

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 2 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-

-

ÍNDICE

1	OBJETIVO	3
2	REFERÊNCIAS	3
3	INTRODUÇÃO	3
4	CONSIDERAÇÕES ACERCA DA CRIAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM GASODUTO	3
5	GRANDEZAS CONSIDERADAS NA MODELAGEM	5
5.1	GRANDEZAS FIXAS	5
5.2	GRANDEZAS VARIÁVEIS	7
6	ESTUDO DE CASO	10
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	11
7.1	EQUAÇÃO DE ESTADO	11
7.2	CÁLCULO DE PERDA DE CARGA	12
7.3	VISCOSIDADE	13
7.4	TEMPERATURA DE ENTRADA DO GÁS	13
7.5	TEMPERATURA DO AMBIENTE (SOLO)	14
7.6	CÁLCULO TÉRMICO	14
8	CONCLUSÕES	15
9	BIBLIOGRAFIA	16

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 3 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-

-

1 OBJETIVO

Conforme estabelecido no Plano de Trabalho (Referência 2.1), o objetivo deste relatório é a análise dos diversos parâmetros físicos que determinam as características do escoamento para o cálculo de capacidade de transporte de gasodutos. Para este efeito, foi utilizado o programa de simulação PipelineStudio, versão 3.4.1, da Energy Solutions.

2 REFERÊNCIAS

2.1. RL-ANP-FPL-001, rev. D

2.2. RL-ANP-FPL-006, rev. A

3 INTRODUÇÃO

Quando se necessita estudar um sistema real complexo, de múltiplas variáveis, é comum recorrer à simulação computacional para obter o comportamento dessas variáveis, sem a necessidade de obtê-las através do sistema real, que pode ser tecnicamente ou financeiramente inviável. A simulação permite, dentro de uma margem de erro, analisar o passado, acompanhar o presente e prever o futuro. A importância do uso de modelos de simulação foi explicitada na referência 2.2. Uma explicação mais aprofundada sobre os usos e limitações de modelos de simulação pode ser encontrada na referência 9.5.

O presente estudo utiliza o programa de simulação PipelineStudio, da EnergySolutions. Essa opção foi realizada devido ao fato da ANP já ter utilizado esse programa anteriormente e por ser utilizado pelas principais empresas do setor de transporte de gás natural no Brasil. Além disso, esse programa atende as exigências mínimas apresentadas na referência 2.2..

4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DA CRIAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM GASODUTO

Para criar um modelo de simulação computacional de um gasoduto, ou de qualquer sistema de gasodutos, é necessário ter compreensão do problema analisado e das variáveis envolvidas nos modelos e dos equacionamentos necessários para o escoamento do gás. Um bom embasamento das premissas utilizadas permite analisar melhor os resultados obtidos.

A utilização de recursos de simulação computacional para o estudo de gasodutos encontra aplicações no apoio à operação diária, no estudo de cenários específicos futuros, para o cálculo da capacidade de transporte, para o estudo de novos gasodutos ou para ampliação de gasodutos existentes, etc. Porém, dentro dessas aplicações da modelagem de um gasoduto,

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 4 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-
-

pode-se observar duas situações principais: a modelagem para um sistema ainda inexistente (tipicamente para o projeto de um gasoduto novo) ou a modelagem para um sistema existente. Essa diferenciação é importante, pois permite ter a ideia do que esperar como resultado da simulação.

Quando se cria um modelo de simulação para apoio a um projeto, muitas variáveis podem ser alteradas ao longo da execução do mesmo. Mesmo considerando um projeto robusto, somente após a construção terminada os dados de projeto podem ser considerados definitivos.

Sendo assim, para o caso de simulações em fase de projeto, onde as incertezas são maiores, algumas simplificações na modelagem do problema são aceitas e, em alguns casos, até recomendadas. O uso de equações simplificadas, generalização de espessura, simplificação do perfil de elevação, rugosidade única, entre outros, facilitam a modelagem de um sistema que ainda pode sofrer mudanças.

No caso da modelagem de um duto existente, as incertezas são menores. As espessuras estão documentadas, o perfil é conhecido, e as localizações das estações ao longo do duto dificilmente sofrerão novos ajustes. E, mais importante, há um caso real para poder comparar os resultados da simulação, permitindo sua validação e utilização para qualquer situação operacional.

