

Departamento de Engenharia Mecânica

Pós-Graduação em Engenharia de Dutos

Estudo de Ampliação da Capacidade de Transferência em Oleodutos

Leonardo Motta Carneiro

Luis Fernando A. Azevedo

Luis Fernando Pires

LEONARDO MOTTA CARNEIRO

ESTUDO DE AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA  
EM OLEODUTOS

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 A. AZEVEDO

LUIS FERNANDO G. PIRES

RIO DE JANEIRO

14 DE MAIO DE 2008

## **Dedicatória**

Dedico esta monografia a toda comunidade que trabalha com oleodutos, com o intuito de orientar e ajudar a elaboração de um estudo de ampliação da capacidade de transferência de um oleoduto.

## **Agradecimentos**

A Deus;

A minha esposa Alessandra e meus familiares pelo apoio constante;

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

Ao IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo) pela bolsa concedida;

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

A todos os professores que compuseram o quadro de aulas oferecidas;

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

A TRANSPETRO/PETROBRAS por compartilhar informações;

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

## Sumário

A cada dia a produção e o consumo de hidrocarbonetos aumentam e conseqüentemente a necessidade de transferência para os locais de refino e distribuição. O melhor meio para escoar estes produtos é através de dutos, os quais levam em média cinco anos para serem construídos, dependendo da localização, extensão e diâmetro.

O Brasil é um país em desenvolvimento que possui cerca de 17.000 quilômetros de dutos dos quais 10.000 estão com aproximadamente 40 anos de uso e são utilizados para o transporte de petróleo, derivados e biocombustíveis. Com o aumento da produção e demanda destes combustíveis surge a necessidade de ampliar a malha de transporte e otimizar os dutos existentes.

A ampliação de um oleoduto remete ao projeto conceitual de todo o sistema de transferência. É preciso estudar todas as alternativas possíveis para cumprir a movimentação solicitada, considerando substituição de alguns trechos do duto, substituição das bombas, construção de estações intermediárias, redimensionamento do sistema de segurança, mudança da composição das misturas, a utilização de redutores de atrito ou, em último caso, até a construção de um novo duto.

O presente trabalho abordou os pontos que devem ser analisados para realizar um estudo de ampliação de um duto do ponto de vista termohidráulico, analisando dois casos como exemplo. Nesses casos foram avaliadas algumas alternativas e apresentados os problemas encontrados, bem como a razão das decisões tomadas. Será demonstrado ainda que cada duto exige um estudo próprio, pois possui diversas peculiaridades que impossibilitam a generalização desses estudos de ampliação e explicam a necessidade das diversas simulações para análise dos transientes.

Quando as projeções de ampliação são feitas, deve-se estar sempre atento a realidade do duto. Assim, verifica-se que cada duto converge para uma solução própria, pois se trata de um estudo com muitas variáveis técnicas e econômicas, além de diversas variáveis de caráter ambiental e político.

# Índice

1	Introdução.....	10
2	Parâmetros de Projeto.....	14
2.1.	Levantamento da Condição Atual.....	14
2.2.	Plano de Movimentações de Produtos.....	15
2.3.	Vazão, Produtos e Misturas.....	16
2.4.	Condição Operacional do Duto.....	17
2.5.	Premissas.....	18
3	Opções para Ampliar a Transferência de Produto.....	19
3.1.	Troca das Bombas.....	19
3.2.	Troca do Duto.....	20
3.3.	Construção de Duto Paralelo.....	22
3.4.	Construção de Estação Intermediária.....	23
4	Redimensionamento do Sistema de Controle e de Segurança.....	26
5	Consumo Energético do Sistema.....	29
6	Avaliação Econômica do Investimento.....	30
7	Medições da Utilização do Duto.....	34
8	Apresentação dos Dutos Estudados.....	36
8.1.	Duto A.....	36
8.2.	Duto B.....	38
9	Resultados.....	41
9.1.	Duto A.....	41
9.2.	Duto B.....	44
10	Conclusões.....	50
11	Referências Bibliográficas.....	51

## Índice de Figuras

Figura 1 – Reservas de petróleo no Brasil. ....	10
Figura 2 – Consumo de petróleo no Brasil. ....	11
Figura 3 – Dutos de petróleo e derivados do Brasil (Fonte: ANP). ....	11
Figura 4 – Receita Operacional Líquida e Investimentos da PETROBRAS (Fonte: CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica). ....	12
Figura 5 – Exemplo de integração do duto com o meio ambiente. ....	13
Figura 6 – <i>Pig</i> magnético sendo retirado no duto. ....	14
Figura 7 – Representação da seção transversal com coluna fechada e aberta. ....	17
Figura 8 – À esquerda bombas em série e à direita bombas em paralelo. ....	20
Figura 9 – Soldagem e abaixamento do duto na construção. ....	21
Figura 10 – Cabeça do TH à esquerda e acompanhamento do TH à direita. ....	22
Figura 11 – Gradiente Hidráulico sem e com Estação Intermediária. ....	24
Figura 12 – Exemplo de Estação Intermediária. ....	25
Figura 13 – Exemplo de válvula de controle tipo esfera (PCV). ....	26
Figura 14 – Exemplo de válvula de alívio de pressão tipo mola. ....	27
Figura 15 – Horário de ponta. ....	34
Figura 16 – Fluxograma do Duto A. ....	38
Figura 17 – Fluxograma do Duto B. ....	40
Figura 18 – Gradiente hidráulico atual do Duto A. ....	41
Figura 19 – Gradiente hidráulico da alternativa A1. ....	42
Figura 20 – Gradiente hidráulico da alternativa A2. ....	43
Figura 21 – Gradiente hidráulico atual do Duto B. ....	45
Figura 22 – Gradiente hidráulico da alternativa B1. ....	46

Figura 23 – Gradiente hidráulico da alternativa B2.....	47
Figura 24 – Gradiente hidráulica da alternativa B3.....	48

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 – Custo médio de materiais e serviços em 2007.....	31
Tabela 2 – Resultados do Duto A. ....	44
Tabela 3 – Avaliação econômica das alternativas do Duto A. ....	44
Tabela 4 – Resultados do Duto B. ....	48
Tabela 5 – Avaliação econômica das alternativas do Duto B. ....	49

## Índice de Equações

Equação 1 – Potência absorvida na bomba.....	29
Equação 2 – Valor Presente Líquido (VPL). ....	30
Equação 3 – Valor do Investimento Aplicado. ....	32
Equação 4 – Fluxo de Caixa.....	32
Equação 5 – Taxa Interna de Retorno (TIR).....	32
Equação 6 – Tempo de Retorno de Investimento (Pay-back). ....	33
Equação 7 – FU operando no HP. ....	34
Equação 8 – FU sem operar no HP.....	34
Equação 9 – Fator de Recuperação de Estoque (FRE).....	35

# 1

## Introdução

Nos últimos dez anos verificou-se um aumento expressivo nas reservas e na produção de petróleo no Brasil (Figura 1). O consumo de derivados vem acompanhando esta elevação (Figura 2) e conseqüentemente observa-se uma pressão sobre os meios de transporte encarregados da movimentação destes produtos para as refinarias e para os pontos de consumo. O melhor meio para escoar estes produtos é através de dutos, os quais levam em média cinco anos para serem construídos, dependendo da localização, extensão e diâmetro.

O Brasil é um país em desenvolvimento que possui cerca de 17.000 quilômetros de dutos (Figura 3) dos quais 10.000 estão com aproximadamente 40 anos de uso e são utilizados para o transporte de petróleo, derivados e biocombustíveis. Com o aumento da produção e da demanda destes combustíveis surge a necessidade de ampliar a malha de transporte e otimizar os dutos existentes.

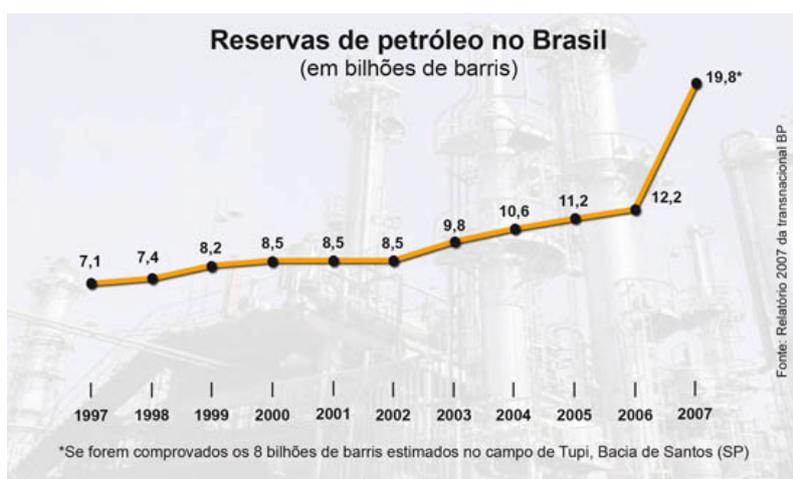


Figura 1 – Reservas de petróleo no Brasil.

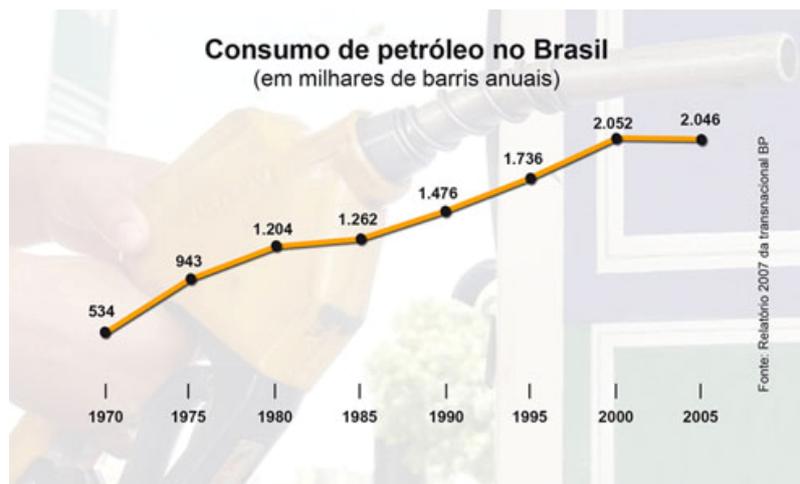


Figura 2 – Consumo de petróleo no Brasil.

