

MODELAGEM DE TRANSIENTE DO ESCOAMENTO CRÍTICO BIFÁSICO EM DUTOS

Rubem da Cunha Reis^{1*}, César Antônio Leal²

¹Depto. de Eng.^a Química, PUCRS e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS
Av. Ipiranga 6681, CEP 90619-200, Porto Alegre, RS

²Depto. de Eng.^a Nuclear e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS
Av. Sarmiento Leite 425, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS

Resumo. Hoje, é comum ter-se grandes distâncias entre uma unidade produtora e uma unidade consumidora, onde fluidos podem vir a escoar em condições de pressão supercríticas. Nestas condições de escoamento, muitos acidentes e incidentes na indústria de processos químicos têm ocorrido em função da falha de acessórios de linha e/ou falhas mecânicas da própria tubulação devido a esta condição de pressão bastante severa. No trabalho, visa-se modelar um etenoduto, onde a condição inicial de pressão é supercrítica, para determinar o comportamento das variáveis vazão, pressão, temperatura e estado do fluido, no interior do sistema, durante o transiente, devido à perda de contenção, possibilitando, também, a avaliação da magnitude do escoamento crítico formado. Discute-se, também, a utilização da equação de estado termodinâmica para o levantamento de propriedades e sua influência no cálculo do escoamento crítico. Resultados da modelagem estacionária e transiente são apresentados, levando em consideração situações onde há ou não isolamento térmico da tubulação.

Palavras-chave: Escoamento bifásico, Escoamento crítico, Pressão supercrítica.

1. Introdução

A modelagem do escoamento crítico bifásico vem sendo estudado por muitos pesquisadores como Moody (1966), Henry e Fauske (1971) e mais recentemente por Elias e Lellouche (1994), Seynhaeve et al. (1994) e Draï et al. (1998). Inicialmente, o interesse era destinado à modelagem de despressurização de reatores nucleares refrigerados à água. Atualmente, este estudo é aplicado também no transporte de fluidos pressurizados através de dutos, para demandas na indústria petroquímica.

É comum ter-se, entre uma unidade produtora e uma unidade consumidora, grandes distâncias a serem vencidas pelo fluido. Assim, o fluido é transportado com pressões que podem atingir níveis supercríticos, justamente, para que estas grandes distâncias sejam vencidas. Devido a alguma falha de acessórios de linha ou da própria tubulação, há a perda de contenção e o fluido é lançado, na atmosfera com formação de escoamento crítico bifásico.

Este é o cenário que será estudado neste texto. O objetivo deste trabalho é o de apresentar os perfis transientes do fluxo de massa e de pressão oriundos da modelagem de uma ruptura total de um duto transportando eteno, que inicialmente, se encontrará em condição de pressão

* A quem toda a correspondência deve ser submetida.

supercrítica, à temperatura ambiente (298,15 K e 101,3 kPa), típicas para este tipo de escoamento. A modelagem utilizará uma equação de estado cúbica, a equação de Peng-Robinson modificada por Melhem, (1989). Será, ainda, realizada uma comparação entre resultados estacionários de fluxo crítico de massa obtidos em duto isolado (adiabático) e não-isolado.

2. Equações básicas do modelo

2.1 Equações de balanço

Nesta seção, as equações apresentadas a seguir, dão ênfase ao escoamento compressível unidimensional, com todas as variáveis e propriedades físicas sendo dadas iguais ao seu valor médio na seção transversal.

Assim, as equações do balanço podem ser escritas como:

- massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = - \frac{\rho w}{A} \frac{dA}{dx} \quad (1)$$

- momento:

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial (\rho w^2 + p)}{\partial x} = -\rho g \cos \varphi - \frac{\partial p}{\partial x} I_{fr} - \frac{\rho w^2}{A} \frac{dA}{dx} \quad (2)$$

- energia:

$$\frac{\partial \rho \left(u + \frac{w^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \rho w \left(h + \frac{w^2}{2} \right)}{\partial x} = -\rho w g \cos \varphi - \frac{\rho w}{A} \left(h + \frac{w^2}{2} \right) \frac{dA}{dx} - \frac{Q_c}{A} + \rho \cdot P \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica, w é a velocidade na coordenada x , t é o tempo, A é a área de seção perpendicular ao escoamento, p é a pressão, φ é o ângulo do duto com a vertical, I_{fr} são as perdas por atrito, u é a energia interna, h é a entalpia, g é a aceleração da gravidade, Q_c é a energia trocada por convecção e P é o termo de geração de energia.

