

	RELATÓRIO		Nº: RL-ANP-FPL-006																																																																		
	CLIENTE: ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS		FOLHA: 1 de 16																																																																		
	PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS		-																																																																		
	TÍTULO: Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação		-																																																																		
<p align="center">Faculdades Católicas – PUC-Rio – SIMDUT</p>																																																																					
<p align="center">ÍNDICE DE REVISÕES</p>																																																																					
REV.	DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS																																																																				
0	EMISSÃO ORIGINAL																																																																				
A	REVISÃO CONFORME COMENTÁRIOS DA ANP																																																																				
B	REVISÃO CONFORME COMENTÁRIOS DA ANP																																																																				
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>REV. 0</td> <td>REV. A</td> <td>REV. B</td> <td>REV. C</td> <td>REV. D</td> <td>REV. E</td> <td>REV. F</td> <td>REV. G</td> <td>REV. H</td> </tr> <tr> <td>DATA</td> <td>12/07/2013</td> <td>30/07/2013</td> <td>16/09/2013</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PROJETO</td> <td>ANP</td> <td>ANP</td> <td>ANP</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>EXECUÇÃO</td> <td>M. Casarin</td> <td>M. Casarin</td> <td>M. Casarin</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIFICAÇÃO</td> <td>P. Krause</td> <td>P. Krause</td> <td>P. Krause</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROVAÇÃO</td> <td>L. Pires</td> <td>L. Pires</td> <td>L. Pires</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>											REV. 0	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H	DATA	12/07/2013	30/07/2013	16/09/2013							PROJETO	ANP	ANP	ANP							EXECUÇÃO	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin							VERIFICAÇÃO	P. Krause	P. Krause	P. Krause							APROVAÇÃO	L. Pires	L. Pires	L. Pires						
	REV. 0	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H																																																												
DATA	12/07/2013	30/07/2013	16/09/2013																																																																		
PROJETO	ANP	ANP	ANP																																																																		
EXECUÇÃO	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin																																																																		
VERIFICAÇÃO	P. Krause	P. Krause	P. Krause																																																																		
APROVAÇÃO	L. Pires	L. Pires	L. Pires																																																																		
AS INFORMAÇÕES DESTE DOCUMENTO SÃO PROPRIEDADE DA ANP, SENDO PROIBIDA A UTILIZAÇÃO FORA DA SUA FINALIDADE.																																																																					

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B**

PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS

FOLHA 2 de 16

TÍTULO: Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

ÍNDICE

1	OBJETIVO	3
2	SIMULAÇÃO TERMOHIDRÁULICA	3
3	REQUISITOS DO SOFTWARE	3
3.1	CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA DO FLUIDO	4
3.2	CONFIGURAÇÃO DO FLUIDO	4
3.3	CÁLCULO DA VISCOSIDADE	5
3.4	SELEÇÃO DA EQUAÇÃO DE ESTADO	5
3.5	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PARA ESCOAMENTO EM DUTOS	6
3.6	FORMULAÇÃO PARA A QUEDA DE PRESSÃO	7
3.7	ABORDAGEM PARA A TRANSFERÊNCIA DE CALOR	9
3.8	REGIME PERMANENTE E TRANSIENTE	11
3.9	ELEMENTOS PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO TERMOHIDRÁULICA	11
3.9.1	Dutos e trechos de dutos	12
3.9.2	Ponto de recebimento	12
3.9.3	Ponto de entrega	13
3.9.4	Compressores	13
3.9.5	Válvula de bloqueio	14
3.9.6	Válvula de controle	14
3.9.7	Trocadores de Calor	14
3.10	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	14
4	CONCLUSÃO	15
5	BIBLIOGRAFIA	15



1 OBJETIVO

Definição dos requisitos para os programas de simulação computacional para a determinação do escoamento em gasodutos de transporte, baseado em modelo matemático representativo das condições físicas, operacionais e contratuais, visando fornecer subsídios para o cálculo de capacidade de gasodutos isolados ou em redes.

