

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

UM MODELO HÍBRIDO DE ESCOAMENTO DE GÁS NATURAL IMPLEMENTADO EM CHECKMATE

Fernando M. Mori¹, Ricardo Lüders², Herlon de Mello Paleo³, Admilson Franco⁴

¹ CEFET-PR/ CPGEI, fernandommori@yahoo.com

² CEFET-PR/ CPGEI, luders@dainf.cefetpr.br

³ CEFET-PR/ CPGEI, herlonmp@gmail.com

⁴ CEFET-PR/ PPGEM, admilson@cefetpr.br

Resumo – Recentemente, o gás natural tem-se tornado uma atrativa fonte alternativa de energia, tanto para consumidores residenciais quanto para comerciais ou indústrias. Portanto, tem-se feito um grande investimento a fim de se obter uma melhor qualidade no serviço. Este trabalho tem como objetivo propor um modelo simplificado para uma rede de distribuição de gás natural, que permite obter um comportamento aproximado para o escoamento do gás levando em consideração tanto aspectos de regime permanente quanto de transitórios. Para isso, a modelagem baseou-se na teoria de sistemas híbridos. Neste trabalho, um sistema híbrido é definido por modelos contínuos que são chaveados por um modelo discreto para diferentes regiões de operação. Esse modelo é implementado na forma de um autômato híbrido usando um pacote de simulação e análise denominado CheckMate.

Palavras-Chave: sistemas a eventos discretos, autômatos híbridos, gás natural, simulação.

Abstract – Actually, the natural gas has become an attractive alternative power source, not only for commercial or industry costumers, but also for residential ones. Therefore, a great investment has been made to get a better service. This paper proposes a simplified model for a natural gas distribution plant that allows to obtain an approximate behavior for the gas flow taking in account aspects of both steady-state as well as transient behaviors. This methodology is based on hybrid systems theory. In this work, a hybrid system is defined by a discrete model that switches various continuous models according to its region of operation. This model is implemented by a hybrid automaton in a simulation software named CheckMate.

Keywords: discrete event systems, hybrid automata, natural gas, simulation.

1. Introdução

Nestes últimos anos, o gás natural tornou-se uma atrativa fonte de energia alternativa para diversas aplicações, tanto para grandes consumidores, como indústrias e comércio, como também para pequenos consumidores, como por exemplo, os consumidores residenciais. Conseqüentemente, tem se feito um grande esforço para a melhoria na qualidade do serviço prestado a todos consumidores, principalmente em relação à segurança e confiabilidade.

Este trabalho propõe a modelagem de um sistema de distribuição de gás bastante simples, com uma fonte, uma ramificação em T e dois consumidores. Além disso, foram adotadas algumas simplificações no sistema fluido-dinâmico (Fox, 2005), como o escoamento laminar, completamente desenvolvido e fluido incompressível. Essa metodologia de modelagem baseia-se na teoria de sistemas híbridos (Antsaklis, 2000; Krogh e Chutinan, 1999), o qual é caracterizado pelo chaveamento de modelos contínuos por um modelo discreto (Cassandras e Lafortune, 1999; Baccelli et al., 1992), que pode ser bem representado por um autômato híbrido (Hezinger, 1996). Em Calvo et al. (2001), essa metodologia também foi adotada.

Para a implementação do modelo, foi utilizado o *CheckMate* (Silva, 2000), um software de simulação e análise de sistemas híbridos baseado na plataforma MatLab¹. Com esse pacote, é possível fazer uma análise formal do modelo, que permite determinar se certas regiões de operação serão atingidas. Este tipo de análise é importante, pois, por exemplo, quando um novo consumidor é adicionado ou retirado da rede há uma variação no comportamento dinâmico do gás. Por sua vez, isso pode acarretar num aumento ou diminuição da pressão do sistema, levando-o a estados de operação não desejáveis, como por exemplo, o acionamento de válvulas de bloqueio ou o aumento da pressão a níveis inseguros. No entanto a análise formal não será abordada neste trabalho, sendo apresentados somente a implementação e os resultados de simulação do modelo de escoamento do gás.