A validação de um modelo não é um processo simples. Deve-se comparar as repostas do simulador com as variáveis reais correspondentes e verificar o desvio entre elas. Esse processo é facilitado quando essa análise é realizada em regime permanente. Nele, o balanço de massa do sistema é atingido, sem haver acumulação de massa em nenhum ponto, e permanece nessa situação indefinidamente. Entretanto, especificamente na operação de gasodutos, a operação em regime permanente é muito rara. Portanto, qualquer comparação deverá ser feita em um regime transiente, o que acarreta uma maior dificuldade, pois é necessário considerar o comportamento de todas as variáveis possíveis no tempo, e compará-las com os resultados da simulação.

Além disso, por serem necessários valores reais das variáveis, deve-se considerar as próprias incertezas dos sensores utilizados na sua aquisição.

Os cálculos de qualquer simulador sempre utilizam aproximações, de maior ou menor grau, para resolver o problema físico. Além disso, de acordo com a necessidade do usuário e a capacidade computacional disponível, outras simplificações podem ser feitas. Consequentemente, isso gera erros nas respostas obtidas. Para mitigar esses erros, certos parâmetros da simulação podem ser ajustados para aproximar mais a simulação da realidade. Esse processo é conhecido como *tuning* (calibração ou personalização).

Em um modelo de simulação de gasodutos, o *tuning* de dutos é usualmente feito através de dois parâmetros: a rugosidade do duto ou um fator de correção comumente chamado de "eficiência do duto". Ambos afetam a perda de pressão no duto para uma determinada

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 5 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-
-

condição operacional. É possível ainda fazer ajuste nos equipamentos do duto, como válvulas e estações de compressão.

O que diferencia os dois parâmetros é que a rugosidade é uma grandeza física, enquanto a eficiência é um ajuste no equacionamento do problema, sem relação com nenhum dado físico na realidade. Porém, esse último tem maior influência sobre o resultado, isto é, pequenas alterações geram alterações significativas na perda de pressão, enquanto para a rugosidade é necessária uma grande alteração no seu valor para que se tenha uma alteração significativa na perda de pressão.

Existem ainda outros fatores que afetam os resultados de simulação, mencionados na referência 2.2, como o uso do regime permanente e transiente, mas que não será abordado neste relatório. A seguir, serão analisadas as grandezas de um modelo de gasoduto que afetam a simulação. Elas foram divididas em duas categorias, grandezas fixas – que não podem (ou devem) ser alteradas - e grandezas variáveis – que podem ser escolhidas ao criar um modelo de simulação de gasoduto.

5 GRANDEZAS CONSIDERADAS NA MODELAGEM

5.1 Grandezas fixas

De modo geral, podemos considerar que as grandezas fixas são as variáveis de cunho físico do duto, ou seja, os dados que devem estar definidos para a construção de um modelo. São eles: diâmetro, comprimento, espessura, elevação, posição das estações (recebimento, estações de controle, compressores, pontos de entrega, etc.) e rugosidade. Tanto a elevação quanto a rugosidade serão analisadas com maior profundidade nesta seção.

O diâmetro de um duto, por exemplo, em qualquer projeto de gasodutos ou oleodutos, não é um valor que varie constantemente em longos trechos de duto. Assim, uma vez calculado na fase de projeto ou definido na montagem do gasoduto, seu valor é conhecido e não existe razão para que não seja utilizado o valor real nos modelos de simulação. Este dado é uma premissa para o cálculo das outras variáveis do projeto. Uma das premissas deste relatório é que se deseja modelar um duto já definido, seja ele em caráter de projeto ou já construído. Logo não tem sentido avaliar a influência do diâmetro no modelo de simulação.

5.1.1 Espessura

Uma mudança de espessura acarreta uma mudança de diâmetro interno do duto. No entanto, deve-se identificar as consequências dessa mudança. Considerando, por exemplo, um comprimento de duto de 100 quilômetros (ou mais), se cada travessia de rio (onde a espessura por norma deve ser maior que nos outros pontos), rodovia, ferrovia, regiões com povoamento, etc for considerada na modelagem, pode-se ter um modelo refinado em excesso, uma vez que

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 6 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-

-

uma travessia de rio ou estrada pode ter um comprimento próximo de 10 metros. A inclusão dessa mudança de espessura pode afetar tanto o tempo de simulação como a capacidade do software de convergir para uma solução. Por outro lado, a exclusão desta pequena mudança pode não afetar a precisão da resposta do modelo para a solução encontrada.

