



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO MONOFÁSICO DE LÍQUIDO EM DUTOS NA PRESENÇA DE PIG UTILIZANDO O MÉTODO FCT (FLUX-CORRECTED TRANSPORT)

Rodrigo A. C. Patricio, rac.patricio@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Carina N. Sondermann, carinans@poli.ufrj.br¹

Aline Figueiredo, aline.figueiredo@ufrj.br¹

Renan M. Baptista, renan.baptista@petrobras.com.br²

Felipe B. F. Rachid, rachid@vm.uff.br³

Gustavo C. R. Bodstein, gustavo@mecanica.coppe.ufrj.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ – COPPE/PEM), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia - Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ – Brasil,

² Centro de Pesquisa Petrobras (CENPES – Petrobras), Av. Horácio Macedo, 950 – Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ – Brasil,

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense (PGMEC/UFF), Rua Passo da Pátria, 156, Campus da Praia Vermelha - São Domingos – Niterói - RJ – Brasil.

Resumo: A passagem de PIGs no interior de oleodutos é uma prática amplamente utilizada na indústria de gás e óleo com o objetivo de atingir elevados níveis de eficiência e produtividade na operação rotineira do duto. Este tipo de operação depende da velocidade com a qual o PIG se desloca ao longo de todo o duto. O uso de PIGs não é uma atividade simples e envolve diversas incertezas e riscos, que requerem uma capacidade de acompanhamento e previsão da movimentação do PIG através do uso de simulações numéricas. A velocidade do PIG está diretamente ligada à velocidade do fluido que, por sua vez, sofre influência da presença do PIG na linha, gerando um acoplamento entre os movimentos do PIG e do fluido. Este artigo apresenta um modelo mecânico, integrado a um esquema numérico, que permite prever a dinâmica deste acoplamento e produzir uma solução aproximada para o problema matemático que descreve o movimento acoplado entre o PIG e o escoamento transiente do líquido no interior do duto. A formulação do problema de valor de contorno-inicial é de natureza hiperbólica. O modelo é discretizado empregando o método de volumes finitos e resolvido numericamente utilizando o método Flux-Corrected Transport (FCT), de segunda ordem no espaço. Resultados referentes ao histórico de velocidade do PIG e das distribuições de velocidade e pressão do escoamento ao longo do duto são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Simulação Numérica, PIG, Escoamento Monofásico, Flux-Corrected Transport, Duto

1. INTRODUÇÃO

Na indústria petrolífera a maneira mais eficiente, segura e contínua de se realizar o transporte de fluidos, tais como óleo, gás e derivados de petróleo, se dá por meio de gasodutos. Sua eficiência é mantida elevada realizando manutenção periódica ao longo de todo o sistema de tubulações e equipamentos. Deve-se verificar a existência de danos estruturais nas paredes do duto e também se há presença de condensados ou resíduos na linha. As tarefas de verificação e remoção de condensados são feitas através da passagem de PIGs. Por ser um procedimento que envolve muitas variáveis, é extremamente difícil prever, a priori, quanto tempo o PIG irá levar para percorrer todo o trajeto desejado com as condições de campo existentes. Grande parte do conhecimento sobre a dinâmica do PIG em dutos é devido à experiência adquirida em campo, de modo que o controle sobre a operação é feito com um certo grau de subjetividade.

Trabalhos como os de Azevedo *et al.* (1996, 1997), Campo e Rachid (1998), Nguyen *et al.* (2001), Nieckele *et al.* (2001), Esmailzadeh *et al.* (2006, 2009), Nieckele e Tomalsquim (2008) são alguns dos que apresentaram contribuições relevantes na modelagem proposta ou no método numérico utilizado, obtendo soluções aproximadas para o problema de valor contorno-inicial associado ao movimento acoplado entre o PIG e o fluido.

Recentemente Bueno *et al.* (2012) apresentaram uma proposta de solução para a movimentação de PIGs em dutos com escoamento bifásico. Este trabalho descreve a primeira etapa da implementação desta estratégia, aplicada, no entanto, ao caso monofásico de líquido. Este modelo é discretizado com base no método de volumes finitos e resolvido

numericamente utilizando o método *Flux-Corrected Transport* – *FCT* (Boris and Book, 1973) para obtenção dos valores de velocidade e pressão ao longo do duto.

2. EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

Para a obtenção da solução do escoamento, supõe-se que as seguintes hipóteses são válidas: escoamento transiente, unidimensional e isotérmico no interior de um duto com área de seção circular constante. O escoamento de líquido é governado pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento, que podem ser escritas na forma de equações diferenciais parciais hiperbólicas de acordo com:

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

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = -\rho g \sin(\beta) - \frac{\tau_w S}{A}. \quad (2)$$

Nas Eqs. (1) e (2) x representa a coordenada axial do duto, ρ , p e u são, respectivamente, a massa específica, a pressão e a velocidade do líquido. A aceleração da gravidade está representada por g e β denota a inclinação do duto com a horizontal. No último termo à direita da eq. (2) τ_w é a tensão de cisalhamento na parede, S é o perímetro do duto e A é a área de seção circular do duto. Temos, então, que

$$\tau_w = \frac{1}{2} f \rho u |u| \quad (3)$$

$$f = 0,001375 \left[1 + \left(2 \times 10^4 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{1 \times 10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho D |u|}{\mu} \quad (5)$$

onde f é o fator de atrito na parede (Moody, 1947), Re é o número de Reynolds, D é o diâmetro do duto e μ é a viscosidade dinâmica do líquido.

2.1. Condição Inicial e Condições de Contorno

O conjunto das Eqs. (1) - (5), apresentado acima, forma um sistema fechado, tendo como variáveis desconhecidas as grandezas u e p , submetido às seguintes condições de contorno e condição inicial:

- Condição de contorno:

Entrada do duto: u

Saída do duto: p

- Condição inicial:

Os valores de u e p são prescritos em todo o domínio no instante $t = 0$.

3. MÉTODO NUMÉRICO

O *FCT* é um método conservativo, de segunda ordem no espaço, baseado em uma discretização conservativa no termo de fluxo (Boris e Book, 1973; Book *et al.*, 1975). A formulação detalhada pode ser encontrada em Sondermann *et al.* (2015).

De modo a adequar as equações ao método numérico, as Eqs. (1) e (2) podem ser reescritas na forma canônica de lei de conservação, ou seja,

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{Q})}{\partial x} = \mathbf{S}(\mathbf{Q}), \quad (6)$$

onde $\mathbf{Q}$ expressa o vetor das grandezas conservadas, $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{Q})$ o vetor de fluxo e $\mathbf{S} = \mathbf{S}(\mathbf{Q})$ o vetor representativo do termo de fonte e/ou sorvedouro, definidos matematicamente como

$$\mathbf{Q} \equiv [\rho \quad \rho u]^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{F} \equiv [\rho u \quad \rho u^2 + p]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{S} \equiv \left[0 \quad -f \frac{\rho u^2}{2A} - \rho g \sin \beta \right]^T. \quad (9)$$

4. MODELO DE MOVIMENTAÇÃO DO PIG

A presença do PIG na linha, para fins de modelagem matemática, é considerada como sendo uma fronteira móvel. Na Figura 1 abaixo, está esquematizado o posicionamento do PIG em um ponto genérico no interior do duto, onde x representa o eixo horizontal, p^- , p^+ , u^- , u^+ são a pressão e velocidade do líquido a montante (-) e a jusante (+) do PIG, L_c e L denotam o comprimento do PIG e o comprimento total da tubulação, respectivamente, de tal forma que $L_c \ll L$. Deve-se levar em consideração as características construtivas tais como: tipo de material, presença de furos e formato. Estas características são determinadas de acordo com o objetivo da operação que irá ser feita (limpeza, inspeção, desobstrução de linha, produção por batelada). Em operações como produção por batelada não se pode permitir que os fluidos transportados se misturem. Logo, é estritamente necessário que não haja passagem de fluido através do PIG.

