



# Simulação da Dinâmica não Isotérmica do Escoamento de Gás Natural

Felipe Barbosa Cordeiro

## Projeto Final de Curso

Orientadores

Prof. Príamo Albuquerque Melo Jr. , D.Sc.

Prof. José Carlos Costa da Silva Pinto, D.Sc.

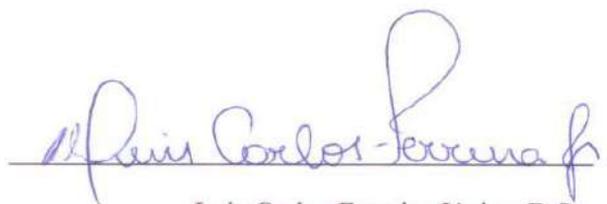
Agosto 2011

# SIMULAÇÃO DA DINÂMICA NÃO ISOTÉRMICA DO ESCOAMENTO DE GÁS NATURAL

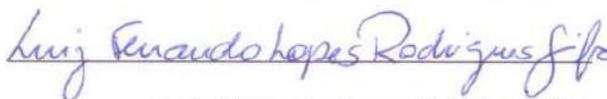
*Felipe Barbosa Cordeiro*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

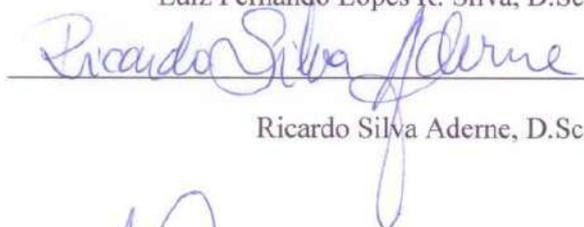
Aprovado por:



Luis Carlos Ferreira Júnior, D.Sc.



Luiz Fernando Lopes R. Silva, D.Sc.

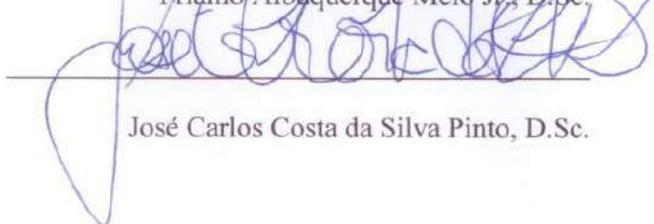


Ricardo Silva Aderne, D.Sc.

Orientado por:



Príamo Albuquerque Melo Jr., D.Sc.



José Carlos Costa da Silva Pinto, D.Sc.

Rio de Janeiro

Agosto de 2011

Cordeiro, Felipe Barbosa.

Simulação da Dinâmica não Isotérmica do Escoamento de Gás Natural/ Felipe Barbosa Cordeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.

viii, 58 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Príamo Albuquerque Melo Jr. e José Carlos Costa da Silva Pinto.

1. Modelagem. 2. Reconciliação de dados. 3. Gás Natural. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Príamo Albuquerque Melo Jr., José Carlos Costa da Silva Pinto. I. Título

Dedico este trabalho a Deus (minha fonte de tudo), meus pais (minha base), minha noiva (amor da minha vida), minha família e meus amigos por me apoiarem e torcerem sempre por mim.

“Ora, a fé é o firme fundamento das coisas que se esperam, e a prova das coisas que se não vêem.”

Hebreus 11-1

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que me concedeu na minha vida, pela Sua fidelidade e amor e por estar presente a todo o momento, por ser o Amigo de todas as horas. Toda honra e toda glória a Deus!

Aos meus pais Haroldo e Penha, pelo amor, carinho, compreensão, cumplicidade e por toda a dedicação que sempre tiveram por mim. Essa é mais uma vitória que conseguimos juntos pela graça de Deus.

A minha noiva Luciana, minha pixuxa, amor da minha vida, um presente divino. Muito obrigado pelo seu amor e carinho, sua compreensão e paciência, pelos diálogos, pelos planos que juntos concebemos. Essa vitória também é sua.

Agradecer a toda minha família que sempre torceu por mim, em especial a minha avó Marlene, que hoje está na Glória, minha avó Maria e meu avô Caetano.

Ao meu professor, amigo e orientador José Carlos, por todas as oportunidades, conhecimento, experiência e por sua compreensão.

Ao Luis por todo apoio, conhecimento, orientação e acompanhamento.

A todos os amigos que já fizeram parte e aos que ainda fazem da família LMSCP, em especial ao meu grande amigo Matheus, uma pessoa excepcional, que sempre me apoiou e passou conhecimentos.

Aos meus amigos de faculdade Alana, Alice, Tati, Bruno, Cadu, Dilsinho, Fábio, Léo Reduc, Léo Petrobrás, Filipe Cassani e aos demais que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

A todos meus amigos Santos, Guilherme, Gabriel que, apesar de ficarmos um pouco afastados durante a faculdade, sei que sempre torceram por mim.

Aos amados irmãos da igreja pelo apoio e pelas orações.

Aos professores Príamo, Márcio e Maria José pelo apoio e orientação.

Aos professores da Escola de Química, por todo conhecimento e maturidade adquiridos.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

## **SIMULAÇÃO DA DINÂMICA NÃO ISOTÉRMICA DO ESCOAMENTO DE GÁS NATURAL**

Felipe Barbosa Cordeiro

Agosto de 2011

Orientadores: Prof. Príamo Albuquerque Melo Jr., D.Sc.  
Prof. José Carlos Costa da Silva Pinto, D.Sc.

O escoamento de gás em redes de gasodutos é inerentemente dinâmico, dado os frequentes distúrbios nas condições de operação do gasoduto. Portanto, os trabalhos que assumem a validade da hipótese do estado estacionário não podem ser usados em diversas aplicações transientes. Assume-se também que as propriedades do gás (densidade, calor específico, condutividade térmica e composição) permanecem constantes durante o escoamento. Entretanto, deve-se notar que a densidade do gás exerce um efeito direto sobre a velocidade do gás e sobre os cálculos de perda de carga. Adicionalmente, sabe-se que o gás natural é uma mistura complexa de hidrocarbonetos, cuja composição está sujeita a flutuações naturais e dependem das condições de alimentação. A modificação da composição do gás certamente afeta as propriedades do fluido. Finalmente, os efeitos da transferência de calor são geralmente desprezados durante a modelagem das redes de gasodutos, que podem levar a severas limitações do modelo quando há variações nas temperaturas do ambiente e na temperatura de operação no transporte do gás natural.

Modelos dinâmicos de gasodutos têm sido recentemente propostos por diferentes autores e resolvidos numericamente. Porém, em todos estes casos, algumas limitações do modelo já citadas foram introduzidas dentro das suas propostas. Por esta razão, o principal objetivo deste trabalho é a apresentação de um modelo matemático rigoroso para representar o escoamento não isotérmico do gás natural em gasodutos e um estudo de reconciliação de dados para aplicação em tempo real. O Modelo baseia-se nos balanços de massa, energia e quantidade de movimento e na determinação rigorosa das propriedades do gás ao longo do escoamento.

# ÍNDICE

<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	3
2.1 Modelagem e Simulação do Transporte de Gás em Dutos.....	3
2.1.1. Modelos Estacionários de Escoamento.....	3
2.1.2. Modelos Dinâmicos de Escoamento.....	4
2.2 Reconciliação de Dados e Detecção de Vazamentos.....	6
2.2.1. Definição do Problema de Reconciliação de Dados.....	8
2.2.2 Classificação das Variáveis.....	9
2.2.3 Aplicações em Sistemas de Transporte de Gás.....	10
<b>3. Modelagem Matemática do Escoamento</b> .....	11
3.1 Procedimento Numérico.....	15
3.2 O Modelo do Compressor.....	16
<b>4. Resultados</b> .....	19
4.1 Análise de Convergência.....	19
4.2 Análise Numérica das Condições de Contorno.....	21
4.3 Simulações Dinâmicas com um Duto.....	23
4.4 Simulações Dinâmicas com Dois Dutos .....	28
4.5 Simulações Dinâmicas com Dois Dutos e um Compressor.....	31
4.6 Reconciliação de Dados.....	38
<b>5. Conclusão</b> .....	42
<b>6. Referências Bibliográficas</b> .....	43
<b>Apêndice A</b> - Parâmetros para o cálculo do fator de compressibilidade e dados disponíveis da composição do gás.....	47
<b>Anexo</b> – Instabilidade Numérica em Modelos de Escoamento de Gás Natural.....	49

# 1. Introdução

Entende-se por infra-estrutura de transporte de gás natural a rede de gasodutos que transporta o gás natural seco até os pontos de entrega às distribuidoras estaduais. Esta infra-estrutura é composta por uma malha que escoo gás natural de origem nacional e outra que escoo produto importado (ANP, 2011).

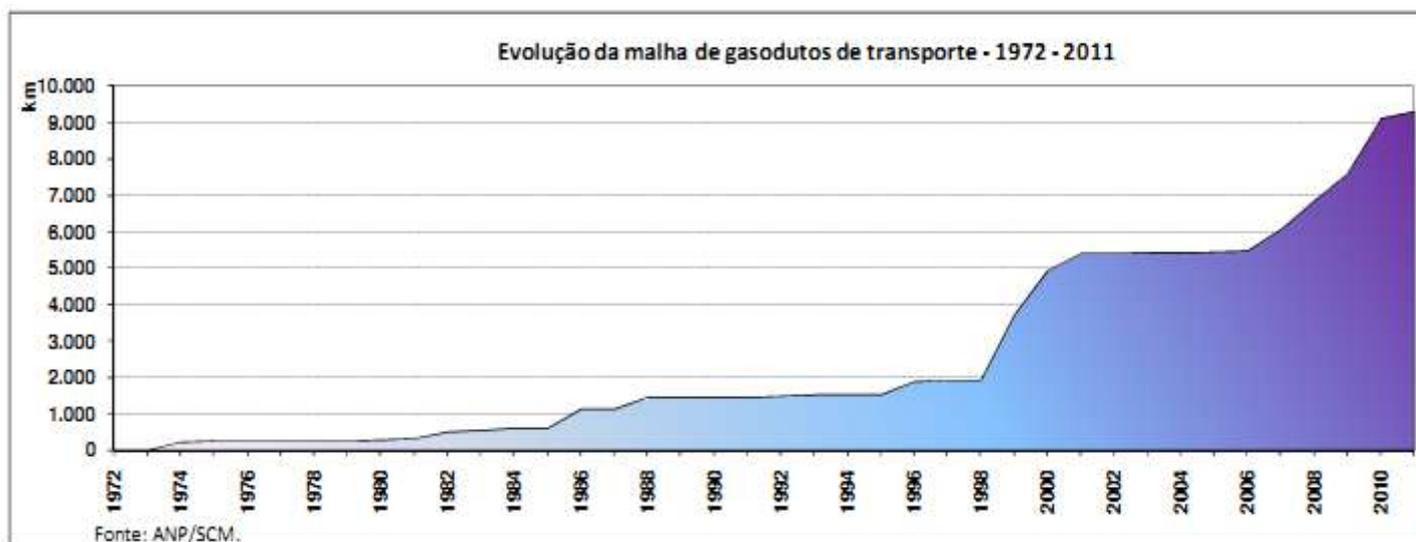
O crescimento do uso do gás natural na matriz energética brasileira exige o desenvolvimento tecnológico continuado tanto na área de produção como na área de transporte de gás natural. Vale destacar o aumento da extensão da rede e da capacidade de transporte de gás natural ocorrido no ano de 2010, com a entrada em operação de diversos projetos de expansão da infra-estrutura deste plano energético no Brasil. Desses projetos, destacam-se os empreendimentos integrantes do Projeto Malhas, PLANGÁS (Plano de Antecipação da Produção de Gás) e a expansão do Trecho Sul do GASBOL (ANP, 2011). A Figura 1 ilustra a evolução da malha de gasodutos de transporte no Brasil.

Na área de transporte de gás natural, uma questão particularmente importante é o modo de operação das malhas de tubulação onde escoo o gás natural. Essas malhas são quase sempre complexas, consistindo num conjunto de dutos, de estações de compressão, de válvulas de controle e de redução de pressão, de elementos limitadores de vazão, além de muitos instrumentos de medição. Deve-se também considerar que as condições ambientes ao longo das malhas de transporte podem impor variações significativas nas vazões e temperaturas do gás transportado.

A operação das malhas de transporte de gás natural consiste fundamentalmente em manter um determinado inventário de gás transportado que possa atender as necessidades atuais e futuras dos clientes do sistema de distribuição. Portanto, dependendo da demanda determinada pelos clientes, podem ocorrer variações significativas das vazões, pressões e temperaturas ao longo do tempo de operação. Estados transientes podem ser introduzidos nas malhas de transporte por meio de operações que incluem (i) mudanças nas vazões e pressões de entrada e saída dos compressores, (ii) partida e parada de compressores ou bombas e (iii) mudanças nas condições operacionais de referência (*setpoints*) e nas condições de controle.

Entender e modelar o comportamento dinâmico das variáveis operacionais é, portanto, muito importante para o desenvolvimento de estratégias de controle que permitam uma operação segura das malhas de distribuição e transporte do gás natural. Em especial, modelos dinâmicos do processo podem contribuir com a implementação de estratégias que permitam a determinação ótima das pressões na sucção e descarga nas estações de compressão e a minimização do consumo de gás natural (Chapman *et al.*, 2005). Com isso, o principal objetivo e aplicabilidade deste projeto é o desenvolvimento e implementação de um modelo

dinâmico e rigoroso junto com um sistema de reconciliação de dados para escoamento de gases em dutos, visando à eventual identificação de falhas de operação de gasodutos como a detecção de vazamentos nas linhas de transporte do gás e de falhas nos sensores usados para monitorar a operação de transporte, permitindo reduzir o risco de desastres ambientais e o prejuízo resultante do vazamento de gás.



**Figura 1** – Evolução da malha de gasodutos de transporte no Brasil – 1972 - 2011 (ANP, 2011).

## 2. Revisão Bibliográfica

Essa revisão bibliográfica tem como objetivo principal apresentar de forma resumida os diversos modelos empregados para modelar o escoamento de gás em dutovias, bem como um breve conhecimento teórico a respeito da técnica de reconciliação de dados e sua importante aplicação em sistemas de aquisição de dados e simulação em tempo real.

### 2.1. Modelagem e Simulação do Transporte de Gás em Dutos

Os modelos matemáticos que representam o escoamento de gases em dutos são baseados fundamentalmente nas equações de conservação de massa, de conservação de quantidade de movimento e de conservação de energia, com o suporte de modelos termodinâmicos para representar as propriedades do material transportado (equação de estado). Os modelos disponíveis podem ser simplificada e classificados como modelos estacionários (as propriedades do escoamento não mudam no tempo) e dinâmicos (quando as propriedades do escoamento mudam no tempo).

#### 2.1.1. Modelos Estacionários de Escoamento

Modelos estacionários são os mais utilizados em aplicações descritas na literatura, embora tenham aplicação limitada em um cenário em que as variáveis estão sujeitas a variações frequentes das condições operacionais. Por isso, apesar do enorme número de publicações existentes a esse respeito, não cabe nesse trabalho uma revisão detalhada sobre esse tema.

Rhoads (1983), Ouyang e Aziz (1996) e Schroeder (2001) apresentaram e resolveram as equações que governam o escoamento de gases compressíveis em dutos. Os modelos apresentados permitem a representação das perdas de carga devidas à fricção, elevação de cota e perda de energia cinética.

Stoner (1969, 1972) apresentou um método numérico para o cálculo do estado estacionário de um sistema de transporte de gás natural integrado por dutos, estações de compressão, válvulas e tanques de estocagem. O método de Newton-Raphson foi usado para a resolução do sistema de equações algébricas não-lineares resultantes da discretização do conjunto de equações diferenciais que descrevem as equações de balanço.

Costa *et al.* (1998) apresentou um modelo para descrever a operação estacionária de um sistema de transporte de gás natural constituído por estações de compressão e dutos. O modelo foi desenvolvido para descrever os perfis de pressão, vazão e temperatura ao longo dos

duto. Foram admitidas condições de escoamento isotérmico, adiabático ou politrópico, sendo as respostas comparadas. Observou-se que as respostas obtidas em cada caso podem ser bem diferentes, de maneira que as hipóteses consideradas devem ser consideradas cuidadosamente.

Fauer (2002) apresentou um modelo para descrever a operação estacionária dos vários elementos de uma rede de distribuição, representando com detalhes as propriedades do fluido transportado. O método de Newton-Raphson foi usado uma vez mais na resolução do sistema de equações algébricas não-lineares resultantes da discretização do conjunto de equações diferenciais que descrevem as equações de balanço.

### 2.1.2. Modelos Dinâmicos de Escoamento

O uso de modelos dinâmicos para a representação do escoamento de gases em dutos é relativamente raro na literatura. Apesar disso, algumas estratégias numéricas já foram propostas e utilizadas para a implementação de modelos dinâmicos. Algumas publicações que tratam desse assunto são apresentadas nos próximos parágrafos.

Mohitpour *et al.* (1996) discutiu a importância da implementação de modelos dinâmicos para a otimização da operação de sistemas de transmissão de gás natural. Esses autores mostraram que, embora os modelos estacionários sejam importantes para representação de condições de processo relativamente estáveis, as vazões de operação geralmente sofrem grandes alterações ao longo do tempo devido a mudanças nas pressões de descarga e sucção de compressores ou dos *setpoints* dos controladores. Desta forma, a simulação estacionária pode ser muito limitante para a interpretação de dados reais de operação.

Price *et al.* (1996) desenvolveram um método para determinar o coeficiente de troca térmica e o coeficiente de fricção em problemas dinâmicos de escoamento, usando um modelo baseado nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, discretizadas com o método das diferenças finitas. No entanto, os autores não consideraram a possibilidade do escoamento turbulento nem resolveram o problema de escoamento em malhas de distribuição de gás.

Osiadacz (1994) descreveu a otimização dinâmica de uma rede de transporte gás natural, mostrando que a representação dinâmica é necessária para o desenvolvimento de estratégias de operação mais seguras. No entanto, os autores ressaltaram a necessidade de desenvolver técnicas numéricas adequadas para resolução rápida das equações diferenciais que descrevem a operação, para viabilizar a utilização do modelo em tempo real. Nesse sentido, Osiadacz (1987) propôs o uso do método de Runge-Kutta-Chebichev (RKC) para resolver de forma eficiente o sistema de equações diferenciais ordinárias resultantes da discretização do modelo de escoamento, em conformidade com a aplicação do método das linhas. Osiadacz (1987) comparou ainda os desempenhos numéricos obtidos com o uso das técnicas de

elementos finitos e de diferenças finitas, para discretização de um modelo baseado nas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento. Na prática, não foram identificadas grandes diferenças de desempenho nos dois casos considerados.

Osiadacz (1996) comparou uma série de artigos que empregam diferentes métodos numéricos para solução do problema de escoamento de gás natural em redes de distribuição. O problema prático foi caracterizado como encontrar um método numérico que leve a uma solução precisa com o menor tempo computacional possível. Como observado pelo autor, nenhum dos métodos disponíveis até então podia ser considerado superior aos demais em todos os possíveis aspectos considerados, dado que o aumento de precisão era quase sempre obtido com aumento da complexidade de programação e aumento do tempo de simulação.

Osiadacz e Chaczykowski (1998, 2001) compararam os desempenhos de modelos isotérmicos e não isotérmicos de escoamento. Os autores mostraram que modelos isotérmicos podem ser utilizados para simulação quando a dinâmica de variação de temperatura é muito lenta e que a troca térmica entre o gás e o ambiente pode ser desconsiderada quando a condução de calor entre o duto e ambiente é muito lenta (tubos isolados).

Zhou e Adewumi (1995) apresentaram um método para solução das equações de balanço de massa e de quantidade de movimento, sem negligenciar o termo de inércia (simplicação realizada em muitos dos trabalhos). Esse termo de inércia torna o sistema de equações não linear, de maneira que a exatidão da solução numérica fica bastante prejudicada quando esse termo é desprezado.

Issa e Spalding (1972), Deen e Reintsema (1983), Thorley e Tiley (1987) e Price *et al.* (1996) desenvolveram uma série de procedimentos numéricos para descrever o escoamento de gases compressíveis em uma dimensão, levando em conta o fator de fricção e a transferência de calor. No entanto, os balanços foram sempre implementados e resolvidos de forma não rigorosa, com diferentes níveis de simplificação.

Rachford e Dupont (1974) utilizaram o método de Galerkin para discretizar o escoamento isotérmico em duas dimensões. Thorley e Tiley (1987) desenvolveram modelos não isotérmicos simplificados de escoamento e resolveram as equações resultantes com o método das características, de diferenças finitas e de elementos finitos, enfatizando as vantagens relativas das diferentes abordagens numéricas.

Chapman *et al.* (2005) apresentou um modelo mais rigoroso para descrever o escoamento dinâmico de gases, usando as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. As equações foram discretizadas por intermédio da técnica de diferenças finitas na dimensão do tempo e espaço. O modelo proposto levou em conta o cálculo dos fatores de fricção (escoamento turbulento) e de transferência de calor (constante) entre o tubo e o gás.

Chaczykowski (2010) apresentou um modelo dinâmico do escoamento baseado nas leis de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia e usou o método das linhas para obter a solução numérica dos sistemas de equações diferenciais. Esse trabalho usou a equação do virial truncada no terceiro coeficiente para cálculo do fator de compressibilidade. Foi admitido escoamento turbulento para cálculo do fator de fricção e foi considerada a transferência de calor constante entre o gás e o tubo.

Os modelos desenvolvidos até o presente momento e publicados na literatura fazem uso extensivo das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Diversas técnicas numéricas já foram utilizadas para resolver o conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem o sistema, tais como os métodos das características, de diferenças finitas, de elementos finitos e o método das linhas. Alguns autores, como Chapman (2003) e Chaczykowski (2010), desenvolveram modelos detalhados para o cálculo do fator de compressibilidade para escoamento turbulento, baseado na equação de Colebrook. No entanto, sabe-se que muitas propriedades dos dutos (fator de fricção, coeficiente de rugosidade) podem variar por conta de diversos fatores, como o depósito de partículas sólidas e de hidratos. Além disso, a variação das condições ambientes em torno do duto pode levar à modificação das constantes de troca térmica. Portanto, a hipótese de que esses coeficientes são essencialmente constantes ao longo da malha de escoamento pode levar a resultados pouco exatos. Nesse caso, uma dificuldade adicional é a ausência de informações a respeito da temperatura do solo, que pode influenciar de modo significativo as condições de troca de calor e conseqüentemente as temperaturas e vazões de escoamento do gás natural.

