



UM MODELO PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO TRANSIENTE TÉRMICO EM GASODUTOS E SEUS COMPONENTES

Angela O. Nieckele¹, Luis Fernando G. Pires², Arturo J. Ortega³

Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, 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, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*.

Resumo

Um novo e prático código computacional que simula escoamento de gás em redes de dutos foi desenvolvido. O modelo é capaz de simular escoamentos compressíveis, térmicos e transientes. O programa possui, além dos dutos, os principais componentes presentes em gasodutos como válvulas, compressores, trocadores de calor, bifurcações, etc. O modelo matemático é baseado nos princípios de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, além das equações constitutivas para os diversos componentes. A solução das equações de conservação foi tratada utilizando o método dos volumes finitos. Vários casos testes foram analisados utilizando circuitos com diferentes tipos de bifurcações assim como diversas combinações de pontos de recebimento e entrega. Analisou-se ainda o regime transiente devido a abertura de válvulas de alívio localizadas ao longo das linhas dos gasodutos. Os resultados dos testes foram comparados com dados disponíveis na literatura apresentando excelente concordância.

Abstract

An innovative and useful computational code to simulate gas flow in pipeline networks was developed. The model is able to simulate compressible, thermal and transient flow. The program has, besides the pipes, the main components present in gas pipelines such as valves, compressors, heat exchanges, pipe junctions, etc. The mathematical model is based on the conservation principles of mass, momentum and energy, combined with the constitutive equations of each component. The solution of the conservation equations was handled by the finite volume method. A simple and efficient method is employed to solve directly the algebraic system. Several test cases were investigated in loops with different types of bifurcation and several combinations of supply and delivery positions. It was also analyzed the transient regime during the opening of relief valves installed along the pipeline. The results were compared with data available in the literature showing an excellent agreement.

1. Introdução

O gás natural é uma das mais importantes fontes de energia e seu consumo está aumentando rapidamente em todo o mundo. Sistemas de gasodutos cada vez mais complexos têm sido projetados, desenvolvidos e operados. Devido à importância desse sistema, esforços têm sido empregados por pesquisadores, para desenvolver modelos matemáticos e métodos numéricos, cada vez mais gerais e eficientes, visando simular computacionalmente estes gasodutos com a finalidade de maximizar a eficiência de suas operações.

Streeter e Wylie (1967) demonstram, fazendo uso do método das características, critérios para a implementação numérica dos componentes encontrados num gasoduto, assim como a metodologia para a implementação dos acoplamentos de dutos, mudanças de diâmetros, etc, os quais são tratados como condições de contorno.

¹ PhD, Professor Associado – Departamento de Engenharia Mecânica – PUC/Rio

² DSc, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - Ctex

³ MSc, Pesquisador – Núcleo de Simulação Termohidráulica de Dutos – DEM – PUC/Rio

Diversos são os trabalhos relacionados com a simulação de gasodutos, entre os quais podemos mencionar os trabalhos de Nazeer et al. (1998, 1999), que desenvolveram um modelo para a simulação de escoamento transiente num complexo sistema de dutos. O modelo matemático consiste num conjunto de equações diferenciais parciais hiperbólicas para resolver o escoamento, equações diferenciais ordinárias para modelar os equipamentos e equações empíricas de fechamento. A discretização das equações diferenciais foi realizada utilizando o método das diferenças finitas juntamente com o esquema de Crank-Nicklson. Um método de solução de redes de dutos, baseados em malhas ortogonais e aproximações nodais, foi aperfeiçoado por Lim e Ti (1998) para malhas complexas. O método subdivide a rede de dutos em diversas redes de dutos de menor tamanho de tal maneira a reduzir o tamanho das matrizes envolvidas, visando economizar tempo computacional. Zhou e Adewumi (2000) analisaram transientes de gás natural em tubulações utilizando esquemas híbridos TVD. Nieckele et al (2001) apresentaram um modelo para a simulação do movimento de *pigs*, ao longo de tubulações. As equações diferenciais de conservação foram resolvidas utilizando a técnica de diferenças finitas. As equações do fluido foram combinadas com a equação de conservação de quantidade de movimento linear para o *pig*. Recentemente, Seleznev (2007) propôs um método para prever o escoamento de gás em uma rede de tubulações, considerando estações de compressão.

