	RELATÓRIO		Nº: RL-ANP-FPL-009						
	CLIENTE: ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS			FOLHA: 1 de 25					
	PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS			-					
	TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade			-					
Faculdades Católicas – PUC-Rio – SIMDUT									
ÍNDICE DE REVISÕES									
REV.	DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS								
0	EMISSÃO ORIGINAL								
A	EMISSÃO APÓS OS COMENTÁRIOS GERAIS DA ANP								
B	REVISÃO DO ITEM 4								
C	REVISÃO DO ITEM 4								
D	REVISÃO DO ITEM 4 APÓS COMENTÁRIOS DA ANP								
E	REVISÃO APÓS OS COMENTÁRIOS DA ANP. ALTERAÇÃO DA REDAÇÃO DO CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA.								
F	REVISÃO DAS TABELAS 5, 7, 8, 9 E 10								
G	REVISÃO DO ITEM 4								
	REV. 0	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H
DATA	16/08/1013	30/08/2013	13/09/2013	10/10/2013	23/10/2013	25/11/2013	21/01/2014	13/03/2014	
PROJETO	ANP	ANP	ANP	ANP	ANP	ANP	ANP	ANP	
EXECUÇÃO	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin	M. Casarin	M.Casarin	
VERIFICAÇÃO	P. Krause	P. Krause	P. Krause	P. Krause	P. Krause	P.Krause	P.Krause	P. Krause	
APROVAÇÃO	LPires	LPires	LPires	LPires	LPires	LPires	LPires	LPires	
AS INFORMAÇÕES DESTES DOCUMENTOS SÃO PROPRIEDADE DA ANP, SENDO PROIBIDA A UTILIZAÇÃO FORA DA SUA FINALIDADE.									

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 2 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

-

-

ÍNDICE

1	OBJETIVO	3
2	INTRODUÇÃO	3
3	CONDIÇÃO DE CONTORNO NOS ELEMENTOS DO MODELO	3
3.1	DUTO	4
3.2	PONTO DE RECEBIMENTO	4
3.3	PONTO DE ENTREGA	5
3.4	ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO	6
3.5	VÁLVULAS DE CONTROLE	7
4	MARGEM OPERACIONAL	8
4.1	EXEMPLO 1	10
4.2	EXEMPLO 2	17
5	CONCLUSÃO	25
6	REFERÊNCIA	25



1 OBJETIVO

Conforme estabelecido no Plano de Trabalho, referência 6.1, este relatório visa definir as condições de contorno para cada um dos elementos presentes em um modelo termo-hidráulico de um gasoduto ou malha de gasodutos, promovendo a aderência com a metodologia de cálculo de capacidade definida na referência 6.2.

É apresentada também uma definição para o estoque estratégico e como ele afeta as condições de contorno para o cálculo de capacidade.

2 INTRODUÇÃO

As condições de contorno são valores que complementam o equacionamento de problemas formulados a partir de equações diferenciais. Em termos práticos, elas ajudam a definir o comportamento de um equipamento a partir de uma condição operacional. Em um modelo termo-hidráulico de uma malha de gasodutos, as condições de contorno dos diversos elementos que a compõem são usadas para indicar qual o modo operacional do modelo.

Cada elemento da malha pode apresentar uma ou mais condições de contorno, que serão selecionadas de acordo com a lógica de cálculo. Entretanto, isso não significa que todas as condições possíveis para um elemento devam ser atendidas ao mesmo tempo, ou mesmo que o programa utilizado permita a configuração de mais de uma condição de contorno por elemento.

As condições de contorno listadas neste relatório devem ser utilizadas na construção do modelo de simulação termo-hidráulica para o cálculo da capacidade de transporte, segundo a metodologia apresentas na referência 6.2.

3 CONDIÇÃO DE CONTORNO NOS ELEMENTOS DO MODELO

Neste item são listados os diversos elementos de uma malha de gasodutos que podem estar presentes nos modelos de simulação termo-hidráulica e suas possíveis condições de contorno.

Cabe ressaltar que dependendo do software de simulação utilizado não é permitido que um nó de interligação de dois ou mais elementos sejam configuradas condições de contorno diferentes, pois, desta forma, não estaria sendo ajustado no modelo qual condição deve ser atendida no referido ponto.

É imprescindível mencionar que, ainda que um modelo termo-hidráulico seja ajustado com uma ou mais condições de contorno por elemento, cabe ao responsável pela simulação termo-

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 4 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

-

-

hidráulica verificar, para cada elemento do modelo, se alguma condição de contorno não foi atendida, seja esta configurada no modelo ou não. O não atendimento de uma condição de contorno implica em uma análise dos parâmetros técnicos e econômicos (contratuais) ajustados e deve ser realizada por profissional capacitado.

3.1 Duto

O duto não possui uma condição de contorno própria, no entanto a sua pressão de operação está limitada à sua pressão máxima operacional admissível (PMOA). A PMOA é calculada com base nos seus dados construtivos, como diâmetro, espessura, material do duto, classe de locação, assim como nas pressões de teste hidrostático, entre outros parâmetros.

Cada trecho de um gasoduto ou malha de gasodutos tem um valor de PMOA. A interligação de trechos com valores diferentes é feita através de estações reguladoras de pressão, que controlam a pressão de acordo com o trecho de menor valor de PMOA, garantindo a segurança operacional.

Embora a PMOA não seja uma condição de contorno, o seu valor deve ser observado e pode servir de condição de contorno para outros elementos do modelo, visando uma operação segura e dentro dos limites do sistema de dutos.

Quando a simulação requer uma análise não isotérmica, a distribuição de temperatura do solo normalmente está associada às condições de contorno do duto. Nesse caso, o coeficiente de transferência de calor entre o duto e o solo pode ser fornecido diretamente ou ter seu valor calculado a partir das propriedades do solo e de possíveis revestimentos do duto.

3.2 Ponto de recebimento

Quando o ponto de recebimento (PTR) representa um ponto de injeção de gás no duto deve ter a pressão configurada para o limite do equipamento ou até o valor da pressão máxima operacional admissível (PMOA) naquele ponto do gasoduto ou rede de gasodutos.

A vazão no PTR não foi considerada como condição de contorno, conforme descrito na referência 6.2, na qual é explicado o fato de que novos carregadores precisam construir um novo tramo de medição, acarretando o dimensionamento dos equipamentos para atender a vazão que se deseja injetar a mais no duto.

No caso do PTR estar representando uma interconexão entre dois gasodutos de transportadores distintos e que não exista injeção de nova quantidade de gás natural no sistema, os limites dos equipamentos existentes na interconexão devem ser observados. Além



disso, os limites de pressão e vazão dos acordos de interconexão devem ser usados como condição de contorno.

Para um PTR que represente o ponto de conexão entre um terminal de GNL e o gasoduto, esse é tratado como um ponto de recebimento normal e a sua condição de contorno de pressão é a PMOA e não é considerado um limite de vazão. Se um segundo carregador desejar se conectar ao gasoduto no mesmo ponto, a condição de contorno para os dois carregadores será a pressão, limitada a PMOA. O carregador responsável pelo terminal de GNL deverá de alguma forma compensar a perda de carga do ramal, para que a pressão na conexão com o gasoduto seja a mesma do segundo carregador e limitada a PMOA.

A Tabela 1 apresenta um resumo para as condições de contorno de um PTR para as capacidades de transporte e a capacidade contratada de transporte.

Tabela 1 - Resumo das condições de contorno para o PTR

Representação do PTR	Condição de contorno	
	Capacidade de transporte	Capacidade contratada de transporte
PTR como ponto de injeção de gás no duto	Pressão = PMOA	Pressão = PMOA
PTR como ponto de interconexão	Pressão e vazão descritos nos acordos de interconexão	Pressão e vazão descritos nos acordos de interconexão
PTR como terminal de GNL	Pressão = PMOA	Pressão = PMOA

No caso de uma análise não isotérmica, a temperatura de entrada do gás natural deve ser fornecida complementando as condições de contorno do PTR.

3.3 Ponto de entrega

Nos pontos de entrega, que representam os consumidores, devem ser observadas as condições de contorno de vazão e pressão mínima de entrega.

Seguindo a metodologia descrita na referência 6.2, para cada etapa do cálculo, deve ser ajustado um valor de vazão para o PTE. Assim, para o cálculo da capacidade contratada de transporte no PTE, a vazão no ponto de entrega deve ser ajustada para a vazão contratual. Durante o procedimento do cálculo da capacidade de transporte, posteriormente, a vazão deve ser elevada para um valor máximo que não infrinja algum limite operacional ou contratual em outro ponto qualquer do gasoduto ou trecho analisado. Caso o contrato permita uma variação da vazão ao longo do tempo, a mesma deve ser analisada a luz da legislação vigente para determinar se será utilizado um valor médio ou perfil de consumo definido no contrato.



A pressão mínima deve ser controlada para que não fique abaixo do valor contratual, mesmo que alguns contratos permitam um percentual inferior a este valor sem a ocorrência de penalidades para o transportador. A pressão contratual está sendo definida a montante do ponto de entrega e o modelo não considera perdas de carga que ocorrem dentro do ponto de entrega. Se houver necessidade de incluir a perda de carga no modelo, o seu valor deve ser explicitado.

A interconexão entre dois gasodutos de transportadores diferentes pode ser tratada como um ponto de entrega para o transportador cujo gasoduto está fornecendo gás para o outro. Essas interconexões, como envolvem transferência de custódia, são caracterizadas pela existência de Estações de Medida (EMED). Nesse caso, as condições de contorno que devem ser controlados são a pressão e a vazão dos acordos de interconexão. Os valores usados no binário da interconexão, ponto de recebimento e ponto de entrega, devem ser iguais para os dois transportadores.

A Tabela 2 apresenta um resumo das condições de contorno para os PTE presentes no modelo de simulação.

Tabela 2 - Resumo das condições de contorno para o PTE

Representação do PTE	Condição de contorno	
	Capacidade de transporte	Capacidade contratada de transporte
PTE como ponto de retirada de gás no duto	Pressão = Pressão mínima contratual Vazão = Vazão máxima até o limite do PTE ou até que um limite operacional ou contratual seja atingido em qualquer elemento do trecho analisado	Pressão = PMOA Vazão = Vazão máxima contratual
PTE representando ponto de interconexão	Pressão e vazão descritos nos acordos de interconexão	Pressão e vazão descritos nos acordos de interconexão

3.4 Estação de compressão

As estações de compressão compreendem uma série de equipamentos como compressores, válvulas, acionadores, aquecedores, entre outros. Quanto maior for o número de equipamentos da estação de compressão traduzidos no modelo de simulação, maior será a complexidade na hora de configurar as condições de contorno das mesmas.

