



**IBP1149\_07**

**ANÁLISE DAS VARIÁVEIS RELACIONADAS AO PROJETO DE  
OPERAÇÃO DE OLEODUTOS COM COLUNA CHEIA**  
Bruno G. Silva<sup>1</sup>, Luis F. G. Pires<sup>2</sup>, Leonardo Motta<sup>1</sup>

**Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, 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 e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*.

---

## Resumo

O objetivo do presente estudo é analisar as variáveis relacionadas ao projeto para operação de oleodutos com coluna fechada, através de uma avaliação teórica e de simulações computacionais com softwares comerciais. Neste estudo, também será abordado os pontos positivos e negativos da operação de duto com coluna fechada. A operação de um duto com coluna fechada, projetado originalmente para operar com coluna aberta pode levar a necessidade de alterações nos sistemas de alívio ou até a troca de trechos do duto. Mesmo com o duto parado pressurizado, pode-se observar variações no perfil de pressão devido a variação da temperatura ao longo do tempo, principalmente para dutos aquecidos o que, em algumas horas, impossibilita a manutenção da pressão acima da pressão de vapor do produto transportado. Outro ponto relevante é que seleção dos parâmetros da malha PID da válvula de controle da extremidade do duto interfere no seu ponto de ajuste, podendo levar a valores superdimensionados que conflitam com limitantes de projeto.

## Abstract

The objective of the current study is to analyze the variables related to operation of oil pipelines, avoiding column separation, through theoretical analysis and computational simulations, using commercial software. The positive and negative points of view of this modus operandi will also be considered.

The operation of a pipeline avoiding column separation (whose original concept was to allow separation) may lead to changes in the relief systems or even require the replacement of pipe sections. Even in stopped pressurized pipes, one may observe variations in the pressure profile, due to temperature variation, mainly for heated pipes which, after a few hours, will cool and contract, turning the maintenance of pressure above the pumped product's vapor pressure not possible.

Another interesting point is that the selection of P-I-D parameters of the control valve controller located at the pipe extremity interferes in its set point that may lead to over-dimensioned and conflicting values.

## 1. Introdução

A abertura de coluna ocorre quando a pressão manométrica em qualquer ponto do duto atinge a pressão de vapor do produto. Esse fenômeno também pode ser identificado quando o gradiente hidráulico encosta na elevação, geralmente nos picos dos perfis. A fração líquida escoar pela parte inferior do duto enquanto a fração gasosa permanece estática na parte superior. Se a pressão aumentar acima da pressão de vapor, o gás se incorpora novamente ao líquido. Entretanto, se isso ocorrer rapidamente, o colapso da bolha de vapor pode ser acompanhado de um pico de pressão.

Um caso de abertura de coluna é no duto OSSP-T apresentado na Figura 1. O duto está localizado no estado de São Paulo e interliga o Terminal de São Caetano do Sul ao Terminal de Cubatão. Pode-se observar a fração de líquido e gás ao longo do duto, sendo 0 para totalmente gasoso e 1 para totalmente líquido.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico – SIMDUT/PUC-Rio

