

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS PADRÕES DOS TIPOS: BOLHAS E ESTRATIFICADO, NO ESCOAMENTO HORIZONTAL BIFÁSICO EM DUTOS DE PETRÓLEO

Código do Resumo: [CON-2016-1075](#)

Resumo: A predição do comportamento, da fração das fases e da perda de carga do escoamento de petróleo são determinantes para a operação e o dimensionamento dos equipamentos de exploração, projeto de dutos (especificação da espessura e material), risers, bombas submarinas e sistemas de processamento primário na plataforma. Óleo e gás percorrem quilômetros sob severos gradientes de pressão, trocas térmicas com o ambiente e diversas inclinações. A análise da forma, da posição e da interação entre as interfaces líquido-gás não é simples. Assim sendo, neste projeto foram estudadas as diferentes abordagens existentes na predição do comportamento dos escoamentos bifásicos, com foco nos padrões tipo bolhas e estratificado, ambos na direção horizontal. Rotinas computacionais foram desenvolvidas para predição do padrão de escoamento, do holdup das fases envolvidas e do gradiente de pressão, primeiramente através do método de Beggs e Brill e, a partir destes resultados, o modelo de Pacheco et al., 2012, também foi empregado para se calcular o gradiente de pressão. O desempenho dos métodos adotados foi comparado com dados presentes na literatura, utilizando escoamento óleo-gás para o padrão bolhas e escoamento água-ar para o padrão estratificado. A partir dos primeiros resultados, observou-se que o método de Beggs e Brill superestima o holdup do líquido para o padrão tipo bolhas enquanto o modelo de Pacheco et al. (2012) superestima o gradiente de pressão para o padrão estratificado. Portanto, a fim de se refinar os resultados anteriormente obtidos, foram propostas modificações na abordagem dos métodos, os quais trouxeram melhorias significativas para ambos os casos analisados, principalmente para o modelo de Pacheco et al. (2012).

Palavras-chave: Escoamento bifásico horizontal. Fator de atrito. Método de Beggs e Brill. Padrões de escoamento. Análise Numérica.

1. INTRODUÇÃO

A importância do escoamento multifásico na indústria petrolífera reside no fato de que o escoamento de mais de uma fase é passível de ocorrer desde o reservatório, passando pelos poços e linhas de fluxo, nas instalações de produção, no processamento, no transporte e nas unidades de destilação (atmosférica e a vácuo) das refinarias.

A predição da perda de carga, do comportamento, da composição e do *holdup*, são determinantes para a operação e o dimensionamento dos equipamentos, projetos de dutos, risers, bombas submarinas e sistemas de processamento primário. Óleo e gás percorrem quilômetros sob severos gradientes de pressão, trocas térmicas com o ambiente e em diferentes inclinações. Esta é uma tarefa muito mais complexa, comparada ao escoamento monofásico. A análise da forma, da posição e da interação entre as interfaces líquido-gás não é trivial.

Muitos modelos e métodos de análise foram desenvolvidos desde o início da década de 50 na tentativa de prever o comportamento dos escoamentos multifásicos. Segundo Brill e Mukherjee, 1999, uma equação geral para o gradiente de pressão, considerando os termos de perda de pressão por atrito, inclinação e mudanças de velocidade (aceleração), pode ser escrita como

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{dp}{dL}\right)_{\text{atrito}} + \left(\frac{dp}{dL}\right)_{\text{elevação}} + \left(\frac{dp}{dL}\right)_{\text{aceleração}} \quad (1)$$

que pode ser reescrita como

$$\frac{dp}{dL} = -f \frac{\rho v^2}{2D} + \rho g \sin(\theta) + \rho v \frac{dv}{dL} \quad (2)$$

onde dp/dL representa o gradiente de pressão ao longo do duto, f o fator de atrito, ρ a densidade, v a velocidade de escoamento, D o diâmetro do duto, g a aceleração da gravidade, θ a inclinação do duto e dv/dL o gradiente de velocidade ao longo do duto.