2 SIMULAÇÃO TERMOHIDRÁULICA

A construção e operação de um gasoduto são investimentos altos que devem levar em consideração as estimativas de mercado a médio e longo prazo. Para ajudar na tomada de decisão no que diz respeito ao dimensionamento e operação do gasoduto, as simulações termo-hidráulicas são de grande importância, pois com elas é possível verificar o impacto e consequências dos cenários estudados.

Durante a fase de dimensionamento, a escolha do traçado, diâmetro do duto, localização e características das estações de compressão são exemplos de atividades onde o emprego de simulações termo-hidráulicas agregam informações para a escolha da melhor opção.

Na operação do gasoduto, onde as características físicas do empreendimento já estão definidas, a utilização de simulações termo-hidráulicas permite verificar a segurança operacional, atendimento aos contratos, previsão de cenários futuros e até mesmo oportunidades novos de negócios.

Um modelo de simulação termo-hidráulica 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. O melhor detalhamento do modelo e a utilização de equações de escoamento mais sofisticadas são indispensáveis na busca de melhores resultados de simulação.

Diversos simuladores computacionais estão disponíveis no mercado e diferem quanto à sofisticação na construção do modelo que eles permitem. Os requisitos de um programa que se adeque às características do escoamento de gás natural em dutos e atenda às necessidades de simulação são detalhados nos itens a seguir.

3 REQUISITOS DO SOFTWARE

Um programa de simulação de escoamento compressível em gasoduto de transporte, na condição de regime permanente e transiente, unifásico e trabalhando de forma integrada (rede de gasodutos), deve permitir a configuração das seguintes características:

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 4 de 16**TÍTULO:** Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

- Condição de referência do fluido;
- Configuração do fluido;
- Cálculo da viscosidade;
- Equações de conservação;
- Solução para a queda de pressão;
- Solução para a equação de estado;
- Equações de conservação;
- Solução para a transferência de calor;
- Regime permanente e transiente;
- Elementos para construção do modelo;

Neste relatório serão verificados com mais detalhes cada um desses itens.

3.1 Condição de referência do fluido

Como o fluido transportado é o gás natural, que é um fluido compressível, se faz necessário estabelecer uma única condição de temperatura e pressão para servir de referência comparativa para as diversas situações do fluido em outras condições, como para determinar o volume ou a vazão. Essa temperatura e pressão são conhecidas como condição de referência.

No Brasil, segundo o Regulamento Técnico nº 2/2008 da ANP, a condição de referência requerida para o cálculo das características de poder calorífico é 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1 atm).

É conveniente que o programa ofereça a possibilidade de configurar no modelo de simulação a condição de referência utilizada no Brasil para evitar a necessidade de conversão das vazões volumétricas que constam nos contratos de serviço de transporte de gás natural.

3.2 Configuração do fluido

O programa de simulação deve permitir a configuração do fluido na forma composicional e simples. A diferença entre os dois métodos de configuração do fluido implica em possíveis simplificações que ocorrem na solução das diferentes equações de estado.

Em um fluido com composição simplificada deve ser informado a sua densidade, o poder calorífico e a quantidade de dióxido de carbono.

Para a formulação composicional o programa precisa ter uma biblioteca de componentes, com suas propriedades, que formarão o fluido. A formulação composicional permite o cálculo da mistura de diferentes gases no interior do duto, o que não é possível com a formulação



simplificada. O cálculo da mistura é importante na simulação de gasodutos, pois muitas vezes existem dois ou mais pontos de injeção de gás natural no duto e cada ponto com um gás natural com características diferentes.

3.3 Cálculo da viscosidade

A viscosidade é uma das características físico-químicas fundamentais de um fluido e representa a resistência do fluido em se deformar sob um esforço cisalhante. A viscosidade varia com a pressão e temperatura do gás, por isso um valor constante pode não apresentar a precisão necessária para o cálculo em tela.