Grandes mudanças de espessura, entretanto, são importantes, pois afetam o resultado obtido. A questão é: Qual valor deve ser considerado em um modelo de duto? Não existe uma resposta certa. A influência sobre o resultado dependerá de todas as outras variáveis do problema. Embora em alguns casos a influência da espessura possa ser identificada facilmente, em geral a experiência do profissional que constrói o modelo e o nível de erro aceitável são fatores determinantes para a obtenção de resultados significativos.

5.1.2 Elevação

O perfil de elevação é um parâmetro cuja análise de seu uso é importante. De modo geral, por ser uma grandeza fixa, poder-se-ia apenas entrar com os dados de elevação no programa de simulação. A diferença entre o perfil de elevação e as outras grandezas apresentadas, como diâmetro ou espessura, é que sua variação ao longo de um duto pode ser - e nos dutos da malha brasileira usualmente é – muito grande. A grande quantidade de picos e vales, de maior ou menor intensidade, cria um modelo muito complexo e, portanto, pode aumentar muito o tempo de simulação, sem ter um efeito significativo no resultado da simulação (9.7).

Considerando um perfil de elevação de um duto obtido através de uma passagem de PIG (*Pipeline Inspection Gauge*), pode-se registrar mais de 20 mil pontos em um duto de 100 quilômetros. Essa quantidade de pontos precisa ser tratada, pois muitos programas de simulação, não conseguem obter um resultado ou demorariam um tempo excessivo para calcular uma simulação simples.

Em um duto de transporte de líquido, devido às altas densidades, uma variação de 10 metros na altitude pode resultar em uma diferença de 1 kgf/cm², devido a sua energia potencial. Quando se trata de gás natural, no entanto, esse efeito é menos notável. Como a densidade do gás varia com as condições de pressão e temperatura onde se encontra, um duto mais pressurizado deve ter uma maior quantidade de pontos para descrever uma determinada variação de elevação que um duto menor pressão operacional.

Como essa preocupação está ligada a avaliação do perfil de pressão ao longo de todo o duto, quando só se deseja saber a pressão nos pontos notáveis, as variações de elevação ao longo do duto não afetam significativamente a resposta encontrada, desde que a elevação nos pontos de interesse esteja corretamente introduzida no modelo. Isso permite, para certos estudos de gasodutos, uma redução drástica do número de pontos a serem calculados, melhorando assim o tempo de simulação sem afetar a eficácia do modelo.



5.1.3 Rugosidade

A rugosidade é uma grandeza fixa determinada pelo material da parede interna do duto. Grande parte dos materiais possuem rugosidades conhecidas. De modo geral, para simulação de dutos, os seguintes valores são utilizados como boas aproximações iniciais (9.2):

- Rugosidade de um duto novo com revestimento interno: 0,009 milímetros;
- Rugosidade de um duto novo sem revestimento interno: 0,018 milímetros;
- Rugosidade de um duto antigo: 0,045 milímetros.

No caso de um duto antigo, o envelhecimento de um tubo provoca incrustações ou corrosões que poderão alterar a rugosidade ou até mesmo o diâmetro interno do tubo. O problema, entretanto, se dá nesta generalização da rugosidade. Por serem valores aproximados, podem não traduzir a realidade do duto.

É neste momento que uma comparação com dados de campo, usualmente de operação, permite a correção destes valores para a realidade do duto. Mas, para ter o valor exato da rugosidade, seria necessária a certeza de que todos os outros parâmetros de cálculo estivessem corretos com uma precisão muito alta.

Como as próprias equações utilizadas nos programas de simulação apresentam erro devido às simplificações e aproximações, seria impossível determinar, através de simulação, a rugosidade correta de um duto. E é exatamente por isso que se usa a rugosidade para o caminho contrário: para reduzir os erros dos diversos equacionamentos e aproximações nos modelos.

O *tuning*, como mencionado anteriormente, utiliza a rugosidade para corrigir erros de modelagem ou de equações para aproximar os resultados das simulações dos dados reais vindos da operação dos dutos. O aumento ou redução dessa grandeza afeta diretamente a perda de pressão para uma determinada vazão, permitindo um ajuste fino dos resultados obtidos. É por isso que, mesmo com uma modelagem mais simples, se corretamente ajustada por essa grandeza, é possível atingir valores mais condizentes com a realidade do que com modelagens mais complexas.

