



IBP1997_08

ESTUDO TERMOHIDRÁULICO PARA AMPLIAÇÃO DE
CAPACIDADE DE OLEODUTOS
Leonardo Motta Carneiro¹, Philipe Barroso Krause²,
Luis Fernando G. Pires³, Antônio Geraldo de Souza⁴

Copyright 2008, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008*, realizada no período de 15 a 18 de setembro de 2008, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008*.

Resumo

Este trabalho tem o intuito de orientar e ajudar a elaboração de um estudo de ampliação da capacidade de transferência de um oleoduto. É demonstrado que cada duto converge para uma solução própria, pois se trata de um sistema com muitas variáveis técnicas, econômicas e ambientais, além de diversas variáveis de caráter político.

Abstract

This paper intent to assist the development of a oil pipeline expansion study. It will show that each pipeline has it's own solution, because it has several variables of technical, economical and environmental order, as well as several ones of political nature.

1. Introdução

Nos últimos dez anos verificou-se um aumento expressivo nas reservas e na produção de petróleo no Brasil. O consumo de derivados vem acompanhando esta elevação 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, - desde o projeto conceitual até a entrada em operação - 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 da demanda destes combustíveis surge a necessidade de ampliar a malha de transporte.

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 ou de seus acionadores, construção de estações intermediárias, redimensionamento do sistema de segurança, mudança da composição das misturas, utilização de redutores de atrito ou, em último caso, 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 estes estudos, são solicitadas aos Órgãos Ambientais competentes as licenças (autorizações) para construção, operação, etc.

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

¹ Engenheiro Mecânico - SIMDUT – PUC-Rio

² Engenheiro Mecânico - SIMDUT – PUC-Rio

³ PHD, Engenheira Mecânico - SIMDUT – PUC-Rio

⁴ Engenheiro - PETROBRAS TRANSPORTE S.A.

alternativas, os problemas encontrados e a razão das decisões tomadas. Será demonstrado ainda que cada duto exige abordagem própria, pois possui diversas peculiaridades que impossibilitam a generalização da metodologia aplicada nas diversas simulações termo-hidráulico, tanto para análise do regime permanente, quanto para análise dos transientes.

2. Parâmetros

Antes de estudar e projetar a ampliação de um duto deve-se fazer o levantamento minucioso das características físicas e técnicas 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 das instalações

A verificação da integridade estrutural do duto é obtida através dos históricos de operação, inspeção e manutenção. O perfil de elevação do duto, com espessuras de parede e materiais é um documento fundamental para os estudos; normalmente faz parte da documentação de projeto do duto, mas também pode ser obtido com a passagem de pig instrumentado com modulo inercial que, além de registrar anomalias, fornece o perfil de elevações do duto com localização dos acessórios – válvulas, vents, etc. – e das mudanças de espessuras de parede dos tubos.

O levantamento da documentação dos últimos testes hidrostáticos realizados também é relevante, pois as pressões de teste hidrostático aplicadas em cada ponto do duto em conjunto com os materiais e espessuras de parede e verificações da integridade estrutural definem a PMOA (Pressão Máxima Operacional Admissível) atual do duto. Com estes documentos será possível definir, após o estudo termohidráulico e obtenção do novo envelope de pressões máximas, 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 a descrição de alguns equipamentos são essenciais, tais como: tanques; bombas; acionadores; válvulas de bloqueio, de retenção, de controle e de alívio de pressão; sistemas de controle e intertravamento.

2.2. Plano de Movimentações de Produto

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.

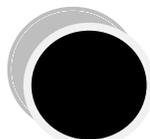
2.3. Vazão, Produtos e Misturas

A vazão requerida está diretamente relacionada aos novos volumes necessários de serem transportados e o fator de utilização (folga) desejável; 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; produtos mais viscosos, por exemplo, irão exigir maior potencia de bombeamento. Para facilitar o escoamento de 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. 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 1).