Para o equacionamento da viscosidade do fluido existem 3 formas usuais. É possível tratar a viscosidade como um valor constante, utilizar o método gráfico de Carr, Kobayashi e Burrows (CKB) ou pela equação de Lee, Gonzalez e Eakin (LGE). Enquanto o método CKB pode ser aplicado para gás natural com qualquer teor de acidez, a relação LGE é voltada somente para o gás natural de baixa acidez.

O método CKB é formado por 2 gráficos com a temperatura como parâmetro de correlação e foi desenvolvido para prever a viscosidade de misturas de hidrocarbonetos gasosos em largo espectro de pressão e temperatura, mas a sua implementação computacional é mais complicada. Enquanto o método LGE foi desenvolvido a partir de 3.000 pontos de teste de misturas de hidrocarbonetos gasosos, mas possui espectro de aplicação menor que o método CKB.

Segundo a referência 12.1, são observadas diferenças insignificantes entre as correlações de Carr et al. e Lee et al., quando analisadas para gás doce. A variação da viscosidade dentro dos limites de temperatura e pressão normalmente encontrados em gasodutos interfere pouco nos resultados.

3.4 Seleção da equação de estado

A equação de estado é uma equação termodinâmica que descreve o estado da matéria segundo uma condição física, de acordo com uma relação matemática entre dois ou mais parâmetros, como temperatura, pressão ou densidade.

Dentre as diversas equações de estado, as mais utilizadas na indústria são:

- Benedict-Webb-Rubin-Starling (BWRS)
- Peng-Robinson (PR)
- Sarem



- Soave Redlich-Kwong (SRK)

As equações BWRS, PR e SRW podem prever o comportamento do gás natural a partir dos diversos componentes identificados numa análise cromatográfica, e por isso são classificadas como equações composicionais, enquanto a Sarem utiliza a formulação simplificada do fluido, onde só é necessário informar a densidade, poder calorífico e percentual de CO₂.

De acordo com a referência 12.2, as equações SRK e PR não são adequadas para fluidos de alta densidade, enquanto a equação BWRS é a mais difundida na área de simulação de gasodutos tanto para fluidos de alta quanto de baixa densidade e por trabalhar com amplitudes de pressão e temperatura maiores que as demais.

Para mistura de gases é importante escolher uma equação que permita a análise de mistura, o que acarreta na necessidade de se conhecer a composição do fluido. Para a simulação de uma rede de gasodutos, com diversos pontos de recebimento, cada um utilizando gás com composições diferentes, o uso de uma equação de estado composicional permite a análise dessa situação.

3.5 Equações de conservação para escoamento em dutos

A modelagem matemática do escoamento de gás natural em um duto consiste em satisfazer as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia nos diversos elementos do modelo. Um programa computacional para simulação de gasodutos precisa resolver essas equações.

A Equação 1, a Equação 2 e a Equação 3 representam a conservação de massa, quantidade de movimento linear e conservação de energia para um volume de controle, respectivamente. As equações são apresentadas em detalhes na referência 12.7 e aqui aparecem em sua forma para regime transiente, considerando escoamento unidimensional e fluido newtoniano dentre outras simplificações.

Os diversos programas de simulação podem apresentar formulações um pouco diferentes devido a simplificações ou mudanças de algumas variáveis por outras que possuam relação, como, por exemplo, ao invés de se trabalhar com temperatura, pode-se optar por entalpia ou energia interna.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho \, dV + \int_{sc} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{A}) = 0$$

Equação 1 – Conservação de massa



Onde ρ é massa específica, \vec{V} é a velocidade, t é o tempo, \vec{A} é a área e \forall o volume.