Como o *tuning* deve ser feito caso a caso, o procedimento detalhado para a sua realização não será abordado neste relatório, pois não afeta o objetivo do mesmo.

5.2 Grandezas variáveis

As grandezas consideradas como variáveis neste relatório de simulação estão relacionadas às correlações utilizadas para calcular as propriedades do gás e às relacionadas a perda de



pressão no duto. Cada uma das equações, não importa o que estejam calculando, tem uma aproximação considerada e por consequência um erro embutido. A escolha do melhor equacionamento envolve o embasamento teórico, o conhecimento do problema a ser estudado e a experiência para fazer as escolhas.

A análise da influência da temperatura no escoamento de um gasoduto também pode afetar significativamente o resultado obtido. Três parâmetros distintos serão analisados neste sentido: A temperatura do gás ao entrar no sistema, a temperatura do meio onde o gasoduto se encontra (o solo) e a necessidade do cálculo da temperatura em si. Apesar de poderem ser considerados dados conhecidos, devido a variação térmica diária e sazonal, decidiu-se por avaliá-las como parâmetros a serem fixados de acordo com as necessidades da simulação.

Dependendo do programa de simulação utilizado, as opções para estas variáveis podem ser mais ou menos flexíveis, o que influenciará uma comparação entre os mesmos. Os casos aqui estudados estão de acordo com as opções ofertadas pelo programa *PipelineStudio*.

5.2.1 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. Para mistura de gases é importante escolher uma equação que permita a análise de mistura, o que acarreta na necessidade da configuração da composição molar do fluido.

Dentre as diversas equações de estado, as principais disponíveis no *PipelineStudio* são:

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

As equações BWRS e Peng-Robinson podem prever a mistura de diferentes gases no duto e por isso são identificadas como equações composicionais. Para a simulação de uma malha de gasodutos, com gás natural de diversas composições entrando no sistema, o uso de uma equação composicional permite avaliar esse efeito de mistura.

A equação de Sarem apresenta uma formulação mais simplificada, utilizando apenas alguns dados do fluido, como densidade, quantidade de CO₂ e o poder calorífico do mesmo. Seu uso é mais interessante para projeto de novos dutos, quando não se possui uma composição exata do produto a ser transportado. A referência 9.4 apresenta mais detalhes sobre o equacionamento e limitações de cada uma.



5.2.2 Viscosidade

O programa utilizado apresenta apenas duas opções para o cálculo de viscosidade ao longo do escoamento. Pode-se utilizar um valor constante, escolhido pelo usuário, ou utilizar a correlação de Lee-Gonzalez-Eakin (LGE), que se trata de um equacionamento simplificado do cálculo de viscosidade para gás natural (9.8). Essa correlação possui erros quando há uma quantidade significativa de impurezas no gás (9.1), mas é a única disponível no programa.

5.2.3 Perda de carga

O *PipelineStudio* apresenta, de forma geral, três equações para o cálculo de perda de carga. São elas: Colebrook-White, Weymouth e AGA. Para esta última, o programa permite utilizar uma forma mais específica para casos especiais, que não serão discutidos neste relatório.

A equação de Colebrook-White é a mais conhecida no meio acadêmico e, dentre as opções oferecidas pelo software, a mais completa, pois calcula o fator de atrito baseado no número de Reynolds, utilizando o Ábaco de Moody. Em comparação, a equação de Weymouth utiliza uma constante para o fator de atrito, enquanto a AGA utiliza o fator de atrito diretamente como uma variável, sem o equacionamento presente na Colebrook-White. Mais detalhes sobre estas e outras equações pode ser encontrado na referência 9.6.

5.2.4 Temperatura de entrada do gás

A temperatura de entrada do gás no sistema seria um dos dados mais simples a serem fornecidos para o modelo. Entretanto, essa temperatura, dependendo da origem do gás sendo introduzido no sistema, pode variar muito de acordo com fatores externos ao duto. Utilizando um exemplo, plantas de regaseificação usualmente entregam o gás a temperaturas baixas, em torno de 5°C. Entretanto, em casos onde há preocupação com formação de líquidos, essa temperatura pode ser elevada. Em unidades de processamento de gás, as temperaturas usualmente são mais elevadas, podendo facilmente variar entre 30°C e 50°C. Por essa razão, será analisada a influência desta temperatura nos resultados de simulação.