Para o cálculo de capacidade de transporte, a condição de contorno que se deve configurar é a pressão máxima de descarga. A pressão de descarga deve estar limitada à PMOA do duto para aquele ponto. Porém, dependendo da configuração dos demais equipamentos e da lógica de cálculo, outras condições de contorno devem ser observadas como limitante no cálculo de

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 7 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade-
-

capacidade: pressão de sucção, vazão, diferencial de pressão entre a sucção e a descarga ou uma taxa de compressão.

A potência de operação, velocidade de rotação, vazão de *surge* e de *stonewall* também devem ser observadas para não ultrapassarem os reais limites do equipamento. Para o acompanhamento dessas variáveis é necessário que o responsável técnico conheça os equipamentos e possua as curvas características de operação dos mesmos.

Existem outros equipamentos que estão presentes e podem ser modelados, pois possuem suas próprias condições do contorno, como por exemplo, os trocadores de calor, que devem ser configurados através da temperatura de descarga ou da diferença de temperatura do gás natural que deve ser aplicada pelo trocador de calor.

Deve-se lembrar que todos os equipamentos presentes na estação de compressão provocam uma perda de carga que, caso seja significativa, deve ser incluída no modelo. Porém esse efeito não se caracteriza como condição de contorno.

A Tabela 3 resume as condições de contorno para as estações de compressão.

Tabela 3 – Resumo das condições de contorno para a estação de compressão

Estação de compressão	Condição de contorno	
	Capacidade de transporte	Capacidade contratada de transporte
	Pressão = Pressão de descarga ajustada para maximizar a vazão no PTE estudado e pressão de sucção acima da pressão mínima de sucção	Pressão = Pressão de descarga ajustada para atender a vazão no PTE estudado pressão de sucção acima da pressão mínima de sucção

3.5 Válvulas de controle

As válvulas de controle normalmente são utilizadas para a redução de pressão (ERP) ou para controle de vazão o que determina a condição de contorno. No caso da válvula de controle de pressão, a pressão máxima de descarga deve estar limitada ao valor da PMOA do duto a jusante da válvula. Essa condição também é mandatória para o cálculo da capacidade de transporte. O controle pode ser configurado como um diferencial de pressão ou um valor fixo da válvula controladora, respeitando também os valores contratuais quando existirem.

No cálculo da capacidade contratada de transporte, o valor da condição de pressão que deve ser utilizado é o da pressão máxima contratual, que não pode ser maior que a PMOA do duto a jusante da válvula de controle.

Para a válvula de controle de vazão, a condição de contorno ajustada é a vazão e deve ser limitada ao valor máximo contratual, sem infringir os valores máximos e mínimos de projeto.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 8 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

-

-

Na Tabela 4 são listadas as condições de contorno para as válvulas de controle de vazão e pressão.

Tabela 4 - Resumo das condições de contorno para as válvulas de controle

Válvula de controle	Condição de contorno	
	Capacidade de transporte	Capacidade contratada de transporte
Pressão	Pressão = PMOA	Pressão = Pressão máxima contratual
Vazão	Vazão = Vazão máxima de projeto	Vazão = Vazão máxima contratual

4 MARGEM OPERACIONAL

Como discutido na referência 6.3, se um gasoduto estiver operando com um empacotamento mínimo (pulmão igual a zero), não será possível acomodar qualquer variação para maior nas vazões dos pontos de entrega ou oscilações operacionais nos equipamentos. Nesse caso, as pressões nos pontos de entrega iriam para valores abaixo dos contratados, caracterizando falha na entrega. Com um pulmão diferente de zero, parte do volume de gás do pulmão pode ser temporariamente adicionado aos valores já disponibilizados nos pontos de entrega, considerando os limites operacionais desses pontos. Logo, o pulmão garante a flexibilidade operacional do sistema, ou seja, variações no recebimento, nos pontos de entrega ou em equipamentos podem ser acomodadas temporariamente pelo volume de gás do pulmão. Quanto maior o pulmão, maior a flexibilidade do sistema, e o pulmão máximo representa a máxima flexibilidade do sistema.

Quando o sistema está operando na capacidade de transporte, isso é, com a capacidade contratada igual à capacidade de transporte, o estoque operacional e o mínimo serão iguais. Por definição o pulmão será igual a zero e o sistema não disporá de flexibilidade.

Deve-se observar que embora exista uma vazão contratual máxima para os pontos de entrega, elas podem variar de acordo com a programação mensal ou diária definida pelo carregador. Além disso, a soma das vazões realizadas nos pontos de entrega não necessariamente corresponde à soma das vazões dos pontos de recebimento, condição tipicamente definida como desequilíbrio operacional. Por outro lado, a operação do gasoduto depende de equipamentos que apresentam flutuações operacionais e que estão sujeitos a falha.

Logo, a margem operacional representa uma parcela da capacidade de transporte necessária para acomodar as variações operacionais decorrentes do desequilíbrio (situação gerada pelo carregador), das mudanças das configurações operacionais para atender a programação e da confiabilidade da rede de transporte (essas duas últimas de



responsabilidade do transportador). No entanto, a introdução de uma margem operacional para dar flexibilidade ao sistema de transporte afeta diretamente a capacidade disponível.

A referência 6.5, adotada na Europa, define a Capacidade Disponível como sendo a diferença entre a máxima capacidade operacional (Capacidade de Transporte) e a capacidade operacional, sendo esta a necessária para atender a Capacidade Contratada e uma margem operacional que garanta uma operação eficiente, conforme representado na Figura 1.

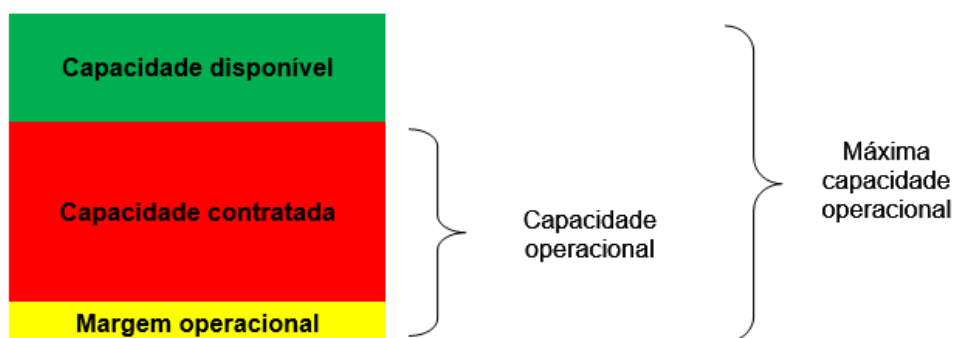


Figura 1 – Composição da máxima capacidade operacional

Deve-se observar que a referência 6.5 considera que a Capacidade Contratada inclui todos os compromissos contratuais. Assim, além do atendimento aos valores de vazão explicitamente contratados, outras garantias contratuais dadas pelo transportador ao carregador, como o percentual de desequilíbrio, também devem ser considerados como parte integrante da Capacidade Contratada. Logo, a Margem Operacional deve ser dimensionada para todas essas variáveis. Fisicamente, a Margem Operacional é representada por um volume de gás estocado no duto (estoque estratégico) que fornecerá a flexibilidade necessária para uma operação segura e confiável.

Uma adaptação do modelo europeu é apresentada na Tabela 5, onde a Capacidade de Transporte deve ser entendida como a vazão máxima que pode ser transportada para um ponto de entrega quando aplicada a metodologia de cálculo de capacidade, sem considerar fatores como flexibilidade e confiabilidade, que podem diminuir tal Capacidade de Transporte.

A Capacidade Comercial é aquela que pode ser motivo de contrato e é obtida quando a Margem Operacional é retirada da Capacidade de Transporte. Quando somente uma parte da Capacidade Comercial está contratada, a diferença entre as duas representa a Capacidade Disponível.

A Margem Operacional é necessária para acomodar flutuações comerciais e operacionais. Essa margem é composta por uma parcela demandada pelo carregador, representada pelo



percentual de desequilíbrio¹ e outra devido à operação do sistema, de responsabilidade do transportador, que representa uma flexibilidade do transportador para acomodar mudanças na configuração operacional do sistema (por exemplo, manutenção programada). Esta parcela não abrange falhas de serviço de transporte, usualmente elencadas no contrato de prestação de serviço de transporte:

O gás transportado em um gasoduto atende aos valores demandados pelos pontos de entrega e ao gás de uso do sistema (GUS). O GUS inclui o gás combustível necessário para a operação dos equipamentos (compressores, trocadores de calor, etc.), gás não contabilizado e perdas. Ao se realizar o cálculo da capacidade segundo a metodologia apresentada, a influência do GUS já está contabilizada no processo. Assim, quanto maior o GUS, menor será a capacidade de transporte e, consequentemente, a disponível.

Especificamente em relação ao gás combustível de um determinado compressor, não é possível identificar qual parcela desse gás combustível é necessária para atender um determinado ponto de entrega e, consequentemente, não é possível quantificar o seu valor em relação a capacidade de transporte do ponto de entrega. Porém, é possível quantificar o incremento do gás combustível a partir de uma determinada situação, por exemplo a Capacidade Contratada, para um outra, por exemplo a Capacidade Comercial. Esse incremento representa a quantidade de gás que o carregador deve disponibilizar para contratar a Capacidade Disponível de um ponto de entrega e pode ser incluído como observação da Tabela 5.

Tabela 5 – Exemplo 1 – Decomposição de capacidade

Capacidade de Transporte		
Margem Operacional	Capacidade Comercial	
	Capacidade Contratada	Capacidade Disponível

*Incremento do GUS

4.1 Exemplo 1

Para exemplificar esses conceitos, será apresentado um exercício baseado em um gasoduto com um ponto de recebimento e dois pontos de entrega, com as seguintes características:

- Diâmetro: 14"

¹ Desequilíbrio: diferença entre os volumes injetados no sistema de transporte pelo carregador, ou por quem este venha a indicar, e os volumes retirados do sistema pelo carregador, ou por quem este venha a indicar, devendo ser descontada dos volumes de gás para uso no sistema e de perdas extraordinárias, durante um determinado período de tempo.

