

Departamento de Engenharia Mecânica

Pós-Graduação em Engenharia de Dutos

Estudo de Ampliação da Capacidade de Transferência em Gasodutos

Thomás Machado Martinoia

Luis Fernando Alzuguir Azevedo e Luis Fernando G. Pires

THOMÁS MACHADO MARTINOIA

ESTUDO DE AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE
EM GASODUTOS

MONOGRAFIA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA DA PUC-RIO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM ENGENHARIA DE DUTOS.
APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA ABAIXO ASSINADA.

LUIS FERNANDO ALZUGUIR AZEVEDO E LUIS FERNANDO G. PIRES

RIO DE JANEIRO

11 DE JULHO DE 2013

Dedicatória

Esta monografia é dedicada a meus pais, Adriana Cardoso Machado e Martinoia e Mariano Pablo Martinoia por toda ajuda e motivação que me deram.

Agradecimentos

A minha família, Adriana e Mariano Martinoia;

A minha namorada Fernanda Rodrigues por compartilhar momentos maravilhosos ao longo do período do curso;

A toda equipe do SIMDUT (Núcleo de Simulação Termo-hidráulica da PUC-Rio) por corroborar e incentivar a fazer o curso;

Aos professores e orientadores Luis Fernando Alzuguir Azevedo e Luis Fernando G. Pires pela orientação dada ao longo do curso;

A todos os professores que participaram do curso oferecido;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e ao CCE (Centro de Cursos de Extensão da PUC-Rio) por organizar e oferecer este curso de reconhecimento internacional;

A GASMIG por compartilhar informações e contratar o SIMDUT para realizar este trabalho;

E a todos que, de alguma forma, me ajudaram a concluir mais este objetivo.

Sumário

Um gasoduto é projetado para transportar uma determinada capacidade a partir da previsão de um mercado futuro da região onde será construído. Eventualmente, depois de alguns anos de operação, o sistema requer um aumento em sua capacidade para transportar mais gás para os pontos de entrega existentes, ou até mesmo para novos pontos. Isso pode ser feito através da adição de novas estações de compressão, de *loops*, ou de ambos ao sistema. Infinitas combinações destas possibilidades podem atender à nova demanda de vazão do sistema, mas escolher a melhor alternativa em termos econômicos requer uma metodologia e estudo detalhado.

A metodologia desenvolvida foi aplicada num estudo de caso real para a expansão do gasoduto “São Brás do Suaçuí – Belo Oriente”, de propriedade da GASMIG,. O objetivo principal foi analisar o problema e propor possibilidades para aumentar a capacidade de transporte do gasoduto para demandas específicas agendadas para 2015, 2017 e 2022.. Num primeiro momento, foram realizadas simulações termohidráulicas que determinassem a capacidade máxima do gasoduto na condição atual. Para isso, foi desenvolvido um modelo do sistema atual em um *software* comercial, Pipeline Studio, e validado conforme dados de histórico do sistema.

Com o objetivo de avaliar as possibilidades para expansão da capacidade do sistema, uma metodologia foi desenvolvida para escolher sete casos capazes de atender à última demanda (2022). Um *software* foi desenvolvido para ajudar neste processo de comparação preliminar entre casos, chamado GASPEX. Este *software* combina a capacidade de realizar simulações termo-hidráulicas de regime permanentes de gasodutos com a de dar indicativos econômicos de capex e opex do projeto.

Após esta fase preliminar, dois casos foram escolhidos dentre os sete iniciais para serem estudados em detalhes, com orçamentos reais e com a análise detalhada do projeto no tempo, incluindo como atender às demandas intermediárias de 2015 e 2017.

Índice

1	Introdução	14
2	Objetivos do Projeto	16
3	Determinação da Capacidade Atual e Validação do Modelo	17
3.1	Dados	17
3.2	Premissas	20
3.3	Resultados	22
3.3.1	Situação operacional atual	22
3.3.2	Cenário 1: Situação operacional com vazões de DP5 e DP13 projetadas.....	26
3.3.3	Cenário 2: Situação operacional com vazão da DP5 projetada e da DP13 máxima	29
3.4	Conclusões do atendimento às novas demandas até 2014	31
4	Estudo Preliminar	32
4.1	Metodologia Técnico-Econômica das Soluções Preliminares	32
4.2	Premissas de Cálculo Técnico	32
4.2.1	Propriedades Termodinâmicas	34
4.2.2	Propriedades dos Equipamentos	39
4.3	Premissas de Cálculo Econômico	44
4.3.1	Custo Por Contagem de Equipamento.....	45
4.3.2	Custo por Parâmetro de Entrada do Equipamento.....	45
4.3.3	Custo por Curva de Dados de Entrada.....	46
4.3.4	Custo por Integral no Tempo.....	47
4.3.5	Fluxo de caixa.....	47
4.4	Alternativas da Solução Técnica.....	48
4.5	Dados Técnicos.....	49

4.6	Dados Econômicos	50
4.6.1	Estimativas de CAPEX.....	50
4.6.2	Estimativas de OPEX	51
4.7	Premissas Técnicas	52
4.8	Premissas Econômicas	54
4.9	Resultados.....	55
4.9.1	Caso 1	55
4.9.2	Caso 2	59
4.9.3	Caso 3	62
4.9.4	Caso 4	65
4.9.5	Caso 5	68
4.9.6	Caso 6	71
4.9.7	Caso 7	73
4.10	Conclusões das Soluções Preliminares	76
5	Avaliação Técnico-Econômica Detalhada	81
5.1	Descrição das alternativas analisadas	81
5.2	Premissas Técnicas	82
5.3	Premissas Econômicas	84
5.4	Valor presente do projeto.....	85
5.5	Cálculo do CAPEX detalhado	86
5.5.1	Desapropriação e Liberação da Faixa.....	86
5.5.2	Materiais do duto	86
5.5.3	Montagem do duto.....	87
5.5.4	Revestimento Anticorrosivo	87
5.5.5	Revestimento Interno.....	87
5.5.6	Proteção Catódica	87

5.5.7	Trechos Especiais	87
5.5.8	Estações de Compressão.....	88
5.5.9	Comunicação e SCADA.....	89
5.5.10	Comissionamento	89
5.5.11	Projeto.....	89
5.5.12	Licenciamento e Gerenciamento Ambiental	89
5.5.13	Gerência e Supervisão	90
5.5.14	Custos Eventuais	90
5.5.15	Inventário de Produto Imobilizado.....	90
5.6	Cálculo do OPEX.....	90
5.6.1	Custo do Gás Consumido	90
5.6.2	Custo Fixo de O&M do duto	90
5.6.3	Custo Fixo de O&M das SCOMPs.....	90
5.6.4	Custo de Aluguel das SCOMPs.....	91
5.6.5	Custo Fixo de Manutenção das Comunicações e SCADA.....	91
5.6.6	Custo Fixo de Inspeção Interna por Pig Instrumentado	91
5.6.7	Custo Fixo de Inspeção Geotécnica e Conservação da Faixa	92
5.7	Metodologia.....	92
5.7.1	Técnica.....	92
5.7.2	Econômica	92
5.8	Resultados.....	93
5.8.1	Caso 2 a:	96
5.8.2	Casos 2 b:	103
5.8.3	Casos 3 a:.....	108
5.8.4	Casos 3 b:	113
5.9	Consolidação dos Resultados.....	117

6	Conclusões	119
7	Referências Bibliográficas.....	121

Índice de Figuras

Figura 1 – Mapa do gasoduto	15
Figura 2 – Perfil de elevação do gasoduto.....	20
Figura 3 – Variação da vazão de entrega.....	24
Figura 4 – Variação da vazão de recebimento e pressão em São Brás do Suaçuí. 24	
Figura 5 – Variação da pressão no PE DP16.....	25
Figura 6 – Variação da pressão no ponto de entrega DP16.....	26
Figura 7 - Perfil de pressão e vazão do Cenário 1	28
Figura 8 - Perfil de pressão e vazão do Cenário 2	30
Figura 9 – Fluxograma do caso 1	56
Figura 10 – Diâmetro econômico do caso 1	57
Figura 11 – Distribuição de pressão a vazão do caso 1	58
Figura 12 – Fluxograma do caso 2	59
Figura 13 – Diâmetro econômico do caso 2	60
Figura 14 – Distribuição de pressão a vazão do caso 2	62
Figura 15 – Fluxograma do caso 3	63
Figura 16 – Diâmetro econômico do caso 3	64
Figura 17 – Distribuição de pressão a vazão do caso 3	65
Figura 18 – Fluxograma do caso 4	66
Figura 19 – Distribuição de pressão a vazão do caso 4	68
Figura 20 – Fluxograma do caso 5	69
Figura 21 – Distribuição de pressão a vazão do caso 5	70
Figura 22 – Fluxograma do caso 6	71
Figura 23 – Distribuição de pressão a vazão do caso 6	73
Figura 24 – Fluxograma do caso 7	74

Figura 25 – Diâmetro econômico do caso 7	75
Figura 26 – Distribuição de pressão a vazão do caso 7	76
Figura 27 – Resumo das Potências das SCOMPs	78
Figura 28 – Resumo de CAPEX e OPEX.....	79
Figura 29 – Fluxo de caixa do Caso 2	80
Figura 30 – Fluxograma do Cenário 2015 - Caso 2 e 3.....	94
Figura 31 – Fluxograma do Cenário 2017a - Caso 2 e 3.....	94
Figura 32 – Fluxograma do Cenário 2017b - Caso 2 e 3.....	95
Figura 33 – Fluxograma do Cenário 2022 - Caso 2	95
Figura 34 – Fluxograma do Cenário 2022 - Caso 3	96
Figura 35 - Gradiente de Pressão e Vazão para 2015 – Casos 2 e 3	97
Figura 36 – CAPEX para 2015 Caso 2a.....	97
Figura 37 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2017a – Casos 2a e 3a	99
Figura 38 – CAPEX para 2017, Caso 2a.....	100
Figura 39 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2022 – Caso 2	102
Figura 40 – CAPEX para 2022, Caso 2a.....	102
Figura 41 – Fluxo de despesas para o Caso 2a.....	103
Figura 42 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2017b – Casos 2b e 3b.....	104
Figura 43 – CAPEX para 2022 Caso 2b (referente ao <i>loop</i>).....	106
Figura 44 – CAPEX para 2022 Caso 2b (referente à SCOMP)	107
Figura 45 – Fluxo de despesas para o Caso 2b.....	108
Figura 46 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2022 – Caso 3	111
Figura 47 – CAPEX para 2022 Caso 3a.....	112
Figura 48 – Fluxo de despesas para o Caso 3a.....	112
Figura 49 – CAPEX para 2022 Caso 3b (referente ao <i>loop</i>).....	115
Figura 50 – CAPEX para 2022 Caso 3b (referente à SCOMP)	115

Figura 51 – Fluxo de despesas para o Caso 3b.....	116
---	-----

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores de vazão máxima e pressão mínima nas estações de entrega.	17
Tabela 2 – Pressão mínima contratual no ponto de recebimento	18
Tabela 3 – Diâmetro, espessura e material dos dutos.....	18
Tabela 4 – Localização das estações de entrega.....	19
Tabela 5 – Características do gás natural	21
Tabela 6 – Valores de vazão constante e pressão mínima.....	22
Tabela 7 – Valores de vazão constante e pressão mínima para Cenário 1	27
Tabela 8 – Valores de pressão nos pontos de entrega e controladoras do Cenário 1	28
Tabela 9 – Valores de pressão nos pontos de entrega e controladoras do Cenário 2	30
Tabela 10 – Propriedades de Substância Pura das Espécies Químicas	36
Tabela 11 – Parâmetros empíricos para dimensionamento de gasodutos	41
Tabela 12 – Parâmetros por Equipamento.....	45
Tabela 13 – Valores de vazão horária média e pressão mínima nas estações de entrega	49
Tabela 14 – Custo de Construção e Montagem.....	51
Tabela 15 – Características do gás natural	53
Tabela 16 – Espessuras dos <i>loops</i>	54
Tabela 17 – Soluções técnico-econômicas	55
Tabela 18 – CAPEX e OPEX do Caso 1	57
Tabela 19 – Potência das SCOMPs do Caso 1	58
Tabela 20 – CAPEX e OPEX do Caso 2.....	60
Tabela 21 – Potência das SCOMPs do Caso 2	61
Tabela 22 – CAPEX e OPEX do Caso 3	64

Tabela 23 – Potência das SCOMP do Caso 3.....	65
Tabela 24 – CAPEX e OPEX do Caso 4.....	66
Tabela 25 – Potência das SCOMPs do Caso 4.....	67
Tabela 26 – CAPEX e OPEX do Caso 5.....	69
Tabela 27 – Potência das SCOMPs do Caso 5.....	70
Tabela 28 – CAPEX e OPEX do Caso 6.....	72
Tabela 29 – Potência das SCOMPs do Caso 6.....	72
Tabela 30 – CAPEX e OPEX do Caso 7.....	75
Tabela 31 – Resumo das Soluções Técnicas.....	77
Tabela 32 – Resumo das Potências das SCOMPs.....	77
Tabela 33 – Resumo de CAPEX e OPEX.....	78
Tabela 34 – Pressões mínimas e demanda de vazão média com flexibilidade para os pontos de entrega.....	81
Tabela 35 – Espessuras dos <i>loops</i>	83
Tabela 36 – Características do gás natural.....	84
Tabela 37 - Trechos Especiais do duto.....	88
Tabela 38 – Soluções estudadas.....	93
Tabela 39 – Trechos Especiais para 2017 – Caso 2 a.....	98
Tabela 40 – Trechos Especiais para o Caso 3.....	
Tabela 41 – Soluções definidas.....	117
Tabela 42 – Resultados Econômicos.....	118

1

Introdução

Estudar a capacidade de um gasoduto é uma tarefa que exige a simulação de diversos cenários, uma vez que esta varia em função da disposição dos pontos de entrega e recebimento e suas respectivas vazões. Assim, estudar a ampliação da capacidade de um gasoduto envolve conhecer a fundo o sistema atual, para em seguida estudar as previsões para o futuro.

Devido à natureza do problema de ampliação, tecnicamente infinitas soluções atendem às novas demandas programadas, podendo ser compostas por loops ou estações de compressão dispostas ao longo do sistema. É importante frisar também que as restrições, como vazão máxima, impostas pelos pontos de recebimento se aplicam. Assim, escolher a melhor alternativa para ampliação passa pelo estudo de diversas opções hidráulicas e suas avaliações econômicas.

O presente trabalho discute o desenvolvimento de uma metodologia para estudo da ampliação de gasodutos tendo como base a aplicação da mesma em um estudo de caso real.

A Figura 1 apresenta um mapa do gasoduto estudado. Após apenas dois anos em operação, o mercado de gás natural da região se expandiu muito, exigindo do sistema um novo projeto de ampliação da capacidade de transporte.

2 Objetivos do Projeto

O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia genérica a ser aplicada para a ampliação da capacidade de gasodutos. Este foi atingido através de um estudo de caso real, conforme apresentado na introdução, e dividido em três etapas:

3. Modelagem, análise da capacidade atual e validação do modelo. Realizar estudo sobre o nível de carregamento hoje existente do gasoduto São Brás do Suaçuí-Belo Oriente, e sua capacidade para atender novas demandas até 2014;

4. Estudo Preliminar. Analisar e propor casos preliminares de medidas que aumentem a capacidade de gás a ser transportada em 2022, quais as alternativas técnicas, custos envolvidos e análise econômica, e;

5. Estudo Detalhado. Analisar os casos vencedores do item 2, através de uma metodologia detalhada de avaliação técnico-econômica das etapas intermediárias de 2015 e 2017 para estes casos.

3

Determinação da Capacidade Atual e Validação do Modelo

Para o estudo do aumento da capacidade de um sistema, é preciso conhecer a fundo os limites de sua capacidade atual em diferentes cenários. Para isso, um modelo computacional se mostra uma ferramenta muito útil, já que permite avaliar o gasoduto sujeito a diferentes demandas de uma forma realista e prática. Para modelar e validar o sistema, é preciso conhecer os dados reais do sistema, características físicas e históricos de operação, além de estabelecer as premissas corretas, que permitirão avaliar o sistema de maneira ágil e correta. Abaixo está descrito em detalhes o procedimento aplicado para o estudo de caso realizado.

3.1

Dados

Conforme definido pela GASMIG, até 2014 pretende-se que o gasoduto seja responsável por uma movimentação de 2,78 MM m³/d. Os valores de vazão máxima e pressão mínima previstos para os pontos de entrega estão apresentados na Tabela 1. SP foi a sigla escolhida para determinar *Supply Point* e DP para *Delivery Point*.

Tabela 1 – Valores de vazão máxima e pressão mínima nas estações de entrega

Ano	2012/2014
Estação de entrega	Vazão (m ³ /h) / Pressão (kgf/cm ²)
DP2 – Mina de Fábrica	10.292 / 10,0
DP5	28.950 / 19,0
DP9	14.276 / 12,0
DP12	10.073 / 10,0
DP16	7.764 / 10,0

Ano	2012/2014
DP1	9.333 / 38,0
DP13	33.000 / 13,0
Bellox	250 / 6,0
DP15	750 / 8,0
DP14	750 / 8,0
Lavanderia Q.	2 / 8,0
Restaurante F.	1 / 8,0
Hotel R.	1 / 8,0
Hotel P.	1 / 8,0
Consumo Automotivo (Posto DP3)	800 / 19,0
DP11	350 / 6,0
Shopping V.	7 / 8,0
Restaurante A.	1 / 8,0
Restaurante P.	1 / 8,0

A pressão mínima contratual no ponto de recebimento está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Pressão mínima contratual no ponto de recebimento

Ano	Pressão
2012	32,0

A Tabela 3 apresenta a variação de diâmetro, espessura e material ao longo do duto.

Tabela 3 – Diâmetro, espessura e material dos dutos

Trecho	Diâmetro	Espessura	Material
1ª Etapa – 27,768 km	16"	7,9 mm	API 5L X46
1ª Etapa – 20,219 km	8"	6,4 mm	API 5L X42
Ramal DP1 – 6,239 km	14"	7,9 mm	API 5L Gr.B
Ramal DP4 – 4,3 km	4"	7,9 mm	-
2ª Etapa – 1º Lote – 37,661 km	18"	9,5 mm	API 5L X46
2ª Etapa – 2º Lote – 41,236 km	18"	9,5 mm	API 5L X46

Trecho	Diâmetro	Espessura	Material
2ª Etapa - 2º Lote – 64,592 km	16”	9,3 mm	API 5L X46
2ª Etapa - 3º Lote – 126,634 km	16”	0,366”	API 5L X46
Ramal DP12 – 0,75 km	10”		
Ramal DP14	90 mm		

A localização de cada estação de entrega está apresentada na Tabela 4. A localização diz respeito ao comprimento desenvolvido do gasoduto a partir de São Brás do Suaçuí.

Tabela 4 – Localização das estações de entrega

Estação de entrega	Distância de SP (km)
DP2 – Mina de Fábrica	34,7
DP5	27,8
DP9	181,8
DP12	257,6
DP16	298,0
DP1	6,24
DP13	271,5
Bellox	161,1
DP15	287,6
DP14	273,4
Lavanderia Q.	273,4
Restaurante F.	273,4
Hotel R.	273,4
Hotel P.	273,4
DP4	22,6
Consumo Automotivo (Posto DP3)	14,7

Estação de entrega	Distância de SP (km)
DP11	257,6
Shopping V.	273,4
Restaurante A.	273,4
Restaurante P.	273,4

A Figura 2 apresenta o perfil de elevação do gasoduto.

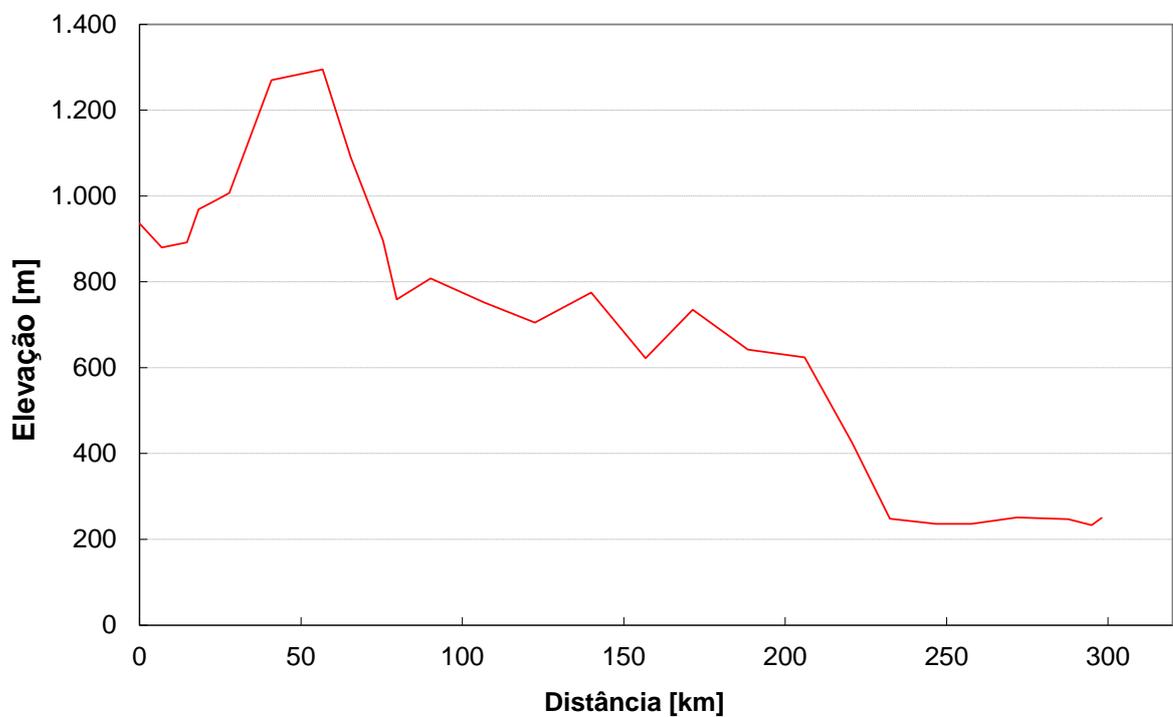


Figura 2 – Perfil de elevação do gasoduto

3.2 Premissas

Além das premissas utilizadas normalmente na análise de escoamento de gás natural em dutos, como escoamento unidimensional, monofásico e fluido newtoniano, as seguintes premissas técnicas serão utilizadas na primeira etapa do estudo:

- Gasoduto operando em regime permanente para análise dos cenários futuros;
- Escoamento isotérmico a 20° C;
- Composição simplificada do gás natural, de acordo com a Tabela 5;

Tabela 5 – Características do gás natural

Propriedade	Porcentagem	Densidade	Poder Calorífico
Dióxido de Carbono	1,18	0,614 ⁽¹⁾	35,0 MJ/m ³
Metano	92,03		
Etano	4,28		
Propano	1,32		
Iso-butano	0,27		
N-butano	0,26		
N-pentano	0,04		
Nitrogênio	0,62		

(1) – Nas condições de referência, 20°C e 1 atm.

- Equação de estado Peng-Robinson;
- Viscosidade constante;
- Rugosidade interna do duto igual a 0,0018'' ;
- Será considerado que não existe restrição de vazão no ponto de recebimento do gasoduto;
- Condições de referência: 20° C e 1 atm;
- A pressão de projeto do gasoduto está limitada pelos acessórios, cuja classe de pressão é #300 (para a temperatura de operação equivale a uma pressão máxima de 750psi ou 52 kgf/cm²).
- A pressão máxima na descarga dos compressores foi considerada, por segurança, 1kgf/cm² abaixo da pressão de projeto, isso é 51kgf/cm².

3.3 Resultados

Os seguintes casos serão apresentados nesse estudo:

- Situação operacional atual, com vazão variável
- Situação atual com ampliação da oferta para a DP5 e DP13, com vazão constante
- Situação atual com ampliação da oferta da DP5 e identificação da máxima oferta para a DP13, com vazão constante

3.3.1 Situação operacional atual

Para a avaliação desse caso foi considerada a variação dos volumes fornecidos no período de sete dias, correspondente das 15:00h de 16/05/2012 às 00:00h de 22/05/2012.

Os pontos de entrega apresentados na Tabela 6 operaram com vazão constante ao longo de todo o período.

Tabela 6 – Valores de vazão constante e pressão mínima

Ano	05/2012
Estação de entrega	Vazão (m³/h) / Pressão (kgf/cm²)
Bellox	250 / 6,0
DP15	750 / 8,0
DP14	750 / 8,0
Lavanderia	2 / 8,0
Restaurante	1 / 8,0
Hotel R.	1 / 8,0
Hotel P.	1 / 8,0

Ano	05/2012
Consumo Automotivo (Posto DP3)	800 / 19,0
DP11	350 / 6,0
Shopping V.	7 / 8,0
Restaurante A.	1 / 8,0
Restaurante P.	1 / 8,0
DP5	(1) / 19,0
DP1	(1) / 38,0
DP9	(1) / 10,0
DP13	(1) / 13,0
DP12	(1) / 10,0
DP16	(1) / 10
DP2 – Mina de Fábrica	(1) / 10,0

(1) – O ponto de entrega possui consumo variável.

Para os pontos de entrega DP5, DP1, DP9, DP13, DP2 e DP16 foram utilizados os perfis de demanda obtidos de documentos da GASMIG, e para o ponto de entrega de DP12 foi utilizado o perfil de demanda fornecido. Esses perfis de consumo são apresentados Figura 3.

A vazão e pressão de recebimento de São Brás do Suaçuí estão apresentadas na Figura 4.