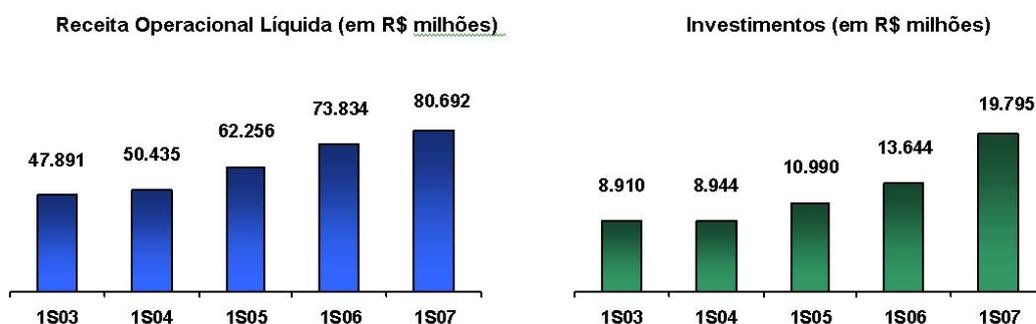


Figura 3 – Dutos de petróleo e derivados do Brasil (Fonte: ANP).

Entre os meios de transporte utilizados, os oleodutos tornaram-se um meio de transporte preferencial tanto para atender ao abastecimento das refinarias como para suprir a necessidade dos grandes centros de consumo de derivados. A transferência por oleodutos é a forma mais segura e econômica de entregar

grandes volumes de produtos a grandes clientes, como aeroportos e indústrias, por um longo espaço de tempo.

O Brasil é um país que está recebendo altos investimentos na área petrolífera e grande parte deles destina-se a área de dutos. A Figura 4 apresenta os montantes de Receita Operacional Líquida e de Investimentos dos primeiros semestres do ano de 2003 até 2007 da PETROBRAS. O Plano de Negócio 2008-2012 deles prevê o investimento de 2,264 milhões de dólares americanos na área de dutos.



**Figura 4 – Receita Operacional Líquida e Investimentos da PETROBRAS (Fonte: CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica).**

A ampliação de um oleoduto remete ao projeto conceitual de todo o sistema de transferência. É preciso estudar todas as alternativas possíveis para cumprir a movimentação solicitada, considerando substituição de alguns trechos do duto, substituição das bombas, construção de estações intermediárias, redimensionamento do sistema de segurança, mudança da composição das misturas, utilização de redutores de atrito ou, em último caso, até a construção de um novo duto. Entre as variáveis ligadas a ampliação, a alteração das propriedades do produto que se deseja transferir e o aumento da vazão são os maiores determinantes das modificações que deverão ser implementadas no duto.

Além disto, as alternativas de ampliação precisam avaliar na sua concepção os impactos ambientais e sociais que ocorrerão com a sua implantação. Para

avaliar estes impactos, é realizado o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e feito o Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA). Após este estudo, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) emiti a Licença Prévia (LP) para o desenvolvimento do projeto básico. Após esta licença, ainda são emitidas mais três até a operação do duto. São elas: Licença de Instalação, para a construção e montagem; Licença de Desmatamento, para suprir a vegetação existente durante a abertura da faixa e a Licença de Operação, para iniciar a operação do duto com os produtos previstos em projeto.



**Figura 5 – Exemplo de integração do duto com o meio ambiente.**

Projetos sociais para a conscientização das sociedades dos arredores, quanto ao risco existente durante a obra e a operação do duto, são realizados para prevenir quanto a possíveis acidentes.

O presente trabalho aborda os pontos que devem ser analisados para realizar um estudo de ampliação de um duto do ponto de vista termohidráulico, analisando dois casos como exemplo. Nesses casos, foram avaliadas algumas alternativas, os problemas encontrados e a razão das decisões tomadas. Será demonstrado ainda que cada duto exige um estudo próprio, pois possui diversas peculiaridades que impossibilitam a generalização desses estudos de ampliação e explicam a necessidade das diversas simulações para análise dos transientes.

## 2

### Parâmetros de Projeto

Antes de estudar e projetar a ampliação de um duto deve-se fazer o levantamento minucioso do estado atual das instalações e dos equipamentos que o compõem. Esta situação atual será o ponto de partida do estudo e sobre ela será proposta as alterações para atingir o objetivo da ampliação.

#### 2.1.

##### Levantamento da Condição Atual

É necessário verificar a integridade do duto observando o estado de corrosão através da passagem de um *pig* instrumentado. Após a corrida do instrumento, realiza-se a interpretação e a verificação dos pontos críticos apontados nos resultados. O perfil de elevação e a extensão do duto também podem ser obtidos com este procedimento (Figura 6).



Figura 6 – *Pig* magnético sendo retirado no duto.

O levantamento da documentação dos últimos testes hidrostáticos realizados também é relevante, pois eles definem a PMOA (Pressão Máxima Operacional Admissível) atual do duto. Com estes documentos será possível definir, após o estudo termohidráulico de transientes, quais trechos terão que ser trocados e quais precisarão ter o teste hidrostático (TH) refeito.

As características da construção de todos os equipamentos instalados no duto devem ser coletadas através das folhas de dados de cada um. Para a análise do escoamento e segurança operacional não são necessárias as descrições de todos os equipamentos, porém alguns são essenciais, tais como:

- Tanques;
- Bombas;
- Propulsores das bombas;
- Válvulas de bloqueio, de retenção, de controle e de alívio de pressão;
- Sistemas de controle e intertravamento.

Juntamente com estes dados, os fluxogramas das instalações são fundamentais, pois descrevem como todos estes itens estão dispostos na planta.

## **2.2.**

### **Plano de Movimentações de Produtos**

As movimentações de produtos desejadas após a ampliação devem ser definidas estabelecendo basicamente uma origem, um destino, a rota de dutos ou trechos utilizados para a transferência e o volume a ser transferido.

Com estes dados levantados é possível aperfeiçoar as operações de forma que os dutos fiquem o mínimo de tempo parado ou realizem menos operações de inversão de fluxo caso o duto opere em ambos os sentidos.

Quando é necessário transferir dois produtos com densidades semelhantes, é aconselhável intercalar um terceiro produto com densidade diferente. Esta boa

prática diminui o volume de produto misturado na interface, diminuindo o reprocessamento destas misturas, pois elas são produtos fora das especificações de mercado.

Quando não tiver um terceiro produto com densidade diferente dos dois produtos, um recurso para resolver o problema das misturas de interface é o lançamento de um *pig* separador entre os produtos com densidades semelhantes. Esta solução, porém, possui três pontos negativos: o custo do *pig* separador, ter que parar a operação para inserir o *pig* no canhão de lançador e o fato dela só funcionar para um trecho de duto com o mesmo diâmetro e com válvulas intermediárias de passagem plena.

### 2.3.

#### **Vazão, Produtos e Misturas**

A vazão desejada e os produtos previstos para serem transportados após a ampliação são objetivos importantes a serem definidos, visto que eles são decisivos na hora de aproveitar ou não os equipamentos atuais do duto.

Com as descobertas de novas reservas de petróleo no Brasil, sabe-se que os petróleos que serão extraídos no futuro possuem alta viscosidade. Para escoar fluidos muito viscosos existem basicamente duas alternativas: aquecê-lo, pois a viscosidade diminui com o aumento da temperatura ou misturá-lo com outros fluidos menos viscosos.

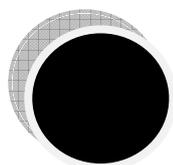
Para misturar dois fluidos, eles devem possuir densidades semelhantes. A densidade da mistura é calculada com a média ponderada da densidade de cada produto e a viscosidade da mistura em outra temperatura é obtida utilizando o método da norma ASTM D 341.

## 2.4.

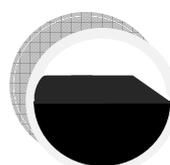
### Condição Operacional do Duto

A condição operacional de dutos é um assunto em questão nos dias de hoje. Algumas operadoras de dutos optam por operar com coluna fechada e outras com coluna aberta. A terminologia coluna fechada significa que se fizermos um corte transversal em qualquer posição ao longo do duto, da sua origem até o seu destino, a sua área transversal estará completamente cheia de líquido (Figura 7).

Seção Transversal com Coluna Fechada



Seção Transversal com Coluna Aberta



**Figura 7 – Representação da seção transversal com coluna fechada e aberta.**

Na operação com coluna aberta, em alguns pontos, geralmente após os picos de elevação, o duto opera com líquido e produto vaporizado ao mesmo tempo. Isso ocorre quando a pressão naquele ponto do duto é menor do que a pressão de vapor do produto.

A grande questão é que operando com coluna fechada, os sistemas de detecção conseguem resolver o cálculo do balanço de massa e identificam os vazamentos com facilidade. Porém, para fechar coluna, os dutos operam com pressões mais altas, aumentando o risco operacional.

Quando operando com coluna aberta, o duto possui líquido com produto vaporizado (gás) ao mesmo tempo e pressões mais baixas, mas os vazamentos são difíceis de serem observados principalmente na partida e na parada do duto, quando se passa por um regime transiente. O gás por ser compressível, dificulta o cálculo do balanço de massa, tornando difícil estimar a quantidade de gás que existe dentro do duto, sendo muito complexo definir se o gás está sendo comprimido durante o transiente ou se está vazando líquido para o ambiente.

## 2.5.

### Premissas

Todo estudo possui premissas que são as considerações e as aproximações que foram feitas no projeto. No caso do estudo de escoamento em oleodutos, é comum pensar nos seguintes questionamentos.