## **2.2. Reconciliação de Dados e Detecção de Vazamentos**

Apesar do que foi descrito no parágrafo anterior, poucos trabalhos abordam a estimação de valores efetivos e operacionais para o fator de fricção, o coeficiente de rugosidade e a constante de troca térmica em problemas de escoamento (Price *et al.*, 1996). O conhecimento desses valores durante a operação real de um sistema de transporte de gás natural pode ser muito importante para a exatidão das soluções numéricas obtidas com os modelos desenvolvidos. Outra dificuldade relacionada à operação de redes de distribuição de gás natural é a detecção de vazamentos e falhas dos sensores distribuídos ao longo das estações de medição e de compressão existentes na malha. Por isso, apresenta-se nessa seção uma revisão sobre alguns trabalhos relacionados à área de estimação de parâmetros, reconciliação de dados e detecção de vazamentos em redes de distribuição de gás natural.

Atualmente, os sistemas industriais possuem um suporte de várias tecnologias de informação e automação que permitem o acesso a uma enorme quantidade de dados. Essas tecnologias permitem que várias funções sejam implementadas em tempo real, tais como a

gravação e recuperação de dados, atuação automática sobre o processo, capacidade de processamento para algoritmos cada vez mais complexos, permitindo também a integração com sistemas de automação com os sistemas empresariais (Feldman, 2007). Portanto, o uso eficiente dessas tecnologias pode constituir um diferencial importante na competitividade e operação dinâmica e eficiente das plantas industriais. Por isso, hoje em dia várias aplicações fazem uso de sistemas que geram dados em tempo real para controle e automação, otimização e integração com a área comercial, utilizando para isso o suporte de modelos fenomenológicos ou empíricos (Feldman, 2007).

É importante enfatizar, no entanto, que os dados disponibilizados por essas tecnologias de informação estão sujeitos a erros de medição, à variabilidade natural do processo e a falhas dos equipamentos. Portanto, não parece realista esperar que as variáveis medidas representem de forma exata a realidade operacional ou que sigam de forma exata o modelo fenomenológico ou empírico desenvolvido para representar a operação. O fato dos dados medidos não seguirem exatamente os modelos desenvolvidos torna importante que um tratamento numérico dos dados seja feito antes que eles sejam analisados e usados para a tomada de decisão.

A técnica de reconciliação de dados é uma técnica desenvolvida e implementada com o objetivo de caracterizar quão próximos os dados de processo estão das previsões feitas com o modelo, sendo realizados ajustes das variáveis medidas para que elas atendam ao modelo desenvolvido. Isso é importante para que decisões tomadas com base nas simulações realizadas com o modelo possam ser consistentes (Feldman, 2007). A técnica de reconciliação está baseada na natureza estatística dos erros de medição e consiste fundamentalmente na minimização de uma função objetivo que pondera as diferenças entre os valores medidos no processo e aqueles previstos com o modelo, obedecendo às restrições impostas pelo modelo.

Feldman (2007) mostrou que a maior parte das publicações relacionadas ao problema de reconciliação de dados pesquisa diferentes formas de apresentação da função objetivo e diferentes metodologias numéricas para minimização do problema. No entanto, poucos artigos estudam aplicações práticas e em tempo real das técnicas de reconciliação.

O problema de medição e análise do escoamento de gás natural em malhas de distribuição consiste na avaliação de medidas de variáveis como pressão, vazão e temperatura em tempo real, obtidas em locais de difícil acesso e separadas por distâncias que podem atingir centenas de quilômetros. Nesses casos, o acompanhamento e manutenção *in loco* dos dispositivos de medida e de possíveis vazamentos ao longo de toda a malha de distribuição parece ser pouco viável. Por isso, o intervalo de tempo decorrido entre a falha e ou vazamento e a conseqüente detecção e manutenção do duto pode resultar em grandes desastres ambientais e prejuízos financeiros. Dessa forma, parece ser plenamente justificável a implementação de

um método de reconciliação de dados que permita a detecção de vazamentos e falhas de sensores ao longo da rede de distribuição de gás natural.

### 2.2.1. Definição do Problema de Reconciliação de Dados

A técnica de reconciliação de dados pode ser definida como uma forma de aproximar as medições de seus valores verdadeiros, respeitando as restrições impostas pelo modelo do processo, levando em conta a estatística dos erros de medição e a redundância dos dados medidos nos sistemas. Os erros de medida podem ser usualmente classificados como erros aleatórios ou erros grosseiros (Ramamurthi *et al.*, 1993; Narasimhan e Jordache, 2000; Liebman *et al.*, 1992). Os erros aleatórios são pequenos e inerentes às medições do sistema e à precisão finita dos equipamentos de medida, sendo quase sempre normalmente distribuídos e apresentando média nula. Os erros grosseiros não possuem necessariamente média nula e são normalmente gerados por erros na instrumentação ou no processo. Erros sistemáticos (*bias*) são erros grosseiros caracterizados por medições sistematicamente altas ou baixas (consequentemente, com média não nula) que podem ser resultado de erros de calibração ou falhas na operação.

O problema de reconciliação de dados pode ser representado na forma:

$\min_{\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{p}} F(\mathbf{x}^m, \mathbf{x})$	(1)
---	-----

sujeito a:

$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0$	(2)
$\mathbf{x}^L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^U$	(3)
$\mathbf{u}^L \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^U$	(4)
$\mathbf{p}^L \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}^U$	(5)

onde  $F$  é uma função objetivo que deve ser minimizada,  $\mathbf{x}^m$  é o vetor das variáveis medidas no processo e  $\mathbf{x}$  é o vetor dos valores reconciliados destas variáveis medidas. As variáveis não medidas (vetor  $\mathbf{u}$ ) e os parâmetros (vetor  $\mathbf{p}$ ) podem ser estimados em conjunto com  $\mathbf{x}$  ou não, minimizando-se a função  $F$  à medida que  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{p}$  são manipulados. As restrições impostas pelo modelo podem ser colocadas na forma de equações ( $h$ ) ou inequações ( $g$ ).

A função objetivo é usualmente representada na forma da Equação (6), resultante da hipótese de normalidade das flutuações dos erros de medição, que leva em conta a matriz de covariâncias dos erros das medidas ( $\mathbf{V}$ ):

$F = (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)$	(6)
---	-----

A Equação (6) resulta da maximização da Equação (7), que admite que os erros de medida seguem uma distribuição normal com média zero em torno dos resultados previstos pelo modelo:

$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}  \mathbf{V} ^{n/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)\right)$	(7)
--	-----

O princípio da máxima verossimilhança admite que os eventos que apresentam máxima probabilidade de ocorrência representam otimamente o comportamento de um sistema. Para maximizar a probabilidade da equação normal multivariável descrita na Equação (7):

$\max \frac{1}{(2\pi)^{n/2}  \mathbf{V} ^{n/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)\right)$	(8)
--	-----

que equivale a:

$\min \left( \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m)^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^m) \right)$	(9)
---	-----

As Equações (1), (6) e (9) são análogas e constituem a base estatística do procedimento de reconciliação de dados.

### 2.2.2. Classificação das Variáveis

Um sistema possui um conjunto de variáveis medidas  $\mathbf{x}$  e possivelmente outro conjunto de variáveis que não são medidas  $\mathbf{u}$ . Estas variáveis não medidas podem ser estimadas com auxílio do modelo, dependendo da estrutura e da quantidade e natureza das variáveis que são medidas no sistema. Também pode ocorrer o caso de variáveis serem medidas por diferentes instrumentos ou poderem ser ainda calculadas com restrições impostas pelo modelo. Nesse caso, diz-se que a variável é redundante. Apenas as variáveis redundantes podem ser reconciliadas; ou seja, comparadas a outras medidas disponibilizadas com o modelo.

De forma geral, é possível propor a seguinte classificação das variáveis em um problema de reconciliação de dados:

- a) **Variável Reconciliável (ou Redundante):** é a variável medida, que pode ser calculada com o modelo (observável) mesmo que sua medição seja removida;
- b) **Variável Medida Não-Reconciliável:** é a variável medida que não pode ser calculada com o modelo se sua medição for removida;
- c) **Variável Observável:** é a variável não medida que pode ser estimada com o auxílio das medições e restrições de processo;
- d) **Variável Não-Observável:** é a variável que não é medida e não pode ser estimada com o auxílio das demais medições e com o modelo do processo.

### 2.2.3. Aplicações em Sistemas de Transporte de Gás

Poucas metodologias de reconciliação de dados foram descritas para detecção de vazamentos e falhas em sensores em problemas reais de transporte de gás natural. O problema de reconciliação pode ser bastante útil para executar essa tarefa, pois uma falha pode ser detectada sempre que as restrições de balanço de massa, energia ou quantidade de movimento não são satisfeitas pelas medidas disponibilizadas pelo sistema de monitoramento da malha.

Narasimham (2006) desenvolveu um modelo para simulação dinâmica do transporte de gás natural. Esse modelo está baseado na aplicação de funções de transferência, oriundas de sistemas linearizados de equações, o que limita a abrangência da modelagem proposta. O simulador foi incorporado a um método de reconciliação de dados para minimização da função objetivo descrita pela Equação (6). Bagajewicz (2003) implementou um método de reconciliação de dados similar, baseado em um modelo estacionário constituído por balanços de massa e de energia mecânica. Um sistema semelhante foi implementado para detecção de vazamentos por Coelho *et al.* (1999, 2002).

Logo, a reconciliação de dados de um sistema de transporte de gás usando um modelo dinâmico rigoroso do processo será executada nos próximos capítulos e, por fim, serão apresentados também possíveis trabalhos futuros.

### 3. Modelagem Matemática do Escoamento

A modelagem desenvolvida nesse trabalho está baseada nas equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia. Issa e Spalding (1972), Deen e Reintsema (1983), Thorley e Tiley (1987) e Price *et al.* (1996) desenvolveram um conjunto de equações básicas baseadas nas seguintes simplificações:

- i) O fluxo de gás ocorre na direção do tubo, desprezando-se as variações de vazão na direção ortogonal ao tubo por conta da grande razão existente entre o comprimento e o diâmetro do tubo;
- ii) O fluxo do gás segue o modelo empistonado por conta da grande razão existente entre o comprimento e o diâmetro do tubo;
- iii) O regime de escoamento é transiente e não isotérmico;
- iv) O gás é compressível;
- v) Existe troca térmica entre o gás que escoar e o ambiente que envolve o tubo (como o tubo está enterrado, a temperatura ambiente é a temperatura do solo).

Essas simplificações permitem que se escrevam as seguintes formas das equações de conservação:

Conservação de massa:

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0$	(10)
--	------

Conservação de quantidade de movimento:

$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{w}{A} - \rho g \sin \theta$	(11)
---	------

onde,

$w = \frac{f \rho v  v }{8} \pi D$	(11a)
------------------------------------	-------

Conservação de energia:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} - v \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Omega + wv}{A} \quad (12)$$

Substituindo as Equações (13) e (14) nas Equações (10 – 12), obtêm-se as seguintes equações:

*Massa:*

$$\frac{\partial P}{\partial t} + v \frac{\partial P}{\partial x} + \rho V_w^2 \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V_w^2}{C_p T} \left[ 1 + \frac{T}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right] \frac{\Omega + wv}{A} \quad (15)$$

*Quantidade de movimento:*

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{w}{A} - \rho g \sin \theta \quad (16)$$

*Energia:*

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{V_w^2}{C_p} \left[ 1 + \frac{T}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right] \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{V_w^2}{C_p P} \left[ 1 - \frac{P}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right] \frac{\Omega + wv}{A} \quad (17)$$

onde o parâmetro  $V_w$  tem a forma:

$$V_w = \sqrt{\frac{ZRT}{\left\{ 1 - \frac{P}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T - \frac{P}{\rho C_p T} \left[ 1 + \frac{T}{Z} \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right]^2 \right\}}} \quad (18)$$

O fator de compressibilidade (Z) pode ser calculado como (Elsharkawy e Elkamel, 2000):

$$Z = 1 + (A_1 + A_2 / Tr + A_3 / Tr^3 + A_4 / Tr^4 + A_5 / Tr^5) \rho_r + (A_6 + A_7 / Tr + A_8 / Tr^2) \rho_r^2 - A_9 (A_7 / Tr + A_8 / Tr^2) \rho_r^5 + A_{10} (1 + A_{11} \rho_r^2) (\rho_r^2 / Tr^3) \exp(-A_{11} \rho_r^2) \quad (19)$$

sendo as constantes de  $A_1$  até  $A_{11}$  mostradas na Tabela 1:

Tabela 1 – Constantes da Equação 19.

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$
0,3265	-1,0700	-0,5339	0,01569	-0,05165	0,5475	-0,7361	0,1844	0,1056	0,6134	0,7210

onde  $P_r$  é a pressão reduzida e  $T_r$  é a temperatura reduzida e:

$\rho_r = 0.27 \frac{P_r}{Z T_r}$	(20)
-----------------------------------	------

As Equações (19-20) foram resolvidas com o procedimento padrão de Newton-Raphson. A pressão reduzida e a temperatura reduzida podem ser calculadas com os dados disponíveis de composição do gás (Elsharkawy e Elkamel, 2000, Piper, 1993) como descrito no apêndice A:

$J = \alpha_0 + \sum \alpha_i y_i (T_c / P_c)_i + \alpha_4 \sum y_j (T_c / P_c)_j + \alpha_5 \left[ \sum y_j (T_c / P_c)_j \right]^2 + \alpha_6 y_{c7+} M_{c7+} + \alpha_7 (y_{c7+} M_{c7+})^2$	(21)
---	------

$K = \beta_0 + \sum \beta_i y_i (T_c / P_c^{0.5})_i + \beta_4 \sum y_j (T_c / P_c^{0.5})_j + \beta_5 \left[ \sum y_j (T_c / P_c^{0.5})_j \right]^2 + \alpha_6 y_{c7+} M_{c7+} + \alpha_7 (y_{c7+} M_{c7+})^2$	(22)
---	------

$T_{pc} = \frac{K^2}{J}$	(23)
--------------------------	------

$P_{pc} = \frac{T_{pc}}{J}$	(24)
-----------------------------	------

$P_r = \frac{P}{P_{pc}}$	(25)
--------------------------	------

$T_r = \frac{T}{T_{pc}}$	(26)
--------------------------	------

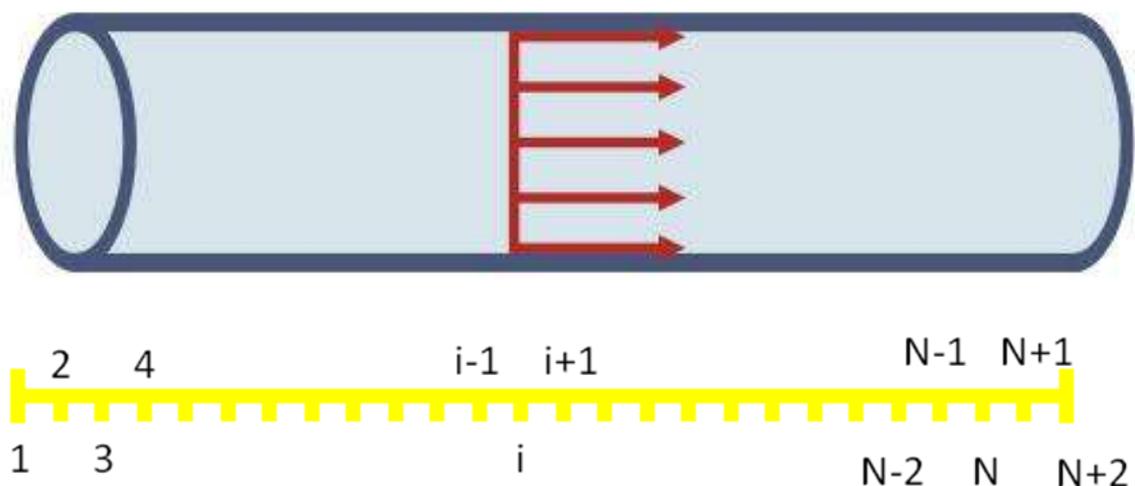
onde  $y_i \in \{y_{H2S}, y_{CO2}, y_{N2}\}$ ,  $y_j \in \{y_{C1}, y_{C2}, \dots, y_{C6}\}$  e  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes (ver Tabela 2).

**Tabela 2** – Coeficientes para as Equações (21-22).

<b>i</b>	<b><math>\alpha_i</math></b>	<b><math>\beta_i</math></b>
0	5,2073E-02	-3,9741E-01
1	1,0160E00	1,0503E+00
2	8,6961E-01	9,6592E-02
3	7,2646E-01	7,8569E-01
4	8,5101E-01	9,8211E-01
5	0,0	0,0
6	2,0818E-02	4,5536E-01
7	-1,506E-04	-3,7684E-03

### 3.1. Procedimento Numérico

A resolução numérica do conjunto de equações diferenciais parciais no domínio do tempo e espaço (Equações 15-17) requer a discretização apropriada dos domínios espaciais e temporais. Portanto, nesse estudo foi utilizada a técnica das diferenças finitas no domínio espacial (ver Figura 2) para reduzir o problema a um conjunto de equações diferenciais ordinárias acopladas apenas no domínio do tempo (Método das Linhas) conforme Pinto & Lage (2001). Esse último conjunto de equações foi resolvido com a ajuda de um pacote computacional de integração para solução de sistemas de equações diferenciais ordinárias (DASSL, Linguagem de Programação Fortran 90).



**Figura 2** – Esquema ilustrativo do método das diferenças finitas.

Segundo o procedimento proposto, as derivadas espaciais das Equações (15-17) devem ser substituídas pelas seguintes expressões algébricas,

$\frac{\partial P_i}{\partial x} = \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x}$	(27)
$\frac{\partial v_i}{\partial x} = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2\Delta x}$	(28)
$\frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta x}$	(29)

onde o índice  $i$  representa o ponto considerado na malha de discretização. Para resolver as equações de balanço, admite-se que as variáveis pressão, temperatura e vazão são conhecidas numa das extremidades do duto. A imposição de restrições nas extremidades do duto constitui uma realidade prática operacional, seja porque se deseja atender a uma demanda do cliente (condição a jusante), seja porque é necessário atender às condições impostas pela fonte do gás (condição a montante).

As equações (27 – 29) foram inseridas nas Equações (15), (16), (17) e (13), para a resolução numérica do modelo.

### 3.2. O Modelo do Compressor

O modelo do compressor pode ser desenvolvido com auxílio de basicamente dois métodos (Brown, 2005; Giampaolo, 2010). O primeiro método está baseado na definição das condições de entrada e saída do compressor (pressão na descarga, temperatura na sucção e pressão na sucção). Dessa forma, determina-se a condição de operação do compressor de acordo com a curva característica de operação do equipamento. O segundo método está baseado na determinação da razão de compressão, para que o equipamento funcione com a potência máxima.

Os parâmetros chaves para determinar o modo de operação de um compressor são o *head* isentrópico, a eficiência isentrópica, a velocidade de rotação e a potência, definidos na forma:

$Head = \frac{T_s R Z_s}{\sigma} \left( \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^\sigma - 1 \right)$	(30)
--	------

onde,  $T_s$  é a temperatura de sucção,  $Z_s$  é o fator de compressibilidade nas condições da sucção,  $P_d$  é a pressão de descarga e  $P_s$  é a pressão na sucção. O termo isentrópico é definido na forma:

$\sigma = \frac{\left(\frac{C_p}{C_v}\right) - 1}{\left(\frac{C_p}{C_v}\right)}$	(31)
--	------

A potência é dada na forma:

$Potencia = \frac{Head \ m_{ac}}{\eta_{ise} \eta_{mec}}$	(32)
--	------

onde  $m_{ac}$  é a vazão mássica nas condições padrões de temperatura (25°C) e pressão (1 atm),  $\eta_{ise}$  é a eficiência isentrópica e  $\eta_{mec}$  é a eficiência mecânica.

As características de um compressor podem ser adicionadas a um modelo de simulação de escoamento de gases em dutos, utilizando os mapas do *Head versus* vazão volumétrica ( $Q_{ac}$ ) que caracterizam o equipamento. As curvas características podem ser digitadas, armazenadas e transformadas em expressões empíricas na forma:

$Head = b_1 + b_2 \left(\frac{Q_{ac}}{N}\right) + b_3 \left(\frac{Q_{ac}}{N}\right)^2$	(33)
--	------

$\eta_{ise} = b_4 + b_5 \left(\frac{Q_{ac}}{N}\right) + b_6 \left(\frac{Q_{ac}}{N}\right)^2$	(34)
--	------

Os coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$ ,  $b_6$  caracterizam um mapa de um compressor centrifugo. Esses coeficientes são usados para determinar a vazão volumétrica e a eficiência isentrópica na sucção em função do *head* e da velocidade de rotação (N).

Admite-se ainda que o compressor consuma parte do gás transportado para seguir em funcionamento, na forma:

$m_f = \frac{Potencia}{LHV \eta_{dr}}$	(35)
--	------

onde LHV (*lower heating value*) e  $\eta_{dr}$  (eficiência do impelidor do compressor) caracterizam o equipamento. Finalmente, a temperatura de descarga do compressor pode ser calculada na forma:

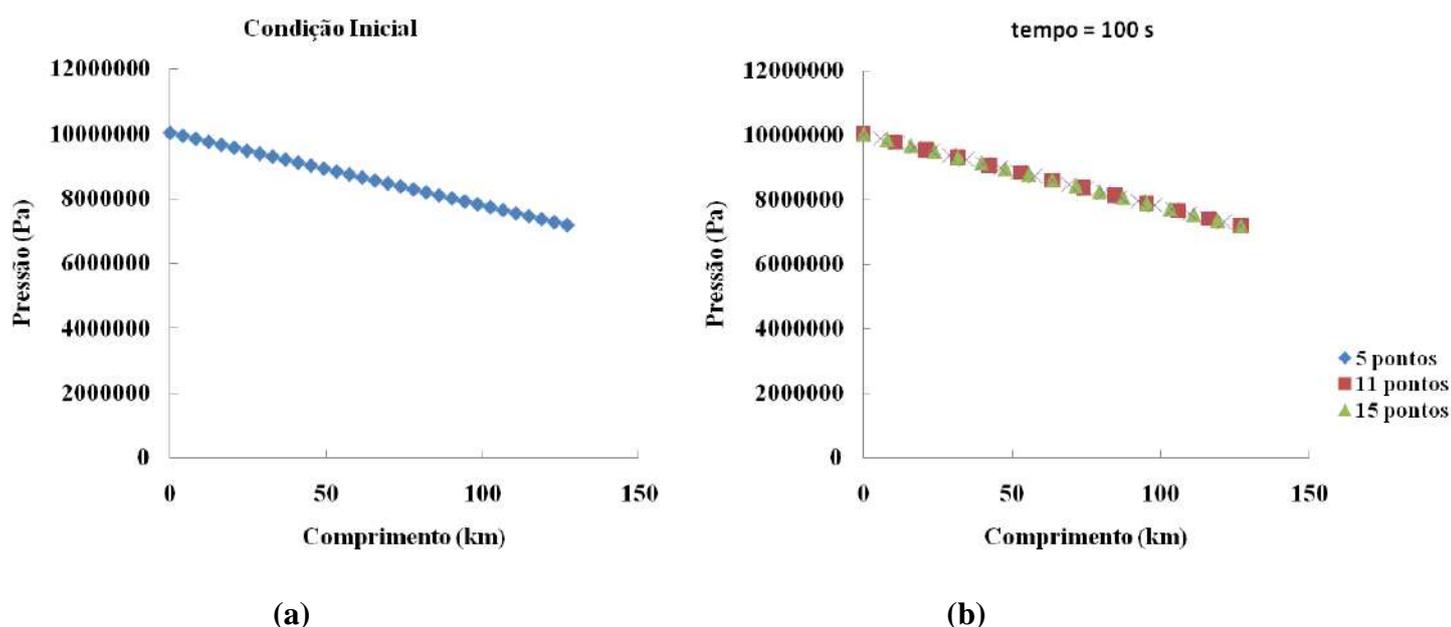
$T_d = T_s + \frac{T_s}{\eta_{ise}/100} \left[ \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^\sigma - 1 \right]$	(36)
---	------

As Equações (30-36) constituem o modelo de compressão usado nesse trabalho para fins de simulação.