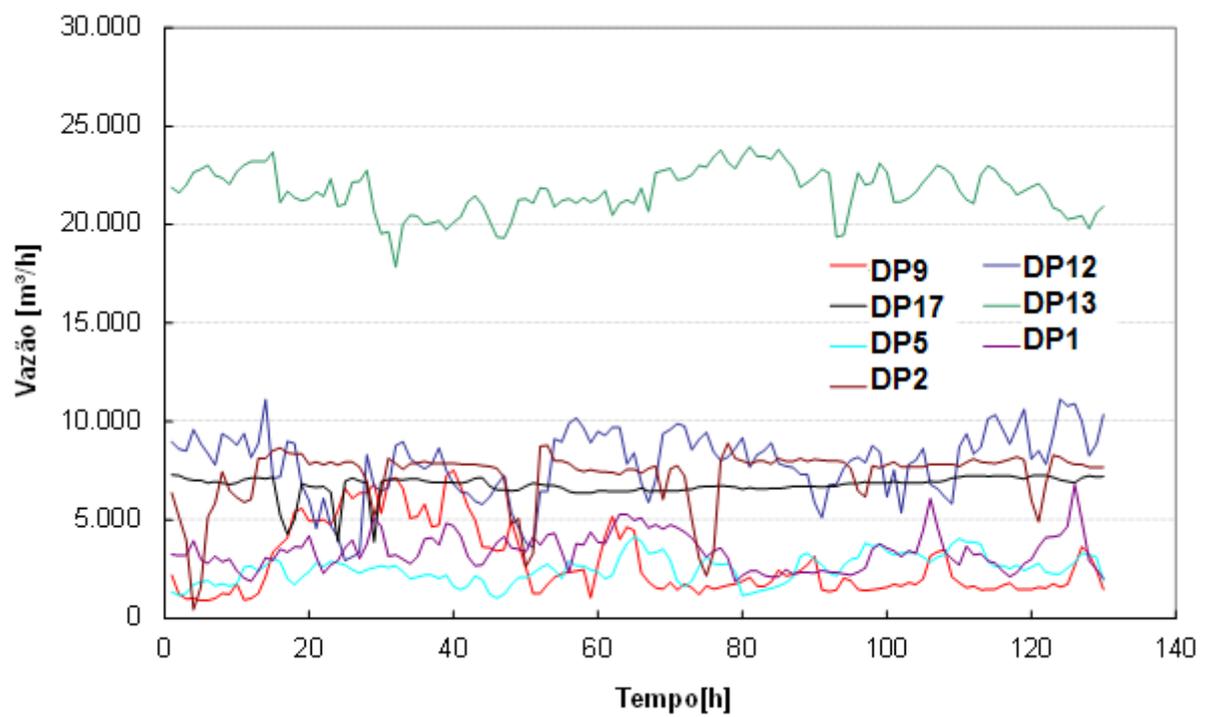


Figura 3 – Variação da vazão de entrega

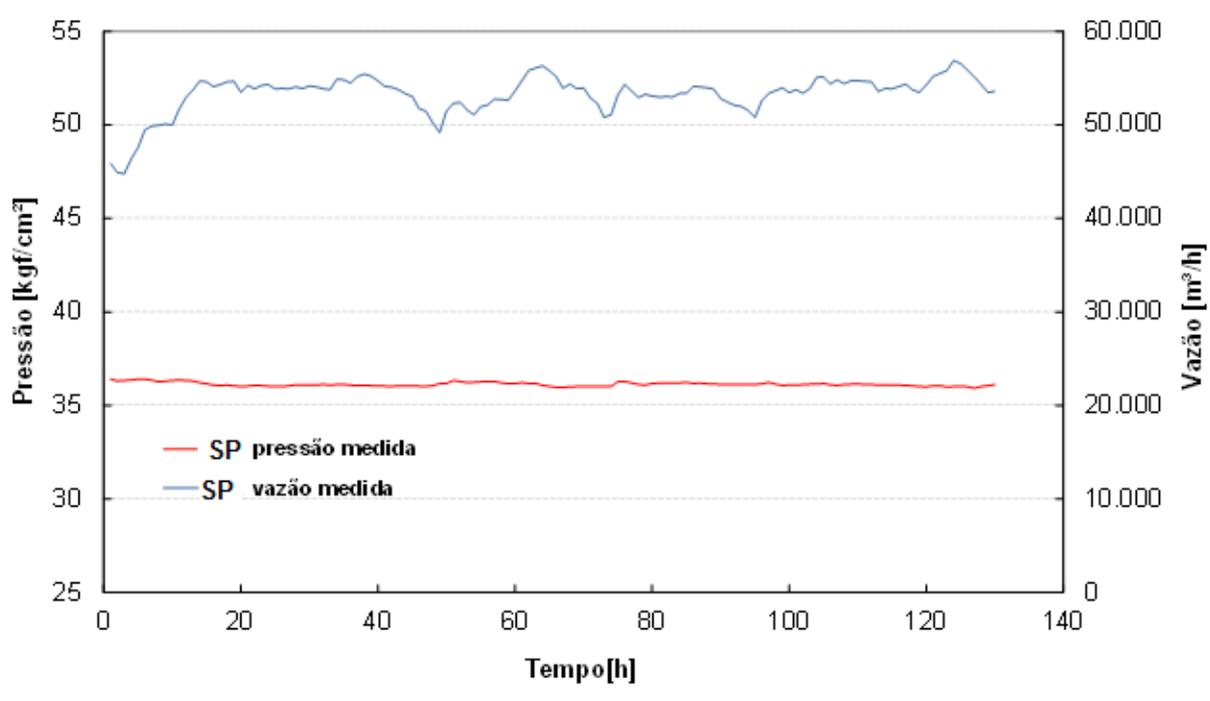


Figura 4 – Variação da vazão de recebimento e pressão em São Brás do Suaquí

As condições de contorno utilizadas foram de pressão no ponto de recebimento de São Brás do Suaçuí e de vazões definidas nos pontos de entrega. Conseqüentemente, as variáveis a serem calculadas na simulação são as pressões nos pontos de entrega e a vazão no ponto de recebimento de SP. Essas duas variáveis serão utilizadas para validar o modelo computacional do gasoduto.

Esses dados foram utilizados para construir um modelo computacional do gasoduto no programa comercial *Pipeline Simulator* da EnergySolutions Inc. Esse programa resolve as equações de conservação de massa e de energia, para simulações em regime permanente e transiente, o que faz dele a ferramenta adequada para o trabalho.

No caso da condição operacional analisada, a menor pressão será obtida no último ponto de entrega, PE DP16. Observa-se pela Figura 5 que a pressão fica, durante o período analisado, bem acima do valor de pressão mínima desse ponto, que é 10 kgf/cm². Isso significa que o duto está operando ainda com uma significativa folga.

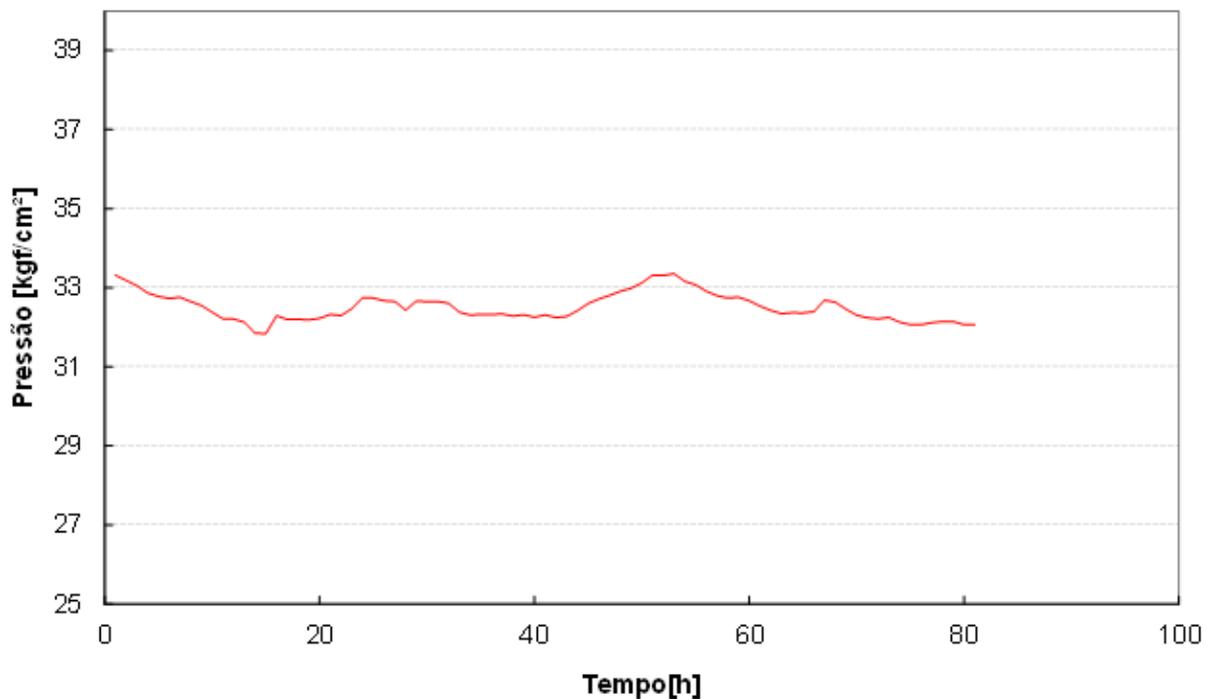


Figura 5 – Variação da pressão no PE DP16

A Figura 6 apresenta os valores da pressão em DP16 medida e os valores calculados através das simulações. O valor da pressão real é maior do que o calculado segundo as premissas do item 3.2, por isso foi feito um estudo de sensibilidade para ver a influência do valor da rugosidade interna do duto ou de um fator de eficiência de transporte, de forma a ajustar o modelo de cálculo.

Os resultados mostram que para uma rugosidade de 0,0004” ou uma eficiência de transporte de 1,1 as pressões se equivalem. Para as próximas simulações foi adotada a rugosidade de 0,0004”.

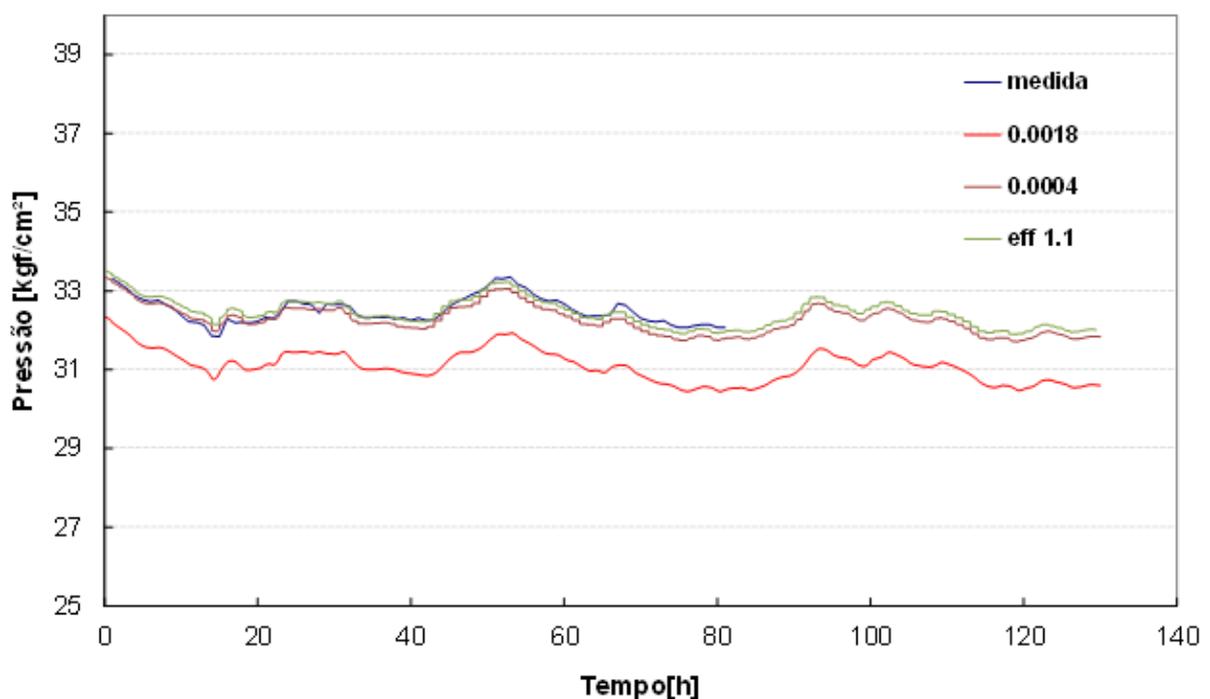


Figura 6 – Variação da pressão no ponto de entrega DP16

3.3.2 Cenário 1: Situação operacional com vazões de DP5 e DP13 projetadas

Para a avaliação desse caso foi considerada o VHM (vazão horária máxima) de cada ponto.

Os pontos de entrega apresentados na Tabela 7 utilizaram vazão constante. Pretende-se analisar se os novos contratos com a DP5, no valor de 682.000m³/dia

(28.417 m³/h) com flexibilidade e para a DP13 no valor de 792.000 m³/dia (33.000 m³/h) com flexibilidade poderão ser atendidos, considerando a pressão em SP constante em 38 kgf/cm².

Tabela 7 – Valores de vazão constante e pressão mínima para Cenário 1

Ano	2012/2014
Estação de entrega	Vazão (m³/h) / Pressão (kgf/cm²)
DP2 – Mina de Fábrica	10.292 / 10,0
DP5	28.417 / 19,0
DP9	14.276 / 12,0
DP12	10.073 / 10,0
DP16	7.764 / 10,0
DP1	9.333 / 38,0
DP13	33.000 / 13,0
Bellox	250 / 6,0
DP15	750 / 8,0
DP14	750 / 8,0
Lavanderia Q.	2 / 8,0
Restaurante F.	1 / 8,0
Hotel R.	1 / 8,0
Hotel P.	1 / 8,0
DP4	0
Consumo Automotivo (Posto DP3)	800 / 19,0
DP11	350 / 6,0
Shopping V.	7 / 8,0
Restaurante A.	1 / 8,0
Restaurante P.	1 / 8,0

Essas condições foram introduzidas no modelo e foi calculada uma situação em regime permanente. O perfil de pressão e vazão ao longo do duto está apresentado na Figura 7. As pressões nos pontos de entrega ou na entrada dos ramais com controladoras estão apresentadas na Tabela 8.

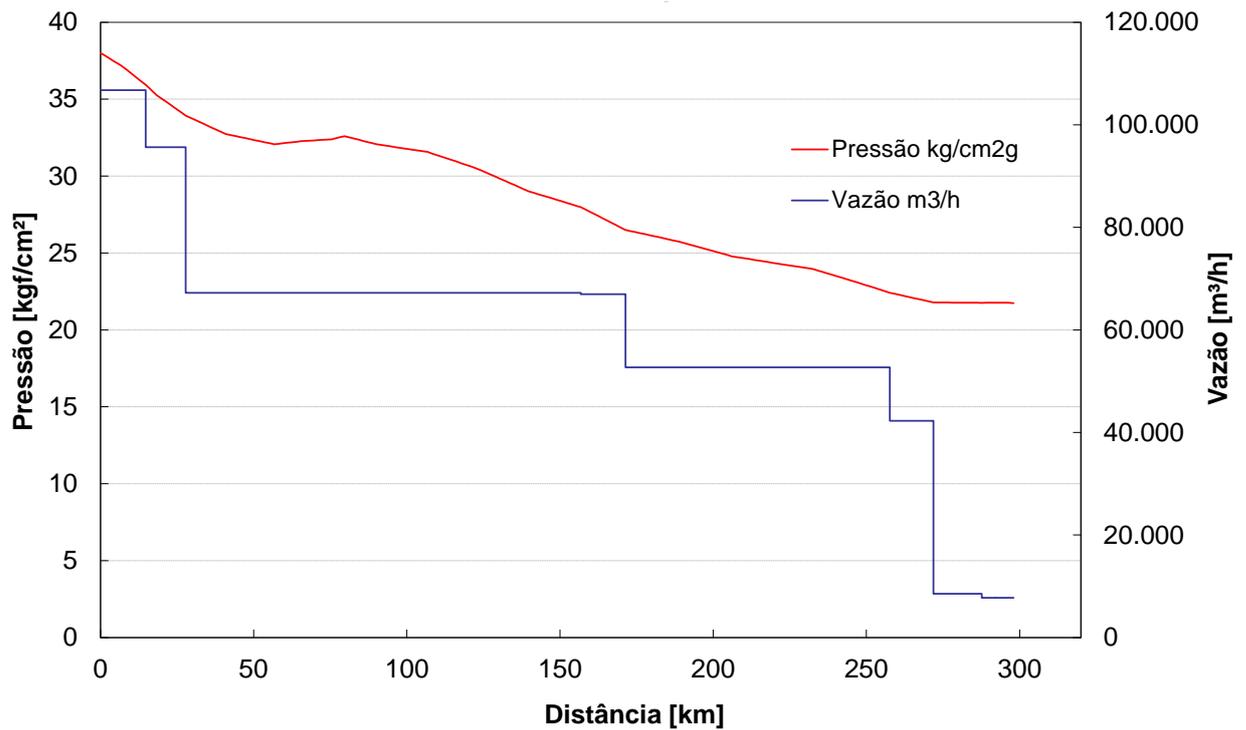


Figura 7 - Perfil de pressão e vazão do Cenário 1

Tabela 8 – Valores de pressão nos pontos de entrega e controladoras do Cenário 1

Ano	2012/2014
Estação de entrega	Pressão (kgf/cm ²)
DP2 – Mina de Fábrica	33,4
DP5	33,9
ERP DP9	26,4
DP12	22,4

Ano	2012/2014
DP16	21,7
DP1	37,9
DP13	21,7
Bellox	27,9
DP15	21,7
ERP Iguaçu-DP14	21,7
DP4	35,3
Consumo Automotivo (Posto DP3)	35,9
DP11	22,4

Observa-se que as pressões mínimas nos pontos de entrega não foram atingidas, indicando que esses novos contratos podem ser empregados. Porém, deve-se reparar que pela Figura 4, a pressão de recebimento em SP nas condições operacionais atuais apresenta uma média de 36,5kgf/cm², abaixo dos 38,0 kgf/cm². Dessa forma, foi calculado que a pressão mínima em SP deve ser de 34,4 kgf/cm², para os valores de vazão desejados sejam atendidos .

3.3.3 Cenário 2: Situação operacional com vazão da DP5 projetada e da DP13 máxima

Para a avaliação desse caso foi considerada o VHM (vazão horária máxima) de cada ponto de entrega, ilustrados na Tabela 7. Pretende-se determinar qual a máxima vazão a ser ofertada a DP13, considerando o novo contrato da DP5, no valor de 682.000 m³/dia (28.417 m³/h) com flexibilidade, considerando a pressão em SP constante em 38 kgf/cm².

Para determinar essa situação, retirou-se a condição de contorno de vazão na DP13 e substituiu-se pela condição de pressão mínima igual a 13 kgf/cm². Com essa condição a vazão máxima na DP13 será de 41.640 m³/h. O perfil de pressão e vazão ao longo do duto está apresentado na Figura 8. As pressões nos pontos e

entrega ou na entrada dos ramais com controladoras estão apresentadas na Tabela 9. A vazão no ponto de recebimento SP é de 124.707 m³/h.

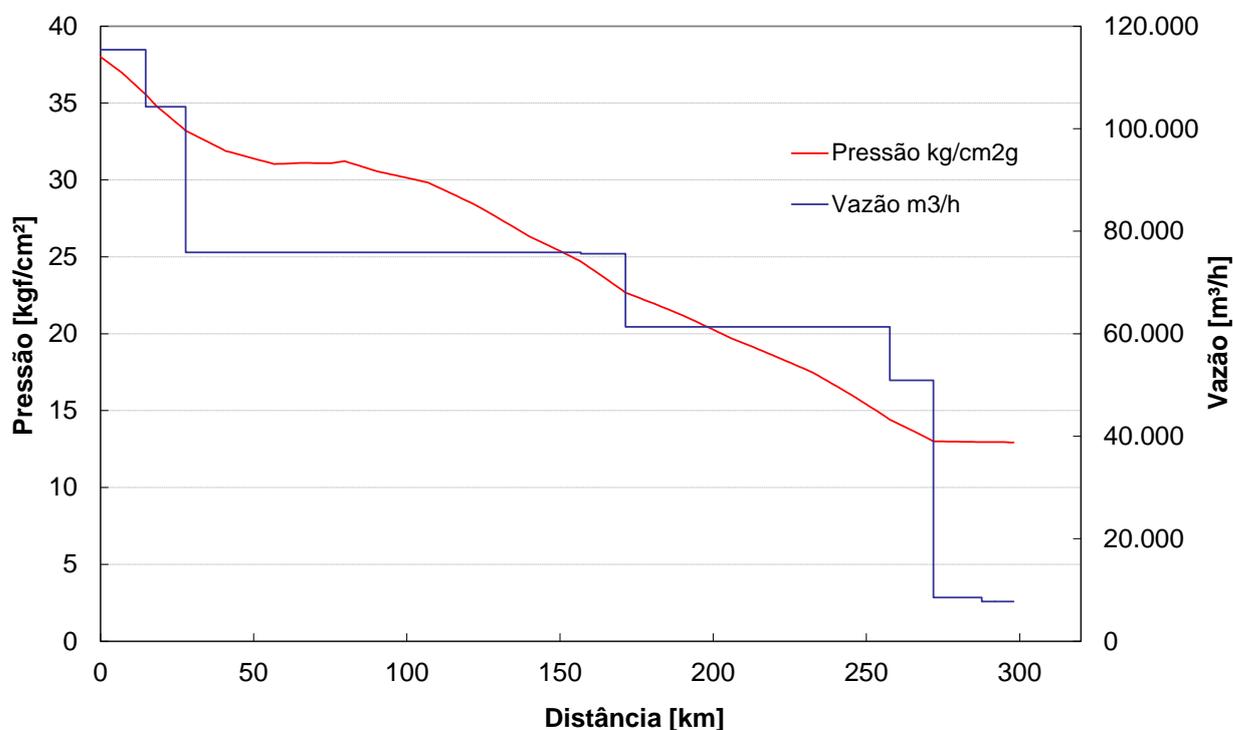


Figura 8 - Perfil de pressão e vazão do Cenário 2

Tabela 9 – Valores de pressão nos pontos de entrega e controladoras do Cenário 2

Ano	2012/2014
Estação de entrega	Pressão (kgf/cm²)
DP2 – Mina de Fábrica	33,0
DP5	33,2
ERP DP9	22,6
DP12	14,4
DP16	12,9
DP1	37,9
DP13	13,0

Ano	2012/2014
Bellox	24,6
DP15	12,9
ERP Iguaçu-DP14	13,0
DP4	34,8
Consumo Automotivo (Posto DP3)	35,5
DP11	14,4

3.4

Conclusões do atendimento às novas demandas até 2014

A modelagem do cenário operacional atual, simulando a situação de sete dias do mês de maio permitiu fazer uma validação completa, no entanto o valor da rugosidade inicialmente adotado resultou em uma pressão no ponto de entrega de DP16 abaixo do medido. Dessa forma, o modelo computacional foi ajustado através da alteração da rugosidade padrão de 0,0018” para 0,0004”. Esse valor será utilizado em todos os demais estudos.

O modelo desenvolvido comprovou que o Cenário 1 pode ser atendido, quando a pressão em SP é de 38,0 kgf/cm². Porém, essa pressão não pode ser inferior a 34,4 kgf/cm², valor ainda abaixo da média histórica verificada atualmente.

Para as condições do Cenário 2, a vazão máxima que pode ser ofertada para o ponto de entrega da DP13, observando as condições desse caso, é de 41.640 m³/h, com a pressão mínima limitada em 13 kgf/cm². Novamente deve-se observar que foi mantida constante a pressão do recebimento em SP em 38,00 kgf/cm².

4 Estudo Preliminar

Neste item, serão analisados e propostos casos preliminares de medidas que aumentem a capacidade de gás a ser transportada ao final da ampliação (2022 para o caso estudado). Para isto, foi desenvolvida uma metodologia que combina a análise técnica com a análise econômica das opções possíveis.

4.1 Metodologia Técnico-Econômica das Soluções Preliminares

O GASPEX é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo laboratório SIMDUT da PUC-Rio para auxiliar na escolha da alternativa ótima para um projeto de gasodutos. Para obtenção da melhor escolha, a ferramenta calcula o escoamento na rede de gasodutos em regime permanente e obtém o ponto de operação de cada equipamento, e realiza de forma integrada o cálculo dos custos de capital e operacionais envolvidos (CAPEX e OPEX). O objetivo principal da ferramenta é a determinação do custo do investimento respeitando as condições técnicas mais importantes como limites de pressão ao longo do duto e vazão nos pontos de entrega.

A seguir, serão apresentadas as premissas utilizadas para os cálculos técnicos e econômicos, implementados no GASPEX.

4.2 Premissas de Cálculo Técnico

Além das premissas utilizadas normalmente na análise de escoamento de gás natural em dutos, como escoamento unidimensional, monofásico e newtoniano, as seguintes premissas técnicas serão utilizadas na primeira etapa do estudo:

- Escoamento em regime permanente;

- Escoamento isotérmico;
- Equações de estado disponíveis: Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong;
- Viscosidade usando Correlação de Lee et al.;
- Poder calorífico e K (C_p/C_v) calculados usando equação de estado;
- Equipamentos ou elementos disponíveis:
- Ponto de Recebimento de Gás (SupplyGas)
- Ponto de Entrega de Gás (DeliveryGas)
- Válvula Controladora (Valve)
- Estação de Compressão (Compressor)
- Gasoduto (PipeGas);
- Equações de cálculo de atrito em gasoduto disponíveis: Weymouth, Colebrook, Panhandle-A, Panhandle-B, IGT, AGA-A e AGA-B;
- Discretização espacial uniforme para os elementos de dutos (KnotSpacing);
- Compressores genéricos com eficiência adiabática;
- Elevação fornecida nos pontos de recebimento e entrega de gás;
- Condições de referência para cálculo de volumes: 20° C e 1 atm.

Nos subitens a seguir, cada premissa adotada é apresentada em detalhes, sendo aquelas referentes às propriedades termodinâmicas do gás no item 4.2.1 e aquelas referentes à modelagem dos equipamentos disponíveis no item 4.2.2

4.2.1 Propriedades Termodinâmicas

Neste item são apresentadas as equações de estado e relações termodinâmicas utilizadas para calcular as propriedades termodinâmicas do gás natural, incluindo a lei de mistura adotada no cálculo das propriedades da mistura de gases. Apresenta-se ainda a correlação empírica adotada para estimar a viscosidade absoluta. As propriedades termodinâmicas são necessárias para a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear.

4.2.1.1 Equações de Estado

A determinação das propriedades do gás natural pode ser obtida a partir de uma equação de estado que retrate o comportamento do gás para várias condições de pressão, volume específico (ou massa específica) e temperatura. A equação de estado, também chamada de relação p - v - T , relaciona as variáveis de estado (pressão p , volume específico v ou massa específica ρ e temperatura T) permitindo a obtenção de qualquer variável em função de duas variáveis de um determinado estado.

A lei dos gases ideais ou perfeitos é o modelo termodinâmico mais simples que prevê o comportamento dos gases submetidos a baixas pressões ou altas temperaturas, quando o efeito das interações moleculares é pequeno. No entanto gases a altas pressões não se comportam como ideais ou perfeitos. O desvio do comportamento em relação ao gás ideal é medido pelo fator de compressibilidade $Z(p,T)$ que varia com pressão e temperatura. A massa específica do gás pode ser calculada com:

$$\rho(p,T) = p \frac{M_g}{Z(p,T) \mathfrak{R} T} \quad (1)$$

sendo \mathfrak{R} a constante universal dos gases perfeitos, $\mathfrak{R}=8314,5$ J/(kmol.K) e M_g é a massa molecular do gás (kg/kmol).

As equações de estado mais empregadas na indústria de gás natural são as desenvolvidas por Soave-Redlich-Kwong em 1972 e Peng-Robinson em 1976 (Pratt, 2002), pois oferecem melhores resultados que a lei clássica dos gases ideais

principalmente quando sujeitos a altas pressões e baixas temperaturas. Estas equações de estado estimam o comportamento de gases a quaisquer pressões e temperaturas inclusive próximas de seu ponto crítico, pois consideram as forças de interação intermoleculares.

