

ANÁLISE DO VAZAMENTO DE LÍQUIDOS E GASES ISOTÉRMICOS EM TUBULAÇÕES

Oldrich Joel Romero

Angela Ourivio Nieckele

Pontifícia Universidade Católica – PUC/Rio, Departamento de Engenharia Mecânica,
22453-900, Rio de Janeiro, RJ, BR E-mail: oldrich@mec.puc-rio.br e nieckele@mec.puc-rio.br

Resumo

A simulação numérica do escoamento em regime transiente de líquidos e gases compressíveis e isotérmicos através de tubulações com vazamento, é apresentada. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear, escritas na forma conservativa, são resolvidas utilizando o método dos volumes finitos. O algoritmo foi validado utilizando resultados disponíveis na literatura. Duas formas de prescrever a perda de massa é considerada: como função da vazão na entrada, e como sendo proporcional à diferença de pressão entre o fluido e o meio externo. A influência da perda de massa nos campos de velocidade e pressão foi analisada mediante a simulação de diversos tamanhos de furos e diferentes localizações dos mesmos ao longo de tubulações de comprimentos e diâmetros variados. Constatou-se que o vazamento introduz perturbações nos campos de velocidade e pressão. Verificou-se que, o instante em que o vazamento ocorre é claramente identificado, mediante o monitoramento contínuo da pressão ou da vazão mássica em diversos pontos ao longo da tubulação. Finalmente observou-se que para localizar o ponto onde a perda de fluido acontece, é necessário realizar balanços de massa entre diversos trechos da tubulação.

Palavras-chave: vazamento, isotérmico, transiente, conservativo, compressível.

1. INTRODUÇÃO

O vazamento em linhas de transporte de líquidos ou gases é uma causa de preocupação constante para os operadores. O derramamento do fluido pode causar sérios acidentes e danos consideráveis podem ir acontecer pela quantidade de produto liberado ao meio ambiente. Isto origina que regulamentos mais rigorosos por parte dos governos sejam emitidos para diminuir estes acidentes (Liou & Tian, 1994).

Mas levando em conta que são diversas as causas que podem originar o vazamento numa tubulação, por exemplo corrosão, erosão, falhas em juntas e soldas, fadiga, ruptura, falhas em equipamentos, etc., o monitoramento contínuo mediante instrumentação e *softwares* adequados da linha de transporte, é essencial.

Diversos métodos foram desenvolvidos para detectar o vazamento, mas em geral podem ser classificados, como mencionado por Watanabe & Himmelblau (1986), em dois tipos: diretos e indiretos. Os primeiros são aqueles que se servem da inspeção visual, do cheiro, do som e do estado anormal da vegetação para localizá-los. No caso dos indiretos, a detecção é feita mediante medições de pressão e vazão ao longo da tubulação, e em operação conjunta com *softwares* desenvolvidos utilizando diversas técnicas computacionais. Whaley & Ellul (1994) apresentam uma importante discussão em relação aos métodos indiretos, classificando-os em: métodos baseados em *hardware* (sistemas sensíveis ao fluido e sistemas SCADA), métodos acústicos, métodos de reconhecimento padrão e métodos baseados em modelos.

Uma outra abordagem é apresentada por Iserman (1984), segundo ele as seguintes distinções devem ser feitas para classificar os métodos de detecção: (i) médio (líquido – gás – múltiplas fases), (ii) operação (parado – estacionário – pequenas mudanças – não estacionário), (iii) tamanho (grande – médio - pequeno), (iv) desenvolvimento do vazamento (abrupto – lento – já existente) e (v) monitoramento (contínuo – intermitente).

Existem vários trabalhos publicados que estudam o problema do vazamento, a maioria deles utilizam o método das características para resolver numericamente o conjunto de equações diferenciais que regem o escoamento.

Estas metodologias baseiam-se no fato de que um vazamento existe quando há discrepâncias entre os valores computados pelo modelo (basicamente pressão e vazão) e os medidos no campo, esta diferença é vista como sendo proporcional ao tamanho do vazamento. Uma ampliação destes conceitos, podem ser encontrados em Whaley *et al.* (1992).