Na Eq. (2) a densidade, a viscosidade, a velocidade de escoamento do fluido e o fator de atrito geralmente adaptados a fim de se abarcar as fases presentes no escoamento. Entretanto, essa equação apresenta algumas limitações, quanto à incompressibilidade, viscosidade constante, escoamento ao longo de linhas de fluxo e regime permanente, devendo ser então utilizado o conceito de padrão de escoamento. Govier e Omer, 1962, propuseram o conjunto de padrões de escoamento bifásico para tubos horizontais. Os padrões de escoamento horizontal dependem principalmente das velocidades superficiais do gás e do líquido e do *holdup* das fases. Em escoamentos com alta vazão para o líquido e baixo *holdup* do gás formam-se pequenas bolhas dispersas de gás que, devido ao empuxo, tendem a se acumularem na parte superior da tubulação esse padrão é denominado bolhas. Escoamento com baixas vazões tanto para o líquido quanto para o gás faz com que, por efeito gravitacional, haja total separação entre as duas fases, padrão denominado estratificado. Ao se aumentar a vazão do líquido e do gás são formadas ondas rolantes de líquido até formarem um fluxo com tampões ou de golfadas, com a presença de bolhas de Taylor, padrão denominado golfada ou intermitente. Para escoamento com vazão de gás muito alta, o gás esco no centro da tubulação formando um anel de líquido, padrão denominado anular. Uma representação dos padrões utilizados nesse trabalho (bolhas e estratificado) é apresentada na Figura 1.

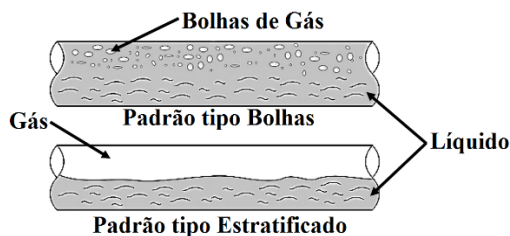


Figura 1. Padrão de escoamento tipo Bolhas e Estratificado.

Uma das mais antigas correlações para a determinação da perda de carga em escoamento bifásico isotérmico horizontal líquido-gás, em dutos, foi desenvolvida por Lockhart e Martinelli, em 1949, essa correlação é muito prática porém pode gerar resultados não muito precisos, principalmente em regimes turbulentos. Em 1962, Govier e Omer propuseram um conjunto de padrões de escoamento bifásico para tubos horizontais. Em 1973, Beggs e Brill desenvolveram uma correlação, obtida experimentalmente, que é amplamente utilizada pela indústria de petróleo por ser válida para todos os padrões de escoamento e inclinações. Em 1976, Taitel e Dukler desenvolveram um modelo estacionário bifásico para escoamento estratificado em dutos horizontais, inclinados ou verticais. Em 2002, Biberg apresentou uma solução analítica para o escoamento bifásico laminar estratificado, determinando o *holdup* e a perda de carga a partir do campo de velocidades. Com o avanço da tecnologia e da computação, a partir dos anos 90, foram desenvolvidos diversos trabalhos na área de simulação de escoamento multifásico de petróleo como Bendiksen *et al.*, 1986, Pauchon *et al.*, 1994, que originaram os softwares OLGA e TACITE, respectivamente. Em 1998, Masella *et al.* avaliaram as vantagens e desvantagens de alguns desses modelos dinâmicos, levando em consideração seu custo computacional e o refinamento dos resultados obtidos. Em 2005, Souza *et al.* desenvolveram um simulador dinâmico simplificado a dois fluidos considerando uma estrutura do tipo rede de dutos considerando padrão de escoamento estratificado. Em 2009, Souza comparou gradientes de pressão no escoamento bifásico água-ar em tubos horizontais utilizando as correlações de Lockhart e Martinelli e Friedel e simulação no ANSYS CFX, além de utilizar o mapa de Baker para a previsão do padrão de escoamento. Em 2012, Pacheco *et al.* fizeram um estudo considerando os efeitos cinéticos e do atrito em escoamentos horizontais bifásicos, este estudo sugere formulações de queda de pressão diferenciadas para o padrão bolhas dispersas e o padrão estratificado, embora não apresente uma correlação para prever qual padrão ocorre. Essa abordagem se justifica devido à não necessidade de outros dados para o estudo ao qual se propôs. Em 2013, Choi *et al.* desenvolveram um modelo transiente simplificado e um simulador bifásico líquido-gás, utilizando os conceitos de drift-flux no cálculo do *holdup* do líquido. Seus resultados foram comparados com o simulador OLGA, e obtiveram resultados satisfatórios tanto para o *holdup* do líquido, quanto para os valores da pressão.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são: estudar o comportamento de escoamentos bifásicos para os padrões tipo: bolhas e estratificado; simular métodos, modelos e dados presentes na literatura, comparando-os e analisando-os; identificar necessidades e propor melhorias.