O software em questão possui a opção de utilização de ambas as equações, tendo como padrão a equação de Peng-Robinson. A equação de estado de Peng-Robinson é expressa de seguinte forma:

$$p = \frac{\mathfrak{R} T}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)} \quad (2)$$

onde os parâmetros a e b dependem da pressão crítica p_c , temperatura crítica T_c e fator acêntrico ω , de acordo com:

$$a = 0,45724 \frac{(\mathfrak{R} T_c)^2}{p_c} \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right]^2 \quad (3)$$

$$b = 0,0778 \frac{\mathfrak{R} T_c}{p_c} \quad (4)$$

$$m = 0,37464 + 1,54226 \omega - 0,26992 \omega^2 \quad (5)$$

O fator de compressibilidade $Z(p,T)$ pode ser obtido a partir da solução do seguinte polinômio cúbico:

$$Z^3 + Z^2 (B-1) + Z(A-2B-3B^2) + (B^3 + B^2 - AB) = 0 \quad (6)$$

onde os parâmetros A e B são definidos pela Eq. (7).

4.2.1.1.1 Massa Específica Padrão

Para que possa existir uma padronização na medição de vazão define-se a vazão nas condições padrão (Standard flow) que é obtida ao se dividir a vazão

mássica pela massa específica numa condição padrão. A condição definida como padrão no software é a condição Petrobrás, com $T_{std} = 293,15$ K (20°C), $p_{std} = 101325$ Pa e $Z_{std} \approx 1$:

$$\rho_{std} = \frac{p_{std}}{Z_{std} \cdot R_g \cdot T_{std}} \quad (7)$$

$$R_g = \frac{\mathfrak{R}}{M\omega_g} \quad (8)$$

4.2.1.1.2 Propriedades de Mistura

O gás natural é formado por uma série de espécies químicas. Para a determinação das equações de estado apresentadas é necessário determinar as propriedades da mistura, as quais dependem da composição do gás natural.

As equações de estado cúbicas necessitam das propriedades de substância pura para cada um dos componentes ou espécies químicas que formam a composição da mistura do gás natural. A Tabela 10 apresenta as propriedades das 13 substâncias puras mais utilizadas para caracterizar um gás natural (ver Anexo B da norma ABNT NBR-1513). As propriedades críticas para várias espécies químicas são facilmente encontradas na literatura (Van Wylen e Sonntag, 2003).

Tabela 10 – Propriedades de Substância Pura das Espécies Químicas

Sigla	Componente	Massa Molar [kg/kmol]	Pres. Crítica [kPa]	Temp. Crítica [K]	Fator Acentrico
CH4	METANO	16,043	4599	190,564	0,011
C2H6	ETANO	30,07	4872	305,32	0,099
C3H8	PROPANO	44,097	4248	369,83	0,153
I-C4H10	I-BUTANO	58,123	3796	425,12	0,199
N-C4H10	N-BUTANO	58,123	3796	425,12	0,199

Sigla	Componente	Massa Molar [kg/kmol]	Pres. Crítica [kPa]	Temp. Crítica [K]	Fator Acentrico
I-C5H12	I-PENTANO	72,15	3370	469,7	0,251
N-C5H12	N-PENTANO	72,15	3370	469,7	0,251
C6+	HEXANO	86,177	3030	506,4	0,299
CO	MONÓXIDO DE CARBONO	28,01	3499	132,91	0,239
CO2	DIÓXIDO DE CARBONO	44,01	7375	304,14	0,066
H2	HIDROGÊNIO	2,0159	1293	32,97	-0,216
N2	NITROGÊNIO	28,0135	3390	126,21	0,039
O2	OXIGÊNIO	31,9988	5043	154,59	0,025

A propriedade ϕ_g da mistura de gás com n-espécies corresponderá ao produto interno do vetor propriedade ϕ das espécies pelo vetor composição molar X :

$$\phi_g = \langle X, \phi \rangle = \sum_{i=1}^n X_i \cdot \phi_i \quad (9)$$

Neste caso adota-se o subscrito g para representar a propriedade do gás de mistura e i para indicar a propriedade de substância pura da espécie.

A Equação (15) pode ser aplicada para o cálculo das seguintes propriedades de mistura:

- Propriedades de substância pura: peso molecular M_g , fator acêntrico ω , pressão crítica p_c e temperatura crítica T_c
- Coeficientes do calor específico molar à pressão zero
- Poder calorífico molar inferior e superior

Como o coeficiente b da equação de estado cúbica depende apenas das propriedades críticas e da constante universal, a seguinte expressão é válida:

$$b_g = \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_i \quad (10)$$

De acordo com Cavalcanti e Rojas (2008) e Pratt (2002) o cálculo das propriedades de uma mistura de gás com n -espécies utilizando a equação de estado de Peng-Robinson, deve utilizar a regra de combinação clássica de Van der Waals para avaliar o parâmetro a da mistura. Esta regra leva em consideração o potencial de combinação em pares de cada espécie através de uma constante empírica de interação binária k_{ij} .

$$a_g = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (11)$$

De acordo com a regra de Van der Waals, a constante de interação binária é exatamente zero ($k_{ij}=0$) para moléculas iguais ($i = j$). Os valores de k_{ij} para vários pares de combinação são encontrados na literatura (Walas, 1985), contudo para moléculas diferentes ($i \neq j$) de hidrocarbonetos os valores são próximos de zero ($k_{ij} \approx 0$).

$$a_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j \sqrt{a_i a_j} \quad (12)$$

4.2.1.2 Viscosidade Absoluta

O cálculo da viscosidade absoluta é realizado com a correlação de Lee et al (1966), válido somente para misturas de gás natural. Nesta correlação a viscosidade absoluta em (cP) é calculada a partir da massa específica ρ (g/cm³), da massa molecular da mistura M_g (kg/kmol) e da temperatura T em Rankine:

$$\mu_g = 10^{-4} A_\mu \exp(B_\mu \rho^{C_\mu}) \quad (13)$$

$$A_\mu = \frac{(9,379 + 0,01607 M_g) T^{1.5}}{209,2 + 19,26 M_g + T} \quad (14)$$

$$B_{\mu} = 3,448 + 0,0101M_g + \frac{986.4}{T} \quad (15)$$

$$C_{\mu} = 2,447 - 0,2224 B_{\mu} \quad (16)$$

4.2.2 Propriedades dos Equipamentos

De uma forma geral, a aplicação das equações de conservação quando associadas a um equipamento requer a adoção de alguma hipótese ou aproximação associada com o tipo de problema que será resolvido. As hipóteses gerais adotadas para a formulação do problema são:

- Escoamento com balanço de massa ou vazão volumétrica padrão nos nós;
- Escoamento unidimensional em regime permanente e isotérmico nos gasodutos;
- Correlações empíricas baseadas na conservação de quantidade de movimento e energia em termos de pressão e vazão para cada equipamento.

A seguir serão apresentadas as equações de balanço de massa e equações em termos de pressão e vazão para cada equipamento. Nas equações de conservação de quantidade de movimento e energia para os equipamentos foram adotadas correlações empíricas para avaliar as perdas por atrito em função do equipamento modelado.

4.2.2.1 Balanço nos Nós e Conectividade entre Elementos

Aplicando o teorema da conservação de massa em um nó temos que os somatórios dos fluxos que entram no nó devem ser iguais ao somatório dos fluxos que saem do nó. As equações de conservação de massa e energia para o gás natural e de massa de uma espécie i são:

$$\sum_{e=1}^{ne} \dot{m}_e - \sum_{s=1}^{ns} \dot{m}_s = 0 \rightarrow \sum_{e=1}^{ne} (Q_{std})_e - \sum_{s=1}^{ns} (Q_{std})_s = 0 \quad (17)$$

Onde \dot{m} é a vazão em massa, Q_{std} a vazão volumétrica padrão, Os subscritos e e s correspondem à “entrada” e “saída” do nó. ne e ns correspondem ao número de “entradas”, “saídas” do nó e ni é o número de espécies que compõe o gás natural.

4.2.2.2 Pontos de Recebimento e Entrega de Gás

As condições de contorno do problema são definidas no GASPEX como pontos de entrada e saída de gás do duto, de modo a satisfazer cada uma das equações de balanço de massa. A regra geral dita que pelo menos num ponto de recebimento a condição de pressão seja fornecida para a solução do problema. Contudo nos pontos de recebimento de gás é recomendada a definição da pressão e nos pontos de entrega de gás é possível definir pressão ou vazão.

4.2.2.3 Válvula de Controle (Valve)

Neste elemento é possível selecionar três tipos de controle:

- Controle de Pressão à Jusante
- Controle de Pressão à Montante
- Controle por Fração de Abertura

A queda de pressão através da válvula é função das variáveis na entrada, da vazão volumétrica e do coeficiente da válvula C_v . A equação que representa a queda de pressão na válvula é apresentada a seguir, onde C_v é função da fração de abertura da válvula:

$$\Delta p = \frac{SG \cdot |Q|Q}{C_v^2} \quad (18)$$

É possível definir uma curva de abertura de coeficiente da válvula em função da fração de abertura. As curvas podem ter comportamento linear ou de igual percentagem dependendo do tipo de atuador da válvula.

4.2.2.4 Gasodutos

Este elemento simula um duto de seção circular uniforme realizando escoamento compressível de gás natural considerando a elevação do terreno apenas nas extremidades do elemento (componente gravitacional). Foram escolhidas 06 equações largamente empregadas na indústria de petróleo para dimensionamento de gasodutos. As equações foram desenvolvidas e aplicadas no cálculo da vazão volumétrica normal e da queda de pressão no duto. Os parâmetros empíricos associados a cada equação são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros empíricos para dimensionamento de gasodutos

Equação	A	B	C	C₁	C₂
Colebrook	1,0	0,5	2,5	13,305	$1/\sqrt{f}$
Weymouth	1,0	0,5	2,6667	137,32	1,0
Panhandle-A	0,8539	0,5394	2,6182	99,51	1,0
Panhandle-B	0,9608	0,51	2,53	137,24	1,0
AGA-A	1,0	0,5	2,5	13,303	$2,0 \cdot C_f \log_{10}(\text{Re} \sqrt{f}/2,51)$
AGA-B	1,0	0,5	2,5	13,303	$2,0 \log_{10}(3,7 D/Ru)$

Fonte: Stuckenbruck S. Escoamento em Dutos. Cap 6. pág 247. 2008.

Dessa forma, aplica-se os parâmetros a equação de escoamento, sendo \mathbf{K}_g o coeficiente gravitacional e \mathbf{K}_T o coeficiente de resistência de pressão:

$$p_1^2 - p_2^2 = K_g + K_T Q_{std}^{1/b} \Rightarrow p_2 = \sqrt{p_1^2 - K_g - K_T Q_{std}^{1/b}} \quad (19)$$

$$K_g = \frac{2\lambda_g g(y_1 - y_2)}{R_{ar} Z_m T_m} \quad (20)$$

$$K_T = \frac{2\lambda_g^a L Z_m T_m}{\left[\eta C_1 C_2 \frac{T_{std}}{P_{std}} D^c \right]^{1/b}} \quad (21)$$

Onde D é o diâmetro interno da tubulação e L seu comprimento, η é o fator de eficiência, γ_g é a densidade relativa do gás ($\gamma_g = M_g/M_{ar}$), Z_m o fator de compressibilidade médio, T_m a temperatura média, A , B , C , C_1 e C_2 são parâmetros empíricos da Tabela 11.

Para as fórmulas de Colebrook e AGA-A foi adotado a expressão de Colebrook-White para o cálculo do fator de atrito.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,87 \ln \left(\frac{Ru / D_i}{3,7} + \frac{2,51}{\mathbf{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (22)$$

4.2.2.5 Compressores Genéricos

O GASPEX possibilita a modelagem de um compressor centrífugo. O compressor pode ser controlado de três formas distintas:

- Controle de Máxima Pressão de Saída
- Controle de Máxima Potência
- Controle por Razão de Compressão

A quantidade de trabalho por unidade de massa H_s (*head*) [N.m/kg] que deve ser realizada no processo de compressão do gás, de tal maneira que o processo seja isentrópico, é dado pela Eq. (30), (Krishnaswami et al., 2004):

$$H_s = \frac{k}{k-1} Z_m R_{gas} T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (23)$$

Onde k é a relação dos calores específicos (Cp/Cv), R_{gas} é a constante do gás, os subscritos 1 e 2 são relacionados aos valores a montante e a jusante do componente e o subscrito m representa um valor médio ao longo do componente.

Outra abordagem de modelagem do compressor no software é através da razão de compressão, definida conforme a seguinte equação:

$$P_{ratio} = \frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{H_s}{Z_m R_{gas} T_1} \left(\frac{k-1}{k} \right) + 1 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (24)$$

A potência utilizada pelo compressor é definida pela seguinte equação:

$$Pot_{bhp} = \frac{H \cdot Q_{std} \cdot \rho_{std}}{\eta_s} \quad (25)$$

onde η_s é a eficiência do compressor.

Para o acionamento do compressor temos o *driver*, cuja vazão de combustível consumida é definida pela seguinte equação:

$$Q_{fuel} = \frac{1}{(\eta_{driver} PCI_g)} \cdot Pot = \frac{m^3}{J} \times \frac{J}{s} = \frac{m^3}{s} \quad (26)$$

onde η_{driver} é a eficiência do *driver* e PCI_g é o poder calorífico inferior da mistura [kJ/Sm³].

O poder calorífico de uma mistura, utilizado como combustível para o funcionamento do compressor é definido a partir da seguinte equação, conforme explicitado anteriormente no item 4.2.1.1.2:

$$PCI_g = \rho_{std} \frac{\sum x_i \cdot \overline{PCI}_i}{\sum x_i \cdot Mw_i} \quad (27)$$

onde \overline{PCI}_i é o poder calorífico inferior molar [kJ/kmol] do componente i .

Finalmente, é calculado o consumo energético necessário para a compressão do gás transportado, através da seguinte equação:

$$E_c = \frac{Pot_{bhp}}{\eta_{driver}} \times Tempo \quad (28)$$

4.3 Premissas de Cálculo Econômico

Para as etapas preliminares do estudo foi adotada a metodologia de cálculo econômico implementada na ferramenta GASPEX. As fórmulas de custos calculam os custos com capital (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) a partir dos resultados da solução técnica abordada no item 4.2 de forma integrada. Os itens de CAPEX estão sempre relacionados à compra ou mobilização de bens de capital, enquanto OPEX as despesas operacionais como aluguel, consumo de energia, etc.

Serão apresentadas neste tópico as fórmulas e premissas utilizadas na ferramenta para o cálculo dos custos de CAPEX e OPEX, valor presente do

investimento (VP) e determinação das curvas J geradas nas soluções preliminares do estudo de avaliação técnico-econômico de projeto de gasodutos

Por convenção os custos dos itens CAPEX são expressos em U\$ e os custos de OPEX em U\$/ano. Todo item de custo apresenta um custo por unidade (U\$) No GASPEX os itens de custo de CAPEX ou OPEX apresentam uma expressão de acordo com o tipo de equipamento modelado: Pipe ou Compressor.

Os itens de custo associados com tipo de equipamento podem ser obtidos utilizando três métodos distintos em função dos dados de entrada:

- Custo por Contagem de Equipamento
- Custo por Parâmetro de Entrada do Equipamento
- Custo usado Curva de Dados de Entrada

Os itens de OPEX podem ser calculados através de todos os métodos anteriores incluindo um novo método:

- *Custo por Integral no Tempo*

4.3.1 Custo Por Contagem de Equipamento

O custo por contagem é calculado multiplicando o custo por unidade pela quantidade de equipamentos habilitados como itens de CAPEX /OPEX.

4.3.2 Custo por Parâmetro de Entrada do Equipamento

O custo por parâmetro técnico de entrada é calculado multiplicando o custo por unidade *em (U\$/InputUnit)* pelo valor do parâmetro de entrada do equipamento referente ao equipamento habilitado. O parâmetro técnico é estabelecido no comando de entrada. Na Tabela 12 são apresentados os parâmetros técnicos válidos para cada tipo de Equipamento.

Tabela 12 – Parâmetros por Equipamento

<i>Tipo de Equipamento</i>	<i>Parâmetro Técnico</i>
Pipe	Peso Pressão a montante Pressão a jusante Comprimento Espessura Diâmetro externo Rugosidade SMYS Perda de carga
Compressor	Diferencial de pressão Taxa de compressão Potência Setpoint de potência Setpoint de pressão Setpoint da taxa de compressão SetPoint de vazão Eficiência adiabática Head Vazão de combustível Vazão

4.3.3 Custo por Curva de Dados de Entrada

O custo por curva de dados de entrada é calculado a partir de uma curva definida em função de dois parâmetros técnicos associados ao equipamento: um parâmetro de entrada e outro de saída. Os parâmetros são definidos em conjunto com os pontos da curva de custo no formato (U\$/unidade de output VS unidade de

input) e deve conter no mínimo dois pontos. Por exemplo, é necessário estabelecer o custo de construção e montagem por comprimento, em função do diâmetro do tubo. Os valores de entrada intermediários serão interpolados linearmente entre pontos consecutivos. Os parâmetros de entrada e saída válidos para cada equipamento são listados na Tabela 12.

4.3.4 Custo por Integral no Tempo

O custo por integral no tempo é calculado de forma análoga ao custo por parâmetro de entrada. No entanto neste método o parâmetro de entrada corresponde a uma derivada temporal do custo por unidade. Logo se o custo por unidade é U\$/m³ o parâmetro de entrada deve estar m³ por unidade de tempo.

O custo do OPEX (U\$/year) por definição será a integral no tempo do valor de entrada do equipamento para um intervalo de 01 ano.

4.3.5 Fluxo de caixa

A ferramenta permite o cálculo do valor presente de investimento (**VP**) para cada solução técnica através da configuração de um fluxo de caixa simplificado, formado por uma série de pagamentos com uma taxa fixa **G** de aumento dos custos de OPEX e uma taxa de juros **J**.

No fluxo de caixa é possível estabelecer o período de compra de bens, o período de início de operação equipamentos e também o intervalo de operação de cada equipamento. No fluxo de caixa cada período representa um ano na série de pagamentos.

O valor presente parcial (VPP) é calculado para cada um dos valores futuros de CAPEX e OPEX no período **i** de acordo com a expressão:

$$VPP_{CAPEX}(k) = \sum_i^{np} \frac{VF_{CAPEX}(i, k)}{(1+J)^i} \quad (29)$$

$$VPP_{OPEX}(m) = \sum_i^n \frac{VF_{OPEX}(i, m)}{(1+J)^i} \quad (30)$$

Onde np representa o número total de períodos do fluxo de caixa

O valor presente total do investimento (**VP**) é o somatório de todos os valores presentes parciais de CAPEX e OPEX configurados.

$$VP = \sum_k VPP_{CAPEX}(k) + \sum_m VPP_{OPEX}(m) \quad (31)$$

No fluxo de caixa os custos de OPEX podem aumentar em função de uma taxa fixa anual de crescimento **G**. Neste caso o Valor Futuro (**VF**) para os custos de OPEX no período i para um certo equipamento com período inicial de operação s é obtido através da expressão:

$$VF_{OPEX}(i, m) = VF_{OPEX}(s, m) \cdot (1 + G)^{i-s}, i > s \quad (32)$$

4.4 Alternativas da Solução Técnica

O item 3 deste documento estudou o nível de carregamento existente hoje no gasoduto e as medidas a serem adotadas para o atendimento das novas transferências para o ano de 2014

Para atender as novas demandas previstas pela GASMIG para o ano de 2022 em diante, as possíveis soluções técnicas foram elencadas:

1. estações de compressão,
2. *loops* (trechos de duto paralelo ao existente),
3. combinação das soluções anteriores.

As diversas opções de combinação de soluções foram limitadas pela otimização do aspecto econômico.

4.5 Dados Técnicos

Conforme definido pela GASMIG, após 2022 pretende-se que o gasoduto seja responsável por uma movimentação apresentada na Tabela 13. Esta movimentação já considera uma flexibilidade de 10% a mais do que o previsto.

Tabela 13 – Valores de vazão horária média e pressão mínima nas estações de entrega

Ponto de Entrega	VHM 2022 + 10% [m³/h]	Pressão Mínima [kgf/cm²]
DP1	44347	19
DP2	9593	10
DP3	1014	19
DP4	21	19
DP5	82531	19
DP6	1093	19
DP7	534	19
DP8	71	6
DP9	28039	12
DP10	27705	19
ACESITA	13393	10
DP11	88	6
DP13	56585	13
DP14	506	8
PARAISO	474	8

Ponto de Entrega	VHM 2022 + 10% [m³/h]	Pressão Mínima [kgf/cm²]
DP16	10327	10
DP16	1412	13

4.6 Dados Econômicos

Nesta avaliação preliminar foram considerados itens simplificados de CAPEX e OPEX. Todos os custos são referentes ao ano de 2012 e foi utilizada uma taxa de juros anual de acordo com o item 4.3.5.

4.6.1 Estimativas de CAPEX

4.6.1.1 Custo do Aço

De acordo com a consulta realizada pelo SIMDUT a fabricantes de tubos em projetos anteriores e utilizando a taxa de juros de acordo com o item 4.3.5, o valor do aço SAW X46 utilizado no estudo é de US\$ 3.015/ton. Este aço foi escolhido para esta fase do estudo pois é o mesmo aço utilizado na construção original do duto.

4.6.1.2 Construção e Montagem do Duto

Pelo orçamento passado pela GASMIG para duto de 16'' e utilizando a taxa de juros de acordo com o item 4.3.5, o valor utilizado para construção e montagem foi de 612.239 US\$/km para um duto de 16''. Utilizando esse valor como base e de acordo com as consultas realizadas a fabricantes de tubos, foram

determinados valores médios para diferentes diâmetros que estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Custo de Construção e Montagem

Diâmetro [pol]	Custo [US\$/km]
14	588.691
16	612.239
18	636.729
20	662.198
22	688.686
24	716.233

Os valores de trechos especiais presentes no orçamento da GASMIG não foram contemplados nessa etapa preliminar.

4.6.1.3 Estação de Compressores

A GASMIG decidiu que será contratado um serviço de compressão (SCOMP). O custo das SCOMPs foi considerado de US\$ 17.900.000 por estação. Uma parte de US\$ 2.900.00 referente à compra do terreno, mais US\$ 15.000.000 de custo de mobilização de equipamentos.

4.6.2 Estimativas de OPEX

4.6.2.1 Locação das Máquinas

Através de um contrato de SCOMP fornecido pela GASMIG, foi dividido custo do aluguel pela potência nominal de uma estação e chegou-se ao valor de US\$ 583,1 por HP.

4.6.2.2 Manutenção e Operação das Estações

Através de um contrato de SCOMP fornecido pela GASMIG, foi dividido custo de operação e manutenção pela potência nominal de uma estação chegou-se ao valor de US\$ 485,9,1 por HP.

4.6.2.3 Custo de Gás Consumido

O custo de gás consumido pelas SCOMPs foi informado pela GASMIG: US\$ 0,35

4.7 Premissas Técnicas

As seguintes premissas técnicas serão utilizadas na primeira etapa do estudo:

- Gasoduto operando em regime permanente para análise dos cenários futuros;
- Escoamento isotérmico a 20° C;
- Equação de estado utilizada: Peng-Robinson;
- Equação de cálculo de atrito em gasoduto utilizada: Colebrook;

- Condições de referência: 20° C e 1 atm;
- Composição simplificada do gás natural, de acordo com a Tabela 5;

Tabela 15 – Características do gás natural

Propriedade	Porcentagem	Massa específica	Poder Calorífico
Dióxido de Carbono	1,18	31,1 kg/m ³	35.0 MJ/m ³
Metano	92,03		
Etano	4,28		
Propano	1,32		
Iso-butano	0,27		
N-butano	0,26		
N-pentano	0,04		
Nitrogênio	0,62		

Nas soluções com estações de compressão, foi considerada a pressão máxima de descarga de 51 kgf/cm².

As soluções com *loop* para os casos preliminares foram projetadas seguindo a ASME 31.8 e a API 5L, considerando:

- pressão de projeto de 51 kgf/cm²;
- material API 5L X46;
- classe de locação 4 (FET=0,4);
- sobre-espessura de corrosão de 1,3mm.

As espessuras empregadas estão relacionadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Espessuras dos loops

Diâmetro do loop [pol]	Espessura [pol]
16	0,366
18	0,406
20	0,469
22	0,500
24	0,562
26	0,562

4.8 Premissas Econômicas

Além das premissas utilizadas normalmente na análise, conforme apontado no anteriormente neste trabalho, foram consideradas as seguintes premissas adicionais:

- todos os itens de CAPEX foram adquiridos no 1º ano,
- os itens de OPEX possuem um intervalo de avaliação de 20 anos,
- taxa de desconto de 11% a.a.,
- taxa de reajuste de juros de 5% a.a..

4.9 Resultados

Foram selecionadas seis alternativas técnico-econômicas, todas com uma estação de compressão no início do duto, em São Brás do Suaçui. Isso foi feito, pois verificou-se que para os anos de 2015 e 2017 essa estação seria necessária tendo em vista a dificuldade de construção de *loops* nesse pequeno intervalo de tempo.

Uma sétima alternativa foi analisada, considerando a existência de um *loop* que pudesse atender as demandas de 2022, sem a compressão em SP. Isto é, mesmo sendo necessária em anos anteriores, com a construção do novo *loop* da sétima solução, a SCOMP poderia ser desmobilizada.

As soluções para cada caso estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Soluções técnico-econômicas

Caso	SCOMPs	Km de Loops
1	02 (SP+DP5)	65,6 (Ø16'')
2	02 (SP+DP7)	27,6 (Ø18'')
3	01 (SP)	93,9 (Ø18'')
4	03 (SP+DP5+DP7)	0
5	04 (SP+DP2+OUOPRETO+DP7)	0
6	04 (SP+DP2+DP5+DP7)	0
7	0 (Sem SCOMPS)	230,1 (Ø22'')

4.9.1 Caso 1

Para a avaliação desse caso foram consideradas duas estações de serviço de compressão (SCOMP) e dois *loops* totalizando aproximadamente 65,6km.

Uma SCOMP foi considerada em SP, após o ponto de recebimento, e outra próxima a DP5. No modelo, ela foi considerada a jusante da válvula VB-1749, existente no gasoduto.

O primeiro *loop* tem 14,7 km com 16" de diâmetro e vai de SP até o ponto de entrega da DP2. O segundo *loop* tem 50,9 km com 16" de diâmetro e parte do ponto onde ocorre a redução de diâmetro do duto atual de 18" para 16".

A Figura 9 apresenta o fluxograma da solução.