No presente trabalho, o princípio de conservação da massa aplicado ao escoamento é utilizado. Este deve ser perfeitamente satisfeito no caso de não existir derramamento. Em outras palavras a diferença entre as vazões em massa da saída e entrada da tubulação, deve ser igual à taxa de variação da massa no interior da linha. Romero, O.J. (1999) efetua um desenvolvimento detalhado desta formulação, utilizando o método dos volumes finitos.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

As equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear, que governam o escoamento de um fluido com propriedades constantes, com exceção da massa específica, escoando unidimensionalmente em um duto de paredes não rígidas; podem ser escritas na forma conservativa, ou divergente (Anderson, 1995), de acordo com o volume de controle elementar ilustrado na Figura 1, como

$$\frac{1}{dV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho dV) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\rho AU) + \frac{1}{dV} F_{\text{perda}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{dV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho U dV) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\rho AUU) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f \rho U |U|}{2D} - \rho g \sin \alpha \quad (2)$$

onde U é a velocidade do fluido, p é a pressão, ρ a massa específica, A é a área da seção transversal ($A = \pi D^2 / 4$), α o ângulo que o eixo faz com a horizontal, f é o fator de atrito, g é a aceleração da gravidade, t o tempo. $dV = A dx$ é o diferencial de volume. F_{perda} representa o vazamento (vazão em massa de fluido que perde-se para o meio externo, o qual é considerado saindo perpendicularmente à parede da tubulação através dos furos localizados na sua superfície, ver Figura 1.

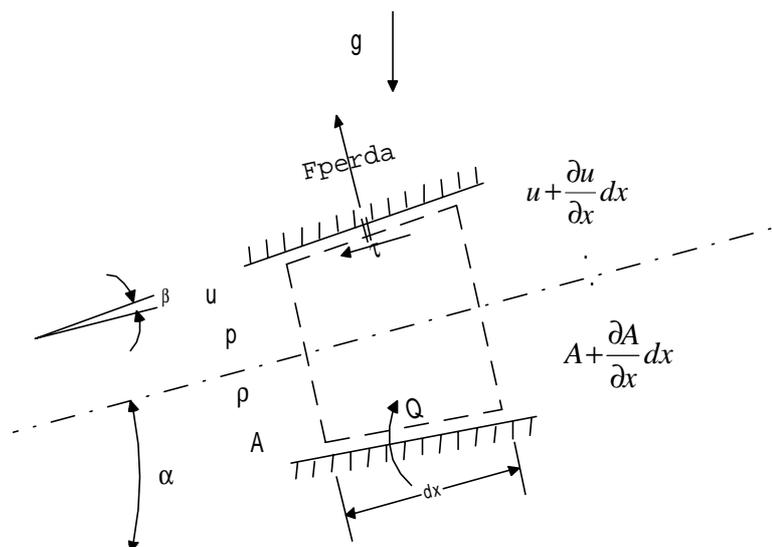


Figura 1. Volume de Controle Elementar

Duas formas de modelar o termo F_{perda} são consideradas:

(i) em função da vazão mássica prescrita na entrada, \dot{m}_{in}

$$F_{\text{perda}} = \xi * \dot{m}_{\text{in}} \quad (3)$$

(ii) em função da diferença de pressão entre a linha e o ambiente, $p - p_{\text{atm}}$.

$$F_{\text{perda}} = \rho C_d A)_{\text{furo}} \sqrt{2(p - p_{\text{atm}}) / \rho} \quad (4)$$

a variável ξ pode assumir diversos valores entre 0 e 1, $C_d A)_{\text{furo}}$ é o produto do coeficiente de descarga através do furo e a área do mesmo.

A área pode variar por causa da utilização de tubulações diferentes ou por deformações da tubulação devido à pressão interna, resultando na seguinte dependência do diâmetro com a pressão, a partir de um diâmetro de referência D_{ref} , avaliado a pressão atmosférica (p_{atm}).

$$D = \frac{D_{\text{ref}}}{[1 - C_D (p - p_{\text{atm}})]} \quad , \quad C_D = \frac{(1 - \mu^2) D_{\text{ref}}}{2eE} \quad (5)$$

e é a espessura da parede da tubulação, E o módulo de elasticidade de Young e μ coeficiente de Poisson.