3. MODELAGEM

Nesta seção são apresentados o modelo de Pacheco *et al.*, 2012, e o método de Beggs e Brill e propostas algumas modificações na abordagem dos mesmos, a fim de se refinar seus resultados.

3.1. Modelo de Pacheco *et al.* (2012)

O modelo de Pacheco *et al.*, 2012, utiliza a Eq. (2) para o cálculo de queda de pressão, sendo o fator de atrito calculado pelo modelo de Drew *et al.*, apresentado na Eq. (3),

$$f = 0,0056 + 0,5Re^{-0,32} \quad (3)$$

onde Re é o número de Reynolds da mistura, obtido de

$$Re = \frac{\rho_m v_m D}{\mu_m} \quad (4)$$

sendo D o diâmetro do tubo, ρ_m , v_m e μ_m a densidade, a viscosidade e a velocidade da mistura, respectivamente, definidas como

$$\rho_m = \rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L) \quad (5)$$

$$\mu_m = \mu_L H_L + \mu_G (1 - H_L) \quad (6)$$

$$v_m = v_L H_L + v_G (1 - H_L) \quad (7)$$

onde os índices L e G representam as fases líquida e gasosa, respectivamente e H_L o *holdup* da fase líquida.

Para o padrão estratificado, calcula-se um diâmetro hidráulico, e o número de Reynolds para cada fase, obtidos das Eq. (8) e (9), respectivamente.

$$A_i = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (8)$$

$$Re_i = \frac{\rho_i v_i D_i}{\mu_i} \quad (9)$$

onde o índice i representa a fase líquida ou gasosa e A_i a área que cada fase ocupa no duto.

Posteriormente, calcula-se o fator de atrito de Drew para cada fase e, em seguida, um fator de atrito ponderado, dado por

$$f_p = f_L H_L + f_G (1 - H_L) \quad (10)$$

Salienta-se ainda que, para ambos os padrões, o termo de queda de pressão por atrito é calculado a partir da densidade e da velocidade de mistura definidos nas Eqs. (5) e (7). Logo, apenas o fator de atrito varia com o padrão de escoamento.

Além disso, no trabalho de Pacheco *et al.*, 2012, há também um estudo dos efeitos cinéticos e do atrito para o caso de variação da velocidade das fases ao longo do duto, que não foram considerados nesse trabalho.

3.2. Método de Beggs e Brill.

Beggs e Brill optaram por correlacionar as fronteiras de transição entre os padrões de escoamento através do *holdup* sem escorregamento do líquido e do número de Froude para a mistura, que são definidos por

$$\lambda_L = \frac{v_{sL}}{(v_{sL} + v_{sG})} = \frac{q_L}{(q_L + q_G)} \quad (11)$$

$$N_{Fr} = \frac{v_m^2}{gD} \quad (12)$$

onde v_{sL} e v_{sG} são as velocidades superficiais da fase líquida e da fase gasosa, respectivamente, definidas por

$$v_{SL} = \frac{q_L}{A_T} \quad (13)$$

$$v_{SG} = \frac{q_G}{A_T} \quad (14)$$

Para se determinar os padrões de escoamento, foram utilizadas as seguintes equações, que determinam as fronteiras entre os padrões:

$$L_1 = 316\lambda_L^{0,302} \quad (15)$$

$$L_2 = 0,000925\lambda_L^{-2,468} \quad (16)$$

$$L_3 = 0,1\lambda_L^{-1,452} \quad (17)$$

$$L_4 = 0,5\lambda_L^{-6,738} \quad (18)$$

e o padrão foi determinado através das condições dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições para se determinar o padrão de escoamento

