Thais Keiko Arakaki

Simulação de rede de distribuição de gás

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

São Paulo

2017

Thais Keiko Arakaki

Simulação de rede de distribuição de gás

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Química:

Orientador:
Prof. Dr. Ardson dos Santos Vianna Jr.

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Arakaki, Thais Keiko

Simulação de rede de distribuição de gás / T. K. Arakaki -- versão corr. --
São Paulo, 2017.

70 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Gasoduto 2. Modelagem 3. Simulação 4. Simulador sequencial modular
5. Simulador orientado a equação I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.

Dedico ao meu pai **Sergio Morikasu Arakaki** (*in memorian*), à minha mãe **Theresa Nakamura Arakaki** e ao meu irmão **Thiago Hideo Arakaki**.

Agradecimentos

A Deus

A Mariazinha e todos os que regem a imensidão do universo espiritual.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Ardson dos Santos Vianna Jr, pela orientação e do seu compartilhamento de toda a sua sabedoria, experiência, paciência e principalmente por acreditar sempre no meu potencial.

Ao Prof Dr. Claudio Neves Borges, por me mostrar que há sempre uma luz no final do túnel e ter incentivado a explorar esse caminho acadêmico e pesquisa.

Ao Prof Dr. Rafael de Pelegrini Soares pelo suporte no decorrer do trabalho.

Ao meu pai Sergio (*in memorian*) que sempre me incentivou a seguir os meus sonhos e escolhas. Apesar de não poder estar mais presente fisicamente, sei que ele está me acompanhando sempre. Saudades eternas. A minha mãe Theresa e ao meu irmão Thiago, que não medem esforços para que eu sempre alcance os meus objetivos e conquistas.

Ao meu namorado Bruno Lucena, que sempre me acompanhou desde a minha adolescência até essa etapa da minha vida. Pela ajuda e suporte como designer para que os pequenos detalhes deste trabalho ficassem melhores. Por toda paciência, compreensão, carinho, amizade, incentivo e amor.

Aos Amigos Engenheiros que tiveram presente nessa jornada: Andhros Guimarães Silva, Fabio Coffani dos Santos de Siqueira, Flavia Daylane Tavares de Luna, José Carlos Gonçalves Peres, Rita Zolin e Rodrigo Costa.

Aos Amigos de longa data e me incentivam a ser uma pessoa melhor: Acacio Capela, Acácio Osório, Alexandre Rocha, Aline Louise Santos Silva, Ana Caroline Cavalcanti, Clayton Casari, Davi Lima, Diego Schwanz, Emanuel Cardoso, Giovanna Paiolleti, Jéssica Sagas, Osvaldo Rodrigues Laja Junior, Thaís Francisco Alho, Suelen Miranda de Melo e Yuri Ornellas

Ao Departamento de Engenharia Química da USP.

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir.”

- **Albert Einstein** (1879 – 1955).

RESUMO

O gás natural é uma fonte alternativa ao petróleo. É uma fonte de energia considerada mais limpa e segura dentre as fontes de energias não renováveis e, por isso, vem aumentando sua participação na matriz energética. Deste modo, impulsionou a criação e ampliação de diversas malhas de gasodutos. O objetivo do presente trabalho é simular redes de gasodutos utilizando ferramentas computacionais disponíveis no mercado. O HYSYS® foi adequado para simular longos gasodutos lineares. Portanto, a estratégia sequencial modular foi adequada para estas configurações. Contudo, não apresentaram bons resultados para redes. O software gratuito iiSE apresenta bons resultados para redes complexas, comprovando que os softwares orientados a equações são mais apropriados para sistemas com paralelismo.

Palavras-chave: Gasoduto, simuladores sequenciais modular e orientado a equação, gás natural, modelagem.

ABSTRACT

Natural gas is an alternative source for oil. It is an energy source considered more clean and safe among the non-renewable energy sources and, therefore, its participation is increasing in the energy matrix. In this way, spurred the creation and expansion of several meshes of pipelines. The objective of this study is to simulate gas pipeline networks using computational tools available on the market. The HYSYS ® was suitable to simulate long linear gas pipelines. Therefore, the sequential modular strategy was appropriate for these settings. However, did not provide good results for networks. The free software iiSE presents good results for complex networks, proving that the software oriented to equations are more suitable for systems with parallelism.

Keywords: gas pipeline, sequential modular simulation and equation oriented, natural gas, modeling.

Sumário Estruturado

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	11
2.1. Objetivo geral	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. Cálculo das propriedades do gás natural.	12
3.2. Gasodutos.	17
3.2.1. Vantagens e desvantagens do transporte de gasodutos	21
3.2.2. Especificação do gás natural para transporte.....	22
3.2.3. Normas de Qualidade	23
3.3. Modelagem computacional.....	23
3.4. Equações de conservação para escoamento de dutos.	26
3.4.1. Conservação de massa	27
3.4.2. Conservação de quantidade de movimento	27
3.4.3. Conservação de energia	27
3.4.4. Compressão do gás natural	27
3.5. Equações simplificadas de escoamento.....	29
3.6. Estratégias de solução.....	35
3.7. Simuladores modulares e orientados equações	36
3.8. Análises termohidráulicas.....	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1. Simulação 01 – GASBOL	40
4.2. Simulação 02 – Teste preliminar - Exemplos típicos de redes	42
4.3. Simulação 03 – Rede de pequena dimensão.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1. Simulação 01 – GASBOL	47
5.2. Simulação 02 – Teste preliminar - Exemplos típicos de redes	53
5.3. Simulação 03 – Rede de pequena dimensão.....	55
6. CONCLUSÃO.....	59
7. REFERÊNCIAS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Compressibilidade dos gases naturais	14
Figura 2 - Gasoduto terrestre de Taubaté	17
Figura 3 - Gasoduto offshore.....	17
Figura 4 - Sistemas de gasodutos.	19
Figura 5 – Rede malhada.	20
Figura 6 - Explosão do gasoduto da operadora Petrobras.	21
Figura 7 - Parâmetros que afetam a complexidade da simulação de fluxo.	24
Figura 8 - Gráfico de Moody.....	30
Figura 9 - Apresentação gráfica de uma rede.	35
Figura 10 - Gasodutos de importação de gás natural da Bolívia-Brasil.	41
Figura 11 - Exemplo 1.	43
Figura 12 - Exemplo 2.....	43
Figura 13 - Rede de Pequena Dimensão.....	45
Figura 14 - Malha simulada de gasodutos GASBOL HYSYS®.....	49
Figura 15 - Análise termohidráulica do trecho 1 do GASBOL no HYSYS®.....	52
Figura 16 - Análise termohidráulica do trecho 2 do GASBOL no HYSYS®.....	52
Figura 17 - Malha simulada no iiSE - Exemplo 1.....	54
Figura 18 - Malha simulada no iiSE - Exemplo 2.....	55
Figura 19 - Rede de pequena dimensão simulada no HYSYS®.	56
Figura 20 - Rede de pequena dimensão simulada no iiSE.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação de comercialização do gás natural no Brasil.	22
Tabela 2 - Simuladores avançados encontrados no mercado.	25
Tabela 3 - Constantes das equações (3.8) e (3.9).	33
Tabela 4 - Constantes da equação (4.0).	34
Tabela 5 - Informações técnicas do gasoduto GASBOL.	41
Tabela 6 - Configurações do Exemplo 1.	43
Tabela 7 - Configurações do Exemplo 2.	44
Tabela 8 - Sentido do escoamento das tubulações do Exemplo 2.	44
Tabela 9 - Vazões da entrada e saídas	45
Tabela 10 - Comprimentos e diâmetros internos das tubulações.	45
Tabela 11 - Sentido do escoamento das tubulações.	46
Tabela 12 - Resultados da Rede de pequena dimensão.	47
Tabela 13 - Características do GASBOL e elementos do HYSYS®.	48
Tabela 14 - Correntes dos trechos 1 e 2 simuladas no HYSYS®.	50
Tabela 15 - Correntes do trecho 1 simuladas no HYSYS®.	50
Tabela 16 - Correntes do trecho 2 simuladas no HYSYS®.	51
Tabela 17 - Exemplo 1 - Resultados.	53
Tabela 18 - Exemplo 2 - Resultados.	54
Tabela 19 - Resultados do HYSYS® x iiSE.	58

Nomenclatura

ε	rugosidade da parede
f	fator de atrito
μ	viscosidade do fluido
μ_g	viscosidade do gás
ρ	massa específica
ρ_g	massa específica do gás
ρ_m	massa específica da mistura
γ_g	densidade do gás
ω_i	fator acêntrico do componente i
Z	fator de compressibilidade do gás
A	área
A_t	área da tubulação
a_k	aceleração
D	diâmetro
E	fator de eficiência
E_{it}	energia interna total
em	energia por unidade de massa
g	gravidade
gz	aceleração da gravidade
h	entalpia
$\hat{h}$	entalpia por unidade de massa
h_f	perda de carga
i, j	índices de componentes em uma mistura
k_{ij}	parâmetro de interação binária entre os componentes i e j
L	comprimento
$\dot{m}$	vazão mássica

N	número total de mols na mistura = $\sum_{i=1}^{nti} Ni$
Ni	número de mols do componente i presentes na mistura
N_{Re}	número de Reynolds
n	número de mols
nc	é o número de componentes
ntc	número total de componentes no sistema
P	pressão
P_b	pressão base
P_{ci}	pressão crítica do componente i
P_i^{sat}	pressão de saturação do componente i
P_{pr}	coordenada de pressão pseudoreduzida
P_{pc}	coordenada de pressão pseudocrítica
P_r	coordenada de pressão reduzida
P_{std}	pressão padrão do gás
$\dot{Q}$	fluxo de calor
$\dot{Q}_a$	calor absorvido
$\dot{Q}_{pd}$	taxa padrão do escoamento de gás
$\dot{Q}_{sc}$	taxa de escoamento do gás
Q_{std}	vazão volumétrica padrão
q	transferência de calor para o fluido por unidade de massa
qg	vazão de gás
ql	vazão de líquido
R	constante individual do gás
T	temperatura
T_{am}	temperatura absoluta média
T_b	temperatura de base
T_{ci}	temperatura crítica do componente i

T_m	temperatura média
T_{pr}	coordenada de temperatura pseudoreduzida
T_{pc}	coordenada temperatura crítica
T_r	coordenada de temperatura reduzida
T_{ri}	temperatura reduzida do componente i
T_{std}	temperatura padrão do gás
t	tempo
u	energia interna
V	volume
v	velocidade
V_{ci}	volume crítico
V_m	volume molar do sistema = V / N
V_r	coordenada de volume reduzido
v_{sl}	velocidade superficial do líquido
v_{sg}	velocidade superficial do gás
v_{sm}	velocidade superficial da mistura
$\dot{W}$	potência total
$\dot{W}_t$	trabalho realizado pelo sistema
$\dot{W}_s$	trabalho realizado pelo fluido através de uma máquina
y_i	fração molar do componente i na mistura

1. INTRODUÇÃO

A produção de gás natural vem crescendo e tornando a sua participação cada vez mais imprescindível na matriz energética no mundo, devido as suas características de transporte e ambientais amigáveis. O gás natural é incolor, inodoro e mais leve que o ar, vem de uma mistura leve de hidrocarbonetos, onde é resultante de um processo sedimentar que ocorreu a milhões de anos, em que constitui em camadas de animais e vegetais soterrados, no qual permanecem em condições de temperatura e pressão intensas. Pode ser encontrado dissolvido em óleo (gás associado) ou de forma livre, que apresenta uma pequena quantidade de petróleo (gás não associado). Onde sua extração é feita por acumulações em rochas porosas, nos quais são localizados nas áreas terrestres ou marinhas, mais especificadamente em subsolos (WANG, 2009).