Caso 1 - 2022

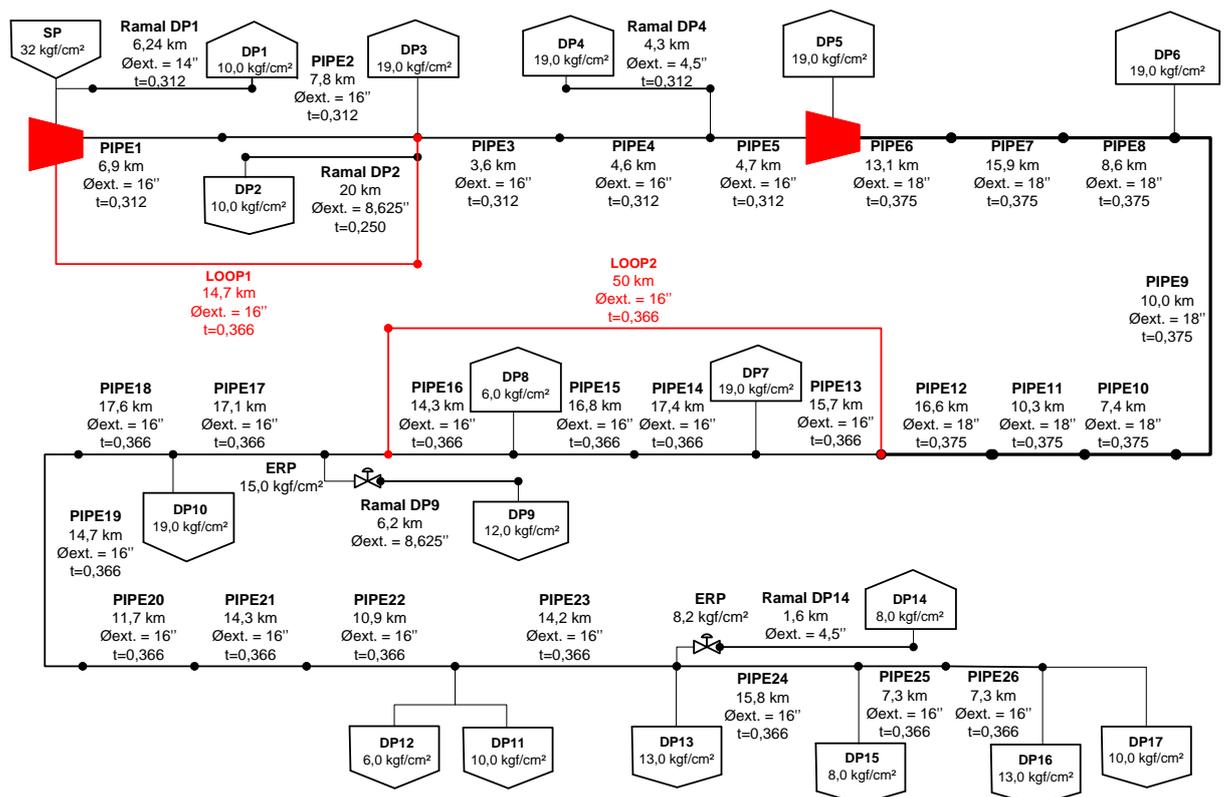


Figura 9 – Fluxograma do caso 1

Foi realizado um estudo para a definição do diâmetro econômico do *loop*. A Figura 10 apresenta a curva do valor presente do investimento (VP) em função dos diâmetros nominais considerados. Para a obtenção dessa curva, ajustou-se o

comprimento do loop para cada diâmetro procurando a solução que fornecesse o menor VP. Esse procedimento também foi utilizado para os Casos 2 e 3.

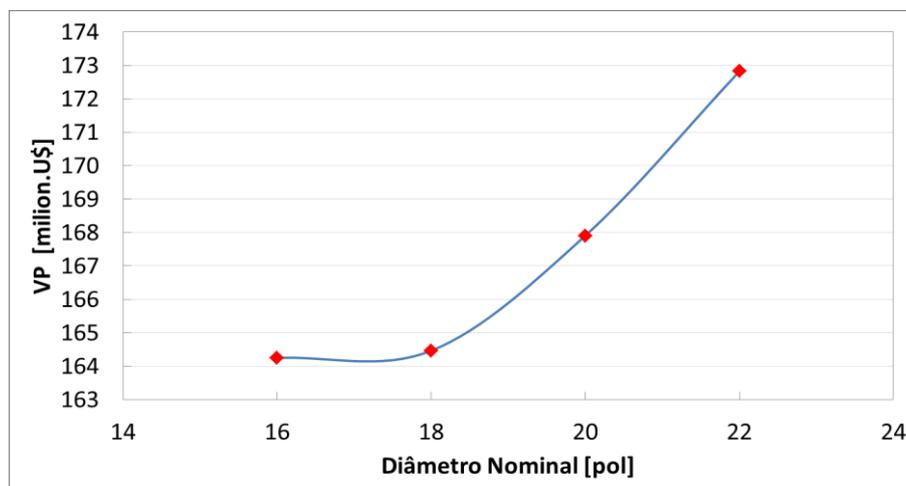


Figura 10 – Diâmetro econômico do caso 1

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 – CAPEX e OPEX do Caso 1

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	18,029
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	40,162
CAPEX Instalação Compressores	35,800
Total CAPEX	93,992
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	57,761
OPEX Gas Consumido	12,493
Total OPEX	70,254
VP [milhão.US\$]	164,247

A estimativa de potência hidráulica consumida pelas estações de serviço de compressão é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Potência das SCOMPs do Caso 1

SCOMP	Potência
SP	3731
DP5	1102
Total [HP]	4832

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 11. DP2 ressaltar que a curva de vazão do gráfico apresenta apenas a vazão no gasoduto existente nos trechos onde foram instalados os *loops*.

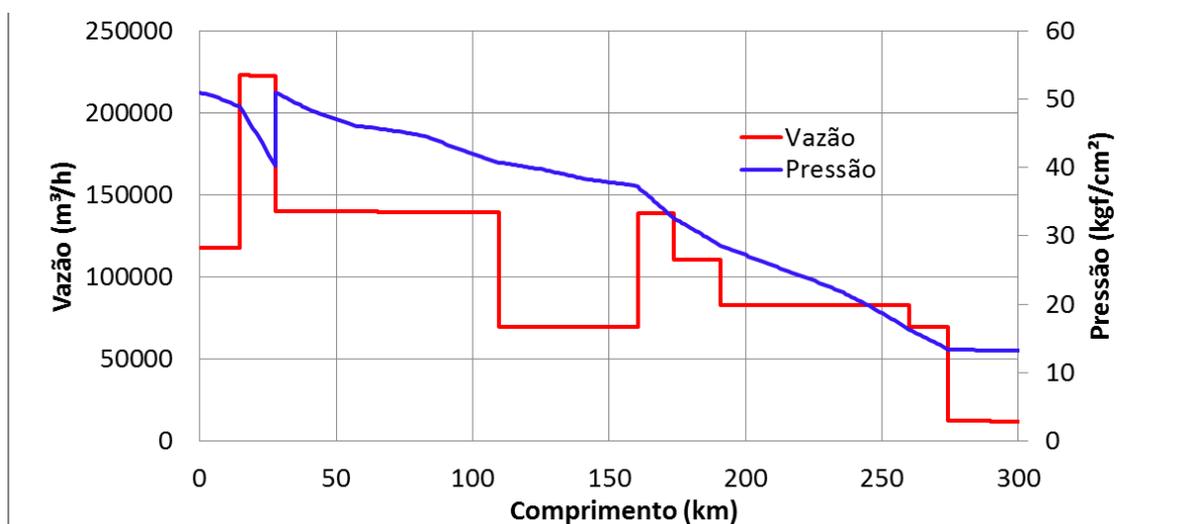


Figura 11 – Distribuição de pressão a vazão do caso 1

4.9.2 Caso 2

Para a avaliação desse caso foram consideradas duas estações de serviço de compressão (SCOMP) e um *loop* com aproximadamente 27,6km.

Uma SCOMP em SP, após o ponto de recebimento, e outra próxima a DP7. No modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1576, existente no gasoduto. O *loop* tem 18" de diâmetro e vai de SP até o ponto de entrega da DP5.

A Figura 12 apresenta o fluxograma da solução.

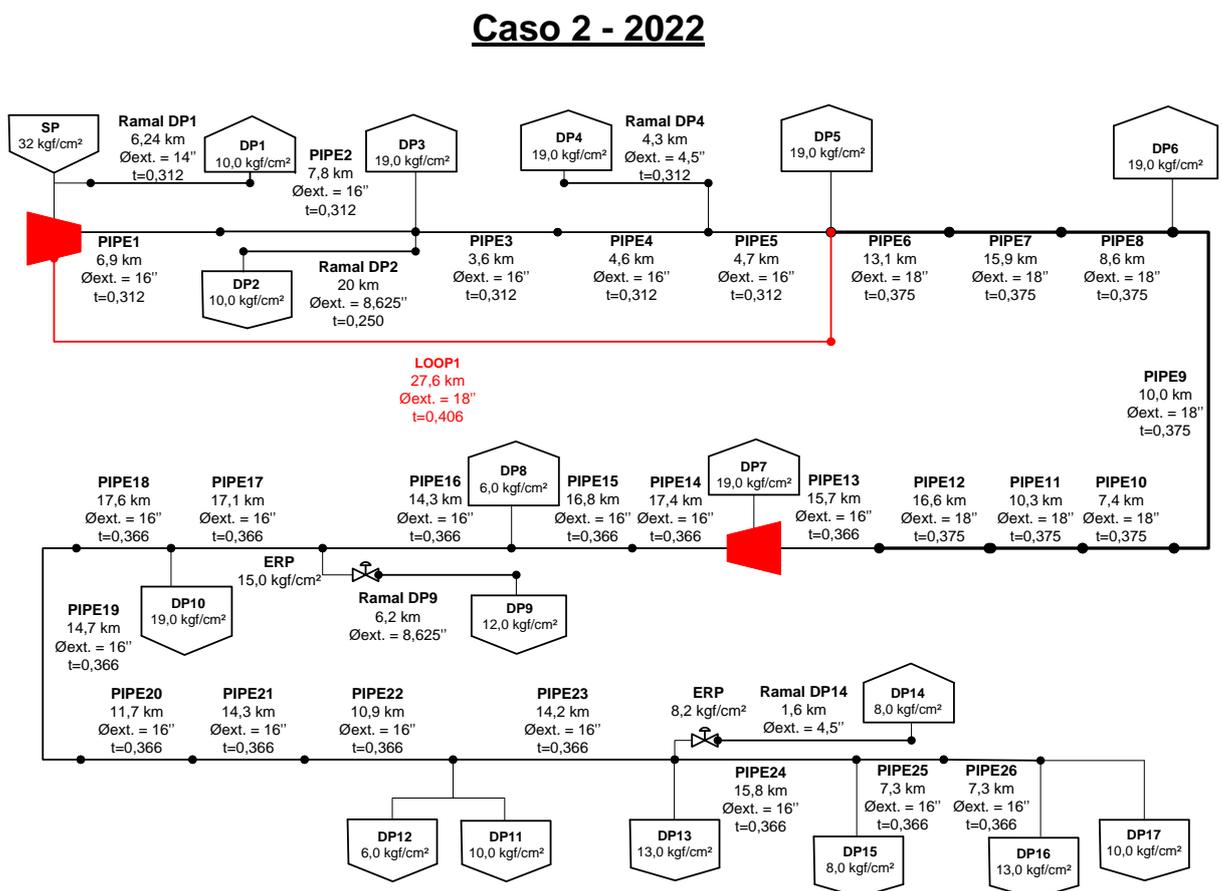


Figura 12 – Fluxograma do caso 2

Foi realizado um estudo para a definição do diâmetro econômico de 16" do *loop*. A Figura 13 apresenta a curva do valor presente do investimento (VP) em função dos diâmetros considerados.

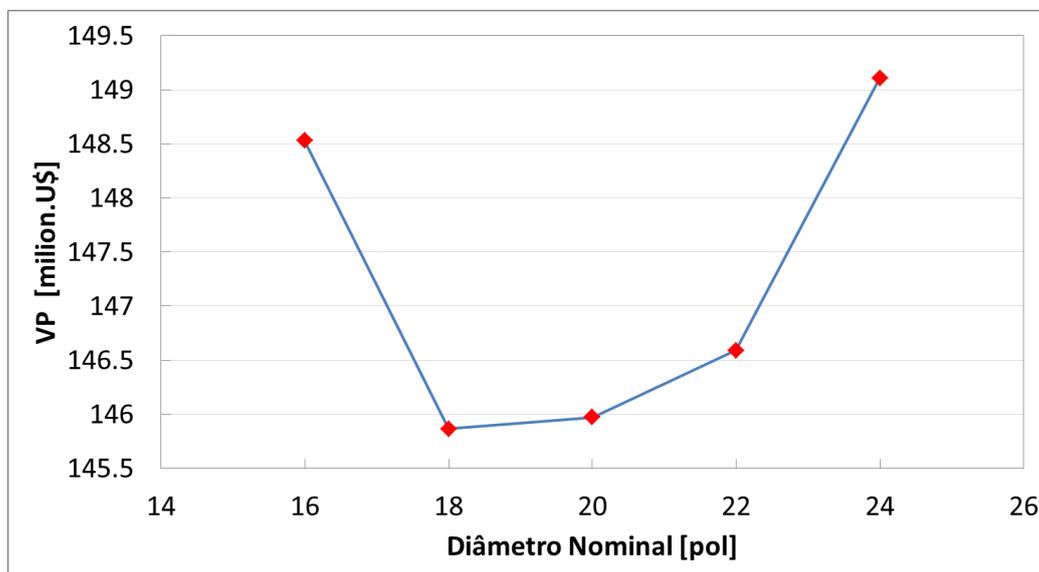


Figura 13 – Diâmetro econômico do caso 2

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – CAPEX e OPEX do Caso 2

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	9,469
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	17,574
CAPEX Instalação Compressores	35,800
Total CAPEX	62,843
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	68,258
OPEX Gas Consumido	14,764

Total OPEX	83,022
VP [milhão.US\$]	145,866

A estimativa de potência hidráulica consumida pelas estações de serviço de compressão é apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 – Potência das SCOMPs do Caso 2

SCOMP	Potência
SP	3731
DP7	1980
Total [HP]	5710

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 14. DP2 ressaltar que a curva de vazão do gráfico apresenta apenas a vazão no gasoduto existente no trecho onde foi instalado o *loop*.

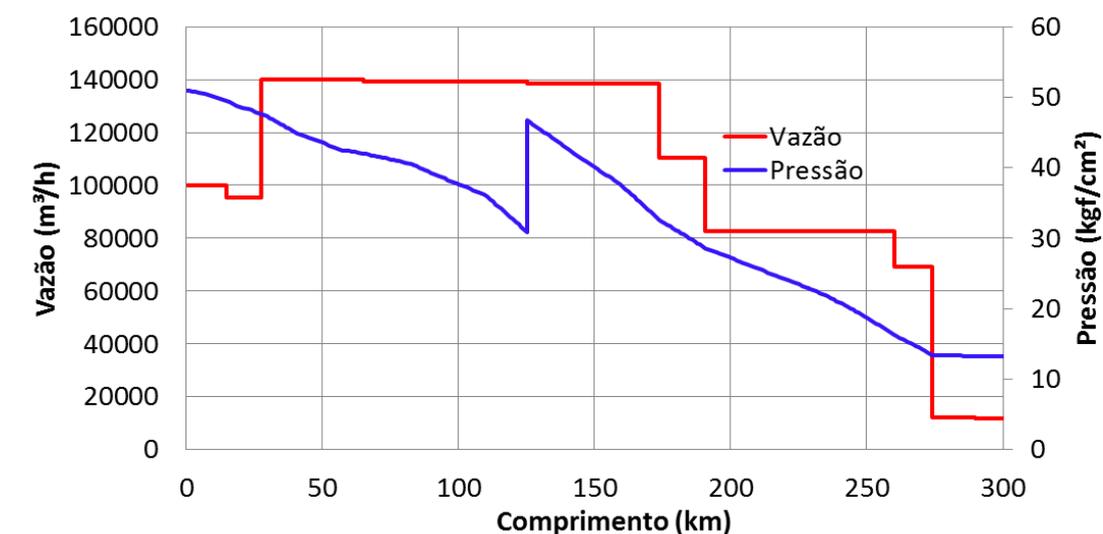


Figura 14 – Distribuição de pressão a vazão do caso 2

4.9.3 Caso 3

Para a avaliação desse caso foi considerada uma estação de serviço de compressão (SCOMP) e dois *loops* totalizando aproximadamente 93,9km.

A SCOMP foi instalada em SP, após o ponto de recebimento.

O primeiro *loop* tem 27,6 km com 18” de diâmetro e vai de SP até o ponto de entrega da DP5 ou onde o diâmetro do duto existente aumenta de 16” para 18”. O segundo *loop* tem 66,3 km com 18” de diâmetro e parte do ponto onde ocorre a redução de diâmetro do duto atual de 18” para 16”.

A Figura 15 apresenta o fluxograma da solução.

Caso 3 - 2022

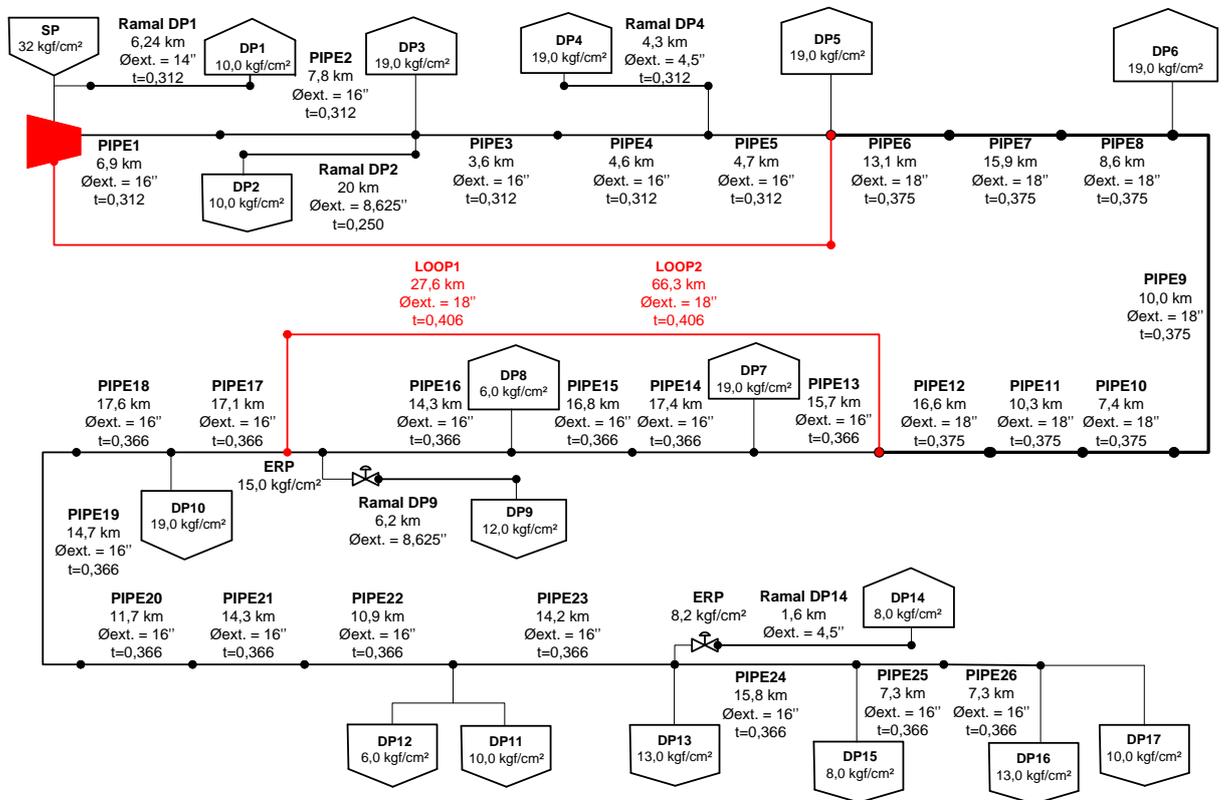


Figura 15 – Fluxograma do caso 3

Foi realizado um estudo para a definição do diâmetro econômico de 18" do loop. A Figura 16 apresenta a curva do valor presente do investimento (VP) em função dos diâmetros considerados.

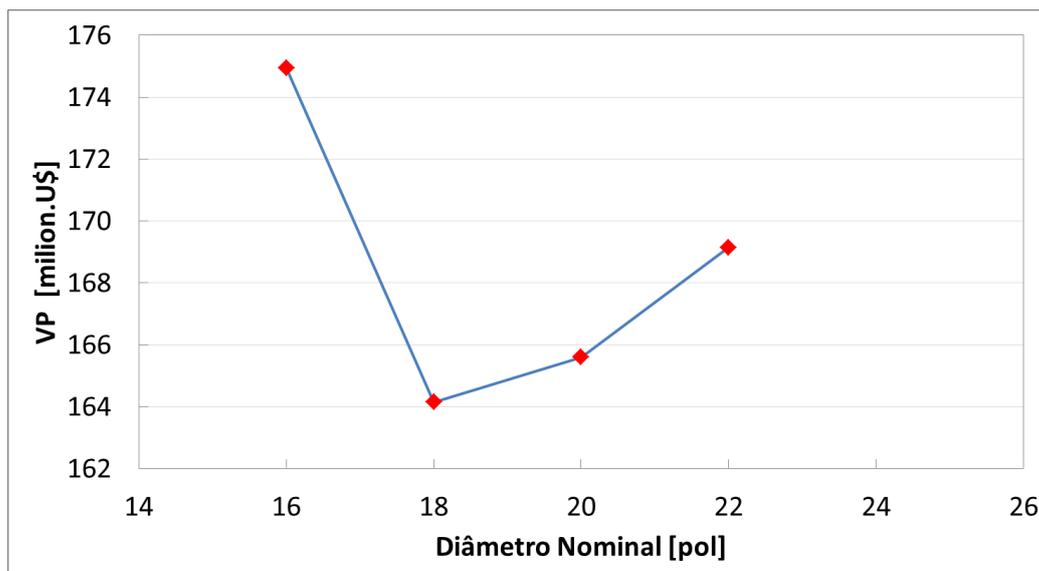


Figura 16 – Diâmetro econômico do caso 3

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – CAPEX e OPEX do Caso 3

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	32,217
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	59,789
CAPEX Instalação Compressores	17,900
Total CAPEX	109,906
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	44,594
OPEX Gas Consumido	9,646
Total OPEX	54,241
VP [milhão.US\$]	164,146

A estimativa de potência hidráulica consumida pela estação de serviço de compressão é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Potência das SCOMP do Caso 3

SCOMP	Potência
SP	3731
Total [HP]	3731

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 17. DP2 ressaltar que a curva de vazão do gráfico apresenta apenas a vazão no gasoduto existente nos trechos onde foram instalados os *loops*.

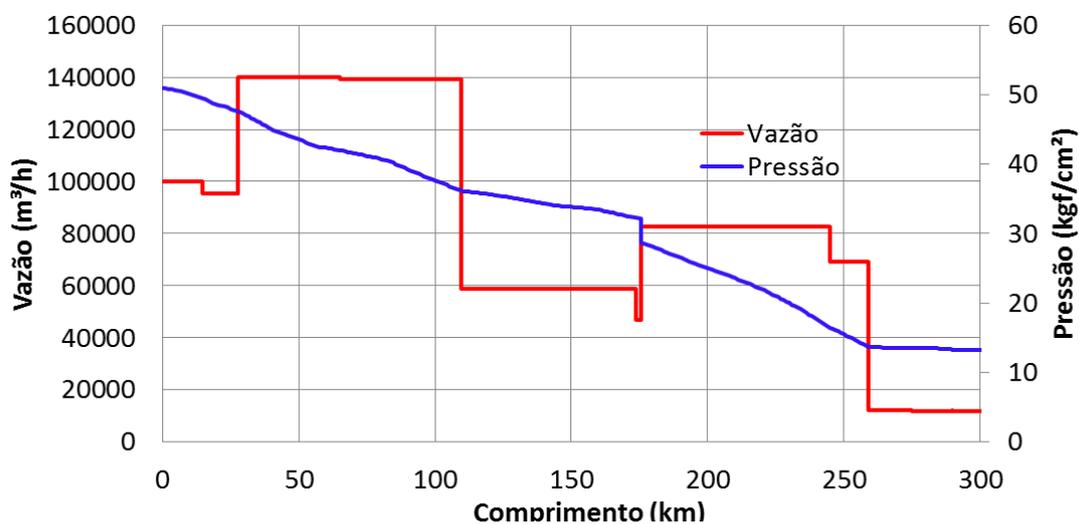


Figura 17 – Distribuição de pressão a vazão do caso 3

4.9.4 Caso 4

Para a avaliação desse caso foram consideradas três estações de serviço de compressão (SCOMP).

Uma SCOMP em SP, após o ponto de recebimento, uma próxima a DP5, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1749, e outra próxima a DP7, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1576.

Caso 4 - 2022

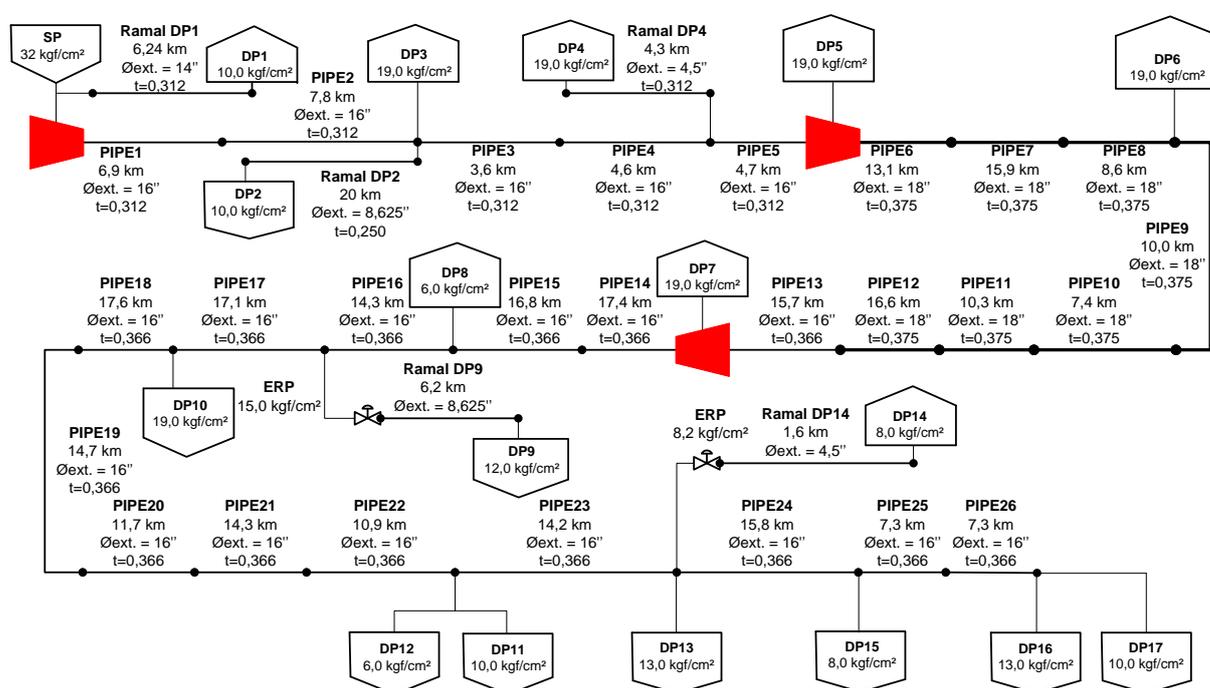


Figura 18 – Fluxograma do caso 4

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 – CAPEX e OPEX do Caso 4

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	0,00

CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	0,000
CAPEX Instalação Compressores	53,700
Total CAPEX	53,700
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	88,437
OPEX Gas Consumido	19,129
Total OPEX	107,566
VP [milhão.US\$]	161,266

A estimativa de potência hidráulica consumida pelas estações de serviço de compressão é apresentada na Tabela 25.