2.2 Equações de estado

A equação de estado adotada neste texto foi a equação de Peng – Robinson modificada por Melhem, (1989). Ela é da forma

$$Z^3 + (B - 1)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z + B^3 + B^2 - AB = 0 \quad (4)$$

$$A = 0.45724 \frac{P_R}{T_R^2} \exp \left[m(1 - T_R) + n(1 - \sqrt{T_R})^2 \right] \quad (4.a)$$

$$B = 0.07780 \frac{P_R}{T_R} \quad (4b)$$

onde m e n são constantes que dependem do fluido, T_R é a temperatura reduzida, calculada por T/T_C , onde T é a temperatura e T_C é a temperatura crítica do fluido, Z é o fator de compressibilidade e p_R é a pressão reduzida (p/p_C), sendo p a pressão e p_C a pressão crítica do fluido.

O sistema formado, da Equação (1) até a Equação (4), contém como incógnitas a massa específica ρ , a velocidade w , a temperatura T e a pressão p .

A técnica de solução empregada foi discutida e apresentada em Reis e Leal, (1999), utilizando-se o esquema numérico de Godunov, (1959). A idéia, lá apresentada, transforma o sistema de quatro equações e quatro incógnitas em um sistema mais simples, formado pela Equação (1) e pela Equação (2). A equação de estado não é utilizada diretamente e, sim, através de um ajuste polinomial de ordem dois da pressão p como função da massa específica ρ . Este ajuste é conseguido após ser resolvido um sistema de equações, em níveis diferentes de pressão, durante uma despressurização, formado pela equação de estado e pela equação da entropia, que é obtida por propriedade residual ("departure function"), metodologia descrita em várias obras de termodinâmica de engenharia química, como, por exemplo, em Kyle, (1992).

3. Resultados

Na Figura 1, as curvas, a seguir, mostram o comportamento do fluxo de massa G (que é o produto da massa específica pela velocidade do fluido), como função da distância em vários instantes (em segundos), em uma perda de contenção com ruptura total da tubulação, ocorrida em um trecho de linha isolada termicamente (escoamento adiabático) de diâmetro de 0,1 m e de comprimento de 5000 m. A pressão inicial tem o valor de 10,13 MPa e a temperatura, o valor de 298,15 K e o fluido (etileno) se encontrava em repouso ($G = 0$).