## 4. Resultados

### 4.1. Análise de Convergência

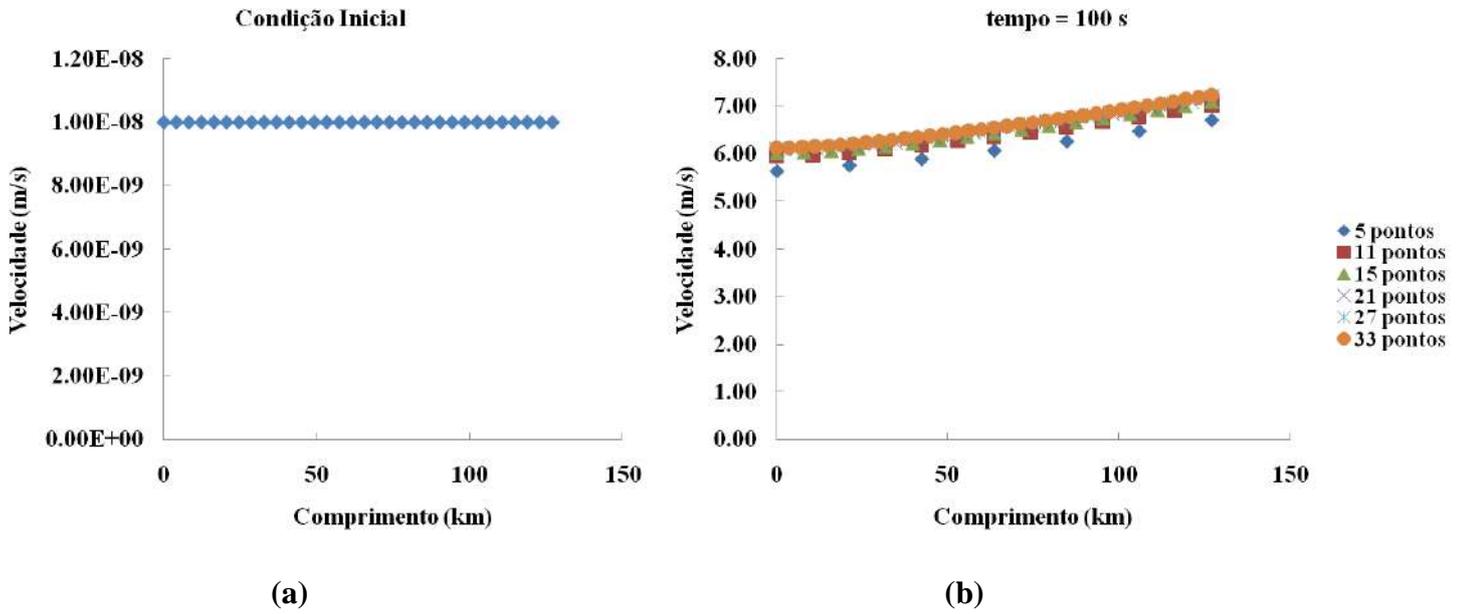
Para uma análise da quantidade de pontos de discretização necessária ao modelo para que o mesmo resulte em simulações confiáveis do presente trabalho, foram feitos testes de convergência de variáveis calculadas pelo modelo como pressão, velocidade e temperatura, ilustradas nas figuras a seguir:



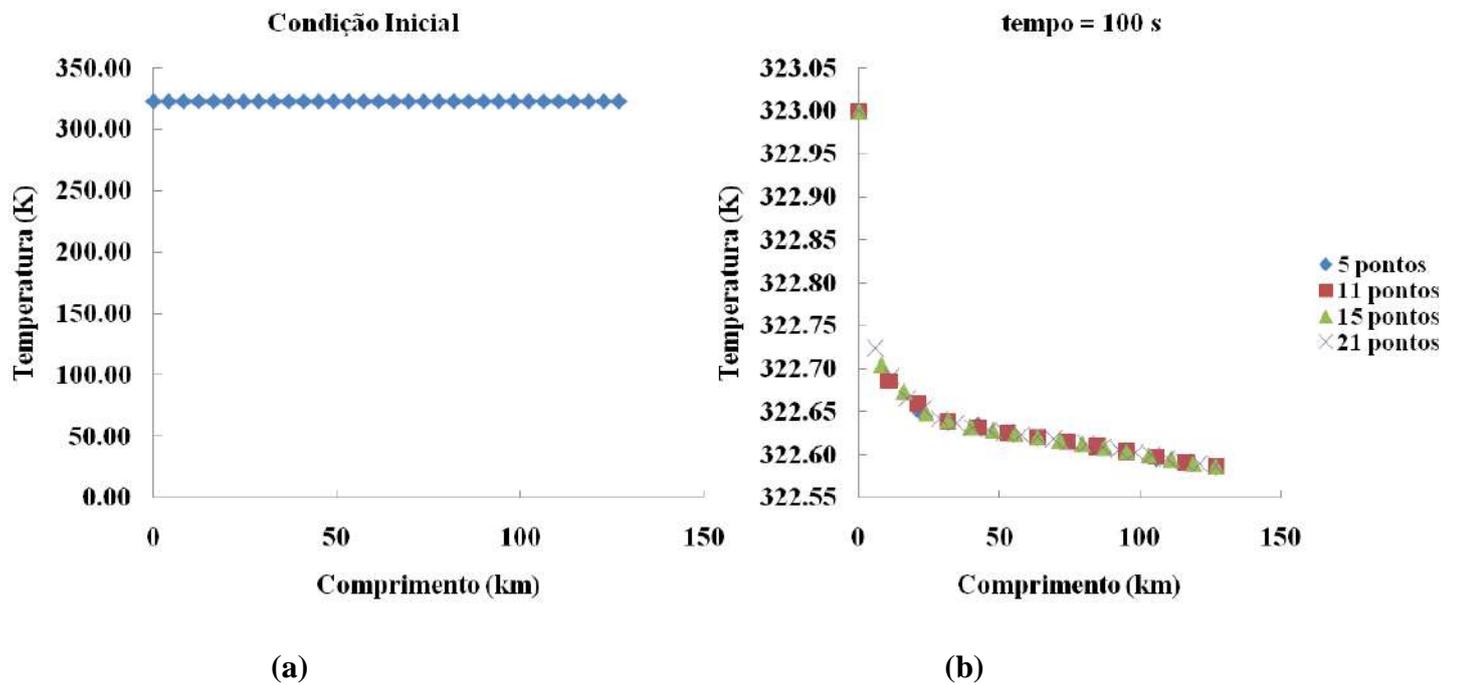
**Figura 3** – (a) Perfil inicial de pressão; (b) Perfil de pressão ao longo do comprimento do duto para diferentes pontos de discretização e tempo de simulação de 100 s.

Pelas Figuras 3 e 5, pode-se inferir que 5 pontos de discretização são suficientes para convergência tanto da pressão quanto da temperatura. Já pela Figura 4, é possível afirmar que a convergência do perfil de velocidades é mais difícil e ocorre com 21 pontos de discretização, o que demonstra uma variação maior do mesmo. Logo, as simulações posteriores foram feitas com um número de pontos de discretização superiores a 21 pontos.

Além disso, é válido ressaltar que essas simulações são baseadas nos dados do primeiro trecho do gasoduto Brasil-Bolívia (Ferreira *et al.*, 2009), cujo comprimento é 127 km, diâmetro de 0,8 m e considerando um perfil de temperatura do solo constante e igual a 20 °C. A pressão e a temperatura foram fixadas como condições de contorno no início do duto.



**Figura 4 – (a)** Perfil inicial de velocidade; **(b)** Perfil de velocidade ao longo do comprimento do duto para diferentes pontos de discretização e tempo de simulação de 100 s.



**Figura 5 – (a)** Perfil inicial de temperatura; **(b)** Perfil de temperatura ao longo do comprimento do duto para diferentes pontos de discretização e tempo de simulação de 100 s.

Como uma maior variação do método numérico ocorreu logo no início das simulações, foi escolhido o tempo de 100 s, visto que tempos mais longos de simulação apresentaram comportamentos semelhantes ao início.

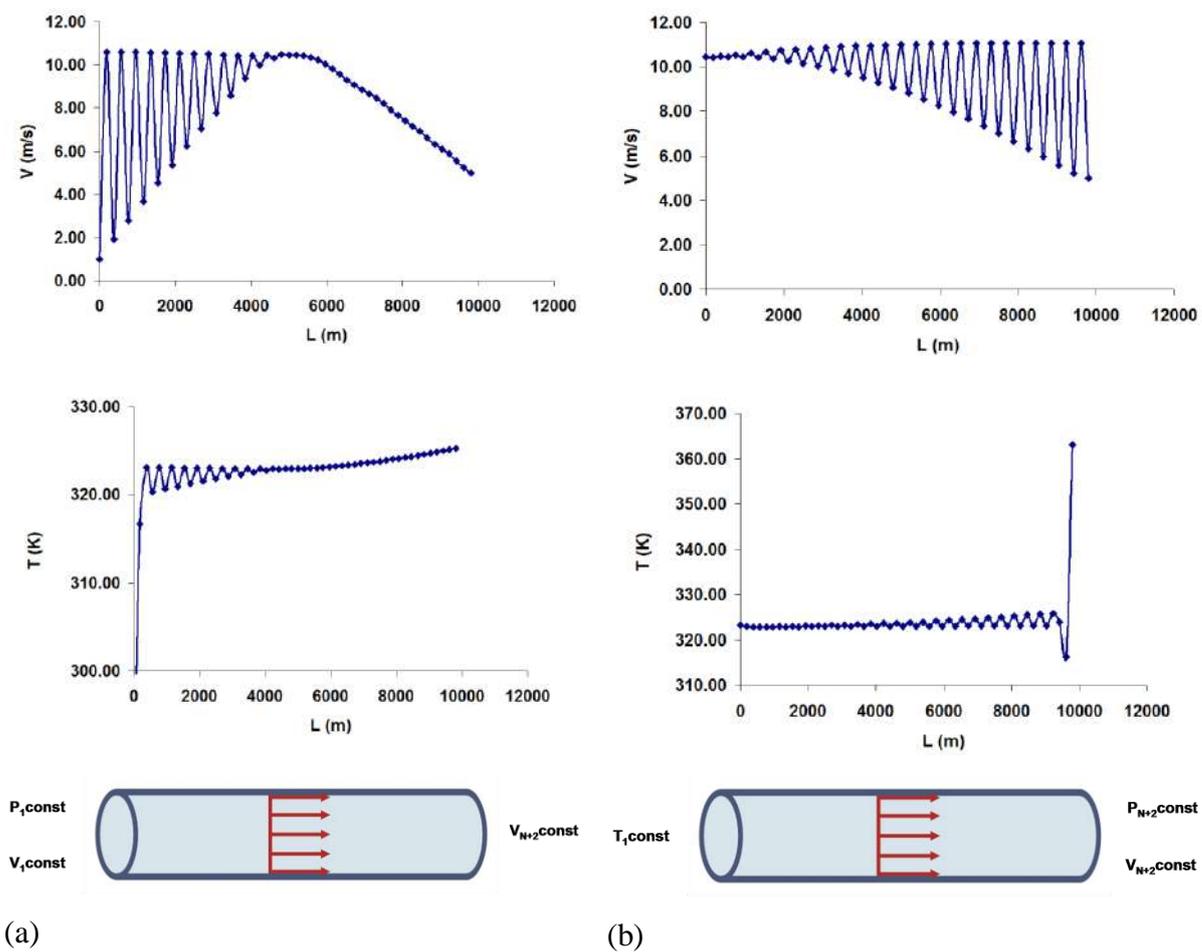
Em anexo, encontra-se um trabalho sobre instabilidade numérica desenvolvida no Laboratório de Modelagem, Simulação e Controle de Processos/ PEQ/ COPPE/ UFRJ.

#### 4.2. Análise Numérica das Condições de Contorno

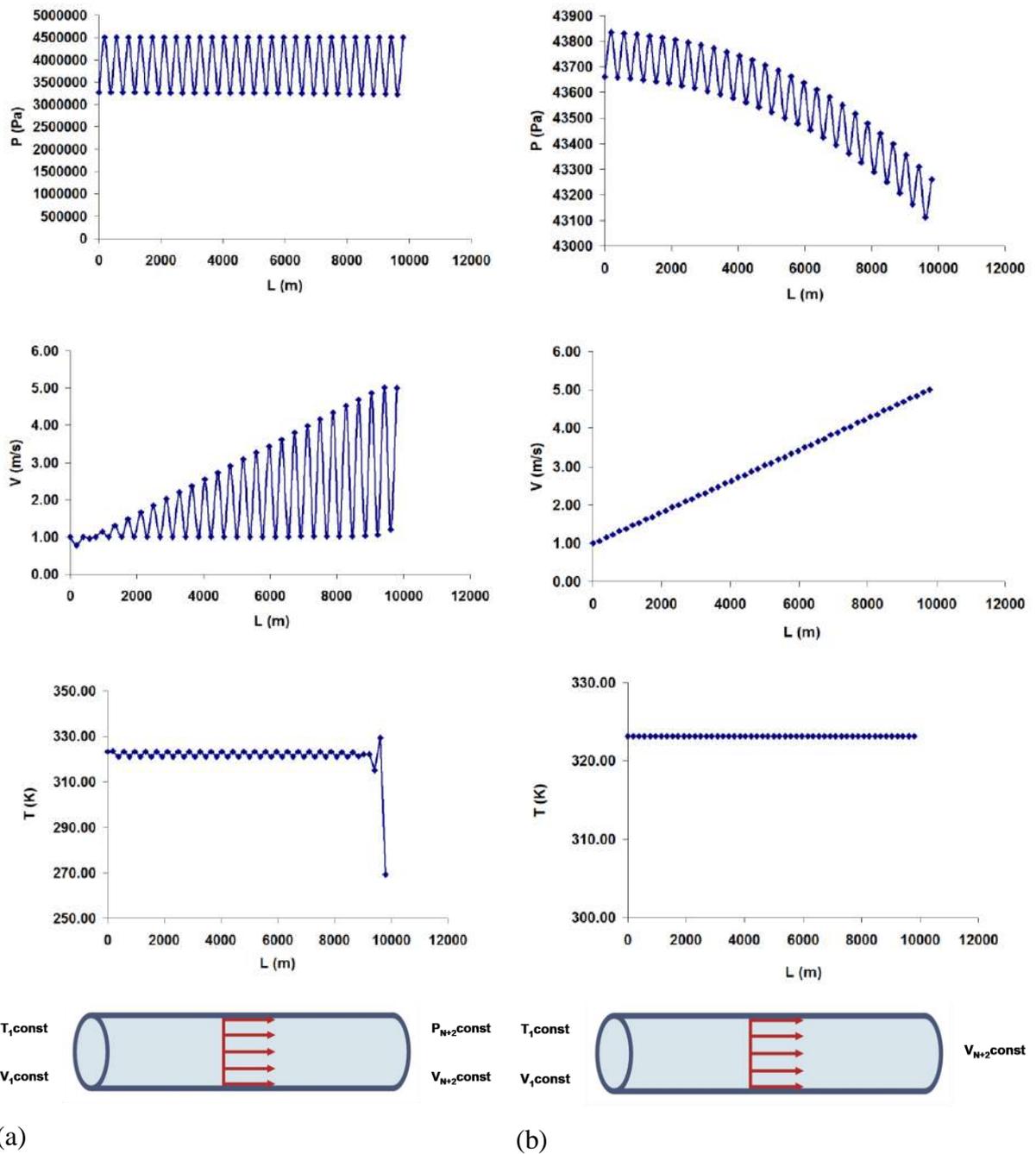
É possível mostrar que o melhor conjunto de condições de contorno para simulação do escoamento do gás natural em um duto é aquele que define as condições de pressão e vazão em pontos extremos do intervalo de interesse do problema, na forma:

$x = 0 \Rightarrow P(0, t) = p_{1,o} \Rightarrow \text{constante}$ $x = 0 \Rightarrow T(0, t) = T_{1,o} \Rightarrow \text{constante}$ $x = L \Rightarrow v(L, t) = v_{N+2,o} \Rightarrow \text{constante}$	(29)
--	------

No entanto, várias tentativas foram feitas para estabilizar as condições de contorno, através da definição de pressões e vazões numa mesma extremidade do escoamento, considerando um duto de 9800 m. Do ponto de vista numérico, a definição das variáveis num mesmo ponto do escoamento pode trazer muitas vantagens computacionais, incluindo a simplificação do código numérico. As Figuras 6 e 7 mostram, contudo, como o uso de condições de contorno distintas gera soluções oscilatórias e instáveis, incompatíveis com o comportamento real do processo. Por isso, admite-se em todos os exemplos que as condições de contorno podem ser definidas como apresentado na Equação (29).



**Figura 6** – Soluções numéricas do escoamento de gás natural em um duto com diferentes condições de contorno. (Parte 1)

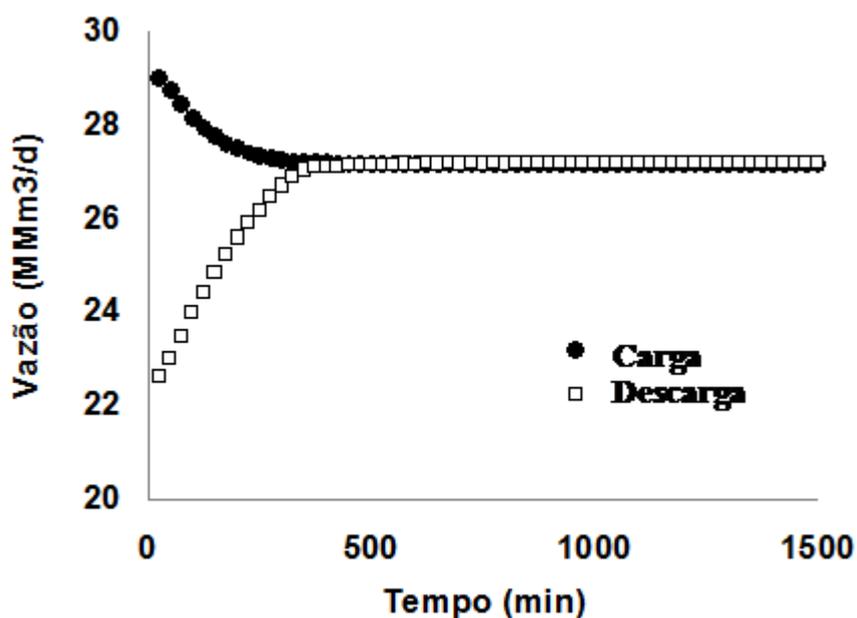


**Figura 7** – Soluções numéricas do escoamento de gás natural em um duto com diferentes condições de contorno. (Parte 2)

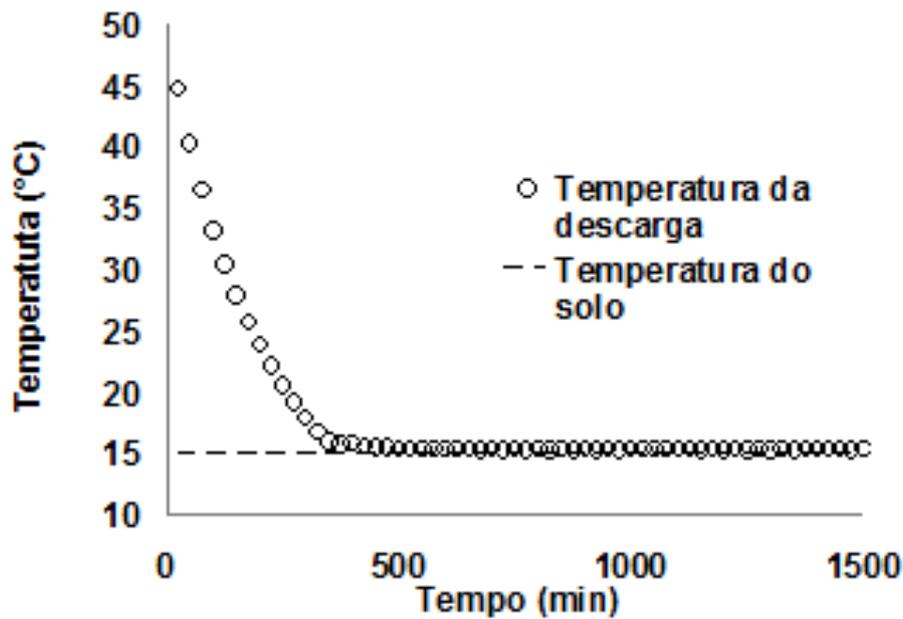
### 4.3. Simulações Dinâmicas com um Duto

A Figura 8 mostra a dinâmica do escoamento do gás natural em um duto de 120 km, admitindo-se que no início o duto está completamente preenchido com o gás nas mesmas condições da alimentação e que existe uma variação linear de velocidades entre o ponto de sucção e o ponto de descarga. Nesse caso, observa-se o desenvolvimento de uma trajetória

dinâmica até que se atinja a operação estacionária, quando as vazões de entrada e saída atingem o mesmo valor, respeitando o balanço de massa. O tempo característico de relaxação (no caso, igual a cerca de 500 minutos) depende fundamentalmente das pressões disponíveis na sucção e da geometria do duto (comprimento e diâmetro). A Figura 9 mostra o perfil dinâmico de temperaturas do gás natural na saída do duto, indicando que a temperatura de saída também se aproxima de um valor estacionário e igual ao da temperatura do solo, como poderia ser esperado. O tempo de relaxação estacionária da temperatura é similar ao do perfil dinâmico de vazões, já que o tempo característico da operação está relacionado com o tempo necessário para o gás alimentado numa extremidade do tubo percorrer todo o equipamento e atingir a saída. As Figuras 8 e 9 mostram com clareza que o estado estacionário é atingido da forma esperada, quando as condições de contorno e os parâmetros operacionais são mantidos constantes durante a simulação.