5.2.5 Temperatura do ambiente (solo)

A temperatura do ambiente onde o duto se encontra – usualmente do solo - é motivo de algumas discussões. Dutos enterrados (é o caso da maioria dos dutos no Brasil, exceto talvez as linhas internas de estações) estão a uma profundidade média de 2 metros. Devido a essa profundidade, eles sofrem pouco as variações diárias de temperatura, pois o solo funciona como um isolante térmico em relação à temperatura do ar.

Entretanto, quando se fala de temperatura média das estações do ano, existem variações que podem afetar o escoamento no duto. Outro fator importante a ser considerado é que, em



duto de grande extensão, pode haver variações de temperatura ao longo de seu comprimento. Por exemplo, em um duto que comece no litoral e siga para um planalto de certa altitude pode sofrer variações significativas de temperatura em um curto comprimento.

5.2.6 Cálculo de troca de calor

O cálculo da variação da temperatura para o escoamento em dutos é um outro caso de diferenciação do escoamento de líquidos e gases. Excluindo alguns produtos aquecidos, usualmente óleos pesados, em geral não há uma preocupação muito grande no cálculo térmico para dutos de líquido. Para gasodutos, no entanto, devido à influência desta grandeza nas propriedades do gás, ela tem uma maior importância. Assim, a formulação da troca de calor no sentido radial (sentido gás, duto, revestimentos, solo) pode interferir tanto no escoamento como a aproximação realizada em relação a temperatura do solo de forma isolada.

6 ESTUDO DE CASO

Considerando as grandezas apresentadas acima, será apresentado um estudo de caso com o objetivo de analisar a influência das grandezas variáveis sobre o cálculo de capacidade de transporte de um gasoduto.

Foram feitas simulações, utilizando o programa *PipelineStudio*, para demonstrar as diferenças de resultado obtidas variando cada um dos itens individualmente. Para isso, foi utilizado um modelo simplificado do sistema de gasodutos Urucu-Manaus. O sistema foi escolhido por ser um sistema mais simples, para o qual estão disponíveis informações reais tanto de aspectos construtivos quanto operacionais. Os dados utilizados para configuração do modelo foram disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo – ANP.

O Urucu-Manaus é composto por dois gasodutos distintos: O GARSOL, no trecho Urucu-Coari, de 18 polegadas, e o GASCOM, no trecho Coari-Manaus, de 20 polegadas. Possui atualmente duas estações de compressão, Juaruna, ao longo do GARSOL e Coari, na ligação entre os dois dutos.

Devido à existência de duas estações de compressão, foi possível analisar o sistema em duas vazões, sendo uma sem a operação dos compressores e outra com ambos funcionando em sua capacidade máxima. A Figura 1 apresenta uma representação do sistema em questão.