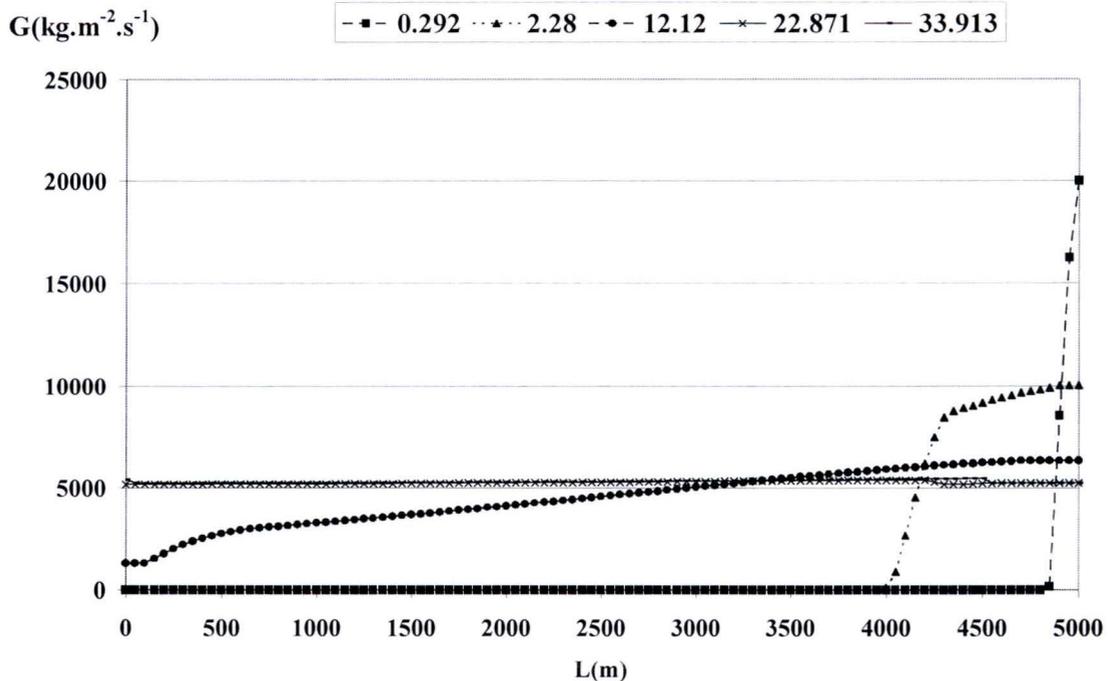


Figura 1. Perfis de fluxo de massa em vários instantes (na legenda, tempo em segundos).

Na Figura 2, estão mostrados os perfis de pressão como função da distância, para vários instantes.

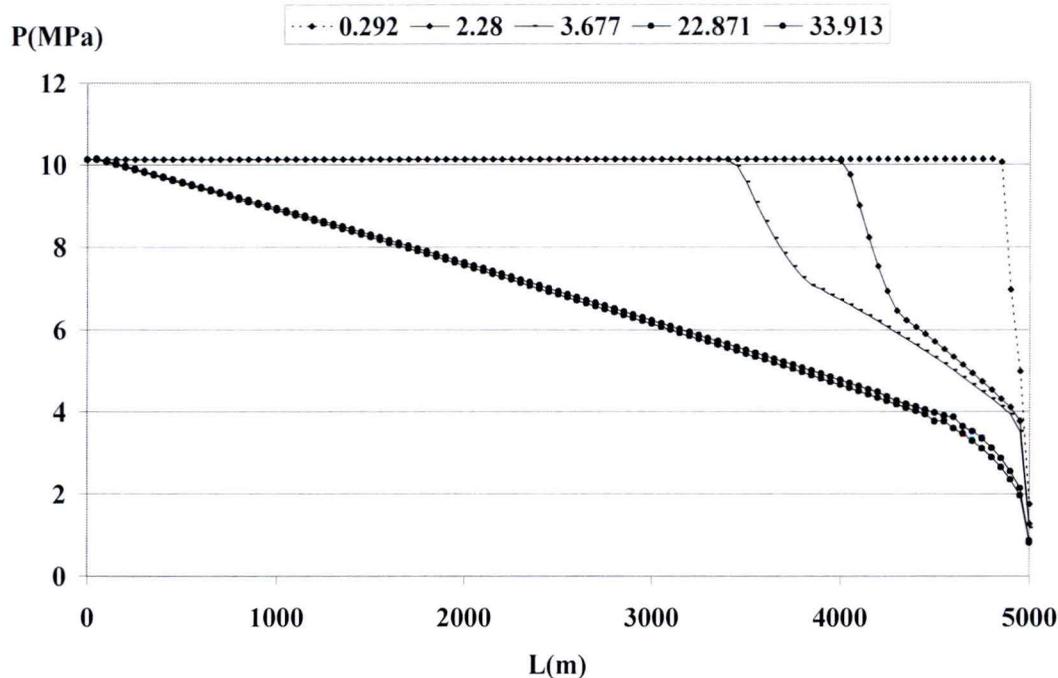


Figura 2. Perfis de pressão em vários instantes (na legenda, tempo em segundos).