Para tanto, este trabalho é organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta um resumo da teoria de sistemas híbridos. Na Seção 3 está descrita a modelagem do escoamento de gás, ou seja, a descrição fluido-dinâmica do problema. A Seção 4 mostra a implementação do modelo na ferramenta *CheckMate* e os resultados de simulação obtidos, finalizando com as conclusões na Seção 5.

2. Sistemas híbridos

Neste trabalho, o sistema híbrido é composto por estados discretos que são identificados pela ocorrência de eventos que caracterizam determinado estado e são responsáveis pela transição entre estados. Esse modelo de transição de estado é representado por um autômato de estado finito. Como a cada estado discreto está associado um modelo contínuo, tal autômato é denominado híbrido. Basicamente, seu comportamento é determinado pelo chaveamento de modelos contínuos pelo modelo discreto. O modelo contínuo pode ser representado por equações diferenciais, lineares ou não lineares. Por exemplo, a equação 1 ilustra o sistema linear, onde $\dot{x}$ representa o vetor das variáveis de estado do sistema, e A e B são matrizes de dimensão apropriada. Entretanto, o modelo pode ser não linear, exemplificado pela equação 2, onde a função $f(x)$ representa uma função não linear.

$$\dot{x} = Ax + B \quad (1)$$

$$\dot{x} = f(x) \quad (2)$$

Conforme acima, autômatos híbridos são utilizados para representar os sistemas híbridos. Este tipo autômato é composto por estados discretos, denominados *location*, determinados pelo *invariante*, que representa as condições as quais devem ser aceitas para que a máquina de estado finita permaneça no estado discreto. Além disso, cada *location* possui um modelo contínuo, representado por equações diferenciais ou algébricas, e também suas respectivas condições iniciais para quando exista transição entre os modelos. Essas transições entre *locations* são chamados *edges* e são realizadas quando determinadas *condições de guarda* são aceitas. Em outras palavras, o sistema entra numa região de transição a qual geralmente é limitada por inequações lineares. Junto às transições são determinadas condições de *reset*, que determinam as condições iniciais de cada *location*. O par *condição de guarda* e *reset* formam o *edge*. Um autômato simples é ilustrado pela Figura 1.

O autômato funciona da seguinte maneira. Iniciando no estado U1, seu comportamento contínuo é dado por $F_u(x)$. Caso o autômato entre numa região de transição dado pelo *edge* e_1 , ele transita para o estado U_2 reiniciando o valor das variáveis dado pelo *reset* x^+ . Conseqüentemente, o comportamento contínuo agora se dá pelo modelo $F_{u2}(x)$.

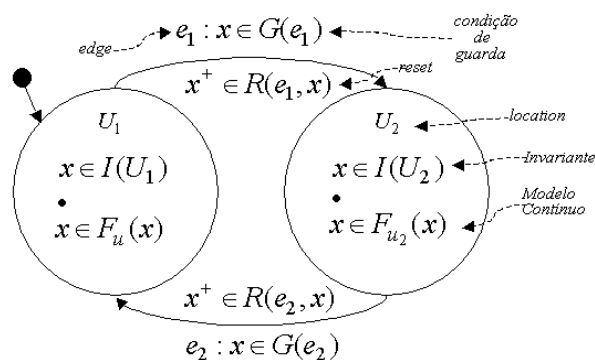


Figura 1. Exemplo de um Autômato Híbrido.

¹ Matlab é marca registrada da Mathworks Inc.

3. Modelagem da rede de distribuição de gás

O sistema de distribuição de gás foi modelado a partir de uma rede bastante simples. A planta utilizada corresponde a uma fonte, que pode ser vista como a saída de um *city-gate*, um ramo principal e outros dois ramos secundários, onde se encontram os dois consumidores. A figura 2 ilustra este cenário.