Segundo Ibrahim et al. (2000) o transporte de gás natural pode ocorrer de forma gasosa ou liquefeita; em curtas distâncias o transporte mais econômico é a via gasodutos. O transporte de gás natural liquefeito incorre em custos de liquefação independente da distância a ser percorrida. Um sistema de gasodutos é composto por: medidores de pressão e vazão, válvulas de controles, compressores. Durante o planejamento preliminar do gasoduto, os principais parâmetros para a tomada de decisão no investimento inicial do projeto da rede de distribuição de gás natural podem incluir a rota (origem e destino), o diâmetro do duto, o tipo do duto, o fluxo de massa, as despesas operacionais com a perda de pressão e estações de compressores (FRANKEL, 2010). A pressão do gás é reduzida devido ao atrito com a parede do duto durante a transferência de calor e entre o gás e o meio envolvente.

O desenvolvimento do sistema da rede de gasodutos é uma questão fundamental, a fim de satisfazer a crescente demanda dos diversos consumidores. Devido à complexidade de controle e verificação do comportamento de um gasoduto no decorrer do trajeto, impõe-se a necessidade de obter informações precisas e confiáveis sobre as condições da malha. O problema do fluxo da rede de distribuição de gás é devido a sua composição de equações não lineares, pois a relação entre o fluxo e a queda de pressão não é linear, o que dificulta a compreensão e leitura da malha de gasodutos (BRKIC, 2009). Portanto, é necessário um levantamento das equações que governam o escoamento, além de compreender suas correlações para o cálculo das propriedades do gás natural e da perda de carga. A modelagem computacional proporciona uma análise

quantitativa, a qual possibilita a verificação de possíveis eventuais alterações em relação aos principais parâmetros que norteiam o funcionamento do gasoduto (KELKAR, 2008).

A simulação de redes calcula as vazões e a perda de carga em cada trecho, muitas vezes por uma relação não linear. O resultado é um sistema de equações não lineares que é resolvido pelos métodos matemáticos adequados. Já existem ferramentas computacionais adequadas para resolver estes sistemas, que são os softwares de simulação de processos. São ferramentas computacionais que apresentam ao usuário um ambiente adequado para a resolução desses problemas, visando à economia de tempo e investimento. Estes podem ser divididos em: sequenciais modulares e orientados a equações. Neste trabalho foram utilizados o simulador HYSYS® da *Aspen Technology* (simulador sequencial modular) e o simulador iiSE – *Industrial Integrated Simulation Environment* (simulador orientado a equação) desenvolvida pela VRTECH Tecnologias Industriais. Por meio destas ferramentas, a proposta deste trabalho é estudar o comportamento de fluxo de redes de gasoduto e analisar a convergência apresentada pelos simuladores sequencial modular e orientado equação para redes em série e ramificadas.

2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é simular redes de gasodutos utilizando ferramentas computacionais disponíveis no mercado.

2.2. Objetivos específicos

01) Avaliar a aplicação de software sequencial modular (HYSYS®) na simulação de redes de gasodutos, lineares e com ciclos.

02) Avaliar a aplicação de software orientado a equações (iiSE) na simulação de redes de gasodutos, lineares e com ciclos.

03) Avaliar equações de estado na simulação de redes de gasodutos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente trabalho é seguida uma sequência similar: 1) definir os componentes, neste caso o gás natural; 2) avaliar a termodinâmica, são usadas equações de estado; 3) definir os componentes de uma linha; 4) modelagem e simulação; 5) apresentar as equações específicas para perda de carga em gasodutos e 6) estratégias de solução do sistema de equações final.

3.1. Cálculo das propriedades do gás natural

Um gás é definido como um fluido homogêneo de baixa densidade e viscosidade, que não tem volume definido, mas se expande preenchendo um recipiente onde for colocado. Para descrever o comportamento dos gases, o conhecimento das relações de pressão-volume-temperatura (PVT) e de outras propriedades físicas e químicas dos gases é essencial para a resolução de problemas de engenharia.

A partir das características do meio, as determinações das propriedades do gás natural podem ser obtidas pela equação de estado, conhecida como a equação Lei dos gases ideais ou por Equação de Clapeyron, em que se apresenta o comportamento do gás para todas as condições de pressão e temperatura. Porém se as medidas de pressão, temperatura e volume molar de um gás não confirmar a relação pressão-volume-temperatura (PVT), dizemos que o gás se desvia da idealidade. Na prática os gases não se comportam idealmente, principalmente quando ocorrem em condições de alta pressão e baixa temperatura. Então para o ajuste do desvio do comportamento de um gás real em relação ao modelo de um gás ideal, é inserido um fator empírico na equação dos gases ideais, sendo expressa por:

$$PV = ZnRT \quad (3.1.1)$$

sendo P é a pressão absoluta do gás, $\frac{kgf}{cm^2}$; V o volume, m^3 ; n o número de mols, $kg \text{ mol}$; T a temperatura absoluta do gás, K ; Z é o fator de compressibilidade do gás nas condições P e T , adimensional; R a constante individual do gás, $\frac{(\frac{kgf}{cm^2}) \cdot m^3}{kg \cdot K}$.

Van der Waals (1873) compreendeu que a equação dos gases ideais não se adaptava para um comportamento de um gás real. Na busca por uma equação que traduzir-se o desempenho dos gases reais, propôs a lei dos estados correspondentes, no qual explica as propriedades termodinâmicas e físicas associando das forças intermoleculares e relacionando-se as propriedades críticas, ou seja, todos os gases demonstram o mesmo comportamento quando submetidos às mesmas condições de temperatura, pressão e volume reduzidos. Então sendo expresso por coordenadas reduzidas:

$$P_r = \frac{P}{P_{ci}} \quad (3.1.2)$$

$$T_r = \frac{T}{T_{ci}} \quad (3.1.3)$$

$$V_r = \frac{V}{V_{ci}} \quad (3.1.4)$$

sendo P_r é a coordenada de pressão reduzida, T_r é a coordenada de temperatura reduzida e V_r é a coordenada de volume reduzido, e P_{ci} é a pressão crítica, T_{ci} é a temperatura crítica, e V_{ci} é o volume crítico.

Segundo Borges (2009), as estimativas das propriedades do gás que afetam significativamente na medição da vazão de gás, dentre os parâmetros mais afetados se encontra o fator de compressibilidade, Z . No caso de misturas, em vez das coordenadas reduzidas, o fator de compressibilidade pode ser obtido em função das coordenadas pseudoreduzidas P_{pr} e T_{pr} :

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (3.1.5)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (3.1.6)$$

sendo P_{pr} é a coordenada de pressão pseudoreduzida, T_{pr} é a coordenada de temperatura pseudoreduzida. As coordenadas de pressão e temperatura pseudocríticas são respectivamente, P_{pc} e T_{pc} , são representadas por:

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^{nc} y_i P_{ci} \quad (3.1.7)$$

$$T_{pc} = \sum_{i=1}^{nc} y_i T_{ci} \quad (3.1.8)$$

na qual y_i é a fração molar do componente i na mistura, nc é o número de componentes, P_{ci} e T_{ci} são respectivamente, a coordenada de pressão e temperatura críticas de cada componente da mistura.

O ábaco desenvolvido por Standing & Katz (1942), mostrado na figura 1, aplica-se a maioria dos gases, até mesmo aqueles que contêm pequenas quantidades de nitrogênio (N_2), dióxido de carbono (CO_2) e ácido sulfídrico (H_2S) (ROSA et al., 2006).

Figura 1 - Compressibilidade dos gases naturais.

Fonte: Standing & Katz (1942).

Desde o surgimento dos gráficos de Standing & Katz (1942), são bastante utilizados para a determinação do fator de compressibilidade, desenvolveram correlações para descrever e representar os gráficos de uma forma matematicamente. Nesse trabalho foi importante escolher uma equação que permita a análise de uma mistura de gases. As equações de estado mais utilizadas na indústria de gás natural são de Soave-Redlich-Kwong (SRK), Sarem e Peng-Robinson.

A equação de Sarem pode estimar o comportamento do gás natural a partir de uma formulação simples do fluido, no qual é necessário indicar o poder calorífico, a densidade e o percentual de CO₂.

Já as equações Soave-Redlich-Kwong (1972) e Peng-Robinson (1976) são as preferidas na modelagem de processos da indústria de petróleo e gás, pois sua estrutura matemática é simples. (CHVIDCHENKO, 2008). Contudo, não são adequadas para fluidos de alta densidade (JAMISON & UPP, 1954).

Em 1972, a equação Soave-Redlich-Kwong (SRK) foi proposta como um melhoramento da equação de estado de Redlich-Kwong (1949) e representada por:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a(T)}{V_m(V_m + b)} \quad (3.1.9)$$

sendo V_m é o volume molar do sistema, T é a temperatura, P é a pressão do sistema e R é a constante universal dos gases perfeitos. Os parâmetros da mistura $a(T)$ e b são definidos a partir de parâmetros dos componentes puros como segue:

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{ntc} N_i b_i \quad (3.1.10)$$

$$a(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{ntc} \sum_{j=1}^{ntc} N_i N_j \sqrt{a_i \phi_i(T)} \sqrt{a_j \phi_j(T)} (1 - k_{ij}) \quad (3.1.11)$$

$$b_i = 0,08664 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (3.1.12)$$

$$a_i = 0,42748 \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}} \quad (3.1.13)$$

$$\phi = \left[1 + (0,480 + 1,574\omega_i - 0,176\omega_i^2) \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{ci}}} \right) \right]^2 \quad (3.1.14)$$

sendo, N representa o número total de mols da mistura, N_i é o número de mols do componente i , ntc representa o número total de componentes no sistema, e T_{ci} e P_{ci} representam a temperatura e pressão crítica, respectivamente, do componente i . R

representa a constante universal dos gases perfeitos (8,314 J.K⁻¹.mol⁻¹). O fator acêntrico ω_i do componente i é definido através da expressão:

$$\omega_i = -1,0 - \log_{10} \left(\frac{P_i^{sat}}{P_{ci}} \right)_{T_{ri}} \quad (3.1.15)$$

na qual P_i^{sat} é a pressão de saturação do componente i, $T_{ri} = \frac{T}{T_{ci}}$ é a temperatura reduzida do componente i.

Assim, como Soave-Redlich-Kwong propôs um melhoramento da equação Redlich-Kwong, Peng-Robinson (1976) também apresentou um melhoramento da equação Soave-Redlich-Kwong. A forma da equação Peng-Robinson empregada neste trabalho está apresentada a seguir:

$$P = \frac{RT}{Vm - b} - \frac{a(T)}{Vm^2 + 2bV - b^2} \quad (3.1.16)$$

Os parâmetros $a(T)$ e b da mistura são definidos como:

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{ntc} N_i b_i \quad (3.1.17)$$

$$a(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{ntc} \sum_{j=1}^{ntc} N_i N_j \sqrt{a_i \phi_i(T)} \sqrt{a_j \phi_j(T)} (1 - k_{ij}) \quad (3.1.18)$$

$$b_i = 0,07779 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (3.1.19)$$

$$a_i = 0,45724 \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}} \quad (3.1.20)$$

$$\phi = \left[1 + (0,37464 + 1,54226\omega_i - 0,26992\omega_i^2) \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{ci}}} \right) \right]^2 \quad (3.1.21)$$

$$\omega_i = -1,0 - \log_{10} \left(\frac{P_i^{sat}}{P_{ci}} \right)_{T_{ri}} \quad (3.1.22)$$

As equações Peng-Robinson e a Soave-Redlich-Kwong descrevem uma mistura por meio de três parâmetros para cada componente puro: a temperatura crítica, a pressão crítica e seu fator acêntrico. Um parâmetro de interação (k_{ij}) é definido para cada par de compostos da mistura, e representa a interação binária entre os componentes i e j . São estimados a partir de dados experimentais de equilíbrio do sistema binário correspondente (CHVIDCHENKO, 2008).

