0
Viscosidade [cP]	0.689	0.353	0.014
Fração Volumétrica [%]	0.25	0.25	0.5
Vazão Mássica [kg/s]	2	2	0.0035
Diâmetro de Bolha/Gota [mm]	1	-	1

Influência do diâmetro do duto

A figura 3 representa a distribuição de gás sobre uma linha vertical, coincidente com o diâmetro do duto, alocada no plano C para diferentes valores de raio do duto. Como se pode observar a variação do raio do duto não afeta a razão de curvatura e a torção (Equação 10), modificando apenas a velocidade do escoamento. Ao aumentar-se o raio de 12.7 para 25.4 mm, observa-se uma melhoria no processo de separação, visto que a espessura da camada entre as fases livres diminua. Porém ao aumentar-se ainda mais o raio nota-se o aumento dessa camada, indicando, assim, que as velocidades impostas quando utilizados raios maiores que 38.1 mm não são suficientes para promover a separação.

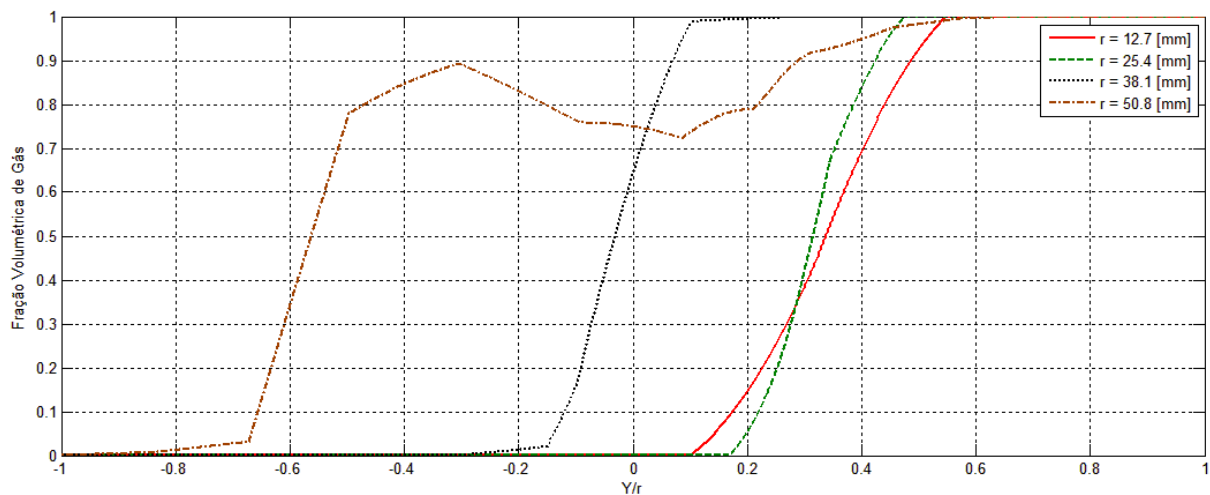


Figura 3. Fração volumétrica de gás para diferentes valores de raio do duto, amostrados em uma linha vertical coincidente com o diâmetro do duto, na seção C. Condições: $R_c=114.3$ mm e $H=90$ mm.

Influência do raio de curvatura

A Figura 4 representa a distribuição da fração volumétrica de gás para diferentes valores do raio de curvatura do duto. É sabido que o aumento do raio de curvatura diminui a vazão do escoamento em dutos curvados, diminuindo também o efeito da força centrífuga sobre as fases. Os resultados obtidos apresentam um comportamento contrário ao teoricamente esperado, pois ao aumentar-se o raio de curvatura notou-se uma melhoria na segregação das fases. Este comportamento pode ter ocorrido devido ao fato de que as fases já se apresentam segregadas ao término de um quarto de volta do duto.