Seção Transversal com Coluna Fechada



Seção Transversal com Coluna Aberta



Figura 1 – Representação da seção transversal com coluna fechada e aberta.

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

Na operação com coluna fechada, os sistemas de detecção de vazamento conseguem resolver o cálculo do balanço de massa com uma grande precisão e identificam eventuais 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 ao mesmo tempo e pressões mais baixas, mas os vazamentos são mais difíceis de serem observados principalmente na partida e na parada do duto, quando se passa por um regime transiente. O vapor de produto, por ser compressível, dificulta o cálculo do balanço de massa, dada a dificuldade de se estimar com precisão o volume do espaço-vapor existente no interior do duto.

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. A ampliação de um duto geralmente tem como objetivo aumentar a vazão para o produto atual ou com um novo produto, ou a manutenção da vazão atual para um produto de maior densidade/viscosidade.

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 são utilizadas no duto. 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 consequência maiores vazões. O dimensionamento mecânico das bombas está atrelado à curva do sistema, à quantidade de transferência de produto necessária, ao custo e aos fornecedores existentes no mercado.

3.2. Troca do Duto e Teste Hidrostático

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

Trocar trechos do duto depende de 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.

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 para o qual está habilitado pelos últimos testes hidrostáticos realizados. Isto ocorre quando o teste foi pouco segmentado em trechos com grande desnível do terreno ou quando o duto foi habilitado 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).

3.3. Construção de Duto Paralelo

A construção de um duto em paralelo é uma solução para reduzir a perda de carga através da duplicação de um ou mais trechos do duto, possibilitando aumentar a vazão. É recomendável que o duto paralelo seja construído com o mesmo diâmetro do duto que está sendo ampliado, para que a velocidade do fluido em ambos os ramais seja a mesma durante a operação, evitando recirculações e refluxo quando ocorrer à junção no término do trecho duplicado. Esta alternativa de ampliação é pouco empregada em oleodutos, porém em gasodutos é utilizada frequentemente.

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 2, onde a linha verde representa o perfil de elevação de um duto imaginário, a linha azul representa o gradiente hidráulico ou perfil de head (perfil da pressão manométrica em cada ponto do duto convertida para metros de coluna de líquido somada a elevação do ponto em metros) de transferência direta, sem estação intermediária, e a linha vermelha o gradiente hidráulico da transferência com uma estação intermediária no quilômetro 50.

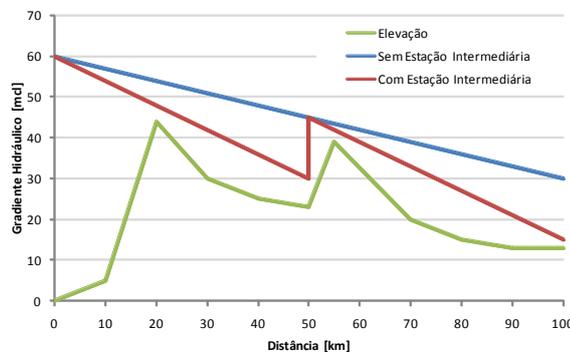


Figura 2 – Gradiente Hidráulico sem e com Estação Intermediária.

Note que ambas as linhas de head da Figura 2 estão acima da linha de elevação. Isso quer dizer que a condição operacional nos dois casos é a mesma, isto é, o duto opera com coluna fechada. Pode-se observar que o perfil de head com a estação intermediária (linha vermelha) encontra-se sempre abaixo head sem a estação intermediária (linha azul), o que indica que o duto está trabalhando com pressões menores, diminuindo o risco operacional. Além disto, como a inclinação do head com a estação intermediária (linha vermelha) é maior do que no caso sem a estação intermediária (linha azul), a vazão operacional com a estação intermediária é maior, considerando que o duto e o produto são os mesmos.

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.