A popularidade na indústria de petróleo e gás, das equações de van der Waals, Soave-Redlich-Kwong e Peng-Robinson deve-se por sua apresentação de forma polinomial e cúbica em relação ao volume. Já que possuem relativa facilidade de resolução (WEI & SADUS, 2000).

3.2. Gasodutos

O gasoduto é um tipo de transporte que emprega sistemas de dutos, constituídos em sua maior parte de cilindros ou tubos, (RODRIGUES, 2009). Estes dutos são classificados de acordo com: a) o seu material (aço, polietileno, ferro e dentre outros), ou b) em relação ao seu trajeto: marítimo, terrestre ou aéreo (TERZIAN, 2005). As figuras 2 e 3 mostram respectivamente dutos terrestres (*onshore*) e marítimos (*offshore*).

Figura 2 - Gasoduto terrestre de Taubaté.

Fonte: Webdutos Softwares Engenharia (2010).

Figura 3 - Gasoduto offshore.

Fonte: Oceânica Engenharia (2016).

Os processos para transportar o gás natural em termos de contexto da engenharia são considerados complexos devido a sua integração entre sistemas, tendo equipamentos anexados, tais como válvulas, unidades de compressão, estações de bombeamento, estação de distribuição, e todos os requisitos de uma instalação física, em que há necessidade de monitorar as especificações dos produtos, para que o transporte do gás seja eficaz (ARRUDA, 2006).

Os sistemas de gasodutos são constituídos por elementos: trechos de dutos, válvulas, compressores e acidentes (cotovelos, curvas, etc.). Segundo Sreeter e Wylie (1982) os sistemas de gasodutos simples podem ser divididos em:

- Série

As redes em série são aquelas que em trechos lineares de dutos são ligados uns aos outros, podendo ser de tamanhos ou de rugosidades diferentes. A perda de carga total na rede em série é igual à soma das perdas de carga de cada trecho dos dutos.

- Paralelo

As redes em paralelo são uma combinação de dois trechos de dutos ou mais que são interligados e o seu escoamento é dividido entre os trechos de dutos e depois é unificado. As perdas de carga são as mesmas em todos os condutos, ou seja, o gás se divide de forma a manter a perda de carga igual em cada duto, assim garantindo que a pressão no ponto de unificação seja igual para todo o sistema.

- Ramificadas

As redes ramificadas apresentam um único sentido para o escoamento, ou seja, da tubulação principal para as extremidades. O inconveniente de estar usando esse tipo de rede é a sua dependência das derivações em relação ao duto principal. Como por exemplo, em questões de manutenção, para efetuar um reparo no trecho, todo o ramal a jusante ficará sem gás. Para o cálculo da perda de carga é necessário saber as variações de vazões da jusante para montante, pois ao longo do escoamento existem diversas derivações, o gás vai sendo consumido e isto influencia diretamente na perda de carga reduzida (LENCASTRE, 1972).

- Malhada

As redes malhadas não são classificadas como sistemas simples, constituída por tubulações que formam anéis ou blocos em que a sua dinâmica de abastecimento permite uma maior flexibilidade em satisfazer a demanda. O cálculo da perda de carga não é direto em função da configuração da rede (PORTO, 2006). As figuras 4 e 5 ilustram as configurações dos tipos de rede mencionadas acima.

Figura 4 - Sistemas de gasodutos.

Fonte: Notas de aula – Rede de distribuição – Paiva (2014).

Figura 5 – Rede malhada.

Fonte: Notas de aula – Rede de distribuição – Paiva (2014).

O projeto de um gasoduto ou redes de distribuição de gás natural também deve levar em conta questões políticas, físicas, econômicas e ambientais. Quando definido a rota da linha de fluxo de gás desde o recebimento até o centro consumidor necessita analisar algumas propriedades dos elementos que irão compor o gasoduto, bem como a natureza e volume de gás para serem transmitidos, o tipo de terreno a ser atravessado, a rota da distribuição, o comprimento e diâmetro do duto, a compressibilidade do gás, temperatura, perda de carga, além dos parâmetros matemáticos para representação do escoamento (ABRAHAM et al. 2010).

Para se montar uma estrutura de abastecimento de gás, é necessário identificar a rota e seus pontos de interligação, desde o seu reservatório de gás até aos centros de consumo. Esses caminhos podem influenciar no percurso, visto que idealmente a trajetória deveria ser uma reta, mas por existir algumas restrições ambientais, geográficas, e na construção e montagem, não é possível traçar uma linha reta.

Além disso, as maiores descobertas estão localizadas em locais afastados ou em regiões *offshore*, onde é fundamental a construção de um gasoduto marítimo interligado ao gasoduto terrestre. A construção desse tipo de gasoduto é cara e robusta em relação aos gasodutos terrestres (LIU, 2009).

3.2.1. Vantagens e desvantagens do transporte de gasodutos

Vantagens

V.1. Estabilidade: os dutos utilizados no deslocamento do gás natural, são de grande resistência, durabilidade, e podendo atravessar em terrenos difíceis, bem como sob a água, permitindo assim de maneira segura o transporte de grandes quantidades de produtos.

V.2. Material: esse meio de transporte, tende a menor possibilidade de perdas ou furtos. Baixo custo de manutenção e operação.

V.3. Meio ambiente: é alternativa de transporte não poluente com baixo impacto ambiental.

Desvantagens

D.1. Investimento: requer alto custo de implantação, pois o devido a sua robusta instalação física.

D.2. Meio ambiente: ao mesmo tempo em que não possui um grande impacto ambiental no seu transporte, isso não elimina totalmente os riscos ambientais. Por grande parte ser de uma rede de distribuição de gás natural, acaba comprometendo algumas áreas com flora e fauna. Fora a probabilidade de poder haver algum acidente de explosão e vazamentos, e os danos serão graves (FERREIRA et al., 2005). Como a figura 6 mostra o acidente que ocorreu no estado de Sergipe.

D.3. Advertência: devido ao transporte ser continua, sem interrupção. Intensifica a influência das medidas de proteção, que têm sobre o risco do gasoduto.

Figura 6 - Explosão do gasoduto da operadora Petrobras.

Fonte: Portal da Globo TV (2014).

3.2.2. Especificação do gás natural para transporte

A especificação do gás natural, seja de origem nacional ou importada, é instituída pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através da Portaria ANP n° 104, como demonstrada na tabela 01 com as especificações de comercialização do gás natural em terras brasileiras, criada em 2002.

As normas *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *International Organization for Standardization* (ISO) devem ser empregadas a fim de caracterização do gás natural (MENDONÇA, 2000).

Tabela 1 - Especificação de comercialização do gás natural no Brasil.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	Limite ^{(1) (2)}			Método	
		Norte	Nordeste	Sul, Sudeste, Centro- Oeste	ASTM	ISSO
Poder calorífico superior ⁽³⁾	kJ/m³	34.000 a 38.400	35.000 a 42.000		D 3588	6976
	kWh/m³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,67			
Índice de Wobbe ⁽⁴⁾	KJ/m³	40.500 a 45.000	46.500 a 52.500		-	6976
Metano, mín.	% vol.	68,0	86,0		D 1945	6974
Etano, máx.	% vol.	12,0	10,0			
Propano, máx.	% vol.	3,0				
Butano e mais pesados, máx.	% vol.	1,5				
Oxigênio máx.	% vol.	0,8	0,5			
Inertes (N ₂ + CO ₂), máx.	% vol.	18,0	5,0	4,0		
Nitrogênio	% vol.	Anotar	2,0			
Enxofre Total, máx.	mg/m³	70			D 5504	6326-2 6326-5
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx	mg/m³	10,0	15,0	10,0	D 5504	6326-2 6326-5
Ponto de orvalho de água a 1 atm. Max.	°C	-39	-39	-45	D 5504	-

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, (2002).

A Portaria ANP n° 104, regulamenta que o gás natural deve estar tecnicamente isento, ou seja, não deve haver traços visíveis de partículas sólidas e partículas líquidas. Algumas observações da tabela:

(1) Limites especificados são valores referidos a 293,15 K (20°C) e 101,325 KPa (1 atm) em base seca, exceto ponto de orvalho

(2) Os limites para região norte se destinam às diversas aplicações, exceto veicular e, para esse uso específico, devem ser atendidos os limites equivalentes à região nordeste.

(3) O poder calorífico de referência de substância pura, empregado nesse regulamento técnico, está em condições de temperatura e pressão equivalente a 293,15 K, 101,325 KPa, respectivamente, em base seca.

(4) O índice de Wobbe (quociente entre o poder calorífico superior do gás e a densidade relativa nas mesmas condições de temperatura e pressão de referência) é calculado empregado o calor calorífico em base seca. Quando o método ASTM D 3588²⁵ for aplicado para a obtenção do poder calorífico superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado pela fórmula constante do regulamento técnico. O gás odorizado não deve apresentar teor de enxofre total superior a 70mg/m³.

3.2.3. Normas de Qualidade

Diante das probabilidades de riscos, normas são fornecidas afim de orientar procedimentos obrigatórios para aplicar um projeto de dutos. Dentre elas, existe a norma Brasileira para ao projeto de dutos, a NBR 12.712 – Projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível.

Outro procedimento exigido é a N-464 H – Construção, montagem e condicionamento de dutos terrestres, do Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras), principal operadora do ramo no mercado brasileiro. Os procedimentos têm como objetivo a sua construção, montagem, testes de condicionamento dos dutos, para que sejam cumpridos os requisitos técnicos (PESTANA et al., 2011).

3.3. Modelagem computacional

Na transferência do gás natural através de redes de distribuição ocorre uma queda de pressão devido ao atrito com a parede do duto de transporte, perda de carga nos componentes (válvulas, medidores e outros) e expansão do gás (MOHITPOUR et al. 2003; ALVES, 2014). As simulações de fluxos em dutos são utilizadas para otimizar, obter um controle de variáveis de interesse e apresentar uma estimativa das várias etapas

do processo. A complexidade das simulações vai depender do que o duto irá transportar e os tipos de fenômenos que devem se investigar.

A figura 7 apresenta os fatores que devem ser considerados para definir o modelo que será usado. Primeiro, é definido se o sistema é composto por uma ou mais fases. Os sistemas multifásicos caracterizam-se por uma complexidade maior (KOLEV, 2005). Outro fator determinante é se o fenômeno é dependente do tempo (transiente ou estacionário). Se estiver no estado estacionário, o modelo pode ser descrito por um conjunto de equações algébricas não lineares, já no estado transiente, o modelo é representado por um sistema de equações diferenciais parciais (BRATLAND, 2009).

Figura 7 - Parâmetros que afetam a complexidade da simulação de fluxo.

Fonte: Bratland (2009).

Os simuladores devem fornecer a possibilidade de configurar o modelo de simulação nas condições adequadas. Se o fluido apresenta uma formulação composicional, o simulador necessita ter a própria biblioteca de componentes, com as devidas propriedades que formarão o fluido, permitindo, então, o cálculo das propriedades da mistura de diferentes gases no interior do duto. O cálculo da mistura de gases é significativo na simulação, tendo em vista que muitas vezes pode existir dois ou mais pontos de injeção de gás natural e cada ponto podem apresentar características diferentes. Cada um destes fatores especifica um termo nos balanços de massa e energia. (MODISETTE, 2000).

Diversos simuladores estão disponíveis no mercado. Na tabela 02 estão alguns exemplos. A maioria desses simuladores só pode simular o fluxo com fase única.

Tabela 2 - Simuladores avançados encontrados no mercado.