Considerou-se a dependência da massa específica com a pressão como:

para líquidos

e para gases

$$\rho = \frac{(p - p_{\text{ref}})}{a^2} \quad \text{onde } a = \text{constante} \quad , \quad \rho = \frac{p}{a^2} \quad \text{onde } a^2 = z R T_{\text{ref}} \quad (6)$$

onde z é o coeficiente de compressibilidade, R a constante do gás, o subscrito ref indica valores de referência e a é a velocidade do som.

O fator de atrito de Darcy f, depende do número de Reynolds, $Re = \rho U D / \mu_{\text{fl}}$ e da rugosidade relativa da tubulação ϵ/D (Fox & McDonald, 1995), μ_{fl} representa a viscosidade absoluta do fluido, considerada constante.

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{para } Re \leq 2300 \quad \text{e} \quad f = 0,25 \left[\log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad \text{para } Re > 2300 \quad (7)$$

3. MÉTODO NUMÉRICO

Para a discretização das equações (1) e (2), utilizou-se o método dos volumes finitos (Patankar, 1980). A velocidade é localizada nas faces do volume de controle, enquanto que a pressão foi armazenada no ponto nodal central. Utilizou-se integração temporal totalmente implícita, o método “Upwind” para a integração dos termos espaciais convectivos e diferenças centrais para os outros termos.

Para a solução do sistema algébrico resultante utilizou-se um procedimento direto, resolvendo-se a velocidade e pressão com um algoritmo hepta-diagonal, baseado no algoritmo SIMPLER (Patankar, 1980), onde uma equação para a pressão é construída combinando-se a equação de conservação de massa e quantidade de movimento linear. Uma vez que o problema é não linear, diversas iterações deste procedimento, com atualização das propriedades relevantes, são realizadas a cada passo de tempo até obtenção da convergência.

4. RESULTADOS

O código computacional implementado foi validado efetuando-se comparações com soluções disponíveis na literatura (Wylie & Streeter, 1978) e com outros códigos computacionais. A concordância entre os resultados do presente modelo e os dados da literatura foram muito boas. Os detalhes destas comparações podem ser encontradas em Romero e Nieckele (1999).

Devido a limitação de espaço, somente dois casos de escoamento com vazamento serão apresentados. Considerou-se escoamento isotérmico ($T_{ref} = 293 \text{ K}$) de um gás e de um líquido ao longo de uma tubulação horizontal não rígida com furos, como esquematizado na Figura 2.

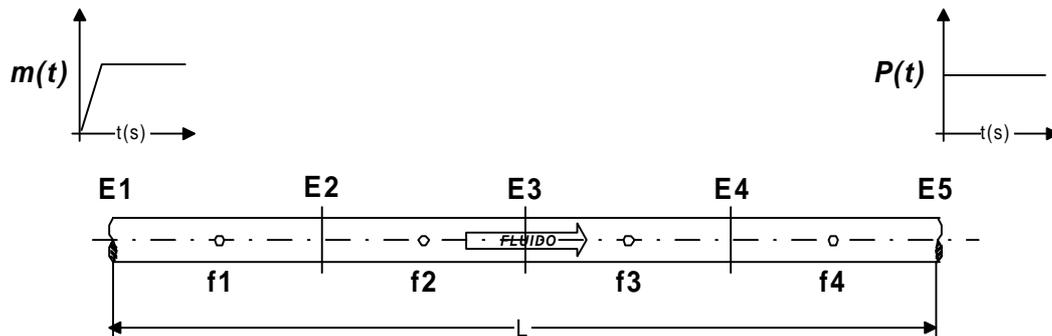


Figura 2. Tubulação horizontal com furos

Considera-se que a tubulação, de comprimento L e diâmetro D , é composta por quatro trechos e possui cinco estações de monitoramento (E1,...,E5) onde são feitas leituras de vazão e pressão. Para efeitos de simulação, furos podem existir ao longo da linha, em cada um dos trechos. Os furos serão denominados de (f1,...,f4) dependendo do trecho onde estão localizados.

Os dados referentes a tubulação válidos para os dois ensaios são

- ⊙ Modulo de Young, $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$
- ⊙ Coeficiente de Poisson, $\mu = 0,3$
- ⊙ Espessura da parede, $e = 2,54 \text{ cm}$
- ⊙ Rugosidade, $\epsilon = 0,002 \text{ mm}$

Em ambos os testes considerou-se que a pressão é sempre mantida constante na saída e a vazão em massa é prescrita na entrada. Inicialmente o fluido está em repouso com distribuição uniforme de pressão igual ao valor da saída. A vazão cresce linearmente até um determinado valor e permanece constante após disso.