**Figura 8** – Dinâmica de relaxação estacionária das vazões na carga e descarga de um duto de transporte de gás.



**Figura 9** – Dinâmica de relaxação estacionária da temperatura de descarga de um duto de transporte de gás.

As malhas de distribuição de gás natural são distribuídas por distâncias longas, usualmente da ordem de centenas de quilômetros, como no caso do gasoduto Brasil-Bolívia. Ao longo desses trechos, as temperaturas podem variar significativamente, devido a mudanças de estações ou mudanças climáticas características das diferentes regiões percorridas. A Figura 10 mostra um perfil de temperatura imposto ao longo do duto de 120 km, criado para analisar as respostas do escoamento do gás natural a variações da temperatura ambiente, como mostrado na Figura 11. Percebe-se que a resposta dinâmica a mudanças do perfil de temperaturas pode ser lenta. Observa-se ainda que o perfil de temperaturas atingido ao longo do tubo não é necessariamente igual ao perfil de temperaturas do solo, quando a temperatura de alimentação é distinta da temperatura ambiente. De qualquer forma, não parece haver qualquer dúvida de que o perfil de temperatura do gás estabelecido ao longo do duto depende do perfil de temperatura ambiente.

A Figura 12 mostra que, nas mesmas condições de escoamento, o fator de compressibilidade sofre mudanças significativas ao longo do duto. Isso mostra que a temperatura ambiente pode promover mudanças significativas na densidade do gás natural e, conseqüentemente, nas velocidades e vazões de operação. A Figura 12 mostra ainda que a hipótese de comportamento ideal do gás pode resultar em incertezas apreciáveis de cálculo, uma vez que variações significativas do fator de compressibilidade podem ocorrer ao longo do tempo e da direção principal do escoamento. Portanto, a inserção do cálculo rigoroso da densidade do gás é muito importante para garantir a qualidade da solução numérica obtida.

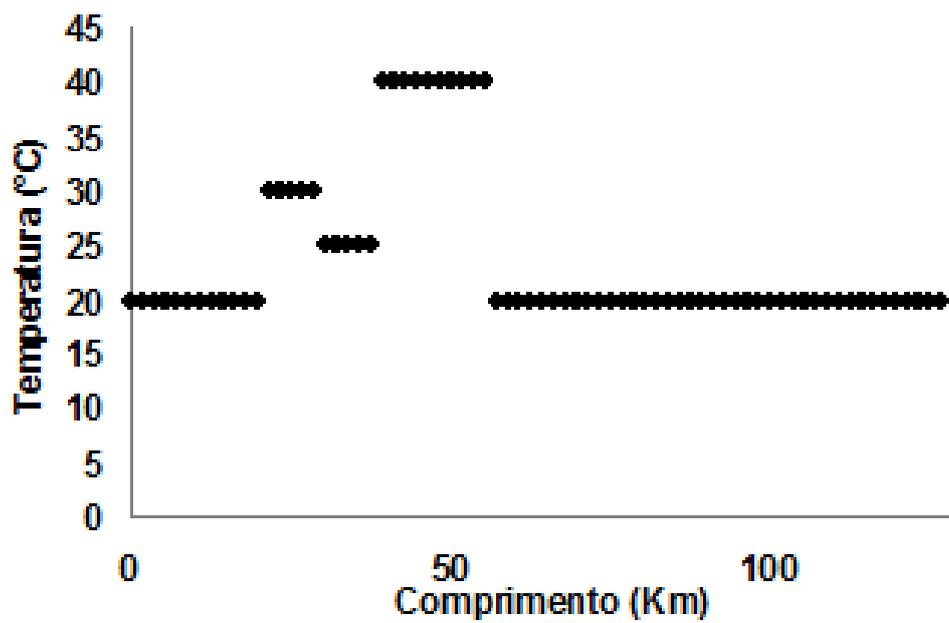


Figura 10 – Perfil de temperatura ambiente imposto a um duto de transporte de gás.

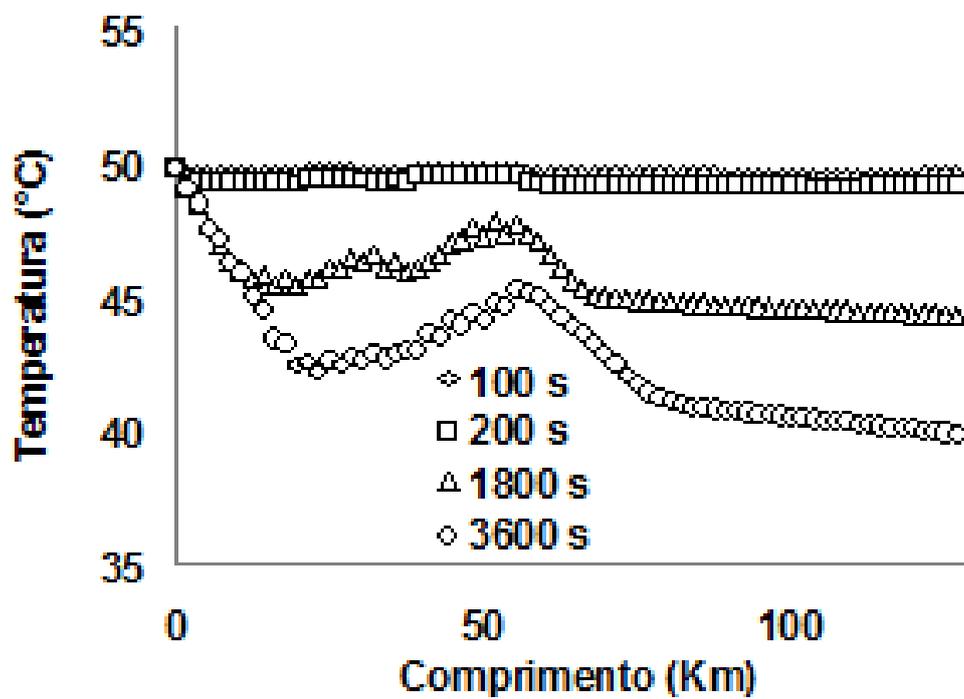
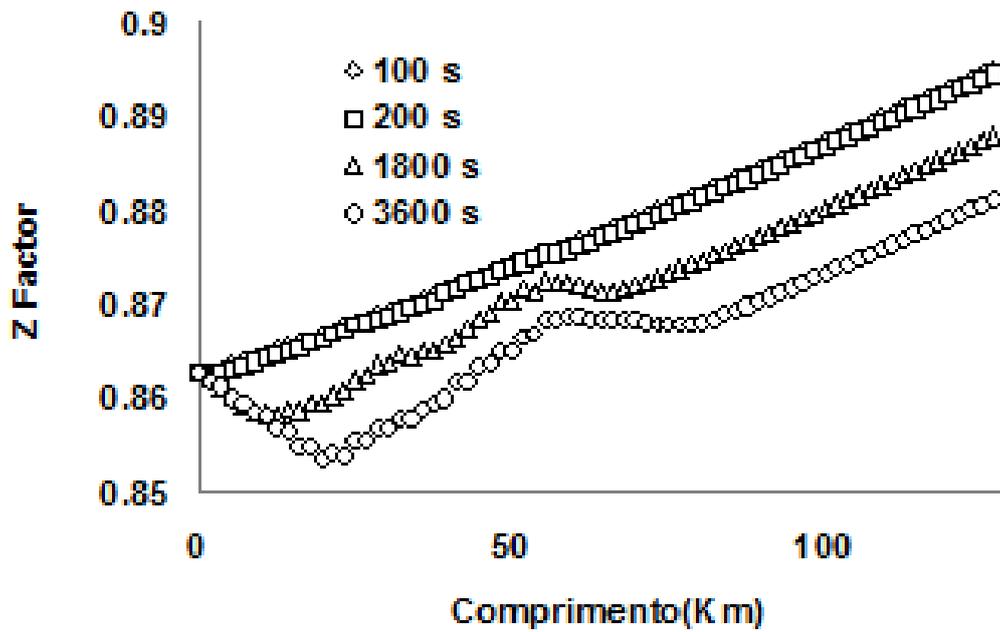
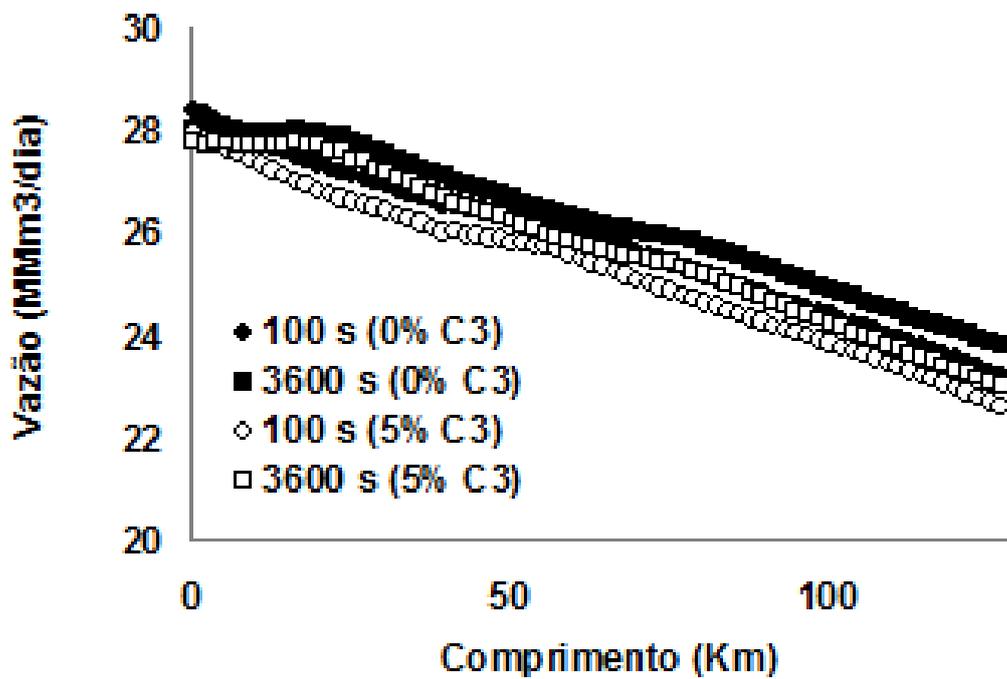


Figura 11 – Dinâmica de relaxação estacionária do perfil de temperaturas do gás em um duto de transporte de gás que atravessa um ambiente com temperaturas variáveis.



**Figura 12** – Dinâmica de relaxação estacionária do perfil de fatores de compressibilidade do gás em um duto de transporte de gás que atravessa um ambiente com temperaturas variáveis.



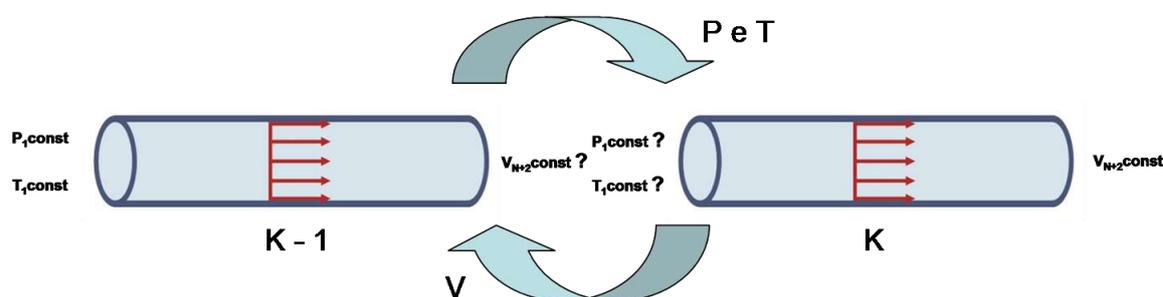
**Figura 13** – Dinâmica de relaxação estacionária do perfil de vazões do gás para diferentes composições em um duto de transporte de gás que atravessa um ambiente com temperaturas variáveis.

A Figura 13 mostra a influência da composição do gás natural sobre os perfis de vazões volumétricas calculadas ao longo do duto em diferentes tempos. Nesse caso, percebe-se

que uma mudança na composição do gás (o conteúdo de propano foi elevado de 0% para 5% em base molar) pode levar a mudanças significativas das vazões ao longo do duto, demonstrando que o modelo deve considerar sempre que possível a composição rigorosa do gás analisado. Particularmente, no caso analisado pode ser observado que a resposta dinâmica do sistema é mais lenta na presença do gás mais pesado, em função dos menores fatores de compressibilidade e maiores densidades.

Os resultados obtidos e apresentados nas Figuras 8 a 13 mostram que o modelo de escoamento implementado fornece resultados consistentes e confiáveis. Os resultados obtidos mostram ainda que a correta descrição dos perfis de temperatura ambiente e do grau de não idealidade e da composição do gás pode ser de fundamental importância para correta representação da dinâmica do escoamento no duto.

#### 4.4. Simulações Dinâmicas com Dois Dutos

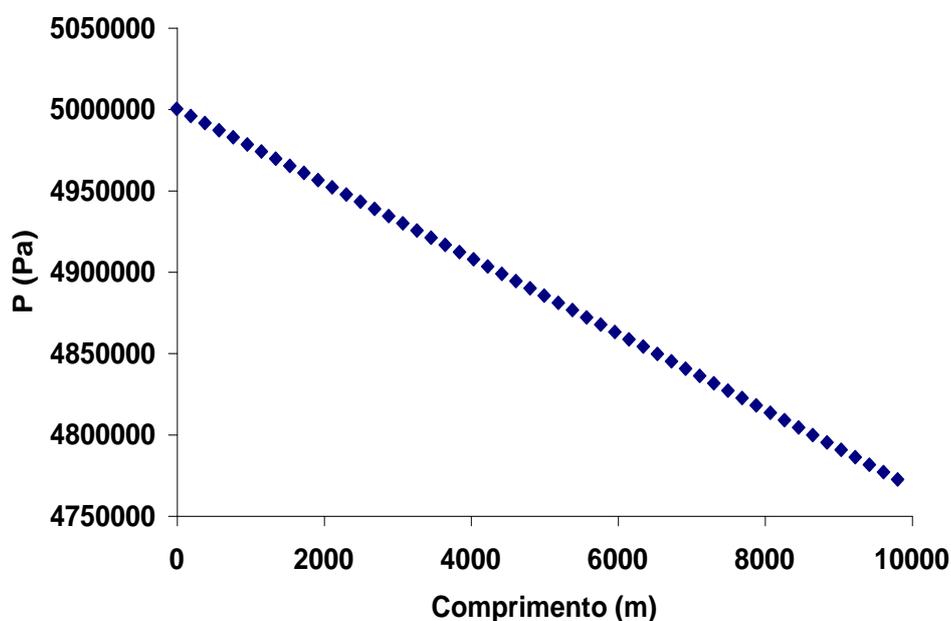


**Figura 14** – Metodologia para estabelecimento das condições de contorno no problema de escoamento de gás em dois tubos em série.

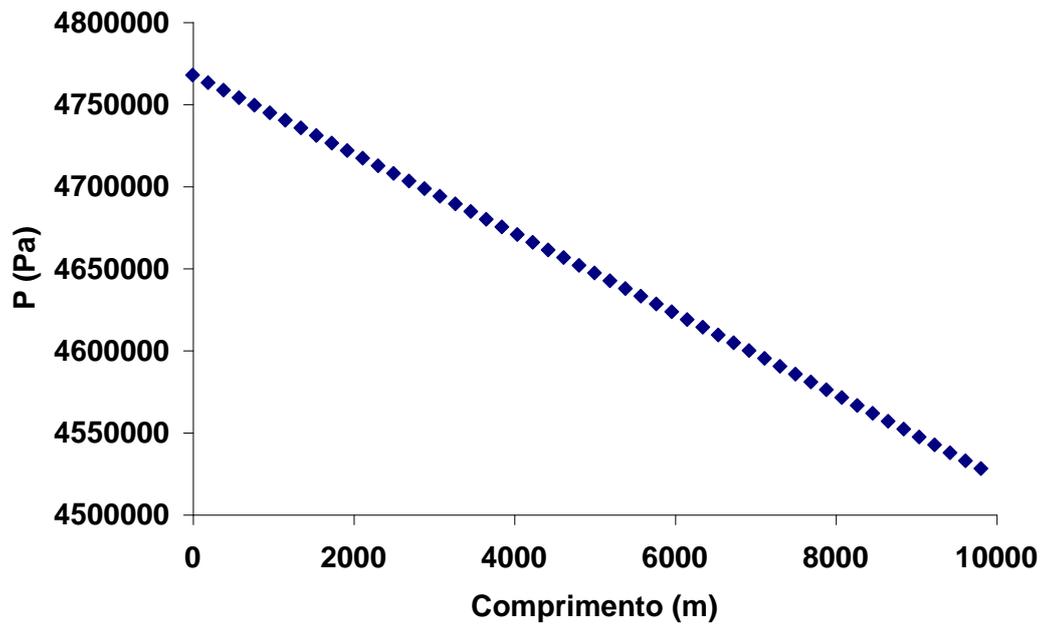
O uso da condição de contorno mostrada na Equação (29) constitui a melhor estratégia para resolver problemas de escoamento em dutos, devido à maior estabilidade do procedimento numérico. No entanto, esse tipo de condição de contorno cria algumas dificuldades para implementação das regras de conexão de dispositivos em série, como ilustrado na Figura 14. Como a condição de contorno para a velocidade do escoamento é implementada como condição de contorno no final do tubo  $k$ , isso gera um problema para a determinação da velocidade de contorno do tubo  $k-1$ . Problema similar ocorre para a determinação da temperatura e pressão de contorno no tubo  $k$ . Assim, a regra de conexão adotada para simulação admite que os valores da pressão e temperatura de entrada do tubo  $k$  são iguais aos respectivos valores calculados no tubo  $k-1$ . De forma similar, admite-se que a velocidade de saída do tubo  $k-1$  é igual à velocidade de entrada calculada para o tubo  $k-1$ . Essas regras de conexão mantêm a estrutura de contorno definidas na Equação (29) (velocidade e pressão especificadas nas diferentes extremidades) e garante a continuidade dos

perfis de temperatura, pressão e velocidade calculados ao longo do tempo. Além disso, para que a velocidade seja uma condição de contorno no final do tubo, partimos da hipótese de que o receptor de gás, uma termoelétrica, por exemplo, tenha seu consumo diário estabelecido e regular.

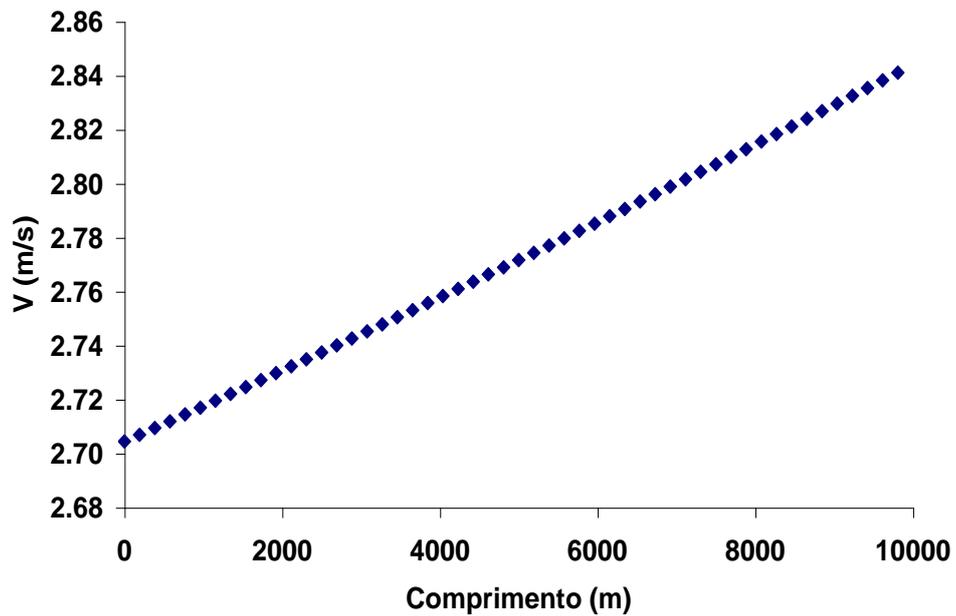
As Figuras 15 a 18 mostram os perfis de pressão e velocidade calculados ao longo de dois segmentos de duto de 10 km conectados em série, quando se atinge o estado estacionário. Admite-se que as temperaturas de alimentação e ambiente são iguais, de maneira que o perfil de temperaturas obtido é trivial. Observa-se nessas figuras a representação numérica estável das respostas obtidas. Resultados similares foram obtidos em todos os casos estudados, indicando que as regras de conexão propostas são capazes de permitir simulações estáveis de vários segmentos de tubos conectados em série.



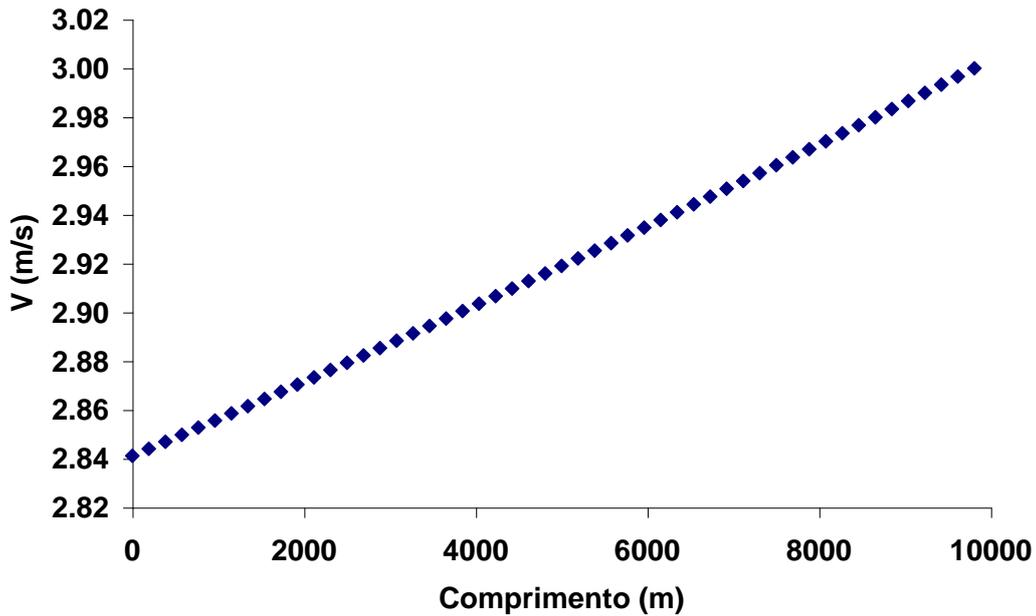
**Figura 15** – Perfil estacionário da pressão do gás no primeiro duto do sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série.