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} (\vec{V} \rho) d\forall + \int_{sc} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{A})$$

Equação 2 - Quantidade de movimento linear

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

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \left(u + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho d\forall + \int_{sc} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho (\vec{V} \cdot d\vec{A})$$

Equação 3 - Conservação de energia

Onde \dot{Q} é fluxo de calor, \dot{W} é a potência total devido ao trabalho de eixo, elétrico, expansão da fronteira e trabalho devido a tensões cisalhantes, u é a energia interna, h é a entalpia, g é a aceleração da gravidade e z é a coordenada vertical.

Essas formulações somente possuem soluções numéricas. Mesmo quando são aplicadas simplificações típicas para a análise de escoamentos em dutos, como a formulação unidimensional, é necessário o emprego de programas de simulação computacional para a obtenção de soluções, mesmo para configurações simplificadas.

Para o regime permanente, as equações sofrem simplificações que permitem soluções mais fáceis e ágeis.

3.6 Formulação para a queda de pressão

O atrito do fluido com a parede do duto provoca uma transformação da energia de pressão em energia térmica que é conhecida como perda de pressão (perda de carga quando se trabalha com líquidos). Essa perda de pressão, observada pela queda de pressão entre dois pontos do duto está diretamente relacionada ao fator de atrito. O fator de atrito é uma função da rugosidade relativa do duto (razão entre a rugosidade e o diâmetro), das características do escoamento e das propriedades do fluido. De maneira geral, quanto maior for a rugosidade da parede do duto ou mais viscoso for o fluido, maior será a perda de energia.

A partir da Equação 1, Equação 2 e Equação 3 e considerando um escoamento em regime permanente, isotérmico, unidimensional e fluido newtoniano, entre outras simplificações, a Equação 4 pode ser obtida e pode ser usada para determinar a vazão do escoamento.



Na formulação de Colebrook-White o fator de atrito usado é resultado das relações de Moody e calculado por uma equação implícita. Os fatores que influenciam o seu valor são número de Reynolds, rugosidade interna do duto e diâmetro do duto. O valor do fator de atrito encontrado pode ser usado diretamente na Equação 4 para o cálculo da vazão.

$$Q^{std} = \frac{\pi \sqrt{R_{ar}}}{4} \frac{T^{std}}{p^{std}} \frac{1}{\sqrt{f}} \left[\frac{p_1^2 - p_2^2 - \frac{2\gamma_g p_m^2}{Z_m R_{ar} T_m} g(z_2 - z_1)}{\gamma_g L Z_m T_m} \right]^{0,5} D^{2,5}$$

Equação 4 – Equação geral para o cálculo de vazão

A Equação 4 é descrita na referência 12.6, como a equação geral para o cálculo de vazão em função de outros parâmetros. Stuckenbruck apresenta outras 5 equações para o cálculo de vazão que possuem semelhança com a equação geral, com pequenas variações em alguns coeficientes e expoentes de certos parâmetros. As equações citadas são:

- Panhandle-A
- Panhandle-B
- AGA-A
- AGA-B
- Weymouth

A Equação 4 é reescrita em função de seis coeficientes (C_1 , C_T , a , b , c , d) para facilitar a comparação entre as equações e toma a forma da Equação 5.

$$Q^{std} = C_1 C_T \left[\frac{T^{std}}{p^{std}} \right]^a \left[\frac{p_1^2 - p_2^2 - \frac{2\gamma_g p_m^2}{Z_m R_{ar} T_m} g(z_2 - z_1)}{\gamma_g^b L Z_m T_m} \right]^c D^d$$

Equação 5 – Equação geral simplificada para o cálculo de vazão

Onde Q (m³/s) é a vazão, p (Pa) é a pressão absoluta, T (K) é a temperatura absoluta, L (m) é o comprimento, z (m) é a elevação, f é o fator de atrito de Darcy e R (m²/s²-K) é a constante do gás. Os coeficientes C_1 , C_T , a , b , c e d são utilizados para comparações entre as equações supracitadas, os valores são apresentados na Tabela 1.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B**

PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS

FOLHA 9 de 16

TÍTULO: Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

Tabela 1 – Coeficientes para diversos modelos de escoamento - Equação 5

Modelo	Coeficiente					
	C_1	a	b	c	d	C_T
Teórico	13,305	1,0	1,0	0,5	2,5	$1/\sqrt{f} = \text{Colebrook}$
Weymouth	137,11	1,0	1,0	0,5	2,667	1,0
Panhandle-A	158,00	1,0788	0,8539	0,5394	2,6182	1,0
Panhandle-B	152,88	1,02	0,961	0,510	2,53	1,0
AGA-A	13,305	1,0	1,0	0,5	2,5	$2C_f \log_{10} \frac{\text{Re} \sqrt{f}}{2,8252}$
AGA-B	13,305	1,0	1,0	0,5	2,5	$2 \log_{10} \frac{3,7D}{k_e}$

O modelo teórico utiliza o fator de atrito calculado por Colebrook-White por esse ser considerado mais preciso e utilizar relações empíricas, cobrindo escoamentos do laminar ao turbulento.

A referência 12.6 recomenda a utilização das outras equações nas seguintes situações;

- Weymouth - Escoamento totalmente turbulento com grandes vazões, grandes diâmetros (dutos maiores do que NPS-24) e sistemas sob altas pressões. 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 – Escoamento parcialmente turbulento e com vazões moderadas, diâmetros médios a grande e operando sob pressões médias a altas.
- Panhandle-B – Escoamento totalmente turbulento, vazões elevadas, grandes diâmetros e altas pressões de operação.
- AGA-A – Escoamento parcialmente turbulento e seus resultados são muito sensíveis ao número de Reynolds. É indicada para vazões médias, diâmetros médios e operando com alta pressão.
- AGA-B – Escoamento totalmente turbulento e a mais recomendada para sistemas de alta pressão, alta vazões e diâmetro do duto entre médio e grande. A melhora da precisão na previsão da vazão e da queda de pressão aumenta com o aumento da precisão de medição da rugosidade efetiva do duto.

3.7 Abordagem para a transferência de calor

Durante o escoamento do fluido os diversos equipamentos e o próprio duto proporcionam trocam de calor com o fluido. Essas trocas podem ser tratadas de diversas formas.



O tratamento dado à solução da equação de conservação de energia pode se dar de duas formas:

- Cálculo isotérmico – A temperatura do fluido é definida e constante ao longo de todo o duto, o que transforma a equação da energia em $T = \text{cte}$.
- Cálculo não isotérmico – A variação de temperatura do gás ao longo do duto é calculada em função da condição inicial, das características do fluido, do escoamento e da transferência de calor com o ambiente.

Em relação ao cálculo da transferência de calor entre fluido, duto e meio-ambiente, os seguintes modelos podem estar disponíveis:

- Adiabático – Não existe transferência de calor através da parede do duto;
- Taxa de transferência de calor constante – Configura-se um valor fixo para a taxa de transferência de calor radial entre os elementos.
- Condução e convecção – A transferência de calor ocorre na direção radial, considerando a convecção entre fluido e duto, condução no duto e nos elementos que envolvem o duto e condução (solo)/convecção (ar ou líquido) para o ambiente.

A referência 12.5 demonstra a complexidade na escolha do modelo de transferência de calor e conclui que a diferença entre o modelo isotérmico e não isotérmico aumenta conforme a vazão de gás aumenta. E no caso da temperatura do gás natural ao longo do duto não atingir um valor estável, a escolha do modelo isotérmico leva a ocorrência de erro. Portanto, a escolha do modelo deve levar em conta a complexidade do gasoduto e dos equipamentos instalados.

Se o gasoduto atravessa regiões de grande variação de temperatura, a simulação não isotérmica também deve ser realizada para verificação das condições operacionais. Assim, o modelo que melhor traduz a realidade é o que considera a condução de calor entre os diversos materiais e a convecção entre o gás e a parede interna do duto, onde as taxas de transferência de calor são decorrentes do calor específico e da condutividade térmica de cada material envolvido e do ambiente.