O objetivo é analisar o comportamento do escoamento quando o vazamento ocorre. Este vazamento é prescrito na simulação somente após o regime permanente ter sido atingido.

4.1 Escoamento de um Gás Isotérmico numa Tubulação Horizontal com Vazamento

Para este caso, considerou-se um gás ideal isotérmico escoando através de uma tubulação com $L = 3 \text{ km}$ e $D = 85 \text{ cm}$. As propriedades do gás são: $R = 287 \text{ N m}/(\text{kg K})$; $z = 1,04$; $\mu_{fl} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m s})$.

A pressão na saída foi mantida constante e igual a pressão atmosférica P_{atm} . A vazão em massa da entrada levou 20 s para atingir o valor constante de 3 kg/s.

O tempo total de simulação foi de 300 s, e o vazamento foi prescrito 200 s após ter-se

iniciado o processo.

A Figura 3 ilustra a variação temporal da vazão e pressão nos cinco pontos da linha quando o vazamento é prescrito através do ponto f2 (Figura 2), considerando-se que este é igual a 10 % da vazão em massa da entrada, de acordo com a equação (3). Observa-se que no instante em que começa o vazamento, ocorre uma sensível diminuição da vazão mássica nas estações a jusante do furo, permanecendo inalteradas as leituras a montante. Com relação a pressão, pode-se identificar o instante em que o incidente ocorre, porém, não é possível identificar o trecho, já que uma leve queda de pressão é detectada em todas as direções.