- A condição operacional será com coluna fechada ou aberta?
- Qual o procedimento de parada e partida do duto adotado?
- O escoamento é considerado isotérmico ou não? Se for, em qual temperatura encontram-se o óleo e o duto? 20°C?
- Tubulação, curvas, válvulas e demais acidentes, nas instalações internas de terminais e estações são modelados por dutos de comprimento equivalente?
- Qual foi a equação de estado adota?
- Qual equação foi utilizada para calcular a perda de carga no duto?
- Qual rugosidade foi adotada para a parede interna do duto? Rugosidade de duto novo?

Dentre estes questionamentos e demais condições impostas no projeto, são feitas algumas aproximações que devem estar relacionadas nas premissas.

### 3

## Opções para Ampliar a Transferência de Produto

Estabelecidos os parâmetros de projeto, toma-se conhecimento da situação atual do duto e o que se pretende dele após a ampliação.

Como a definição da palavra ampliar já diz (tornar amplo, estender, pôr em formato maior), a ampliação de um duto geralmente pretende aumentar a vazão para o produto atual ou com um novo produto e até com uma nova condição operacional.

Existem algumas formas de alcançar este objeto, porém é preciso estudar algumas alternativas para definir qual é, ou qual a combinação delas, que possui o melhor custo-benefício e que atende as condições do projeto. As alternativas apresentadas a seguir são: substituição das bombas, substituição de trechos do duto, construção de um duto paralelo, construção de estações intermediárias e até a construção de um duto novo.

#### 3.1.

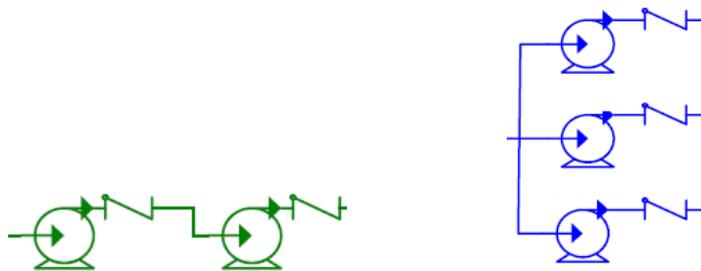
#### Troca das Bombas

A primeira opção cogitada para realizar a ampliação é a troca das bombas que serão utilizadas para fornecer energia ao fluido. Porém deve ser verificado se as bombas atuais estão trabalhando com válvulas da descarga estranguladas. Esta condição é encontrada no campo quando se deseja operar com vazões menores, por exemplo, devido a restrições no duto.

Instalando novas bombas com maior capacidade e potência, se obtém maiores pressões de envio e por conseqüência maiores vazões. Existem vários tipos, modelos e construções de bombas, porém elas podem ser divididas em dois grandes grupos: Turbo bombas, que têm como característica grandes vazões e

baixas pressões, e Volumétricas ou Bombas de Deslocamento Positivo, que possuem baixas vazões e altas pressões. Cada equipamento possui curvas características próprias de operação, curvas de *head*, potência, eficiência e *head* mínimo de sucção (NPSH) que variam de acordo com a vazão.

Estes equipamentos podem ser instalados em série, em paralelo ou os dois ao mesmo tempo. Em série, eles permitem uma maior elevação da pressão de descarga e em paralelo, eles proporcionam o aumento da vazão. Combinando os dois métodos obtêm-se o aumento de pressão e vazão. A Figura 8 apresenta à esquerda a formação em série e à direita a formação em paralelo.



**Figura 8 – À esquerda bombas em série e à direita bombas em paralelo.**

O dimensionamento mecânico das bombas está atrelado a curva do sistema, à quantidade de transferência de produto necessária, ao custo e aos fornecedores existentes próximo ao local de construção do duto.

### 3.2.

#### Troca do Duto

Com a troca das bombas e conseqüentemente o aumento das pressões é necessário trocar alguns trechos do duto por outros com o mesmo diâmetro e espessura maior, possibilitando a operação com maiores pressões.

O duto possui um corredor de terra que une a sua origem ao seu destino. A faixa do duto, como é chamado o corredor de terra por onde o duto passa, interfere na vida das sociedades por onde ele cruza. A Lei número 6766 de 19/12/1979, assinada pelo ex-presidente João Figueiredo, determina o parcelamento de terras

para fins urbanos. Porém, o proprietário da terra por onde a faixa do duto passa deve ser indenizado toda vez que for realizado uma obra que prejudique a sua vida ou a sua renda.

As licenças municipais, estaduais, federais e ambientais também levam muito tempo para serem adquiridas, sendo as ambientais as mais complicadas. Para elas, é realizado o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para avaliar os impactos ambientais que serão causados e é feito o Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA). Após este relatório, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) emite a Licença Prévia (LP) para o desenvolvimento do projeto básico. Após esta licença, ainda são emitidas mais três até a operação do duto. São elas: Licença de Instalação, para a construção e montagem; Licença de Desmatamento, para suprir a vegetação existente sobre da faixa e a Licença de Operação, para iniciar a operação do duto com os produtos previstos em projeto.

Trocar trechos do duto despense muito tempo e dinheiro, pois se trata de uma obra geralmente em locais de difícil acesso e que possuem mão de obra e equipamentos muitos específicos e valorizados (Figura 9). Para tornar o empreendimento economicamente viável, buscam-se fornecedores próximos para obter um baixo custo de transporte de tubos. Para isto, fica-se limitado a tubos com diâmetros e espessuras que estes fornecedores fabricam.



**Figura 9 – Soldagem e abaixamento do duto na construção.**

Uma opção para não trocar trechos do duto e elevar a pressão máxima de operação admissível (PMOA), é refazer o teste hidrostático (TH). Esta alternativa

só é possível quando o duto possui uma pressão de projeto acima da pressão na qual os últimos testes hidrostáticos foram realizados. Isto ocorre quando o teste foi pouco segmentado em trechos com grande desnível do terreno ou quando só habilitaram o duto para realizar operações com baixas pressões.

Neste caso deve ser projetado um novo teste hidrostático seguindo a norma de projeto do duto (ASME B31.4), otimizando os seguimentos de teste e elevando a pressão do teste a 90% do limite de escoamento mínimo especificado do material (SMYS). O teste hidrostático possui dois momentos, o primeiro no qual é testada a capacidade do duto de ser resistente a altas pressões e o segundo onde se verifica a estanqueidade assegurando que o duto não apresenta vazamentos no segmento em teste (Figura 10).



**Figura 10 – Cabeça do TH à esquerda e acompanhamento do TH à direita.**

### **3.3.**

#### **Construção de Duto Paralelo**

A construção de um duto em paralelo é uma solução onde a perda de carga diminui devido à duplicação de um ou de alguns trechos do duto, possibilitando o aumento da vazão.

É recomendável que o duto paralelo seja construído com o mesmo diâmetro do duto que está sendo ampliado. Desta maneira a velocidade do fluido em ambos

os ramais será a mesma durante a operação, evitando recirculações e refluxo quando ocorrer a junção “Y” no término do trecho duplicado.

Uma regra prática para esta avaliação é: caso almeje-se aumentar a vazão de um duto em X% com a instalação de um duto paralelo, com mesmo diâmetro e rugosidade, será necessário construir um trecho paralelo com aproximadamente os mesmos X% do comprimento do duto que se deseja ampliar, independente das pressões praticadas.

Esta alternativa de ampliação é pouco empregada em oleodutos, porém em gasodutos é utilizada freqüentemente. Um ponto negativo é a ocupação do espaço referente a um duto igual na faixa. Este espaço poderia ser utilizado para a construção de outro duto com diferente finalidade.

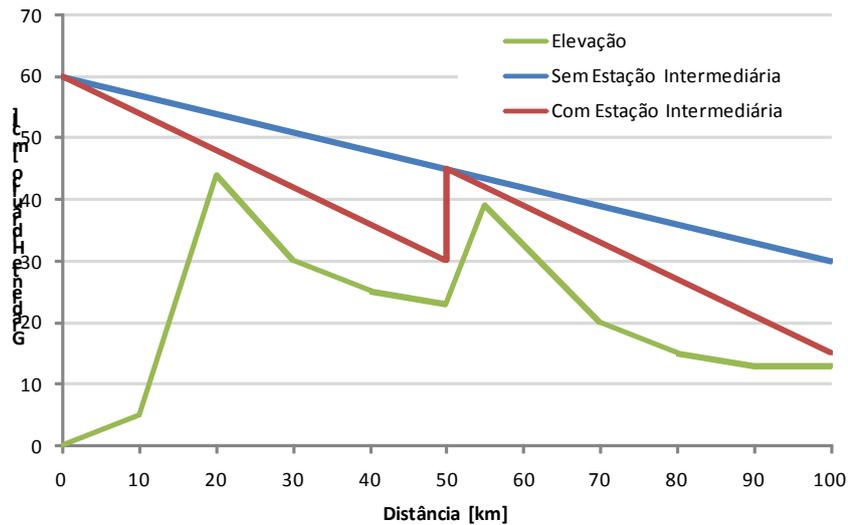
### **3.4.**

#### **Construção de Estação Intermediária**

A última alternativa de ampliação apresentada neste trabalho é a construção de estações intermediárias no duto. Com esta metodologia, consegue-se aumentar a vazão, pois a elevação da perda de carga devido ao aumento da vazão é compensada pela energia de bombeamento acrescentada pelas novas estações.

Como exemplo observe-se o caso da Figura 11, onde a linha verde representa o perfil de elevação de um duto imaginário, a linha azul representa o gradiente hidráulico de transferência direta, sem estação intermediária, e a linha vermelha o gradiente hidráulico da transferência com uma estação intermediária no quilômetro 50.

O gradiente hidráulico, também conhecido como *head*, é a pressão manométrica em cada ponto do duto convertida para metros de coluna de líquido (mcl) somada a elevação do ponto em metros. Desta forma, a pressão possui a mesma unidade da elevação facilitando a análise da condição operacional.