Padrão	Condição
Segregado	$\lambda_L < 0,01$ e $N_{Fr} < L_1$ ou $\lambda_L \geq 0,01$ e $N_{Fr} < L_2$
Transição	$\lambda_L \geq 0,01$ e $L_2 \leq N_{Fr} \leq L_3$
Intermitente	$0,01 \leq \lambda_L < 0,4$ e $L_3 < N_{Fr} \leq L_1$ ou $\lambda_L \geq 0,4$ e $L_3 < N_{Fr} \leq L_1$
Distribuído	$\lambda_L < 0,4$ e $N_{Fr} \geq L_1$ ou $\lambda_L \geq 0,4$ e $N_{Fr} < L_4$

O padrão de escoamento também pode ser obtido através dos mapas específicos para o tipo de escoamento.

O padrão bolhas é um padrão do tipo distribuído e o estratificado é do tipo segregado.

É importante notar que a determinação do padrão de escoamento só corresponde à realidade para o escoamento horizontal, para o qual as correlações foram obtidas.

O *holdup* horizontal do líquido é calculado a partir da Eq. (19).

$$H_L = \frac{a \lambda_L^b}{N_{Fr}^c} \quad (19)$$

sendo os coeficientes a, b e c determinados a partir da Tabela 2, segundo o padrão de escoamento encontrado.

Tabela 2. Coeficientes empíricos de Beggs e Brill para o *holdup* horizontal do líquido.

Padrão	a	b	c
Segregado	0,980	0,4846	0,0868
Intermitente	0,845	0,5351	0,0173
Distribuído	1,065	0,5824	0,0609

Para a região de transição, o *holdup* deve ser corrigido por interpolação entre os padrões segregado e intermitente. Todavia, aqui não será considerado neste trabalho, tendo em vista que os padrões analisados são bem definidos.

O fator de atrito é então calculado por

$$f = f_n \exp(s) \quad (20)$$

$$s = \frac{\ln(y)}{-0,0523 + 3,182 \ln(y) - 0,8725(\ln(y))^2 + 0,01853(\ln(y))^4} \quad (21)$$

$$y = \frac{\lambda_L}{(H_L)^2} \quad (22)$$

sendo f_n o fator de atrito para tubos lisos, obtido do diagrama de Moody ou da formulação de Drew com um número de Reynolds da mistura definido como

$$Re = \frac{\rho_n v_m D}{\mu_n} \quad (23)$$

onde

$$\rho_n = \rho_L \lambda_L + \rho_G (1 - \lambda_L) \quad (24)$$

$$\mu_n = \mu_L \lambda_L + \mu_G (1 - \lambda_L) \quad (25)$$

$$v_m = v_L H_L + v_G (1 - H_L) \quad (26)$$

Para evitar descontinuidades no intervalo $1 < y < 1,2$ Beggs e Brill sugerem a substituição da Eq. (21) por

$$s = \ln(2,2y - 1,2) \quad (27)$$

Desprezados os efeitos cinéticos, o gradiente de pressão é dado por

$$\frac{dp}{dL} = -f \frac{\rho_n v_m^2}{2D} \quad (28)$$

Payne, 1979, *apud* Brill e Mukherjee, 1999, descobriram que o método subestima o fator de atrito e superestima o *holdup* do líquido. Por isso, propuseram que um fator de atrito que considerasse os efeitos de rugosidade fosse usado em substituição ao de tubos lisos. Também propuseram o seguinte fator de correção para escoamento ascendente e descendente, respectivamente

$$H_{L_{\text{nov}}o} = 0,924 H_L \quad (29)$$

$$H_{L_{\text{nov}}o} = 0,685 H_L \quad (30)$$

3.3. Procedimentos e modificações sugeridas.

Adotou-se o método de Beggs e Brill, devido a sua ênfase em escoamentos direcionais, e por ser uma das últimas e mais refinadas correlações empíricas. Através desse método, determinou-se o padrão de escoamento e o *holdup* do líquido e, a partir deles, foi calculado o gradiente de pressão tanto pelo método de Beggs e Brill quanto pelo método proposto por Pacheco *et al.* (2012).