Nome do Simulador	Comentários
Stoner Pipeline Simulator	Pacote de simulação com muitos módulos e escritórios de apoio em todo o mundo. Depende dos dados de P-V-T.
Flormaster	Integra-se com Matlab. Simula fase líquida e gasosa. Contém pacotes termodinâmicos. Não se concentra em sistemas relativamente complexos. São necessários dados de P-V-T.
FluidFlow3	Simulações de gás e líquidos. Vem com 850 fluidos pré-definidos em seu banco de dados. Compatível com fluidos não-newtonianos.
AFT Pipeline	Bem estruturado. Simulações no estado estacionário e transitória. Tem módulo separado para dados de P-V-T.
PipelineStudio	Extensa coleção de módulos de software para o projeto, análise, otimização e previsão de petróleo e rede de gás.
SIMONE	Simulação e otimização de sistemas de dutos de gás natural.
Hysys Pipesys	Licenciado separadamente do pacote de simulação de processo. Hysys é usado para projeto de gasodutos e análise.
PIPESIM	Um dos pacotes de simulação mais conhecidos e mais utilizados para fluxos multifásicos. Desenvolvidos para integrar bem com o Eclipse.

PIPEPHASE	Desenvolvido para simulação de redes complexas de gasodutos e poços. Simulações de duas e três fases.
PROFES	Modelos dinâmicos de várias fases que podem ser implementadas dentro do ambiente de Aspen Hysys. Fluxos multifásicos. Faz a execução e análise na fase transiente.
H2OCalc	Especializado em vários tipos de cálculos de dutos de água.
Atmos Pipeline Software	Envolvidos em todos os tipos de cálculos de gasodutos monofásicos.
GASWorkS	Desenvolvido por uma empresa de pequeno porte. Simulador de custo baixo para estado estacionário de rede de gás.
Flow Desk	Simulador de gasoduto. Concentra-se muito sobre a programação e previsão.
DPDL	Simulação de duas fases, fluxo isotérmico líquido-gás.

Fonte: Bratland (2009).

3.4. Equações de conservação para escoamento de dutos

Quando o gás flui através dos dutos, as equações básicas relativas para conservação de massa, conservação de energia, conservação de momento e termodinâmica devem ser obedecidas. Se houver componentes (compressores, válvulas e outros dispositivos) não tubulares no sistema de dutos, deve-se considerar a influência causada por esses componentes no fluxo.

Na modelagem matemática no escoamento compressível, a massa específica tende a variar significativamente, portanto a pressão e temperatura variam de forma substancial. A componente térmica da equação de energia não pode ser desprezada. Assim, os valores de fluxo e pressão de uma rede de gasodutos podem ser calculados usando as equações

de estado, conservação de massa, quantidade de movimento e energia (OUYANG, 1995). As equações (3.4.1), (3.4.2) e (3.4.3) representam a conservação de massa, quantidade de movimento e conservação de energia para um volume de controle, respectivamente.

3.4.1. Conservação de massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho \, dV + \int_{sc} \rho (v \cdot dA) = 0 \quad (3.4.1)$$

sendo ρ é a massa específica, v é a velocidade, t é o tempo A é a área e V o volume, os subscritos vc e sc nas integrais referem-se ao volume e superfície de controle, respectivamente.

3.4.2. Conservação de quantidade de movimento

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} (v \rho) dV + \int_{sc} v \rho (v \cdot dA) \quad (3.4.2)$$

sendo $\sum \vec{F}$ corresponde ao somatório de forças externas ao volume de controle.

3.4.3. Conservação de energia

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} (u + \frac{v^2}{2} + gz) \rho \, dV + \int_{sc} (h + \frac{v^2}{2} + gz) \rho (v \cdot dA) \quad (3.4.3)$$

sendo $\dot{Q}$ é o fluxo de calor, $\dot{W}$ é a potência total, u é a energia interna, h é a entalpia, gz é a aceleração da gravidade.

3.4.4. Compressão do gás natural

Wu et al. (2000) e Ríos-Mercado et al. (2006) indicam que o custo operacional global do sistema de rede de gasodutos é altamente dependente do custo de funcionamento das estações de compressão, representando entre 25% e 50% do orçamento operacional. Sendo assim, a estação de compressão é considerada como um dos elementos básicos no sistema de rede de gasodutos de gás natural.

Os compressores são estruturas mecânicas industriais de grande porte distribuídas ao longo da linha de dutos, com a finalidade de elevar a energia do gás natural pelo aumento de pressão, assim compensando as perdas provenientes do atrito com a parede interna do duto e do consumo próprio. São utilizados dois tipos de compressores na transferência de gás:

- Alternativos: é um mecanismo de deslocamento positivo, que executa através de um pistão em um movimento linearmente no interior de um cilindro equipado com válvulas de sucção e descarga. Normalmente são alimentados por mecanismos de gás ou elétricos;
- Centrífugos: São máquinas rotativas geradoras, em que transferem energia ao fluido por meio da aceleração do gás, para a transformação da energia cinética em energia de pressão, ou seja, são destinados a aumentar a energia utilizável dos fluidos elásticos pelo aumento de sua pressão dinâmica ou cinética. Utilizam turbina a gás ou motores elétricos como propulsores (LUBOMIRSKY, 2010).

A seleção do tipo de compressor a ser utilizado vai depender das condições de operação do gasoduto e a viabilidade econômica. As variáveis envolvidas são a capacidade e na potência requerida. Atualmente, é uma prática comum usar mapas de características do compressor para descrever o comportamento do desempenho do compressor. Alguns métodos estão disponíveis para ajudar na escolha, por exemplo, os diagramas de Mollier (KURZ e OHANIAN, 2003; RODRIGUES, 1991).

Pela primeira lei da termodinâmica ou a lei de conservação de energia, aplicada a um volume de controle fixo, vem que:

$$\dot{Q}a - \dot{W}t = \frac{dE_{it}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho em dV + \int \rho em (V \cdot dS) \quad (3.4.4)$$

sendo um valor positivo de $\dot{Q}a$ refere-se ao calor absorvido, $\dot{W}t$ de um valor positivo refere-se ao trabalho realizado pelo sistema. E_{it} é o valor da energia interna total e em representa a energia por unidade de massa, representada pela equação (3.4.4). A energia por unidade de massa atuando num sistema fluido é normalmente composta em três partes: energia interna (molecular), energia cinética e energia potencial.

$$em = \hat{u} + \frac{1}{2} V^2 + gz \quad (3.4.5)$$

sendo $\hat{u}$ é função da pressão e temperatura para uma substância pura simples, enquanto as energias cinética e potencial são propriedades cinemáticas.

Em regime permanente ($\dot{m} = \rho Q = \text{constante}$) a equação pode ser simplificada para:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_s}{\dot{m}} = q - w_s = \sum_{saída} \left(\hat{h} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) - \sum_{entrada} \left(\hat{h} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \quad (3.4.6)$$

Sendo $q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{dQ}{dm}$ é a transferência de calor para o fluido por unidade de massa. De forma análoga, $w_s = \frac{\dot{W}_s}{\dot{m}}$ representa o trabalho realizado pelo fluido através de uma máquina (bomba, turbina ou compressor), por unidade de massa, e $\hat{h} = \hat{u} + \frac{P}{\rho}$ é a entalpia por unidade de massa.

3.5. Equações simplificadas de escoamento

No decorrer dos anos, a indústria de gás natural progrediu em estudos de produção de gás e transporte em dutos. Existem diversas propostas na literatura que correlacionam vazão e perda de carga.

O fluxo de gás sofre uma perda de energia denominada como perda de pressão, causada pelo atrito na parede interna do duto, no qual pode ser observada entre dois pontos. Essa queda de pressão está diretamente relacionada ao fator de atrito; a influência da rugosidade relativa do duto (razão entre a rugosidade e o diâmetro) e das características do escoamento com as propriedades do fluido. Então se o fluido for muito viscoso ou quanto maior for a rugosidade da parede do duto, a perda de energia será elevada (TIAN & ADEWUMI, 1995).

Nos gasodutos geralmente são transmitidas taxas de escoamentos de gás em pressões elevadas. Para calcular a queda de pressão necessita de um valor numérico para o fator de atrito, tal que se torna inconveniente de ser implícita, requisitando métodos numéricos para obter o fator de atrito (MOKHATAB e SAEID, 2014). A determinação do fator de atrito pode ser feita pelo diagrama de Moody (1944), apresentado na figura 8 e dentre outras correlações. O diagrama de Moody é composto por zona laminar, transição, parcialmente turbulenta e totalmente turbulenta.

Figura 8 - Gráfico de Moody.

Fonte: Brunetti (2008).

Com a finalidade de analisar o escoamento em dutos, a equação de Darcy-Weisbach é uma das equações mais antigas e utilizada para o cálculo de perda de carga em dutos, no qual depende do número de Reynolds (N_{Re}) que correlaciona com a rugosidade relativa do tubo ($\frac{\varepsilon \text{ (rugosidade da parede)}}{D \text{ (diâmetro interno do tubo)}}$). As correlações são dadas por:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2gz} \quad (3.5.1)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.5.2)$$

sendo h_f é a perda de carga, m ; f é o fator de atrito, adimensional; L é o comprimento do duto, m; gz é a aceleração da gravidade, m/s²; N_{Re} é o número de Reynolds, adimensional; D é o diâmetro do tubo, m; v é a velocidade do fluido, m/s; ρ é a massa específica do fluido, kg/m³; e μ é a viscosidade do fluido, Pa.s.

Quando o número de Reynolds atinge ou excede o valor de 2.000 o escoamento é considerado turbulento, e por este trabalho estar utilizando um fluido compressível, no

caso o gás natural, seu escoamento em geral é turbulento. Kennedy (1993) apresentou para gases um número de Reynolds mais conveniente para a indústria de gás, é expressa por:

$$N_{Re} = \frac{0,7105 P_b \gamma_G Q_{sc}}{T_b \mu_G D} \quad (3.5.3)$$

sendo D é o diâmetro do tubo, in; Q_{sc} é a taxa de escoamento do gás, padrão ft³/dia; μ_g é a viscosidade do gás, cp; P_b é a pressão de base, psia; T_b é a temperatura de base, °R; e γ_g é a densidade do gás, adimensional.

Colebrook (1939) desenvolveu uma correlação para o fator de atrito através de dados experimentais. A correlação é dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{N_{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.5.4)$$

Moody (1944) apontou que a equação de ColeBrook é apropriada para cálculos do fator de atrito para número de Reynolds acima de 2.000. A equação (3.5.4) é inserida na maioria dos softwares de simulação (MOKHATAB e SAEID, 2014).

Beggs e Brill (1973) propuseram uma equação para estimar a queda de pressão em uma seção tubular em estudo, no qual é dada por:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{f \rho_m v_{sm}^2 + \rho_m g \sin \theta}{1 - a_k} \quad (3.5.5)$$

Durante o escoamento de gás, a vazão aumenta, ocasionando um fluxo caótico, que promove uma grande agitação entre as moléculas, consequentemente maior atrito. Com isso, a perda de carga sofrerá uma influência direta sobre as componentes de aceleração (BRILL e MURKEJEE, 1999). O termo a_k representa a contribuição da queda de pressão pela aceleração.

$$a_k = \frac{v_{sm} v_{SG} \rho_G}{P} \quad (3.5.6)$$

$$A_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.5.7)$$

$$v_{sG} = \frac{q_G}{A_t} \quad (3.5.8)$$

$$v_{sL} = \frac{q_L}{A_t} \quad (3.5.9)$$

$$v_{sm} = v_{sL} + v_{sG} \quad (3.5.10)$$

sendo A_t é a área da tubulação, v_{sL} é a velocidade superficial do líquido, v_g v_{sg} é a velocidade superficial do gás, v_{sm} é a velocidade superficial da mistura, P é a pressão, ρ_g é a massa específica do gás, ρ_m é a massa específica da mistura.