Cenário de Consumo:

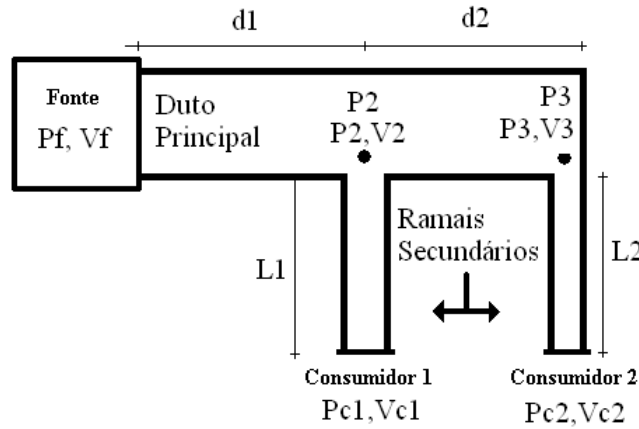


Figura 2. Cenário com dois Consumidores.

Para o modelo matemático foram feitas algumas simplificações importantes. O duto principal é considerado um sistema estático com perdas distribuídas. Dessa forma, considera-se que o comportamento transitório nos dutos secundários tem pouca influência no ramo principal. Já nos dutos secundários foi implementado um modelo dinâmico, com algumas simplificações, descritas a seguir. Primeiramente, o gás é considerado um fluido incompressível, seu escoamento laminar e completamente desenvolvido no ramo principal, cuja fonte é ideal com pressão constante.

A modelagem do escoamento no ramo principal utiliza a equação estática de Bernoulli (Fox e Pritchard, 2005; Osiadacz, 1987), conforme a equação (1), onde p_f e V_f representam a pressão (em Pa) e a velocidade do gás (em m/s) na fonte, respectivamente (idem para p_2 e V_2 no ponto P2) e h_{f2} representa a perda distribuída entre a fonte e o ponto P2.

$$\frac{p_f}{\rho} + \frac{V_f^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + h_{f2} \quad (1)$$

Como o diâmetro é considerado constante ao longo de todo o ramal principal, pela conservação da massa, tem-se $V_f = V_2$ e a equação (1) se simplifica para:

$$\frac{p_f}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + h_{f2} \quad (2)$$

Portanto, a pressão no ponto P2 pode ser obtida substituindo-se a perda h_{f2} , devida ao atrito do fluido nas paredes do duto. A perda de carga de um escoamento completamente desenvolvido é proporcional à velocidade de escoamento entre dois pontos. No modelo proposto, esta perda é considerada somente no ramo principal.

$$p_2 = p_f - \rho \cdot h_{f2} = p_f - \frac{A \cdot V_2 \cdot 128 \cdot \mu \cdot d_1}{\pi \cdot D^4} \quad (3)$$

Na equação (3), d_1 é a distância da fonte ao ponto P2, A é a área da seção transversal do ramal principal em m^2 , D é o diâmetro do ramal principal em m e μ é a viscosidade do gás em $kg/(m.s)$. Além disso, a velocidade V_2 está relacionada com o consumo através da conservação da massa, ou seja:

$$AV_2 = A_1V_{c1} + A_2V_{c2} \quad (4)$$

Na equação (4), A_1 e A_2 correspondem às áreas dos ramais secundários 1 e 2, respectivamente. Para o escoamento nos ramais secundários, utiliza-se a equação dinâmica de Bernoulli (Fox e Pritchard, 2005; Osiadacz, 1987), considerando a derivada da velocidade do gás no ponto de consumo e assumindo que a variação de pressão e velocidade do gás no consumidor são desprezíveis no ramal principal. Dessa forma tem-se:

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} = \frac{p_{c1}}{\rho} + \frac{V_{c1}^2}{2} + \frac{dV_{c1}}{dt} L_1 \quad (5)$$