<sup>2</sup> PHD, Engenheira Mecânico – SIMDUT/PUC-Rio

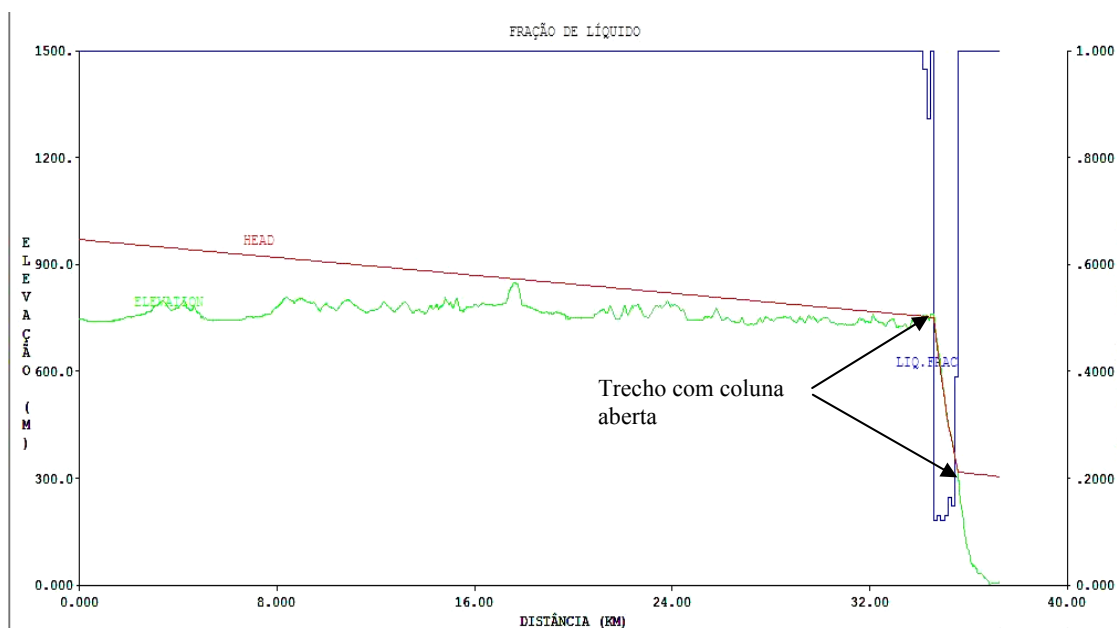


Figura 1 – Gradiente hidráulico do OSSP-T e a fração líquida ao longo do duto

Para operar e parar o duto com coluna cheia é necessário a instalação de válvulas de controle (PCV) em pontos estratégicos para proporcionar o ajuste da pressão necessária para manter todo o duto pressurizado. Conforme se altera o arranjo de bombeamento ou o produto, deve-se também alterar a pressão de ajuste das válvulas para manter a pressão ao longo do duto acima da pressão de vapor do produto bombeado em qualquer ponto do duto. Com o desligamento das bombas deve-se fechar as válvulas de bloqueio nas extremidades do duto, assegurando que as mesmas mantenham-se estanques para não despressurizar o duto.

A operação com coluna cheia em oleodutos possui vantagens e desvantagens que precisam ser analisadas a cada duto. Uma das vantagens é o aumento da confiabilidade na detecção de vazamentos, pois se o duto está pressurizado, com coluna cheia, o controle de vazamento por balanço de massa fica mais confiável. Outra vantagem é que durante o procedimento de partida do duto, a diferença da vazão entre o envio e o recebimento é devida basicamente ao empacotamento do duto, que é facilmente calculado. Com a operação com coluna aberta, observa-se normalmente que a vazão do produto no terminal de recebimento oscila, o que dificulta o procedimento para fechar o balanço de massa elevando o grau de incerteza do processo. Porém, tem-se um grande número de dutos projetados para operar com coluna aberta, pois o duto pode operar com pressões menores e maiores vazões são obtidas.

Mesmo com o duto parado pressurizado, pode-se observar variações no perfil de pressão devido a variação da temperatura ao longo do tempo. As propriedades do fluido, do duto e do isolamento térmico também influenciam no projeto e nos ajustes das válvulas de controle. Os parâmetros dos controladores das válvulas de controle, a estanqueidade das válvulas de bloqueio e de retenção, o efeito da variação da temperatura e a adaptação de projetos antigos que operam com coluna aberta são pontos que serão analisados neste trabalho através de uma avaliação teórica e de simulações computacionais com softwares comerciais.

## 2. Determinação da Pressão de Ajuste para Operação com Coluna Fechada

O sistema de dutos OSPLAN opera com produtos claros, como gasolina e diesel, e interliga o Terminal de São Sebastião para a Refinaria REPLAN, passando pela estação de bombeamento de Rio Pardo e pelo Terminal de Guararema. Um diagrama esquemático do sistema está apresentado na Figura 2. Este sistema opera atualmente com coluna aberta. Porém, para o esquema de bombeamento 2-2-2 (2 bombas boosters e duas bombas principais em São Sebastião e duas bombas principais em Rio Pardo) uma contra-pressão no recebimento em  $13,2 \text{ kgf/cm}^2$  é suficiente para o duto operar com coluna fechada. Estas duas situações estão apresentadas na Figura 3. Quando o duto passa a operar com uma bomba o ponto de ajuste da válvula de controle no recebimento deve ser mudado para  $37,5$  e quando o duto for parado, isto é, todas as bombas forem desligadas, o duto deve estar com uma contra pressão de  $59,5 \text{ kgf/cm}^2$ , como apresentado na Figura 4. Observa-se inicialmente, que este valor produz uma folga no ponto mais alto muito acima dos  $2 \text{ kgf/cm}^2$  estabelecido nas premissas de operação. Isto é necessário porque quando as bombas são