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G**

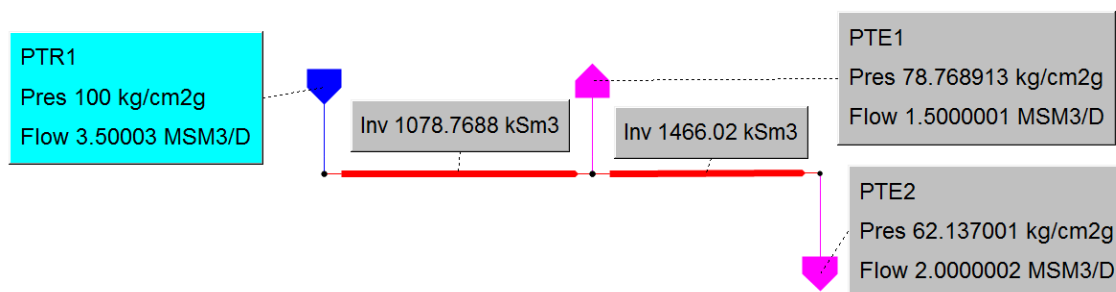
PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS

FOLHA 11 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

- Comprimento: 280 km
- Pressão máxima operacional: 100 kgf/cm²
- Pressão mínima de entrega: 35 kgf/cm²
- Vazão contratada no PTE1: 1,5 Mm³/dia
- Vazão contratada no PTE2: 2,0 Mm³/dia

Na Figura 2 é observada a situação contratual do gasoduto, onde a capacidade contratada é de 3,5 Mm³/dia e a pressão no ponto de recebimento foi ajustada para seu valor máximo. Como consequência, a pressão no PTE2 (62,1 kgf/cm²) encontra-se acima da mínima. Operando a partir dessa situação, verifica-se que existe uma margem operacional capaz de absorver variações na operação. Como exemplo, seria possível interromper ou reduzir o fornecimento de gás natural no PTR1 por um tempo, acarretando uma queda na pressão dos pontos de entrega, sem que necessariamente um deles atinja a pressão mínima de entrega. Outra condição operacional que o gasoduto poderia ser capaz de absorver é a oscilação da pressão do ponto de recebimento, provocada, por exemplo, por flutuações na pressão de descarga dos compressores.

**Figura 2 – Exemplo 1 - Capacidade contratada atual**

Quando a metodologia de cálculo de capacidade de transporte é aplicada e a vazão do PTE1 é elevada até que um limite operacional ou contratual seja atingido, é obtida a capacidade de transporte do PTE1 igual a 2,552 Mm³/dia, conforme a Figura 3. Utilizando o mesmo procedimento para o PTE2, na Figura 4 é apresentada a capacidade de transporte deste ponto de entrega, que é igual a 2,526 Mm³/dia. As diferenças das capacidades de transporte para os respectivos pontos de entrega e os valores contratuais são as capacidades disponíveis para cada PTE. Se a capacidade disponível for contratada integralmente, o gasoduto ficará sem margem operacional para absorver as variações operacionais ou desequilíbrios.

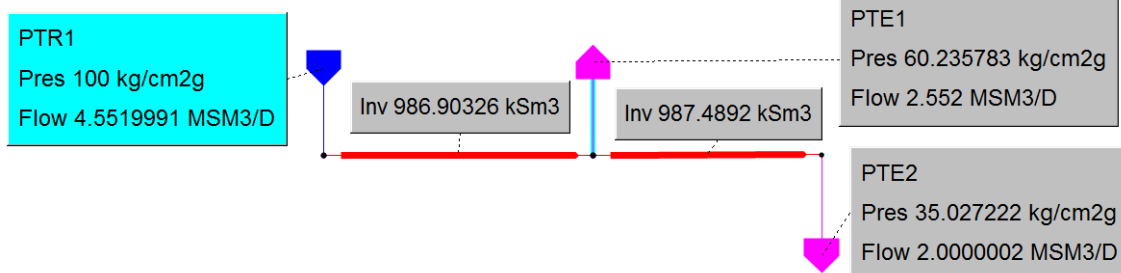


Figura 3 – Exemplo 1 – Capacidade de transporte do gasoduto para o PTE1

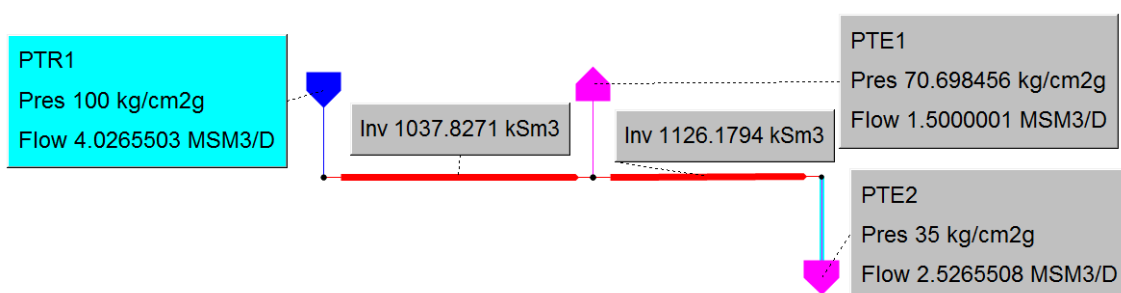



Figura 4 – Exemplo 1 – Capacidade de transporte do gasoduto para o PTE2

Utilizando como exemplo de desequilíbrio o valor de 5% da vazão contratada, que é apresentado no documento Termos e Condições Gerais (TCG) do contrato do GASENE (referência 6.4), foi criado um cenário de simulação em regime transiente onde a vazão do PTR1 é reduzida em 5% durante 24 horas e após esse período a vazão é aumentada em 5% da vazão original. A vazão do ponto de entrega para o qual está sendo avaliada a capacidade disponível é elevada até o valor que permita a ocorrência do desequilíbrio sem infringir limites operacionais ou contratuais. Esse processo pode ser realizado por sucessivas tentativas. A vazão no outro ponto de entrega deve permanecer constante.

A Tabela 6 apresenta as tentativas realizadas para se obter a Capacidade Comercial do PTE1, onde para cada vazão do PTE1 foi simulado o caso de desequilíbrio e observado a menor pressão mínima dos PTE's para cada caso. O processo pode ser encerrado quando a diferença de vazão que violar alguma das pressões mínimas dos pontos de entrega ultrapassar a margem de erro admissível para o sistema de medição de vazão, de acordo com a Resolução Conjunta ANP-Inmetro 1/2013.

Tabela 6 – Tentativas do cálculo de capacidade comercial

Tentativa	Vazão do PTE1 (10 ³ m ³ /dia)	Pressão do PTE1 (kgf/cm ²)	Pressão do PTE2 (kgf/cm ²)
1	2.250	60,70	37,39

	RELATÓRIO		Nº RL-ANP-FPL-009	REV. G
	PROGRAMA: MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS			FOLHA 13 de 25
	TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade			-

Tentativa	Vazão do PTE1 (10 ³ m ³ /dia)	Pressão do PTE1 (kgf/cm ²)	Pressão do PTE2 (kgf/cm ²)
2	2.280	60,05	36,32
3	2.300	59,62	35,61
4	2.310	59,42	35,26
5	2.312	59,35	35,25
6	2.315	59,29	35,05

Para o PTE1 a Capacidade de Comercial que permite um desequilíbrio de 5%, considerando no PTE2 a vazão contratual já estabelecida, é de 2,315 Mm³/dia conforme Figura 5. A Margem Operacional é de 0,237 Mm³/dia quando toda a Capacidade Comercial do PTE1 é contratada.

Na Tabela 7 é decomposta a Capacidade de Transporte nos diversos itens que a compõem.

O valor de 0,237 Mm³/dia da Margem Operacional não varia com o valor da Capacidade Disponível, mas depende do cenário considerado que, no exemplo, foi de 5% de desequilíbrio. Se outros cenários forem simulados o valor da Margem Operacional será diferente.

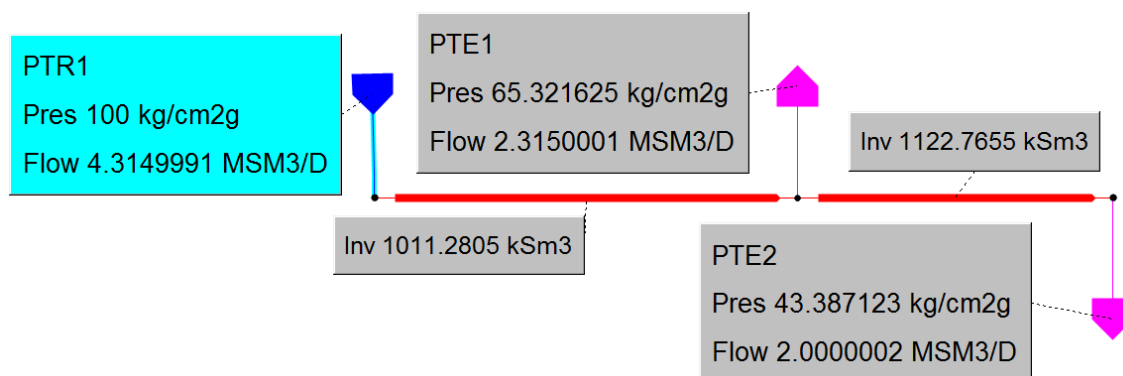


Figura 5 – Exemplo 1 – Capacidade comercial para o PTE1

Tabela 7 – Exemplo 1 – Decomposição de capacidade para o PTE1

2,552 Mm ³ /dia (Capacidade de Transporte)		
0,237 Mm ³ /dia (Margem Operacional)	2,315 Mm ³ /dia (Capacidade Comercial)	
	1,5 Mm ³ /dia (Capacidade Contratada)	0,815 Mm ³ /dia (Capacidade Disponível)

A Figura 6, a Figura 7 e a Figura 8 apresentam as variações da pressão e vazão ao longo do tempo durante a simulação em regime transiente do cenário nos PTE1, PTE2 e PTR1, respectivamente. No PTE1 a vazão entregue é constante e a pressão varia durante a simulação do cenário sem atingir a pressão mínima do ponto. No PTE2 a vazão também é



RELATÓRIO

Nº **RL-ANP-FPL-009**

REV. **G**

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

FOLHA 14 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

-

-

constante durante a simulação do cenário, mas a pressão de entrega quase atinge a pressão mínima de entrega. O menor valor da pressão ocorre após as 24 horas em que a vazão do PTR1 fica reduzida. Isso ocorre devido à capacitância do duto que não reage ao aumento de vazão do PTR1 de forma instantânea. Na Figura 8 é apresentada a variação de vazão e pressão no PTR1 ao longo do tempo.