**Figura 11 – Gradiente Hidráulico sem e com Estação Intermediária.**

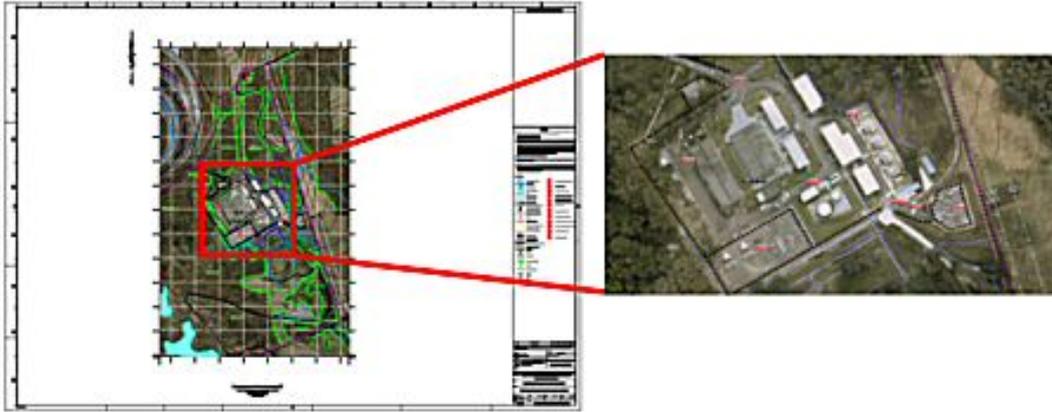
Observe que o *head* com a estação intermediária (linha vermelha) é menor do que o *head* sem a estação intermediária (linha azul). Isto quer dizer que o duto está trabalhando com pressões menores diminuindo o risco operacional.

Deve-se atentar também que o módulo da derivada, a inclinação do gradiente com a estação intermediária (linha vermelha) é maior do que a do gradiente sem a estação intermediária (linha azul). Isso mostra que a diferença de pressão no primeiro trecho (0 a 50km) e no segundo (50 a 100km) é maior do que as empregadas sem a estação intermediária. Por consequência, se o duto é o mesmo, sem e com estação intermediária, a vazão com a estação intermediária é maior.

Note que ambas as linhas de *head* da Figura 11 estão acima da linha de Elevação. Isso quer dizer que a condição operacional nos dois casos é a mesma, com coluna fechada. Se o *head* fosse igual à elevação em algum ponto do duto, a pressão neste ponto seria igual à pressão atmosférica ( $1,033\text{kgf/cm}^2$ ), que é maior do que a pressão de vapor média dos óleos ( $0,7\text{kgf/cm}^2$ ), portanto mantém a condição operacional de coluna fechada.

Está é uma boa solução, pois o duto opera com pressões menores do que as originais de projeto e atinge o objetivo de aumento de vazão, porém o consumo energético é maior do que nas outras alternativas apresentadas anteriormente. A

definição do ponto de instalação da estação intermediária deve ser feita com cautela, uma vez que as faixas e dutos passam por regiões isoladas onde pode não haver energia elétrica disponível com facilidade (Figura 12).



**Figura 12 – Exemplo de Estação Intermediária.**

## 4

### Redimensionamento do Sistema de Controle e de Segurança

Os dutos possuem equipamentos de controle e de segurança que são projetados para determinadas pressões, vazões e produtos. Com a ampliação, eles podem ficar sub-dimensionados impossibilitando o controle durante a operação normal e comprometendo a segurança do duto caso ocorra alguma falha mecânica, elétrica ou humana.

Tipicamente são utilizadas válvulas de controle (PCV), Figura 13, para ajustar a pressão de envio e de recebimento, a vazão e até a potência consumida pelo motor da bomba. Estas válvulas possuem atuadores associados a uma malha de controle proporcional, integral e derivativa (PID) e podem ser operadas remotamente em automático ou manual. Uma das suas atribuições é o controle de pressão durante a partida e a parada do duto de forma que não ultrapassem a PMOA e mantenham o duto sempre com coluna fechada.



Figura 13 – Exemplo de válvula de controle tipo esfera (PCV).

Os sistemas de segurança geralmente são compostos por válvulas de alívio de pressão (PRV – *Pressure Relief Valve*) e sistemas de intertravamento.

Geralmente os sistemas de alívio de pressão possuem mais de uma PRV e são instaladas em paralelo nas descargas das bombas e a montante da válvula de controle de recebimento. Caso ocorra algum transiente no duto que eleve a pressão acima do ponto de ajuste (*setpoint*), a válvula abre e alivia a pressão escoando o fluido para um tanque de alívio. Após o alívio de pressão a válvula volta a fechar.

Para a determinação dos ajustes e capacidades das válvulas de alívio são realizados estudos termohidráulidos em simuladores de transientes utilizando-se de possíveis cenários de falhas, tais como: fechamento indevido das válvulas motorizadas, fechamento por vandalismo de válvulas intermediárias não motorizadas e desligamento repentino das bombas.

Existem diversos tipos de válvula de alívio de pressão, porém a mais comum é a de mola que são normalizadas pela ASME VIII (*American Society of Mechanical Engineers*) ou pela API 520 (*American Petroleum Institute*), Figura 14.



**Figura 14 – Exemplo de válvula de alívio de pressão tipo mola.**

Os sistemas de intertravamento monitoram algumas variáveis do duto e são programados para que certas tarefas sejam executadas automaticamente quando uma ou mais condições forem satisfeitas. Dois exemplos são: o monitoramento da pressão de descarga das bombas, onde se ultrapassar uma determinada pressão as

bombas desligam automaticamente, e a condição que a bomba só liga quando as válvulas de bloqueio de sucção e descarga dela estiverem abertas.

## 5

### Consumo Energético do Sistema

O consumo energético do sistema vai aumentar de acordo com as novas condições operacionais após a ampliação. Quando se deseja transportar um fluido mais viscoso ou com uma vazão maior, a quantidade de energia despendida também aumenta. Isto ocorre devido ao aumento da pressão de descarga quando o fluido é mais viscoso do que o atual e pela potência depender linearmente da vazão.

É interessante avaliar o consumo de energia das bombas em todas as alternativas de ampliação estudadas, observando a potência consumida pelas bombas através da Equação 1.

**Equação 1 – Potência absorvida na bomba.**

$$Pot_{absorvida} = \frac{\left(\frac{Q}{3600}\right) \left(\frac{(P_{descarga} - P_{sucção}) 98060,37}{g}\right)}{\eta}$$

$$, \text{ onde: } \begin{cases} Pot_{absorvida} \rightarrow \text{Potência absorvida [W] ou [0,00134102 2 HP]} \\ Q \rightarrow \text{Vazão [m}^3 / \text{h]} \\ P \rightarrow \text{Pressão [kgf / cm}^2\text{]} \\ g \rightarrow \text{Força gravitacional [m / s}^2\text{]} \\ \eta \rightarrow \text{Eficiência [\%]} \end{cases}$$

Conhecendo a potência absorvida em cada bomba para todos os regimes permanentes estudados, basta multiplicá-la pelo número de bombas em cada alternativa e relacionar as potências totais consumidas para cada caso. Desta forma será possível mensurar o aumento no custo de transporte por volume e calcular o tempo de recuperação do investimento.

## 6

### Avaliação Econômica do Investimento

A estimativa de um investimento é baseada na sua capacidade de prover fluxos de caixa no futuro, ou melhor, de gerar renda. Logo, as alternativas da ampliação podem ser comparadas somente se a capacidade de prover recursos forem medidas em um instante comum de tempo. Os investimentos possuem como característica uma variação do fluxo de caixa com o tempo, portanto, os critérios de avaliação econômica devem considerar a atualização desses fluxos.

Entre os métodos mais difundidos de avaliação estão: o método do Valor Presente Líquido (VPL) e o da Taxa Interna de Retorno (TIR). Outro método também muito utilizado é o método do Pay-back, que proporciona uma idéia do tempo de recuperação do investimento.

O objetivo do método VPL é encontrar projetos ou alternativas de investimento que valham mais do que custam, projetos que tenham um VPL positivo. A sua finalidade é valorar como valor presente o impacto dos eventos futuros associados a um projeto ou alternativa de investimento; ou seja, mede o valor presente da renda gerada pelo projeto ao longo da sua vida útil. O valor presente líquido é calculado através da Equação 2.

#### Equação 2 – Valor Presente Líquido (VPL).

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+K)^t} \quad , \text{ onde: } \begin{cases} I \rightarrow \text{Investimento inicial} \\ n \rightarrow \text{Anos de operação} \\ FC \rightarrow \text{Fluxo de caixa} \\ K \rightarrow \text{custo do capital [\%]} \end{cases}$$

Para estimar o montante inicial do investimento ( $I$ ) aplicado na ampliação, orça-se à grosso modo com fornecedores próximos do local onde o duto está instalado ou realiza-se uma busca no departamento financeiro pelos valores referentes às compras de materiais e contratações de serviços semelhantes aos que serão necessários.

Para se compreender a ordem de grandeza dos valores, são relacionados na Tabela 1 alguns materiais e serviços com valores médios de 2007.

**Tabela 1 – Custo médio de materiais e serviços em 2007.**

<b>Descrição</b>	<b>Material</b>	<b>Serviço</b>	<b>Total</b>
Válvula esfera de 24" de 600#	US\$100 000.00	US\$150 000.00	<b>US\$250 000.00</b>
Drenagem e limpeza do duto	US\$10 000.00	US\$140 000.00	<b>US\$150 000.00</b>
Motor elétrico de 3000HP	US\$290 000.00	US\$80 000.00	<b>US\$370 000.00</b>
Motor elétrico de 2500HP	US\$240 000.00	US\$70 000.00	<b>US\$310 000.00</b>
Motobomba centrífuga de 2500HP	US\$1 500 000.00	US\$500 000.00	<b>US\$2 000 000.00</b>
Teste Hidrostático por km	US\$1 000.00	US\$50 000.00	<b>US\$51 000.00</b>
Projeto	-	US\$1 500 000.00	<b>US\$1 500 000.00</b>

Para uma primeira estimativa de custo da troca de trechos de duto é comum utilizar o valor do “metropol”, que é o custo de compra e instalação por metro vezes o diâmetro em polegadas do duto. Em 2007, o “metropol” estava em média US\$8.33, isso quer dizer que para trocar 100km de duto com 24" de diâmetro seriam necessários aproximadamente US\$20 000 000.00 (vinte milhões de dólares americanos).