4. Redimensionamento dos Sistemas de Controle e Segurança

Os dutos possuem equipamentos de controle e de segurança que são projetados para determinadas pressões, vazões e produtos. Com a ampliação, eles podem necessitar de um redimensionamento. Tipicamente são utilizadas válvulas de controle (PCV), para ajustar a pressão de envio e de recebimento, a vazão e até a potência consumida pelo motor da bomba. Uma das suas atribuições é o controle de pressão durante a partida e a parada do duto de forma que a manter as pressões dentro dos limites operacionais.

A proteção do duto pode ser realizada por válvulas de alívio e segurança (PSV), normalmente 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 termohidráulicos 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.

Parte da proteção do duto pode recair sobre intertravamento. Dois exemplos são: o monitoramento da pressão de descarga das bombas, onde se esta ultrapassar um determinado valor as bombas desligam automaticamente, e a condição de que a bomba só liga quando as válvulas de bloqueio de sucção e descarga dela estiverem abertas.

5. Resultados

Serão apresentadas a seguir algumas opções de ampliação para dois dutos hipotéticos. No caso do Duto A são apresentadas duas soluções para uma mesma solicitação de ampliação. Para o caso do Duto B são apresentadas as soluções para três solicitações diferentes de ampliação.

5.1 – 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 2AEE+3PEE+1PEI, 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 diâmetro de 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" de diâmetro
- Estação de Recebimento (ER): 4 válvulas de alívio de pressão a montante; 1 válvula de controle de pressão; 1 tanque

O Gradiente hidráulico (Head) da situação atual do Duto A, em regime permanente (RP), transportando o produto PA, com densidade 0,872 e viscosidade de 19,4cSt à 20°C, é apresentado na Figura 3. O duto possui uma vazão de 1800m³/h operando com o arranjo 2AEE+3PEE+1PEI 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.

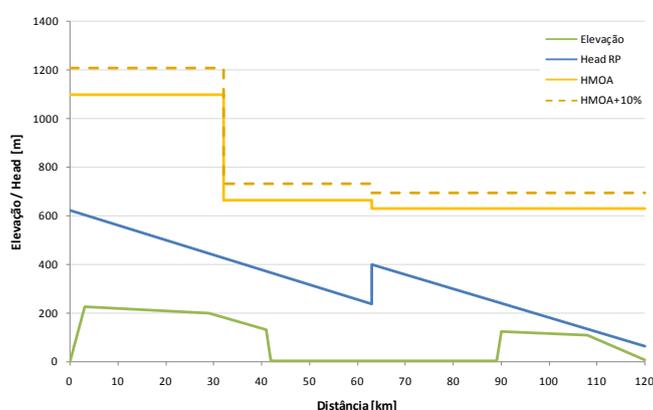


Figura 3 – Gradiente hidráulico atual do Duto A.

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 PA1, 130% mais viscoso, obtém-se uma vazão de 1934m³/h operando com o arranjo 2AEE+4PEE+3PEI 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 4a, onde a HMOA é a PMOA convertida para metro de coluna de líquido.

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 PA1, 130% mais viscoso, obtém-se uma vazão de 1890m³/h operando com o arranjo 2AEE+4PEE+3PEI 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 4b.

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 e alívio foram inevitáveis. Na primeira (A1), verificou-se que 45% do duto deveriam ser trocados e na segunda (A2) 29%, conforme a Tabela 1.

Para avaliar as opções de ampliação foi utilizado o Fator de Utilização (FU) com o duto operando ou não no horário de ponta (HP). Neste período de tempo, 17:30 às 20:30h, o custo de energia elétrica é mais alto, o que aumenta o custo operacional do duto. O valor sugerido de projeto para o FU é de no máximo 85%.

Também foi utilizado o Fator de Recuperação de Estoque (FRE) que contempla o tempo de parada no horário de ponta, o tempo para procedimentos de partida e parada do duto e a disponibilidade para intervenções. É esperado no projeto que o FRE fique entre 1,1 e 1,2.