No escoamento em dutos é comum alguns problemas envolvendo processos particulares, como: adiabático, isentrópico, isotérmico, irreversível e reversível. Resumidamente, o processo isotérmico é aquele no qual a temperatura do sistema se mantém uniforme e constante com o tempo. O processo adiabático é aquele no qual não ocorre a troca de calor entre o sistema e o exterior; já o processo isentrópico é o processo adiabático reversível, ou seja, de entropia constante.

Segundo Ikoku (1984), a equação (3.5.11) é satisfatória para um gasoduto longo. Por existir as perdas por arrasto. Assim, na expressão da taxa-padrão do escoamento de gás é conveniente introduzir o fator de eficiência E , então compensando as perdas extras. Os fatores de eficiência podem variar de 0,6 a 0,95, dependendo do teor de líquido nos gasodutos. São requeridos normalmente em escoamentos parcialmente turbulentos e totalmente turbulentos, pois na região laminar quase não existe perdas extras, logo não necessita do fator de eficiência E .

Segundo Uhl (1965) e Schroeder (2001), considerando o escoamento isotérmico e que não há indícios de elevação, a equação integrada de Bernoulli é expressa por:

$$Q_{pd} = C \left(\frac{T_{std}}{P_{std}} \right) D^{2,5} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{f \gamma_g T_{am} Z L} \right)^{0,5} E \quad (3.5.11)$$

Sendo Q_{pd} é a taxa padrão do escoamento de gás medida na temperatura e pressão de base, ft³/d; T_{std} é a temperatura padrão do gás, 519,6°R(15°C); P_{std} é a pressão padrão do

gás, 14,7 psia (1 atm); P_1 e P_2 respectivamente são as pressões de entrada e saída do gás, psia; D é o diâmetro interno do duto, polegadas; f é o fator de atrito de Moody; E é o fator de eficiência do escoamento; γ_g é a massa específica do gás; T_{am} é a temperatura absoluta média do gasoduto, °R; Z é o fator de compressibilidade; L é o comprimento do duto, milhas; C é uma constante para as unidades específicas utilizadas, 77,54.

Dentro da integral da equação (3.5.11) de escoamento de gás, o fator de atrito de Moody, f , é uma função altamente não linear. A partir do fator de atrito de Moody foram estudadas as possibilidades de estabelecer aproximações, para que permitir que a sua solução fosse resolvida diretamente, em vez de iterativamente (IKOKU, 1984).

As aproximações do fator de atrito de Moody como a de Panhandle-A e B, e IGT podem ser usadas através da equação (3.5.12) e a de Weymouth pode ser usada pela equação (3.5.13) em que “c” e “d” são constantes. Essas constantes são representadas pela tabela 3.

$$f = c (N_{Re})^{-d} \quad (3.5.12)$$

$$f = c (D)^{-d} \quad (3.5.13)$$

Sendo D é o diâmetro interno e o N_{Re} é o número de Reynolds.

Tabela 3 - Constantes das equações (3.5.12) e (3.5.13).

Equação	C	D
Weymouth	0,032	0,333
Panhandle A	0,085	0,147
Panhandle B	0,015	0,039
IGT	0,187	0,2

Fonte: (OUYANG & AZIZ, 1995).

As aproximações foram aplicadas no cálculo da vazão volumétrica normal e da queda de pressão no duto. Quando se substitui f na equação de escoamento, resulta na

equação (3.5.14), ressaltando os modelos de Weymouth, Panhandle-A, Panhandle-B e IGT, a equação é dada por:

$$\dot{Q}_{sc} = \frac{a_1 \left(\frac{T_{std}}{P_{std}} \right) E (P_1^2 - P_2^2)^{0,5} D^{a_2}}{(\gamma_G)^{a_3} (T_m Z L)^{a_4} (\mu_G)^{a_5}} \quad (3.5.14)$$

Sendo a1, a2, a3, a4 e a5 são constantes em função das aproximações de fator de atrito, e da equação de escoamento de gás. São apresentas na tabela 4.

Tabela 4 - Constantes da equação (3.5.14).

Equação	a1	a2	a3	a4	a5
Weymouth	433,46	2,667	0,5000	0,5000	0,0000
Panhandle A	403,09	2,619	0,4603	0,5397	0,0793
Panhandle B	715,35	2,53	0,49	0,5100	0,02
IGT	307,26	2,667	0,4444	0,5556	0,1111

Fonte: (OUYANG & AZIZ, 1995).

Maddox e Erbar (1982) recomendam a utilização das equações de Weymouth, as de Panhandle A e B, e IGT nas seguintes situações:

- Weymouth: muito utilizada em projetos de sistemas de distribuição de gás e em escoamentos totalmente turbulentos, com grandes vazões e de grandes diâmetros (>24 in). Costuma superestimar a queda de pressão e usualmente é aplicada nos cálculos de distribuição em rede por uma questão de segurança no cálculo das quedas de pressão.
- Panhandle – A: utilizada em escoamentos parcialmente turbulentos e com vazões moderadas, operando em pressões média a alta (800 a 1500 Psia) aplicável em diâmetros médios a relativamente grande (12 a 60 in).
- Panhandle – B: utilizada em escoamentos totalmente turbulentos, com vazões elevadas, e opera com pressões elevadas (>1000 Psi ou 68 atm), aplicável em diâmetros grandes (>36 in).

- IGT: utilizado para vazões médias, diâmetros médios e opera em altas pressões em escoamento parcialmente turbulento.

3.6. Estratégias de solução

Ao projetar sistemas de distribuição de água, ar comprimido ou de gás, é necessária uma análise das plantas de processamento, fluxo e da pressão em redes de tubulação. Portanto é de suma importância a avaliação de condutos na engenharia de processos.

Uma rede de distribuição é formada por elementos que são conectados uns aos outros por nós e cada elemento é associado com um nó a montante e um a jusante (GREWENSTEIN e LAURIE, 1994). Os números são usados para identificar cada nó e elemento.

Figura 9 - Apresentação gráfica de uma rede.

Fonte: Grewenstein e Laurie (1994).

Segundo Dolan et al. (1993) assim como em redes elétricas, as leis de Kirchhoff podem ser aplicadas a rede de gasodutos. O modelo pode resultar em sistema algébrico de equações não lineares, que pode ser resolvido de duas formas:

- Equilibrar as perdas de cargas associadas a cada tubo na rede com base nas equações de nó de continuidade (formulação do nó);
- Equilibrar os fluxos assumidos associados a cada tubo usando as equações de continuidade de reciclo (formulação de malha).

A primeira lei de Kirchhoff é o estado que a soma das correntes que entram em uma junção de um elétrico iguala a soma das correntes que saem. Aplicando em redes de gasodutos a conservação de massa em um nó, tem-se que os somatórios dos fluxos que

entram no nó devem ser iguais ao somatório dos fluxos que saem do nó. As equações de conservação de massa e energia para o gás natural e de massa de uma espécie i são:

$$\sum_{e=1}^{ne} \dot{m}_e - \sum_{s=1}^{ns} \dot{m}_s = 0 \rightarrow \sum_{e=1}^{ne} Q_{std,e} - \sum_{s=1}^{ns} Q_{std,s} = 0 \quad (3.6.1)$$

sendo $\dot{m}$ é a vazão em massa, Q_{std} a vazão volumétrica padrão, Os subscritos e e s correspondem à “entrada” e “saída” do nó, respectivamente. ne e ns correspondem ao número de “entradas”, “saídas” do nó.

A segunda lei de Kirchhoff estabelece que a queda de tensão total em torno de um circuito fechado deve ser zero. Aplicando em redes de gasodutos de gás natural, a soma do momento é zero. Quando aplicadas para a análise de escoamento em dutos, essas formulações são modeladas com o auxílio de sofisticadas técnicas de programas de simulação computacional, permitindo prever as incógnitas, as taxas de fluxos e pressões em cada nó (KEN-WORGU, 2008).

Os primeiros métodos para solucionar os problemas de rede de tubulação foram propostos por Hardy Cross em 1936, em que descreve dois métodos:

- Resolver as equações de reciclo com base no ajuste de taxas de fluxos para equilibrar individualmente as quedas de pressão em torno de um reciclo fechado;
- Ajuste na pressão em cada nó para que a equação da continuidade seja satisfeita.

Os cálculos de ajustes são independentes uns dos outros, conforme o resultado da convergência por vezes lenta ou inexistente em alguns casos. Com base nesse estudo, buscou-se ao longo dos anos uma melhoria nos procedimentos em relação ao método de Hardy-Cross. Com o advento da era digital, o interesse em algoritmos de resolução de redes se intensificou, mas não só porque se tornou possível à implementação de grandes redes em computadores, mas, sobretudo devido à possibilidade de otimizar projetos (CHANDRASHEKAR e STEWART, 1975).

3.7. Simuladores modulares e orientados equações

Os simuladores de processos são programas computacionais designados aos usuários e indústria para a resolução de problemas complexos na modelagem de processos de engenharia químicos, petroquímicos e de projetos de equipamentos, proporcionando

economia de tempo e investimento. Possuindo uma biblioteca de banco de dados de modelos termodinâmicos e equipamentos, apresentando como a principal função executiva de controle, acompanhamento e dimensionamento das informações dos cálculos de um fluxograma de processos elaborados pelos usuários (TOWLER; SINNOTT, 2007).

No final da década de 60, grandes corporações da indústria de petróleo e gás desenvolvem seus próprios programas para simulação de processos. Em 1976 o departamento de energia dos Estados Unidos junto com o Instituto de Tecnologia de Massachusetts MIT lança o projeto Sistema Avançado de Engenharia de Processos – ASPEN. Desde então, novos conceitos, interfaces gráficas, linguagens de programação vem avançando e ficando mais influentes no mercado dos *softwares* de processos (RODRIGUES, 2013).

Ao decorrer dos anos, diversos estudos fomentam a necessidade para as simulações de processos químicos, petroquímicos e de conversão de energia. Como o trabalho de Costa et al. (1998) desenvolveram um simulador de gasoduto para um estado estacionário, em que as equações de fluxo e de conservação de energia fossem resolvidas de maneira acoplada na intenção de investigar as diferentes soluções nas condições de fluxo isotérmico e adiabático.

Os simuladores de processos podem-se ser classificados em dois tipos básicos: os sequenciais modulares, os orientados a equações (também conhecidos como globais ou simultâneos). Os simuladores sequenciais modulares foram a primeira estratégia usada na engenharia de processos, e ainda domina o mercado dos simuladores em estado estacionário. Seu funcionamento consiste na separação das equações em blocos, que são representativos de uma operação unitária, que são chamados de módulos. Cada equipamento contém um código computacional próprio, assim possibilitando a resolução de seus cálculos. A definição das variáveis é feita pela lógica do que é conhecido e do que é desejado, dessa maneira o conjunto é resolvido individualmente e seguindo a sequência do processo, ou seja, numa sequência pré-estabelecida, daí o nome modular sequencial (VRTECH, 2015). O software HYSYS® da *Aspen Technology* é um exemplo de simulador sequencial modular. Ele possibilita o estudo completo de uma simulação, seja estacionária, dinâmica, controle regulatório e avançado em um mesmo ambiente de desenvolvimento. É capaz de prever o comportamento de processos utilizando-se de

relações de engenharia, tais como balanço de massa e energia, equilíbrio químico e de fases, e cinética de reações.

Segundo Rodrigues (2013), as vantagens de utilizar a estratégia sequencial modular são:

- Facilidade de programação e manutenção;
- Possui uma flexibilidade de controle e de convergência;
- Tem o poder de dispor algoritmos especializados, ou seja, cada equipamento tem seu código computacional específico e normalmente o código é muito robusto para aquele tipo de equipamento e uma solução numérica é encontrada com bastante frequência.