Os fatores de atrito de Drew e de Moody foram então substituídos pelo de Colebrook, apresentado na Eq. (31), utilizando a estimativa inicial de Miller, segundo a Eq. (32), fazendo com que em apenas uma iteração o erro seja menor do que 1%. Dessa forma, o fator de atrito pôde ser programado e variações de rugosidade no tubo consideradas para ambos os métodos (Beggs e Brill e Pacheco *et al.*, 2012).

$$f = \left[-2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \quad (31)$$

$$f_0 = \left[-2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (32)$$

Outras duas modificações foram propostas, adotando-se a correção de Payne *et al.*, 1979, para o *holdup* de Brill, também para o caso horizontal. E na modelagem do padrão estratificado, pelo método de Pacheco *et al.* (2012), foi proposta uma modificação que consiste em uma abordagem próxima à de Lockhart e Martinelli. Um gradiente de pressão ponderado através do *holdup* previsto (ao invés de multiplicadores) é obtido a partir dos gradientes monofásicos, ou seja, como se as fases escoassem sozinhas em toda seção transversal do duto, porém mantendo suas velocidades reais, como pode ser observado na equação abaixo

$$\left(\frac{dp}{dL} \right)_{\text{bifásico}} = \left(\frac{dp}{dL} \right)_L H_L + \left(\frac{dp}{dL} \right)_G (1 - H_L) \quad (33)$$

A Figura 2 apresenta, de modo resumido, os principais estágios presentes na construção do algoritmo desenvolvido para simulação da queda de pressão para os padrões analisados.



Figura 2. Fluxograma representando o algoritmo do programa desenvolvido.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Primeiramente foi simulado um escoamento bifásico óleo-gás com padrão tipo bolhas, utilizando os métodos de Pacheco *et al.* (2012), de Beggs e Brill e as modificações propostas. Os resultados obtidos foram comparados com dados de campo.

Posteriormente foi simulado um escoamento bifásico água-ar com padrão tipo estratificado, utilizando os métodos de Pacheco *et al.* (2012), de Beggs e Brill e as modificações propostas para esse padrão. Os resultados obtidos foram comparados com dados presentes na literatura.

Em seguida é realizada uma breve discussão sobre as melhorias obtidas nas modificações realizadas para os métodos utilizados nesse trabalho.

4.1. Padrão Bolhas para o escoamento óleo-gás

Os dados utilizados nessa simulação foram obtidos a partir dos dados de Oliveira, 2002, para o escoamento óleo-gás horizontal com hegemonia da fase líquida, esses dados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados de entrada para escoamento óleo-gás com padrão bolhas.

Mistura	Gás		Líquido		Duto		
V_m [m/s]	ρ_G [kg/m ³]	μ_G [kg/m·s]	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/m·s]	D [m]	L [m]	p_0 [atm]
1	2	0,00001	900	0,003	0,1	1000	10

Para que fosse possível obter resultados a partir desses dados entrada, estipulou-se a velocidade superficial do líquido como 0,99 m/s e assumiu-se a hipótese de não escorregamento entre as fases. O método de Beggs e Brill previu o padrão bolhas mas divergiu para os valores possíveis do *holdup* do líquido ($H_L = 1,057$). Sendo assim, os cálculos foram refeitos utilizando a correção proposta por Payne *et al.*, 1979, para o *holdup* de Brill, assumindo assim o valor de 0,977. Os resultados obtidos, com e sem as modificações propostas, foram comparados com os dados de queda de pressão obtidos de Oliveira, 2002, e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados referentes ao padrão bolhas.