Tabela 1 – 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%

Analisando os resultados da Tabela 1, o FU sem operar no horário de ponta (HP) ficou acima do esperado, o FRE ficou baixo e os percentuais de troca do duto ficaram altos nas duas alternativas de ampliação. Neste caso, a melhor solução é construir um novo duto na mesma faixa, pois o custo de ampliação somado ao custo de parada do duto atual alcança o custo de um novo duto.

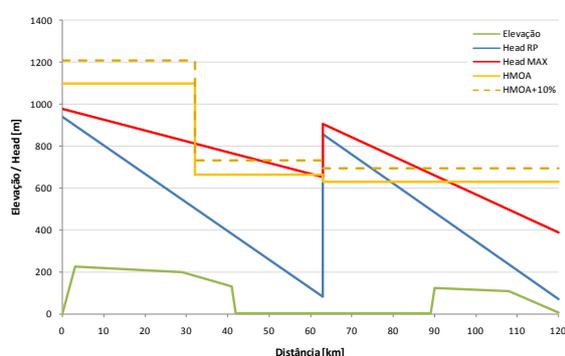


Figura 4a - Gradiente hidráulico da alternativa A1.

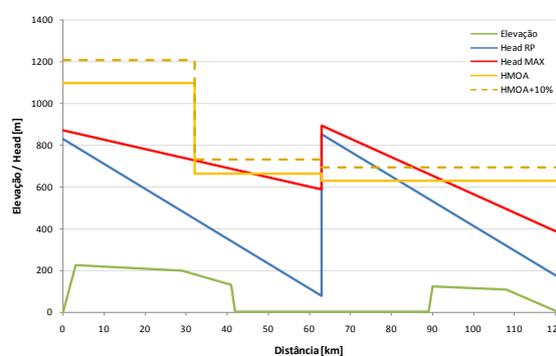


Figura 4b - Gradiente hidráulico da alternativa A2.

Figura 4 – Gradientes hidráulicos do duto A.

6.2 – 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 1AEE+3PEE+3PEI1+4PEI2, 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 Gradiente hidráulico (Head) da situação atual do Duto B, em regime permanente (RP), transportando o produto PB, com densidade 0,891 e viscosidade de 53,5cSt à 20°C, é apresentado na Figura 5a. O duto possui uma vazão de 1300m³/h operando com o arranjo 1AEE+3PEE+3PEI1+4PEI2 na condição de coluna fechada. O consumo total de potência nas bombas é igual a 12,14 MW.

No Duto B, a ampliação visa permitir a transferência de novos elencos de petróleos considerando também um aumento da vazão, preferencialmente 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, a vazão requerida é atingida, mas o duto encontra-se no seu limite de capacidade de transferência. Em regime permanente, transportando o produto PB1, com 267,5cSt, obtém uma vazão de 1185m³/h operando com o arranjo 1AEE+3PEE+3PEI1+4PEI2 na condição de coluna fechada e sem as válvulas de controle de pressão das descargas das bombas estarem atuando. Foi necessário também alterar os ajustes das válvulas de alívio. O head de regime permanente (Head RP) e o head máximo (Head MAX), de todos os possíveis cenários de falhas são apresentados na Figura 5b.

Para atender as premissas da alternativa B2 foi necessário prever a instalação de três novas estações de bombeamento intermediárias, a troca de bombas numa das antigas estações e a alteração dos ajustes das válvulas de alívio. 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, sendo eles: após a EI1 e após nova estação de bombeamento intermediária localizada entre a EI1 e a EI2. Em regime permanente, transportando o produto PB1, 500% mais viscoso, obtém-se uma vazão de 1500m³/h operando com o arranjo 1AEE+3PEE+3PEI1+3PEI2+3PEI3 + 4PEI4+2PEI5 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 5c.