O objetivo do presente trabalho consiste em apresentar uma nova metodologia para prever transientes de gás em tubulações. Diversos casos testes foram realizados e comparados com dados disponíveis na literatura apresentando ótimo desempenho.

2. Modelagem Matemática

De um modo geral, as tubulações utilizadas para transporte de gás são bastante longas com relação aos seus diâmetros, permitindo considerar o escoamento como unidimensional, com velocidade uniforme ao longo da secção transversal. O escoamento dentro da tubulação é governado pelas equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, as quais são dependentes do tempo. Adicionalmente é necessário utilizar uma equação de estado.

No presente trabalho o gás é considerado como um gás quase ideal, de maneira que a equação de estado pode ser escrita como:

$$\rho = \frac{P}{a^2} \quad ; \quad a^2 = \frac{z \mathfrak{R} T}{M} \quad ; \quad \frac{1}{z} = 1 + \frac{(3,44 \times 10^5 P' 10^{(1,785 SG)})}{\tilde{T}^{3,825}} \quad (1)$$

onde P e T são a pressão e a temperatura absolutas respectivamente. ρ é a densidade do gás, a é a velocidade do som a temperatura constante, $\mathfrak{R} = 8314 \text{ Nm/(kgmol K)}$ é a constante universal do gás e M é o peso molecular do gás. z é o fator de compressibilidade o qual para um gás natural pode ser determinado como função da pressão absoluta P' em psig, \tilde{T} é a temperatura do fluido em $^{\circ}\text{R}$ e SG a gravidade específica.

Com a finalidade de considerar as irregularidades do terreno onde as tubulações são instaladas, a linha de centro da tubulação pode ser inclinada com relação à direção horizontal num ângulo α . Adicionalmente, devido à significativa variação da pressão, o efeito desta na deformação da tubulação é considerada.

A equação de conservação de massa pode ser escrita como (Wylie and Streeter, 1978)

$$\frac{dP}{dt} + \frac{\rho a^2}{\xi} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \beta \frac{dT}{dt} \right] = 0 \quad (3)$$

onde $d/dt = \partial/\partial t + V \partial/\partial x$ é a derivada material, V é a velocidade do gás, A é a secção transversal da tubulação, e β é o coeficiente de expansão térmica. O fator $\xi = 1 + \rho a^2 2 (1-\nu^2) D/(2 e E)$, leva em consideração a deformação do duto devido à pressão, a qual é função do diâmetro interno D , da espessura da parede e , do módulo de elasticidade E e do coeficiente de Poisson ν .

A equação de quantidade de movimento linear pode ser escrita como

$$\frac{dV}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f}{2} \frac{|V| V}{D} - g \sin \alpha \quad (4)$$

onde g é a gravidade e f é o fator de fricção hidrodinâmico, o qual depende do número de Reynolds. Para o cálculo do fator de fricção a correlação de Hagen Pousseuille é usada no caso do regime laminar e a correlação empírica de Miller é usada no caso do regime turbulento (Fox and McDonald, 2001).

A equação de conservação de energia pode ser escrita como

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\beta T}{\rho c_p} \frac{dP}{dt} + \frac{f}{2 c_p} \frac{V^2 |V|}{D} - \frac{4 U_e}{\rho c_p D} (T - T_{ref}) \quad (5)$$

onde c_p é o calor específico a pressão constante, U_e é o coeficiente de transferência de calor e T_{ref} é a temperatura de referência. Para o cálculo do calor trocado com as paredes da tubulação é desprezado a energia armazenada na parede da tubulação e as camadas de isolamento térmico.

2.1. Componentes

A quantidade de trabalho por unidade de massa H (*head*) que deve ser realizada no processo de compressão do gás, de um compressor centrífugo, de tal maneira que o processo seja isentrópico é dado pela Eq. (6), (Krishnaswami et al., 2004), onde k é a relação dos calores específicos, R é a constante do gás, os subscritos u e d são relacionados aos valores a montante e a jusante do componente e o subscrito av represente um valor médio ao longo do componente.

$$H = R z_{av} \frac{k}{k-1} T_u \left[\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (6)$$

O aumento da temperatura na descarga do compressor representa o natural incremento de temperatura como consequência do processo de compressão:

$$T_d = T_u + \frac{T_u}{\eta} \left[\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (7)$$

onde η é a eficiência isentrópica do compressor. As curvas características do compressor representam o comportamento do *head* isentrópico e da eficiência isentrópica como uma função da vazão do gás. São representadas como curvas polinomiais dependentes da vazão.