Dados simulados		Pacheco <i>et al.</i>	Beggs e Brill	Dados de Campo
$H_L = 1,057$	$\frac{dp}{dL}$ [Pa/m]	-111,8	-137,0	-91,192
	Erro%	22,6%	50,2%	-----
$H_L = 0,977$ (Modificado)	$\frac{dp}{dL}$ [Pa/m]	-103,3	-113,2	-91,192
	Erro%	13,3%	24,1%	-----

O método de Pacheco *et al.* (20012) apresentou um desempenho superior, o que talvez possa ser justificado pela abordagem semelhante à formulação mecanicista de Ansari *et al.*, 1994, *apud* Brill e Mukherjee, 1999, para o padrão bolhas dispersas.

4.2. Padrão Estratificado para o escoamento água-ar

Os dados utilizados na simulação do escoamento água-ar foram obtidos a partir de Souza, 2009, e são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados de entrada para escoamento água-ar com padrão estratificado.

Gás			Líquido			Duto		
ρ_G [kg/m ³]	μ_G [kg/m·s]	V_{SG} [m/s]	ρ_L [kg/m ³]	μ_L [kg/m·s]	V_{SL} [m/s]	D [m]	L [m]	ε [m]
1,185	$1,83 \cdot 10^{-5}$	0,143	997	$8,9 \cdot 10^{-4}$	0,176	0,0207	1	$4,56 \cdot 10^{-5}$

Os resultados obtidos dos métodos utilizados neste trabalho, sem as modificações sugeridas, são comparados com os de Souza, 2009, por terem sido assumidas as mesmas hipóteses, e são apresentados na Tabela 6, que também apresenta os resultados obtidos para o gradiente de pressão, para os métodos de Lockhart e Martinelli e Friedel, que não foram considerados neste trabalho, mas foram apresentados por Souza, 2009. Para cálculo do erro percentual, utilizou-se os resultados obtidos pelo simulador ANSYS CFX como referência.

Tabela 6. Resultados referentes ao padrão estratificado.

Método	$\frac{dp}{dL}$ [Pa/m]	Erro relativo ao CFX
L&M	-75	56,2%
Friedel	-115	139,6%
Pacheco <i>et al.</i>	-155,7	224,4%
Beggs e Brill	-71	47,9%
Pacheco <i>et al.</i> (Modificado)	-47,65	0,0073%
Beggs e Brill (Modificado)	-71,94	49,9%
ANSYS CFX	-48	-----

Uma acentuada divergência dos valores de queda de pressão ocorreu para o padrão estratificado utilizando os diversos métodos citados acima. O que obteve o menor erro relativo ao resultado do simulador ANSYS CFX foi o método de Beggs e Brill, muito embora a identificação do padrão também tenha divergido (intermitente ao invés de segregado). É mais provável que o método de Beggs e Brill, 1973, tenha realizado a melhor predição do padrão de escoamento, uma vez que este método se baseou em condições de laboratório mais modernas do que o referido mapa de Baker (1954), utilizado por Souza, 2009. Nota-se ainda que, as modificações propostas gerou resultado notavelmente mais próximo entre o método modificado de Pacheco *et al.* (2012) e o ANSYS CFX todavia, para o método de Beggs e Brill, demonstrou-se um tênue aumento no erro.

4.3. Considerações gerais sobre as modificações propostas

Os resultados dos dois métodos, Pacheco *et al.* (2012) e Beggs e Brill, apresentaram uma precisão razoável para muitas aplicações de engenharia em ambos os padrões estudados neste trabalho (bolhas e estratificado), quando adotadas as modificações propostas. As melhorias obtidas por todas as modificações propostas são resumidas na Tabela 7.

Tabela 7. Erro percentual referente aos cálculos após as modificações propostas.