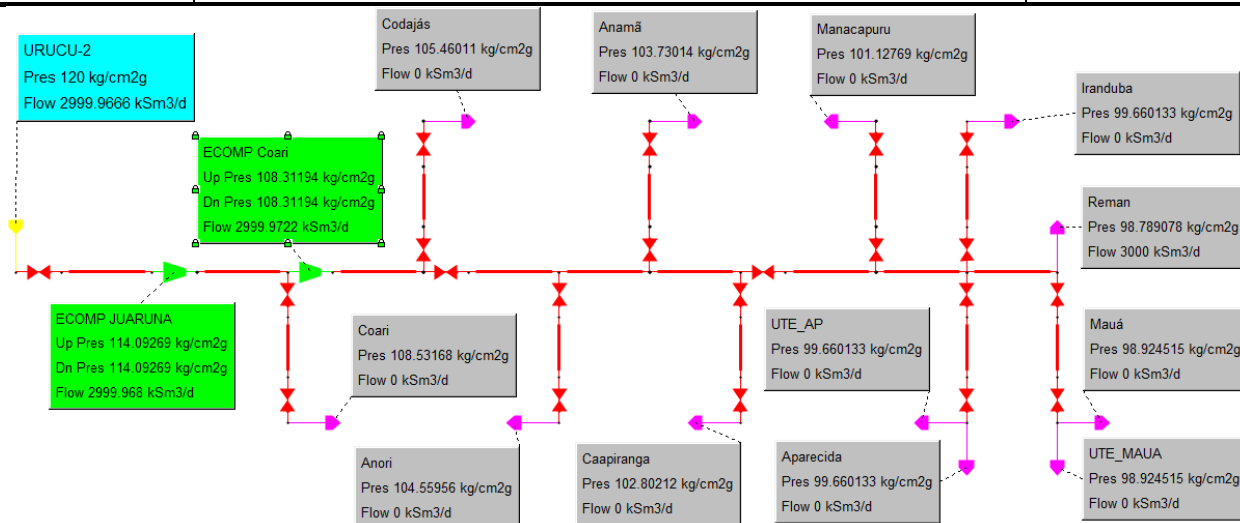


Figura 1 – Modelo do Sistema de Gasodutos Urucu-Manaus

Algumas premissas operacionais foram utilizadas para permitir a análise dessas variáveis:

- Pressão de recebimento em Urucu (PTR): 120 kgf/cm²
- Pressão mínima de entrega na REMAN (PTE): 55 kgf/cm²
- Consumo concentrado na REMAN (PTE)
- Pressão máxima de descarga nos compressores: 120 kgf/cm²
- Regime Permanente

O caso base de comparação utilizou as seguintes premissas:

- Equação de Estado: BWRS
- Cálculo de perda de carga: Colebrook-White
- Viscosidade: LGE
- Temperatura de entrada do gás: 30°C
- Temperatura do ambiente (solo): 30°C
- Coeficiente de troca de calor constante: 2 W/m²K
- Tipo cálculo de temperatura: Não isotérmico

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 Equação de Estado

Observado os resultados apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2, podemos verificar que a equação de Sarem, que é não composicional, apresenta um resultado um desvio maior que a equação de Peng-Robinson, que apresenta um comportamento similar ao caso base, utilizando

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 12 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-

-

BWRS para ambas faixas de vazão. O cálculo da equação de estado assumindo gás ideal foi incluído apenas para fins comparativos.

Tabela 1 – Comparação das equações de estado sem compressores

Equação de Estado	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
BWRS	104.6	0	88.4	0	28.7	4696	-
Sarem	104.8	0	88.8	0	27.7	4925	4.9%
Peng	104.7	0	88.6	0	28.5	4773	1.6%
Ideal	104.3	0	87.9	0	30.1	4343	7.5%

Tabela 2 – Comparação das equações de estado com compressores

Equação de Estado	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
BWRS	77.6	4603	80.9	4222	25.7	7307	-
Sarem	78.5	4229	81.1	4012	23.4	7634	4.5%
Peng	77.8	4492	81.0	4132	25.3	7424	1.6%
Ideal	76.1	5134	81.0	4459	30.1	6782	7.2%

7.2 Cálculo de perda de carga

Tendo como base a equação de Colebrook-White, do caso base, podemos observar pela Tabela 3 que, para o gasoduto utilizado, a equação AGA apresenta resultados bem mais coerentes que a de Weymouth. Esta diferença aumenta significativamente quando há um aumento da vazão no duto por meio do acionamento dos compressores, como demonstrado na Tabela 4.

Tabela 3 – Comparação das equações de perda de carga sem compressores

Perda de carga	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
Colebrook	104.6	0	88.4	0	28.7	4696	-
Weymouth	105.4	0	90.2	0	28.7	4345	7.5%
AGA	104.4	0	88.0	0	28.7	4793	2.0%

Tabela 4 – Comparação das equações de perda de carga com compressores

Perda de carga	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
Colebrook	77.6	4603	80.9	4222	25.7	7307	-
Weymouth	83.3	3393	86.5	3071	26.0	6499	11.1%
AGA	75.6	5017	79.0	4621	25.6	7505	2.7%



7.3 Viscosidade

O cálculo da viscosidade, como pode ser visto nos resultados apresentados na Tabela 5 e Tabela 6, não afeta significativamente os resultados da simulação. Entretanto, como a correlação de Lee (LGE) apresenta um equacionamento simplificado, sem demandar muito poder computacional, seu uso pode ser indicado.