Para a modelagem matemática das válvulas intermediárias e de alívio foram usadas as normas ISA S75.01-S75.02, Hutchison (1976), para fluidos compressíveis.

$$Q_{std} = 4,17 F_p C_v P_u Y \left[\left(\frac{\chi}{SG T_u Z_u} \right) \right]^{0,5} \quad (8)$$

onde Q_{std} é a vazão volumétrica nas condições padrões (m^3/h). F_p é um fator que considera as mudanças geométricas dos dutos conectados na válvula, C_v é o coeficiente da válvula ($gpm/psi^{0,5}$), χ é a taxa relativa de queda de pressão e Y um fator de expansão.

Os trocadores de calor são dispositivos que tem como finalidade aumentar ou diminuir a temperatura do escoamento do gás em certos pontos ao longo do gasoduto. O calor trocado é considerado igual a diferença de entalpias correspondente à diferença entre as temperaturas de entrada e de saída do trocador de calor. Para obter a queda de pressão no trocador de calor se fez uso da seguinte relação, Pipeline Studio (2004):

$$K = \frac{P_u^2 - P_d^2}{Q_{std}^2} \quad (9)$$

onde K é coeficiente de resistência.

3. Método Numérico

A solução das equações governantes para o campo do escoamento dentro das tubulações é determinada pela técnica dos volumes finitos Patankar (1980). A derivada espacial é aproximada pelo método das diferenças centrais, e uma aproximação completamente implícita é adotada para a integração no tempo. No presente método considera-se o acoplamento das equações de continuidade, quantidade de movimento linear e energia, as quais são resolvidas simultaneamente para a tubulação utilizando um algoritmo heptadiagonal direto.

Para a solução numérica dos modelos dos componentes, os princípios de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia são respeitados. Esses definem as condições de contorno na entrada ou na saída das respectivas tubulações onde se encontram instalados os componentes, tomando em consideração o sentido do escoamento.

No caso das junções de tubulações considera-se uma pressão e temperatura comum no nó que represente a junção. A pressão comum é determinada através de um balanço de massa na junção e acoplado a esta a equação de quantidade de movimento linear aproveitando a relação desta com a pressão. A condição de contorno para este caso é de pressão conhecida seja na entrada ou na saída da respectiva tubulação. Para obter a temperatura comum, nos dutos onde sai fluxo de massa, se faz uso da condição de contorno de temperatura desconhecida, isso significa que a temperatura é obtida mediante a natural solução da equação de energia na saída da respectiva tubulação. Entretanto, nos dutos onde se tem entrada de fluxo de massa é calculada uma temperatura que representa a média das temperaturas dos extremos dos dutos em volta da respectiva junção.

Para o restante dos componentes se procede de maneira similar, usando os princípios das equações de conservação e combinando estas com as equações do modelo que representam os componentes, com a finalidade de utilizar estas como condições de contorno de entrada e/ou saída da tubulação onde se encontra instalado o componente.

4. Resultados

Com a intenção de validar o código computacional desenvolvido, *NetGasSim*, diferentes testes foram executados incluindo tanto casos ideais como reais. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles do *software* comercial de simulação de gasodutos *TGNET Pipeline Studio*.

Os testes dos casos ideais servirão para validar o critério utilizado na implementação dos diferentes componentes incluindo as redes. Um dos resultados obtidos é apresentado a seguir. A Figura 1 mostra a configuração utilizada, onde se observa um série de dutos de 16 in com comprimentos de 40 e 30 km formando um *loop*. Na entrada da rede é imposto um fluxo de massa de 0,7 kg/s a 50 °C e na saída da linha é considerada a pressão atmosférica. Os resultados obtidos para o campo de pressão, temperatura e vazão em massa ao longo da rede são apresentadas nas Figuras 2 a 4, respectivamente. Pode-se observar a excelente concordância com a previsão do *software* *TGNET*.