**Figura 16** – Perfil estacionário da pressão do gás no segundo duto do sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série.

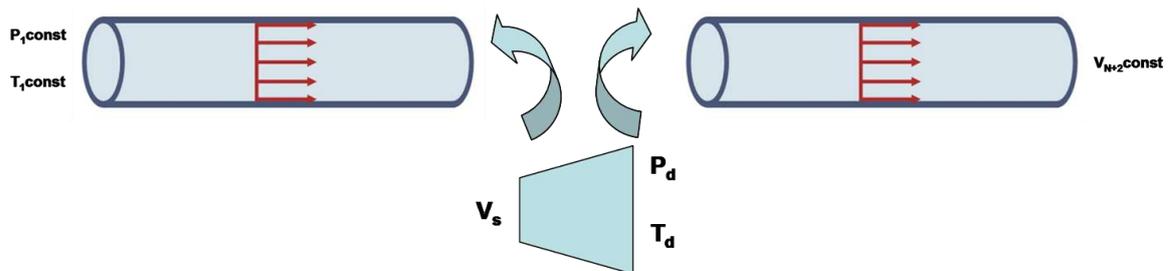


**Figura 17** – Perfil estacionário da velocidade de escoamento do gás no primeiro duto do sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série.



**Figura 18** – Perfil estacionário da velocidade de escoamento do gás no segundo duto do sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série.

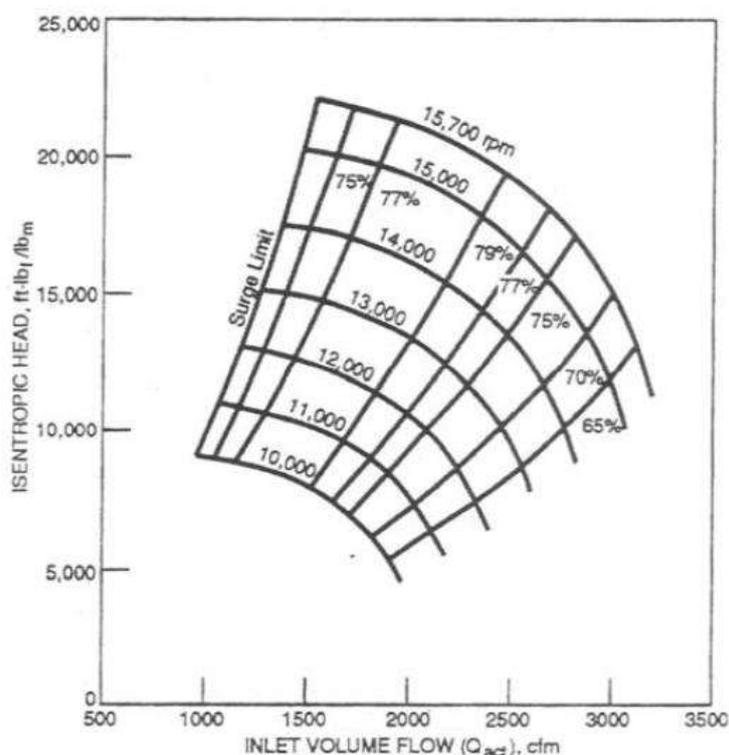
#### 4.5. Simulações Dinâmicas com Dois Dutos e um Compressor



**Figura 19** – Metodologia para estabelecimento das condições de contorno no problema de escoamento de gás em dois tubos em série, intermediados por uma estação de compressão.

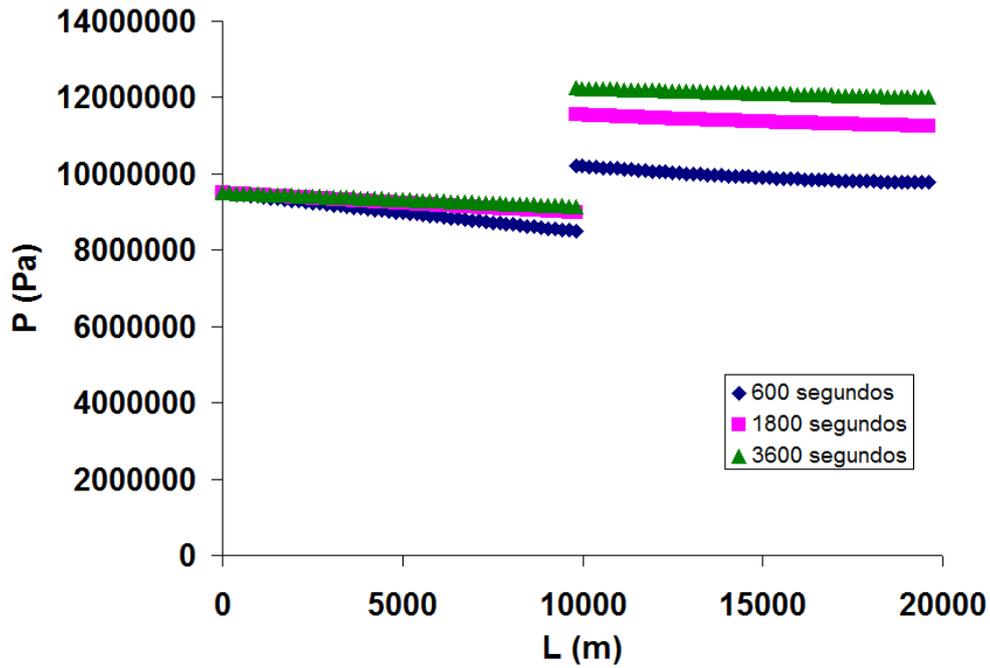
Foi implementado um processo constituído por dois dutos em série, intermediados por uma estação de compressão. Para assegurar a estabilidade numérica do esquema de discretização e manter a coerência da apresentação das equações, as condições de contorno foram estabelecidas como descrito na Figura 19. De acordo com essa estratégia, especificam-se as condições de temperatura e pressão na sucção do compressor (iguais à temperatura e pressão de descarga, calculadas para o primeiro segmento de duto) e a vazão de descarga do compressor (igual à vazão de alimentação calculada para o segundo segmento de duto). O modelo do compressor então deve calcular a pressão e temperatura da descarga do compressor (feita iguais à temperatura e pressão de alimentação do segundo segmento de duto, como condição de contorno) e a vazão de carga (feita igual à vazão de descarga do primeiro

segmento de duto, como condição de contorno). Para fins de modelagem e simulação, admitiu-se que o compressor analisado apresentava a curva característica apresentada na Figura 20.

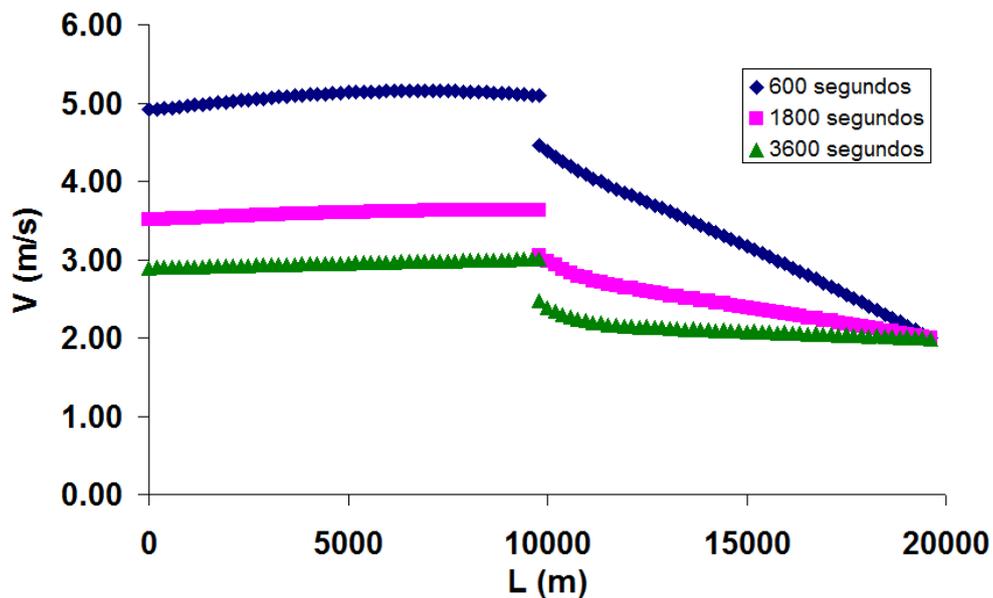


**Figura 20** – Curva operacional característica do compressor analisado.

As Figuras 21 a 24 mostram os perfis de pressão, de velocidade do escoamento, de temperatura e de fator de compressibilidade ao longo de dois trechos tubulares de 10 km, quando se admite que as temperaturas de alimentação e do ambiente são iguais. Como condições iniciais, foram admitidos perfis lineares de pressão e velocidade entre os pontos de alimentação e descarga do gás. Observa-se a evolução continuada dos perfis na direção da solução estacionária. As Figuras 21 e 22 mostram o forte acoplamento existente entre a evolução dos perfis de pressão e velocidade no sistema. À medida que aumenta a pressão de descarga do compressor, reduz-se a velocidade do escoamento, levando a redução da perda de carga e aumento adicional da pressão. Esse mecanismo de retroalimentação positiva se mantém por quase uma hora, nas condições de simulação. As pressões caem continuamente ao longo dos trechos de duto, em função das perdas de carga. A queda de velocidade observada ao longo do tubo só pode ser explicada com auxílio da Figura 23.



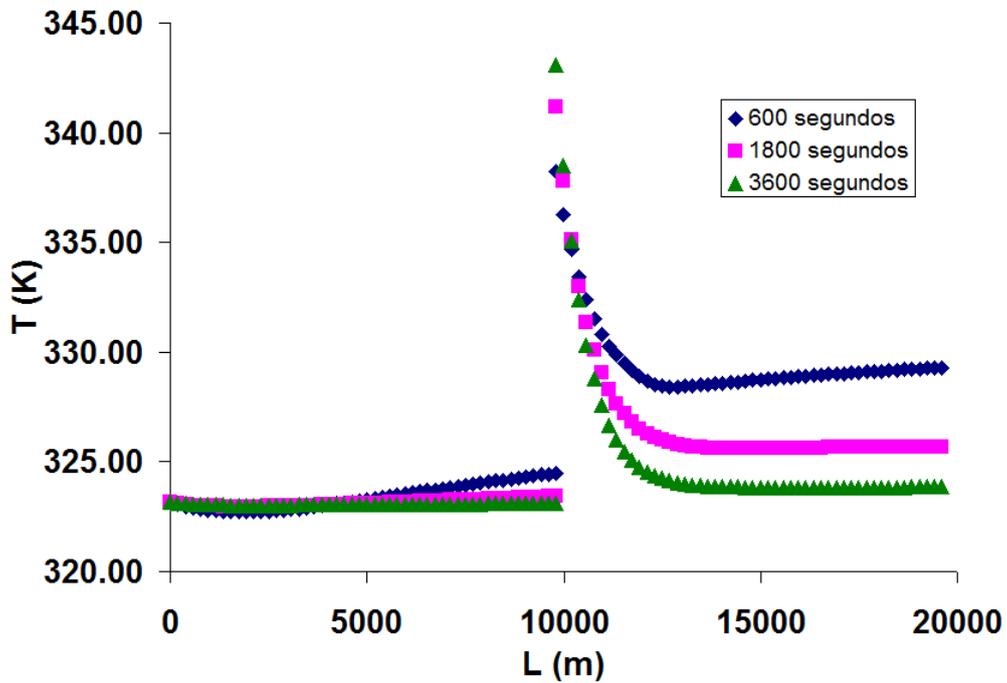
**Figura 21** – Perfis de pressão do gás no sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.



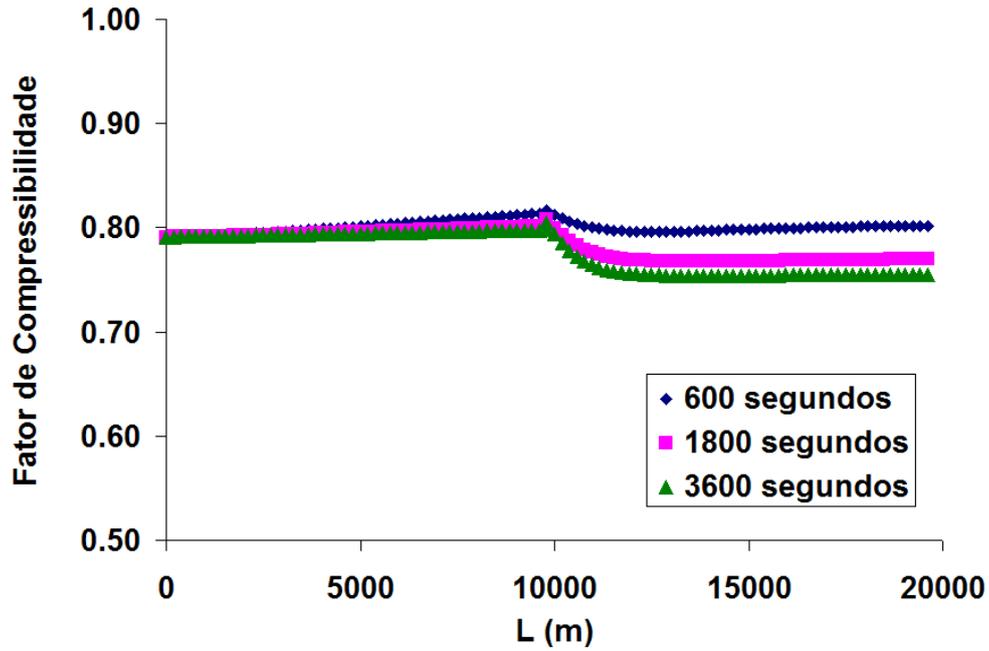
**Figura 22** – Perfis de velocidade de escoamento do gás no sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.

A Figura 23 mostra que o gás de descarga do compressor tem temperaturas significativamente superiores às do gás de sucção. O aumento da temperatura do gás na descarga e o subsequente resfriamento do gás explicam a redução das velocidades de escoamento no segundo duto, a despeito da leve redução da pressão. O efeito de temperatura

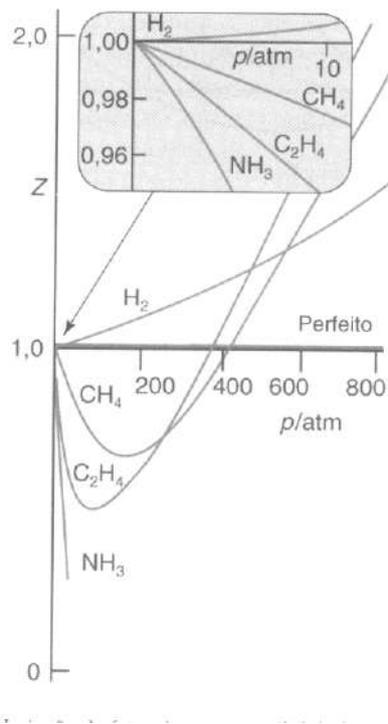
justifica a instalação de uma unidade de resfriamento (*cooler*) na linha de exaustão do compressor. Por causa da flutuação da pressão e da temperatura, o fator de compressibilidade do gás também flutua no tempo e no espaço, como mostrado na Figura 24. Chama-se a atenção para o fato de que as flutuações do fator de compressibilidade não podem ser consideradas desprezíveis. As flutuações observadas são compatíveis com os valores reportados por Atkins e Jones (2001) e mostrados na Figura 25.



**Figura 23** – Perfis de temperatura do gás no sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.



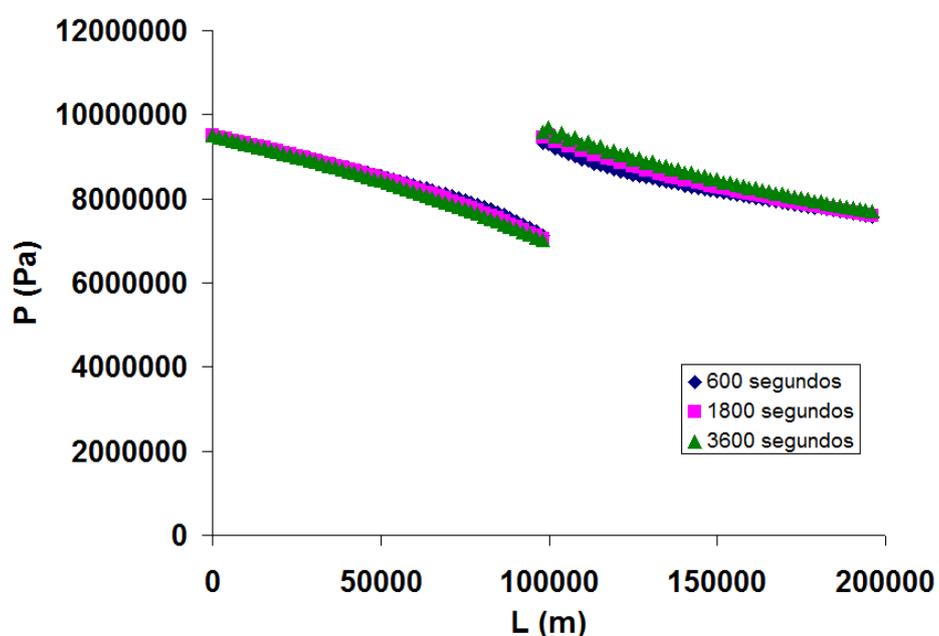
**Figura 24** – Perfis de fator de compressibilidade do gás no sistema formado por dois dutos de 10 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.



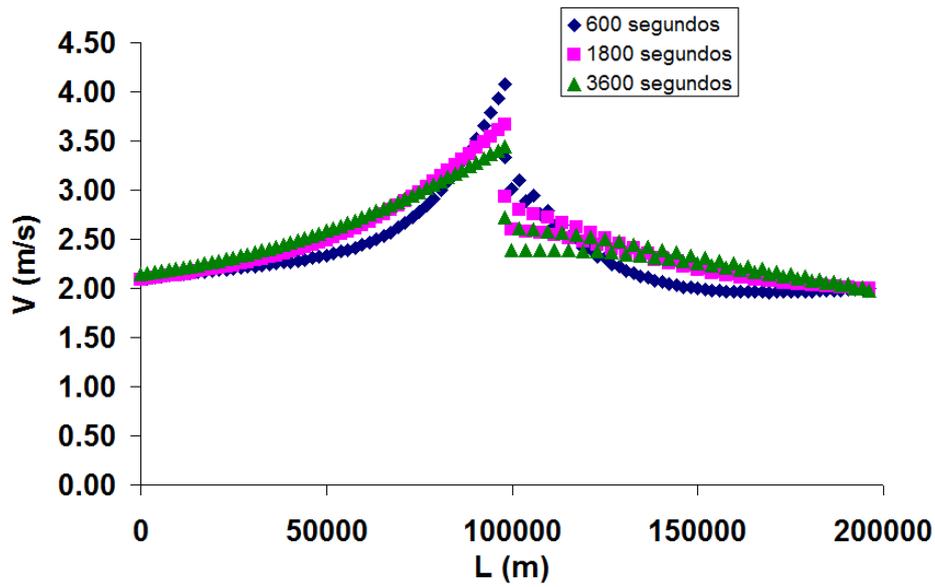
**Figura 25** – Fator de compressibilidade para hidrocarbonetos (Atkins e Jones, 2001).

Testes adicionais foram realizados para sistemas duto-compressor-duto com diferentes geometrias. As Figuras 26 a 29 mostram resultados obtidos quando o comprimento dos dutos foi aumentado de 10 km para 100 km. Nesse caso e como esperado, observa-se na

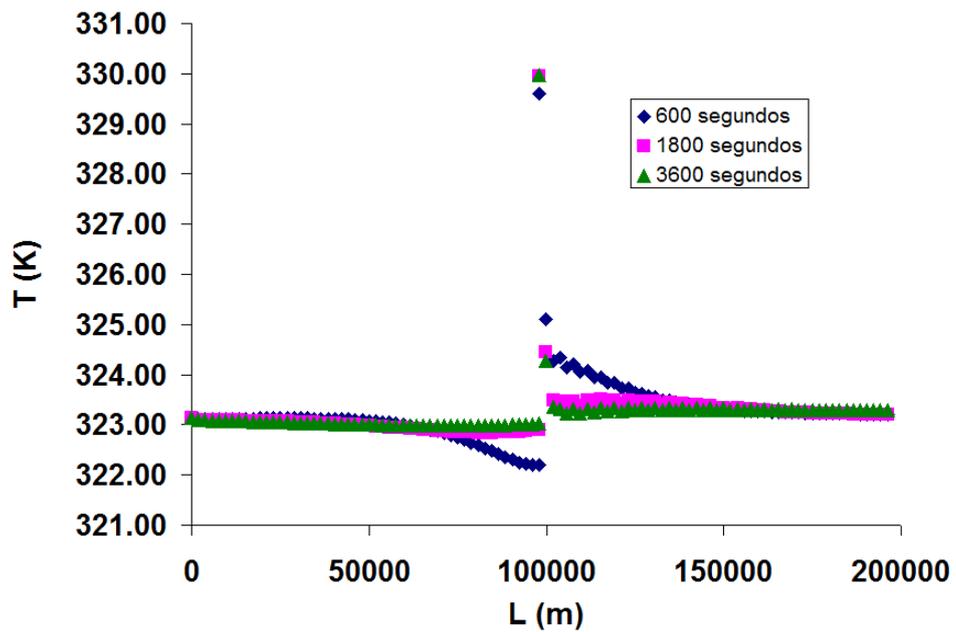
Figura 23 que ocorre uma maior queda de pressão nos tubos, por causa do aumento da perda de energia por fricção ao longo do escoamento. A diminuição das pressões no duto 1 causa o aumento das velocidades de escoamento do gás natural na primeira seção da malha. Contudo, na segunda seção ocorrem efeitos similares de aumento da velocidade por causa do súbito aumento da temperatura na descarga do compressor, como mostrado nas Figuras 27 e 28. Nesse caso, no entanto, os efeitos são concentrados numa seção relativamente menor do tubo, por causa do comprimento muito maior dos dutos analisados nesse exemplo. Como já mostrado na Figura 24, a Figura 29 também mostra que o fator de compressibilidade muda de forma expressiva com a mudança das condições de operação.