desligadas, a pressão começa a cair ao longo do duto. Quando esta onda de redução de pressão chega ao outro extremo do duto (cerca de 3 min após), onde está a controladora, o sistema de controle automático inicia o fechamento, de forma a manter a pressão igual a pressão de ajuste. Porém, devido ao tempo de resposta da malha de controle, ao comprimento do duto e ao perfil de pressão, ao final do transiente o duto para pressurizado, com a pressão no recebimento igual a 56 kgf/cm<sup>2</sup>, menor do que o valor de ajuste. Isto explica o porquê da necessidade deste ponto de ajuste ser consideravelmente superior ao valor da pressão ao final do transiente. As variações das pressões no recebimento, no envio e no ponto crítico ao longo do tempo, na operação de parada do duto estão apresentadas na Figura 5.

Para a operação com estes valores de ajuste será necessário trocar um trecho de 7 km de duto, na região onde a pressão máxima operacional admissível é ultrapassada. Porém, estes novos valores operacionais de pressão não podem ser aplicados porque o duto dispõe de sistemas de alívio (PSV), cujas pressões de ajuste são mais baixas que os valores operacionais. Assim, será necessário redimensionar estes pontos de ajuste. Utilizando a premissa de que, no recebimento, os valores de pressão devem ser no máximo 90% dos valores de ajuste dos sistemas de alívio, e no envio, 95% dos valores de ajuste dos sistemas de alívio, a Tabela 1 apresenta um resumo destes parâmetros.

Tabela 1 – Novos pontos de ajuste das PSV's do OSPLAN

	Local	PSV	Ajuste Atual (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ajuste Futuro (kgf/cm <sup>2</sup> )
OSPLAN	Terminal de São Sebastião	36001 A/B/C/D	<b>96,3</b>	<b>96,3</b>
	Terminal de Rio Pardo – recebimento	36002 A/B/C/D	<b>26,7</b>	<b>46,7</b>
	Terminal de Rio Pardo – envio	36003 A/B/C D/E/F	<b>70 / 90</b>	<b>78,8</b>
	Terminal de Guararema – recebimento	129.26 / 129.27	<b>65,0</b>	<b>70,1</b>
	REPLAN	SC-01 / SC-02	<b>58,9</b>	<b>66,0</b>