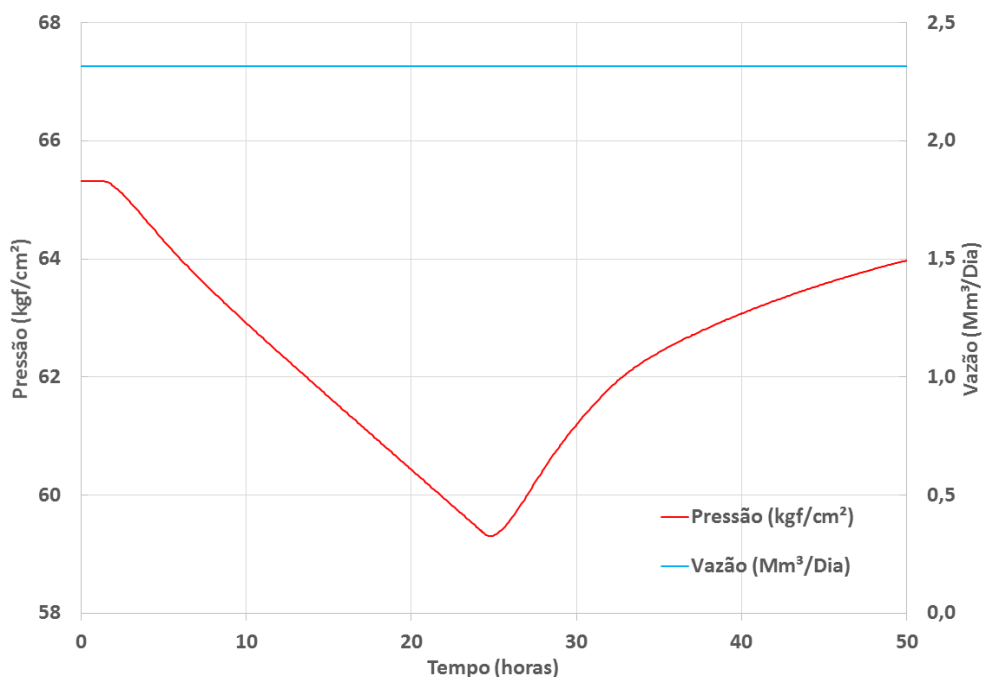


Figura 6 – Exemplo 1 – Transiente no PTE1 para capacidade do PTE1

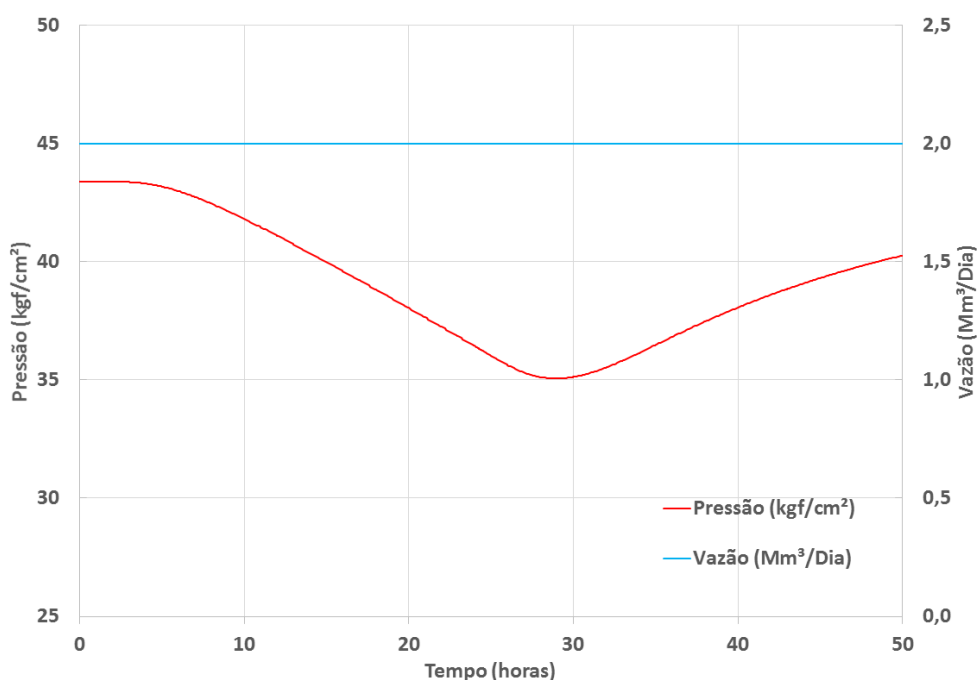
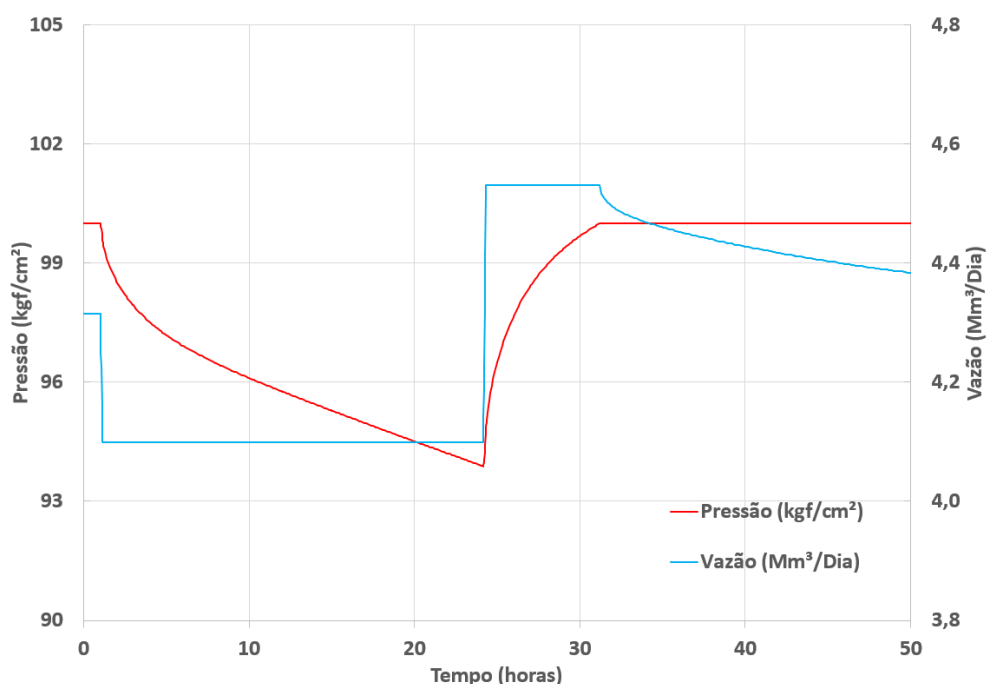
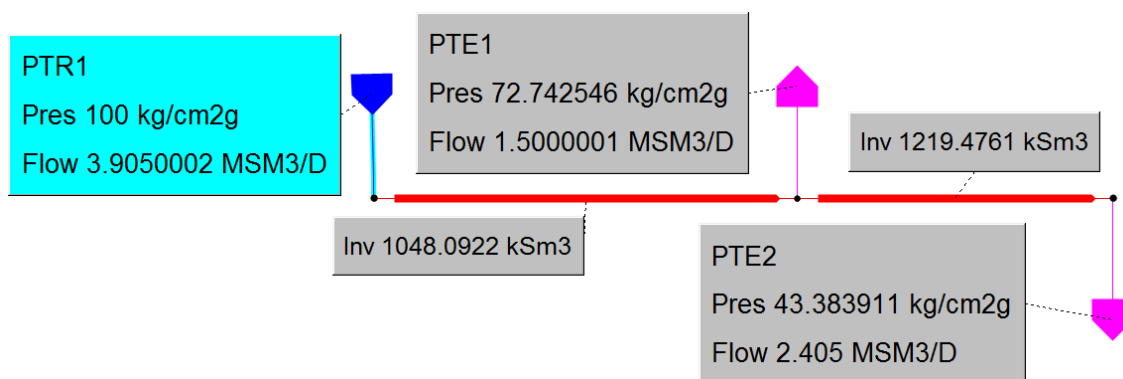


Figura 7 - Exemplo 1 – Transiente no PTE2 para capacidade do PTE1

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 15 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade**Figura 8 – Exemplo 1 – Transiente no PTR1 para capacidade do PTE1**

Para a aferição da capacidade para o PTE2 foi repetido o procedimento de cálculo de capacidade a partir das condições contratuais e a flexibilidade de 5%. O resultado em regime permanente é uma capacidade comercial de 2,405 Mm³/dia, conforme apresentado na Figura 9.

Na Tabela 8 é decomposta a Capacidade de Transporte em todos os elementos que a compõem, apresentando o valor da Margem Operacional, quando considerado o cenário de flexibilidade no ponto de recebimento de 5%.