Para finalizar o levantamento do valor do investimento aplicado ( $I$ ), somam-se os valores de materiais ( $VT_{material}$ ) com os valores dos serviços necessários ( $VT_{serviços}$ ), conforme a Equação 3.

### Equação 3 – Valor do Investimento Aplicado.

$$I = VT_{material} + VT_{serviços}$$

O fluxo de caixa (FC) pode ser estimado pela Equação 4 que depende da vazão, do Fator de Utilização (FU), do valor de tarifa por unidade de volume e do custo energético e operacionais. Pode-se utilizar como uma primeira estimativa do custo operacional o valor de 30% do custo energético.

### Equação 4 – Fluxo de Caixa.

$$FC = (Vazão.FU.Valor da Tarifa.365dias.24h) - (Custo_{energético} / ano + Custo_{operacional} / ano)$$

O valor médio da tarifa do metro cúbico transportado foi de R\$ 14,08 mais impostos para produtos claros em fevereiro de 2008. Para petróleo e escuros, estima-se que seja em torno de 10 a 20% deste valor.

A Taxa Interna de Retorno (*TIR*) é a taxa de retorno esperada do projeto de investimento. O seu método tem como objetivo encontrar uma taxa intrínseca de rendimento. A regra decisória a ser seguida no método é: empreenda o projeto se a *TIR* exceder o custo do capital (se  $TIR > K$ ).

Matematicamente, ela é calculada pela Equação 5, onde *TIR* é o valor que satisfaz a equação.

### Equação 5 – Taxa Interna de Retorno (TIR).

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1 + TIR)^t}$$

O tempo de recuperação do investimento ou Pay-back mede quantos anos decorrerão até que o valor presente dos fluxos de caixa previstos se iguale ao

montante do investimento inicial ( $I$ ). Ele é muito útil na comparação das alternativas de ampliação.

O tempo do retorno do investimento realizado ( $T$ ) é calculado através da Equação 6.

**Equação 6 – Tempo de Retorno de Investimento (Pay-back).**

$$I = \sum_{t=1}^T \frac{FC}{(1 + K)^t}$$

## 7

### Medições da Utilização do Duto

É importante quantificar o quanto um duto está sendo utilizado em relação ao tempo disponível de operação. Existem basicamente duas formas de medir a utilização de um duto. A primeira, mais simples, é o Fator de Utilização do duto e a segunda é o Fator de Recuperação de Estoque atrelado a uma determinada movimentação.

O Fator de Utilização (*FU*) pode considerar ou não a parada do duto no horário de ponta (Equação 7 e Equação 8). O horário de ponta (*HP*) é o período de três horas durante o dia (Figura 15), com exceção de sábados, domingos e feriados nacionais, no qual o consumo de energia elétrica está em seu ápice, aumentando fortemente a carga demandada do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Por isso, neste período a energia elétrica tem um preço significativamente maior, implicando em um alto custo de energia durante a operação. O valor esperado de projeto para o *FU* é de 85%.

Fora da Ponta 00:00 – 17:30	Horário de Ponta 17:30 - 20:30	Fora de Ponta 20:30 – 24:00
--------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------

Figura 15 – Horário de ponta.

#### Equação 7 – *FU* operando no *HP*.

$$FU \text{ operando no } HP[\%] = \frac{\text{Tempo da Operação}[h]}{24h} \cdot 100$$

#### Equação 8 – *FU* sem operar no *HP*.

$$FU \text{ sem operar no } HP [\%] = 1,125 \cdot FU \text{ operando no } HP[\%]$$

O Fator de Recuperação de Estoque (*FRE*) contempla o tempo de parada no horário de ponta ( $T_{hp}$ ) e o tempo para procedimentos de parada e partida do oleoduto ( $T_{pp}$ ). Também é considerada a disponibilidade de projeto ( $F_d$ ), que é sugerido o valor de 95%. É esperado no projeto que o *FRE* fique entre 1,1 e 1,2.

**Equação 9 – Fator de Recuperação de Estoque (FRE).**

$$FRE = \frac{Vazão [m^3 / h]}{\frac{Volume a ser transferido[m^3 / d]}{\left(24[h] - \left(\frac{T_{hp}[h / semana] + T_{pp}[h / semana]}{7}\right)\right)} F_d}$$

Caso identifique-se que o duto está subutilizado, prova-se que é melhor adicionar mais um turno de trabalho ao invés de investir em aumento da capacidade de transferência dos equipamentos. O investimento realizado para uma ampliação de um duto é muito superior ao custo da adição de mais um turno de trabalho.

## 8

### Apresentação dos Dutos Estudados

No primeiro caso estudado, denominado **Duto A**, desejava-se transferir produtos com viscosidade até 130% maior do que a do atual e com uma vazão 10% maior do que as utilizadas no projeto do duto. Foram estudadas duas alternativas para atender as novas condições de transferência.

No estudo do segundo caso, denominado **Duto B**, a ampliação também visava permitir a transferência de novos elenos de petróleo considerando também um aumento da vazão. Foram estudadas três alternativas para atender a estes requisitos.

#### 8.1.

##### Duto A

O Duto A atual opera com arranjo de 2 bombas auxiliares e 3 principais na Estação de Envio (EE) e 1 principal na Estação Intermediária (EI), arranjo  $2A_{EE}+3P_{EE}+1P_{EI}$ , e possui a seguinte configuração:

- **Estação de Envio (EE)**
  - 1 tanque
  - 3 bombas auxiliares em paralelo
  - 4 bombas principais em série
  - 1 válvula de controle de pressão na descarga de cada bomba
- **Trecho de duto EE-EI com 24"**
- **Estação Intermediária (EI)**

- *By-pass* da estação
  - 2 bombas principais em série
  - 1 válvula de controle de pressão a jusante de cada bomba
- **Trecho de duto EI-ER com 24”**
  - **Estação de Recebimento (ER)**
    - 4 válvulas de alívio de pressão a montante
    - 1 válvula de controle de pressão
    - 1 tanque

O fluxograma do modelo utilizado no programa de simulação termohidráulico para simular a condição atual do duto é apresentado na Figura 16.

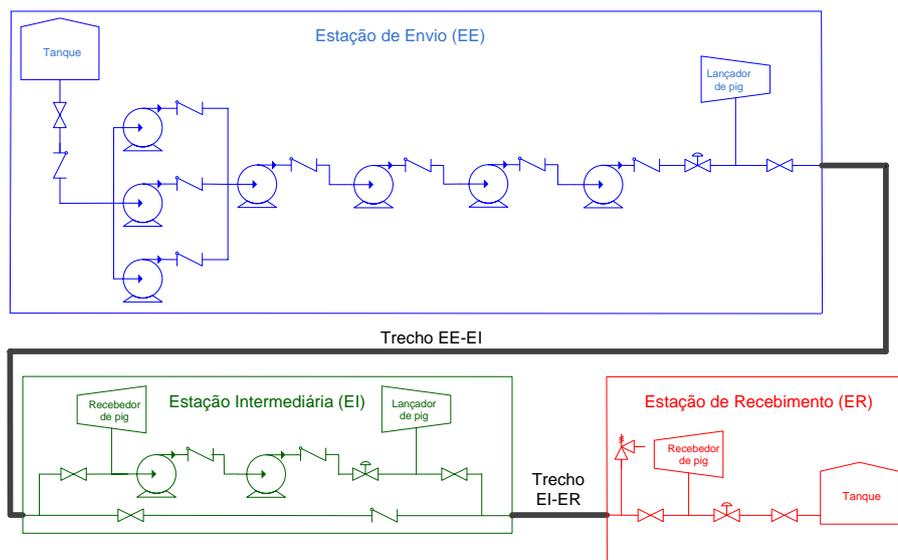
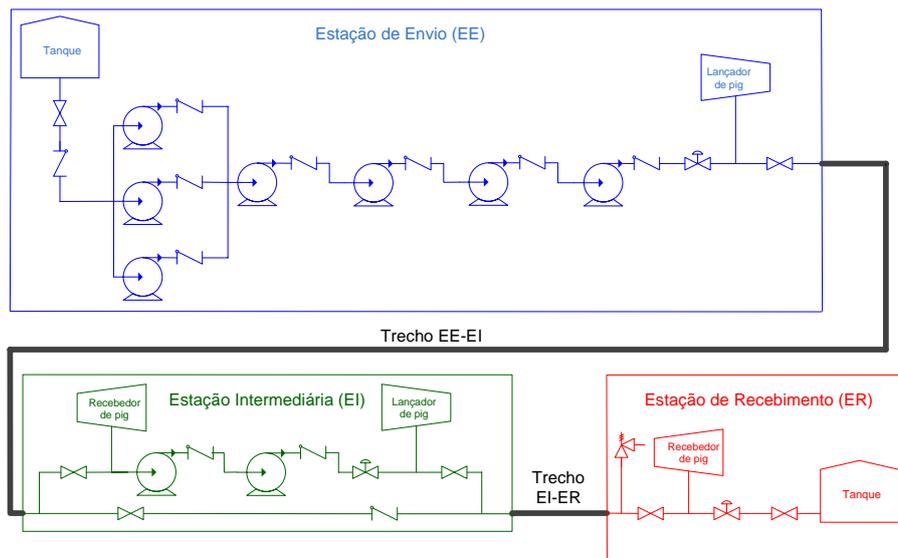


Figura 16



**Figura 16 – Fluxograma do Duto A.**

## 8.2.

### Duto B

O perfil de elevação do Duto B é ascendente e bastante acidentado. Existem no duto duas estações intermediárias para vencer a diferença de altitude entre a origem e o destino. A configuração atual opera com arranjo de 1 bomba auxiliar e 3 principais na estação de envio (EE), 3 principais na primeira estação intermediária (EI1) e 4 principais na segunda estação intermediária (EI2), arranjo  $1A_{EE}+3P_{EE}+3P_{EI1}+4P_{EI2}$ , da seguinte forma:

- **Estação de Envio (EE)**

- 1 tanque
- 2 bombas auxiliares em paralelo
- 4 bombas principais também em paralelo
- 1 válvula de controle de pressão na descarga de cada bomba
- 4 válvulas de alívio de pressão a jusante do lançador de pig

- **Trecho de duto EE-EI1 com 24”**
- **Estação Intermediária (EI1)**
  - 4 válvulas de alívio de pressão a montante da estação
  - 4 bombas principais em paralelo
  - 1 válvula de controle de pressão a jusante de cada bomba
  - 4 válvulas de alívio de pressão a jusante da estação
- **Trecho de duto EI1-EI2 com 24”**
- **Estação Intermediária (EI2)**
  - 4 válvulas de alívio de pressão a montante da estação
  - 5 bombas principais em paralelo
  - 1 válvula de controle de pressão a jusante das bombas
  - 4 válvulas de alívio de pressão a jusante da estação
- **Trecho de duto EI2-ER com 24”**
- **Estação de Recebimento (ER)**
  - 4 válvulas de alívio de pressão a montante
  - 1 válvula de controle de pressão
  - 1 tanque

O fluxograma do modelo utilizado no programa de simulação termohidráulico para simular a condição atual do duto é apresentado na Figura 17

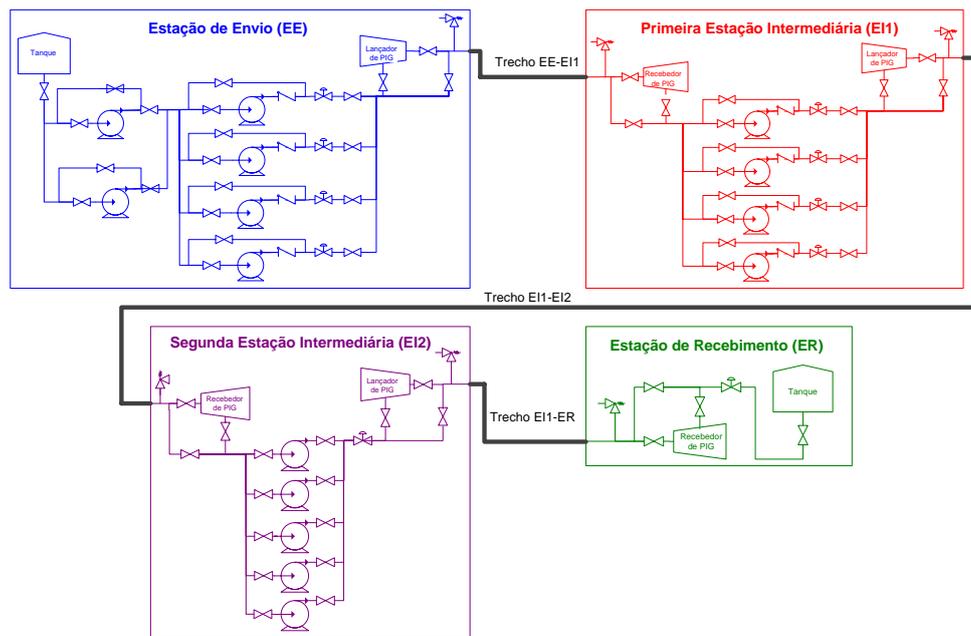


Figura 17 – Fluxograma do Duto B.

## 9

### Resultados

Para simular o escoamento termohidráulico e obter os resultados das alternativas estudadas foi utilizado o programa comercial Stoner Pipeline Simulator 9.6 (SPS) da Advantica, comumente adotado no mercado.

#### 9.1.

##### Duto A

O Gradiente hidráulico (*Head*) da situação atual do Duto A, em regime permanente (RP), transportando o produto  $P_A$ , com de densidade 0,872 e viscosidade de 19,4cSt à 20°C, é apresentado na Figura 18. O duto possui uma vazão de 1800m<sup>3</sup>/h operando com o arranjo 2A<sub>EE</sub>+3P<sub>EE</sub>+1P<sub>EI</sub> na condição de coluna fechada, pois o *Head* é maior do que a Elevação ao longo de toda a sua extensão. O consumo total de potência nas bombas é igual a 5,6 MW.

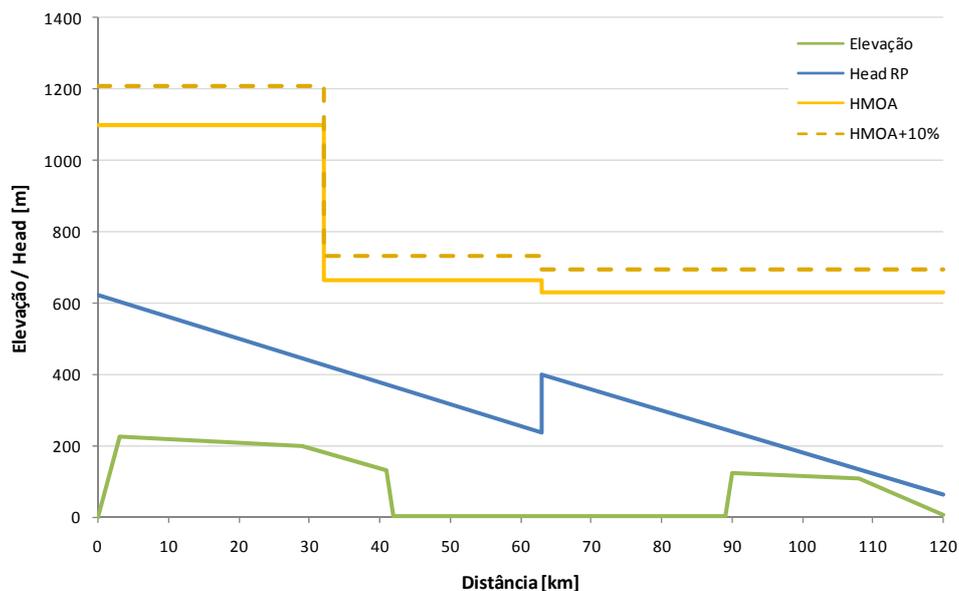


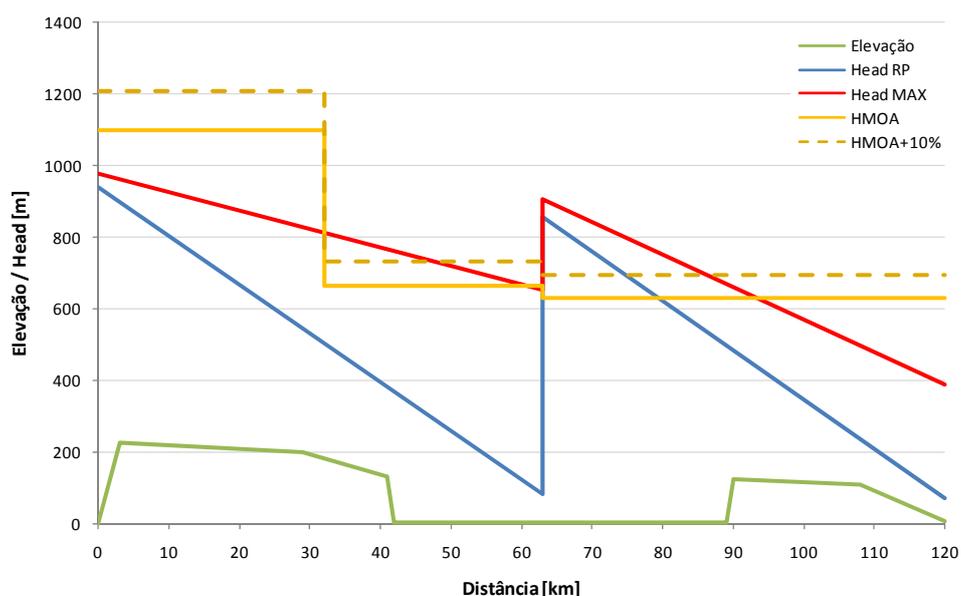
Figura 18 – Gradiente hidráulico atual do Duto A.

Deseja-se transferir produtos com viscosidade de até 130% maior do que a do produto atual e com uma vazão 10% maior do que as utilizadas no projeto do duto.

Foram estudadas duas alternativas para atender as novas condições de transferência. Na primeira (A1), as bombas atuais da estação de envio são aproveitadas na estação intermediária e instalam-se quatro bombas novas e mais potentes na estação de envio. Na segunda (A2), todas as bombas da estação intermediária são trocadas por bombas novas mais potentes e as bombas da estação de envio são mantidas. Ambas as alternativas operam com o arranjo de 2 bombas auxiliares e 4 principais na estação de envio (EE) e 3 principais na estação intermediária (EI).

Na alternativa A1, em regime permanente, transportando o produto  $P_{A1}$ , 130% mais viscoso, obtém-se uma vazão de  $1934\text{m}^3/\text{h}$  operando com o arranjo  $2A_{EE}+4P_{EE}+3P_{EI}$  na condição de coluna fechada.