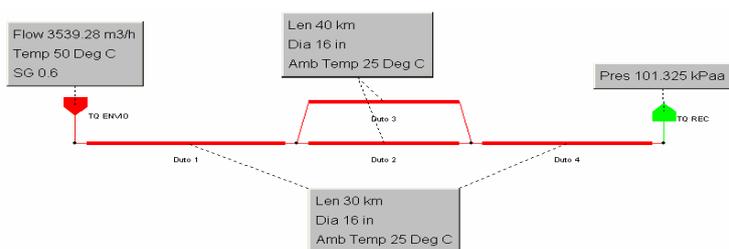


Figura 1. Configuração do *loop* testado

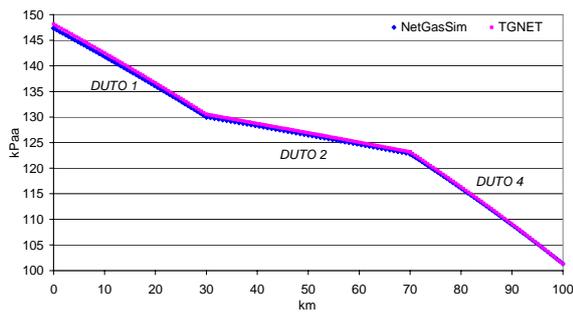


Figura 2. loop - Distribuição do campo de pressão

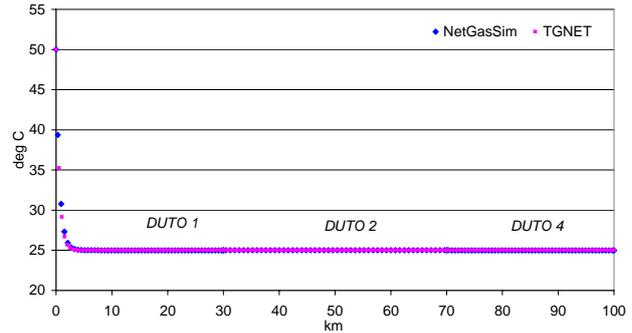


Figura 3. loop - Distribuição do campo de temperatura

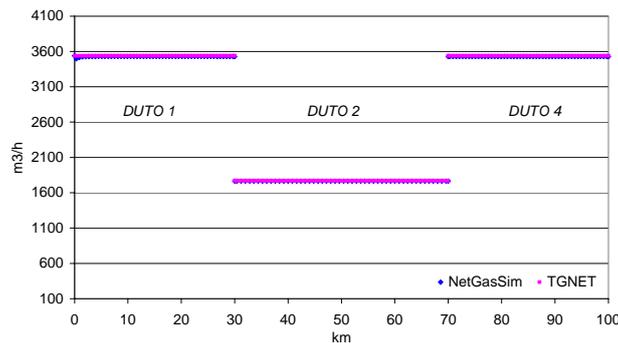


Figura 4. loop - Distribuição da vazão mássica

A Figura 5 ilustra a configuração de outro teste serviu para analisar o regime transiente durante a atuação de uma válvula de alívio, em uma linha de 10 km e 16 in de diâmetro, na qual estão distribuídas uniformemente duas válvula de bloqueio e duas de alívio. O Cv das válvulas tem um valor de 400 e no regime permanente as válvulas de bloqueio encontram-se completamente abertas.

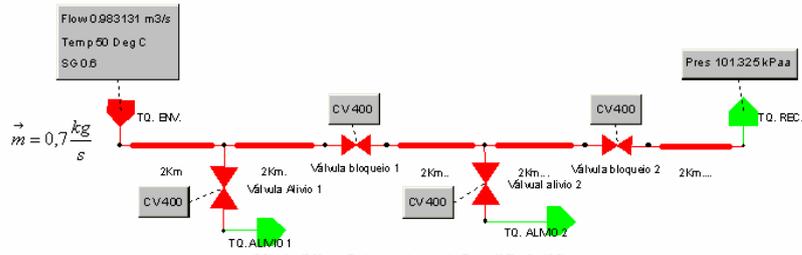


Figura 5. Configuração utilizada para a análise do regime transiente

Para a realização deste teste, na entrada da linha é imposto um fluxo de massa de 0,7 kg/s a 50 °C e na saída da linha é considerada a pressão atmosférica, os tanques de alívio são considerados abertos. Nas válvulas de alívio são estabelecidos *setpoints* de 300kPaa com um tempo de abertura total de 3s. Depois de atingir o regime permanente a válvula de bloqueio 2 inicia seu fechamento no instante de 2500s, fechando totalmente depois de 20s.