Tabela 25 – Potência das SCOMPs do Caso 4

SCOMP	Potência
SP	3731
DP5	2476
DP7	1192
Total [HP]	7399

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 19.

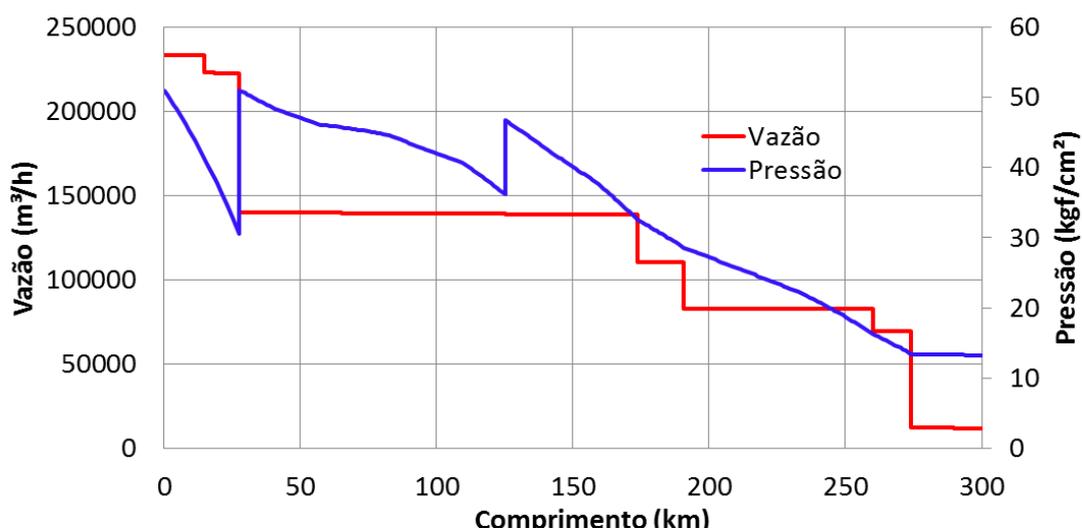


Figura 19 – Distribuição de pressão a vazão do caso 4

4.9.5 Caso 5

Para a avaliação desse caso foram consideradas quatro estações de serviço de compressão (SCOMP).

Uma SCOMP em SP, após o ponto de recebimento, uma próxima a DP2, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1718, uma próxima a DP6, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1802 e outra próxima a DP7, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1576.

A Figura 20 apresenta o fluxograma da solução.

Caso 5 - 2022

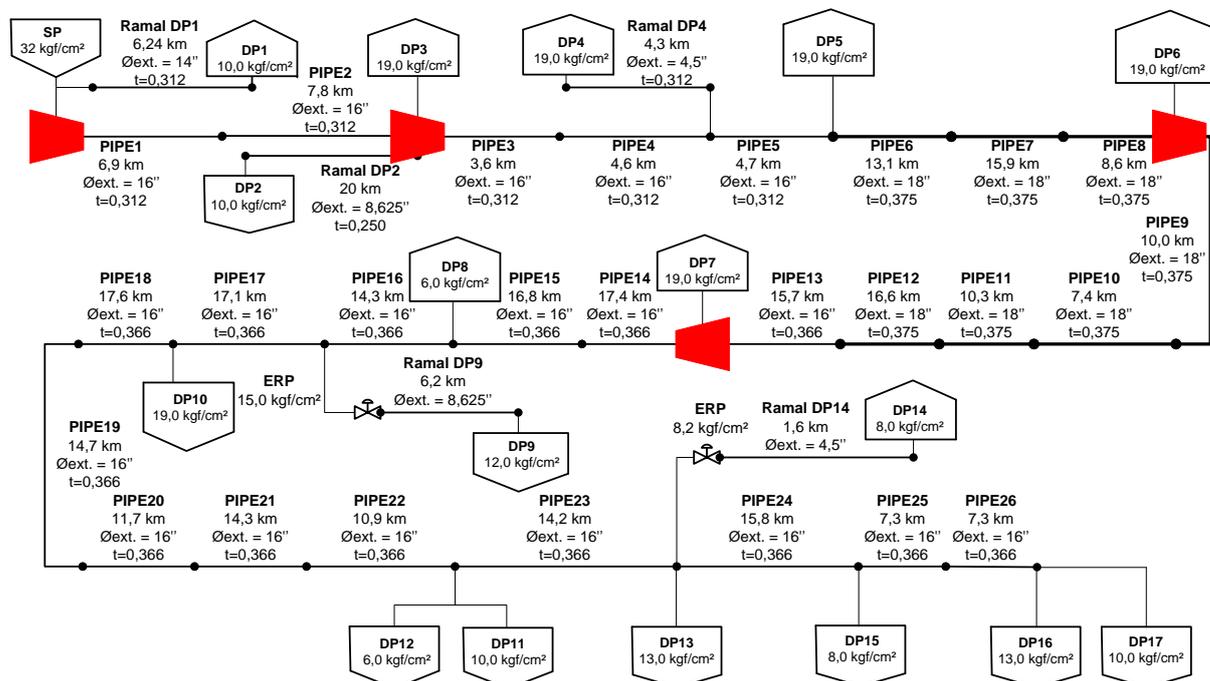


Figura 20 – Fluxograma do caso 5

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 26.

Tabela 26 – CAPEX e OPEX do Caso 5

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	0,000
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	0,000
CAPEX Instalação Compressores	71,600
Total CAPEX	71,600
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	85,061
OPEX Gas Consumido	18,399

Total OPEX	103,460
VP [milhão.US\$]	175,060

A estimativa de potência hidráulica consumida pelas estações de serviço de compressão é apresentada na Tabela 27.

Tabela 27 – Potência das SCOMPs do Caso 5

SCOMP	Potência
SP	3731
DP3	1548
DP6	1147
DP7	690
Total [HP]	7116

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 21.

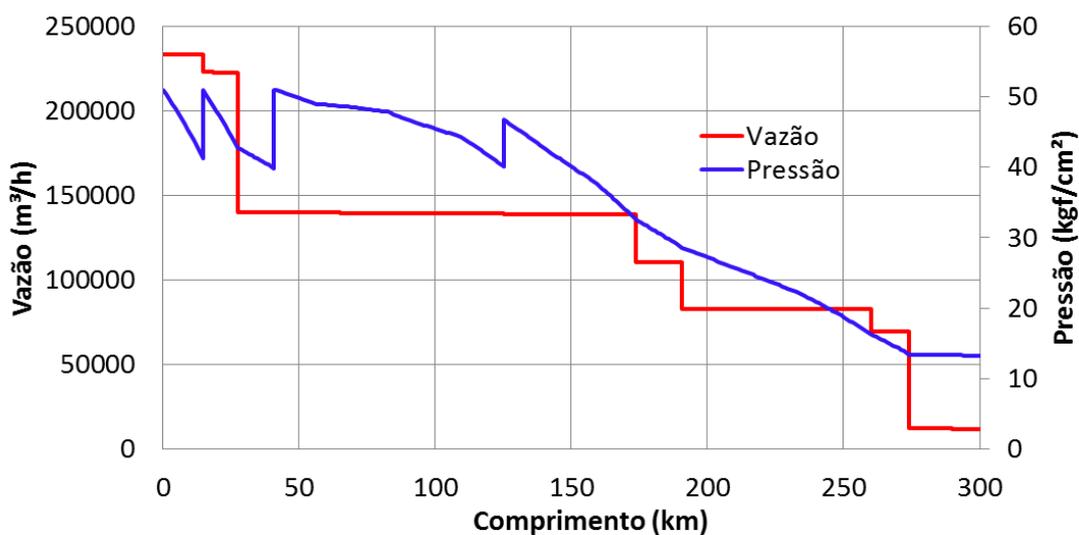


Figura 21 – Distribuição de pressão a vazão do caso 5

4.9.6 Caso 6

Para a avaliação desse caso foram consideradas quatro estações de serviço de compressão (SCOMP).

Uma SCOMP em SP, após o ponto de recebimento, uma próxima a DP2, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1718, uma próxima a DP5, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1749 e outra próxima a DP7, onde no modelo ela foi considerada a jusante da válvula VB-1576.

A Figura 22 apresenta o fluxograma da solução.

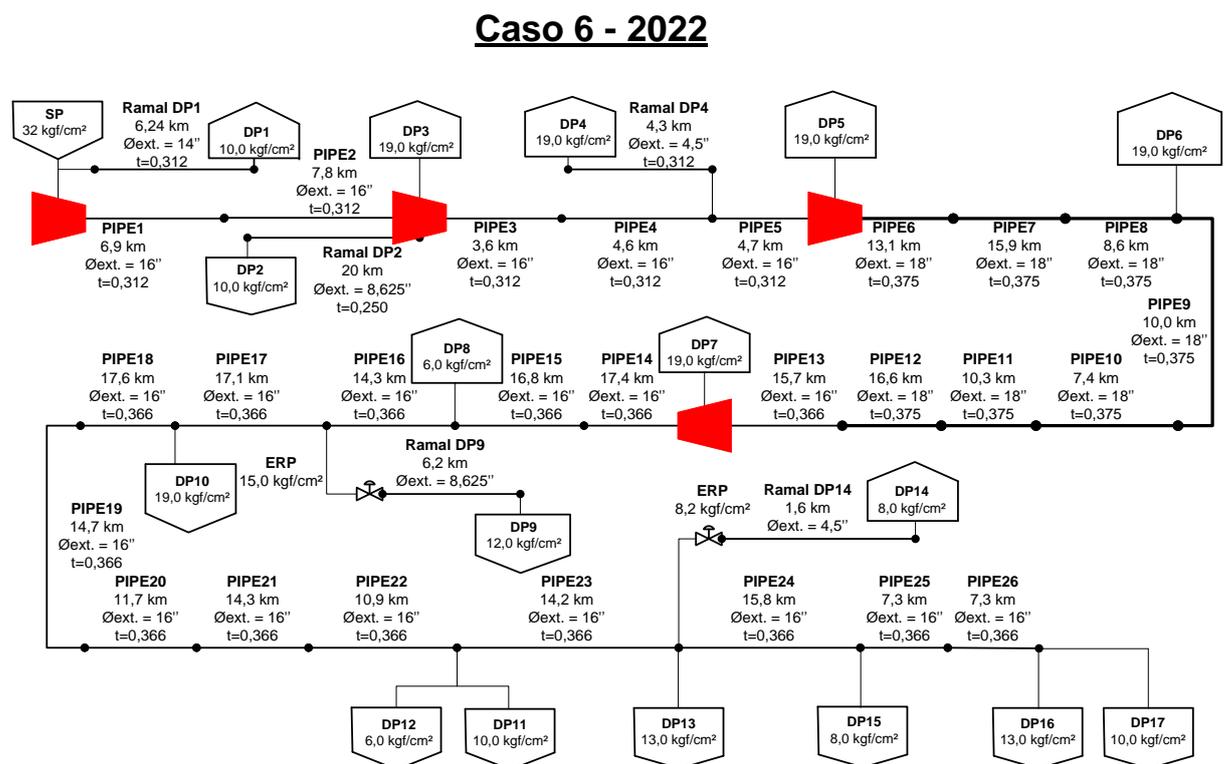


Figura 22 – Fluxograma do caso 6

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 – CAPEX e OPEX do Caso 6

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	0,000
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	0,000
CAPEX Instalação Compressores	71,600
Total CAPEX	71,600
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	87,064
OPEX Gas Consumido	18,832
Total OPEX	105,896
VP [milhão.US\$]	177,496

A estimativa de potência hidráulica consumida pelas estações de serviço de compressão é apresentada na Tabela 29.

Tabela 29 – Potência das SCOMPs do Caso 6

SCOMP	Potência
SP	3731
DP3	1548
DP5	813
DP7	1192
Total [HP]	7284

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 23.

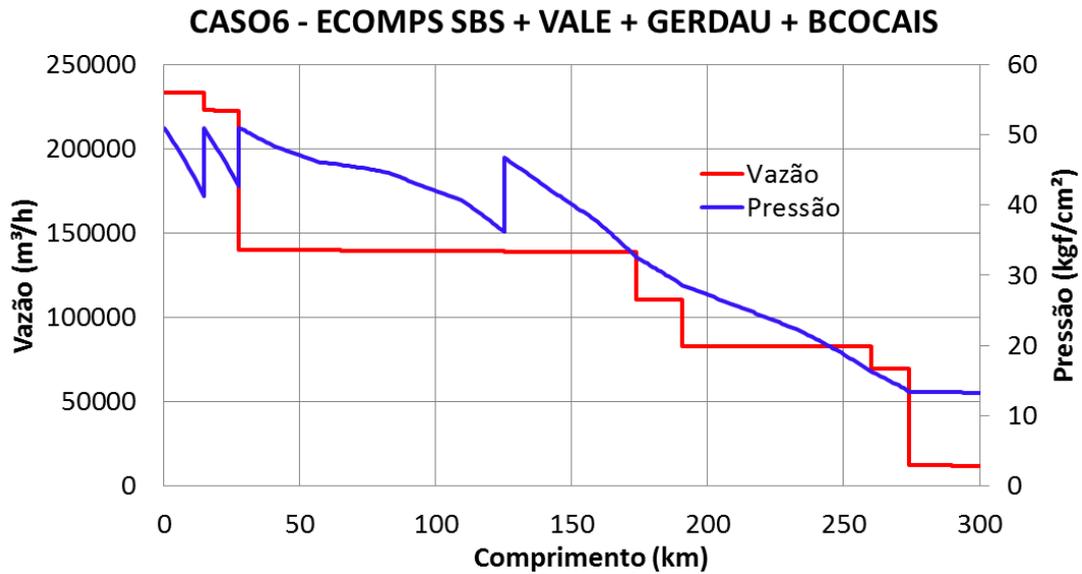


Figura 23 – Distribuição de pressão a vazão do caso 6

4.9.7 Caso 7

Para a avaliação desse caso foi considerado apenas um *loop* com aproximadamente 230,1km partindo de SP com 22” de diâmetro.

A Figura 24 apresenta o fluxograma da solução.

Caso 7 - 2022

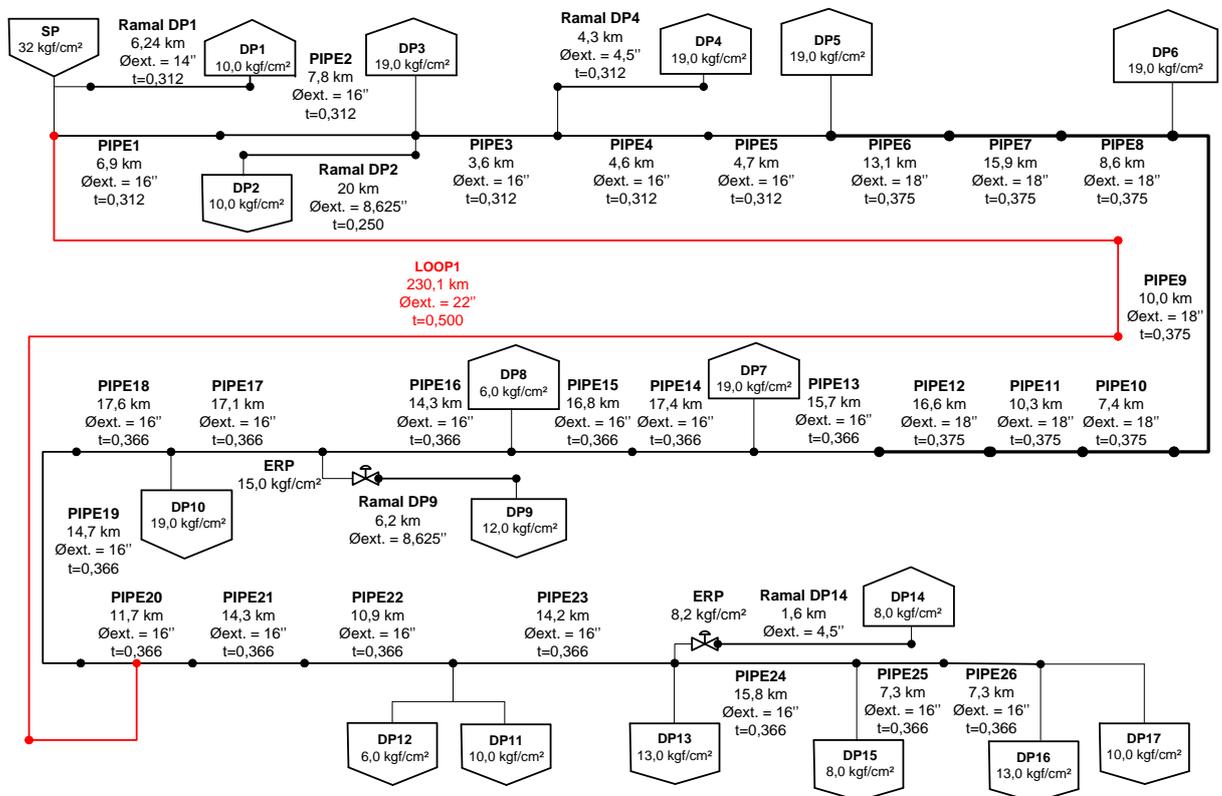


Figura 24 – Fluxograma do caso 7

Foi realizado um estudo para a definição do diâmetro econômico de 22” do *loop*. A Figura 25 apresenta a curva do valor presente do investimento (VP) em função dos diâmetros considerados.

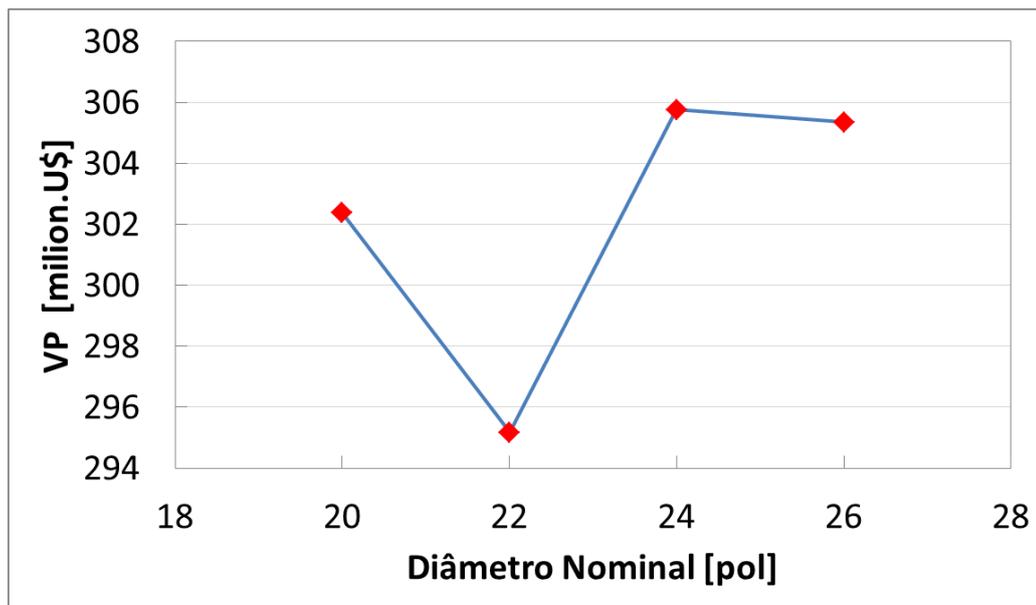


Figura 25 – Diâmetro econômico do caso 7

A estimativa preliminar de CAPEX e OPEX para este caso é apresentada na Tabela 30.

Tabela 30 – CAPEX e OPEX do Caso 7

Investimento	Custo
CAPEX Custo do Aço X46	118,810
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	158,467
CAPEX Instalação Compressores	17,900
Total CAPEX	295,176
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	0
OPEX Gas Consumido	0
Total OPEX	0
VP [milhão.US\$]	295,176

A distribuição de pressão e vazão ao longo do gasoduto para esta solução técnica é apresentada na Figura 26. DP2 ressaltar que a curva de vazão do gráfico apresenta apenas a vazão no gasoduto existente no trecho onde foi instalado o *loop*.

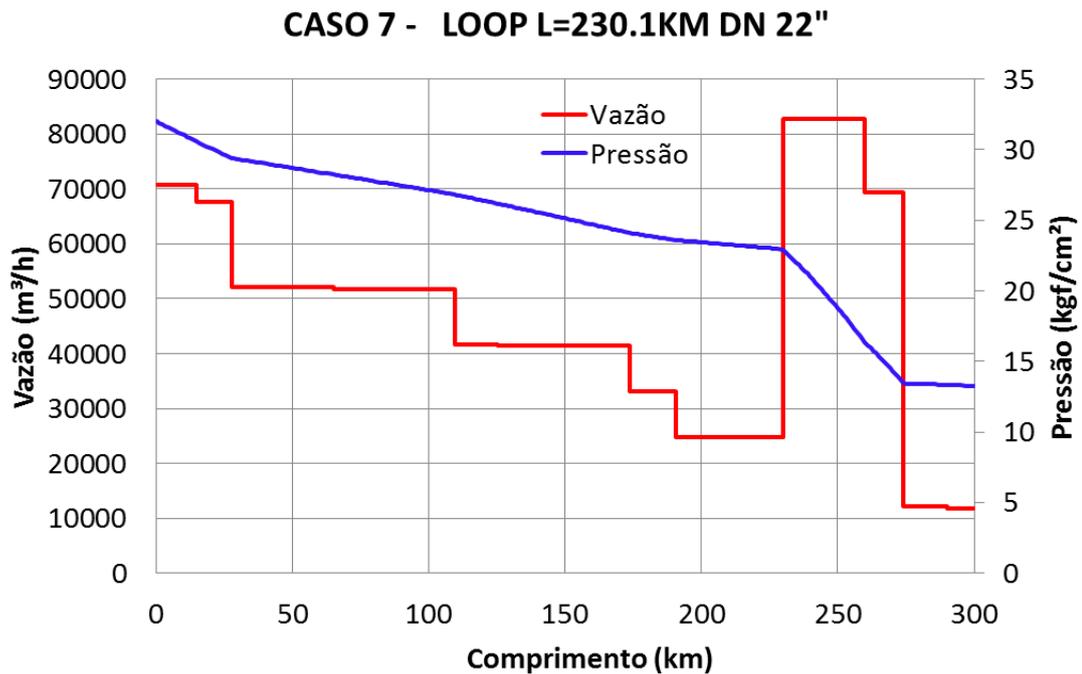


Figura 26 – Distribuição de pressão a vazão do caso 7

4.10 Conclusões das Soluções Preliminares

A Tabela 31 apresenta um resumo das soluções técnicas apresentadas do item anterior, onde os casos 1, 2 e 3 são soluções combinadas de SCOMPs e *Loops*, os casos 4, 5 e 6 são soluções apenas com SCOMPs e o caso 7 apenas *Loop*

Tabela 31 – Resumo das Soluções Técnicas

Caso	SCOMPS	Km Loops (Diâmetros)	Pressão DP16 [kgf/cm²]
1	02 (SP+DP5)	65,6 (Ø16'')	13,2
2	02 (SP+DP7)	27,6 (Ø18'')	13,2
3	01 (SP)	93,9 (Ø18'')	13,0
4	03 (SP+DP5+DP7)	0	13,2
5	04 (SP+DP2+OUOPRETO+DP7)	0	13,2
6	04 (SP+DP2+DP5+DP7)	0	13,2
7	0 (Sem SCOMPS)	230,1 (Ø22'')	13,2

A Tabela 32 e a Figura 27 apresentam um comparativo entre as potências hidráulicas consumidas nas estações de serviço de compressão de cada caso.

Tabela 32 – Resumo das Potências das SCOMPS

SCOMP	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7
SP	3731	3731	3731	3731	3731	3731	-
DP3	-	-	-	-	1548	1548	-
DP5	1102	-	-	2476	-	813	-
OUOPRETO	-	-	-	-	1147	-	-
DP7	-	1980	-	1192	690	1192	-
Potência Total [HP]	4832	5710	3731	7399	7116	7284	0

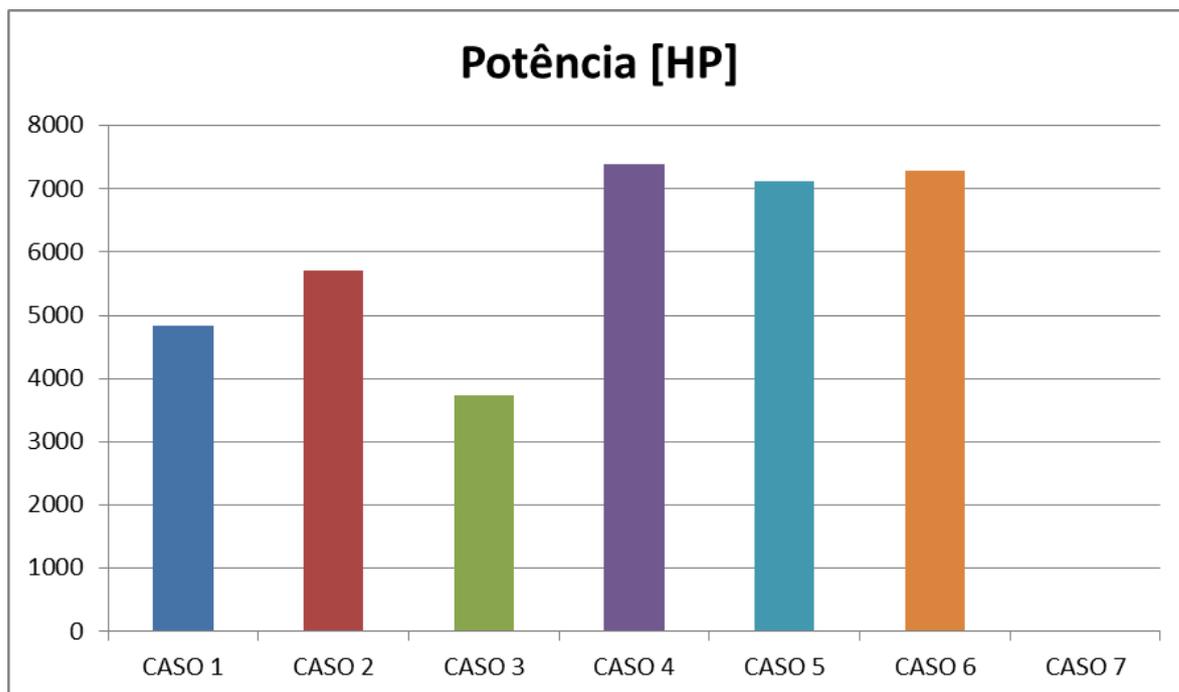


Figura 27 – Resumo das Potências das SCOMPs

A Tabela 33 e a Figura 28 proporcionam uma análise econômica entre os casos, no âmbito de CAPEX e OPEX.

Os cálculos consideraram uma taxa de retorno de 11% a.a., investimento no 1º ano e os itens de OPEX com taxa de reajuste de 5% a.a..