**Figura 9 – Exemplo 1 – Capacidade comercial para o PTE2**

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G**

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

FOLHA 16 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

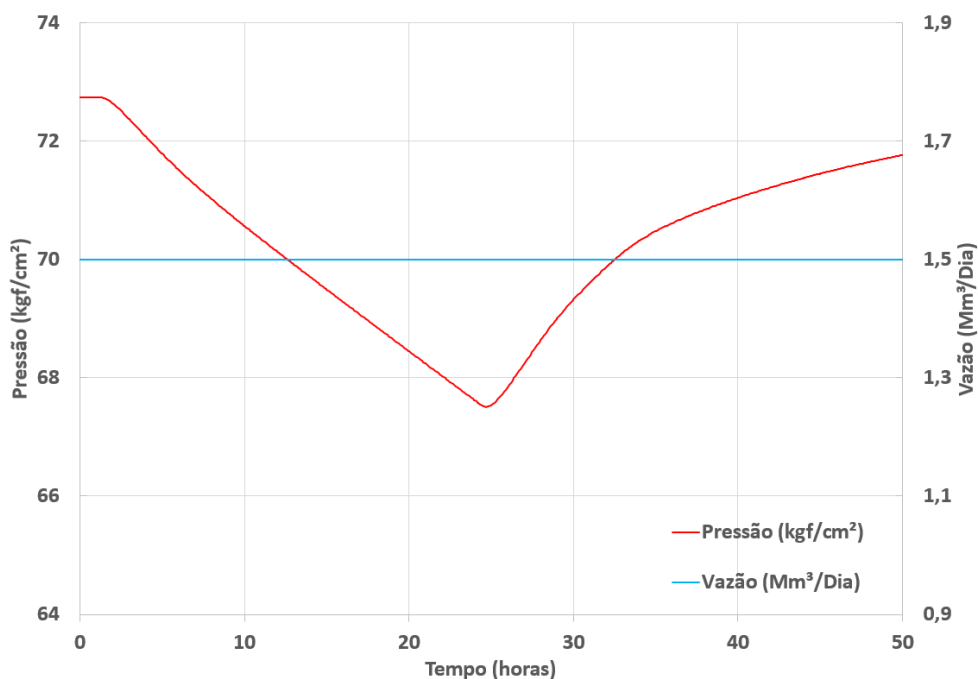
-

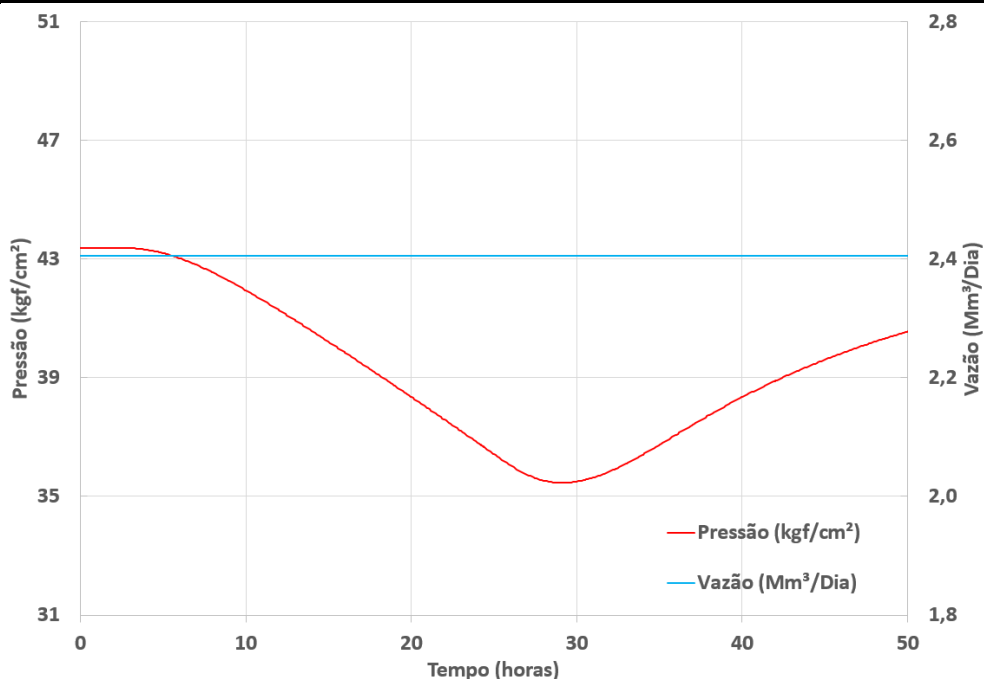
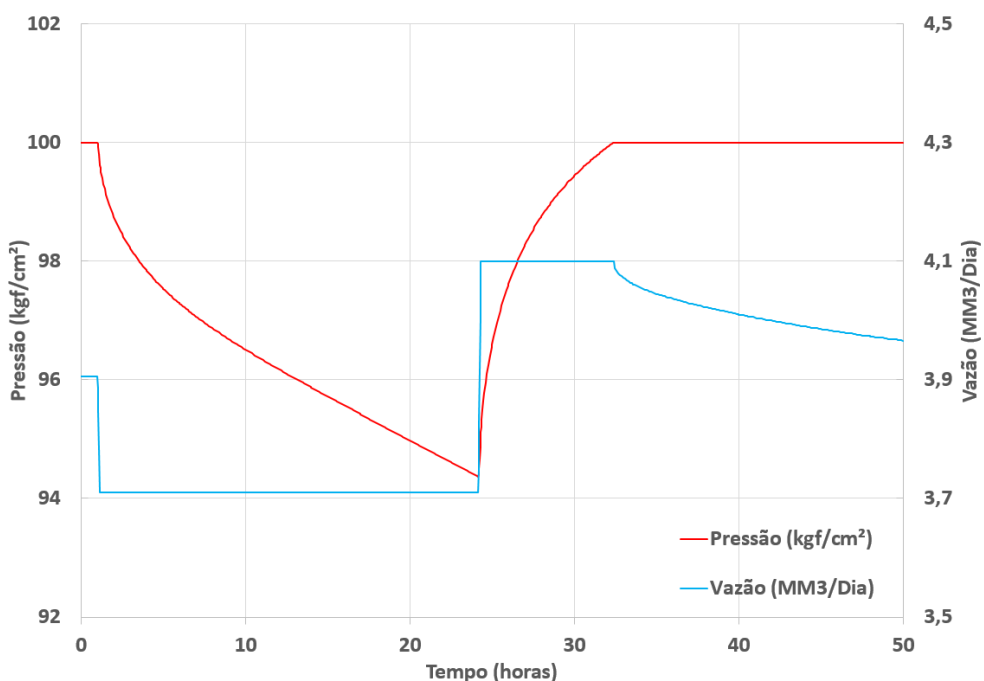
-

Tabela 8 – Exemplo 1 – Decomposição de capacidade para o PTE2

2,526 Mm³/dia (Capacidade de Transporte)		
0,121 Mm³/dia (Margem Operacional)	2,405 Mm³/dia (Capacidade Comercial)	
	2,0 Mm³/dia (Capacidade Contratada)	0,405 Mm³/dia (Capacidade Disponível)

A Figura 10, a Figura 11 e a Figura 12 apresentam as variações de pressão e vazão ao longo do tempo durante a simulação em regime transiente do cenário nos PTE1, PTE2 e PTR1, respectivamente. No PTE1 a vazão entregue é constante e a pressão varia durante a simulação do cenário sem atingir a pressão mínima do ponto. No PTE2 a vazão também é constante durante a simulação do cenário, mas a pressão de entrega quase atinge a pressão mínima de entrega. O menor valor da pressão ocorre após as 24 horas em que a vazão do PTR1 fica reduzida. Isso ocorre devido à capacitância do duto, que não reage ao aumento de vazão do PTR1 de forma instantânea. Na Figura 12 é mostrada a variação de vazão e pressão no PTR1 ao longo do tempo.

**Figura 10 – Exemplo 1 – Transiente no PTE1 para capacidade do PTE2**

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 17 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade**Figura 11 – Exemplo 1 – Transiente no PTE2 para capacidade do PTE2****Figura 12 – Exemplo 1 – Transiente no PTR1 para capacidade do PTE2**

4.2 Exemplo 2

Neste exemplo é adicionada uma estação de compressão para que se possa observar como é realizado o procedimento para determinação da capacidade de transporte quando existem equipamentos que consomem parte do gás natural que é transportado.



As características do modelo utilizado são:

- Diâmetro: 14"
- Comprimento: 280 km
- Pressão máxima operacional: 100 kgf/cm²
- Pressão mínima de entrega: 35 kgf/cm²
- Vazão contratada no PTE1: 1,5 Mm³/dia
- Vazão contratada no PTE2: 2,0 Mm³/dia
- Pressão mínima de sucção da ECOMP: 60 kgf/cm²
- Pressão máxima de descarga da ECOMP: 100 kgf/cm²

Na Figura 13 é observada a situação contratual do gasoduto, onde a capacidade contratada é de 3,5 Mm³/dia e a pressão no ponto de recebimento foi ajustada para seu valor máximo. A estação de compressão opera com pressão de descarga de 100 kgf/cm² e com pressão de sucção acima da pressão mínima. Como consequência, a pressão do PTE1 é de 78,2 kgf/cm² e do PTE2 é de 70,8 kgf/cm², acima da pressão mínima de entrega. A partir da situação descrita, são verificadas a máxima vazão em cada ponto de entrega, um de cada vez, que pode ser atingida, seguindo o procedimento de cálculo de capacidade.

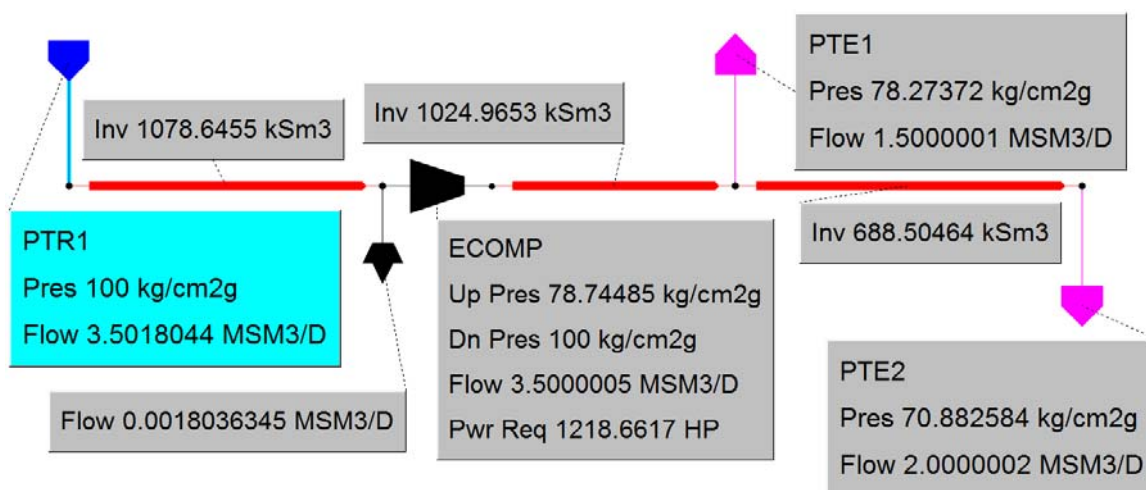


Figura 13 – Exemplo 2 – Capacidade contratada atual

Na Figura 14 e na Figura 15 são apresentadas as capacidades de transporte do gasoduto para o PTE1 e para o PTE2, respectivamente. Na Figura 14 se observa que não foi atingida a pressão mínima de entrega em nenhum ponto de entrega, no entanto a pressão mínima de sucção da ECOMP é alcançada. De forma a permitir uma flexibilidade de 5%, é feito o procedimento semelhante ao explicado no Exemplo 1, só que a flexibilidade é calculada

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G**

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

FOLHA 19 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

somente sobre os valores de vazão dos pontos de entrega, sem levar em consideração o gás consumido na ECOMP.