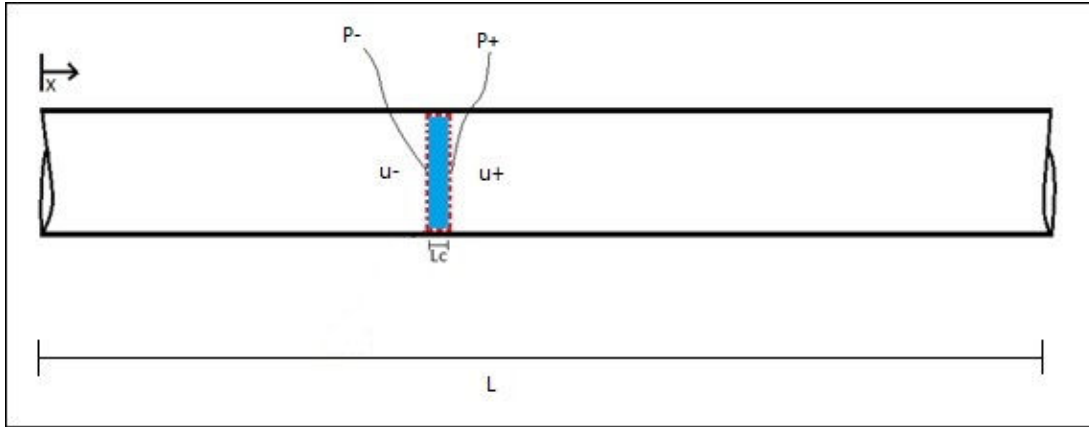


Figura 1 – Esquema do posicionamento do PIG na linha

O PIG considerado neste artigo, ilustrado esquematicamente na Figura 2, apresenta características construtivas simples e permite uma vazão de *bypass* apenas através do espaço (*gap*) existente na interface PIG/Duto, denotado por δ .

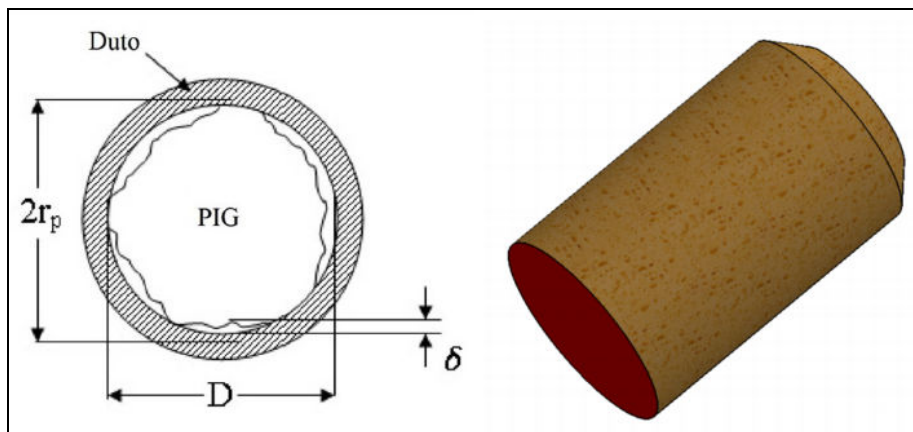


Figura 2 – PIG espuma

A fronteira móvel imposta pelo PIG impõe discontinuidades nos campos de velocidade e pressão a montante e a jusante, as quais devem ser determinadas como resultado do acoplamento entre o modelo do PIG e o método FCT. O modelo para movimentação do PIG pode ser escrito baseado nas leis de conservação de massa e de quantidade de movimento linear. Sendo assim, a equação de conservação de massa pode ser expressa como

$$\rho^- A(u^- - v_p) = \rho^+ A(u^+ - v_p) = \dot{m}_{BP}, \quad (10)$$

sendo ρ^- e ρ^+ os valores de massa específica a montante e a jusante do *PIG*, respectivamente, v_p a velocidade do *PIG*, e $\dot{m}_{BP}$ a vazão mássica de *bypass*, que representa a folga (*gap*) entre o *PIG* e a superfície interna do duto.