Tabela 5 – Comparação do cálculo de viscosidade sem compressores

Viscosi- dade	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
LGE	104.6	0	88.4	0	28.7	4696	-
Constante	104.6	0	88.4	0	28.7	4713	0.3%

Tabela 6 – Comparação do cálculo de viscosidade com compressores

Viscosi- dade	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
LGE	77.6	4603	80.9	4222	25.7	7307	-
Constante	77.3	4663	80.6	4278	25.7	7339	0.4%

7.4 Temperatura de entrada do gás

A temperatura de entrada do gás, apesar de poder sofrer grandes variações, não exerce influência no resultado da simulação, principalmente em dutos longos e sem isolamento térmico, como demonstrado nas Tabela 7 e Tabela 8. Porém, o efeito dessa variável poderá ser mais significativo em dutos curtos e/ou com isolamento térmico. Uma análise específica para esses casos deve ser realizada.

Tabela 7 – Comparação da variação de temperatura do gás sem compressores

Urucu Temp.	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
30.0	104.6	0	88.4	0	28.7	4696	-
40.0	104.4	0	88.2	0	28.7	4697	0.0%
20.0	104.8	0	88.6	0	28.7	4730	0.7%

Tabela 8 – Comparação da variação de temperatura do gás com compressores

Urucu Temp.	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
30.0	77.6	4603	80.9	4222	25.7	7307	-
40.0	75.8	4922	80.3	4329	25.7	7337	0.4%
20.0	78.9	4398	80.9	4223	25.7	7342	0.5%



7.5 Temperatura do ambiente (solo)

Em comparação com a temperatura de entrada do gás no sistema, a influência da temperatura do solo é significativamente maior, para ambas as faixas de vazão apresentadas, como demonstrado na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Comparação da variação de temperatura do ambiente sem compressores

Temp. Ambiente	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
30.0	104.6	0	88.4	0	28.7	4696	-
25.0	104.5	0	88.4	0	23.6	4775	1.7%
20.0	104.4	0	88.3	0	18.5	4840	3.1%

Tabela 10 – Comparação da variação de temperatura do ambiente com compressores

Temp. Ambiente	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
30.0	77.6	4603	80.9	4222	25.7	7307	-
25.0	76.6	4710	80.4	4247	20.4	7444	1.9%
20.0	75.9	4770	80.3	4221	15.1	7556	3.4%

7.6 Cálculo térmico

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 11 e na Tabela 12, pode-se notar que as variações pelo efeito Joule-Thompson são reduzidas, produzindo resultados de temperatura e vazão similares. Isso se deve, em parte, ao comprimento do duto, que mitiga esses efeitos.

Para um sistema mais complexo, principalmente com o uso de compressores, é recomendado o cálculo de trocas térmicas no modelo de simulação. A Tabela 12 mostra, por exemplo, o efeito da temperatura na potência requerida, que afeta direta o gás utilizado no sistema (GUS). Uma comparação mais ampla do uso do cálculo térmico em gasodutos pode ser encontrada na referência 9.9.

Tabela 11 – Comparação do cálculo de temperatura sem compressores

Temp. Ambiente	Cálculo de Temp.	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
30.0	Térmico	104.6	0	88.4	0	28.7	4696	-
30.0	Isotérmico	104.6	0	88.4	0.0	30.0	4681	0.3%
25.0	Térmico	104.5	0	88.4	0	23.6	4775	-
25.0	Isotérmico	104.7	0	88.5	0.0	25.0	4751	0.5%
20.0	Térmico	104.4	0	88.3	0	18.5	4840	-
20.0	Isotérmico	104.7	0	88.5	0.0	20.0	4826	0.3%

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 15 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-

-

Tabela 12 – Comparação do cálculo de temperatura com compressores

Temp. Ambiente	Cálculo de Temp.	Juaruna Pres suc	Juaruna Pot.	Coari Pres suc	Coari Pot.	Reman Temp.	Vazão	Comp. Vazão
30.0	Térmico	77.6	4603	80.9	4222	25.7	7307	-
30.0	Isotérmico	76.0	5019	82.4	4062.8	30.0	7348	0.6%
25.0	Térmico	76.6	4710	80.4	4247	20.4	7444	-
25.0	Isotérmico	76.0	4957	82.4	4008.7	25.0	7457	0.2%
20.0	Térmico	75.9	4770	80.3	4221	15.1	7556	-
20.0	Isotérmico	76.0	4891	82.4	3952.2	20.0	7574	0.2%

8 CONCLUSÕES

O modelo utilizado neste relatório não foi validado com dados reais de operação nem verificado contra documentos de projeto. A base para a sua modelagem utilizou dados e relatórios de simulação fornecidos pela ANP. Sua utilização foi apenas para avaliar as variáveis apresentadas.