A variação da pressão ao longo do duto para o regime permanente encontra-se ilustrada na Figura 6, enquanto que na Figura 7 apresenta-se a variação da pressão com o tempo na válvula de alívio. Novamente, pode-se observar a excelente concordância entre os *softwares*. Observa-se ainda que como consequência do aumento da pressão somente a válvula de alívio 1 abriu amortecendo o transiente.

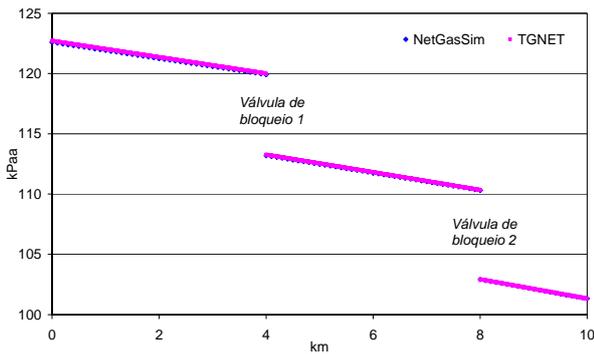


Figura 6. Regime permanente – validação da atuação da válvula de alívio

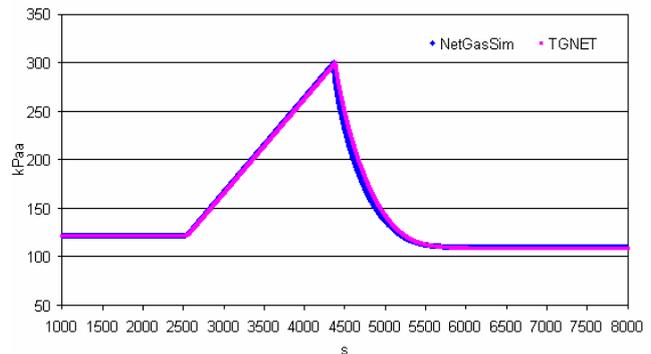


Figura 7. Análise do transiente na válvula de alívio

Com relação aos testes com casos reais utilizou-se configurações da malha nordeste do sistema de distribuição de gás brasileiro, duas das quais são mostrados a seguir.

O primeiro teste num caso real foi realizado no gasoduto chamado *GASALP*, um gasoduto de 204 km e 12 in. , gasoduto no qual seu perfil de elevação varia consideravelmente ao longo das tubulações. A configuração deste gasoduto é mostrada na Figura 8.

As condições de contorno são as seguintes: em Pilar foi estabelecido uma pressão de 6475,65 kPa e uma temperatura de 35 °C, na saída do gasoduto em Cabo é necessário um consumo de 8.622 kg/s. Este gasoduto apresenta uma série de válvulas de bloqueio de passagem plena ao longo da linha.

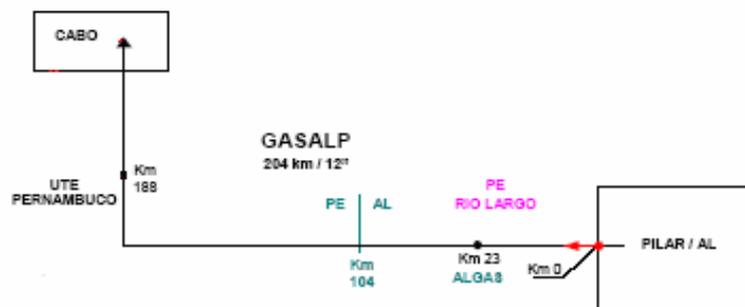


Figura 8. Configuração do *GASALP*.

Os resultados das simulações referentes às distribuições de pressão e temperatura ao longo da linha são ilustrados nas Figuras 9 e 10, respectivamente, onde mais uma vez observa-se uma boa concordância entre os resultados previstos com os dois simuladores.