Sabendo que $\rho = p/c^2$, onde c é a velocidade do som no meio, considerada constante neste modelo, a Eq. (10) pode ser reescrita como

$$\frac{p^-}{c^2} A(u^- - v_p) = \frac{p^+}{c^2} A(u^+ - v_p) = \dot{m}_{BP}, \quad (11)$$

A vazão mássica de *bypass* pode ser escrita, matematicamente, como

$$\dot{m}_{BP} = \bar{\rho} Q_{gap}, \quad (12)$$

onde a grandeza $\bar{\rho} = \hat{\rho}(\rho^-, \rho^+)$ expressa uma função que depende dos valores das massas específicas a montante e a jusante do *PIG* e é dada por $\bar{\rho} = (\rho^- + \rho^+)/2$.

A vazão volumétrica através da folga efetiva entre o *PIG* e a parede interna do duto é dada por:

$$Q_{gap} = \pi D \left(\frac{\delta^3}{12\mu} \frac{|\Delta p|}{L_c} - \frac{\delta}{2} v_p \right). \quad (13)$$

Substituindo a Eq. (13) em (12), obtemos

$$\dot{m}_{BP} = \bar{\rho} \pi D \left(\frac{\delta^3}{12\mu} \frac{|\Delta p|}{L_c} - \frac{\delta}{2} v_p \right). \quad (14)$$

Aplicando a conservação da quantidade de movimento linear para o *PIG*, podemos escrever

$$M_p \frac{dv_p}{dt} = (p^- - p^+) A - M_p g \sin \beta - F_H - F_M. \quad (15)$$

Na Eq.(15), as grandezas M_p , F_H e F_M representam a massa do *PIG*, a força de atrito hidrodinâmico e a força de atrito mecânico, respectivamente. A força de atrito hidrodinâmico pode ser escrita como:

$$F_H = (1 - \xi) \pi D L_c \left(\mu \frac{v_p}{\delta} - \frac{(p^- - p^+)}{2L_c} \delta \right), \quad (16)$$

onde $\xi = \hat{\xi}(v_p)$ é a razão de contato entre o *PIG* e a superfície interna do duto. A força de atrito mecânico pode ser expressa na forma

$$F_M = \begin{cases} \text{sgn}(v_p) F_M^d, & \text{se } v_p \neq 0 \\ \text{sgn}((p^- - p^+) A - F_H - M_p g \sin \beta) F_M^e, & \text{se } v_p = 0 \text{ e } \frac{dv_p}{dt} \neq 0, \\ (p^- - p^+) A - F_H - M_p g \sin \beta, & \text{se } v_p = 0 \text{ e } \frac{dv_p}{dt} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

na qual F_M^e e F_M^d representam as forças de atrito estático e dinâmico, respectivamente, que podem ser escritas como

$$F_M^e = \xi \pi D L_c \eta_e \frac{1}{1 - \nu} \left(\frac{E^* \Delta r}{r_p} + \nu \frac{(p^- + p^+)}{2} \right), \quad (18)$$

$$F_M^d = \xi \pi D L_c \eta_d \frac{1}{1 - \nu} \left(\frac{E^* \Delta r}{r_p} + \nu \frac{(p^- + p^+)}{2} \right). \quad (19)$$

Nas Eqs. (18) e (19), η_e e η_d denotam os coeficientes de atrito estático e dinâmico, respectivamente, r_p é o raio do *PIG*, ν é o coeficiente de Poisson do *PIG* e E^* representa o módulo de elasticidade equivalente do *PIG*.

Com a formulação acima, podemos montar um sistema acoplado algébrico-diferencial de três equações, sendo uma equação diferencial ordinária e duas equações algébricas, formado pelas Eqs. (11), (14) e (15). Este sistema descreve o movimento do *PIG* no duto.

5. MÉTODO DE SOLUÇÃO PARA O MOVIMENTO DO *PIG* NO DUTO

Como dito anteriormente, a presença do *PIG* na linha foi considerada como uma fronteira móvel. A partir desta condição foi elaborada uma estratégia para o acoplamento da solução proveniente do *FCT*, que determina os campos de velocidade e pressão no duto, com a solução do sistema de equações do *PIG*.