Tabela 33 – Resumo de CAPEX e OPEX

Investimento	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7
CAPEX Custo do Aço	18,029	9,469	32,217	0,000	0,000	0,000	118,810
CAPEX Construção e Montagem do Duto 16pol	40,162	17,574	59,789	0,000	0,000	0,000	158,467
CAPEX Instalação Compressores	35,800	35,800	17,900	53,700	71,600	71,600	17,900

Total CAPEX	93,992	62,843	109,906	53,700	71,600	71,600	295,176
OPEX Aluguel Operação e Manutenção SCOMPs	57,761	68,258	44,594	88,437	85,061	87,064	0
OPEX Gas Consumido	12,493	14,764	9,646	19,129	18,399	18,832	0
Total OPEX	70,254	83,022	54,241	107,566	103,460	105,896	0
VP [milhão.U\$]	164,247	145,866	164,146	161,266	175,060	177,496	295,176

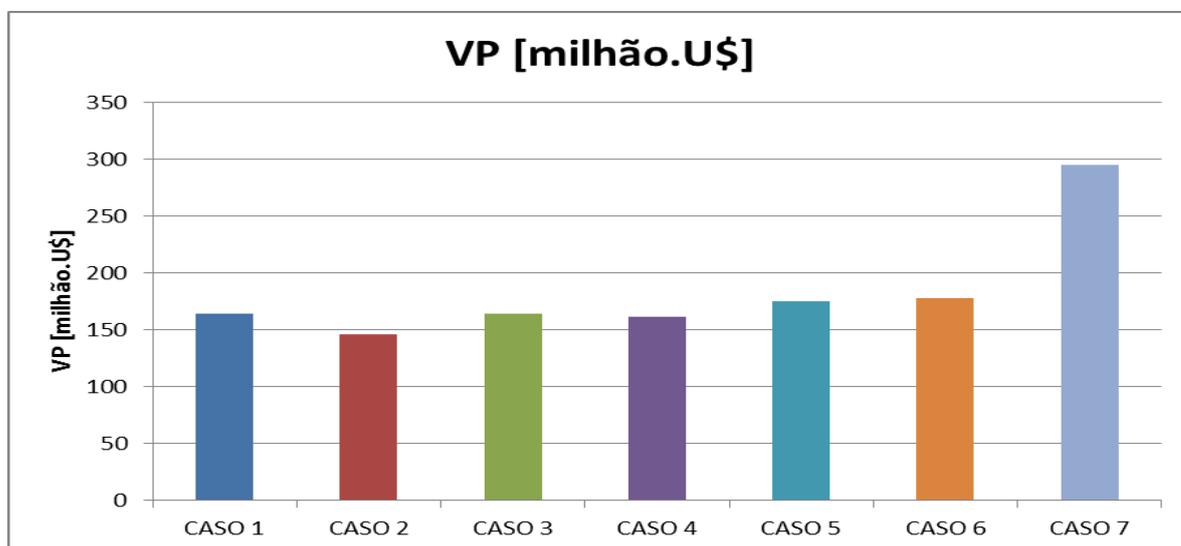


Figura 28 – Resumo de CAPEX e OPEX

Pela análise da Tabela 33 e a Figura 28 constata-se que o Caso 2 é o mais indicado para uma análise mais detalhada, tanto da solução técnica como da parte econômica.

Para este caso é apresentado na Figura 29 o fluxo de caixa considerando as premissas adotadas.

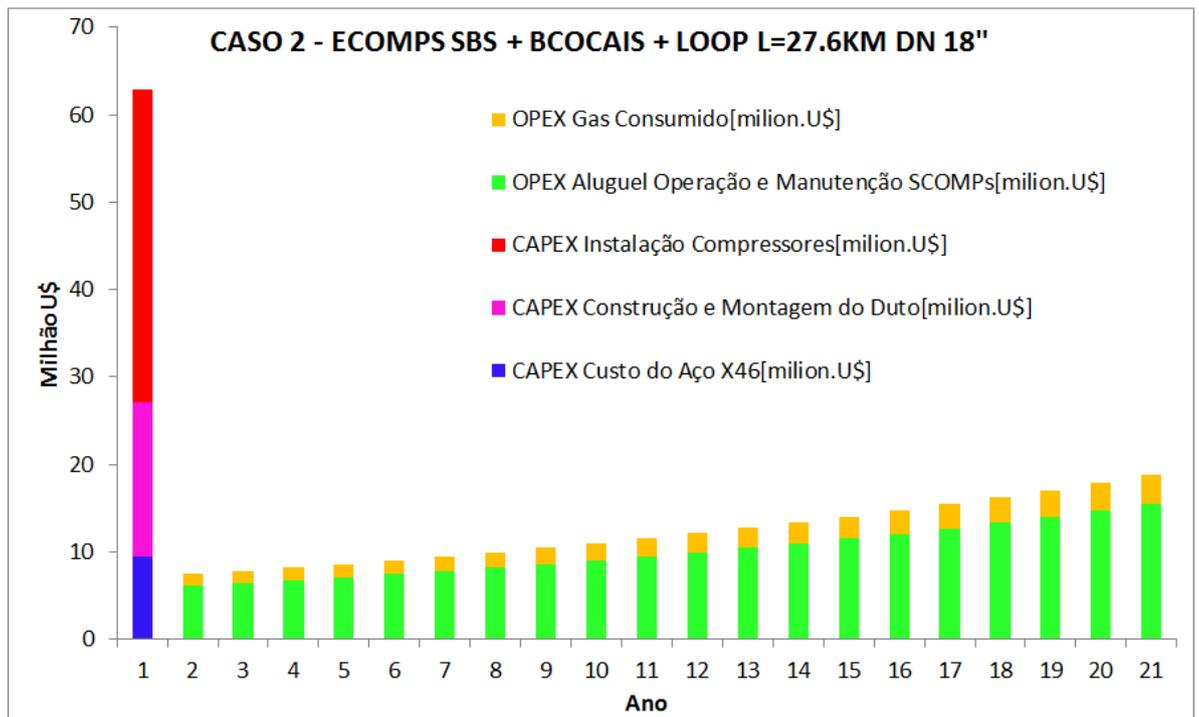


Figura 29 – Fluxo de caixa do Caso 2

5 Avaliação Técnico-Econômica Detalhada

Após o estudo preliminar, os casos vencedores são estudados em detalhes, de modo a obter resultados ainda mais próximos a realidade quanto aos custos envolvidos e, portanto ao valor presente de cada alternativa. Observações estratégicas da empresa podem impactar na definição dos casos a serem detalhados, uma vez que a solução ótima matematicamente nem sempre é a mais adequada.

5.1 Descrição das alternativas analisadas

Após o estudo preliminar detalhado no item 4, a GASMIG solicitou que fosse feito o detalhamento dos Casos 2 e 3, atendendo as pressões mínimas e as demandas de vazão para cada ponto de entrega, conforme Tabela 34.

Tabela 34 – Pressões mínimas e demanda de vazão média com flexibilidade para os pontos de entrega

Ponto de Entrega	Pressão Mínima [kgf/cm ²]	VHM 2015 + 10% [m ³ /h]	VHM 2017 + 10% [m ³ /h]	VHM 2022 + 10% [m ³ /h]
DP1	19	9754	7664	44347
DP2	10	9579	9593	9593
DP3	19	1014	1014	1014
DP4	19	0	21	21
DP5	19	32084	32115	82531
DP6	19	0	1093	1093
DP7	19	0	534	534
DP8	6	69	71	71

DP9	12	15932	28039	28039
DP10	19	0	205	27705
ACESITA	10	8540	13393	13393
DP11	6	76	88	88
DP13	13	44261	55980	56585
DP14	8	503	506	506
PARAISO	8	474	474	474
DP16	10	13640	9369	10327
DP16	13	1412	1412	1412

O Caso 2 adotou uma solução combinando a instalação de duas SCOMPs (sendo uma em SP e a outra a definir) e a construção de trechos de *loop*, distribuídos ao longo do tempo para atender cada uma das três demandas (2015, 2017 e 2022).

O Caso 3 adotou uma solução combinando a instalação de uma SCOMP (em SP) e a construção de trechos de *loop*, distribuídos ao longo do tempo para atender cada uma das três demandas (2015, 2017 e 2022).

5.2 Premissas Técnicas

No procedimento utilizado para o refinamento das soluções técnicas, foram desenvolvidos modelos computacionais do gasoduto ampliado utilizando o programa de simulação *PipelineStudio* da *EnergySolutions*. A escolha da ferramenta foi baseada na larga aplicação desta na indústria e na confiabilidade de seus resultados para simulações termo-hidráulicas de gasodutos.

Além das premissas utilizadas normalmente na análise de escoamento de gás natural em dutos, como escoamento unidimensional, monofásico e newtoniano, as seguintes premissas técnicas foram utilizadas nesta etapa do estudo:

- Gasoduto operando em regime permanente;
- Escoamento isotérmico a 20° C;
- Equação de estado utilizada: Peng-Robinson;
- Equação de cálculo de atrito em gasoduto utilizada: Colebrook;
- Rugosidade interna do duto igual a 0,0004'';
- Condições de referência: 20° C e 1 atm;
- A pressão de projeto do gasoduto está limitada pelos acessórios, cuja classe de pressão é 300# (para a temperatura de operação, equivale a uma pressão máxima de 750 psi ou 52 kgf/cm²);
- A pressão máxima na descarga dos compressores foi considerada, por segurança, 1 kgf/cm² abaixo da pressão de projeto, isso é 51 kgf/cm²;
- Eficiência adiabática (ou do compressor) de 79% e eficiência mecânica (ou do motor) de 33% nas estações de compressão, conforme dados do fabricante,
- Os *loops* para os casos detalhados foram projetados seguindo a ASME 31.8 e a API 5L, considerando:
 - material X70;
 - classe 4 (FET=0,4);

A escolha do material X70 para esta fase do projeto foi uma escolha econômica, tendo em vista a disponibilidade do aço X70 no mercado atual.

As espessuras empregadas estão relacionadas na Tabela 35.

Tabela 35 – Espessuras dos *loops*

Diâmetro do <i>loop</i> [pol]	Espessura [pol]
16	0,219
18	0,25
20	0,281
22	0,312
24	0,312

26	0,344
----	-------

- Composição simplificada do gás natural, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 36 – Características do gás natural

Propriedade	Porcentagem	Massa específica	Poder Calorífico
Dióxido de Carbono	1,18	31,1 kg/m ³	35.0 MJ/m ³
Metano	92,03		
Etano	4,28		
Propano	1,32		
Iso-butano	0,27		
N-butano	0,26		
N-pentano	0,04		
Nitrogênio	0,62		

O diâmetro dos *loops* foi definido pela GASMIG de modo que ainda possibilitasse a criação de um cenário para atendimento das demandas previstas sem a utilização de SCOMPs, por mais que atualmente essa solução não fosse a mais econômica. Os trechos de *loop* possuem diâmetro de 22'' e espessura de 0,500''.

5.3 Premissas Econômicas

Além das premissas anteriormente, foram determinados em conjunto com a GASMIG os seguintes valores:

- Conversão R\$/US\$ 2,00;

- Taxa de crescimento anual para valores de CAPEX e gás consumido de 2,8%;
- Taxa de desconto de 11%;
- Os fluxos de despesas não consideram inflação;

Os itens 5.5 e 5.6 apresentam os valores utilizados para os cálculos de CAPEX e OPEX. Os valores informados correspondem à valores de 2012, são ajustados para ao ano de desembolso. Os itens de OPEX são informados em valores anuais.

5.4 Valor presente do projeto

Para cada caso do estudo detalhado foi apresentado o valor presente do projeto, calculado através de um fluxo de caixa simplificado, formado por uma série de pagamentos com uma taxa de juros J . O cálculo do valor presente é feito da mesma maneira que para as soluções preliminares.

O valor presente parcial (VPP) é calculado para cada um dos valores futuros (VF) de CAPEX e OPEX no período i de acordo com a expressão:

$$VPP_{CAPEX}(k) = \sum_i^{np} \frac{VF_{CAPEX}(i, k)}{(1+J)^i} \quad (33)$$

$$VPP_{OPEX}(m) = \sum_i^{np} \frac{VF_{OPEX}(i, m)}{(1+J)^i} \quad (34)$$

Onde np representa o número total de períodos do fluxo de caixa, k representa o item de custo de CAPEX, m representa o item de OPEX

O valor presente total do investimento (**VP**) é o somatório de todos os valores presentes parciais de CAPEX e OPEX do projeto.

$$VP = \sum_k VPP_{CAPEX}(k) + \sum_m VPP_{OPEX}(m) \quad (35)$$

No fluxo de caixa os custos de OPEX podem aumentar em função de uma taxa fixa anual de crescimento **G**, ou em função de uma taxa fixa anual específica para aquele item, caso especificado neste relatório. O Valor Futuro (**VF**) para os custos de OPEX no período **i** para um certo investimento com período inicial de operação **s** é obtido através da expressão:

$$VF_{OPEX}(i, m) = VF_{OPEX}(s, m) \cdot (1 + G)^{i-s}, i > s \quad (36)$$

Os valores de CAPEX são calculados com base em valores atuais, e devem ser corrigidos para o ano do investimento, através da taxa fixa anual de crescimento **G**. O Valor Futuro (**VF**) para os custos de CAPEX no ano **i** para um certo investimento calculado para os valores do ano **a** é obtido através da expressão:

$$VF_{CAPEX}(k) = VF_{CAPEX}(k) \cdot (1 + G)^{i-a}, i > a \quad (37)$$

5.5 Cálculo do CAPEX detalhado

5.5.1 Desapropriação e Liberação da Faixa

Para a desapropriação e liberação da faixa foi considerado custo 0, pois entende-se que a faixa utilizada será a mesma do duto já construído.

5.5.2 Materiais do duto

A GASMIG informou que o aço utilizado deveria ser o SAW X70. De acordo com a experiência do SIMDUT em projetos anteriores e utilizando a taxa de reajuste mencionada no item 5.5, o valor do aço SAW X46 utilizado no estudo é de US\$ 3.015,00/ton. O valor do aço X70 foi estimado a partir deste resultando em US\$ 3.618 US\$/ton.

5.5.3 Montagem do duto

Através orçamento passado pela GASMIG para duto de 16'' já construído e utilizando a taxa de crescimento de acordo com o item 5.5, calculou-se o valor para construção e montagem de um duto de 22'': 688.686,00 US\$/km.

Considera-se que para o *loop* estar operacional sua construção deve se iniciar dois anos antes.

5.5.4 Revestimento Anticorrosivo

O custo unitário do revestimento anticorrosivo externo padrão é estimado em 7,72US\$/m², considerando-se material e aplicação.

5.5.5 Revestimento Interno

O duto terá revestimento interno e seu custo unitário foi estimado igualmente ao revestimento anticorrosivo: 7,72US\$/m², considerando-se material e aplicação.

5.5.6 Proteção Catódica

O custo da instalação do sistema de proteção catódica do duto (instalação de leitos de anodos e retificadores) é estimado em 882,00US\$/km de duto.

5.5.7 Trechos Especiais

Para cada caso foram considerados diferentes comprimentos de trechos especiais. Este levantamento foi feito através do Google Earth. A Tabela 37 apresenta os multiplicadores do custo base de montagem apresentado no item 5.5.3.

Tabela 37 - Trechos Especiais do duto

Trecho Especial		Multiplicador
Cruzamento de Estradas Rurais		1,1
Cruzamento de Rodovias Federais		3
Cruzamento de Vias Espressas Estaduais		2
Cruzamento de Ferrovias		3
Trechos Urbanos com Densidade Populacional:	Baixa	1,3
	Média	1,6
	Alta	2
	Muito Alta	5
Trechos com inclinação acentuada, em graus:	10 a 20	3
	20 a 30	5
	30 a 40	7
	> 40	10
Trecho com presença de rochas:		1,5
Travessia de Riachos ou Córregos		3
Travessia de Rios		10
Charcos e Pântanos		15
Parques e Reservas Florestais		15
Furos Direcionais		100 US\$/pol/m

5.5.8 Estações de Compressão

Os custos de cada SCOMP foram divididos em duas partes. A primeira com um valor de US\$ 2.900.000,00, referente ao custo do terreno, terraplenagem, interligação na rede existente etc. A segunda parte corresponde a mobilização e instalação dos equipamentos. Os custos de instalação e mobilização de máquinas adicionais para estações a serem ampliadas com novas máquinas iguais às primeiras são calculados de maneira diretamente proporcional ao custo por máquina do primeiro orçamento.

Os valores utilizados e suas respectivas referências são mostrados a seguir:

- Custo de instalação e mobilização dos equipamentos para a SCOMP de SP: US\$ 14.000.000,00.
- Custo de instalação e mobilização dos equipamentos para a SCOMP intermediária US\$ 7.000.000,00.
- Custo de instalação e mobilização de uma máquina adicional para a SCOMP de SP: US\$ 4.666.667,00. Calculado a partir de informações fornecidas.

Considera-se que para uma SCOMP estar operacional em um determinado ano, sua instalação deve se iniciar no ano anterior.

5.5.9 Comunicação e SCADA

O custo da instalação do sistema de comunicações e do SCADA foi estimado em 7720,00US\$/km de duto. O custo referente às SCOMPs foi estimado em 0,2% do custo de instalação da SCOMP.

5.5.10 Comissionamento

O custo do comissionamento do duto foi estimado em 3310,00US\$/km.

5.5.11 Projeto

O custo do projeto foi estimado em 3% da soma dos itens 5.5.1 a 5.5.9.

5.5.12 Licenciamento e Gerenciamento Ambiental

O custo do licenciamento e gerenciamento ambiental do duto foi estimado como sendo 2% da soma dos itens 5.5.1 a 5.5.9.

5.5.13 Gerência e Supervisão

O custo de gerência e supervisão do empreendimento foi estimado como sendo 8% da soma dos itens 5.5.1 a 5.5.11.

5.5.14 Custos Eventuais

A previsão para eventualidades físicas e de preço foi estimado como 10% da soma dos itens 5.5.1 a 5.5.12.

5.5.15 Inventário de Produto Imobilizado

Através de simulações com o Pipeline Studio foi calculado o volume de inventário imobilizado em cada caso e esses valores multiplicados pelo preço de custo do gás fornecido pela GASMIG, igual a US\$ 0,35/m.

5.6 Cálculo do OPEX

5.6.1 Custo do Gás Consumido

O custo do gás consumido pelas SCOMPS foi determinado pela GASMIG em US\$ 0,35/m³.

5.6.2 Custo Fixo de O&M do duto

O custo fixo de O&M do duto foi estimado em 3 % do investimento no duto ao ano. Foi utilizada a taxa de crescimento desse custo igual a 2% ao ano para levar em conta o envelhecimento das instalações.

5.6.3 Custo Fixo de O&M das SCOMPs

Os custos fixos anuais para operação e manutenção das SCOMPs são obtidos através de orçamentos com empresas especializadas. Os valores e as referências utilizados são mostrados a seguir:

- Custo anual de O & M da SCOMP SP: US\$ 1.560.000,00.

- Custo anual de O & M da SCOMP intermediária US\$ 1.044.000,00.;

Foi utilizada uma taxa de crescimento desse custo igual a 5%, estimada com base no IGPM.

5.6.4 Custo de Aluguel das SCOMPs

Os custos fixos anuais para aluguel das SCOMPs são obtidos através de orçamentos com empresas especializadas. Os valores e as referências utilizados são mostrados a seguir:

- Custo anual de aluguel da SCOMP SP: US\$ 2.040.000,00;
- Custo anual de aluguel da SCOMP SP com uma máquina a mais: US\$ 2.720.000,00. Calculado baseado nas informações fornecidas;
- Custo anual de aluguel da SCOMP intermediária US\$ 1.920.000,00.;

Foi utilizada uma taxa de crescimento desse custo igual a 5%, estimada com base no IGPM.

5.6.5 Custo Fixo de Manutenção das Comunicações e SCADA

O custo fixo de manutenção dos sistemas de Comunicações e SCADA do duto foi estimado em 5% do investimento nesses sistemas ao ano. A taxa de crescimento utilizada foi de 4% ao ano.

5.6.6 Custo Fixo de Inspeção Interna por Pig Instrumentado

O custo anualizado dessa inspeção foi estimado em 132,00US\$/km. A taxa de crescimento desse valor foi de 2,5% ao ano.

5.6.7 Custo Fixo de Inspeção Geotécnica e Conservação da Faixa

O custo desse item foi estimado em 1100,00US\$/km ao ano. Utilizou-se 2% ao ano para a taxa de crescimento desse custo.

5.7 Metodologia

5.7.1 Técnica

Após definição da GASMIG, optando pelo estudo detalhado dos casos 2 e 3, cujas soluções preliminares para 2022 estão definidas no item 4, realizou-se um refinamento dos modelos de simulação atribuídos a cada caso e cenário específico. Neste refinamento, para obtenção da solução técnica, consideraram-se variações nos seguintes parâmetros:

- Posição da segunda SCOMP;
- Pressão na descarga das SCOMPs;
- Posição e comprimento dos trechos de *loop* (o diâmetro foi fixado em 22", conforme determinação da GASMIG);

As soluções foram obtidas de modo a atender as pressões mínimas e as demandas de vazão para cada ponto de entrega, visando minimizar a potência total de compressão e o menor comprimento de *loop* possível.

5.7.2 Econômica

Com base nas premissas e nas informações apresentadas nos itens 5.3, 5.5, 5.6, foram estudados em detalhes os casos selecionados.

5.8 Resultados

Após avaliação das simulações de cada um dos casos preliminares, e por solicitação da GASMIG, definiu-se que os Casos 2 e 3 seriam analisados em duas situações distintas em 2017. Na primeira, chamada de caso *a*, considera-se a construção do primeiro *loop* e conseqüentemente uma pressão de descarga em SP. No caso *b*, considera-se que o *loop* não está construído, necessitando de uma pressão mais elevada em SP. A Tabela 38 resume essas soluções.

Tabela 38 – Soluções estudadas

Cenários	Casos	
	2	3
2015	SCOMP SP	
2017a	SCOMP SP + <i>Loop 22''</i> no primeiro trecho	
2017b	SCOMP SP (sem <i>loop</i>)	
2022	SCOMP SP + <i>Loop 22''</i> + segunda SCOMP próximo a DP6	SCOMP SP + primeiro trecho de <i>Loop 22''</i> +segundo trecho <i>Loop 22''</i>

OBS.: DP2 observar que para os períodos de 2015 e 2017, os casos 2 e 3 são idênticos.

Os fluxogramas de cada uma das soluções estudadas são apresentados da Figura 30 até a Figura 34.