As desvantagens do sequencial modular são:

- Necessidade de análises sistemáticas para inicialização de correntes de amarração;
- Dificuldades para tratar sequências de cálculo
- Não adequada para simulação dinâmica de sistemas com ciclos.

Os simuladores orientados a equações são de uma tecnologia mais recente, e consiste no agrupamento de todas as equações em um único conjunto, ou seja, onde os modelos de cada equipamento, ao invés de ter um código próprio, compõem-se de um conjunto de variáveis e equações associadas ao processo. Então o simulador resolve as equações simultaneamente para todas as incógnitas (VRTECH, 2015). A estratégia orientada a equações tem como vantagens uma flexibilidade melhor em termos de tratamento de ciclos ou fortemente integrada, não há necessidade de correntes de amarração. Em compensação possui maior esforço computacional, dificuldades para tratar sistemas com muitas equações.

Desta forma, tem-se total liberdade na definição das incógnitas, ou seja, no lugar de informar dados de entrada e calcular as saídas, é possível fazer o processo inverso, o que torna essa abordagem mais apropriada para projeto de rede de gasodutos. Pode-se citar como exemplo de simulador de processos orientados a equações o iiSE - Ambiente de Simulação Industrial Integrado. Possui um banco de dados físicos e termodinâmico atualizados para assegurar uma boa representação do comportamento da substância pura

e da mistura. O simulador iiSE apresenta-se continuamente em desenvolvimento, então qualquer *feedback* ao desenvolvedor é apreciado.

Nas metodologias encontradas na literatura para o cálculo de redes, observa-se um cenário em desenvolvimento de softwares e de métodos. O atual cenário então constata que há poucos simuladores que possam resolver simultaneamente os cálculos necessários para atingir a convergência em uma rede de tubulações (RAONI, 2013).

É possível encontrar na literatura diversas referências sobre simulação de redes de condutos com fluidos incompressíveis, como os trabalhos de Gostoli e Spadoni (1985), Houache et al. (1996) e de Beck e Boucherb (1997), em que o principal objetivo desses trabalhos é determinar pressões e taxas de fluxo. Contudo, a literatura sobre simulações e estudos de rede de condutos com fluidos compressíveis é escassa (GREYVENSTEIN e LAURIE, 1994).

3.8. Análises termohidráulicas

As análises termohidráulicas auxiliam no melhor detalhamento do modelo e o emprego das equações de escoamento nas simulações, visto que durante o planejamento da rede de gasodutos, a tomada de decisão remete a investimentos altos, com elas é possível verificar o impacto e prever cenários futuros.

Segundo o Núcleo de Simulação Termo hidráulica de Dutos da PUC-Rio - SIMDUT (2013) “um modelo de simulação termohidráulica é a tradução das características físicas do gasoduto para um modelo matemático, que emprega a solução de equações de escoamento de fluido em um duto, para prever o comportamento do mesmo”.

Para a formar um modelo de simulação termohidráulica nos simuladores, são necessários alguns elementos que caracterizem, no mínimo, os seguintes equipamentos: dutos, pontos de entrega e recebimento, estações de compressores, válvulas de controle e bloqueio e trocadores de calor (SIMDUT, 2013).

Diante deste cenário, as análises termohidráulicas tornam-se uma ferramenta indispensável para definição das novas condições operacionais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para executar a simulação de gasodutos foi necessário primeiramente traçar uma rota das tubulações, introduzir as propriedades termodinâmicas, bem como os trechos e

nós. Após essa etapa, a modelagem precisa de alguns modelos que representem, no mínimo, os seguintes equipamentos: dutos, estações de compressões, pontos de entrega e recebimento, singularidades e trocadores de calor. Determinados programas de simulação podem não apresentar alguns dos equipamentos citados acima, porém podem possuir elementos genéricos que permitam ser configurados através de recursos de programação disponibilizados no simulador.

Inicialmente, realizou-se uma análise das peculiaridades da problemática da distribuição do gás natural. Foi possível definir, dentro de uma visão sistêmica, quais as variáveis mais importantes que estão relacionadas diretamente ao processo de implantação de infraestruturas para sua distribuição. A etapa seguinte objetivou em definir qual o modelo para realizar as simulações, que possibilita uma elaboração de resultados permitindo analisar quais as variáveis que influenciam no escoamento nos gasodutos e a usabilidade do uso dos simuladores.

O uso de softwares de simulação tem um amplo campo de aplicação na indústria. Com propriedades físicas confiáveis, dados termodinâmicos, condições operacionais realistas, diferentes modelos de arranjos foram simulados em dois diferentes simuladores um comercial Aspen HYSYS® e o outro não comercial iiSE.

4.1. Simulação 01 – GASBOL

Desde os anos 1980, o Brasil vem estudando fontes alternativas de energia, e dentre esses caminhos foram escolhidos a importação do gás da Bolívia no qual se deu o projeto GASBOL - Gasoduto Bolívia-Brasil (CARVALHINHO FILHO, 2003).

O projeto GASBOL abrange uma extensão total de 3.150 km, onde 2.593 km são de trecho brasileiro e outros 557 km restante em trecho boliviano. A figura 10 mostra o gasoduto GASBOL, tendo início no Rio Grande (Bolívia), por onde percorre até Puerto Suarez (Bolívia), dando entrada no território brasileiro através de Corumbá (MS), em que atravessa o Mato Grosso do Sul e o norte de São Paulo, se desloca até Paulínia onde ocorrem duas ramificações. Uma com destino a Guararema (SP), interligando o gasoduto Rio de Janeiro – São Paulo, e a outra ramificação segue de Paulínia, São Paulo até o Rio Grande do Sul (SCANDIFFIO, 2001).

Figura 10 - Gasodutos de importação de gás natural da Bolívia-Brasil.

Fonte: Gosmann (2011).

Primeiro foi simulado no HYSYS® um modelo simples com sistema aberto. Baseado nas informações técnicas do GASBOL, a partir do lado brasileiro, a rede de distribuição dos dutos que são tubulações de diâmetro de 24 (609,6mm) polegadas e *Schedule* 40, bem como seus distintos trechos e equipamentos. As vazões médias e perfis de pressão (tabela 5) variam similarmente de acordo com documento disponibilizado na Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil – TBG, que é a firma proprietária e operadora em solo brasileiro do GASBOL (TBG, 2014).

Tabela 5 - Informações técnicas do gasoduto GASBOL.

Trecho	Diâmetro Nominal (Polegadas)	Pressão (kgf/cm ²)	Comprimento (km)	Capacidade Nominal de Transporte (MMm ³ /d)
Paulínia – Guararema	24	75	SP – 153	9,30
Paulínia – Canoas Sul	24	100	SP – 341 PR – 130	12,57
	20	75	PR – 75 SC – 200	
	18		SC – 180	
	16		SC – 65 RS – 185	

Fonte: TGB (2014).

Todos os parâmetros hidráulicos necessários para o cálculo devem ser inseridos pelo usuário, devido ao fato do software ter valores preestabelecidos para diferentes tipos

de tubulações e singularidades. São adicionados compressores a fim de garantir o escoamento e manter a pressão do gás dentro dos limites operacionais. São considerados compressores do tipo centrífugos acionados por turbinas a gás. As pressões de trabalho máxima e mínima operacional admissíveis são respectivamente 150 Kgf/cm² ($1,471 \cdot 10^7$ Pa) e 30 Kgf/cm² ($2,942 \cdot 10^6$ Pa). Os cálculos termodinâmicos são feitos a partir da equação de estado Peng-Robinson. Consideram-se tubos de aço-carbono com rugosidade (0,00004572), dado sugerido pelo simulador.

O software HYSYS® disponibiliza alguns métodos numéricos para a solução do sistema de equações não lineares, que resulta da modelagem: iterações sucessivas, secante, Wegstein, Newton e Broyden. O método de Broyden é um método quase-Newton, que aproxima as derivadas por linearização e apresenta convergência rápida. É adequado para simulação de processos com múltiplas correntes de corte, tendo isso o método aplicado nesta simulação. O HYSYS® permite gerar relatórios e gráficos das simulações, podendo efetivamente criar análises termohidráulicas.

4.2. Simulação 02 – Teste preliminar - Exemplos típicos de redes

Apresentam-se dois exemplos típicos de redes afim de testar a eficiência de um simulador orientado a equação. As redes de distribuição são simuladas supondo um fluido incompressível, a água. Nos documentos disponibilizados pelos engenheiros e professores Carlos Fernandes de Medeiros Filho e Ed Carlo Rosa Paiva, os exemplos típicos foram resolvidos analiticamente usando métodos de aproximações sucessivas, como o método de Hardy Cross. Portanto, com o software acessível, não é preciso fazer a análise trecho por trecho. Então iremos verificar se o modelo pode ser resolvido simultaneamente para todas as incógnitas.

Foram considerados condições de temperatura e pressão padrões, respectivamente, 60 graus Fahrenheit (°F) e 14,6 psia. Na seleção das tubulações foi utilizado a correlação de Darcy-Weisbach, para a perda de carga. A equação de estado selecionado foi de Peng-Robinson.

Figura 11 - Exemplo 1.

Fonte: Medeiros Filho (2009).

Tabela 6 - Configurações do Exemplo 1.

TRECHO	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Vazão (L/s)
AB	0,250	1000	40
AF	0,200	800	25
BE	0,100	800	05
FE	0,150	1000	10
BC	0,200	1200	25
ED	0,100	1200	05
CD	0,100	800	05

Fonte: Medeiros Filho (2009).

Figura 12 - Exemplo 2.

Fonte: Paiva (2014).

Tabela 7 - Configurações do Exemplo 2.

TRECHO	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Vazão (L/s)	Elevação (m)
1 – 2	100	100	4,00	0,33
1 – 3	75	130	3,00	- 1,02
1 – 4	100	100	5,00	- 0,52
2 – 3	50	90	1,00	0,60
4 – 3	50	100	1,00	- 0,66
Vazão de entrada 1		12 (L/s)		
Vazão de saída 2		3,0 (L/s)		
Vazão de saída 3		5,0 (L/s)		
Vazão de saída 4		4,0 (L/s)		

Fonte: Paiva (2014).

Tabela 8 – Sentidos adotados no escoamento das tubulações do Exemplo 2.

TRECHO	Sentido adotado
1 – 2	→
1 – 3	→
1 – 4	→
2 – 3	→
4 – 3	→

4.3. Simulação 03 – Rede de pequena dimensão

Para aumentar o nível de complexidade e avaliar ciclos nos dois simuladores usados neste trabalho, utilizou-se uma pequena rede do trabalho de Yeh e Lin (2008). Raoni (2013) avaliou a mesma rede, através de diversas simulações (com fluidos compressíveis e incompressíveis), e os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com o de Raoni (2013). A rede é apresentada na figura 13.

Figura 13 - Rede de Pequena Dimensão.

Fonte: Raoni (2013).

As tabelas 09 e 10 retratam respectivamente as entradas e saídas, os valores de comprimento e diâmetro interno das tubulações da rede de pequena dimensão.

Tabela 9 - Vazões da entrada e saídas

E	0,4166 m ³ /s	S4	0,03833 m ³ /s
S1	0,03667 m ³ /s	S5	0,02500 m ³ /s
S2	0,04167 m ³ /s	S6	0,03333 m ³ /s
S3	0,23334 m ³ /s	S7	0,00833 m ³ /s

Fonte: Raoni (2013).

Tabela 10 - Comprimentos e diâmetros internos das tubulações.

Tubulação	Comprimento (m)	Tubulação	Diâmetro (mm)
P1	1000	P1	305
P2	1000	P2	305
P3	1100	P3	250
P4	1250	P4	405
P5	500	P5	200
P6	400	P6	400
P7	500	P7	200
P8	400	P8	355
P9	600	P9	355

P10	1100	P10	305
P11	1250	P10	305

Fonte Raoni (2013).