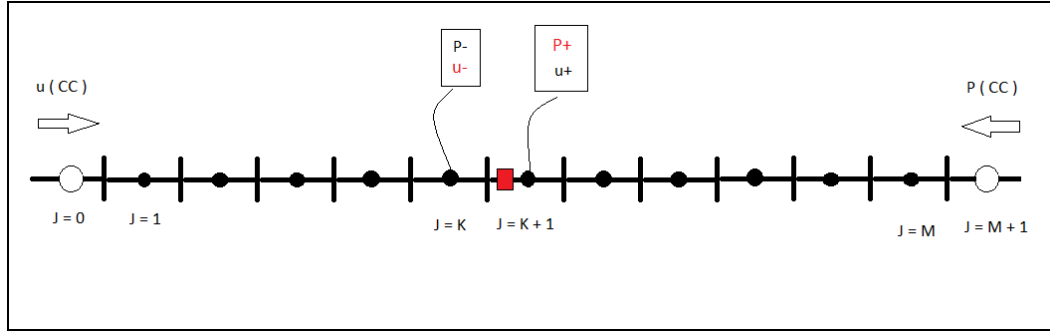


Figura 3 - Esquema do acoplamento entre o *PIG* e o escoamento no duto

A Figura 3 representa um duto discretizado com $M + 1$ células. O *PIG* se encontra em uma posição genérica entre as células $J = K$ e $J = K + 1$. As condições de contorno de velocidade e pressão são impostas nas células $J = 0$ e $J = M + 1$, respectivamente.

A solução do problema obedece a sequência apresentada abaixo:

1. o escoamento a montante do *PIG* (de $J = 1$ até $J = K - 1$) é calculado (via *FCT*);
2. o escoamento a jusante do *PIG* (de $J = K + 2$ até $J = M$) é calculado (via *FCT*);
3. utilizando os valores de u^- e p^+ do passo de tempo anterior, o sistema de equações para o *PIG* é resolvido de modo a se obter novos valores para u^+ , p^- e v_p ;
4. tendo como condição de contorno os valores de $J = K - 2$ e $J = K + 1$, o valor de u^- é atualizado na célula $J = K$ (via *FCT*);
5. Por fim, tendo como condição de contorno os valores de $J = K$ e $J = K + 3$, o valor de p^+ é atualizado na célula $J = K + 1$ (via *FCT*).

6. RESULTADOS

Antes dos resultados relativos à simulação do deslocamento do *PIG*, apresentamos uma validação para um escoamento permanente de líquido no interior do duto, sem *PIG*, em comparação com a solução analítica obtida a partir da equação de energia, com o objetivo de demonstrar que os resultados obtidos através do *FCT* são acurados.

6.1. Solução Analítica

Para a validação do modelo monofásico de líquido, consideramos um escoamento em regime permanente. A simulação é realizada partindo do regime transiente até que se alcance o regime permanente. Desta forma pode-se obter a perda de carga ao longo da tubulação.

Foi considerado um duto de comprimento $L = 5$ km, horizontal, com diâmetro $D = 0.3032$ m e rugosidade superficial média da superfície interna do duto de $\varepsilon = 4,572 \times 10^{-5}$ m. O fluido utilizado foi a água a 20°C , massa específica $\rho = 998$ kg/m³ e viscosidade dinâmica $\mu = 1,0 \times 10^{-3}$ Pa·s, escoando com velocidade de 2 m/s imposta na entrada do duto e 40×10^5 Pa de pressão imposta na saída.

A perda de carga pode ser obtida analiticamente a partir da equação de energia (Fox *et al.*, 2012) escrita na forma

$$\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{u_1^2}{2} + gz_1 \sin \beta = \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{u_2^2}{2} + gz_2 \sin \beta + h_f \quad (20)$$

para um escoamento incompressível, onde p_k , α_k , u_k e Z_k , com $k = [1, 2]$, representam, respectivamente, a pressão, o coeficiente de energia cinética, a velocidade do escoamento e a cota para cada extremidade k da tubulação, sendo $k = 1$ a entrada e $k = 2$ a saída do duto. O coeficiente de energia cinética está associado ao regime de escoamento, sendo

$\alpha_k \cong 1$ se o escoamento for turbulento e $\alpha_k = 2$ se for laminar. Na Eq. (20), a grandeza h_f expressa a perda de carga distribuída ao longo do tubo de comprimento L , obtida da equação

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2} \quad (21)$$

onde f denota o fator de atrito na tubulação. Considerando que o escoamento é tratado como incompressível, a velocidade é prescrita na entrada e o diâmetro é constante ao longo do duto, então a vazão e a velocidade são constantes ao longo de toda tubulação.