**Figura 26** – Perfis de pressão do gás no sistema formado por dois dutos de 100 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.



**Figura 27** – Perfis de velocidade de escoamento do gás no sistema formado por dois dutos de 100 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.



**Figura 28** – Perfis de temperatura do gás no sistema formado por dois dutos de 100 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.

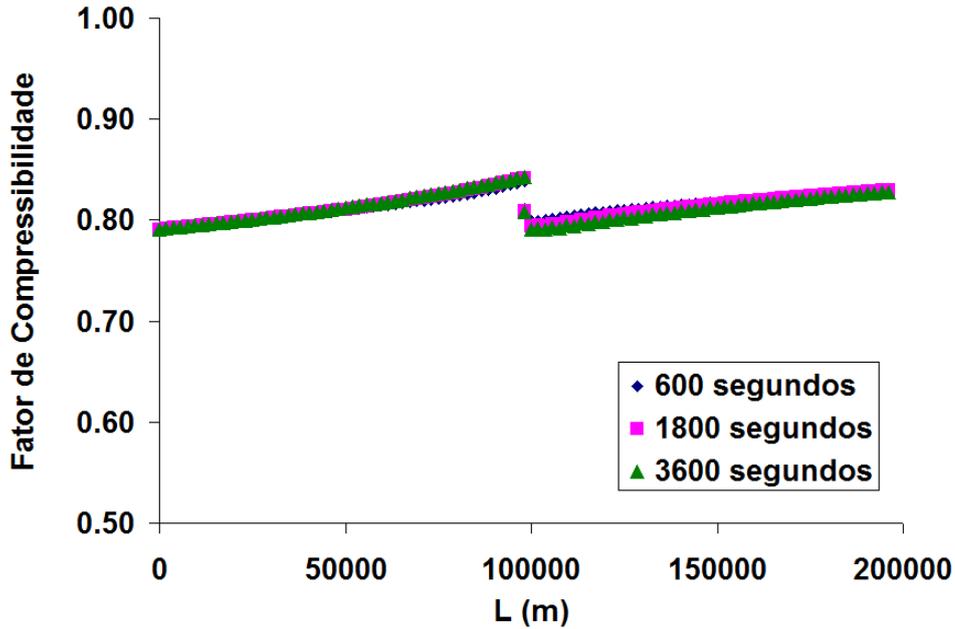


Figura 29 – Perfis do fator de compressibilidade do gás no sistema formado por dois dutos de 100 km conectados em série por intermédio de uma estação de compressão.

#### 4.6. Reconciliação de Dados

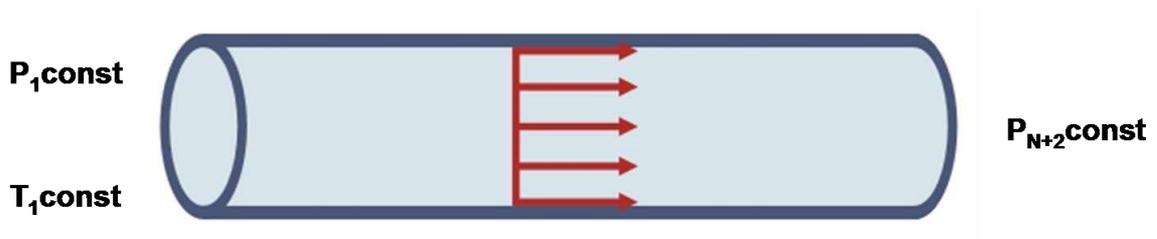


Figura 30 – Metodologia para estabelecimento das condições de contorno no problema de reconciliação de dados de escoamento de gás em um tubo.

Para fins de ilustração, faz-se a seguir a reconciliação de dados para o problema de escoamento em um duto. Como já mostrado nas seções anteriores, redes mais complexas de escoamento poderiam ser também configuradas para conduzir esses estudos de simulação. Para ilustrar o fato de que outros conjuntos de condições de contorno também poderiam ser usados para fins de simulação, utiliza-se nesse exemplo a configuração proposta na Figura 30, em que a pressão é fixada em ambas as extremidades do duto. A temperatura do solo foi utilizada como uma das variáveis de entrada, supondo-se assim que o analista conhece o comportamento da temperatura ambiente ao longo da rede. Os valores de pressão, vazão e temperatura na entrada e saída do duto, além da temperatura do solo, foram utilizados como variáveis manipuladas para fins de minimização da função objetivo, simulando a condição usual

conhecida entre dois pontos de medição ao longo de um trecho da rede. A constante de transferência de calor entre o gás e o solo foi estimada como parâmetro adicional do problema.

O problema de minimização foi resolvido com a ajuda de um pacote de otimização baseado na técnica heurística do enxame de partículas (Schwaab *et al.*, 2008). Dados fictícios de operação foram gerados com o modelo, para que o método de reconciliação pudesse ser implementado, uma vez que o projeto não contou com dados reais de operação. Nesse caso, um conjunto de dados calculados com o modelo foi corrompido por meio de valores aleatórios normalmente distribuídos, para simular a existência de um ruído aleatório nas variáveis medidas. O procedimento de otimização admitiu que as condições iniciais para o problema de minimização eram aquelas disponibilizadas pelo sistema de medição, como usualmente feito na área de reconciliação de dados. Esse procedimento é justificado pelo fato de que normalmente não se esperam desvios pronunciados das medidas num cenário em que os ruídos e erros de medição não são muito grandes. Apesar disso, resultados obtidos com diferentes procedimentos de inicialização dos dados foram sempre equivalentes, o que demonstra a robustez do procedimento de otimização implementado.

As Figuras 31 a 34 mostram resultados obtidos com o procedimento de reconciliação. Em todos os casos, o sistema proposto para representação dos dados converge e fornece como solução valores muito próximos dos valores operacionais medidos, independentemente das condições de inicialização do procedimento numérico. Esses resultados mostram que o esquema de análise de dados proposto pode ser usado com sucesso para interpretação de dados reais de produção obtidos no campo.

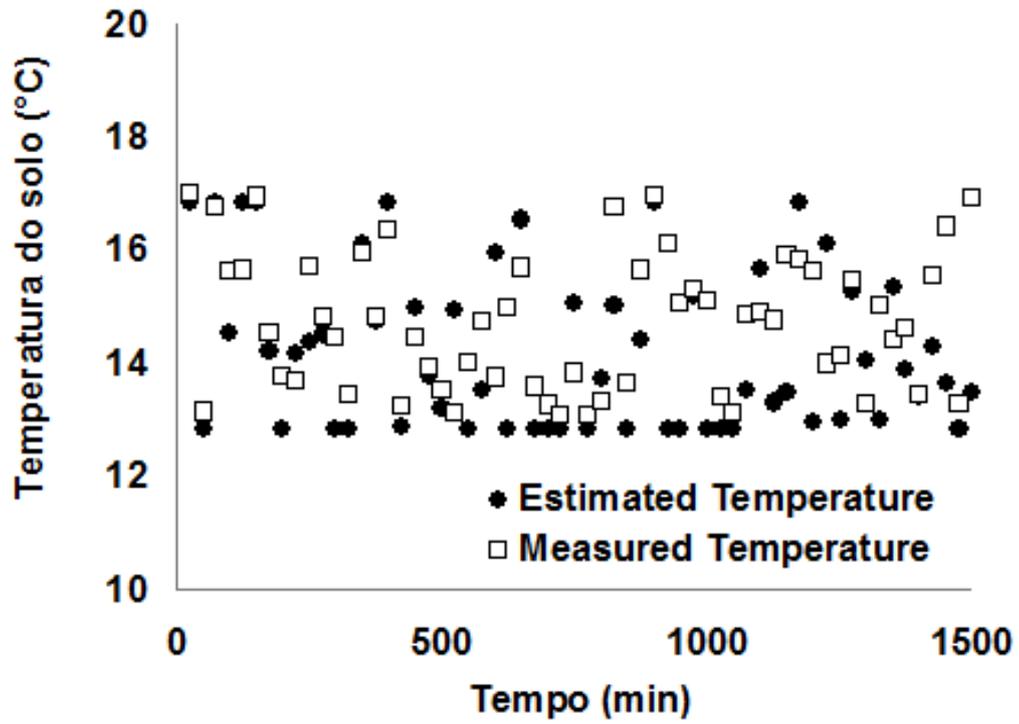


Figura 31 – Perfil das temperaturas do solo medidas e reconciliadas.

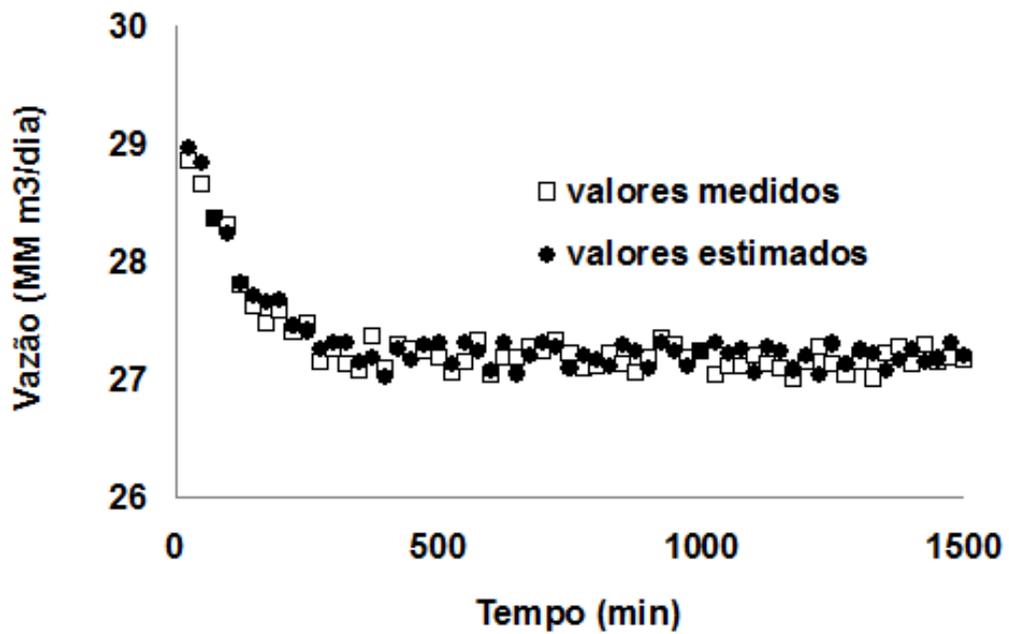


Figura 32 – Perfil das vazões de gás medidas e reconciliadas na entrada do duto.

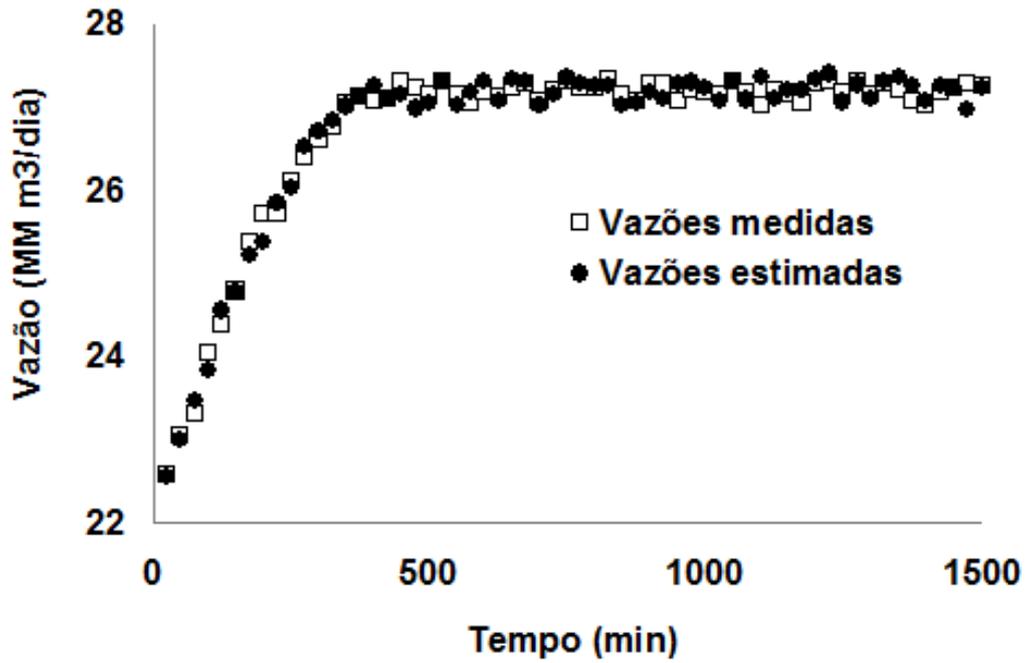


Figura 33 – Perfil das vazões de gás medidas e reconciliadas na saída do duto.

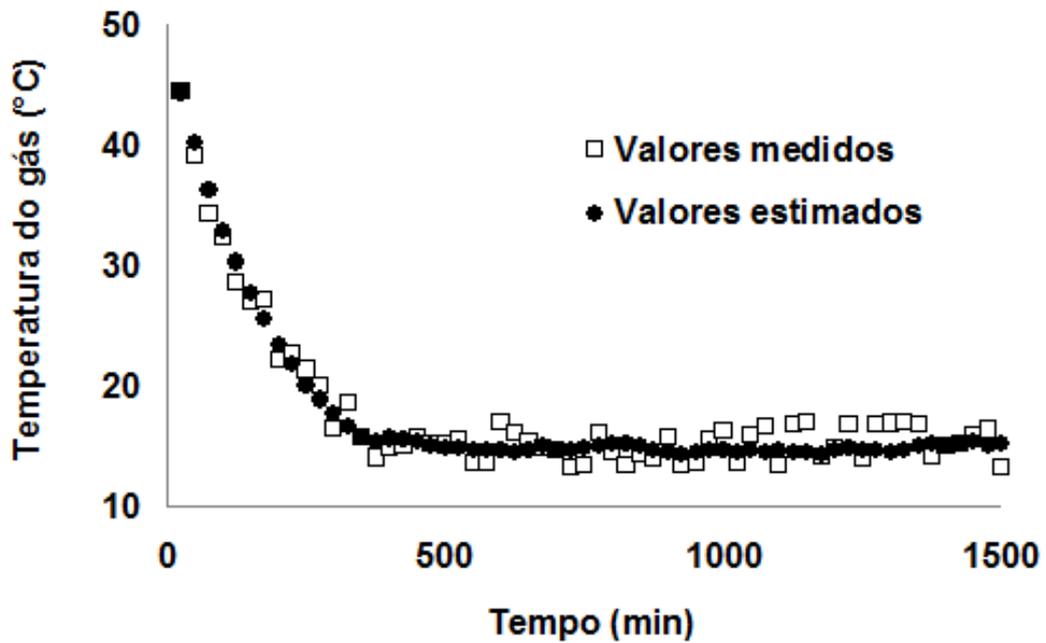


Figura 34 – Perfil das temperaturas do gás medidas e reconciliadas na saída do duto.

## 5. Conclusão

Primeiro, pôde-se evidenciar o desenvolvimento e a implementação com sucesso de um modelo para simulação de redes de escoamento de gás constituídas por dutos e elementos de compressão, instalados em série. O modelo pela primeira vez reporta a resolução simultânea dos balanços dinâmicos de massa, energia e quantidade de movimento, com descrição rigorosa do estado da fase gasosa. Mostrou-se que o modelo é capaz de fornecer resultados numéricos de forma confiável em diferentes condições e configurações.

Em seguida, um exemplo de como seria uma aplicação da técnica de reconciliação de dados em tempo real num problema de avaliar variáveis de operação como temperatura e vazão foi proposto de forma bem sucedida.

Por fim, podem-se apresentar os seguintes projetos e aplicações futuras do trabalho:

- Aplicação do sistema com reconciliação de dados na detecção de vazamentos;
- Implementação de malhas de dutos;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica de usuário (GUI) em linguagem de programação C# para o programa escrito em linguagem de programação FORTRAN

90.

## 6. Referências Bibliográficas

- ANP, “Boletim Mensal do Gás Natural”, número 25, Janeiro de 2011.
- ATKINS, P.W., JONES, L., “Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente”, Bookman, Porto Alegre, 2001.
- BAGAJEWICS, M. J., CABRERA, E., “Data Reconciliation in gas Pipeline Systems”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42, 5596 – 5606.
- BROWN, R.N., “Compressors: Selecting and Sizing”, 3<sup>rd</sup> Edition, Gulf Professional Publishing, New York, 2005.
- CHAPMAM, K. S., ABBASPOURT, M., “Non-isothermal compressor station transient modeling”, 35<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 2003, Oct. 15-17, Bern, Switzerland.
- CHAPMAN, K.S., KRISHNISWAMI, P., WALLENTINE, V., ABBASPOUR, M., “Virtual Pipeline System Testbed to Optimize the U.S. Natural Gas Transmission Pipeline System”, Technical Report, 2005.
- CHACZYKOWSKI, M., OSIADACZ, A.J., “Verification of Transient Gas Flow Simulation Model”, 41<sup>st</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 2010, May 11-14, Bonita Springs, Florida.
- COSTA, L.H, MEDEIROS, J.L., PESSOA, F.L.P, “Steady State Modeling and Simulation of Pipeline Networks for Compressible Fluids”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 1998,15, 4, 344-357.
- DEEN, J.K., REINTSEMA, S.R, “Modeling of High-Pressure Gas Transmission Lines”, *Applied Mathematical Modeling*, 1983,7, 268-273.
- ELSHARKAWY, A.M., ELKAMEL, A., “Compressibility Factor for Sour Gas Reservoirs”, Society of Petroleum Engineers, 2000, SPE 64284.
- FAUER, D., “The Making of a Useful Pipeline Simulation Model”, 34<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 2002, Oct. 23-25, Portland, Oregon.
- FERREIRA, L.C, PINTO, J.C., SOARES, M., “Simulation of Non-isothermal Transient Flow in Gas Pipeline”, *Rio Pipeline Conference Proceedings*, 2009, Rio de Janeiro.
- FELDMAN, R.N., “Reconciliação de Dados em Tempo Real para Monitoração e Detecção de Falhas em Terminal de Transporte e Armazenamento de Derivados

- de Petróleo”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2007, Rio de Janeiro, Brasil.
- FUKUSHIMA, K., MAESHIMA, B., KINOSHITA, A., SHIRAIISHI, H., KOSHIJIMA, I., Gas Pipeline Leak Detection System Using the Online Simulation Method”, *Computers and Chemical Engineering* 2000, 24, 453-456.
- GIAMPAOLO, A., “Compressor Handbook: Principles and Practice”, CRC Press, New York, 2010.
- ISSA, R.I., SPALDING, D.B., “Unsteady One-Dimensional Compressible Frictional Flow with Heat Transfer”, *Journal Mechanical Engineering Science*, 1972, 14, 6, 365- 369.
- LIEBMAN, M.J., EDGAR, T.F., LASDON, L.S., “Efficient Data Reconciliation and Estimation dos Dynamics Processes Using Nonlinear Programming Techniques”, *Computers and Chemical Engineering*, 1992, 16, 963-986.
- MOHITPOUR, M., THOMPSON, W., ASANTE, B., “Importance of Dynamic Simulation on the Design and Optimization of Pipeline Transmission Systems”, *Proceedings of the International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 1996, 2, 1183-1188.
- NARASIMHAN, S., JORDACHE, C., “Data Reconciliation and Gross Error Detection: an Intelligent Use of Process Data”, Gulf Publishing Company, 1 ed. Houston, 2000.
- OSIADACZ, A.J., “Simulation and Analysis of Gas Networks”, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1987.
- OSIADACZ, A.J., “Dynamic Optimization of High Pressure Gas Networks Using Hierarchical Systems Theory”, 26<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 1994, Oct. 13-14, San Diego, California.
- OSIADACZ, A.J., “Deferent Transient Models- Limitations, Advantages and Disadvantages”, 28<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 1996, Oct. 23-25, San Francisco, California.
- OSIADACZ, A. J., CHACCZYKOWSKI, M. “Comparison of Isothermal and Non-Isothermal Transient Models”, 30<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 1998, Oct. 28-30, Denver, Colorado.
- OSIADACZ, A.J., CHACCZYKOWSKI, M., “Comparison of Isothermal and Non-isothermal Pipeline Gas Flow Models”, *Chemical Engineering Journal*, 2001, 81, 41 – 51.

- OUYANG, L., AZIZ, K., “Steady-State Gas Flow in Pipes”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996, 14, 137-158.
- PINTO, J.C., LAGE, P.L.C., “Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química”, E-papers, Rio de Janeiro, 2001, Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ.
- PIPER, L.D., “Compressibility Factors for Naturally Occurring Petroleum Gases”, *Society of Petroleum Engineers*, 1993, SPE 26668.
- PRICE, G.R, MCBRIEN, R.K., RIZOPOULOS, S.N., GOLSHAN, H., “Evaluating the Effective Friction Factor and Overall Heat Transfer Coefficient During Unsteady Pipeline Operation”, *Proceedings of the International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 1996, 2, 1175-1182.
- RACHFORD, H.H., DUPONT, T.A., “A Fast Highly Accurate Means of modeling Transient Flow in Gas Pipelines by Variational Methods”, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, 14, 2, 356-362.
- RAMAMURTHI, Y. SISTU, P.B., BEQUETTE, W., “Control-relevant Dynamic Data Reconciliation and Parameter Estimation”, *Computers and Chemical Engineering*, 1993, 17, 41-59.
- REDDY, H. PRASHANTH, NARASIMHAM, S., BHALLAMUDI, M., “Simulation and State Estimation of Transient Flow in gas Pipeline Networks Using a Transfer Function Model”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45, 3853 – 3863.
- RHOADS, G.A., “Which Flow Equation - Does it Matter?”, 15<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 1983, Oct. 27-28, Detroit, Michigan.
- SCHRODER, D.W., 2001, “A Tutorial on Pipe Flow Equations”, 33<sup>rd</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), Oct. 17-19, Salt Lake City, Utah.
- SCHWAAB, M., BISCAIA, E.C., MONTEIRO, J.L., PINTO, J.C., “Nonlinear Parameter Estimation Through Particle Swarm Optimization”, *Chemical Engineering Science*, 2008, 63, 6, 1542-1552.
- STONER, M.A., “Steady- State Analysis of Gas production Transmission and Distribution Systems”, *Society of Petroleum Engineers of AIME*, 1969, SPE 2554.

STONER, M.A., "Sensitivity Analysis Applied to a Steady-State Model of Natural Gas Transportation Systems", Society of Petroleum Engineers Journal, 1972, 12, 115-125.

THORLEY, A.R.D., TILEY, C.H., "Unsteady and Transient Flow of Compressible Fluids in Pipelines - A Review of Theoretical and Some Experimental Studies", Journal of Heat and Fluid Flow, 1987, 8, 1, 3-15.