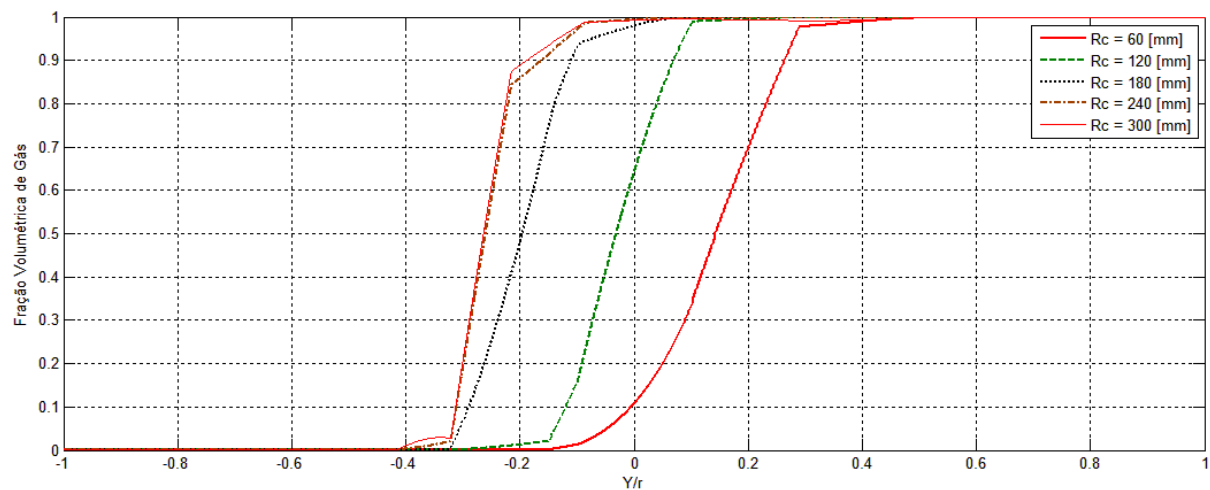


Figura 4. Fração volumétrica de gás para diferentes valores de raio de curvatura, amostrados em uma linha vertical coincidente com o diâmetro do duto, na seção C. Condições: $r=38.1$ mm e $H=90$ mm.

Influência do passo

A variação do passo, assim como do raio de curvatura, influencia diretamente a torção do duto helicoidal. Quanto a variação deste parâmetro, os resultados, aqui obtidos, indicam pouca influência na segregação da fase gasosa. Como pode ser observado na Figura 5, ao aumentar-se a distância entre duas voltas não aumenta-se significativamente a espessura da camada entre as fases. Porém ao analisar as curvas da figura 5 para valores de H maiores que 90 mm nota-se uma pior distribuição da

fase gasosa na camada limite, indicando maior concentração de gás próximo a região de segregação da fase líquida.

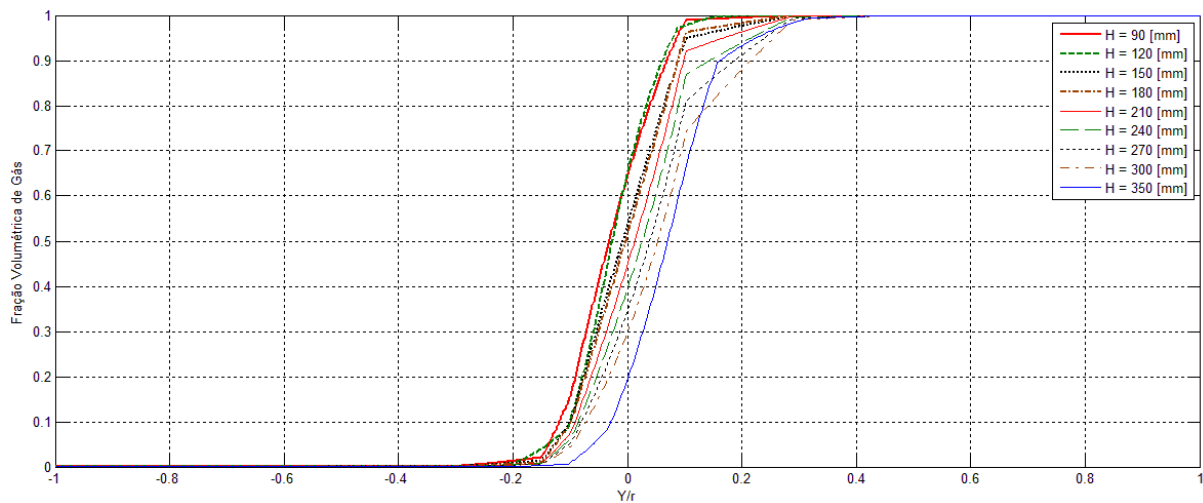


Figura 5. Fração volumétrica de gás para diferentes valores de passo, amostrados em uma linha vertical coincidente com o diâmetro do duto, na seção C. Condições: $r=38.1$ mm e $R_c=114.3$ mm.

A Figura 6 representa a distribuição da fração de gás nas seções B e C (Figura 1) para diferentes valores de raio (a), raio de curvatura (b) e passo (c) do duto helicoidal. Nesta representação nota-se claramente o efeito do aumento do raio interno do duto e do raio de curvatura na diminuição da força centrífuga, fazendo com que a fase menos densa (gás) já não permaneça na região interna do duto. Como as fases já estão segregadas, o que se observa na saída do tudo (seção C) é um aumento na turbulência devido ao retorno da fase gasosa a região interna. Observa-se, também, que o aumento do passo desloca a região de concentração de gás na mesma direção em que se promove o aumento da torção, indicando, assim, a influência do escoamento secundário no processo.