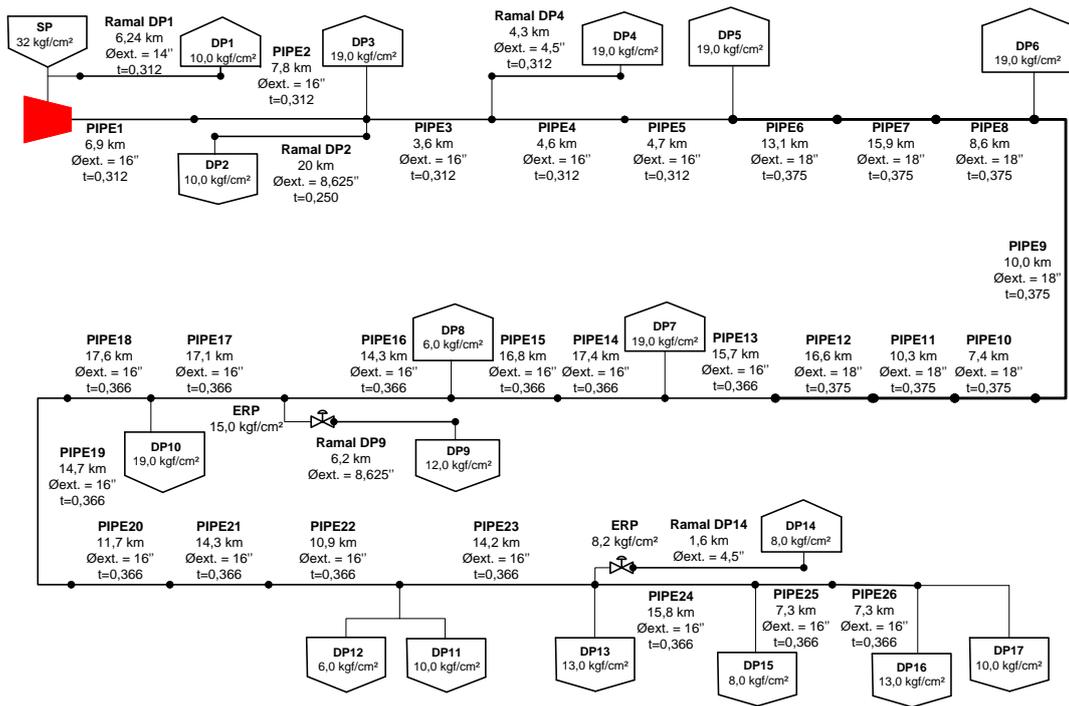


Figura 30 – Fluxograma do Cenário 2015 - Caso 2 e 3

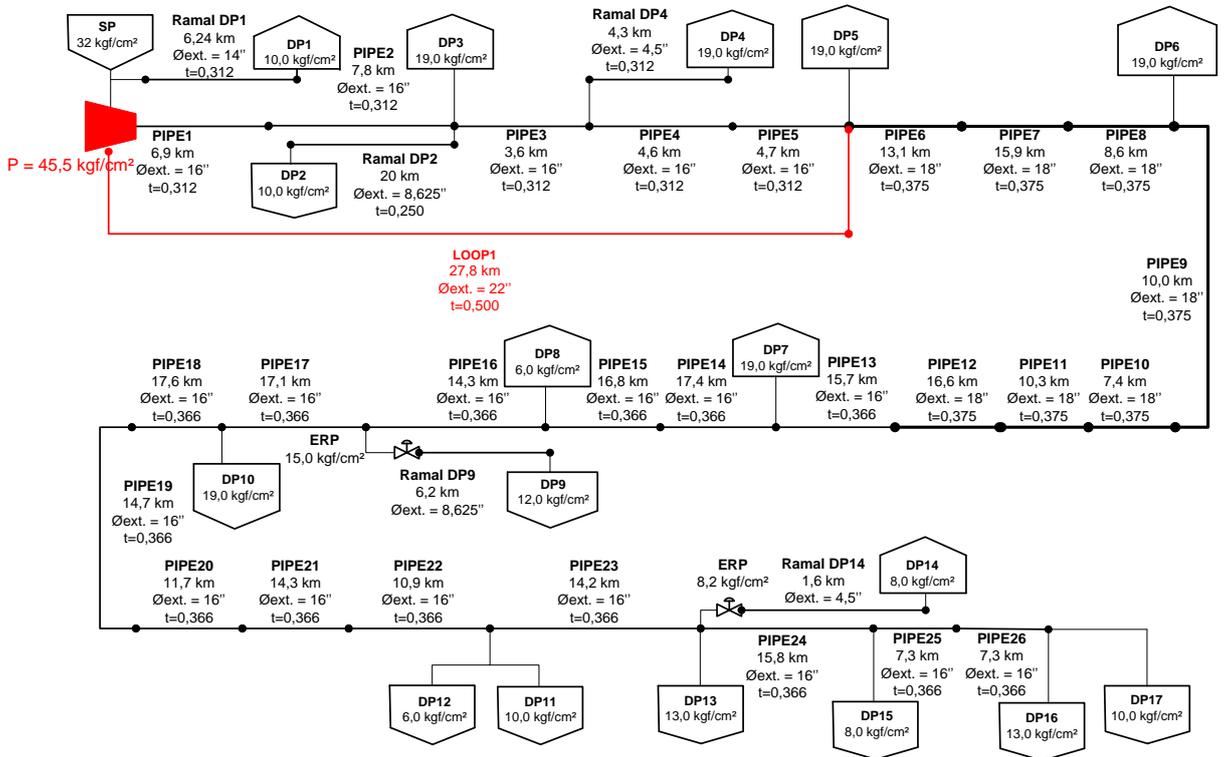


Figura 31 – Fluxograma do Cenário 2017a - Caso 2 e 3

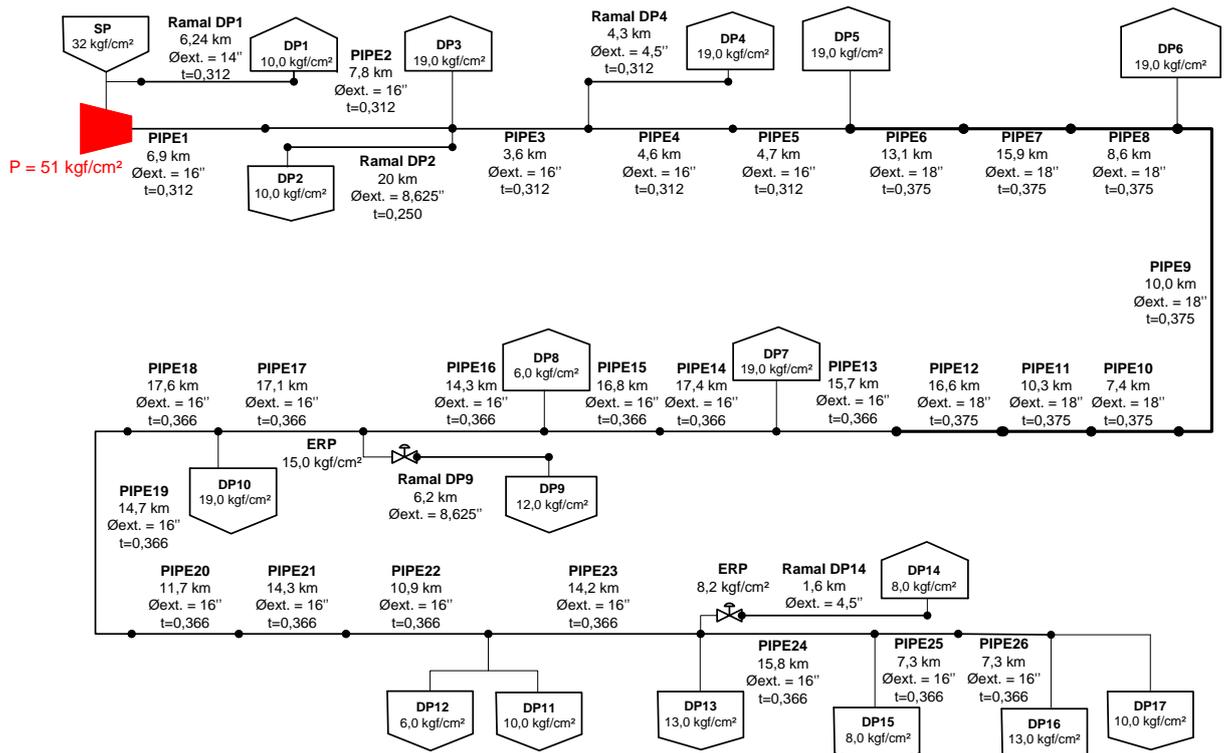


Figura 32 – Fluxograma do Cenário 2017b - Caso 2 e 3

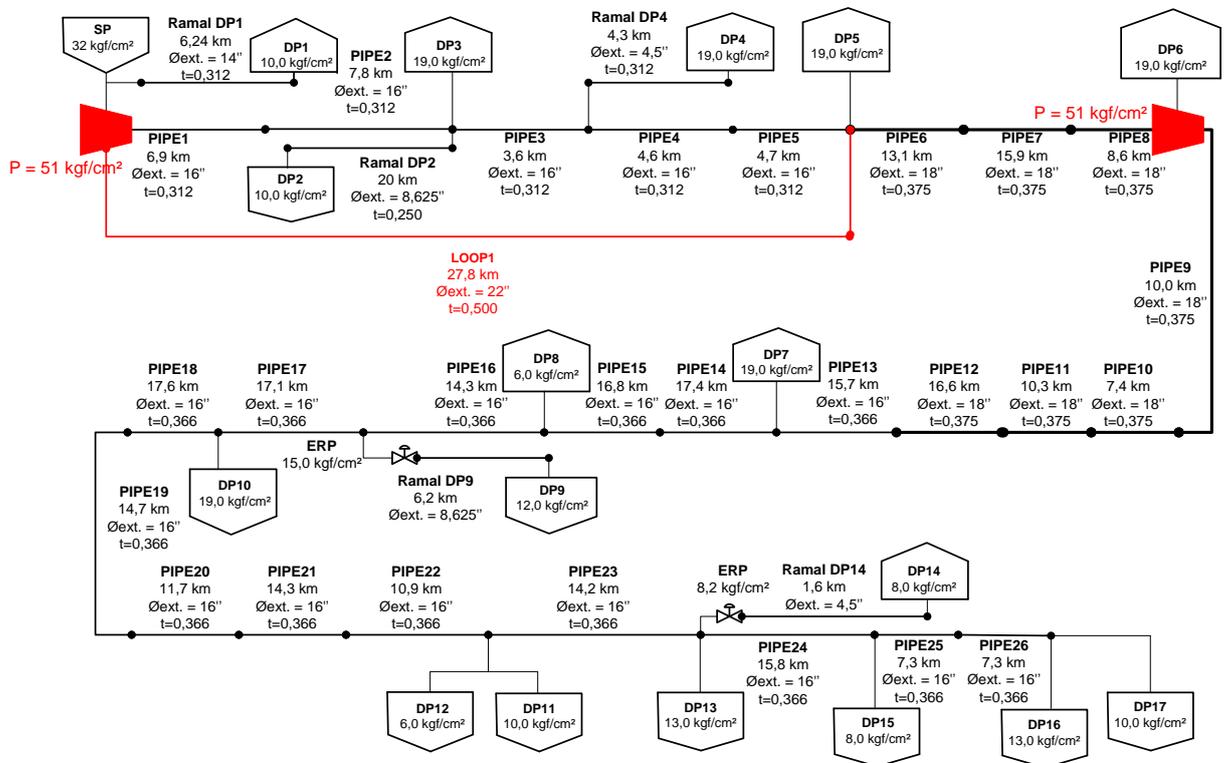


Figura 33 – Fluxograma do Cenário 2022 - Caso 2

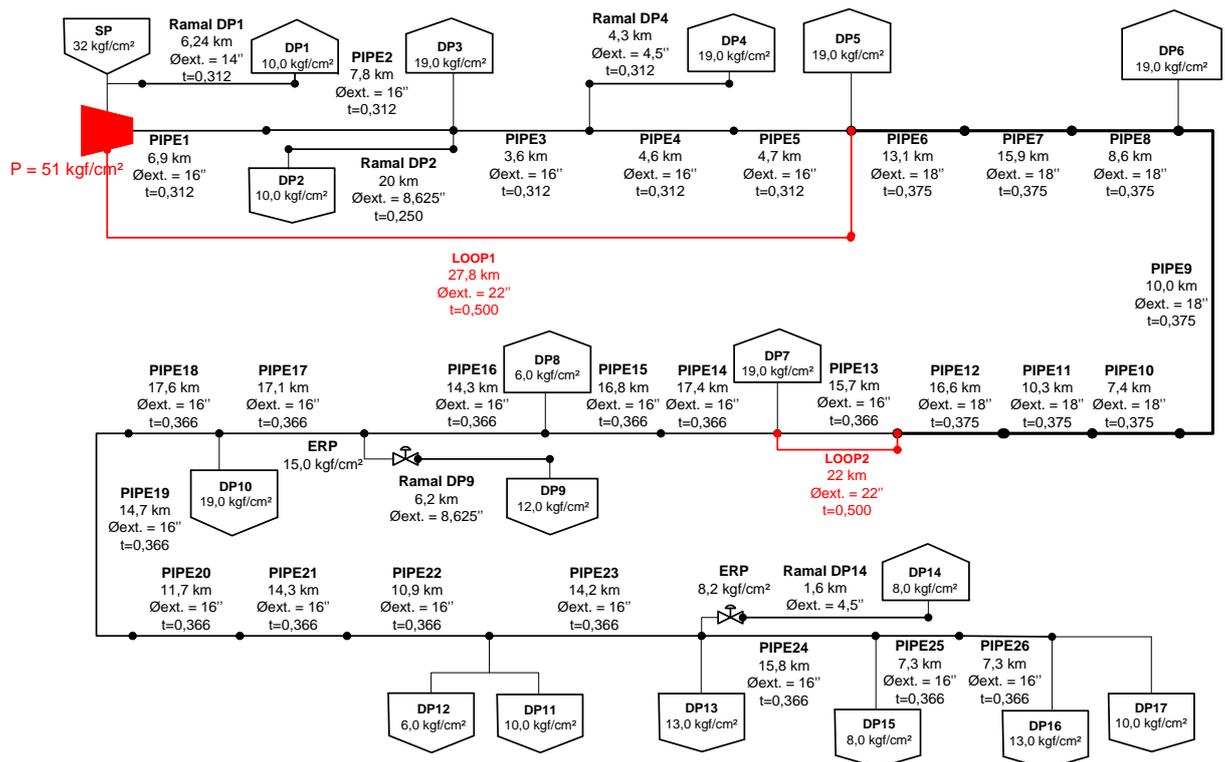


Figura 34 – Fluxograma do Cenário 2022 - Caso 3

5.8.1 Caso 2 a:

- **2015**

– Instalação de uma SCOMP em SP:

- três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 42,0 kgf/cm²;
- Vazão = 127584 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 4055 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 183,1 m³/h.

A Figura 35 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2a no ano de 2015.

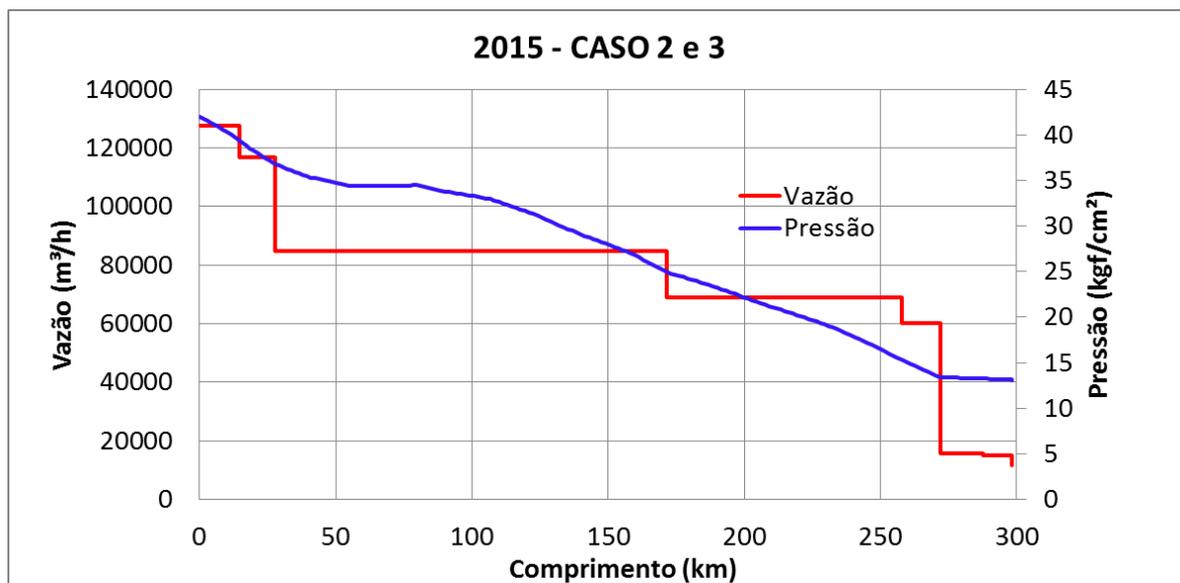


Figura 35 - Gradiente de Pressão e Vazão para 2015 – Casos 2 e 3

A Figura 36 apresenta os valores de CAPEX do Caso 2a para o ano de 2015.

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comum SCADA	
0	2 900 000	14 000 000	0	0	0	0	33 800	
0.0%	13.7%	66.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	
Custos Percentuais					Inventário	CUSTO TOTAL		
Projeto	Licenc. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
508 014	338 676	1 422 439	1 920 293	80 404				
2.4%	1.6%	6.7%	9.1%	0.4%	\$ 21 203 626.57			

Figura 36 – CAPEX para 2015 Caso 2a

- **2017**

– Aumento da compressão da SCOMP em SP construída em 2015:

- três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 45,5 kgf/cm²;
- Vazão = 153907 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 6579 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 255,5 m³/h.

- Instalação de um trecho de *loop* de 22'' e comprimento de 27,8 km, contabilizados a partir de SP.

Foram considerados trechos especiais (item 5.5.7) como mostrado na Tabela

39

Tabela 39 – Trechos Especiais para 2017 – Caso 2 a

Trechos Especiais		Comprimento (m)
Cruzamento de Estradas Rurais		500
Cruzamento de Rodovias Federais		150
Cruzamento de Vias Expressas Estaduais		200
Cruzamento de Ferrovias		130
Trechos Urbanos com Densidade Populacional:	Baixa	0
	Média	0
	Alta	1500
	Muito Alta	0
Trechos com inclinação acentuada, em graus:	10 a 20	0
	20 a 30	0
	30 a 40	0

Trechos Especiais	Comprimento (m)
> 40	0
Trecho com presença de rochas:	0
Travessia de Riachos ou Córregos	0
Travessia de Rios	0
Charcos e Pântanos	0
Parques e Reservas Florestais	0
Furos Direcionais	0

A Figura 37 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2a no ano de 2017.

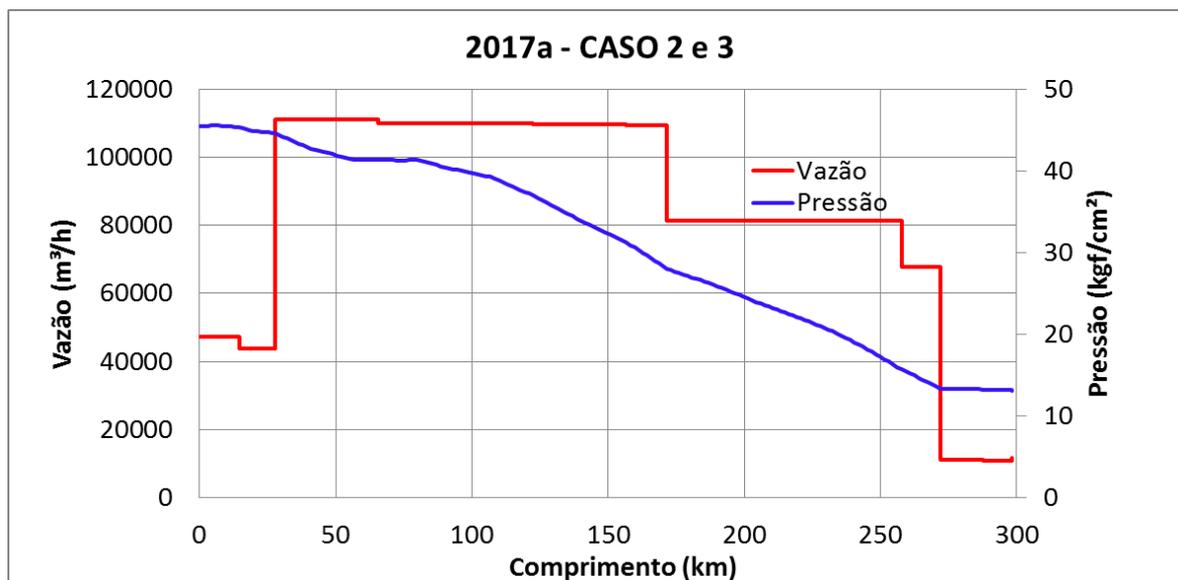


Figura 37 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2017a – Casos 2a e 3a

A Figura 38 apresenta os valores de CAPEX do Caso 2a para o ano de 2017.

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	10 842 447	542 122	20 736 335	376 763	366 077	24 520	214 616	92 018
0.0%	26.1%	1.3%	49.9%	0.9%	0.9%	0.1%	0.5%	0.2%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comum SCADA	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Custos Percentuais					Inventário	CUSTO TOTAL		
Projeto	Licens. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
995 847	663 898	2 788 371	3 764 301	178 500	\$ 41 585 816.11			
2.4%	1.6%	6.7%	9.1%	0.4%				

Figura 38 – CAPEX para 2017, Caso 2a

- **2022**

Para esse ano é necessária a ampliação da SCOMP de SP com a instalação de um compressor extra.

– Ampliação da SCOMP em SP construída em 2015:

- quatro moto-compressores, sendo três em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 51,0 kgf/cm²;
- Vazão = 233386 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 13714 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 495,3 m³/h.

Para a instalação desse compressor extra, foi considerado um custo extra de mobilização de equipamento (item 5.5.8) de US\$ 4.666.667, que corresponde a um terço no valor utilizado em 2015.

O custo de aluguel (item 5.6.4) passa a ser de US\$ 2.720.000 anual, que corresponde a quatro terços do valor considerado em 2015.

Além disso, para esse caso é necessária a instalação de uma segunda SCOMP. A localização ótima do ponto de vista técnico-econômica é próxima a VB-1823, cerca de 65,4km a partir de SP.

- Instalação de uma SCOMP em DP6:
 - dois moto-compressores, sendo um em operação e um reserva;
 - Pressão na sucção = 45,0 kgf/cm²;
 - Pressão na descarga = 49,0 kgf/cm²;
 - Vazão = 139134 m³/h;
 - Potência na SCOMP DP6 = 1374 HP;
 - Vazão de gás consumido na SCOMP DP6 = 77,4 m³/h.

Para essa SCOMP foi orçado um custo de mobilização de equipamento (item 5.5.8) de US\$ 7.000.000, operação e manutenção (item 5.6.3) de US\$ 1.044.000 anual e aluguel (item 5.6.4) de US\$ 1.920.000 anual.

A Figura 39 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2a no ano de 2022.

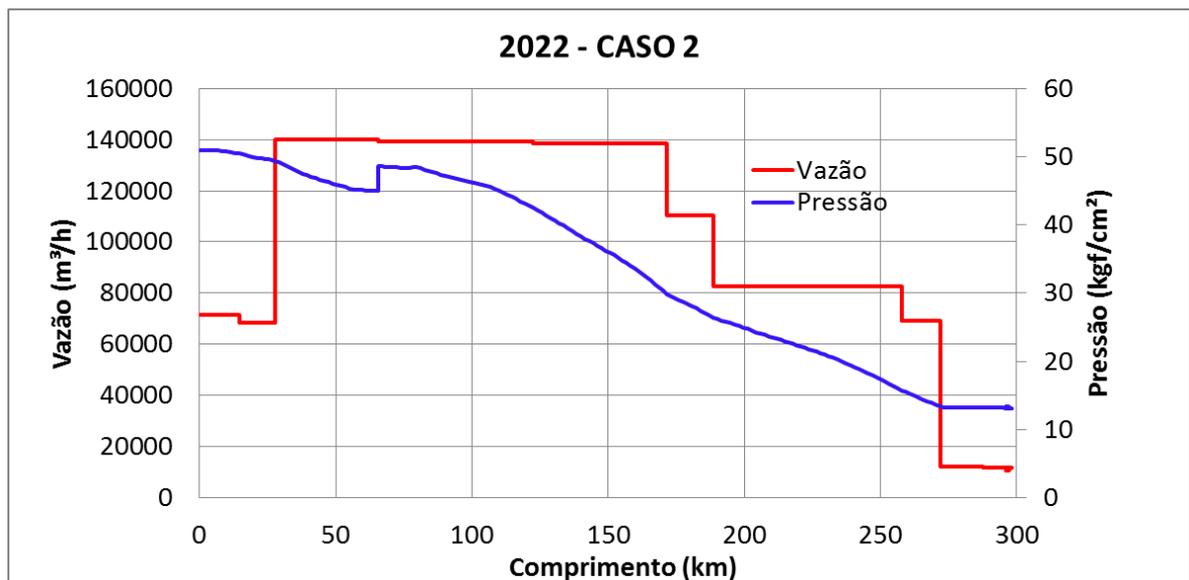


Figura 39 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2022 – Caso 2

A Figura 40 apresenta os valores de CAPEX do caso 2 para o ano de 2012, situação “a”.

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comun. e SCADA	
0	2 900 000	4 666 667	7 000 000	0	0	0	29 133	
0.0%	15.9%	25.5%	38.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	
Custos Percentuais					Inventário			
Projeto	Licens. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado	CUSTO TOTAL			
437 874	291 916	1 226 047	1 655 164	73 500	\$ 18 280 300.92			
2.4%	1.6%	6.7%	9.1%	0.4%				

Figura 40 – CAPEX para 2022, Caso 2a

Utilizando 20 anos a partir de 2022, foi calculado o valor presente apresentado na Tabela 42. O fluxo de despesas para esse caso está apresentado na Figura 41.

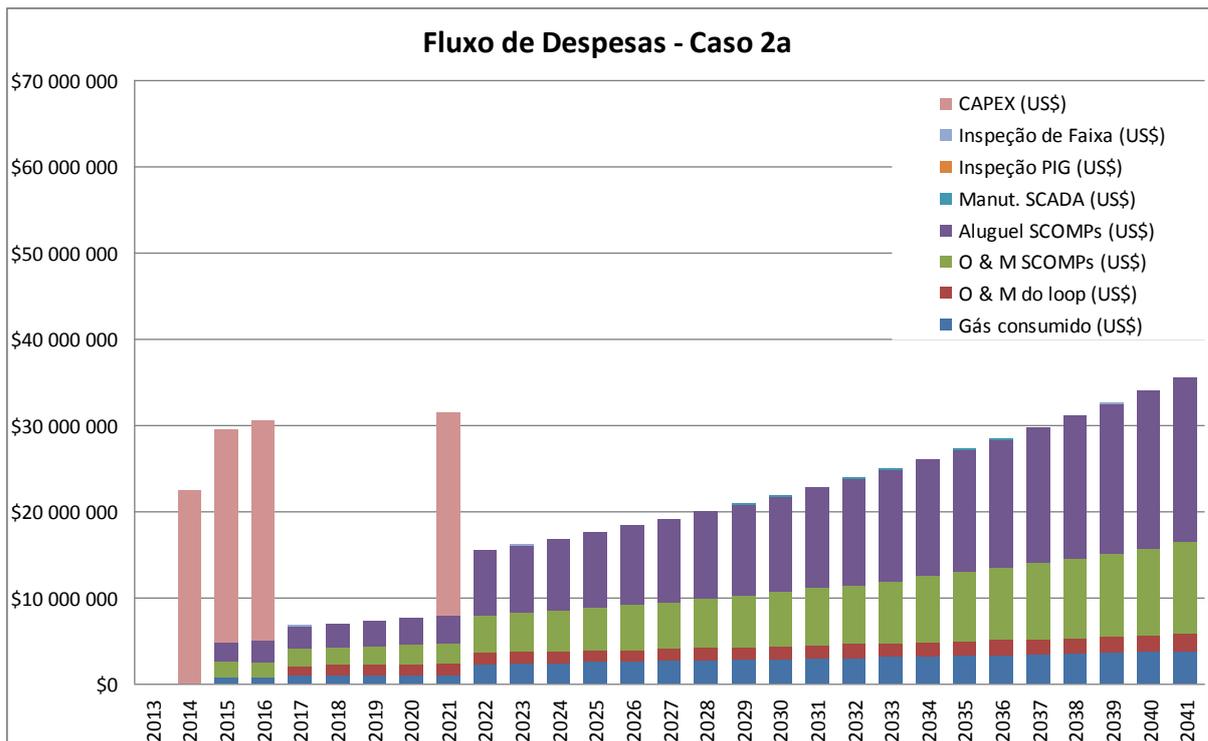


Figura 41 – Fluxo de despesas para o Caso 2a

5.8.2 Casos 2 b:

- **2015**
 - Instalação de uma SCOMP em SP:
 - três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
 - Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
 - Pressão na descarga = 42,0 kgf/cm²;
 - Vazão = 127584 m³/h;
 - Potência na SCOMP SP = 4055 HP;
 - Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 183,1 m³/h.

O Caso 2b para o ano de 2015 é idêntico ao Caso 2a para o ano de 2015 (item 5.8.1).

A Figura 35 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2b no ano de 2015.

A Figura 36 apresenta os valores de CAPEX do caso 2b para o ano de 2015.

- **2017**

- Aumento da compressão da SCOMP em SP construída em 2015:

- três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 51,0 kgf/cm²;
- Vazão = 153907 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 8869 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 321,0 m³/h.

A Figura 42 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2b no ano de 2017.

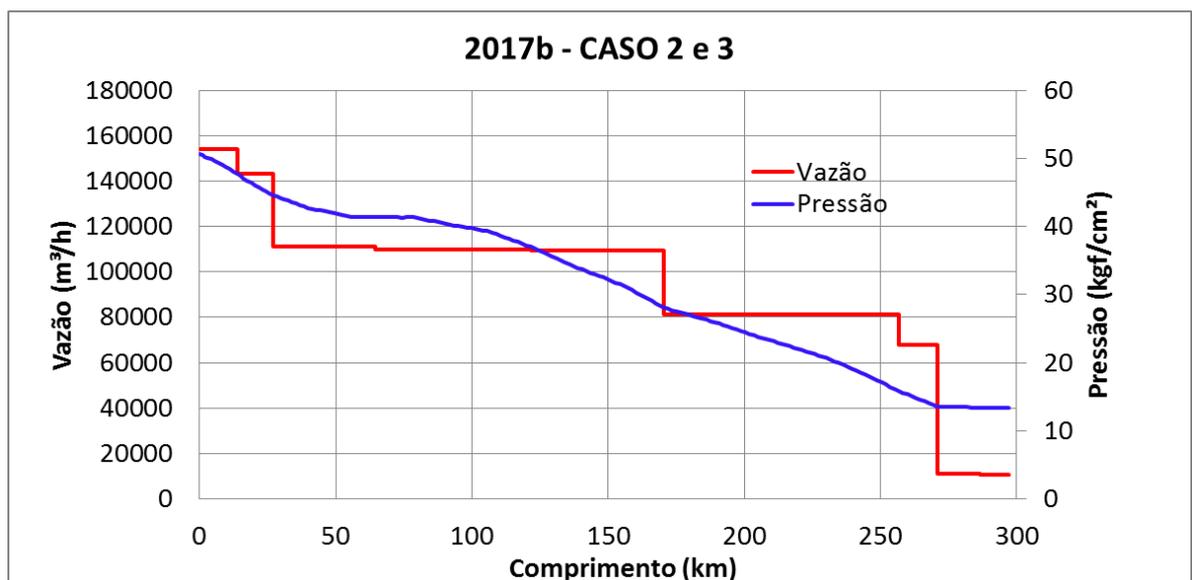


Figura 42 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2017b – Casos 2b e 3b

O aumento na compressão da SCOMP implica em CAPEX.