Método	Padrão Bolhas	Padrão Estratificado
Pacheco <i>et al.</i>	-41,2%	-99,9%
Beggs e Brill	-52,0%	+4,2%

Percebe-se que ambos os métodos simulados neste trabalho tiveram seus erros reduzidos pela metade, aproximadamente, para o padrão bolhas (-41,2% e -52,0%, respectivamente) em comparação com os dados de campo de Oliveira, 2002. Já para o padrão estratificado, o erro foi praticamente dirimido para o método de Pacheco *et al.* (2012) e um sutil aumento para o método de Beggs e Brill (-99,9% e +4,2%, respectivamente), quando comparados com os resultados obtidos por Souza, 2009, através do simulador ANSYS CFX.

5. CONCLUSÕES

Através deste trabalho de pesquisa foi possível verificar a importância e a abrangência do escoamento multifásico, especialmente para a indústria de petróleo. Após uma breve revisão dos métodos e modelos desenvolvidos ao longo do século XX e início deste século, verificou-se a diversidade de abordagens e o esforço que vem sendo empreendido nessa área.

Estudou-se o método de Pacheco *et al.* (2012) e de Beggs e Brill para escoamentos bifásicos horizontais, tendo sido desenvolvida, com sucesso, uma rotina computacional para o cálculo do gradiente de pressão, identificação do padrão de escoamento e fração das fases no duto (*holdup*).

Da comparação de resultados entre os métodos programados e os dados de campo disponíveis na literatura, pôde-se observar um bom desempenho para o padrão bolhas dispersas na mistura óleo-gás. No entanto, uma correção do *holdup*, prevista por Brill, foi necessária, uma vez que valores acima dos factíveis foram observados. A previsão do gradiente de pressão, pelo método de Pacheco *et al.* (2012), mostrou-se melhor do que a de Beggs e Brill para este padrão.

Já para o escoamento estratificado na mistura água-ar, observou-se uma divergência de resultados tanto para os métodos aqui programados, quanto para outros presentes na literatura. Ainda assim, o método de Beggs e Brill obteve o melhor resultado. O baixo desempenho da formulação de Pacheco *et al.* (2012) motivou a proposta de uma nova modelagem para o padrão estratificado. O cálculo do gradiente de pressão, nesta nova abordagem, obteve uma melhoria significativa.

É importante salientar que os resultados obtidos nesta pesquisa foram comparados com um número limitado de dados. Por isso, as conclusões baseadas nos resultados quantitativos ainda requerem maior estudo para sua validação.