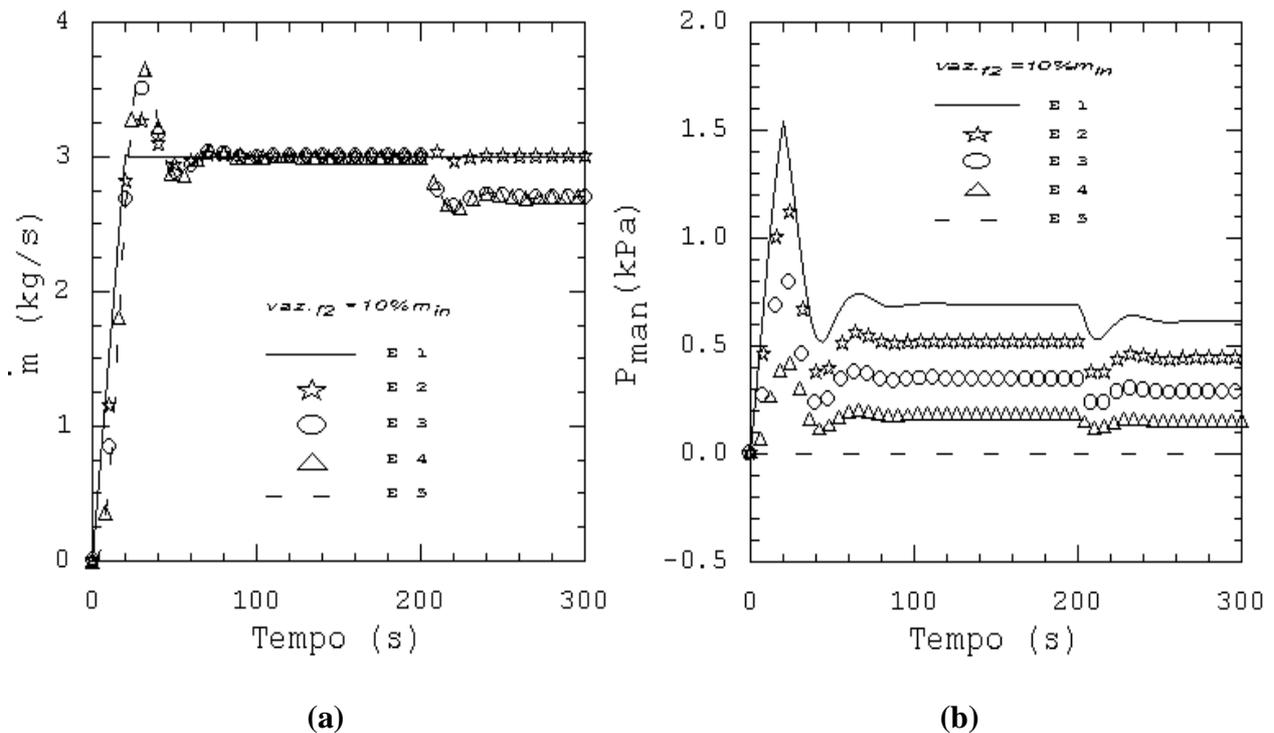


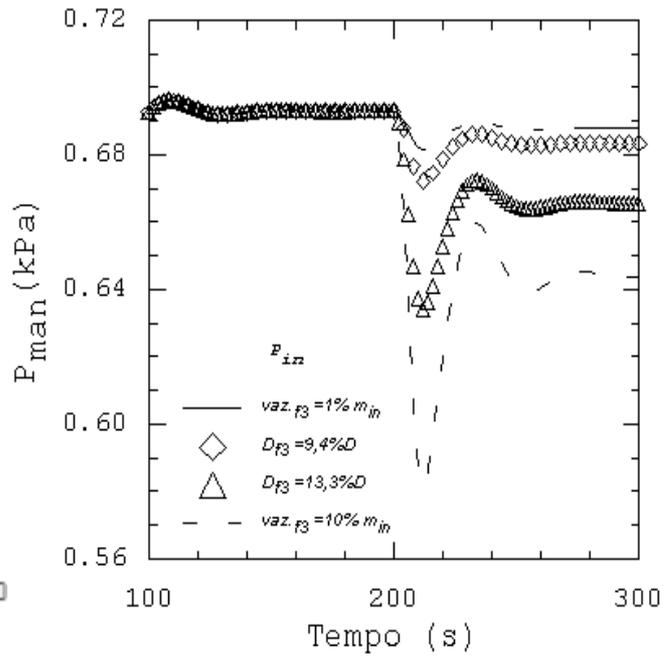
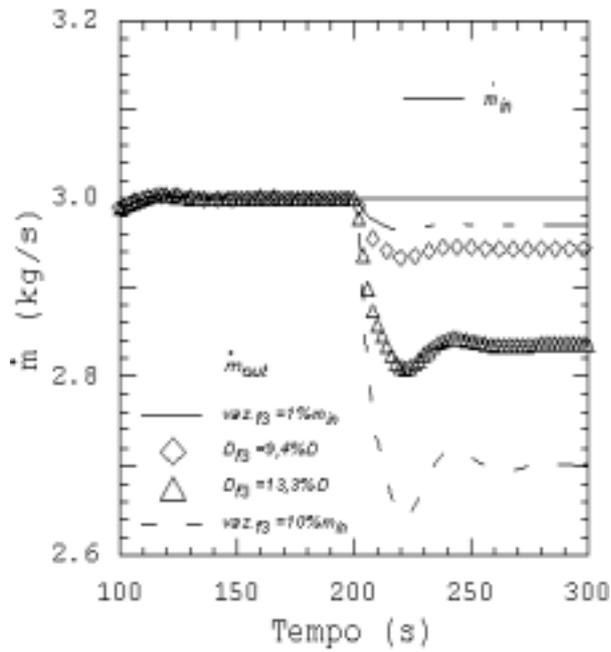
Figura 3. Escoamento de gás na tubulação com vazamento em f2. Variação temporal da (a) vazão em massa e (b) pressão

Visando verificar se é possível detectar pequenas perdas, prescreveu-se um vazamento no ponto f3 (Figura 2) como sendo 1 % da vazão na entrada. Os resultados são ilustrados na Figura 4. Na mesma figura ilustra-se o comportamento do escoamento quando outra forma de impor o vazamento, via equação (4), é utilizada. Considerou-se um $C_d = 0,5$ e dois valores diferentes para a área do furo:

- (a) $D_f = 9,4 \% D = 7,98 \text{ cm}$, o que equivale a uma área do furo de $A_f = 0,005 \text{ m}^2$, sendo $C_d A_f = 0,0025 \text{ m}^2$.
- (b) $D_f = 13,3 \% D = 11,28 \text{ cm}$; $A_f = 0,010 \text{ m}^2$, $C_d A_f = 0,0050 \text{ m}^2$.