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, a troca das bombas numa das antigas estações e a alteração dos ajustes das válvulas de alívio. Nos transientes de cenários de falhas foi percebida a necessidade de refazer o TH de 2,8% do duto em um trecho após a EI1. Em regime permanente, transportando o produto PB2, 300% mais viscoso, obtém uma vazão de 1500m³/h operando com o arranjo 1AEE+3PEE+3PEI1+4PEI2+3PEI3 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 5d.

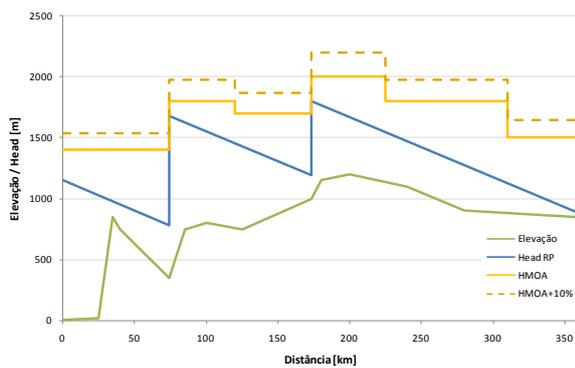


Figura 5a - Gradiente hidráulico atual do Duto B.

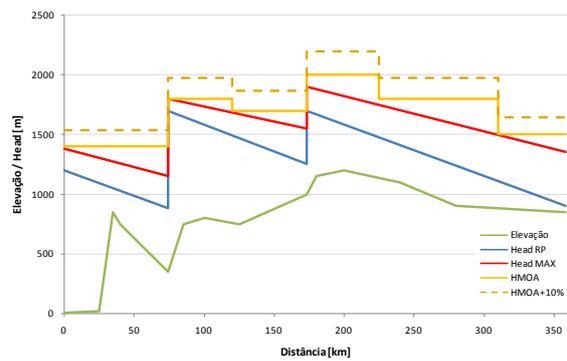


Figura 5b - Gradiente hidráulico da alternativa B1.

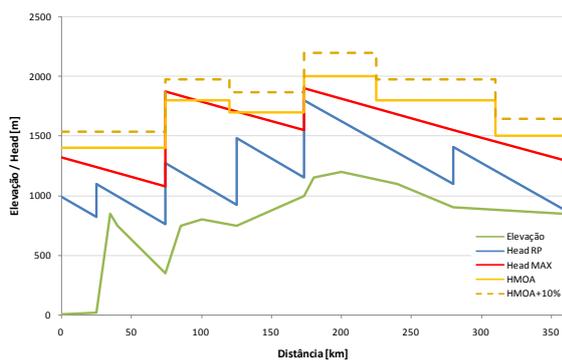


Figura 5c - Gradiente hidráulico da alternativa B2.

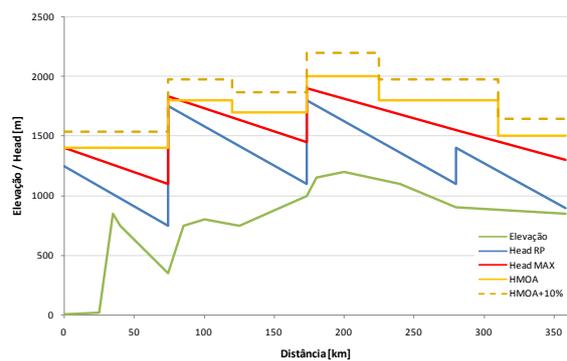


Figura 5d - Gradiente hidráulica da alternativa B3.

Figura 5 – Gradientes hidráulicos do duto B.

A Tabela 2 resume os resultados obtidos em cada alternativa.

Tabela 2 – 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

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%

Analisando os resultados da Tabela 2, o FU sem operar no horário de ponta (HP) ficou acima do esperado, o FRE está dentro do esperado e os percentuais de troca do duto ficaram baixos nas três alternativas de ampliação. A melhor solução neste caso é a B3, pois ela possui um alto FRE e um pequeno trecho de duto para refazer o teste hidrostático.

7. Conclusões

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.

Conclui-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 estratégico.

8. Referências

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