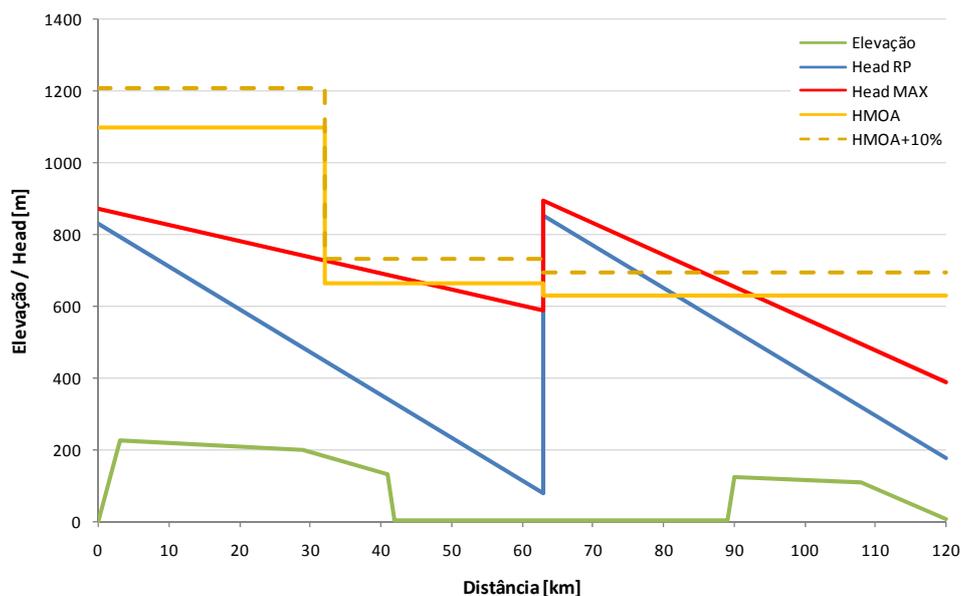
O *head* de regime permanente (Head RP) e o *head* máximo (Head MAX), de todos os possíveis cenários de falhas, são apresentados na Figura 19, onde a HMOA é a PMOA convertida para metro de coluna de líquido.



**Figura 19 – Gradiente hidráulico da alternativa A1.**

A norma ASME B31.4 diz que a pressão de regime permanente não pode ultrapassar a PMOA e que a pressão de transientes de possíveis falhas não pode ultrapassar a PMOA mais 10%, logo o Head RP não pode ser maior do que HMOA e o Head MAX não pode ser maior do que a HMOA mais 10% (HMOA+10%).

Na alternativa A2, em regime permanente, transportando o produto  $P_{A1}$ , 130% mais viscoso, obtém-se uma vazão de 1890m<sup>3</sup>/h operando com o arranjo  $2A_{EE}+4P_{EE}+3P_{EI}$  na condição de coluna fechada. O *head* de regime permanente (Head RP) e o *head* máximo (Head MAX), de todos os possíveis cenários de falhas, são apresentados na Figura 20



**Figura 20 – Gradiente hidráulico da alternativa A2.**

Com o intuito de economizar na compra de novas bombas, ambas as alternativas estudadas aproveitaram as bombas da estação de envio, entretanto a substituição de trechos de dutos e o redimensionamento do sistema de segurança foram inevitáveis. Na primeira (A1), verificou-se que 45% do duto deveriam ser trocados e na segunda (A2) 29%, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do Duto A.

Alternativas Estudadas		FU/dia operando no HP	FU/dia sem operar no HP	FRE	Potência consumida nas bombas	% km para troca
A1	Bombas da EE na EI e bombas novas na EE	82%	92%	1,03	11,35 MW	45%
A2	Bombas novas na EI e bombas atuais na EE	84%	94%	1,01	12,44 MW	29%

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em seu relatório anual de balanço energético de 2007 com ano base de 2006, o preço médio nacional corrente de eletricidade industrial foi de US\$122.00. Supondo-se que foi realizada uma pesquisa de mercado onde se estimou a tarifa por metro cúbico transportado de US\$1.00 para os produtos destas alternativas. Verificou-se através da análise econômica que as alternativas tiveram custos de implantação tão altos, Tabela 3, que a opção de construção de um novo duto paralelo com maior capacidade de transferência mostrou-se tão atraente quanto a ampliação do antigo duto.

Tabela 3 – Avaliação econômica das alternativas do Duto A.

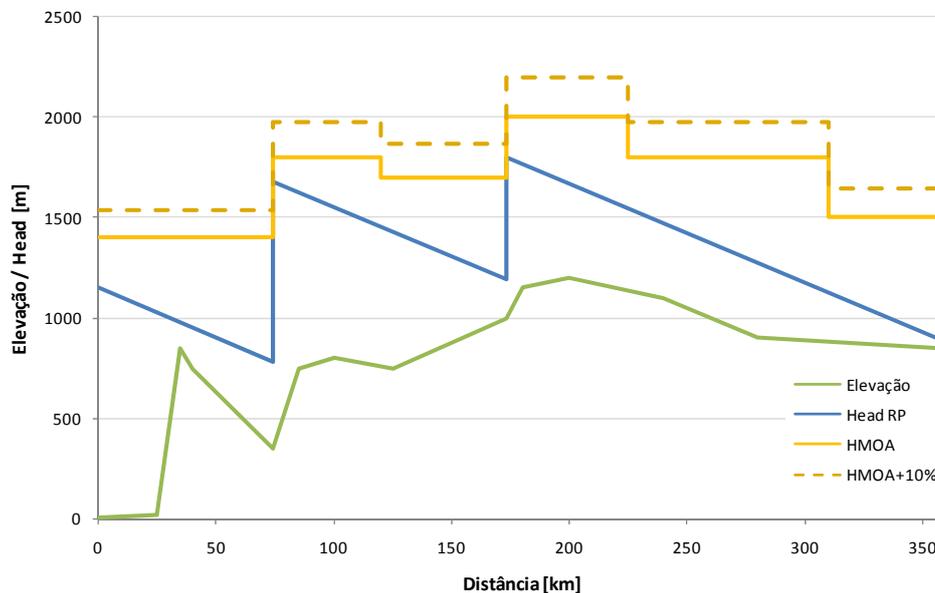
Alternativa	Investimento (I)	VPL para 25 anos com K = 8,5% (deve ser > 0)	TIR (deve ser > K)	Pay-back (deve ser < 25 anos)
A1	US\$ 23 839 680.00	US\$1 023 137.70	13,17%	23 anos
A2	US\$ 15 022 016.00	- US\$30 766 795.94	- ∞ %	> 30 anos

## 9.2.

### Duto B

O Gradiente hidráulico (Head) da situação atual do Duto B, em regime permanente (RP), transportando o produto P<sub>B</sub>, com de densidade 0,891 e viscosidade de 53,5cSt à 20oC, é apresentado na Figura 21. O duto possui uma

vazão de  $1300\text{m}^3/\text{h}$  operando com o arranjo  $1A_{EE}+3P_{EE}+3P_{EI1}+4P_{EI2}$  na condição de coluna fechada. O consumo total de potência nas bombas é igual a  $12,14\text{ MW}$ .



**Figura 21 – Gradiente hidráulico atual do Duto B.**

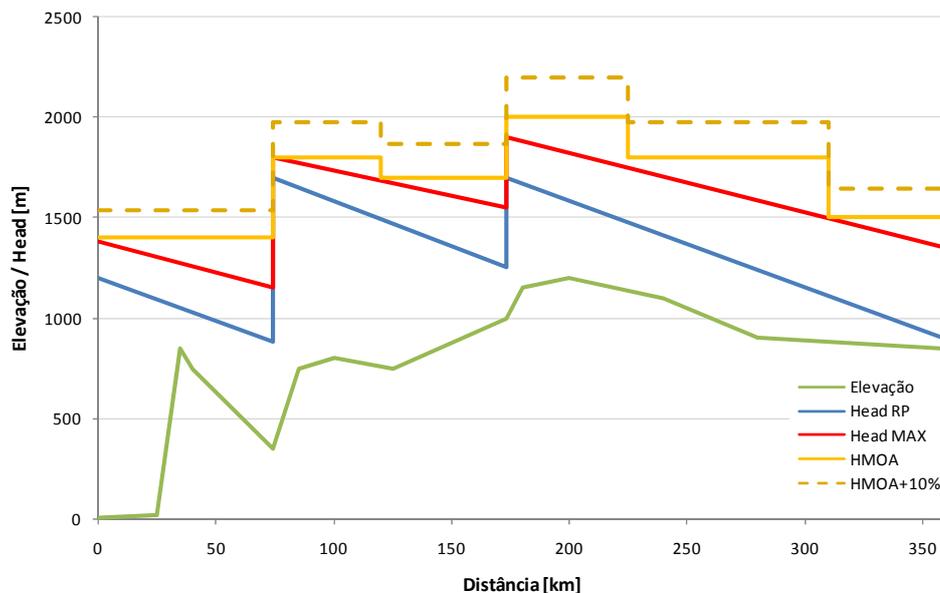
No Duto B, a ampliação visa permitir a transferência de novos elencos de petróleos considerando também um aumento da vazão, sem necessitar trocar trechos de duto.

Foram estudadas três alternativas para atender a estes requisitos. Na primeira (B1), tem-se um petróleo cinco vezes mais viscoso que o atual, e uma vazão 10% menor que a atual. Na segunda (B2), utiliza-se o mesmo petróleo do primeiro caso, mas com uma vazão 20% maior. Na terceira (B3), usa-se um petróleo três vezes mais viscoso que o atual e uma vazão 20% maior.

Na alternativa B1, foi possível manter o duto existente mesmo retirando os controles de pressão do duto. A vazão requerida é atingida, mas o duto encontra-se no seu limite de capacidade de transferência.