Conclui-se que existe a necessidade de aplicação do modelo não isotérmico para que seja verificada a variação dos resultados da temperatura. Após a análise inicial é possível definir qual modelo de transferência de calor será adotado, de forma a continuar os estudos que se deseja fazer para o gasoduto.



3.8 Regime permanente e transiente

A referência 12.3 enumera várias etapas para o projeto de um novo gasoduto e exemplifica situações onde simulações termo-hidráulicas em regime permanente e transiente são requisitadas.

O regime permanente é empregado durante o dimensionamento do melhor diâmetro, localização da estação compressão e seus pontos de operação, localização dos pontos de recebimento e entrega, entre outras variáveis.

No entanto, o duto deve ser capaz de operar em diversos cenários, como de variação das vazões dos pontos de entrega ao longo do tempo, interrupção da operação de um grande ponto de entrega e parada de uma estação de compressão. Para esses cenários é necessária uma análise em regime transiente para se verificar o comportamento do gasoduto.

Após a construção e entrada em operação do gasoduto, ainda são necessárias simulações que possam verificar cenários de expansão, tempo de sobrevida no caso de interrupção do fornecimento de gás ou parada de estação de compressão, novos pontos de entrega e cenários incidentais.

Para a aplicação da metodologia de capacidade definida na referência 12.4, um programa que só trabalhe em regime permanente, não é capaz de suprir as necessidades. Logo, o programa deve trabalhar em ambos os regimes, pois será necessário verificar a capacidade do gasoduto para todos os cenários.

3.9 Elementos para a construção do modelo de simulação termo-hidráulica

Para a construção de modelos de simulação termo-hidráulica de gasodutos em programas de simulação são necessários elementos que representem, no mínimo, os seguintes equipamentos:

- Dutos;
- Pontos de recebimento;
- Pontos de entrega;
- Estações de compressores;
- Válvulas de bloqueio;
- Válvulas de controle;
- Trocador de calor.

O nome, a forma e os parâmetros podem variar para cada programa de simulação, requerendo do usuário familiaridade com técnicas de simulação e conhecimento do programa para configurar cada elemento de forma que opere da maneira desejada.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 12 de 16**TÍTULO:** Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

Deve-se ressaltar que alguns programas de simulação podem não apresentar um dos equipamentos acima listados, mas podem possuir elementos genéricos que permitam ser configurados através de recursos de programação disponibilizados pelo programa.

3.9.1 Dutos e trechos de dutos

A configuração do elemento duto deve levar em conta as características físicas do duto, como diâmetro, espessura, comprimento, rugosidade, perfil de elevação e camada de isolante térmico e outros parâmetros relacionados à solução de queda de pressão e à solução para transferência de calor.

Dependendo do programa utilizado, os parâmetros que envolvem a queda de pressão, a transferência de calor e o perfil de elevação podem requerer essas configurações associadas ao duto, ou trecho de duto, ou em separado. No caso específico do perfil de elevação, alguns programas aceitam uma discretização completa da elevação ou somente a elevação no início e fim do elemento duto. Neste caso, deve ser avaliada a necessidade de segmentar o duto em vários elementos a fim de representar seu perfil de elevação.

Alguns programas de simulação possuem a funcionalidade de calcular o volume de gás armazenado no duto (inventário), em regime permanente ou transiente. Essa funcionalidade pode estar associada a cada elemento duto ou pode ser um valor global de todo o sistema modelado.

As informações relevantes para o cálculo de capacidade que podem ser obtidas nesse elemento são a distribuição de pressão, vazão e temperatura do gás natural ao longo do duto.

3.9.2 Ponto de recebimento

O ponto de recebimento é a instalação no gasoduto de transporte onde o gás natural é colocado à disposição do transportador pelo carregador.