Para cálculo do fator de atrito foi utilizada a relação de Moody, apresentada na Eq. (4). Com Re , o número de Reynolds do escoamento, definido como $Re \equiv \rho V D / \mu$. Igual a $Re = 604486$.

Tabela 1 - Diferença de pressão entre saída e entrada do duto

			Erro Relativo
FCT - Velocidade na entrada e Pressão na saída:			
Delta P =	0.485	MPa	0.103%
Analítico			
Delta P =	0.484	MPa	

Os resultados numéricos obtidos para a perda de carga no duto com o método *FCT* e com a solução analítica estão apresentados na Tabela 1.

6.2. Deslocamento do *PIG* no Duto

Para a simulação do escoamento na presença do *PIG* foi considerada uma tubulação comprimento $L = 30$ km, de diâmetro $D = 0.3032$ m e rugosidade superficial média da superfície interna do duto de $\varepsilon = 4.572 \times 10^{-5}$ m. O fluido utilizado foi a água a 20°C , massa específica $\rho = 998$ kg/m³ e viscosidade dinâmica $\mu = 1.0 \times 10^{-3}$ Pa·s, escoando com velocidade inicial zero e impondo 2 m/s na entrada do duto e 20×10^5 Pa de pressão imposta na saída.

O modelo do *PIG* considerado tem formato semelhante ao mostrado na Figura 2. Seu comprimento $L_c = 0.61$ m, massa $M_P = 10$ kg, sem furos, com um *gap* $\delta = 0.001$ m.

Para a partida do programa o *PIG* foi posicionado na posição $x = 1$ km. A localização inicial deve ser deslocada da origem devido ao método exigir uma quantidade mínima de células da malha de discretização para que seja realizado o cálculo do escoamento a montante do *PIG*. O mesmo ocorre na parte final do duto, onde a simulação é interrompida no momento em que o *PIG* chega a um certo limite.