ZEMANSKY, M.W., "Heat and Thermodynamics", 1968, 5<sup>th</sup> edition, McGraw Hill.

ZHOU, J., ADEWUMI, M.A., "Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines", 27<sup>th</sup> Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 1995, Oct. 18-20, Albuquerque, New Mexico.

## Apêndice A – Parâmetros para o cálculo do fator de compressibilidade e dados disponíveis da composição do gás

O conhecimento do comportamento PVT de gás natural é necessário para resolver diversos problemas na engenharia de petróleo. Armazenamentos de gás, gradientes de pressão do gás, escoamento em dutovias e compressão de gases são alguns dos problemas que requerem o fator de compressibilidade do gás (fator Z). Tipicamente, o fator Z pode ser determinado por medidas em laboratório. Entretanto, os dados de laboratório são aplicáveis somente para as composições e condições investigadas. Quando as condições de interesse são diferentes daquelas estudadas no laboratório ou os dados não estão disponíveis, correlações devem ser usadas (Piper *et al.*, 1993).

Piper *et al.* (1993) propôs uma “regra de mistura” que leva em conta tanto não hidrocarbonetos quanto diferentes frações de hidrocarbonetos maiores ou iguais a C<sub>7</sub>, que foi mostrada nas equações (21) e (22). Para calcular as propriedades pseudo críticas do gás condensado ele usou massa molar de C<sub>7+</sub> em vez de propriedades críticas.

Tabela A1 – Propriedades físicas dos componentes (Elsharkawy, 2000).

Componente	Peso Molecular	Pressão Crítica (psia)	Temperatura Crítica (°R)
H <sub>2</sub> S	34,08	1300,00	672,45
CO <sub>2</sub>	44,01	1071,00	547,45
N <sub>2</sub>	28,01	493,00	227,27
C <sub>1</sub>	16,04	667,80	343,04
C <sub>2</sub>	30,07	707,80	549,76
C <sub>3</sub>	44,01	616,30	665,68
i-C <sub>4</sub>	58,12	529,10	734,65
n-C <sub>4</sub>	58,12	550,70	765,32

i-C <sub>5</sub>	72,15	490,40	828,77
n-C <sub>5</sub>	72,15	488,60	845,37
C <sub>6</sub>	86,18	436,90	913,37
C <sub>7+</sub>	127,0	-----	-----

Tabela A2 – Dados da composição molar do gás para estudo (Elsharkawy, 2000).

Composição molar	Mínima (%)	Média (%)	Máxima (%)
Metano	17,27	74,14	97,40
Etano	0	6,00	28,67
Propano	0	2,56	13,16
iso-Butano	0	0,50	2,61
n-Butano	0	0,84	5,20
iso-Pentano	0	0,35	2,85
n-Pentano	0	0,32	2,09
Hexano	0	0,44	5,30
C <sub>7+</sub>	0	1,64	17,20
Sulfeto de hidrogênio	0	7,45	73,85
Dióxido de carbono	0	4,04	67,16
Nitrogênio	0	1,72	25,15

# Anexo – Instabilidade Numérica em Modelos de Escoamento de Gás Natural

**Autor: Thiago Felipe Rodrigues Alves Ribeiro**  
**Orientador: José Carlos Pinto**  
**Co-Orientador : Luis Carlos Ferreira Júnior**

**Título:** Instabilidade Numérica em Modelos de Escoamento de Gás Natural

## **Introdução:**

Além dos avanços tecnológicos e a preocupação com recursos naturais não renováveis, há também a preocupação com o aumento da eficiência e redução de perdas nos processos industriais. Portanto, a diminuição de falhas humanas e aproveitamento de matérias primas têm sido incentivados por meio de uso de novas tecnologias e novos materiais.

Atualmente, a modelagem e simulação de processos de escoamento de gás é de grande interesse para implementação de técnicas de detecção de vazamento e falhas em sensores em redes de distribuição, como o gasoduto Brasil-Bolívia, que opera com uma vazão diária em torno de 30 milhões de m<sup>3</sup> do gás natural. Logo, grandes perdas em sistemas desse tipo podem gerar grandes custos empresariais e ambientais. Enfocando nessa visão, foi proposto o desenvolvimento do projeto SOFTGAS (parceria COPPETEC, CHEMTECH e PETROBRAS) que seria um software que supervisionaria essas redes.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é implementar e avaliar as instabilidades numéricas de um modelo baseado nas equações da Continuidade, Quantidade de Momento e Energia para o escoamento em dutos. Foi utilizada a equação de Estado para gases reais. O gás natural foi representado por uma mistura de componentes: C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e frações maiores que C<sub>7</sub>, assim como impurezas como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

O método de “Elementos Finitos” foi utilizado na dimensão do comprimento do tubo e o sistema de Equações Diferenciais Ordinárias resultantes foi resolvido pelo pacote de integração DASSL, utilizando a linguagem FORTRAN de programação.

## **Resultados:**

As equações foram resolvidas para um conjunto de dados reais de operações como temperatura do solo, temperatura do gás, rugosidade, diferença de pressão dos dutos, composição mássica do gás natural, comprimento do duto, diâmetro do duto, inclinação do mesmo e etc. Dessa maneira, foi possível obter resultados de um problema real (vazão mássica, pressão, temperatura do gás).

As equações utilizadas são amplamente conhecidas na área de Fenômenos de Transporte, sendo elas:

*Continuity Equation*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0$$

*Momentum Equation*

where  $w = \frac{f \rho v |v|}{8} \pi D$ .

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{w}{A} - \rho g \sin \theta$$

*Conservation of Energy*

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial t} - v \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Omega + wv}{A}$$

As condições de operação aplicadas ao programa, apesar de não serem estáticas, ou seja podendo sofrer mudanças durante o estudo, foram as seguintes:

D = 775 mm	Diametro interno
L = 127000 m	Comprimento
Ts= 15°C	Temperatura do Solo
e = 9.d-6	Rugosidade
h = 2d0	Coefficiente de transferencia de calor
mi = 1.0758d-5	Viscosidade dinâmica (Pa s) nas
g = 9.8d0	Aceleração da gravidade (m/s2)
MMC7 = 135.2d0	Massa molar da fração C7+
GEC7 = 0.779d0	Gravidade específica
f = Fator de fricção calculado pela equação explicita de Haaland	

A priori, aplicando às condições de contorno valores de operação próximos aos valores reais de operação, foram obtidos perfis consistentes de pressão, velocidade e temperatura ao longo do tempo, tais como:

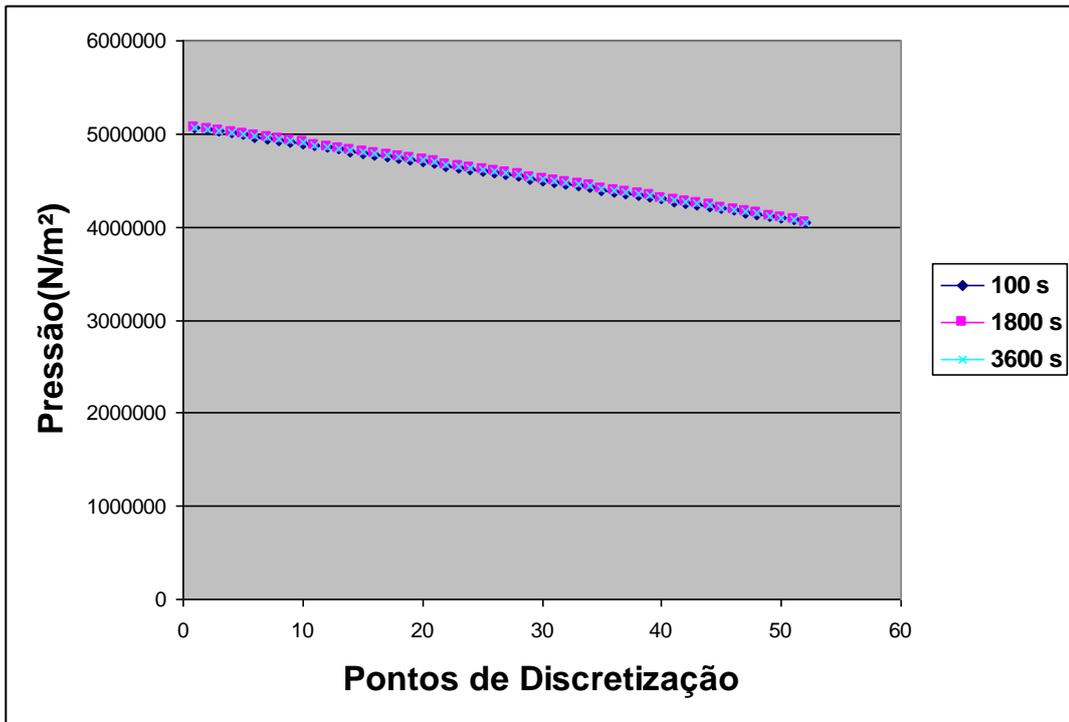


Gráfico para diferença de pressão 50 – 40 bar com 50 pontos de discretização

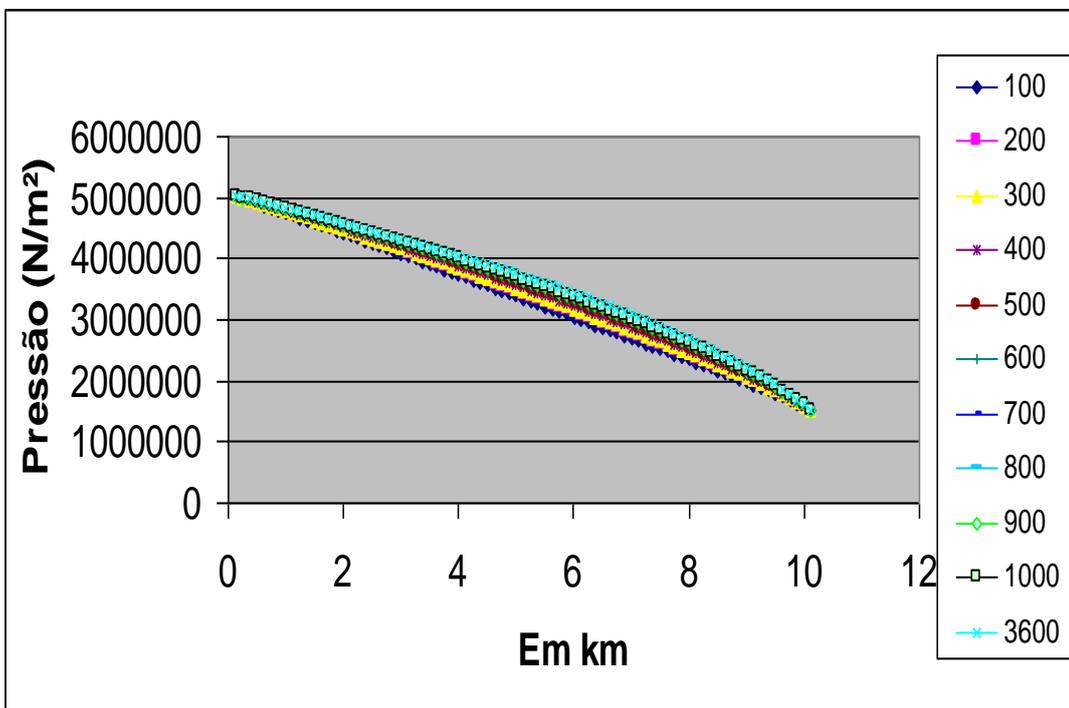


Gráfico para diferença de pressão 50 – 15 bar com 80 pontos de discretização

Gráfico para diferença de pressão 50 – 40 bar com 80 pontos de discretização

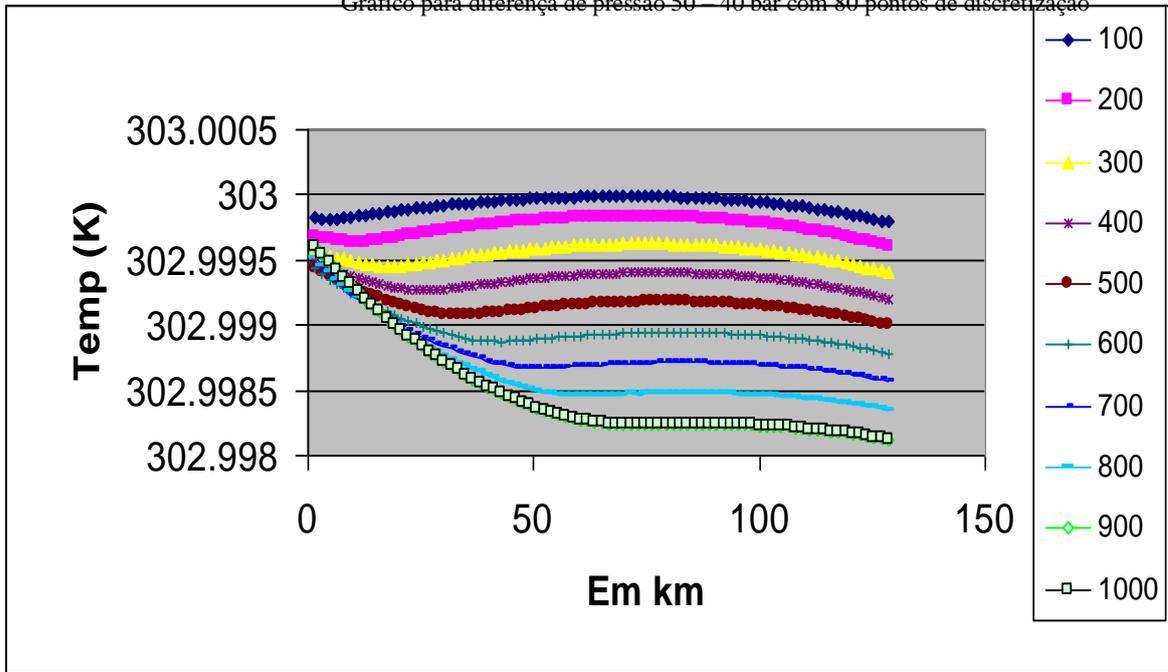


Gráfico para diferença de pressão 50 – 40 bar com 80 pontos de discretização

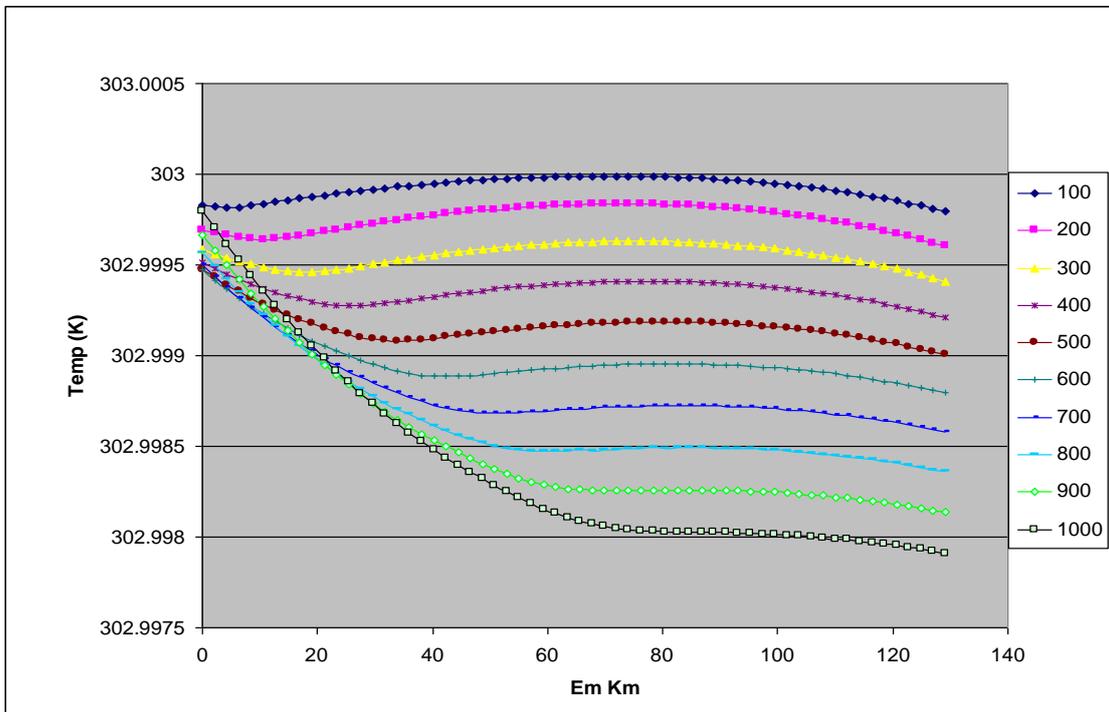


Gráfico para diferença de pressão 50 – 20 bar com 50 pontos de discretização

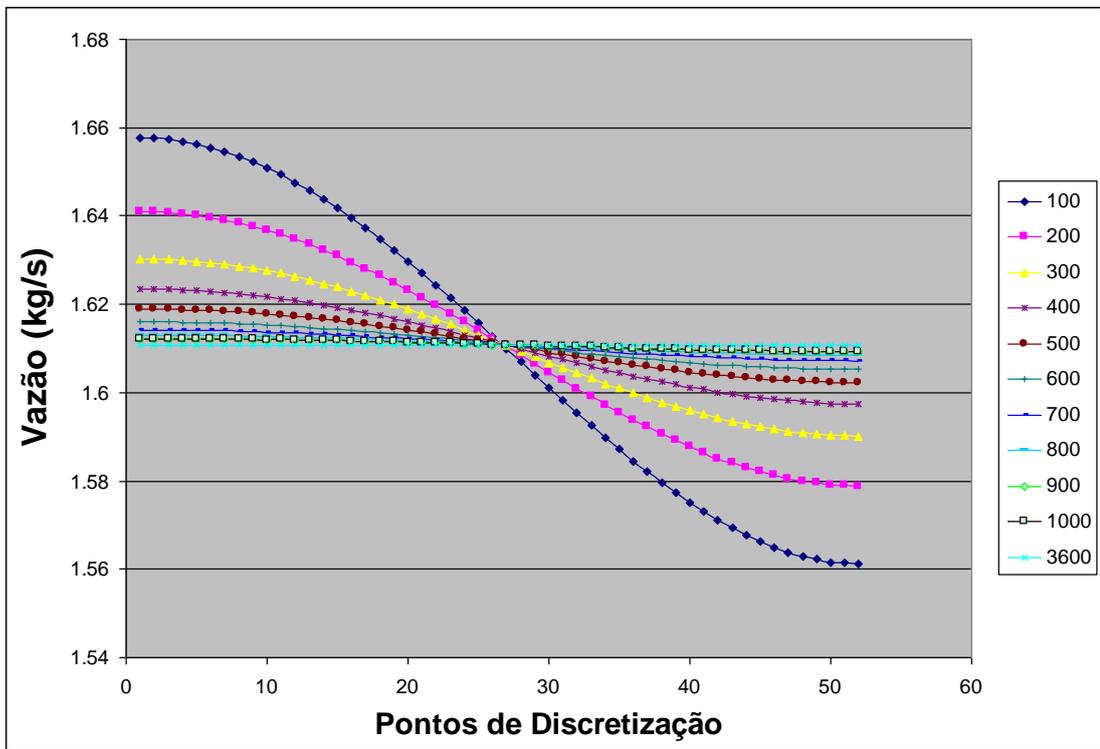
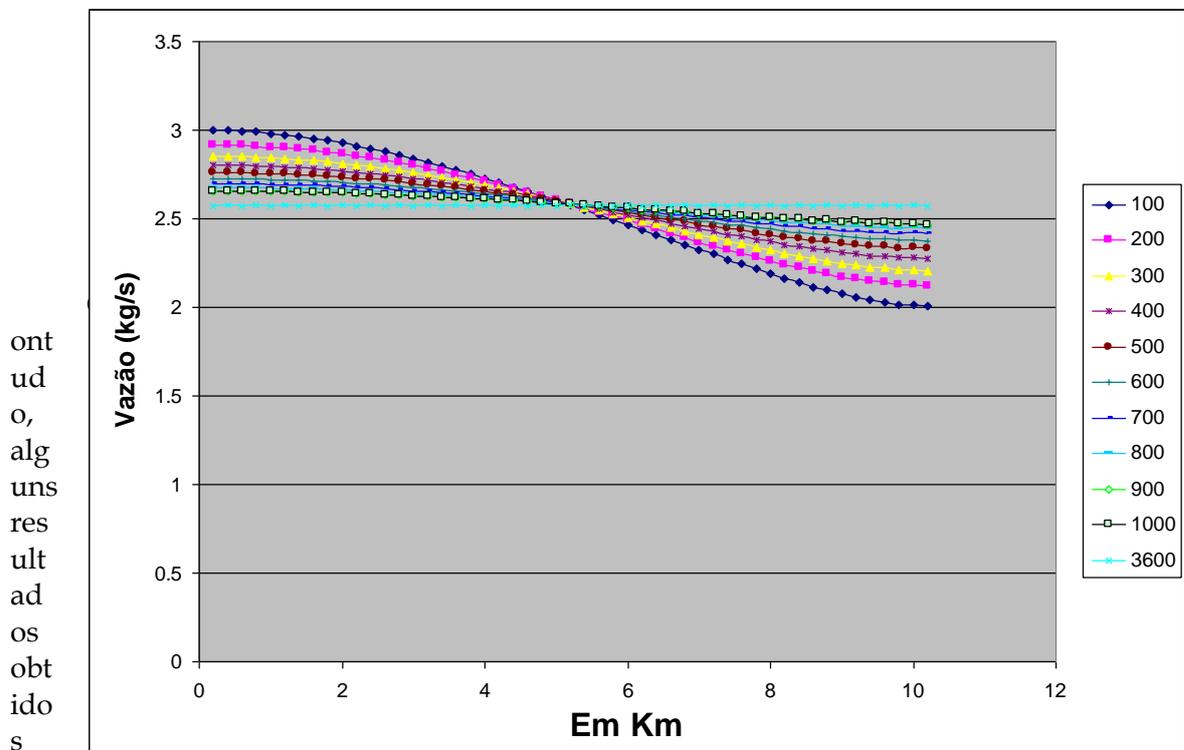


Gráfico para diferença de pressão 50 – 40 bar com 50 pontos de discretização



ont  
ud  
o,  
alg  
uns  
res  
ult  
ad  
os  
obt  
ido  
s

mostraram que a técnica numérica para solução do problema gerou oscilações nos perfis de vazão mássica, pressão e temperatura. Foi proposto primeiramente um estudo superficial em diversas condições de contorno. Foram obtidos diversos perfis do tipo:

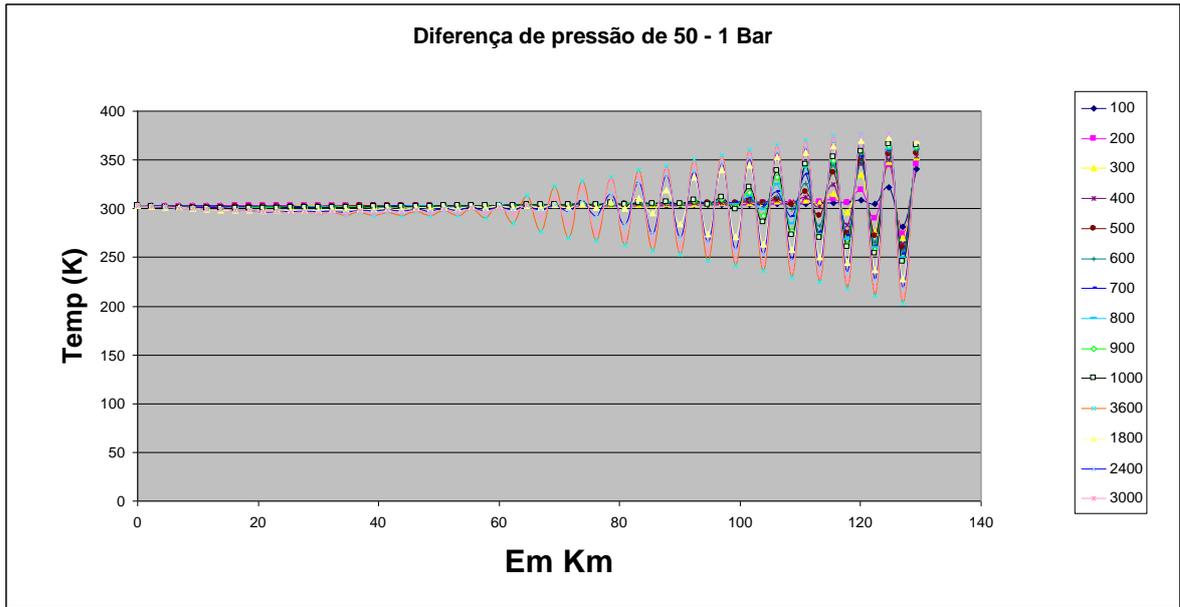


Gráfico para diferença de pressão 50 – 15 bar com 60 pontos de discretização

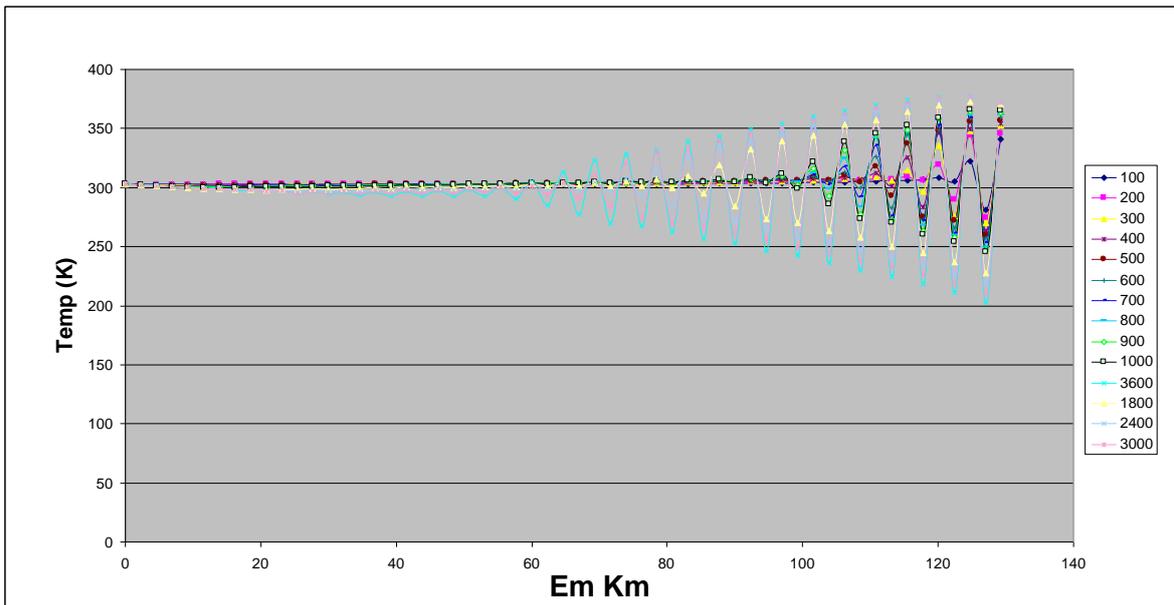


Gráfico para diferença de pressão 50 – 1 bar com 50 pontos de discretização

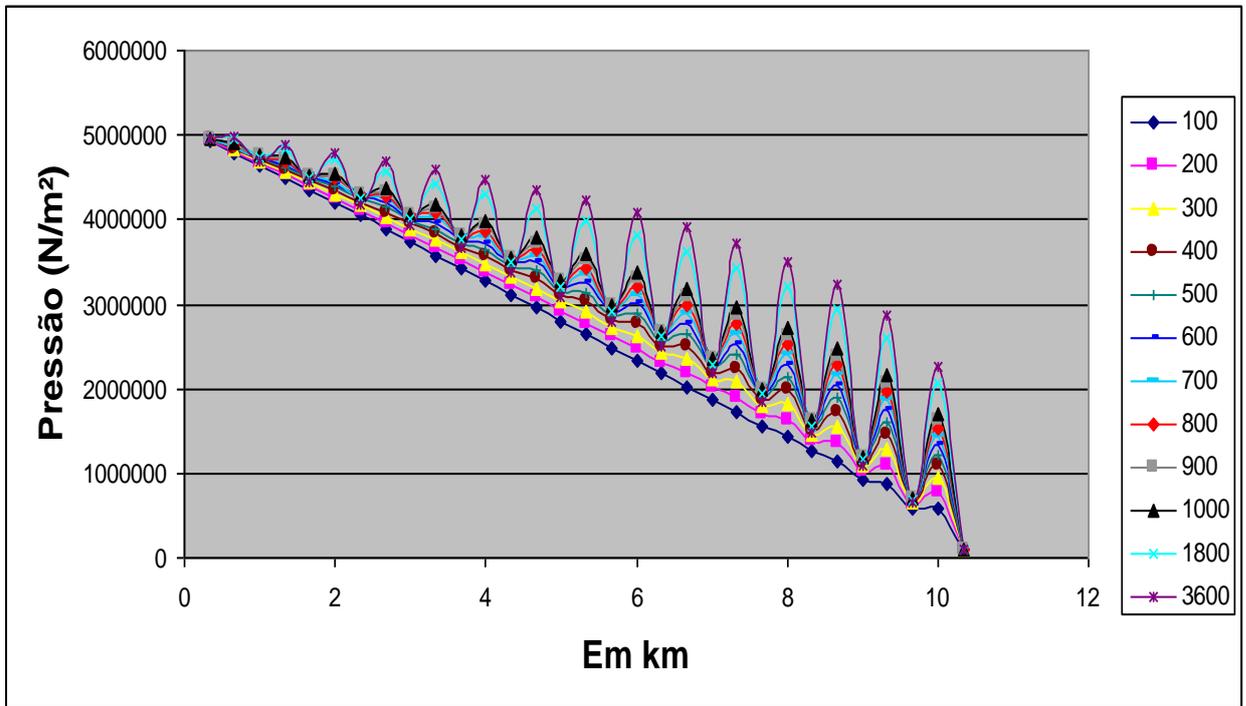


Gráfico para diferença de pressão 50 – 1 bar com 60 pontos de discretização

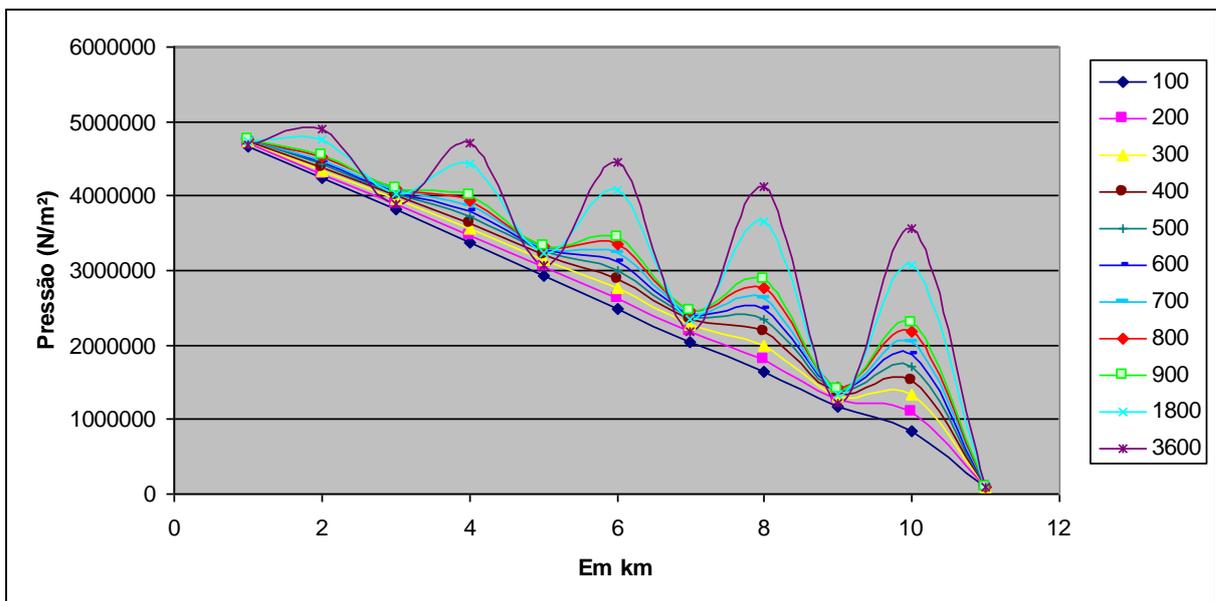


Gráfico para diferença de pressão 50 – 1 bar com 10 pontos de discretização

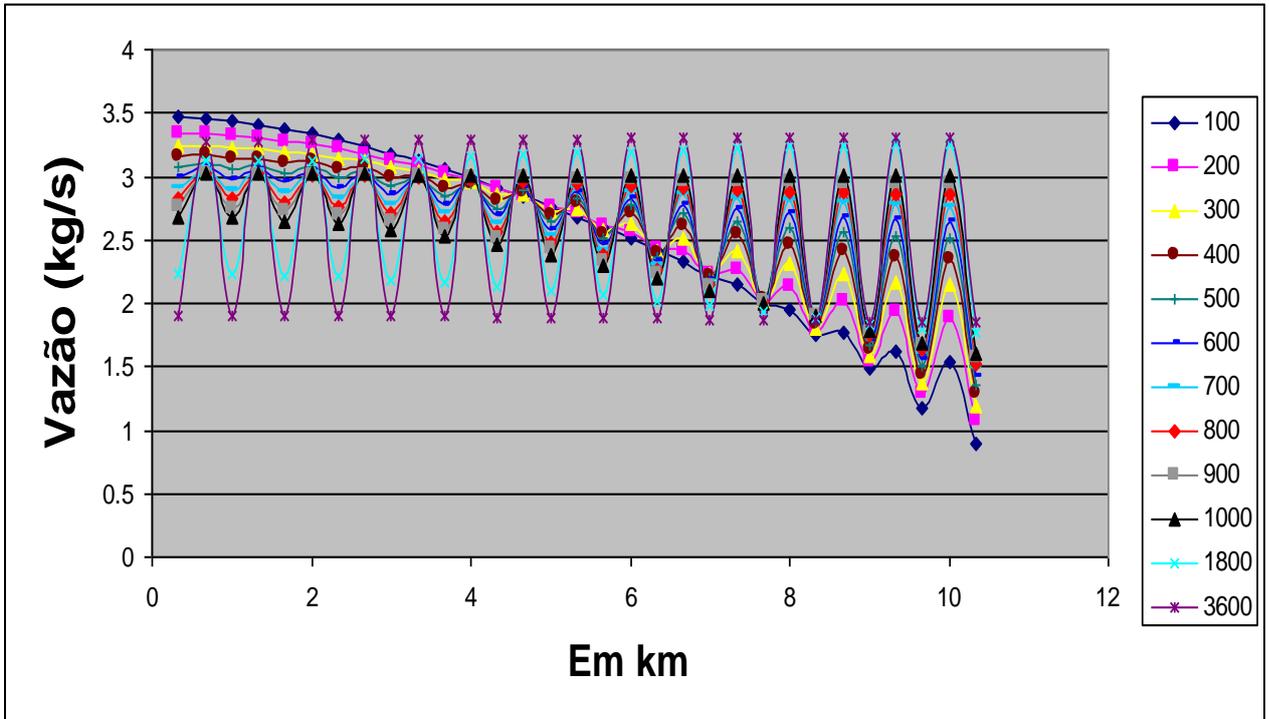


Gráfico para diferença de pressão 50 – 1 bar com 40 pontos de discretização

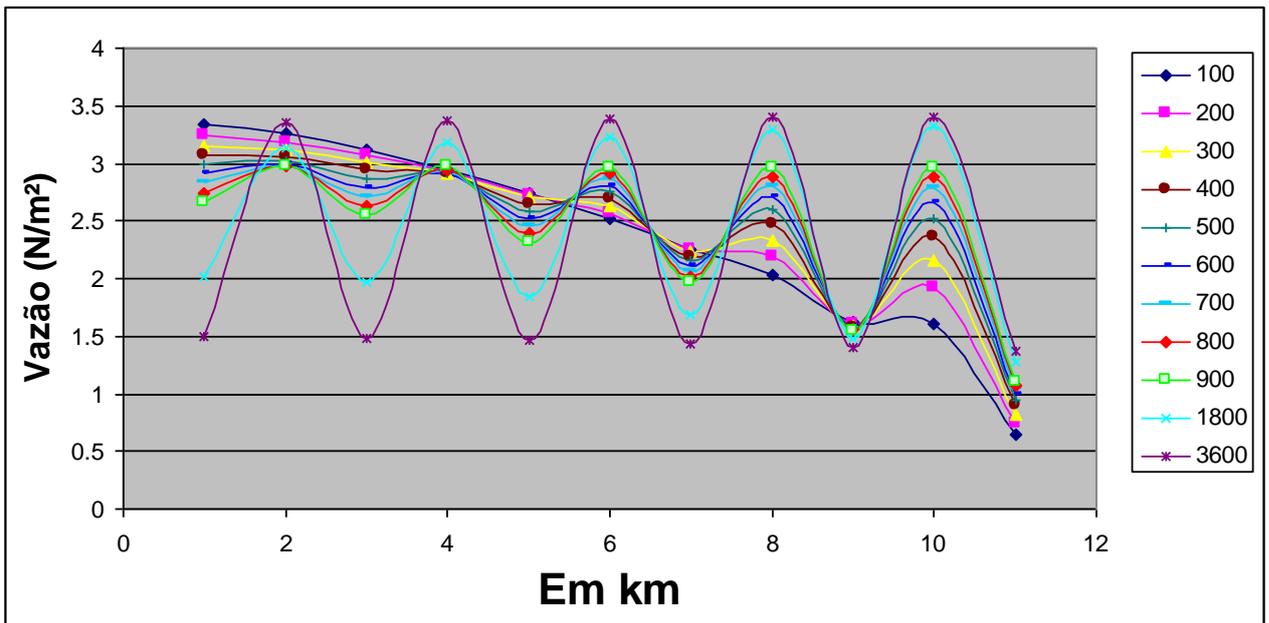
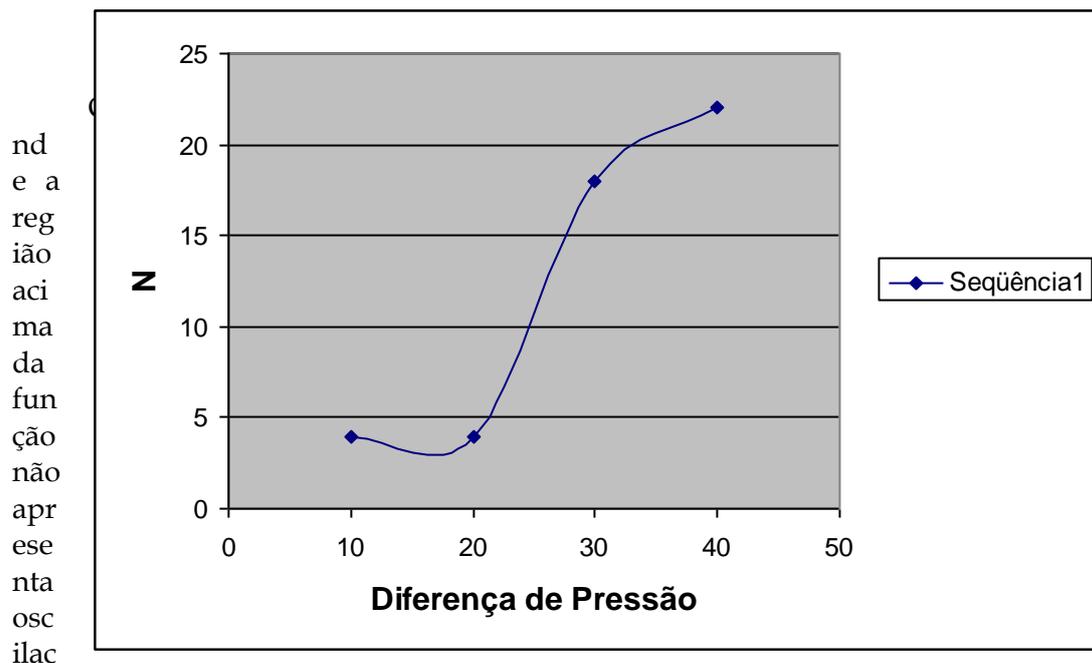


Gráfico para diferença de pressão 50 – 1 bar com 10 pontos de discretização

Certas conclusões puderam ser obtidas a partir desse estudo:

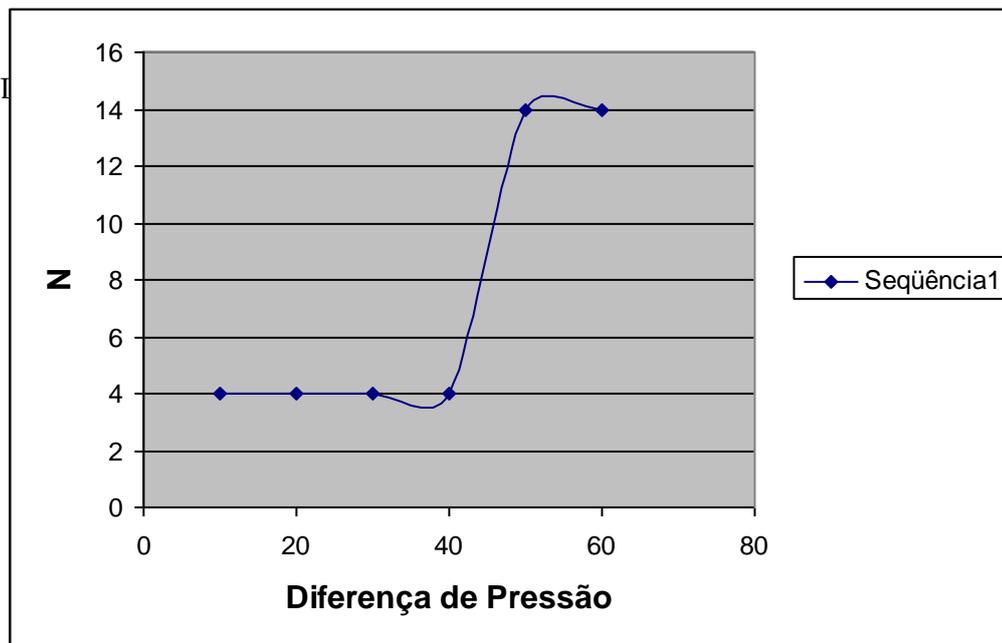
1. O caráter oscilatório parece estar relacionado principalmente com a diferença de pressão aplicado nas extremidade do duto
2. O aumento do número de pontos de discretização (N) retarda o efeito de aparecimento destas instabilidades
3. Esse comportamento pode ser explicado mesma maneira como o método de Euler leva a formação de oscilações em integração numéricas, já que a Dassl resolve o problema de forma semelhante.

Como estas instabilidades são desvantajosas do ponto de vista numérico, já que geram imprecisões, foi proposto um estudo mais detalhado desse comportamento, visando a construção de um gráfico de continuidade onde é possível identificar as regiões onde não existem oscilações em função do número de elementos finitos. Logo, foi construído este:



ões, e abaixo apresenta as instabilidades. Contudo, para este gráfico foi usado um limitante superior de 50 Bar, gerando diferenças de pressão do tipo  $d = (50 - X)$ , onde X é a pressão no final do duto. Também foi construído um gráfico em que o limitante superior fosse de 100 Bar gerando diferenças de pressão do tipo  $d' = (100 - X)$ .

og  
o,  
per  
ceb  
e-  
se  
qu  
e  
par  
a  
con  
diç  
ões  
dif  
ere  
nte



s, regiões de oscilação diferentes são encontradas, instaurando a idéia de que provavelmente exista um ponto de bifurcação neste gráfico. Contudo, para regiões próximas das condições normais de operação, pode-se concluir sem problemas que um número baixo de pontos de discretização já faz o modelo convergir bem sem gerar oscilações, fundamentando um programa capaz de modelar o sistema proposto.

### Conclusão:

Em suma, percebe-se que o estudo da instabilidade do método numérico aplicado a resolução do problema, pode ajudar ao desenvolvimento do projeto em questão, o que gerará uma otimização da rede de distribuição de gás natural diminuindo perdas e custos. Com isso será possível um retorno de investimento de grande ordem à Petrobras e conseqüentemente ao Brasil, engrandecendo o setor petroquímico do país.

### Bibliografia:

1. FOX, Robert W., MCDONALD, A. T., Pritchard, P. J., 2006, "Introduction to fluid Mechanics, 6th edition", USA.
2. Chapman, K. S., Krishniswami P., Wallentine, V., 2005, "Virtual Pipeline System Testbed to Optimize the U.S. Natural Gas Transmission Pipeline System", Manhattan, Kansas - USA.
3. Jr., PRÍAMO A. M., Pinto, JOSÉ C. C. S., 2008, "Introdução à Modelagem Matemática e Dinâmica Não-Linear de Processos Químicos", Rio de Janeiro, RJ - Brasil.
4. Metcalf, M., Reid, J., Cohen, M., 2004, "Fortran 95/2003 Explained (Numerical Mathematics and Scientific Computation) 3rd edition", Oxford University Press, USA.