6. REFERÊNCIAS

- Ansari, A.M. *et al.*, 1994, “A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Wellbores”, SPEPF 143, Trans., AIME, 297.
- Beggs, H.D., Brill, J.P., 1973, “A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes”, Journal of Petroleum Technology, pp. 607-617.
- Bendiksen K. *et al.*, 1986, “Two-Phase Flow Research at SINTEF and IFE: Some Experimental Results and a Demonstration of the Dynamic Two-Phase Flow Simulator”, Offshore Northern Seas Conference 1986, Stavanger.
- Biberg, D., 2002, “Hold-up and Pressure Drop In Two-Phase Laminar Stratified Pipe Flow”, Multiphase Science and Technology, v. 14, pp. 267-301.
- Brill, J. P.; Mukherjee, H., 1999, “Multiphase Flow in Wells”, Society of Petroleum Engineers Inc., Richardson, Texas.
- Choi, J. *et al.*, 2013, “Development of a fast transient simulator for gas-liquid two-phase flow in pipes”, Journal of Petroleum Science and Engineering 102, pp. 27-35.
- Fox, R. W.; McDonald, A. T., 2004, “Introduction to Fluid Mechanics”, 6th ed., Hoboken: John Wiley & Sons.
- García, F. *et al.*, 2007, “Friction factor improved correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines”, Int. J. Multiphase Flow 33, pp. 1320-1336.
- Govier, G. W., Omer, M. M., 1962, “The Horizontal Pipeline Flow of Air-Water Mixtures”, Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 40, pp. 93-104.
- Hewitt, G. F.; Delhay, J. M.; Zuber, N., 1986, “Multiphase science and technology”, vol. 2, Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- Lockhart, R. W., Martinelli, R. C., 1949, “Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase Two-Component Flow in Pipes”, Chemical Engineering Progress, v. 45, pp. 39-48.
- Masella, J. M. *et al.*, 1988, “Transient simulation of two-phase flows in pipes”, Int. J. Multiphase Flow, v. 24, pp. 739-755.
- Obregón Vara, R.M., 2001, “Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Óleo Pesado-Água em um Tubo Horizontal”, Diss. de Mestrado, Ciências e Eng. de Petróleo, Unicamp, Campinas, Brasil.
- Oliveira, G.P.H.A., 2002, “Cursos de Formação em Operações de Produção-Elevação Natural e Artificial”, Petrobrás, Brasil.
- Pacheco, A. C. *et al.*, 2012, “Effect of inertia in the study of two-phase oil-gas flow in horizontal pipelines”, Journal of Petroleum and Gas Engineering, vol. 3(5), pp.74-80.
- Pauchon, C. *et al.*, 1994, “TACITE: A transient tool for multiphase pipeline and well simulation”, SPE Annual Technical Conference, SPE 28545, Nova Orleans, LA, USA, pp. 25-28.
- Payne, G.A. *et al.*, 1979, “Evaluation of inclined-pipe two-phase liquid *holdup* and pressure-loss correlations using experimental data”, JPT 1198, Trans., AIME, 267.
- Souza, J.N.M.; Medeiros, J.L.; Costa, A.L.H., 2005, “A Two-Phase Transient Flow Model for Undersea Risers of Oil and Gas Production”, Proceedings of ENPROMER 2005 (Paper 1234), 4th Mercosul Congress on Process Systems Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.
- Souza, Jaime N. M., 2010, “Modelagem e Simulação de Escoamento Multifásico em Dutos de Produção de Óleo e Gás Natural”, Tese de Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Souza, Raquel G. S., 2009, “Escoamento Bifásico Líquido-Gás: Previsão de Gradientes de Pressão com a Correlação de Lockhart & Martinelli e Fluidodinâmica Computacional”, TCC do Curso de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ.
- Taitel, Y., Dukler A. E., 1976, “A Model For Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near-Horizontal Gas-Liquid Flow”, AIChE Journal, v. 22, pp. 47-55.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY, MODELING AND SIMULATION OF BUBBLE AND STRATIFIED PATTERN IN HORIZONTAL TWO-PHASE FLOW PIPELINES

Bruno Marins Soares, bruno5@gmail.com¹

Gustavo Vieira Frez, gfrez@iprj.uerj.br¹

Leônicio Diógenes Tavares Câmara, dcamara@iprj.uerj.br¹

¹University of State of Rio de Janeiro (UERJ), Politechnic Institute (IPRJ). Bonfim Street, 25. Vila Amélia, Nova Friburgo, RJ, Brazil. Zip Code.: 28.625-570.

Abstract: The prediction of the behavior, the holdup and the pressure gradient in petroleum flow are crucial for operation and measurement of the exploration equipments, project of the pipes (thickness and material specification), risers, undersea pumps and primary process systems on the platform. Oil and gas flow kilometers under severe pressure gradients, thermal changings and different inclinations. The form, the position and the interaction analysis between the interface liquid-gas is not simple. For this reason, this work studied different approaches to predict the behavior of two-phase flows focusing on bubble and stratified patterns in a horizontal pipeline. Computational routines were developed to predict the pattern flow, the holdup and the pressure gradient, firstly using Beggs and Brill method and, after these results, Pacheco et al. (2012) model was used to calculate the pressure gradient. The methods performance was compared with some literature data, using oil-gas flow for the bubble pattern and water-air flow for the stratified pattern. From these results, it was observed that, Beggs and Brill method overestimates the holdup of the liquid for the bubble pattern as Pacheco et al. (2012) model overestimates the pressure gradient for the stratified pattern. Therefore, in order to improve the results obtained before, modifications in the approaches of the methods were proposed and brought better performance to both cases analysed, specially for Pacheco et al. model (2012).

Key-words: Two-phase horizontal flow. Friction factor. Beggs and Brill method. Flow patterns. Numerical Analysis.