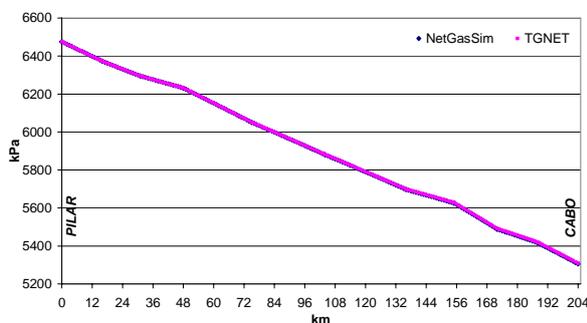


Figura 9. *GASALP* - Distribuição do campo de pressão.

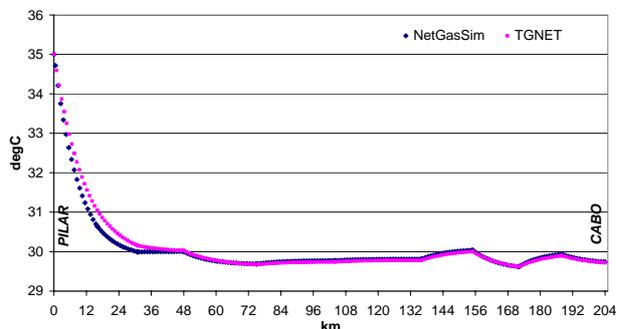


Figura 10. *GASALP* - Distribuição do campo de temperatura.

O segundo teste analisado, baseado em um caso real, foi realizado no gasoduto chamado *GASFOR*, um gasoduto de 12 in nos primeiros 213 km, posição no qual se encontra um compressor centrífugo, e 10 in nos restantes

170 km. A configuração deste gasoduto é mostrada na Figura 11, seu perfil de elevação varia consideravelmente ao longo das tubulações.

As condições de contorno impostas são as seguintes, em Guamaré é estabelecida uma pressão de 8927,31 kPa e uma temperatura de 35 oC. No km 213 da linha encontra-se a estação de compressão de Aracati onde é fixada uma pressão de descarga de 9417,64 kPa. Este gasoduto se caracteriza além da série de válvulas de bloqueio ao logo da linha, pelos pontos de retirada intermediários ao longo da linha, originando que o fluxo de massa varie de 16,98 kg/s na entrada do *GASFOR* para aproximadamente 0,01 kg/s na saída, em Pecem.

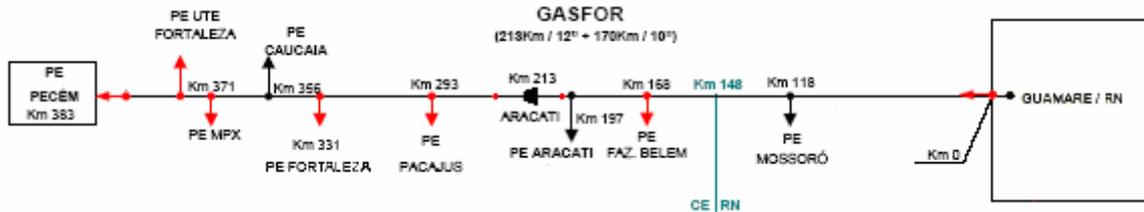


Figura 11. Configuração do *GASFOR*

Os resultados das simulações obtidas com os dois *softwares* para a distribuição axial da pressão, temperatura e vazão em massa são mostrados nas Figuras 12 a 14. A excelente concordância entre os dois simuladores confirma a validação da presente metodologia.