Esta instalação pode ser modelada por um elemento que possua vazão ou pressão constante para a injeção de fluido no duto, o que caracteriza a condição de contorno configurada para esse elemento. Em alguns simuladores é neste elemento que deve ser escolhido qual o fluido que será utilizado e a temperatura de entrada no gasoduto. Se o simulador usado for capaz de trabalhar com regime transiente, a esse elemento poderá ser associado um perfil de vazão ou pressão ao longo do tempo.

Os dados de interesse para cálculo de capacidade neste elemento são a vazão ou a pressão, assim como a temperatura de entrada do fluido.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 13 de 16**TÍTULO:** Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação-
-

3.9.3 Ponto de entrega

O ponto de entrega é a instalação no gasoduto de transporte onde o gás natural é colocado à disposição do carregador pelo transportador.

Esta instalação pode ser modelada por um elemento que possua vazão ou pressão constante para a retirada de fluido do duto, o que caracteriza a condição de contorno configurada para esse elemento.

Se o simulador usado for capaz de trabalhar com regime transiente, o elemento pode ter um campo onde são configuradas as vazões ao longo do tempo.

Os dados de interesse para cálculo de capacidade neste elemento são a vazão e pressão.

3.9.4 Compressores

Em gasodutos longos é comum que existam uma ou mais estações de compressão com a função de elevar a pressão para que o gás possa ser transportado nas condições desejadas. Essas estações são compostas basicamente de compressores e seus acionadores, além de válvulas de bloqueio e de controle.

Normalmente os programas de simulação disponibilizam compressores centrífugos e alternativos que são configurados com as curvas características de desempenho. Alguns programas possuem uma biblioteca de modelos de compressores, o que facilita a construção do modelo. Além das curvas características de desempenho, outros parâmetros podem ser usados para configurar o elemento como: pressão de descarga, eficiência, taxa de compressão, modo de controle e modelo de transferência de calor do compressor.

É comum a existência de compressores e acionadores chamados “genéricos”, usualmente empregados quando não se possui todas as informações sobre o compressor e/ou o acionador que se deseja simular. Os parâmetros de entrada são os mesmos dos anteriores, mas com menos exigências de preenchimento de dados.

Alguns simuladores possuem a funcionalidade de calcular a quantidade de gás natural consumida pelo acionador (gás combustível). Nesses, associado às configurações dos compressores podem ser encontrados campos para preenchimento das informações dos acionadores. Essas informações ajudam a melhorar os resultados das simulações, uma vez que permitem avaliar com maior precisão o gás consumido por esses elementos. Caso a função não esteja disponível diretamente no simulador, deverá ser possível utilizar a informação da potência consumida pelo compressor e, de posse das características do compressor e acionador, calcular o gás combustível.

No cálculo de capacidade de transporte do gasoduto as informações importantes são: pressão de descarga, potência consumida e vazão e gás combustível.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 14 de 16**TÍTULO:** Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

3.9.5 Válvula de bloqueio

Uma válvula de bloqueio pode ser de diversos tipos como gaveta, borboleta, globo e esfera. Todos esses tipos podem ser empregados nos gasodutos e a sua escolha é feita pelo projetista. Os programas de simulação costumam apresentar todos esses modelos de válvulas para a montagem do modelo. Independentemente do tipo de válvula, as informações necessárias para a configuração desses equipamentos são o tamanho, curva característica do coeficiente de descarga ou vazão da válvula e fração de abertura.

A utilização das válvulas de bloqueio no modelo de simulação vai depender do nível de detalhamento que se deseja utilizar. Assim a sua representação pode facilitar a criação de um modelo que represente diversas condições operacionais, como alinhamento de estações de compressão e ramais, ou a utilização delas durante simulações em regime transiente como, por exemplo, tempo de sobrevivência de uma rede de gasodutos diante da interrupção do fornecimento de gás natural no ponto de recebimento. Elas também podem ser usadas para interligar gasodutos, mas mantendo a possibilidade de segregação dos mesmos.