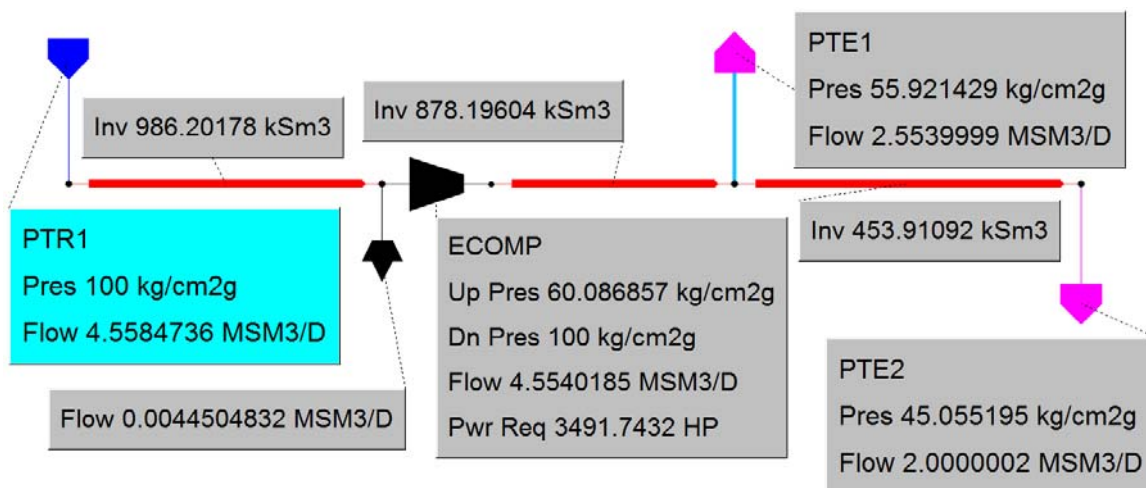


Figura 14 – Exemplo 2 – Capacidade técnica do gasoduto para o PTE1

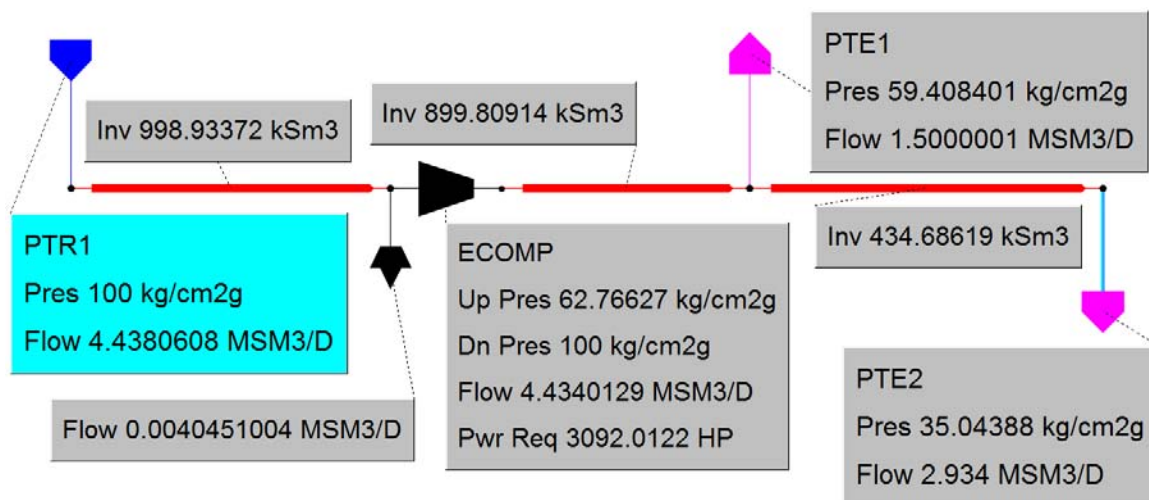


Figura 15 – Exemplo 2 – Capacidade técnica do gasoduto para o PTE2

Para o PTE1 a Capacidade Comercial que permite um desequilíbrio de 5%, considerando no PTE2 a vazão contratual já estabelecida, é de 2,45 Mm³/dia conforme Figura 16. A Margem Operacional é de 0,104 Mm³/dia quando toda a Capacidade Comercial do PTE1 é contratada.

Neste exemplo o único elemento que foi considerado no GUS foi o compressor, mas outros elementos que consumirão parte do gás transportado podem ser incluídos no modelo. O incremento do GUS na condição de Capacidade Comercial para a situação de Capacidade Contratada é de 0,00229 Mm³/dia.

Na Tabela 9 é decomposta a Capacidade de Transporte do ponto de entrega para os cenários considerados.



RELATÓRIO

Nº **RL-ANP-FPL-009**

REV. **G**

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

FOLHA 20 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

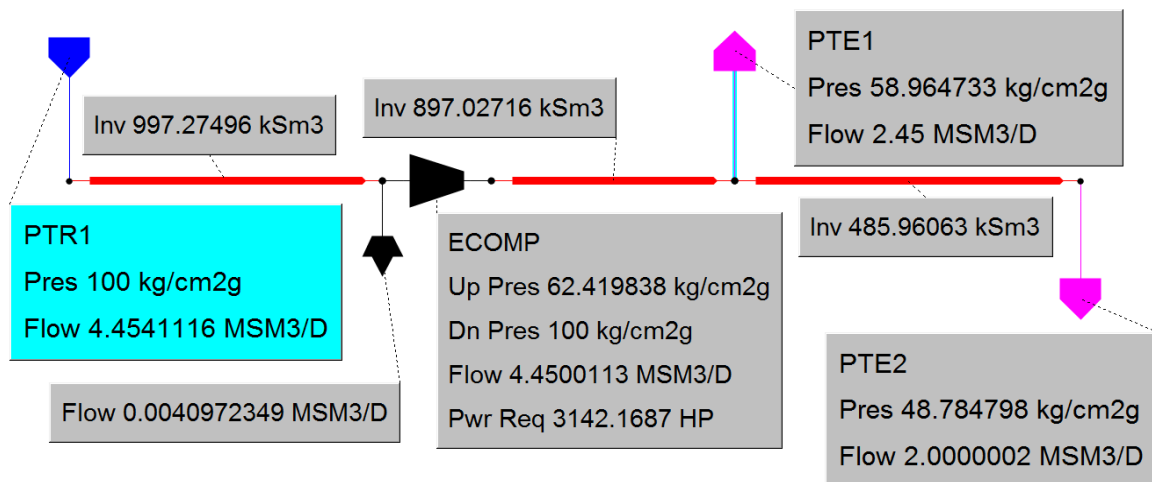


Figura 16 – Exemplo 2 – Capacidade comercial do PTE1

Tabela 9 – Exemplo 2 – Decomposição de capacidade para o PTE1

2,554 Mm³/dia (Capacidade de Transporte)		
0,104 Mm³/dia (Margem Operacional)	2,45 Mm³/dia (Capacidade Comercial)	
	1,5 Mm³/dia (Capacidade Contratada)	0,950 Mm³/dia (Capacidade Disponível)

Incremento do GUS: 0,00229 Mm³/dia

A Figura 17, a Figura 18 e a Figura 19 apresentam as variações da pressão e vazão ao longo do tempo durante a simulação em regime transiente do cenário nos PTE1, PTE2 e PTR1, respectivamente. No PTE1 a vazão entregue é constante e a pressão varia durante a simulação do cenário sem atingir a pressão mínima do ponto. No PTE2 a vazão também é constante durante a simulação do cenário, mas a pressão de entrega quase atinge a pressão mínima de entrega. O menor valor da pressão ocorre após as 24 horas em que a vazão do PTR1 fica reduzida. Isso ocorre devido à capacitância do duto que não reage ao aumento de vazão do PTR1 de forma instantânea. Na Figura 19 é apresentada a variação de vazão e pressão no PTR1 ao longo do tempo.