A rede de pequena dimensão possui onze tubulações e nove nós, logo a sua relação entre a vazão e a perda de carga não são lineares. São conhecidas sete vazões e uma pressão, resultando um sistema de equações não lineares. Pelo balanço de massa de nós e com a aplicação das leis de Kirchhoff, verifica-se que o problema, apresenta três graus de liberdade. Pela formulação apresentada por Martinez (1988) e Raoni (2013) tem-se $LF = Y - N + 1 = 3$, em que Y é o número de dutos, N o número de nós e LF os números de graus de liberdade (equações de reciclo). Logo, são necessárias três equações:

$$P_{finalDuto3} - P_{finalDuto4} = 0 \quad (4.1)$$

$$P_{finalDuto5} - P_{finalDuto6} = 0 \quad (4.2)$$

$$P_{finalDuto8} - P_{finalDuto9} = 0 \quad (4.3)$$

Na simulação foi necessário escolher os sentidos do escoamento dos dutos para poder formular as equações de diferença de pressão. Essa abordagem foi adotada devido à dificuldade de convergência para o cálculo destas pressões nas simulações de redes de malhas com reciclos (RAONI, 2013). Na tabela 11 são apresentados os sentidos do escoamento.

Tabela 11 - Sentido do escoamento das tubulações.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
←	↓	→	↓	→	↑	→	↓	↑	→	↓

Fonte: Raoni (2013).

Yeh e Lin (2008) simularam apenas para um fluido incompressível, no caso, água. Apresentaram apenas resultados de vazão. Isto porque o balanço de massa global da rede apresenta uma vazão dependente dentre as oito vazões que devem ser especificadas, ou

seja, não é possível determinar as pressões nos nós com apenas os dados de vazão como variáveis especificadas. Para resolver isso, Raoni (2013) utilizou como dado de pressão o valor de 10 kgf/cm²g e para cálculos de perda de carga aplicou-se a equação de Darcy-Weisbach, o presente trabalho também utilizou das mesmas condições.

O presente trabalho visa verificar se o simulador sequencial modular é capaz de resolver esta rede de gasodutos. Segue a tabela 12 com os resultados da simulação da rede de pequena dimensão relatados no trabalho de Raoni (2013).

Tabela 12 - Resultados da Rede de pequena dimensão.

Resultados da Simulação	
Tubulações	Pressão (kgf/cm ²)
P1	9,1529
P2	8,6763
P3	9,0792
P4	9,0792
P5	8,8836
P6	8,8834
P7	8,8805
P8	8,8847
P9	8,8847
P10	8,5968
P11	7,9428

Fonte: Raoni (2013).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam, a seguir, os resultados e as respectivas discussões das simulações executadas nesse trabalho.

5.1. Simulação 01 – GASBOL

As hipóteses consideradas para essa simulação foram: regime permanente, sistema adiabático e fluido compressível; no caso o fluido é gás natural. Para o cálculo da queda de pressão e do perfil de temperatura, foram sendo inseridos segmentos menores de gasoduto. O HYSYS® aceita tubos com tamanho limitado, para que a perda de carga não exceda 10% do valor inicial.

O trecho do GASBOL analisado está apresentado na Tabela 13. Cada elemento foi associado a um módulo do HYSYS®, por exemplo, o trecho de 60 km de tubulação foi inserido como Pipe no HYSYS®. Observe que não foram inseridos trechos com mais de 100 km, porque o software utiliza correlações que não devem ter mais de 10% de perda de carga.

Tabela 13 - Características do GASBOL e elementos do HYSYS®.

GASBOL	Elementos do HYSYS®
60 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-1
Válvula de controle	VLV-100
Compressor centrífugo com potência 37156,1 kW	K-100
50 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-2
Compressor centrífugo com potência 8814,38 kW	K-101
Divisor	TEE-1
40 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-3
100 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-4
Compressor centrífugo com potência 378,498 kW	K-102
Compressor centrífugo com potência 4394,75 kW	K-103
100 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-5
100 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-6
Misturador	MIX-100
30 km de tubulação com 24 polegadas	PIPE-7
Resfriador	E-100

A malha simulada é do tipo rede paralela como pode ser visto na Figura 14. Pode ser aplicado o cálculo sequencial modular, com a restrição de mesmo valor de pressão ao fim dos trechos paralelos, ou seja, no MIX-100. O trecho 1 é definido como o ramo superior da malha, PIPES 1-2-3-5-7. O trecho 2 é composto pelo ramo inferior: PIPES 1-2-4-6-7.

Figura 14 - Malha simulada de gasodutos GASBOL HYSYS®.

Os resultados podem ser vistos nas Tabelas 14, 15 e 16. Não foi observada nenhuma condensação nos trechos considerando a equação de estado de Peng-Robinson, já que só são observadas frações de vapor. Como o escoamento foi considerado adiabático, nota-se queda de temperatura ao longo da tubulação. Este resultado é coerente com uma transformação isentrópica, já que há uma variação de pressão associada à perda de carga.

Tabela 14 - Correntes dos trechos 1 e 2 simuladas no HYSYS®.

	Gás Natural	2	3	Compre_out	E_1	4	Compre_out_2
Fração de vapor	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Temperatura (°C)	30,00	15,55	14,98	167,9	40,00	35,92	38,08
Pressão (kPa)	6000	3394	3294	9216	9216	8148	8300
Fluxo molar (kgmole/h)	21150	21150	21150	21150	21150	21150	21150
Fluxo de massa (kg/h)	385100	385100	385100	385100	385100	385100	385100

Tabela 15 - Correntes do trecho 1 simuladas no HYSYS®.

	tee_1	pipe_tee_1	compre_out_tee_1	GN_tee_1	mixer_1	mixer_out_1
Fração de vapor	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Temperatura (°C)	38,08	36,65	37,44	15,55	38,08	38,08
Pressão (kPa)	8300	7939	6000	3394	8300	8300
Fluxo molar (kgmole/h)	12570	12570	21150	21150	21150	12570
Fluxo de massa (kg/h)	229000	229000	385100	385100	385100	229000

Tabela 16 - Correntes do trecho 2 simuladas no HYSYS®.

	tee_2	pipe_tee_2	compre_out_tee_2	GN_tee_2	mixer_1	mixer_out_1
Fração de vapor	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Temperatura (°C)	14,98	167,9	40,00	35,92	38,08	38,08
Pressão (kPa)	3294	9216	9216	8148	8300	8300
Fluxo molar (kgmole/h)	21150	21150	21150	21150	21150	12570
Fluxo de massa (kg/h)	385100	385100	385100	385100	385100	229000

As figuras 15 e 16 apresentam as efetivas análises termohidráulicas. Observam-se trechos de perda de carga seguidos de grandes saltos devido à recompressão, assim compensando as perdas provenientes do atrito com a parede interna do duto e do consumo próprio, admitidos nos compressores centrífugos. Também foram considerados resfriadores que estão presentes no projeto do GASBOL.

Os trechos finais da ramificação apresentam temperaturas diferentes, então, a temperatura da corrente final foi calculada por uma interpolação entre as temperaturas da ramificação.

Figura 15 - Análise termohidráulica do trecho 1 do GASBOL no HYSYS®.

Figura 16 - Análise termohidráulica do trecho 2 do GASBOL no HYSYS®.

Assim como em redes elétricas, o cálculo de determinados parâmetros para redes de gás, seguido pela lei de Kirchhoff, podem resultar em equações não lineares dificultando a implementação numérica. Foi observado durante a simulação que a equação de Peng-Robinson é mais precisa que Soave-Redlich-Kwong quando se aproxima do ponto crítico. Nas pressões moderadas os resultados entre as equações de Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong são similares.

Os resultados podem ser considerados bons, na trajetória decorrida. Observa-se que quanto mais robusta as simulações, a modelagem apresenta maiores tempos de computação. Nesse caso, a convergência foi obtida em poucas iterações (a partir de 5 interações).

5.2. Simulação 02 – Teste preliminar - Exemplos típicos de redes

O simulador iiSE demonstrou ser eficiente para redes com ciclos, é possível observar nos resultados da tabela 17, as comparações dos resultados entre o método Hardy-Cross utilizado nos exemplos típicos, com o uso do simulador iiSE, pode concluir-se que o simulador orientado a equação é eficiente com redes com ciclos.

Tabela 17 - Exemplo 1 - Resultados.

	Medeiros Filho (2009)	iiSE
TRECHO	Vazão (L/s)	
AB	40,00	40,85
AF	25,00	24,70
FE	10,00	10,12
BE	5,00	5,18
BC	25,00	25,33
ED	5,00	5,18
CD	5,00	5,35
SAÍDAS	Vazão (L/s)	
SA	30,00	29,45
SB	10,00	10,33
SC	20,00	23,49
SD	10,00	11,89
SE	10,00	10,50

SF	15,00	14,57
----	-------	-------

Tabela 18 - Exemplo 2 - Resultados.

	Paiva (2014)	iiSE
Tubos	Vazão (L/s)	
1 – 2	4,07	4,07
1 – 3	3,01	4,00
1 – 4	4,92	3,75
2 – 3	1,07	1,13
4 – 3	0,92	0,94
	Vazões de Saída (L/s)	
S2	3,00	2,92
S3	5,00	6,30
S4	4,00	3,71

Figura 17 - Malha simulada no iiSE - Exemplo 1.

iiSE

iiSE

iiSE

iise

de convergir, as vazões e pressões resultam em dados divergentes. Reiterando em que a estratégia sequencial modular é um método antigo. Aplicou-se o simulador orientado a equação iiSE que é o mais indicado para a resolução de problemas de redes. Assim, podendo alcançar as soluções sem demandar um esforço computacional.

Quando comparamos os resultados do iiSE com o trabalho de Raoni (2013), verificamos que a porcentagem de erro relativo está dentro dos padrões aceitáveis, apresentado cerca de 2,3%. As figuras 19 e 20 representam as simulações de rede de pequena dimensão realizadas nos simuladores HYSYS® e iiSE, respectivamente.

Figura 19 - Rede de pequena dimensão simulada no HYSYS®.

Figura 20 - Rede de pequena dimensão simulada no iiSE.

Tabela 19 - Resultados do HYSYS® x iiSE.

Resultados da simulação		
Raoni (2013)	Pressão (kgf/cm ²)	Resultados
	P1	9,1529
	P2	8,6763
	P3	9,0792
	P4	9,0792
	P5	8,8836
	P6	8,8834
	P7	8,8805
	P8	8,8847
	P9	8,8847
	P10	8,5968
	P11	7,9428

Vazão (m ³ /s)	
E	0,41667
S1	0,03667
S2	0,04167
S3	0,23334
S4	0,03833
S5	0,02500
S6	0,03333
S7	0,00833

Resultados da simulação		
HYSYS®	Pressão (kgf/cm ²)	Resultados
	P1	9,1529
	P2	9,152
	P3	9,152
	P4	9,152
	P5	9,152
	P6	9,152
	P7	9,152
	P8	9,152
	P9	9,152
	P10	9,152
	P11	9,152

Vazão (m ³ /s)	
E	0,41667
S1	0,03750
S2	0,04272
S3	0,05055
S4	0,00451
S5	0,02711
S6	0,03361
S7	0,03361

Resultados da simulação		
iiSE	Pressão (kgf/cm ²)	Resultados
	P1	9,1379
	P2	9,1276
	P3	9,1230
	P4	9,1230
	P5	9,0863
	P6	9,1116
	P7	9,1108
	P8	9,1225
	P9	9,1225
	P10	9,1246
	P11	9,1255

Vazão (m ³ /s)	
E	0,41667
S1	0,03760
S2	0,04170
S3	0,02320
S4	0,03800
S5	0,02500
S6	0,03340
S7	0,00700

6. CONCLUSÃO

Embora no atual cenário já existam diversos simuladores disponíveis para a realização de cálculos de rede, a maioria baseia-se na tecnologia modular sequencial. Esta estratégia impõe limitações ao usuário. Por exemplo, as especificações de variáveis de entrada requerem o uso de ferramentas adicionais, como *Pipe Segment* do Hysys®. Por outro lado, os simuladores orientados a equações, são mais flexíveis podendo resolver um número maior de problemas com núcleo básico do software.