Na equação (5), p_{c1} e V_{c1} são a pressão e a velocidade do gás, respectivamente, no consumidor 1, enquanto L_1 é o comprimento do ramal secundário 1. Isolando-se o termo p_{c1} tem-se:

$$p_{c1} = p_2 + \rho \cdot \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_{c1}^2}{2} - \frac{dV_{c1}}{dt} \cdot L_1 \right) \quad (6)$$

Através da equação (6), é possível obter o comportamento dinâmico da pressão no consumidor 1 por intermédio do seu perfil de consumo, dado pelos valores instantâneos da velocidade do gás e sua derivada. As equações (3) e (5) são então usadas para se obter a pressão no ponto P2 e a pressão p_{c1} no consumidor 1, respectivamente. Entretanto, essas equações estão relacionadas entre si através de V_2 , que também depende do consumo. Para contornar esse problema, V_2 é assumida constante durante a variação de consumo, ou seja, a influência dos consumidores é desprezível no ramo principal. Assim, esse valor constante de V_2 pode ser usado para a obtenção do transitório de p_{c1} através da equação (6). Terminado o transitório, o novo valor de V_2 é ajustado através da equação (4) e refletido para p_2 através da equação (3), permitindo recalcular o valor em regime de p_{c1} , ou seja, a pressão final em regime do consumidor 1. De forma análoga, são estabelecidas as equações para o ponto P3 e o consumidor 2. Em resumo, propõe-se calcular o transitório de pressão nos consumidores supondo que o ramo principal não é afetado e, posteriormente, corrigir esses valores com os valores em regime. Obviamente, isso causará descontinuidade nas curvas de pressão assim obtidas, mas é um procedimento que gera um comportamento aproximado das variáveis de interesse (pressão nos diversos pontos da rede), segundo o modelo híbrido proposto.

4. Implementação e resultados

Para implementar o modelo proposto, foi utilizado o software *CheckMate*, desenvolvido na universidade de Carnegie Mellon. Esse *toolbox* apresenta ferramentas de simulação e análise de sistemas híbridos através de regiões de análise delimitadas por hiperplanos, os quais determinam os invariantes da máquina de estado finita e também regiões de operação não permitidas.

A máquina de estado finita foi desenvolvida com base nos perfis de consumo, onde as transições entre os estados discretos correspondem às variações no consumo determinadas pelo tempo. Além desses estados, é criado um estado não permitido, quando o sistema alcança níveis indesejados de operação. Por exemplo, a pressão sobe ou decresce a níveis críticos, ou tempo de simulação pré-definido é excedido.

A Tabela 1 ilustra os estados discretos do autômato implementado e descreve seu comportamento em relação aos consumidores 1 e 2.

Tabela 1. Descrição dos estados discretos.

Estado discreto:	Descrição:
q=1	Consumo 1 e 2 nulos
q=2	Consumo 1 aumenta à taxa constante e 2 permanece nulo
q=3	Consumo 1 constante e 2 permanece nulo
q=4	Consumo 1 constante e 2 aumenta à taxa constante
q=5	Consumo 1 e 2 constantes
q=6	Consumo 1 diminui à taxa constante e 2 permanece constante
q=7	Consumo 1 nulo e 2 permanece constante
q=8	Consumo 1 nulo e 2 diminui à taxa constante
q=9	Pressão fora dos limites de operação (Estado não permitido)

Os parâmetros utilizados estão mostrados na tabela 2. A densidade do gás utilizada foi ρ igual a 0,675, já a viscosidade μ é igual a $11,84 \times 10^{-6}$ Kg/(m.s). A pressão da fonte foi considerada constante igual a 7kgf/cm².

Tabela 2. Configurações da rede de distribuição de gás.