Analisando-se a Figura 4 observa-se uma variação brusca na vazão da saída assim como na pressão da entrada quando inicia-se o vazamento. As duas formas de prescrever a perda de fluido apresentam respostas similares. Naturalmente que quanto menor o vazamento, menor a discontinuidade, e quanto menor o furo, menor é o vazamento.

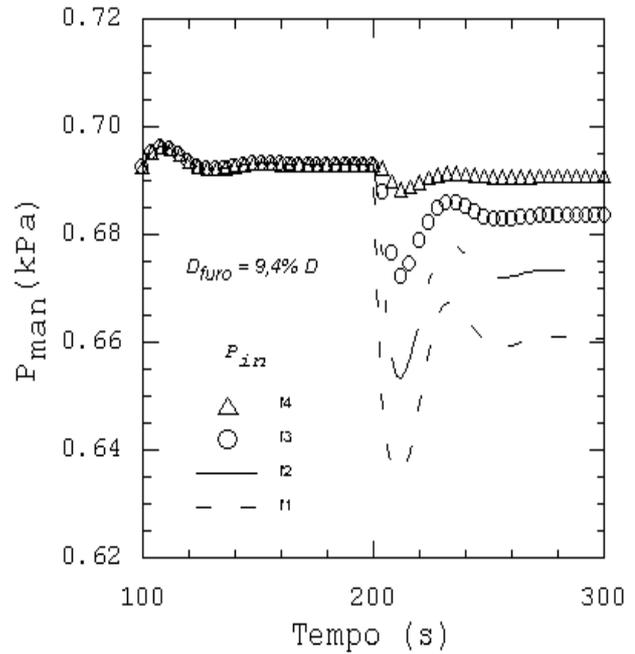
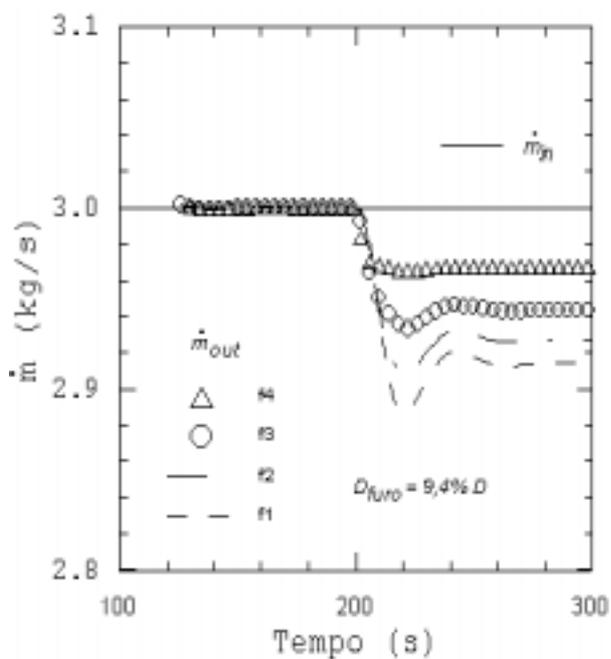
A influência da localização do furo na perda de massa é investigada na Figura 5. Considera-se o aparecimento de um furo ($D_f = 9,4 \% D = 7,98 \text{ cm}$, $C_d A_f = 0,0025 \text{ m}^2$) em diversas pontos da tubulação (f1, f2, f3, f4) localizados a 375m; 1,125 m; 1,875 m e 2,625 m respectivamente, da seção de entrada.



(a)

(b)

Figura 4. Escoamento de gás na tubulação com diferentes vazamentos em f3. Variação temporal da (a) vazão em massa na saída e (b) pressão na entrada



(a)

(b)

Figura 5. Escoamento de gás na tubulação com vazamento em diferentes localizações. Variação temporal da (a) vazão em massa na saída e (b) pressão na entrada

Analisando-se a Figura 5a, observa-se que quanto menor for a distância do furo à entrada, maior é a perda de massa, o que corresponde a uma vazão em massa menor na saída. Este comportamento já era esperado, pois próximo à entrada os níveis de pressão são mais altos, e como estamos considerando sempre uma perda para um ambiente a pressão atmosférica, o forçamento de pressão é maior. Examinando a Figura 5b, observa-se que quando maior a

perda de massa, maior a queda de pressão, conseqüentemente, quando o furo ocorre próximo à entrada a queda da pressão na entrada é maior, sendo mais facilmente identificável.