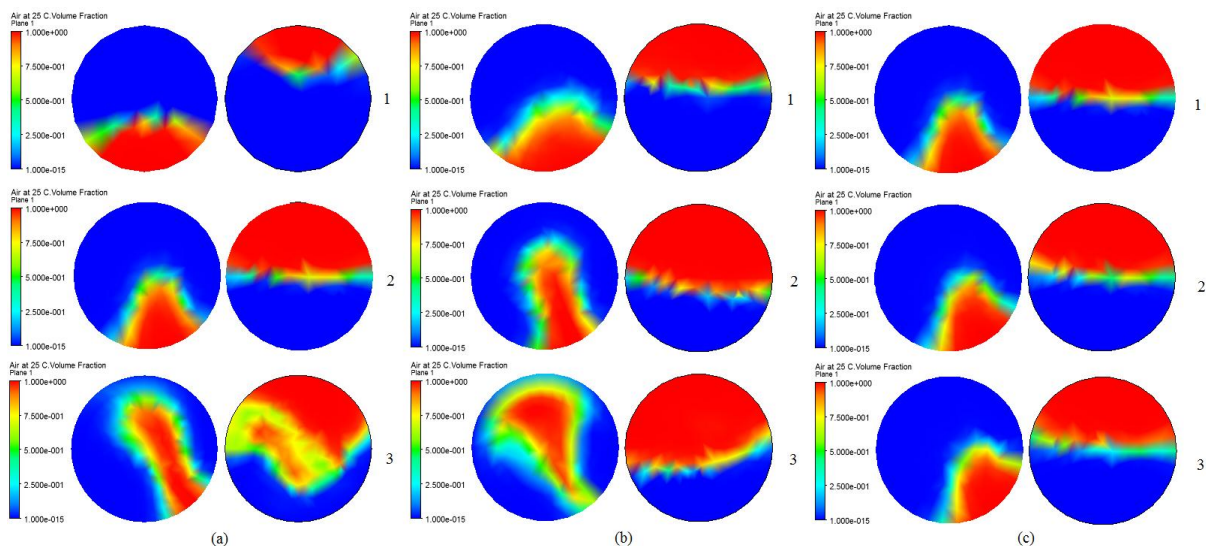


Figura 6. Fração volumétrica de gás para diferentes valores de raio (a) [1: 12.7 mm; 2: 25.4 mm e 3: 50.8 mm], raio de curvatura (b) [1: 60 mm; 2: 180 mm e 3: 300 mm] e passo (c) [1: 90 mm; 2: 180 mm e 3: 270 mm], amostrados nas seções B e C.

4 Conclusões

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico do escoamento multifásico no interior de um duto com configuração helicoidal com intuito de se solidificar a base teórica para desenvolvimento de um sistema de medição multifásica com estágio de separação parcial gás líquido. Os resultados das análises aqui realizadas demonstraram que o fenômeno de separação gás-líquidos em configurações helicoidais é influenciados por diversos parâmetros (geométricos e operacionais), tais como a vazão de gás e de líquido impostas na entrada do duto.

A força centrífuga, diretamente proporcional ao quadrado da vazão e inversamente proporcional ao raio de curvatura, mostrou-se a principal causadora deste fenômeno. A razão de curvatura e a torção, consideradas pequenas neste estudo, não apresentaram significativa influência na separação gás-líquido, indicando, assim, que para as configurações simuladas a eficiência da separação está fortemente atribuída ao parâmetros operacionais do escoamento tais como vazão e diâmetro de bolha de gás.

5 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à PETROBRAS que por meio do projeto ***Desenvolvimento de sistemas de controle avançado de processos e otimização em tempo-real e integrada da produção*** promove o suporte financeiro para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

- AZZOPARDI, B. J. et al. Plant application of a T-junction as a partial phase separator. *Trans IChemE*, V. 80, p. 87-96, 2002.
- BERGER, S.A., L. Talbot e L. S. Yao. Flow in curved pipes. *Ann. Rev. Fluid Mech.* V. 15, p. 461-512, 1983.
- CAO, Huaiyu et al. Numerical simulation and experimental study on helical pipe oil-water separator for deoiling. IEEE, 2009.
- DEAN, W. R. Note on the motion of fluid in a curved pipe. *Philosophical Magazine*, Series 7, V. 4(20), p. 208-23, 1927.
- DEAN, W. R. The streamline motion of fluid in a curved pipe. *Philosophical Magazine*, Series 7, V. 5(30), p. 673-95, 1928.
- EUSTICE, J. Flow of water in curved pipes. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, V. 84, p. 107-18, 1910.
- EUSTICE, J. Experiments of streamline motion in curved pipes. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, V. 85, p. 119-31, 1911.
- GAO, Hui; GUO, Leijin e ZHANG, Ximin. Liquid-solid separation phenomena of two-phase turbulent flow in curved pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V. 45, p. 4995-5005, 1999.
- ISSA, R. I. and OLIVEIRA, P. J. Numerical prediction of phase separation in two-phase flow through T-junctions. *Computers Fluids*, V. 23, p. 347-372, 1994.
- ITO, H. Flow in curved pipes. *JSME Int. J.* V. 30, p. 543-552, 1987.
- JUN, Zhang et al. An investigation on oil/water separation mechanism inside helical pipes. *Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics*, 2008.
- RENNIE, Timothy J. Numerical and experimental studies of a double pipe helical heat exchanger. McGill University, Montreal, 2004.
- VERSTEEG, A. E. e MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: *the Finite Volum Method*. 2ed. Pearson Educational Limited, 2007.