3.9.6 Válvula de controle

As válvulas de controle são usadas normalmente quando se deseja controlar a pressão ou vazão a partir de um ponto, seja por limitação de PMOA, classe de equipamentos instalados ou razão contratual.

Nos simuladores computacionais de gasodutos as válvulas de controle devem apresentar o seu modo de operação (variável de controle), tamanho e curva característica do coeficiente de descarga ou vazão da válvula e fração de abertura.

3.9.7 Trocadores de Calor

Os trocadores de calor normalmente são encontrados associados aos compressores nas estações de compressão e são utilizados para resfriar o gás natural após a compressão. Os parâmetros configuráveis dos trocadores de calor podem ser a temperatura de saída, variação da temperatura de saída e entrada, pressão de saída, eficiência e potência.

3.10 Apresentação de resultados

O programa de simulação deve permitir que, após as simulações, os resultados possam ser exportados para que possam ser construídos gráficos de pressão, vazão e temperatura ao longo do duto ou a variação desses parâmetros ao longo do tempo para um determinado ponto do duto ou equipamento. Essa exportação pode ser em forma de planilhas, tabelas, relatórios ou gráficos.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**REV. **B****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 15 de 16**TÍTULO:** Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

Como alternativa à exportação dos dados, o próprio programa pode ser capaz de construir esses gráficos para análise.

4 CONCLUSÃO

De forma a sintetizar os requisitos discutidos para um programa de simulação de gasodutos, a Tabela 2 resume os itens discutidos anteriormente.

Tabela 2 - Resumo dos requisitos do programa de simulação computacional

	Necessidade do programa	
	Imprescindível	Desejável
Condição de referência	293,15K (20°C) e 101,325kPa (1 atm)	Qualquer outra
Configuração do fluido	Simplificada e Composicional	
Cálculo de viscosidade	Valor constante	Método de LGE ou CKB
Equação de estado	BWRS e Sarem	Peng-Robinson Soave Redlich-Kwong
Solução para queda de pressão	Colebrook-White	Weymouth e AGA
Solução para transferência de calor	Isotérmico e não isotérmico	Adiabático e taxa de transferência de calor constante
Regime de escoamento	Permanente e transiente	
Elementos para construção do modelo	Duto Ponto de recebimento Ponto de entrega Estação de compressão Válvulas de bloqueio Válvulas de controle Resfriador	Cálculo do gás natural consumido no compressor e do inventário do duto

5 BIBLIOGRAFIA

- 12.1. O. Jeje, L. Mattar, Fekete Associates Inc., Comparison of Correlations for Viscosity of Sour Natural Gas, Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 45, nº 7, Julho de 2006.
- 12.2. Jerry L. Modisette, Energy Solutions International, Equation of State Tutorial, Pipeline Simulation Interest Group, 2000, paper 0008.
- 12.3. Sidney Pereira dos Santos, Petrobras S.A., Transient Analysis A Must in Gas Pipeline Design, Pipeline Simulation Interest Group, 1997, paper 9703.
- 12.4. RL-ANP-FPL-004 – Conceito Consolidado de Capacidade de Transporte de Gasodutos

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-006**

REV. B

PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 16 de 16**TÍTULO:**

Definição dos Requisitos para os Programas de Simulação

-

-

- 12.5. Andrzej J. Osiadacz, Maciej Chaczykowski, Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models, Chemical Engineering Journal, Volume 81, Issues 1–3, 1 January 2001, Pages 41-51
- 12.6. Sidney Stuckenbruck, Escoamento em Dutos, Curso de Escoamento de Dutos
- 12.7. Fox, Robert W.,; McDonald, Alan T., Introdução a Mecânica dos Fluidos, 5a ed. – Rio de Janeiro : Livro Técnico e Científico, 2001. 504 p. ISBN 8521612613