4.2 Escoamento de um Líquido Isotérmico numa Tubulação Horizontal com Vazamento

Este teste é análogo ao caso anterior, porém o fluido de trabalho é água. Neste caso a vazão em massa na entrada demora 20 s em atingir o valor constante de 80 kg/s. Na saída a pressão continua sendo a pressão atmosférica p_{atm} . O comprimento da tubulação foi alterado para $L = 10$ km. A velocidade do som para o líquido é $a = 1200$ m/s e a viscosidade $\mu_{fl} = 10^{-3}$ kg/(m s). Considerou-se 400 s de simulação, com o surgimento do vazamento 250 s após o início do processo, quando o regime permanente já havia sido atingido.

Resultados similares ao caso do gás foram obtidas quando condições semelhantes foram impostas sendo que os transientes neste caso são mais acentuados.

A Figura 6 ilustra a variação da massa e pressão na coordenada (f3) onde a perda de fluido ocorre, para duas vazões diferentes de vazamento ($1\% \dot{m}_{in}$ e $10\% \dot{m}_{in}$) e dois tamanhos de furos, $D_f = 10\% D$ e $D_f = 2\% D$, com $Cd_f = 0,5$ (para $D_f = 10\% D = 8,5$ cm, $A_f = 0,0057$ m²; tem-se $Cd A_f = 0,00284$ m²; e para $D_f = 2\% D = 1,7$ cm, $A_f = 0,00027$ m², obtém-se $Cd A_f = 0,000113$ m²). O comportamento de todas as situações é análogo e como era de se esperar, quanto maior o furo, maior o vazamento e a queda de pressão associada.

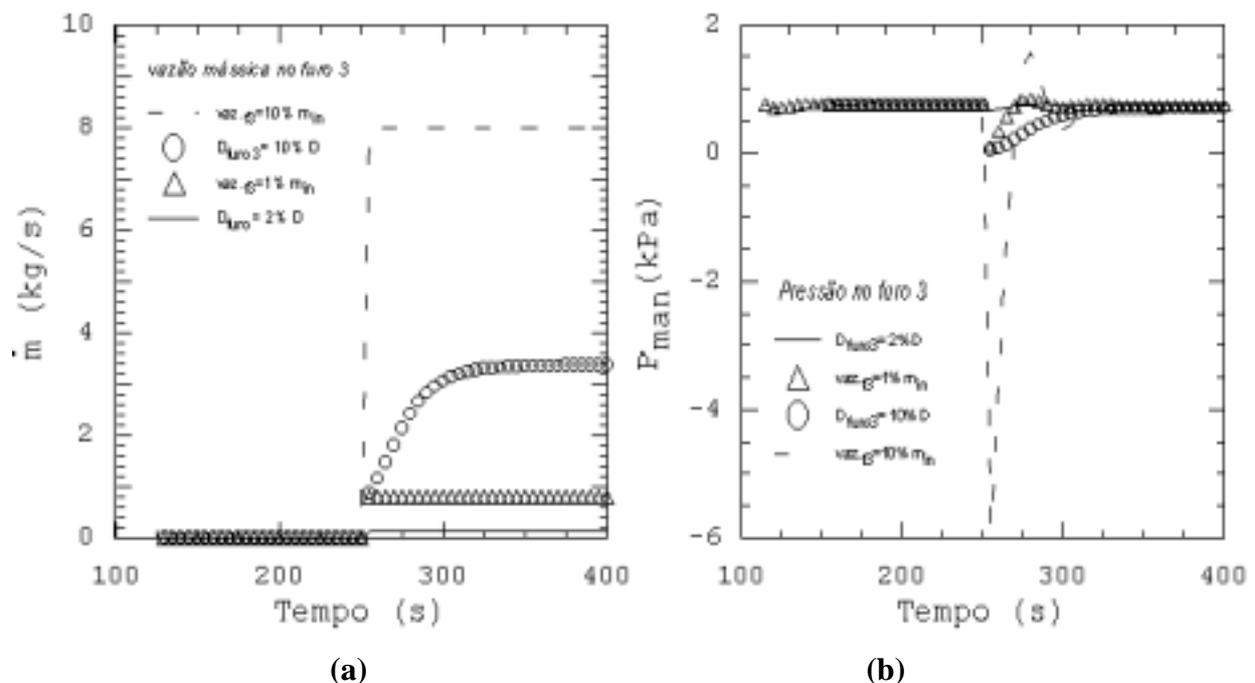


Figura 6. Escoamento de líquido através do local do furo (f3) para diversos tamanhos dos furos. Variação temporal da (a) vazão em massa e (b) pressão