- **2022**

- Ampliação da SCOMP em SP construída em 2015:
 - quatro moto-compressores, sendo três em operação e um reserva;
 - Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
 - Pressão na descarga = 51,0 kgf/cm²;
 - Vazão = 233386 m³/h;
 - Potência na SCOMP SP = 13714 HP;
 - Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 495,3 m³/h.

Para a instalação do compressor extra em 2022 foi considerado um custo extra de mobilização de equipamento (item 5.5.8) de US\$ 4.666.667, que corresponde a um terço no valor utilizado em 2015.

O custo de aluguel (item 5.6.4) passa a ser de US\$ 2.720.000 anual, que corresponde a quatro terços do valor considerado em 2015.

Além disso, para esse caso é necessária a instalação de uma segunda SCOMP. A localização ótima do ponto de vista técnico-econômica é próxima a VB-1823, cerca de 65,4km a partir de SP.

- Instalação de uma SCOMP em DP6:
 - dois moto-compressores, sendo um em operação e um reserva;
 - Pressão na sucção = 45,0 kgf/cm²;
 - Pressão na descarga = 49,0 kgf/cm²;
 - Vazão = 139134 m³/h;

- Potência na SCOMP DP6 = 1374 HP;
 - Vazão de gás consumido na SCOMP DP6 = 77,4 m³/h.
- Construção de um trecho de *loop* de 22'' e comprimento de 27,8 km, contabilizados a partir de SP.

Foram considerados trechos especiais (item 5.5.7) como mostrado na Tabela 39.

A Figura 39 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2 no ano de 2022.

A Figura 43 e a Figura 44 apresentam os valores de CAPEX do Caso 2b para o ano de 2022, a primeira referente ao *loop* e a segunda referente a SCOMP

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	10 842 447	542 122	20 736 335	376 763	366 077	24 520	214 616	92 018
0.0%	26.1%	1.3%	50.0%	0.9%	0.9%	0.1%	0.5%	0.2%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comun. SCADA	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Custos Percentuais					Inventário	CUSTO LOOP		
Projeto	Licens. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
995 847	663 898	2 788 371	3 764 301	70 000	\$ 41 477 316.11			
2.4%	1.6%	6.7%	9.1%	0.2%				

Figura 43 – CAPEX para 2022 Caso 2b (referente ao *loop*)

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comum SCADA	
0	2 900 000	4 666 667	7 000 000	0	0	0	29 133	
0.0%	15.8%	25.4%	38.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	
Custos Percentuais				Inventário		CUSTO SCOMP		
Projeto	Licens. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
437 874	291 916	1 226 047	1 655 164	182 000		\$ 18 388 800.92		
2.4%	1.6%	6.7%	9.0%	1.0%				

Figura 44 – CAPEX para 2022 Caso 2b (referente à SCOMP)

A soma dos valores de CAPEX para 2022 Caso 2b é igual a US\$ 64.009.123,75.

Utilizando 20 anos a partir de 2022, foi calculado o valor presente apresentado na Tabela 42. O fluxo de despesas para esse caso está apresentado na Figura 45.

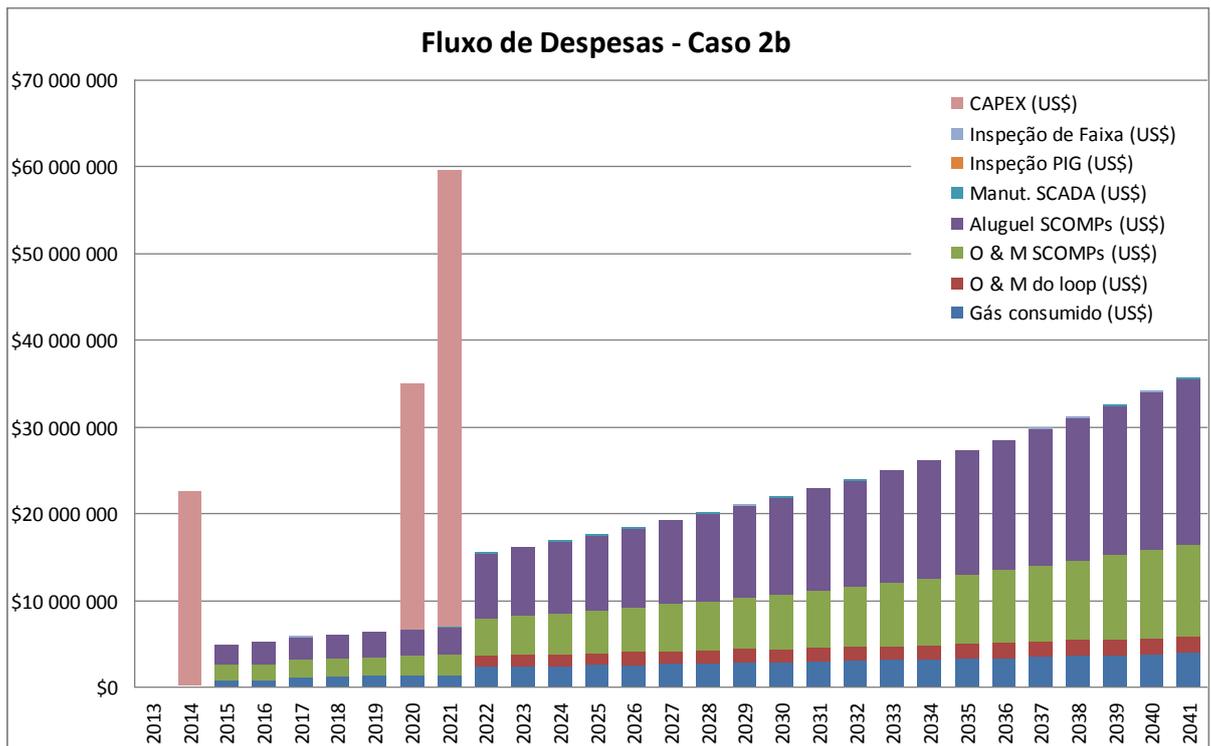


Figura 45 – Fluxo de despesas para o Caso 2b

5.8.3 Casos 3 a:

- **2015**

– Instalação de uma SCOMP em SP:

- três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 42,0 kgf/cm²;
- Vazão = 127584 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 4055 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 183,1 m³/h.

O Caso 3a para o ano de 2015 é idêntico ao Caso 2a para o ano de 2015 (item 5.8.1). Dessa forma, a Figura 35, que apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 2b no ano de 2015, também representa o

gradiente hidráulico para o Caso 3a. Os dados da Figura 36 apresentam também os valores de CAPEX do Caso 3a para o ano de 2015.

- **2017**

- Aumento da compressão da SCOMP em SP construída em 2015:

- três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 45,5 kgf/cm²;
- Vazão = 153907 m³/h.
- Potência na SCOMP SP = 6579 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 255,5 m³/h.

- Instalação de um trecho de *loop* de 22'' e comprimento de 27,8 km, contabilizados a partir de SP.

O Caso 3a para o ano de 2017 é idêntico ao Caso 2a para o ano de 2017 (item 5.8.1). Os mesmos trechos especiais foram considerados para os dois casos, como mostrado na Tabela 39. Da mesma forma, a Figura 37 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 3a no ano de 2017 e a Figura 38 apresenta os valores de CAPEX do Caso 3a para o ano de 2017.

- **2022**

- Ampliação da SCOMP em SP construída em 2015:

- quatro moto-compressores, sendo três em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 51,0 kgf/cm²;

- Vazão = 233386 m³/h;
 - Potência na SCOMP SP = 13714 HP;
 - Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 495,3 m³/h.
- Construção de um trecho de loop de 22'' e comprimento de 22,0 km, contabilizados a partir do km 106,73.

Para a instalação do compressor extra em 2022 foi considerado um custo extra de mobilização de equipamento (item 5.5.8) de US\$ 4.666.667, que corresponde a um terço no valor utilizado em 2015.

O custo de aluguel (item 5.6.4) passa a ser de US\$ 2.720.000 anual, que corresponde a quatro terços do valor considerado em 2015.

Foram considerados trechos especiais (item 5.5.7) como mostrado na Tabela 40

Tabela 40 – Trechos Especiais para o Caso 3

Trechos Especiais		Comprimento (m)
Cruzamento de Estradas Rurais		750
Cruzamento de Rodovias Federais		100
Cruzamento de Vias Expressas Estaduais		100
Cruzamento de Ferrovias		100
Trechos Urbanos com Densidade Populacional:	Baixa	0
	Média	0
	Alta	1760
	Muito Alta	0
Trechos com inclinação acentuada, em graus:	10 a 20	0

	20 a 30	0
	30 a 40	0
	> 40	0
Trecho com presença de rochas:		0
Travessia de Riachos ou Córregos		150
Travessia de Rios		300
Charcos e Pântanos		0
Parques e Reservas Florestais		0
Furos Direcionais		0

A Figura 46 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 3 no ano de 2022.

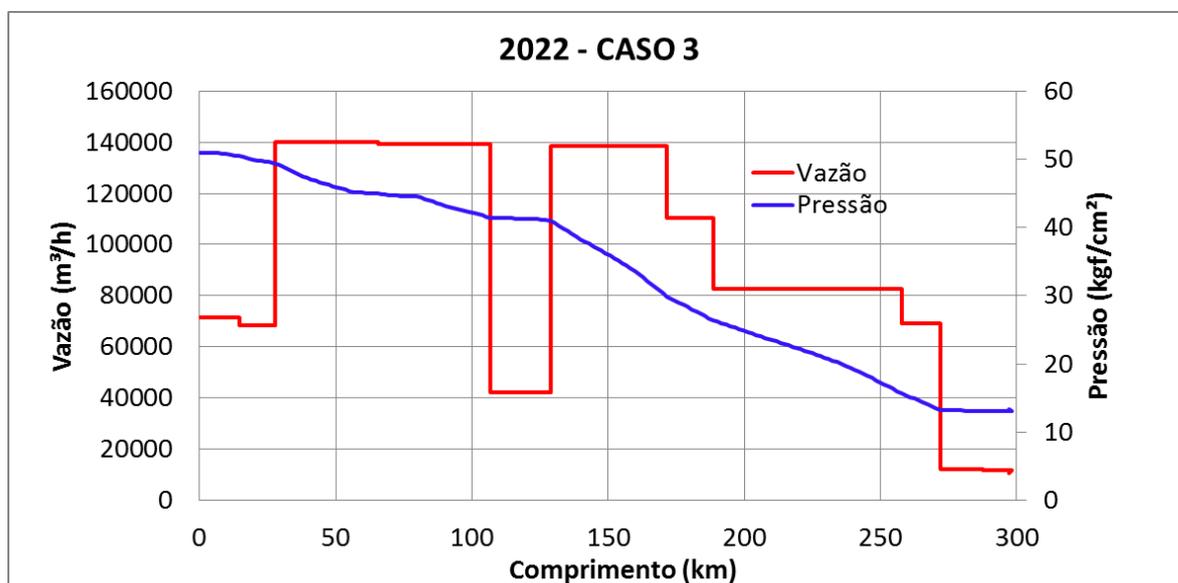


Figura 46 – Gradiente de Pressão e Vazão para 2022 – Caso 3

A Figura 47 apresenta os valores de CAPEX do caso 3a para o ano de 2022.

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	8 580 354	429 018	18 825 232	298 158	289 701	19 404	169 840	72 820
0.0%	20.6%	1.0%	45.1%	0.7%	0.7%	0.0%	0.4%	0.2%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comun SCADA	
0	0	4 666 667	0	0	0	0	9 333	
0.0%	0.0%	11.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
Custos Percentuais					Inventário	CUSTO TOTAL		
Projeto	Licens. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
1 000 816	667 211	2 802 284	3 783 084	108 500				
2.4%	1.6%	6.7%	9.1%	0.3%	\$ 41 722 420.29			

Figura 47 – CAPEX para 2022 Caso 3a

Utilizando 20 anos a partir de 2022, foi calculado o valor presente apresentado na Tabela 42. O fluxo de despesas para esse caso está apresentado na Figura 48.

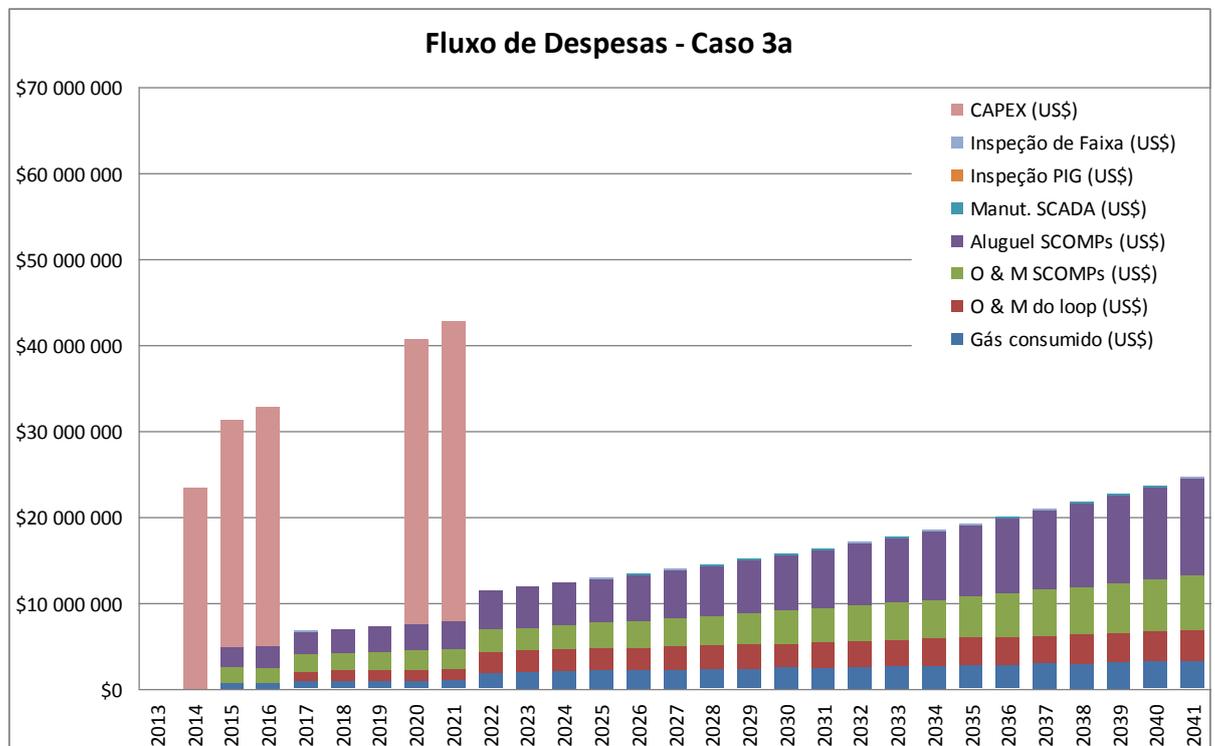


Figura 48 – Fluxo de despesas para o Caso 3a

5.8.4 Casos 3 b:

- **2015**

- Instalação de uma SCOMP em SP:

- três moto-compressores com configuração de motor Waukesha 7044 e compressor Ariel JGK4, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 42,0 kgf/cm²;
- Vazão = 127584 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 4055 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 183,1 m³/h.

O Caso 3b para o ano de 2015 é idêntico ao Caso 2a para o ano de 2015 (item 5.8.1). Logo, a Figura 35 também representa o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 3b no ano de 2015. O mesmo pode ser observado em relação a Figura 36 que apresenta os valores de CAPEX do caso 3b para o ano de 2015.

- **2017**

- Aumento da compressão da SCOMP em SP construída em 2015:

- três moto-compressores, sendo dois em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 51,0 kgf/cm²;
- Vazão = 153907 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 8869 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 321,0 m³/h.

A Figura 42 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 3b no ano de 2017.

O aumento na compressão da SCOMP não apresenta CAPEX.

- **2022**

- Ampliação da SCOMP em SP construída em 2015:

- quatro moto-compressores com configuração de motor Waukesha 7044 e compressor Ariel JGK4, sendo três em operação e um reserva;
- Pressão na sucção = 33,0 kgf/cm²;
- Pressão na descarga = 51,0 kgf/cm²;
- Vazão = 233386 m³/h;
- Potência na SCOMP SP = 13714 HP;
- Vazão de gás consumido na SCOMP SP = 495,3 m³/h.

- Construção de um trecho de *loop* de 22’’ e comprimento de 22,0 km, contabilizados a partir do km 106,73.

Foram considerados trechos especiais (item 5.5.7) como mostrado na Tabela 40

- Construção de um trecho de *loop* de 22’’ e comprimento de 27,8 km, contabilizados a partir de SP.

Foram considerados trechos especiais (item 5.5.7) como mostrado na Tabela 39

A Figura 46 apresenta o gradiente de pressão e a vazão ao longo do gasoduto para o Caso 3b no ano de 2022.

A Figura 49 e a Figura 50 apresentam os valores de CAPEX do caso 3 para o ano de 2022, situação “b”.

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	10 842 447	542 122	20 736 335	376 763	0	24 520	214 616	92 018
0.0%	26.4%	1.3%	50.6%	0.9%	0.0%	0.1%	0.5%	0.2%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comun. SCADA	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Custos Percentuais				Inventário	CUSTO LOOP1			
Projeto	Licenc. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
984 865	656 576	2 757 621	3 722 788	70 000	\$ 41 020 671.99			
2.4%	1.6%	6.7%	9.1%	0.2%				

Figura 49 – CAPEX para 2022 Caso 3b (referente ao loop)

Custos ligados ao duto								
Desaprop. e Liberação de Faixa	Custo total do aço	Custo Equip. (5% do aço)	Montagem	Revest. Externo	Revest. Interno	Proteção Catódica	Comun. e SCADA	Comissionamento
0	11 359 476	567 974	18 825 232	298 158	0	19 404	169 840	72 820
0.0%	25.2%	1.3%	41.7%	0.7%	0.0%	0.0%	0.4%	0.2%
SCOMPs								
Comissionamento	Instalações Fixas	SCOMP1	SCOMP2				Comun. SCADA	
0	0	4 666 667	0	0	0	0	9 333	0
0.0%	0.0%	10.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Custos Percentuais				Inventário	CUSTO LOOP2			
Projeto	Licenc. Ambiental	Gerenc. do Projeto	Custos Eventuais	Inventário Imobilizado				
1 079 667	719 778	3 023 068	4 081 142	217 000	\$ 45 109 558.70			
2.4%	1.6%	6.7%	9.0%	0.5%				

Figura 50 – CAPEX para 2022 Caso 3b (referente à SCOMP)

O CAPEX total para 2022 Caso 3b é igual a US\$ 90.729.881,53.

Utilizando 20 anos a partir de 2022, foi calculado o valor presente apresentado na Tabela 42. O fluxo de despesas para esse caso está apresentado na Figura 51.

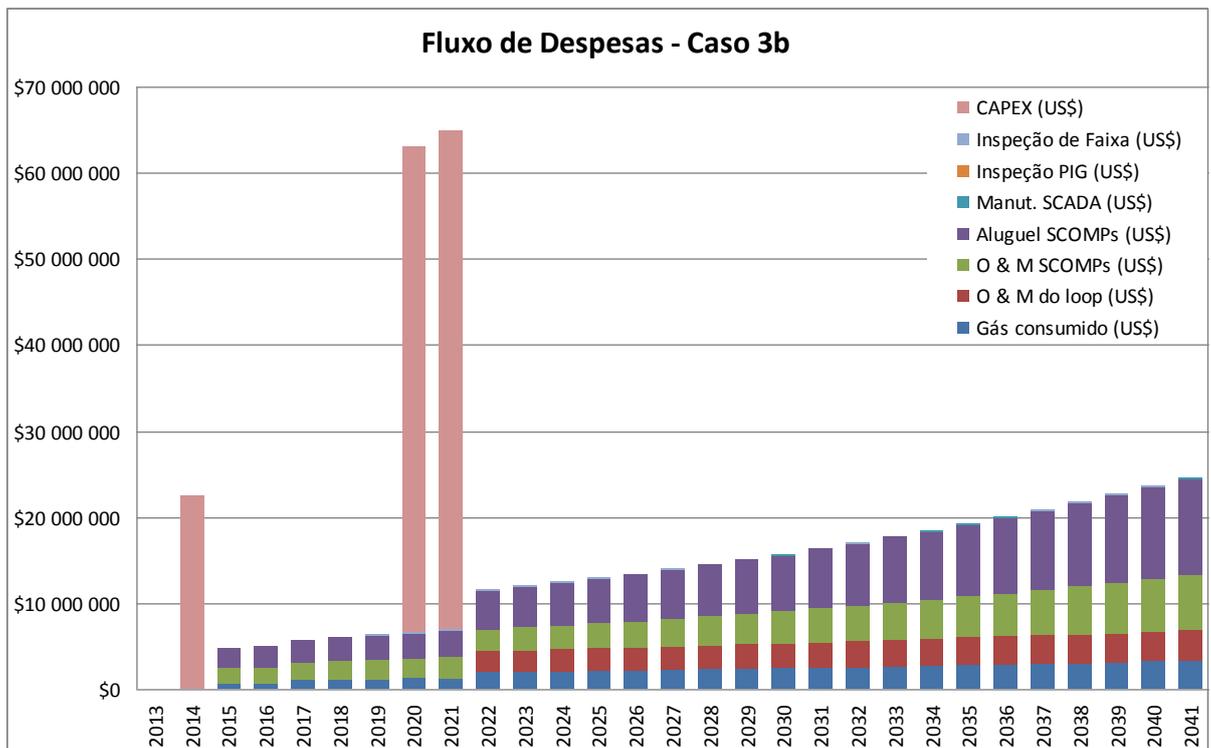


Figura 51 – Fluxo de despesas para o Caso 3b

5.9 Consolidação dos Resultados

A análise técnico-econômica detalhada do projeto de ampliação do gasoduto São Brás do Suaçui-Belo Oriente definiu dois casos, cada um com duas alternativas, baseadas no ano em que os *loops* estarão operacionais. Um resumo desses casos está apresentado na Tabela 41.

Tabela 41 – Soluções definidas

Cenários	Casos	
	2	3
2015	SCOMP SP (P+ = 42,0 kgf/cm ²)	
2017a	SCOMP SP (P+ = 45,5 kgf/cm ²) + 27,8 km de Loop 22''	
2017b	SCOMP SP (P+ = 51,0 kgf/cm ²)	
2022	SCOMP SP (P+ = 51,0 kgf/cm ²) + 27,8 km de Loop 22'' + SCOMP DP6 (P+ = 49,0 kgf/cm ²)	SCOMP SP (P+ = 51,0 kgf/cm ²) + 27,8 km de Loop 22'' + 22,0 km de Loop 22''

Conseguiu-se ajustar os comprimentos de *loops* e localização das estações de compressão de forma que as soluções sejam somente diferentes em 2022. Assim, têm-se soluções iguais até 2017. Isso permitirá também atender possíveis variações futuras nas vazões, casos as previsões para os anos de 2017 e principalmente 2022 sejam alteradas.

A tabela abaixo apresenta o valor presente de projeto para os casos descritos no item 5.8. Os projetos foram considerados no nível de FEL-1, podendo apresentar uma variação de -30% a +50% em seu custo final. FEL corresponde a “*Front End Loading*”, uma metodologia para definição dos requisitos de um projeto.

Tabela 42 – Resultados Econômicos

Investimento	Caso 2a	Caso 2b	Caso 3a	Caso 3b
VP (milhão US\$)	147,612	135,289	141,379	128,940

As alternativas b se mostraram mais econômicas que as alternativas a, para os dois casos. O caso 3 se mostrou mais econômico em comparação ao caso 2.

Recomendou-se um estudo posterior dos fluxos de caixa, incluindo as receitas previstas pela companhia para cada caso, em função das disponibilidades da GASMIG.

6 Conclusões

O estudo de caso discutido neste trabalho exigiu a criação de uma metodologia que foi criada e testada simultaneamente. O estudo da capacidade de gasodutos exige que se conheça em detalhes os contratos aos quais o gasoduto está submetido, ou seja, as vazões contratadas em cada ponto de entrega, suas pressões mínimas, as pressões mínimas dos pontos de recebimento, as localizações de cada um destes pontos, além de características físicas dos dutos e estações de compressão. Assim sendo, qualquer alteração no sistema, incluindo alterações de contrato, modificam a capacidade disponível do gasoduto.

A validação do modelo computacional através da simulação de históricos operacionais de vazão e comparação com o histórico de pressão de um ponto de entrega distante do ponto de recebimento se mostrou eficiente e possível, através do parâmetro da rugosidade.

O *software* desenvolvido motivado por este projeto, GASPEX, se mostrou extremamente eficiente em determinar os diâmetros econômicos de cada uma das diversas opções avaliadas para se tornarem os casos preliminares. Esta metodologia de escolha de diversos casos preliminares bastante diferentes entre si se mostrou eficaz porque permitiu encontrar com exatidão as opções que se destacam para o estudo detalhado. Os resultados, tanto hidráulicos como econômicos, para as simulações dos casos preliminares desenvolvidas no GASPEX, se mostraram muito próximas das simulações dos casos detalhados. Isto indica que os resultados termo-hidráulicos do GASPEX se aproximam satisfatoriamente dos resultados de *software* comerciais internacionais. Além disso, indica também que a metodologia do cálculo econômico para estimativa do valor presente do projeto é eficaz e capaz de fornecer resultados próximos a realidade o suficiente para determinar quais casos devem ser estudados em detalhes.

O estudo detalhado de dois casos mostrou resultados satisfatórios, que combinados com decisões estratégicas (como por exemplo, a escolha do diâmetro de 22” e da semelhança entre os casos 2 e 3 até 2017) permitiram à GASMIG ter a segurança de planejar com a certeza de realizar as melhores escolhas nos momentos adequados.

Esta mesma metodologia, em suas linhas gerais, inclusive as premissas, podem ser aplicadas à outros gasodutos que necessitem de ampliação da capacidade em virtude de um aumento no mercado de determinada região. É preciso considerar, contudo que sistemas mais complexos em malha exigirão ainda mais simulações.

7

Referências Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *ANSI/API SPECIFICATION 5L Specification for Line Pipe* – Fourty-Fourth Edition

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING, *ASME B31.8 Gas Transmission & Distribution Piping Systems* - 2012

CAVALCANTI, R. L.; ROJAS L. O. A.; OLIVEIRA, J. A., 2008. **Uso de um método estocástico para cálculo do equilíbrio líquido-vapor de sistemas multicomponentes e avaliação de uma abordagem por contribuição de grupos para o cálculo do coeficiente de fugacidade.** IBP2128_08. Rio Oil & Gas Exposition.

PRATT, R.M., 2001. **Thermodynamic properties involving derivatives. Using the Peng-Robinson Equation of State.** CHe Division. p.112-115.

WALAS, S. M., 1985. **Phase Equilibria in Chemical Engineering.** Butterworth-Heinemann.

P. KRISHNASWAMI, K.S. CHAPMAN, M. ABBASPOUR, **Compressor Station Optimization for Linepack Maintenance,** Pipeline Simulation Interest Group, 2004.

LEE, A.L., GONZALEZ, M.H., AND EAKIN, B.E.: **The Viscosity of Natural Gases,** *JPT* (Aug. 1966) 997-1000; Trans., AIME (1966) 234.