A escolha das variáveis utilizadas como caso de referência foi baseada em uma análise técnicas das opções apresentadas pelo programa de simulação, a fim de atender o maior número de casos possíveis com a maior precisão permitida. Essas variáveis se encontram resumidas na Tabela 13. Sugere-se o uso das mesmas para a simulação de gasodutos utilizando o programa PipelineStudio.

Tabela 13 – Variáveis do caso base

Variável	Escolha
Equação de Estado	BWRS
Cálculo de Perda de Carga	Colebrook-White
Cálculo de Viscosidade	LGE
Cálculo de Temperatura	Não-Isotérmico

Os resultados obtidos nesse relatório não atendem somente ao programa de simulação utilizado, pois o equacionamento dessas variáveis independe do programa. O resultado aqui encontrado, para as variáveis analisadas pode ser utilizado para qualquer programa.

Ressalta-se novamente que, para um modelo que sofreu *tuning* baseado em dados de operação, é possível encontrar resultados mais precisos utilizando outras escolhas. Entretanto, sem essa alteração na modelagem, as escolhas apresentadas devem obter resultados mais precisos. Assim, além das premissas da modelagem, um modelo ajustado deve apresentar quais parâmetros foram alterados e o procedimento utilizado para o seu ajuste (*tuning*). Sem essas informações, a modelagem do problema ficará incompleta impossibilitando a verificação de resultados apresentados baseados nesses modelos.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-007**

REV. 0

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

FOLHA 16 de 16

TÍTULO: Avaliação de variáveis de simulação computacional de gasodutos

-

-

A análise apresentada considerou o escoamento de gás natural, na fase gasosa, em condições típicas de gasodutos de transporte. A análise para outros fluidos ou para gás natural em outros estados físicos pode acarretar novas escolhas.

Todos os agentes do mercado (transportadores, carregadores, reguladores, etc) devem ter o interesse de trabalhar com modelos de simulação termohidráulica que representem com a maior precisão possível os gasodutos modelados. Assim, sempre que os modelos não puderem ser ajustados, as boas práticas de modelagem apresentadas no presente estudo são recomendadas. Porém, a comparação da modelagem de gasodutos com programas de simulação distintos, mas com as mesmas premissas, deve encontrar resultados similares, mas nunca iguais, devido à característica iterativa do cálculo e às aproximações envolvidas. A definição de um percentual de desvio entre modelos (com premissas e equacionamentos aceitáveis), sem que haja uma comparação com dados reais, irá variar de duto para duto e mesmo para um mesmo duto em relação a condições operacionais distintas, sem que se chegue a uma conclusão de qual modelo está fornecendo resultados mais confiáveis. Logo, o modelo aceito como o mais adequado deverá ser totalmente documentado, com as premissas baseadas nas melhores práticas de engenharia (ou com o procedimento de ajuste documentado) e, finalmente, acordado entre os agentes do mercado.

9 BIBLIOGRAFIA

- 9.1. Oluyemisi Jeje, Louis Mattar, Comparison of Correlations for Viscosity of Sour Natural Gas, Fekete Associates Inc.
- 9.2. E. Shashi Menon, Gas Pipeline Hydraulics, 2005. Taylor & Francis Group.
- 9.3. Donald W. Schroeder Jr, A Tutorial on Pipe Flow Equations, Stoner Associates Inc.
- 9.4. Jerry L. Modisette, Equation of State Tutorial, PSIG 2000
- 9.5. Doug Fauer, P.E., The Making of an Useful Pipeline Simulation Model. Southern Natural Gas. 2002.
- 9.6. Donald W. Schroeder, Jr., A Tutorial of Pipe Flow Equations. 2001.
- 9.7. Susan Bachman et. al., Accuracy versus Precision in Modeling. PSIG 2000.
- 9.8. F.E. Londono, R.A. Archer, T.A. Blasingame. Simplified Correlations for Hydrocarbon Gas Viscosity and Gas Density - Validation and Correlation of Behaviour Using a Large-Scale Database. SPE Gas Technology Symposium, 2002.
- 9.9. A. J. Osiadacz, M. Chaczykowski. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models. Chemical Engineering Journal 81 (2001). pg 41–51.