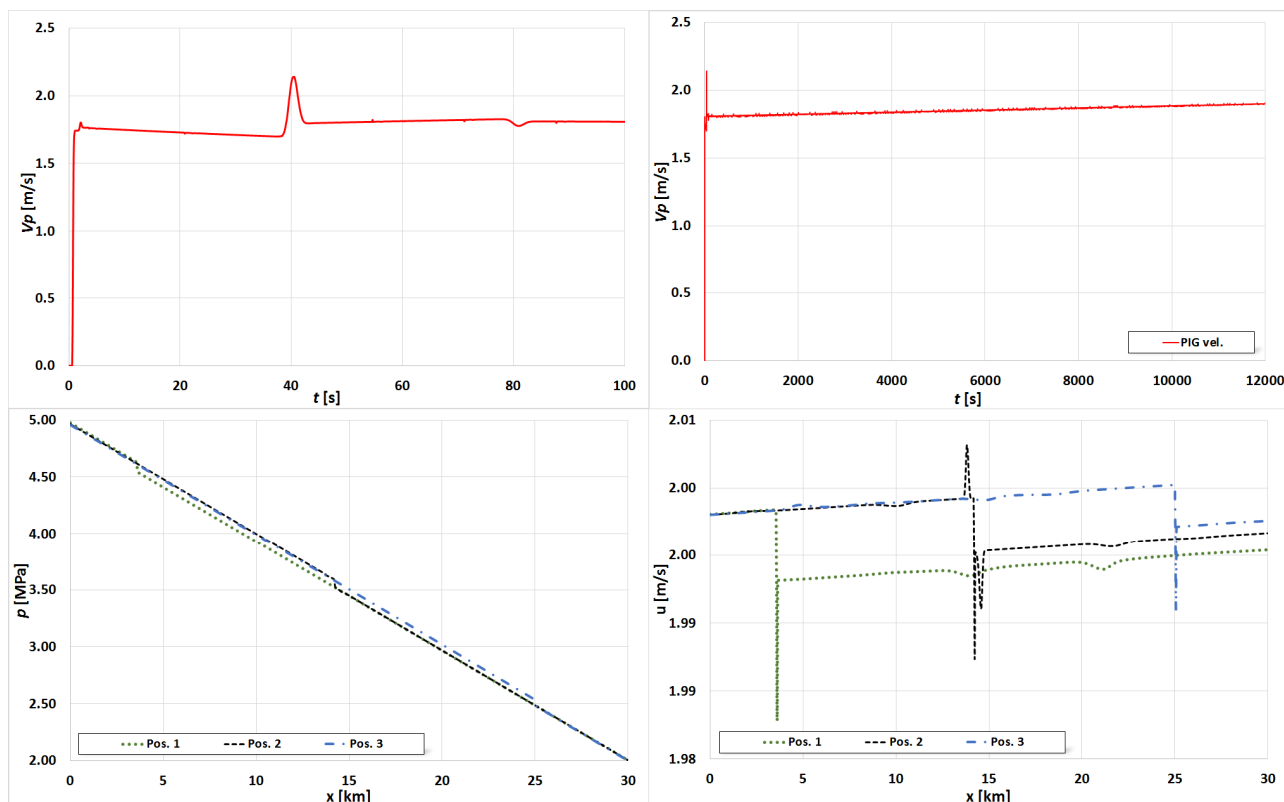


Figura 4. Velocidade do *PIG* nos instantes iniciais e no tempo total, pressão e velocidade do líquido

Na Figura 4, estão apresentadas as três grandezas calculadas através da simulação. Os dois gráficos superiores apresentam a velocidade do *PIG* ao longo do tempo, onde o gráfico da esquerda representa apenas os 100 s iniciais. Nele é possível observar três oscilações. Elas são devido à reflexão da onda de choque nas extremidades do duto. Nos dois gráficos inferiores estão apresentadas as curvas de pressão, à esquerda, e velocidade, à direita, para três posições diferentes do *PIG*. É interessante notar o salto sofrido em ambas as curvas, evidenciando a descontinuidade provocada pela presença do *PIG*.

7. CONCLUSÕES

A simulação do escoamento monofásico de líquido em conjunto com o *PIG* foi realizada utilizando o método numérico *FCT* (*Flux-Corrected Transport*). Os resultados foram previamente validados através da equação da energia, o que mostrou uma excelente acurácia. Os resultados obtidos para a dinâmica do *PIG* se mostraram satisfatórios e dentro do esperado ao se analisar a velocidade desenvolvida pelo *PIG*.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver, para um primeiro momento, um código que acoplasse o escoamento monofásico com as equações de movimento do *PIG*. A segunda etapa deste trabalho será desenvolver uma ferramenta computacional que nos possibilite simular a passagem de *PIGs* em dutos com escoamentos bifásicos.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras S.A. pelo apoio financeiro deste projeto. Os autores gostariam de agradecer, também, à CAPES, CNPq e à FAPERJ, órgãos de incentivo do Brasil e Rio de Janeiro, pelo contínuo apoio às atividades de pesquisa deste grupo ao longo dos anos.

9. REFERÊNCIAS

- Azevedo, L. F. A., Braga, A.M.B, Nieckele, A.O., Naccache, M, F, 1996, “Simple Hydrodynamic Models for the Prediction of Pig Motions in Pipelines”, Offshore Technology Conference, OTC 8232;
- Book, D.L., Boris, J.P., Hain, K., 1975, “Flux corrected transport II. -Generalizations of the method”, Journal of Computational Physics, Vol. 18, pp. 248-283;
- Boris, J. P., Book, D. L., 1973, “Flux correct transport I - SHASTA - A fluid transport algorithm that works”, Journal of Computational Physics, Vol. 11, pp. 38-69;
- Boris, J.P., Book, D. L., 1976, “Solution of continuity equation by the method of flux-corrected transport”, Journal of Computational Physics, Vol. 129, pp. 85-129;
- Botros, K. K., Golshan, H., 2009, “Dynamics of PIG Motion in Gas Pipeline”, AGA – Operations Conference & Biennial Exhibition;