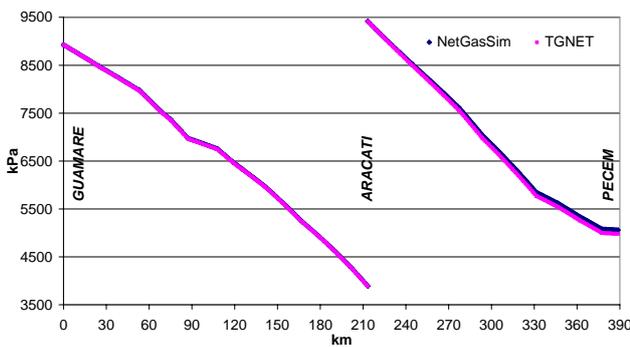


Figura 12. *GASFOR* - Distribuição do campo de pressão

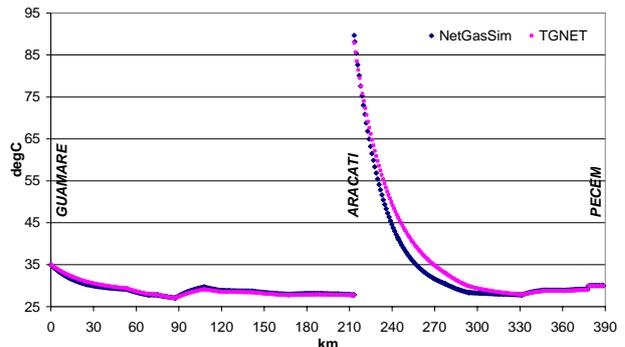


Figura 13. *GASFOR* - Distribuição do campo de temperatura.

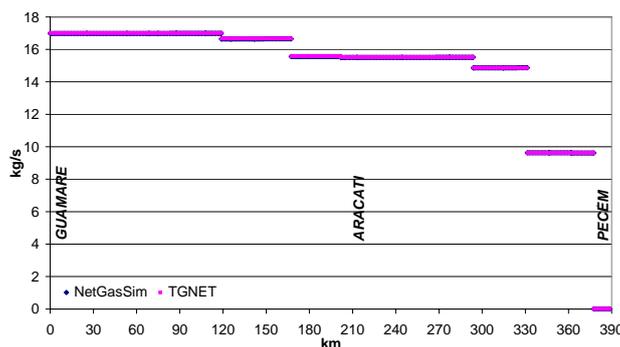


Figura 14. *GASFOR* - Distribuição da vazão mássica.

5. Comentários Finais

Segundo os resultados obtidos nas simulações apresentadas, pode-se afirmar que a modelagem, a técnica e o código computacional desenvolvido representam uma boa ferramenta para a simulação de escoamento de gás em redes de dutos, o qual apresenta funcionalidades e resultados semelhantes a conhecidos *softwares* presentes no mercado. Futuras ampliações do trabalho devem considerar a sofisticação dos componentes modelados, a implementação de

outros componentes, a análise dos resultados em regime transiente considerando outros componentes e funções, como acionamento de compressores, assim como a retirada dos mesmos das linhas, e ainda a minimização do tempo computacional.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela ANEEL para a realização do presente trabalho. O primeiro autor agradece também ao CNPq pelo apoio recebido durante a execução deste trabalho.

7. Referências Bibliográficas

- FOX, R. W. AND MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Livros Técnicos e Científicos Editora, 5a. Ed. , 2001.
- HUTCHISON, J. W. *ISA Handbook of Control Valves*, Instrument Society of America, 2da. Edition, 1976.
- KRISHNASWAMI, P.; CHAPMAN, K. S.; ABBASPOUR, M. *Compressor Station Optimization for Linepack Maintenance*, Pipeline Simulation Interest Group, 2004.
- LIM, CH. S.; TI, H. CH. Mixed specification problems in large-scale pipeline networks, *Chemical Engineering Journal*, v. 71, p. 23-35, 1998.
- NAZER, M. M.; AFZAL, M.; TARIQ, G. F.; AHMED, N. Mathematical Modeling and Computer Simulation of Transient Flow in Centrifuge Cascade Pipe Network with Optimizing Techniques, *Computers Math. Applic.* v. 36, n. 4, p. 63-76, 1998.
- NIECKELE, A. O.; BRAGA, A. M. B.; AZEVEDO, L. F. A. Transient pig motion through gas and liquid pipelines, *Journal of Energy Resources Technology*, v. 123, p. 260-269, 2001.
- PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
- PIPELINE STUDIO, User Guide, v. 2.5, 2004.
- SELEZNEV V., Numerical simulation of a gas pipeline network using computational fluid dynamics simulators”, *Journal of Zhejiang University-Science A*, v.8, n.5, p. 755-765, 2007.
- STONER PIPELINE SIMULATOR, User Guide: Modeling the Physical System, v. 9.4, 2003.
- STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. *Hydraulic Transients*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1967.
- WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. *Compressible Flow in Pipes*, McGraw Hill. 1978.
- ZHOU J.Y.; ADEWUMI, M.A. , “Simulation of transients in natural gas pipelines using hybrid TVD schemes,” *International Journal For Numerical Methods In Fluids*, v. 32, n. 4, p. 407-437, 2000.