RELATÓRIO

Nº **RL-ANP-FPL-009**

REV. **G**

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

FOLHA 21 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

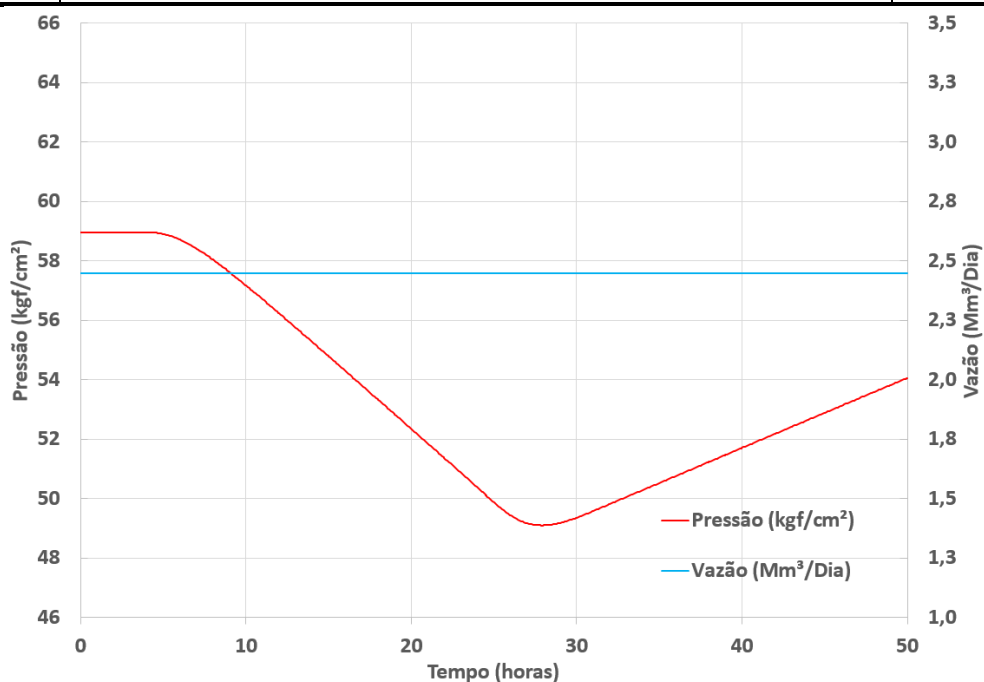


Figura 17 – Exemplo 2 – Transiente no PTE1 para capacidade do PTE1

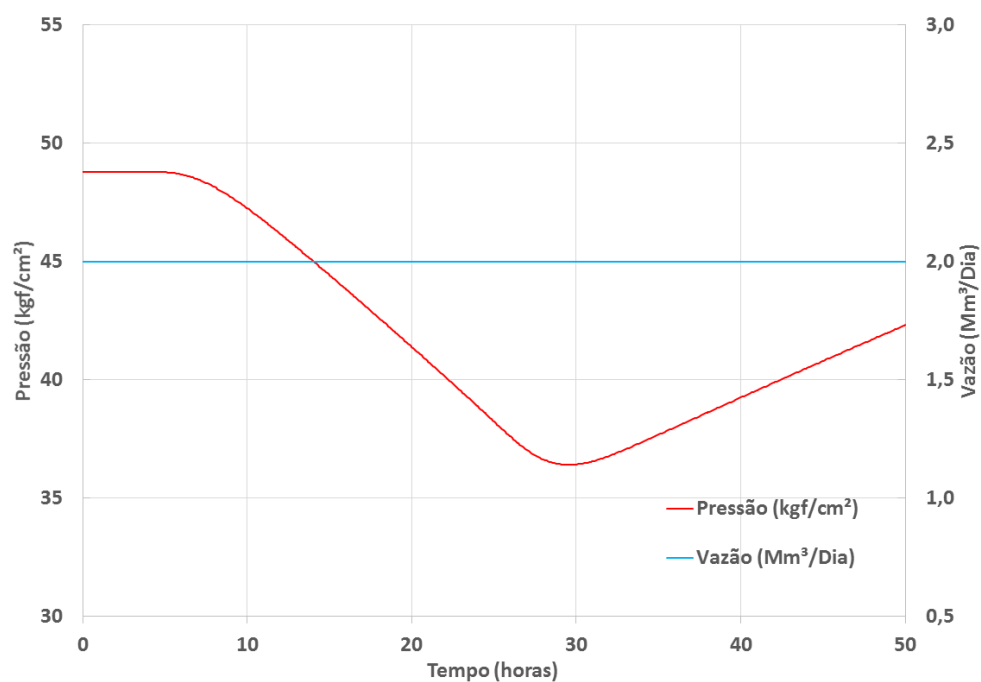


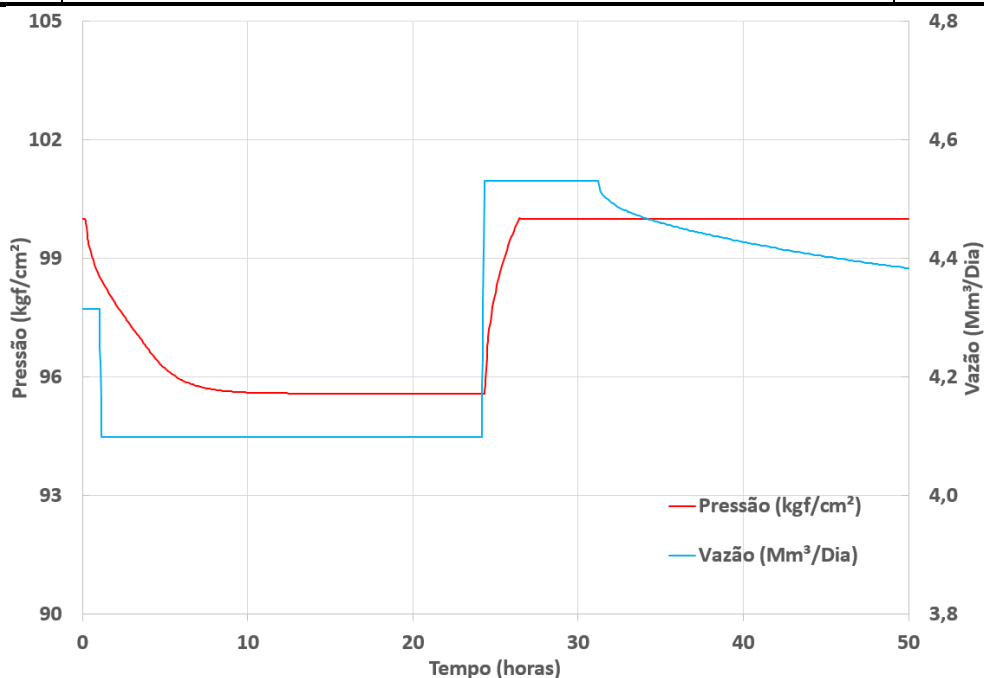
Figura 18 – Exemplo 2 – Transiente no PTE2 para capacidade do PTE1

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G**

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

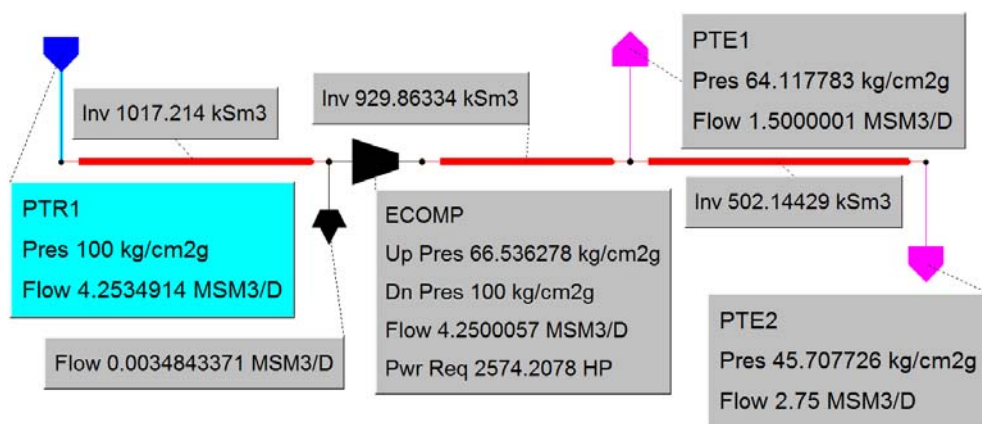
FOLHA 22 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

**Figura 19 – Exemplo 2 – Transiente no PTR1 para capacidade do PTE1**

Para a aferição da capacidade para o PTE2 foi repetido o procedimento de cálculo de capacidade a partir das condições contratuais e a flexibilidade de 5%. O resultado em regime permanente é uma capacidade comercial de 2,75 Mm³/dia, conforme apresentado na Figura 20.

Na Tabela 10 é decomposta a Capacidade de Transporte em todos os elementos que a compõem, apresentando o valor da Margem Operacional, quando considerado o cenário de flexibilidade no ponto de recebimento de 5%.

**Figura 20 – Exemplo 2 – Capacidade comercial para o PTE2**

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G**

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

FOLHA 23 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

-

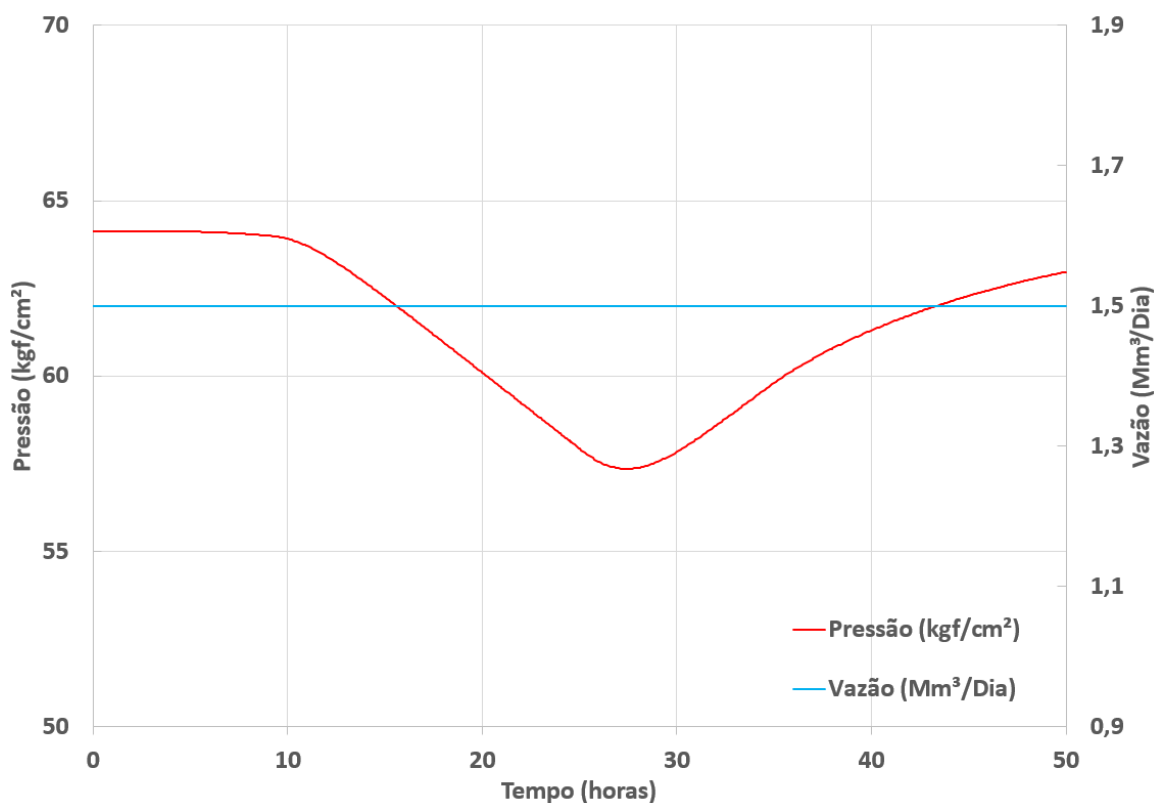
-

Tabela 10 – Exemplo 2 – Decomposição de capacidade para o PTE2

2,934 Mm³/dia (Capacidade de Transporte)		
0,184 Mm³/dia (Margem Operacional)	2,75 Mm³/dia (Capacidade Comercial)	
	1,5 Mm³/dia (Capacidade Contratada)	1,25 Mm³/dia (Capacidade Disponível)

Incremento do GUS: 0,00168 Mm³/dia

A Figura 21, a Figura 22 e a Figura 23 apresentam as variações da pressão e vazão ao longo do tempo durante a simulação em regime transiente do cenário nos PTE1, PTE2 e PTR1, respectivamente. No PTE1 a vazão entregue é constante e a pressão varia durante a simulação do cenário sem atingir a pressão mínima do ponto. No PTE2 a vazão também é constante durante a simulação do cenário, mas a pressão de entrega quase atinge a pressão mínima de entrega. O menor valor da pressão ocorre após as 24 horas em que a vazão do PTR1 fica reduzida. Isso ocorre devido à capacitância do duto que não reage ao aumento de vazão do PTR1 de forma instantânea. Na Figura 23 é apresentada a variação de vazão e pressão no PTR1 ao longo do tempo.