Em regime permanente, transportando o produto  $P_{B1}$ , 500% mais viscoso, obtém uma vazão de  $1185\text{m}^3/\text{h}$  operando com o arranjo  $1A_{EE}+3P_{EE}+3P_{EI1}+4P_{EI2}$

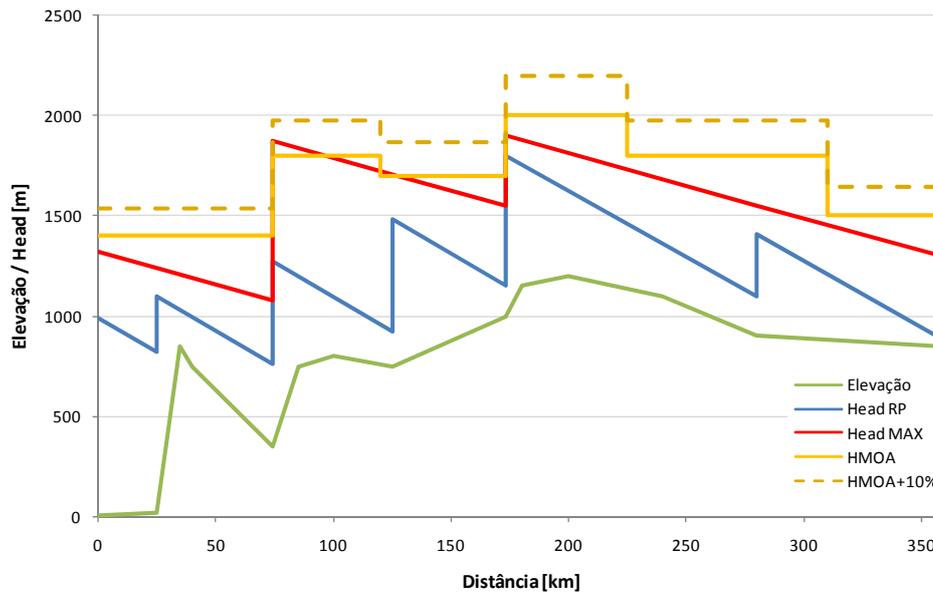
na condição de coluna fechada e sem as válvulas de controle de pressão das descargas das bombas estarem atuando. O *head* de regime permanente (Head RP) e o *head* máximo (Head MAX), de todos os possíveis cenários de falhas são apresentados na Figura 22.



**Figura 22 – Gradiente hidráulico da alternativa B1.**

Para atender as premissas da alternativa B2 foi necessário prever a instalação de três novas estações de bombeamento intermediárias e a troca de bombas numa das antigas estações. Nos transientes de cenários de falhas foi percebida a necessidade de refazer o Teste Hidrostático (TH) de 7% do duto dividido em dois trechos para elevar a PMOA.

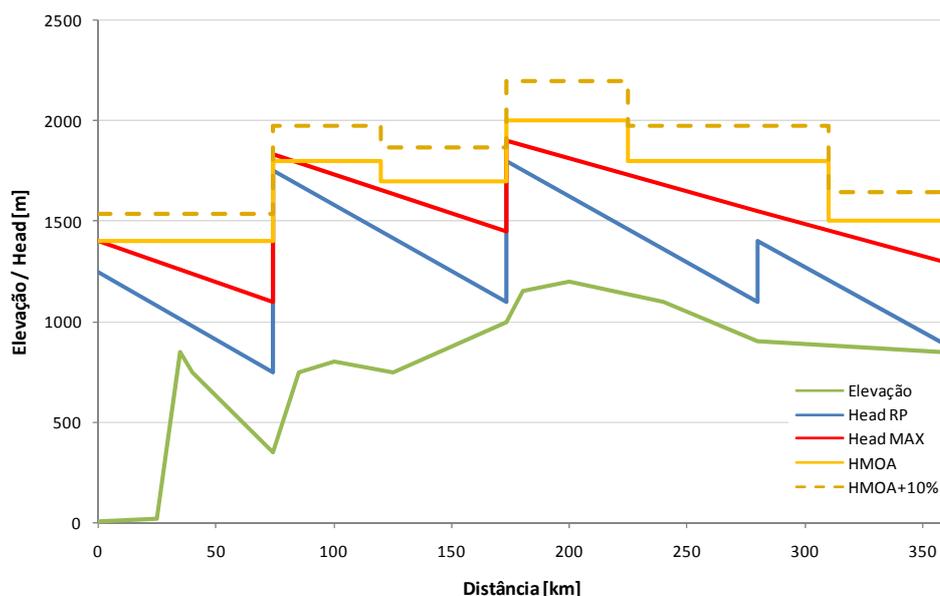
Em regime permanente, transportando o produto  $P_{B1}$ , 500% mais viscoso, obtém-se uma vazão de  $1500\text{m}^3/\text{h}$  operando com o arranjo  $1A_{EE}+3P_{EE}+3P_{EI1}+3P_{EI2}+3P_{EI3}+4P_{EI4}+2P_{EI5}$  na condição de coluna fechada. O *head* de regime permanente (Head RP) e o *head* máximo (Head MAX), de todos os possíveis cenários de falhas são apresentados na Figura 23.



**Figura 23 – Gradiente hidráulico da alternativa B2.**

Para atender as premissas da alternativa B3 foi necessário prever a instalação de uma nova estação de bombeamento intermediária, a usinagem dos rotores das bombas na estação de envio e a troca das bombas numa das antigas estações. Nos transientes de cenários de falhas foi percebida a necessidade de refazer o TH de 2,8% do duto em um trecho.

Em regime permanente, transportando o produto  $P_{B2}$ , 300% mais viscoso, obtém uma vazão de  $1500\text{m}^3/\text{h}$  operando com o arranjo  $1A_{EE}+3P_{EE}+3P_{EI1}+4P_{EI2}+3P_{EI3}$  na condição de coluna fechada. O *head* de regime permanente (Head RP) e o *head* máximo (Head MAX), de todos os possíveis cenários de falhas são apresentados na Figura 24.



**Figura 24 – Gradiente hidráulica da alternativa B3.**

A Tabela 4 resume os resultados obtidos em cada alternativa.

**Tabela 4 – Resultados do Duto B.**

Alternativas Estudadas		FU/dia operando no HP	FU/dia sem operar no HP	FRE	Potência consumida nas bombas	% km para TH
B1	Bombas atuais com produto 5 vezes mais viscoso. (90% da vazão atual)	84%	95%	1,12	14,02 MW	0%
B2	Mais 3 EI com produto 5 vezes mais viscoso. (120% da vazão atual)	83%	91%	1,14	25,42 MW	7%
B3	Mais 1 EI com produto 3 vezes mais viscoso. (120% da vazão atual)	83%	93%	1,20	15,23 MW	2,8%

Utilizando o preço médio nacional em 2006 de eletricidade industrial de US\$122.00 e supondo-se que foi realizada uma pesquisa de mercado onde se estimou a tarifa por metro cúbico transportado de US\$2.00 para os produtos

destas alternativas. Verificou-se através da análise econômica de investimento, Tabela 5, que a alternativa B3 deverá ser escolhida, pois ela proporciona um aumento de 20% em relação à vazão atual além de possuir a maior TIR. O fato da vazão na alternativa B3 ser maior faz com que seja possível movimentar maiores volumes de produtos ou oferecer maiores intervalos de tempo para manutenção no duto, diminuindo assim a possibilidade de paralisação na transferência.

**Tabela 5 – Avaliação econômica das alternativas do Duto B.**

<b>Alternativa</b>	<b>Investimento (I)</b>	<b>VPL para 25 anos com K = 8,5% (deve ser &gt; 0)</b>	<b>TIR (deve ser &gt; K)</b>	<b>Pay-back (deve ser &lt; 25 anos)</b>
B1	US\$ 3 180 000.00	US\$24 897 737.70	858,00%	3 anos
B2	US\$ 13 436 000.00	-US\$178 307 055.74	- ∞ %	> 30 anos
B3	US\$ 5 351 000.00	US\$129 525 844.00	2634,84%	1 ano

## 10

### Conclusões

As alternativas apresentadas para realizar a ampliação da capacidade de um duto são a substituição das bombas, a substituição de trechos do duto, a construção de um duto paralelo, a construção de estações intermediárias e até a construção de um duto novo.

Os casos estudados tiveram como objetivo minimizar a troca de trechos de duto, devido às dificuldades e custos inerentes a uma obra desta natureza, e aproveitar o maior número de bombas atuais. Desta forma, minimiza-se o valor total investido no empreendimento.

Quando as projeções de ampliação são feitas, deve-se estar sempre atento a realidade do duto. No caso onde foi necessária a instalação de estações intermediárias, a localização não foi escolhida somente devido às características hidráulicas, mas em locais onde era possível instalá-las por questões ambientais, de infra-estrutura e de localização de propriedades privadas.

O que deve ser analisado não é apenas o valor do investimento, precisa-se analisar o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno e o Tempo de Retorno de Investimento ou *Pay-back*, que contemplam o valor de investimento, o fluxo de caixa da operação após a ampliação e o custo do capital empregado.

Deve-se ressaltar que o estudo hidráulico e econômico é parte do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA), utilizado para auxiliar na decisão da melhor alternativa de ampliação.

Concluí-se que cada duto converge para uma solução própria, pois se trata de um estudo com muitas variáveis técnicas, econômicas e ambientais, além de diversas variáveis de caráter político.

## Referências Bibliográficas

BRUNO G. SILVA, LUIS FERNANDO G. PIRES e LEONARDO M. CARNEIRO - **Análise das Variáveis Relacionadas ao Projeto de Operação de Oleodutos com Coluna Cheia, IBP1149\_07**, Rio Oil & Gas 2007, Rio de Janeiro, 2007.

CARLOS HEITOR, PROF. – **Apostila do Curso Técnicas Avançadas em Gestão Logística**, COOPEAD – UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

CARLOS PATRICIO SAMANEZ, PROF. - **Apostila do Curso de Economia da Engenharia**, Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

EDSON EZEQUIEL DE MATTOS E REINALDO DE FALCO - **Bombas Industriais**, 2ª Ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 1998.

EPE (Empresa Pesquisa Energética) - **Balanco Energético Nacional 2007, ano base 2006 – BEM 2007**; EPE, Ministério de Minas e Energia e Governo Federal, 2007.

PETROBRAS TRANSPOTE S.A., TRANSPETRO - **Pipelines: from the beginning to the end**, 1ª Ed., PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2007.

PUC-RIO - **Apostilas do Curso de Pós-Graduação de Engenharia de Dutos**, Departamento de Engenharia Mecânica e Coordenação Central de Extensão, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.

ROBERT W. FOX & ALAN T. MCDONALD - **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 5ª Ed., LTC Editora, Rio de Janeiro, 2001.

SIDNEY STUCKENBRUCK, PHD - **Escoamento em Dutos**, Departamento de Engenharia Mecânica e Coordenação Central de Extensão, PUC-Rio; Programa de Recursos Humanos, Agência Nacional do Petróleo, Rio de Janeiro, 2007.