Assim, na Figura 1, pode ver-se, que no instante inicial em que acontece a ruptura, praticamente em $t = 0,292$ s, a despressurização ocorre em um espaço muito pequeno, provocando um gradiente de pressão muito elevado que reflete, diretamente, no fluxo de massa no mesmo instante. Esta despressurização inicial provoca a maior descarga de material, que vai sendo atenuada nos demais instantes.

A informação desta perturbação de pressão, inicialmente, percorre cerca de 1000 m em 2,28 s. Neste instante, o etileno já escoava na forma bifásica. Quando esta perturbação de pressão começa a se dirigir para montante do duto, esta velocidade vai se reduzindo, até chegar ao ponto onde o sistema entra em estado estacionário, atingindo o seu ponto crítico, ou seja, as condições de pressão à jusante podem ser reduzidas que o fluxo de massa se manterá constante. Neste ponto, que ocorre cerca de 33,9 s após haver a perda de contenção, o fluido se encontra em estado estacionário.

A Figura 2 ilustra como esta modelagem consegue descrever este comportamento. No início, apenas regiões do duto muito próximas do acidente percebem a evolução do fluxo de massa. A partir do instante de 0,292 s, cerca de 80 % do duto ainda não havia sentido os efeitos da perda de contenção. Nos instantes seguintes, há uma evolução à montante desta informação, sendo que em 12 s, todo o trecho do duto já sente a despressurização e o efeito da perda de contenção, até o escoamento entrar em condição estacionária.

4. Considerações gerais

A modelagem do transiente de um escoamento de um fluido supercrítico, que em função de um vazamento para atmosfera venha a desenvolver, no ponto de ruptura um escoamento crítico bifásico, é uma tarefa árdua e desafiadora. Nestas circunstâncias, quando há a perda de contenção devido a uma falha de um acessório de linha, como uma válvula de controle, por exemplo, a ordem de grandeza das variáveis envolvidas é de grande monta. Mesmo utilizando um esquema numérico robusto, voltado para a solução de equações diferenciais parciais de

primeira ordem (hiperbólicas), como é o esquema de Godunov, (1959), a modelagem pode apresentar algumas dificuldades. Na Figura 1 é possível perceber que o comportamento do fluxo de massa nos instantes iniciais, após a ruptura, tem uma forte característica 'stiff', tanto com relação ao tempo, como em relação à coordenada espacial.

Nas primeiras tentativas de executar esta modelagem, trabalhou-se com o sistema de equações formado pelas Equações (1) a (3) mais a equação de estado, a Equação (4). Mesmo utilizando os critérios para convergência estipulados pelo esquema de Godunov, (1959), não foi possível manter um comportamento numérico estável da solução. A forte característica "stiff", associada à expressões com fortes não-linearidades, não possibilitou uma solução estável e viável computacionalmente. Isto só foi atingido quando da utilização do ajuste polinomial já descrito e apresentado em Reis e Leal, (1999). Este ajuste transformou o sistema em equações mais simples que, mesmo dentro desta forte característica "stiff", viabilizaram a convergência da solução com um consumo de tempo computacional mais adequado.

Uma outra dificuldade encontrada foi o tratamento das condições de contorno, também evidenciada no trabalho de Seynhaeve et al.,(1994). Além disto, não há na literatura dados experimentais para tubos longos para efetuar uma comparação mais exata com valores previstos na modelagem. Apenas fazendo uma comparação com os dados de Pilz e van Herck, (1976), que mediram a descarga de varias substâncias armazenadas em tanques, verifica-se que o valor encontrado para o fluxo de massa, quando atingido o escoamento crítico, apresentam a mesma ordem de grandeza.