**Figura 21 – Exemplo 2 – Transiente no PTE1 para capacidade do PTE2**



RELATÓRIO

Nº **RL-ANP-FPL-009**

REV. **G**

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

FOLHA 24 de 25

TÍTULO: Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

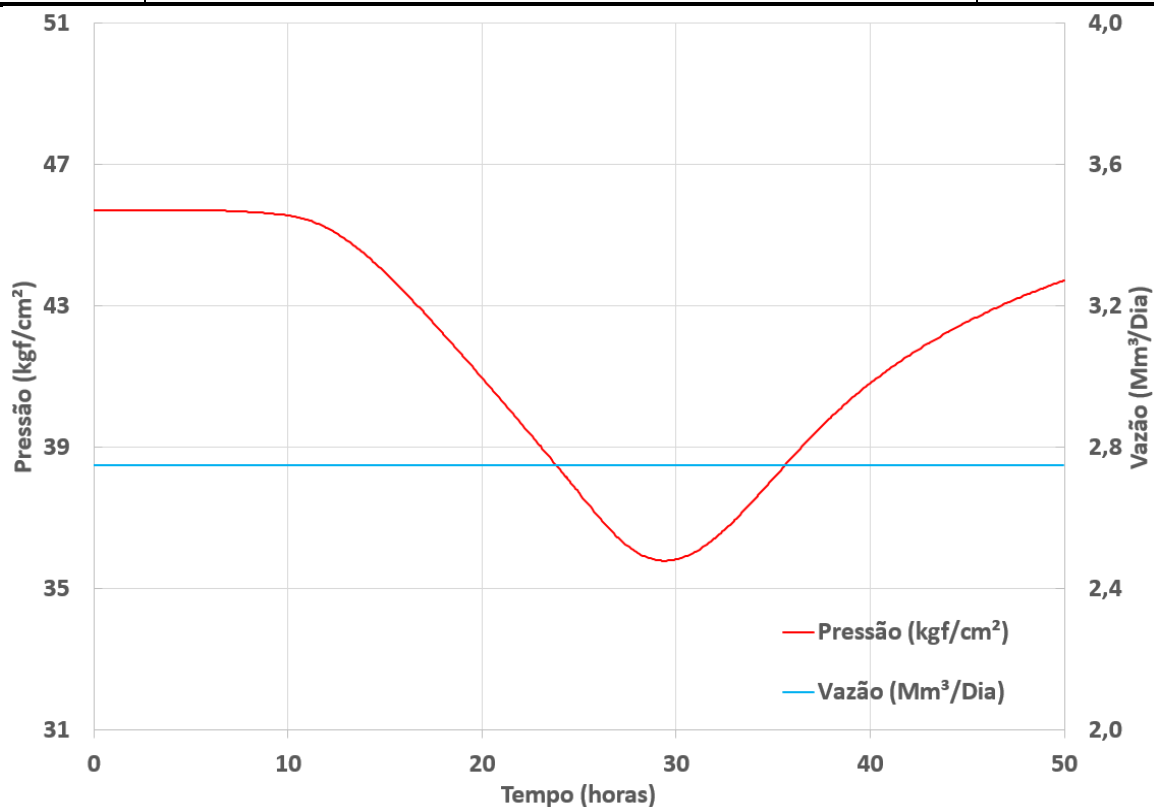


Figura 22 – Exemplo 2 – Transiente no PTE2 para capacidade do PTE2

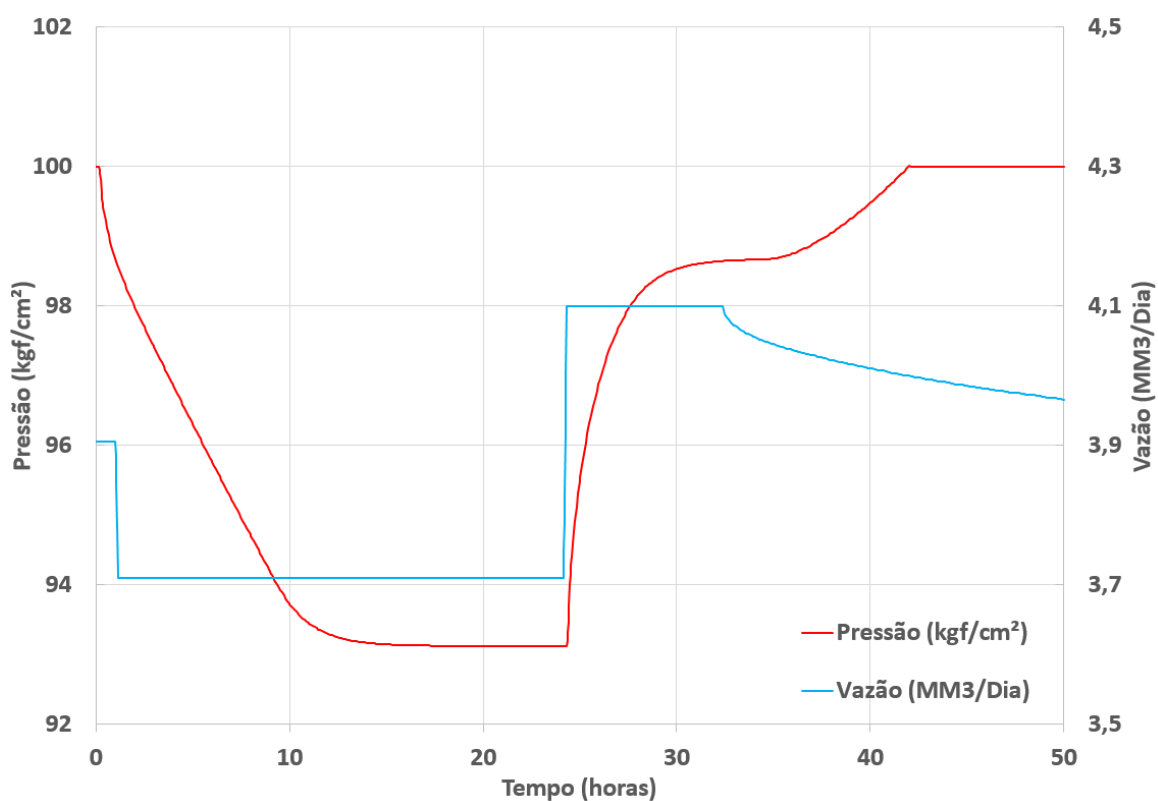


Figura 23 – Exemplo 2 – Transiente no PTR1 para capacidade do PTE2

**RELATÓRIO**Nº **RL-ANP-FPL-009**REV. **G****PROGRAMA:** MODELO TEÓRICO E COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE GASODUTOS**FOLHA** 25 de 25**TÍTULO:** Estudo das Condições de Contorno para o Cálculo de Capacidade

-

-

5 CONCLUSÃO

A metodologia do cálculo de capacidade deve adotar as condições de contorno descritas no item 3 deste relatório para os diversos elementos que compõem o modelo de simulação termo-hidráulica.

De forma a atender a flexibilidade operacional garantida em contrato entre o carregador e o transportador, e uma parcela do gás transportado que é gasto na operação de equipamentos, gás não contabilizado ou perdas, foi definido no item 4 o que é a Margem Operacional.

A margem operacional representa uma parcela da capacidade de transporte não comercializável em base firme, necessária para dar flexibilidade ao sistema, de forma a acomodar as variações operacionais decorrentes de ações dos carregadores ou do transportador, previstas em contrato. Assim, a introdução da margem operacional afeta diretamente a capacidade disponível e o seu cálculo deve ser realizado de forma a minimizar essa margem, maximizando a capacidade disponível.

Os exemplos empregados nesse relatório demonstram a influência da margem operacional no cálculo da capacidade disponível. A metodologia utilizada nesses exemplos é ilustrativa e não necessariamente única. Cada transportador, tendo em vista suas peculiaridades operacionais e contratuais, deverá apresentar os critérios e a metodologia utilizada para definir a sua respectiva margem operacional.

A flexibilidade solicitada pelo carregador e aceita pelo transportador precisa ser definida de maneira objetiva nos contratos e ser passível de avaliação pela ANP de forma que se possa constatar a maximização da capacidade de transporte de um gasoduto ou de uma rede de gasodutos.

6 REFERÊNCIA

- 6.1. RL-ANP-FPL-001_RD – Plano de Trabalho
- 6.2. RL-ANP-FPL-004_RA – Conceito Consolidado de Capacidade de Transporte de Gasodutos
- 6.3. RL-ANP-FPL-008_RB – Indicadores Relacionados à Avaliação de Capacidade
- 6.4. Termos e condições Gerais – GASENE, <http://tag.petrobras.com.br/lumis/porta1/file/fileDownload.jsp?fileId=8A95488423CECA010123DDCF059567E2> acessado em 28/08/2013
- 6.5. GTE (Gas Transmission Europe) report, 10/07/2003, "Definition of available capacities at cross-border point in liberalized markets"