- Bueno, D. E. G., Figueiredo, A. B., Baptista, R. M., Rachid, F. B. F., Bodstein, G. C. R., 2012, "Featuring PIG Movement in Two-Phase Gas Pipelines", 9th International Pipeline Conference, IPC2012-90187;
- Campo, E. V., 1998, *Modelagem do Movimento de PIGS em Regime Transiente*, Dissertação de M.Sc. PGMEC/UFF, Niterói, RJ, Brasil;
- Esmailzadeh, F., Mowla, D., Asemani, M., 2009, *Mathematical Modeling and Simulation of PIGging Operation in Gas and Liquid Pipelines*, Journal of Petroleum Science and Engineering 69 (2009) 100-106;
- Esmailzadeh, F., Mowla, D., Asemani, M., Shiraz U., 2006, *Modeling of PIG Operations in Natural Gas and Liquid Pipeline*, SPE INTERNATIONAL, SPE 102049;
- Essama, Christian Omgba, 2004, *Numerical Modelling of Transient Gas-Liquid Flows (Application to Stratified & Slug Flow Regimes)*, PhD Thesis, School of Engineering Applied Mathematics and Computing Group, Cranfield University, Bedford, United Kingdom;
- Tolmasquin, S. T., Nieckele, A. O., 2008, *Design and control of PIG operations through pipelines*, Journal of Petroleum Science and Engineering 62 (2008) 102-110;
- nieckele, A.O., Braga, A.M.B., Azevedo, L. F. A., 2001, *Transiente PIG Motion Through Gas and Liquid Pipelines*, *Journal Of Energy Resources Technology*, DOI: 10.1115/1.1413466;
- Petzold, L.R., 1982, *A Description of DASSL: A Differential-Algebraic System Solver*, In Proceedings of the IMACS World Congress, Montreal, Canada;
- Sondermann, C. N., Patricio, R. A. C., Figueiredo, A. B., Baptista, R., Rachid, F. B. F., Bodstein, G. C. R., "Numerical Simulation of The Gas Flow in Pipelines Using The Flux-Corrected Transport Method", 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2015;
- Moody, L.F., 1947, "An approximate Formula for Pipe friction factors", Transactions of ASME, v. 69, pp.1005;

10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho".

NUMERICAL SIMULATION OF PIG MOTION IN LIQUID-FLOW PIPELINES USING THE FLUX-CORRECTED TRANSPORT METHOD

Rodrigo A. C. Patricio, rac.patricio@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Carina N. Sondermann, carinans@poli.ufrj.br¹

Aline Figueiredo, aline.figueiredo@ufrj.br¹

Renan M. Baptista, renan.baptista@petrobras.com.br²

Felipe B. F. Rachid, rachid@vm.uff.br³

Gustavo C. R. Bodstein, gustavo@mecanica.coppe.ufrj.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ – COPPE/PEM), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia - Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ – Brasil,

² Centro de Pesquisa Petrobras (CENPES – Petrobras), Av. Horácio Macedo, 950 – Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ – Brasil,

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense (PGMEC/UFF), Rua Passo da Pátria, 156, Campus da Praia Vermelha - São Domingos – Niterói - RJ – Brasil.

Abstract. In order to maintain efficiency and high productivity in pipeline operations, it is necessary to keep an updated maintenance program. The use of PIGs is a very common task, but not a simple one, since there are uncertainties and risks associated to its passage inside a long duct. For these reasons, it is important to follow the motion of a PIG inside a pipeline using numerical simulations. The pigging operation depends on the velocity at which the PIG travels throughout the line, which is coupled to the fluid flow itself. Therefore, it becomes crucial to accurately predict the PIG motion and the fluid flow within the pipeline. This paper presents a mechanical model, along with a numerical scheme, to obtain approximate solutions to the resulting initial-boundary-value problem that describes the PIG movement in a transient liquid flow inside a pipeline. The model is discretized within the finite-volume framework and is solved using the Flux-Corrected Transport (FCT) method, which is second-order in space. The problem is formulated as an initial-boundary-value problem of hyperbolic nature. We present results for the PIG velocity history and for the distributions of flow pressure and velocity along the pipe.

Keywords: numerical simulation, flux-corrected transport method, liquid-flow pipelines, PIG motion in pipelines

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.