Com relação ao escoamento não-isolado, percebe-se que este se configura através de um escoamento quase adiabático. Resultados de modelagem estacionária realizada nas duas circunstâncias, foram obtidas através de um procedimento iterativo duplo. Para um trecho de linha de 1000 m de comprimento, com um diâmetro de 0,1 m, que, inicialmente também se encontrava a 10,13 MPa e 298,15 K, os seguintes valores de fluxo de massa crítica foram encontrados:

Tabela 1. Fluxos de massa crítica em dutos

$G(\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$ (duto isolado)	$G(\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$ (duto não-isolado)
11500	10600

5. Conclusão

No regime transiente, o tratamento numérico adotado mostrou ser bastante adequado. O método de Godunov, (1959) é bastante robusto, mas pode apresentar instabilidade em função de não-linearidades presentes nas relações PVT de estado, no caso, a equação de Peng-Robinson modificada por Melhem et al.,(1989) e no próprio modelo de escoamento.

Outro fato importante são as condições de contorno, que numericamente requerem um cuidado especial, não sendo fácil tratá-las eficientemente, fato este observado também no trabalho de Seynhaeve et al., (1994). Percebe-se, também, que a modelagem pode ser conduzida em um ambiente adiabático, pois a influência do ambiente externo é pouco sentida.

Referências

- Elias, E. e Lellouche, G.S., (1994), "Two-phase critical flow", *Int. J. Multiphase Flow*, vol.20, p.91.
- Drai, P., Porterie, B., Monier, P., Lorand, J.C., (1998), "Numerical and Experimental Study of an Accidental Depressurization in an Enclosure Containing High-Pressure Liquid", *Nuclear Science and Eng.*, vol.129, pp 246-260.
- Godunov, S.K., (1959), "A finite difference method for the numerical computation and discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics", *Mat. Sb.*, vol.47, p.271.

- Henry, R.E., Fauske, H.K., (1971). "The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes", *Journal of Heat Transfer - Transactions of ASME*, may, 1971, pp.179-187.
- Kyle, B.G., (1992), "Chemical and Process Thermodynamics", 2nd ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Moody, F.J., (1966). "Maximum Two-Phase Vessel Blowdown from Pipes", *Journal Heat Transfer-ASME Trans., série C*, vol. 88, p. 285
- Melhem, G.A., Little, A.D., Goodwin, B.M. e Saini, R., (1989), "A modified Peng-Robinson equation state" *.Fluid Phase Equilibria*, vol.47, p189.
- Pilz, V e van Herck, W., (1976), "Chemical engineering investigations with respect to the safety of large chemical plants", *Third Symposium on Large Chemical Plants. European Federation of Chemical Engineering*, Antwerp .
- Reis, R.C. e Leal, C.A., (1999), "Estudo da despressurização de fluidos supercríticos em dutos", *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Campinas.
- Seynhaeve, J.M.; Lombré, R.; Ducrocq, J. e Bolle, L., (1994), "Physical modelling of rapid transients in long pipes, in case of vaporization: na efficient for safety management", *Process Safety Progress*, vol 13, n. 2, p. 95.

MODELING OF TRANSIENT OF TWO-PHASE CRITICAL FLOW IN PIPELINES

Rubem da Cunha Reis^{1*}, César Antônio Leal²

¹Depto. de Eng^o Química, PUCRS e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS
Av. Ipiranga 6681, CEP 90619-200, Porto Alegre, RS

²Depto. de Eng^o Nuclear e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS
Av. Sarmiento Leite 425, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS

Abstract. *Today, it is common to see great distances between producing and consumer units, where fluids can flow under supercritical pressure conditions. Under these severe flow conditions, many accidents and incidents in the industry of chemical processes have happened due to the failure of components or of the pipeline itself. In the work, it is sought to model the a pipeline, with supercritical pressure for initial condition, to determine the behavior of the variables flux, pressure, temperature and state of the fluid, inside the system, during the transient, due to the contention loss. This also allows for the evaluation of the magnitude of the formed critical flow. It is also presented a discussion on the use of a thermodynamic state equation for estimation of fluid properties and its influence on the calculation of the critical flow. Results from stationary and transient modeling are presented, considering both insulated and non-insulated situations.*

Keywords: *Choked flow, Two-phase flow, Critical flow.*

* To whom all correspondence should be addressed.