O presente trabalho teve o intuito de verificar a eficiência dos simuladores modulares e orientados a equações na simulação de redes de gasodutos, tanto em série quanto ramificadas. O Hysys® é um dos simuladores de processos principais da indústria de energia e química, pois o seu sucesso se deve a facilidade de uso e o acolhimento entre o usuário e o ambiente de trabalho do simulador. Porém conforme citado na tabela 03, o Hysys® possui um pacote de licenciamento separado chamado *Hysys Pipe Segment* usado para análises de redes, no qual não foi utilizado nesse trabalho, pois a intenção era avaliar a utilização de softwares de livre acesso.

O simulador orientado a equações iiSE apresentou ser útil quando se tem um grande número de ciclos no sistema em relação ao simulador sequencial modular, pois para alcançar a convergência tem que quebrar o ciclo e interagir até que a convergência seja alcançada e por vezes não tendo sucesso, como mostrado na tabela 19. As soluções no iiSE não demandaram um amplo tempo computacional, o que favorece ao usuário e projeto.

7. REFERÊNCIAS

Aina, I. O. **Steady-State and Transient flow studies in Natural Gas Pipeline Networks**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual da Pensilvânia, 2006.

ANP - **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**.

ARRUDA, P.R.P. de. **Técnicas de construção e montagem de gasodutos**. Bahia: Escola Politécnica, 2006.

BECK, S. B., BOUCHER, R. F., **Steady State Analysis of Fluid Circuits Containing Three Port Devices**, Engenharia Química Pesquisa e Design, Volume 75, Volume 1, 1997.

BORGES, L.M. Edilso. **Avaliação de Correlações e Equações de Estado para Determinação de Fatores de Compressibilidade de Gás Natural**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade do Estado do Rio de Janeiro Instituto de Química, Rio de Janeiro, 2009.

BRATLAND, O. **Capítulo 1 – Pipe flow single phase**. Garantia de Fluxo Site. 2009. Disponível em: <<http://drbratland.com/PipeFlow1/chapter1.html>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

BRKIC, D. **An improvement of hardy cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks**. Editora Elsevier. Revista Applied Energy, v. 86, n. 7 – 8, p. 1290-1300. Jul – Ago. 2009.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2.ed. São Paulo: Editora Eugênia Pessoti, 2008.

CARVALHINHO, J. C. L. F. **O valor da flexibilidade em cláusulas “TakeorPay” de contratos para fornecimento de gás natural industrial**. Dissertação de Mestrado em Administração. Departamento de Administração, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

COSTA, A.L.H. **Steady State Modeling and Simulation of Pipeline Networks for Compressible Fluids**, Revista Brasileira de Engenharia Química, Volume 15, n. 4, 1998.

CHANDRASHEKAR, M., STEWART, K. H. **Sparsity Oriented Analysis of Large Pipe Networks**. Jornal da Divisão Hidráulica, v. 101, p. 341-355, 1975.

CHEN TI, H. **Mixed specification problems pipeline network analysis: partitioning methods**. Editora Elsevier. Jornal de Engenharia Química, v 44, p 89-95, 1990.

CHVIDCHENCKO, Vitor. **Estudo comparativo do desempenho das equações de estado CPA, SRK E PR na modelagem de sistemas de interesse para a indústria do gás natural**. Dissertação de mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/modelagem-de-sistemas-de-gas-natural.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2016.

DOLAN, A., ALDOUS, J. **Networks and Algorithms : An Introductory Approach**. Editora : John Wiley & Sons, 1993.

DONATELLI, J. L. **Otimização estrutural e paramétrica de sistemas de cogeração utilizando superestruturas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

FRANKEL, M. **Facility Piping Systems Handbook**. 3ed. McGraw-Hill, 2010.

GOSTOLI, C., SPADONI, G. **Linearization of the Head-capacity Curve in the Analysis of Pipe Networks Including Pumps, Computers and Chemical Engineering**. Editora Elsevier. Revista Computers & Chemical Engineering. V. 9, n. 2, p. 89. Dez., 1985.

GPSA **Engineering Data Book**. 11^o edição Tulsa, Oklahoma: Gas Processors Suppliers Association (GPSA), 1998.

GREYVENSTEIN, G. P., LAURIE, D. P. **A Segregated CFD Approach to Pipe Networks Analysis**. Editora : John Wiley & Sons. Revista Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia. V. 37, p. 3685-3705, 1994.

HOUACHE, O.; KHEZZAR, L. & BENHAMZA, M.H. **Matrix methods for pipe network analysis: Observations on partitioning and cut methods**. Engenharia Química Pesquisa & Design, vol.74A, pp.321-328, 1996.

JAMISON, W.H, UPP E. L. **Internal report Tenesse gas Transmission Co.**, 1954.

JEPPSON, R. W. **Analysis of Flow in Pipe Networks**. Editora: Ann Arbor Science, Michigan, 1977.

KELKAR, Mohan. **Natural Gas Production Engineering**. Editora: PennWell, Tulsa, Oklahoma, 2008.

KENNEDY, J.L. **Oil and Gas Pipeline Fundamentals**. Editora: PennWell. Segunda edição, Oklahoma, 1993.

KOLEV, Nikolay. **Multiphase Flow Dynamics Fundamentals 1**. Editora Springer, 2005.

KURZ, Rainer. ; OHANIAN, Sebouh. **Modeling turbomachinery in pipeline simulations**. Encontro Annual PSIG. 15 a 17 de out. Berna, Suíça, 2003.

LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1972.

MADDOX, R. N. **Gas Conditioning and Processing: Advanced Techniques and Applications**. Editora: Norman, Oklahoma: Campbell Petroleum Series, 1982.

MARTINEZ, J. M. **A powerful improvement on the methodology for solving large-scale pipeline networks**. Editora Elsevier. Revista Computers & Chemical Engineering. v. 12, n. 2/3, p. 261-265, 1988.

MEDEIROS FILHO, Carlos Fernandes de. **Engenharia Sanitária**. Universidade de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Notas de aula. Mimeografado.

MENDONÇA, M. J. C., GUTIEREZ, M. B. S. **O Efeito Estufa e o Setor Energético Brasileiro**. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/pub/td/2000/td_0719.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2015.

MOHITPOUR, M., GOLSHAN, H., MURRAY, A. **Pipeline Design and Construction: A Practical Approach**. Editora: Amer Society of Mechanical, Segunda edição, Set. 2003.

MOKHATAB, Saeid., WILLIAM, A. Poe. **Processamento e Transmissão de Gás Natural**. 2 edição. Editora Campus Grupo Elsevier, 2014.

OCEÂNICA ENGENHARIA. **Consultoria e Projetos**. Disponível em: <<http://oceanicabr.com/pt/empresa/>>. Acesso em: 06/02/2016.

OUYANG, L., AZIZ, K. **Steady-state gas flow in pipes**. Jornal da ciência e Engenharia de Petróleo. v. 14, p. 137, 1996.

DUPUIS, P., ROBERT, J. L., OUELLET, Y. **A modified element method for pipe network analysis**. Jornal de Pesquisa Hidraulica. p. 27 – 40, 1986.

PAIVA, Ed Carlo Rosa. **Rede de distribuição**. Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2014. Notas de aula. Mimeografado.

PESTANA, Creso; SANTO, E. Eniel. **Gasoduto: uma análise das etapas do projeto de implantação**. Vetor – Revista de Ciências Exatas e Engenharias. v.21, n.2, p. 44-59, 2011.

PORTAL DA GLOBO. **Explosão em gasoduto da Petrobras assusta moradores de Carmópolis, SE**. 2 Disponível em: <
<http://g1.globo.com/se/sergipe/noticia/2014/11/explosao-em-gasoduto-da-petrobras-assusta-moradores-de-carmopolis-se.html>>. Acesso em: 13/03/2016.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4.ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

RAONI, Rafael L. de Britto. **Nova metodologia para o cálculo de redes de tubulações com anéis**. Dissertação de Mestrado - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

RODRIGUES, A.C.M. **Aplicação de Processo Hierárquico na escolha de traçados de Dutovias**. Paraná: Instituto de Engenharia de Tecnologia, Departamento de Engenharia, 2009.

ROSA, A.J. et al. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

RÍOS-MERCADO, R. Z., KIM, E., BOYD, E. A. **Efficient operation of natural gas transmission systems: a network-based heuristic for cyclic structures**. Editora Elsevier. Jornal Computadores e Pesquisa de Operações. v. 33, p. 2323-2351, Ago. 2006.

RODRIGUES, Paulo Sergio. **Compressores industriais**. Editora EDC, 1991.

SCANDIFFIO, M.I.G. **A competitividade do gás natural no segmento de revestimento cerâmico brasileiro**. 137p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SIMDUT - Núcleo de Simulação Termo-hidráulica de Dutos. **Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação**. Relatório para agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis. 16 de set. 2003.

STANDING, M. B., KATZ, D. L., **Density of Natural Gases**. Jornal Avanços da Engenharia Mecânica (AIME), 1942.

STREETER, V. L.; WYLIE, E.B. **Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TBG – Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia Brasil. **Informações Técnicas do Lado Brasileiro**. 2014. Disponível em: < http://www.tbh.com.br/pt_br/o-gasoduto/informacoes-tecnicas.htm>. Acesso: 05/07/2016.

TERZIAN, R. Luiz. **Conceitos e Metodologias de Gestão de Projeto e sua aplicação ao caso da Integridade da Malha Dutoviária**. Dissertação de M.Sc. PUCRIO. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp075203.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

TIAN, S., ADEWUMI, M., A. **Development of an Analytical Design Equation for Gas Pipelines**. Sociedade dos Engenheiros de Petróleo. SPE Produção e Facilidades, p. 100-106, Mai. 1995.

VRTECH Tecnologia Industriais. **Manual do simulador iiSE**. 2015. Disponível em:<<http://vrtech.com.br/wp-content/uploads/2016/07/Manual.pdf>>. Acesso em: 12/12/2016.

WANG, X. ; ECONOMIDES, M. **Advanced Natural Gas Engineering**. Texas: Gulf publishing company, 2009.

WEBDUTOS SOFTWARES ENGENHARIA. **Relatório de vistoria Nº 041/SCM/2010**. Caraguatatuba, São Paulo. 2010. Disponível em: <<https://webdutos.com.br/gastau.html>>. Acesso em: 14/11/2016.

WEBDUTOS SOFTWARES ENGENHARIA. **Relatório de vistoria Nº 041/SCM/2010**. Caraguatatuba, São Paulo. 2010. Disponível em: <<https://webdutos.com.br/gastau.html>>. Acesso em: 14/11/2016.

WEI, Y. S., SADUS, R. J. **Equations of state for the calculation of fluid-phase equilibria**. Jornal AIChE, v. 46, p. 169-196, 2000.

WOOD, D., RAYES, A. **Reliability of algorithms for pipe network analyses**. Jornal da Divisão de Hidráulica, p.982– 991. 1981

WU, S., et al. **Model relaxations for the fuel cost minimization of steady-state gas pipeline networks.** Editora Elsevier. *Jornal Internacional Modelagem e Matemática Computacional*, 2000.

YEH, H. D., LIN, Y. C. **Pipe Network System Analysis Using Simulated Annealing,** *Jornal de Abastecimento de Água: Pesquisa e Tecnologia*. v.57, p. 317, 2008.