	Diâmetro	Comprimento
Fonte	6"	$d_1=10\text{km}$ $d_2=5\text{km}$
Consumidor 1	4"	$L_1=100\text{m}$
Consumidor 2	4"	$L=100\text{m}$

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3, que mostra o padrão de consumo dos dois consumidores e as respectivas curvas de pressão na entrada dos consumidores (P_{c1} e P_{c2} na Figura 2).

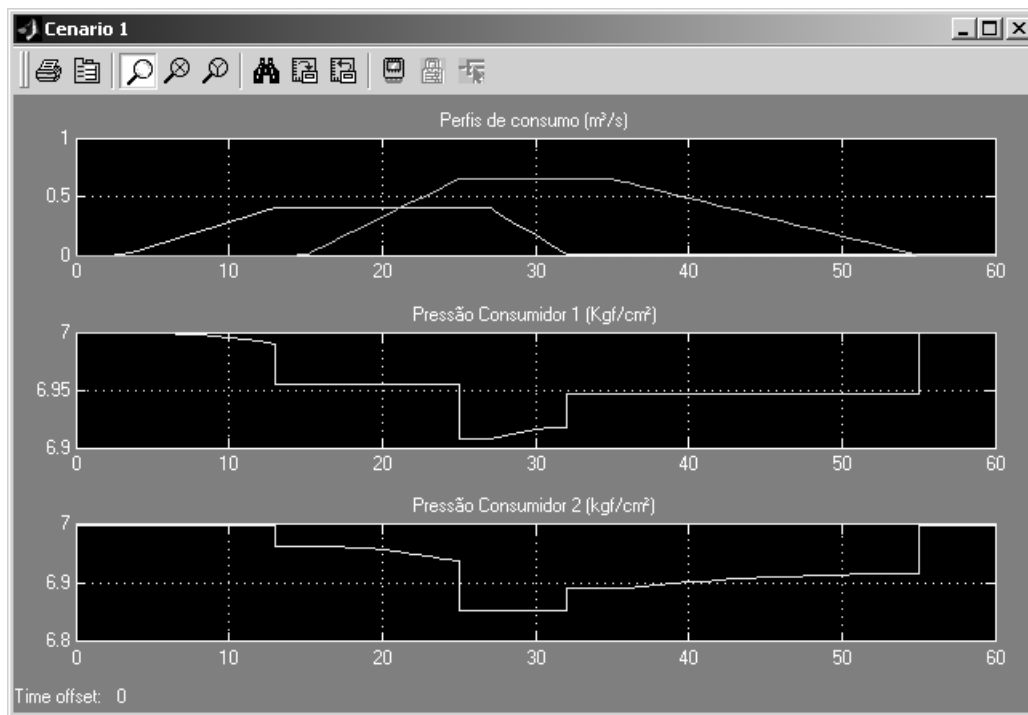


Figura 3. Perfis de vazão e pressão.

Na Figura 3, observa-se que à medida que o consumidor 1 aumenta seu consumo de zero até $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, a pressão (inicialmente igual à da fonte) começa a cair em ambos os consumidores. A queda de pressão ocorre devido à perda causada pelo atrito dinâmico do gás no duto, que é pequena devido à velocidade de escoamento obtida.

Nota-se que, a curva da queda de pressão no consumidor 1 reflete o comportamento transitório observado, enquanto a queda de pressão no consumidor 2 apenas reflete a queda de pressão (em regime) ocorrida no ramal principal, devido ao aumento de consumo do consumidor 1.

De forma semelhante, quando o consumidor 2 aumenta seu consumo de zero até $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$, observa-se o comportamento transitório no consumidor 2 e o reflexo deste aumento no comportamento em regime do consumidor 1. Obviamente, o comportamento real do sistema está sujeito aos dois efeitos (regime e transitório) simultaneamente. Porém, apesar de apenas aproximar o comportamento do sistema por níveis de consumo, esta metodologia permitirá que se faça uma análise formal do modelo. Essa análise baseia-se na partição do espaço de estado contínuo, e permite verificar se, para uma dada condição inicial, determinada região de operação é atingida ou não. Isso é importante para, por exemplo, identificar regiões críticas de operação.