5. CONCLUSÕES

O objetivo de elaborar um modelo com o enfoque conservativo para simular o transiente do vazamento de líquidos e gases foi atingido. A influência da perda de massa nos campos de velocidade e pressão foi analisada mediante simulação de diversos tamanhos de furos e diferentes localizações dos mesmos ao longo de tubulações de diferentes comprimentos e diâmetros, tanto para gases quanto para dos líquidos.

Constatou-se que a presença de vazamentos introduz perturbações na vazão em massa e pressão. O instante que começa o vazamento é claramente identificado. No entanto, o monitoramento da pressão ao longo da tubulação não permite identificar a localização do

furo, pois uma queda de pressão similar é verificada tanto a montante quanto a jusante do furo. No entanto, no registro contínuo da vazão mássica, pode-se observar claramente o trecho da tubulação na qual o vazamento acontece, já que sendo um modelo que conserva massa em cada ponto, a perda através do furo origina um desbalanceamento na massa, a qual é rapidamente captada pelas estações localizadas a jusante do furo.

O comportamento do escoamento impondo uma vazão em massa conhecida de vazamento ou uma perda de massa proporcional a uma queda de pressão associada a um tamanho de furo, é similar. Obviamente que, quanto menor o furo, menor a vazão através dele e menor também a queda de pressão.

Quanto mais próximo o furo é da entrada da tubulação maior a queda de pressão associada a ele, já que os níveis de pressão são mais elevados, tendo-se portanto, uma perda de massa mais acentuada, e por conseqüência, vazamentos detectáveis com maior segurança.

Dado que os efeitos de compressibilidade no líquido são pequenos em relação ao gás, a perda de massa numa linha transportando este tipo de fluido é mais fácil de ser detectada, pois a queda de pressão devido ao surgimento do vazamento é mais acentuada do que no caso de gases. Esta característica do escoamento com líquidos faz com que vazamentos através de furos pequenos sejam detectáveis, ou o que é equivalente, menores perdas de massa são mais fáceis de serem identificadas para o caso de líquidos.

Agradecimentos

O autores agradecem ao CNPq pelo apoio recebido durante a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Anderson JR., J.D., 1995, *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill International Editions.
- Fox, R.W. and McDonald, A.T., 1995, *Introdução a Mecânica dos Fluidos*. Editora Guanabara S.A., 4^a. Edição.
- Isermann, R., 1984, “*Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods- A Survey*”, *Automatica*, Vol. 20, No. 4, pp. 387-404.
- Liou, J.C.P. and Tian, J. 1994, “*Leak Detection: A Transient Flow Simulation Approach*”, PD-Vol 60, *Pipeline Engineering*, pp. 51-58.
- Liou, J.C.P., 1983, “*A Numerical Model for Transients in Petroleum Products Pipelines*”, *Joint ASME Conference*, Houston, Texas, USA, pp. 61-66.
- Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, U.S.A.
- Romero, O.J., 1999, “*Um Método Conservativo para Análise de Transientes de Gases/Líquidos em Tubulações*”, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Brasil.
- Romero, O.J. e Nieckele, A.O., 1999, “*Estudo do Regime Transiente de Fluidos Compressíveis em Tubulações com Área Variável*”, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM99, CD-ROM, Águas de Lindóia, São Paulo, SP, Brasil.
- Waley, R.S. and Ellul, I.R., 1994, “*Consideration in Choosing a Leak Detection Method*”, PD-vol 60, *Pipeline Engineering*, ASME, pp. 39-44.
- Waley, R.S., Nicholas, R.E. and Van Reet, J.D., 1992, “*Tutorial on Software Based Leak Detection Techniques*”, *Pipeline Simulation Interest Group*, pp. 1-19.
- Watanabe, K. and Himmelblau, D.M., 1986, “*Detection and Location of a Leak in a Gas transport pipeline by a New Acoustic Method*”, *AIChE Journal*, Vol 32, No 10.
- Wylie, E. B. and Streeter, V.L., 1978, *Fluid Transients*, McGraw-Hill.