Os resultados acima devem ser vistos como preliminares de uma metodologia pouco difundida para a modelagem de sistemas onde ocorre o escoamento de fluidos sujeitos à ocorrência de eventos discretos. Esses sistemas apresentam um comportamento contínuo que é perturbado (chaveado) pela ocorrência de eventos discretos, tais como mudanças nos perfis de consumo ou abertura e fechamento de válvulas.

5. Conclusões

A simulação computacional representa importante ferramenta para o estudo do comportamento de sistemas complexos. Neste trabalho é considerado o escoamento de gás ao longo de um duto principal com duas ramificações secundárias. Para tanto, foi utilizado um modelo híbrido que representa tanto o comportamento contínuo das variáveis de interesse do sistema (vazão e pressão) quanto seu estado discreto, definido pelas diversas condições de operação e suas respectivas transições. Diversas simplificações são adotadas para a construção deste modelo, dentre as quais destacam-se: fluido incompressível, escoamento plenamente desenvolvido e laminar com perdas distribuídas no ramal principal, escoamento sem perdas para os ramais secundários e fonte ideal fornecendo pressão constante. Os resultados obtidos devem ser vistos como preliminares de uma metodologia pouco difundida para a modelagem de sistemas onde ocorre o escoamento de fluidos sujeitos à ocorrência de eventos discretos. Entretanto, apesar da ferramenta computacional utilizada se prestar à simulação do comportamento dinâmico aproximado do sistema, os resultados obtidos ainda necessitam ser comparados com outros pacotes de simulação que forneçam uma melhor aproximação em relação ao comportamento real do sistema. Além disso, deve-se destacar que a principal vantagem da ferramenta utilizada é a possibilidade de se obter uma verificação formal do modelo, ou seja, através de algoritmos de partição do espaço de estado contínuo, é possível garantir que certas regiões de operação de interesse nunca serão atingidas. Essas regiões, previamente definidas, correspondem a condições críticas de operação que devem ser evitadas.

6. Agradecimentos

Este trabalho teve apoio financeiro da Fundação Araucária/PR (Edital 04/2001) e do programa PIBIC/CNPq do CEFET-PR. Os autores agradecem também à Agência Nacional do Petróleo – ANP - e à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás PRH-ANP/MCT (PRH-10/CEFETP-PR).

7. Referências

- ANTSAKLIS, P. J. (Editor). A brief introduction to the theory and applications of hybrid systems, *Proceedings of the IEEE* Vol. 88, No. 7, July, 2000.
- CALVO, R. A.; SILVA, C. M. C.; MARTINCOSKI, R. J.; NEVES, F.; ARRUDA, L. V. R. Autômatos híbridos: modelagem e análise de sistemas de transferência e distribuição de gás natural. In: *V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Canela, 2001.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. *Introduction to Discrete Event Systems*, Boston: Kluwer, 1999.
- CHUTINAN, A. *Hybrid System Verification Using Discrete Model Approximations*, PhD Thesis, Carnegie Mellon University, 1999.
- FOX, R. W., McDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. *Introduction to Fluid Mechanics*, 6 edition, John Wiley & Sons, 2005.
- HEZINGER, T. A. The theory of hybrid automata, In: *Proceedings of the 11th Annual Symposium on Logic in Computer Science*, pp. 278-292, IEEE Computer Society Press, 1996.
- KROGH, B.; CHUTINAN, A. Hybrid systems: modeling and supervisory control, In: *Proceedings of European Control Conference – ECC99*, pp. 227-246, Karlsruhe, Germany, 1999.
- OSIADACZ, A.J. *Simulation and Analysis of Gas Networks*, Gulf Publishing, 1987.
- SILVA, B., RICHELSON, K., KROGH, B., CHUTINAN, A. Modeling and Verifying Hybrid Dynamic Systems Using CheckMate In: *ADPM*, 2000.