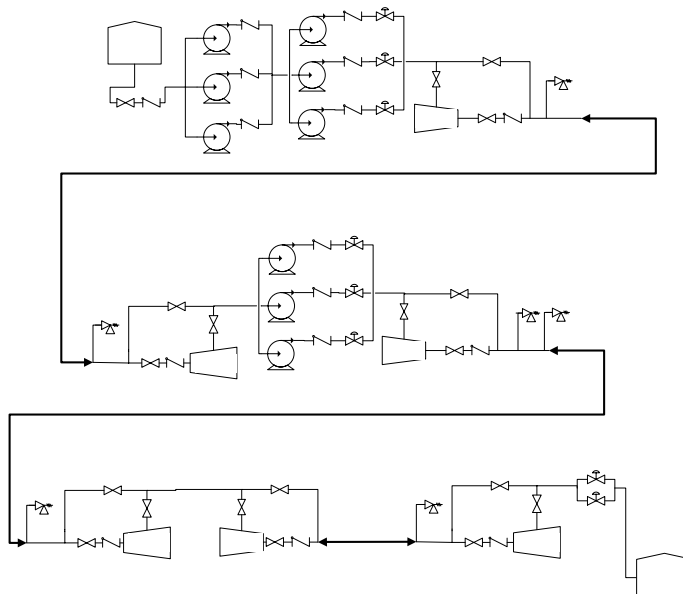


Figura 2 – Fluxograma esquemático do OSPLAN

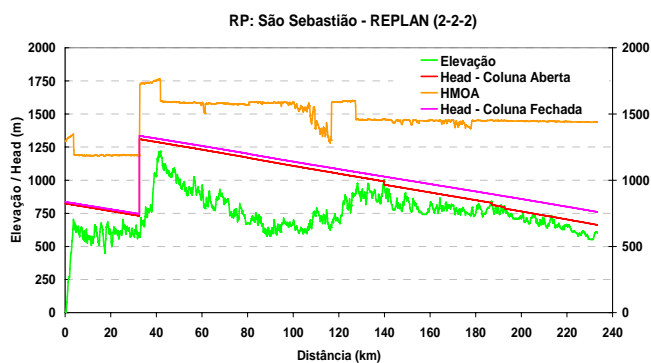


Figura 3 – Gradientes hidráulicos do arranjo típico com o diesel

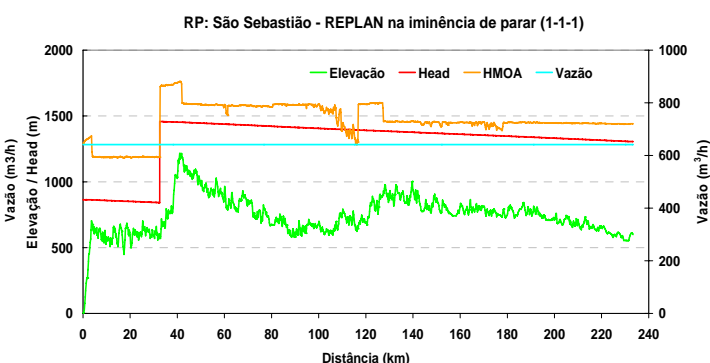


Figura 4 – Gradiente hidráulico na iminência da parada do duto, com o arranjo 1-1-1

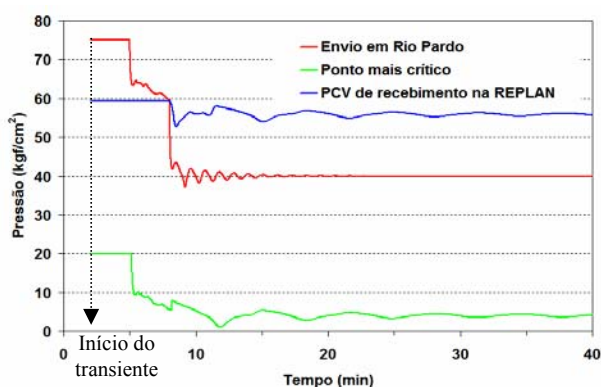


Figura 5 – Pressões no envio, ponto crítico e recebimento no trecho Rio Pardo – REPLAN durante a parada

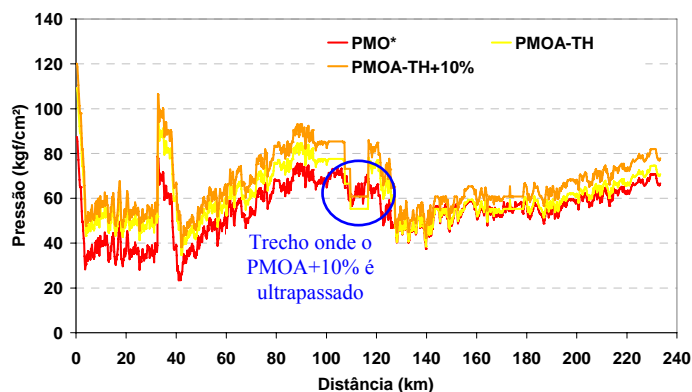


Figura 6 – Gradiente das máximas pressões após o fechamento da válvula de recebimento na chegada, com o diesel

Com estas mudanças, é necessário que um estudo de cenários de falha seja realizado para determinar o impacto destas alterações. Para isto, é considerado o cenário no qual o duto opera na configuração de bombas 2-2-2 e por alguma razão, a válvula de bloqueio motorizada na estação de recebimento se fecha bloqueando o duto. De acordo com a Figura 6, que apresenta as máximas pressões durante o transiente (PMO\*) de fechamento da válvula, a pressão máxima operacional admissível (PMOA) mais 10% é ultrapassada, comportamento que não pode se aceitar durante um regime transiente. Mais uma vez pode-se confirmar a necessidade da troca do trecho citado por outro de maior espessura, para garantir a integridade do duto com os novos valores do sistema de alívio.

### 3. Efeito dos Parâmetros da Malha de Controle

Os parâmetros da malha de controle PID da válvula de controle de recebimento influenciam no procedimento de parada do duto. Dependendo dos valores utilizados, a PCV pode ter um comportamento diferente, como no tempo de atuação ou no amortecimento da pressão de controle. A seguir serão apresentados alguns resultados para efeito de comparação. A malha PID rege o comportamento da PCV como apresentado nas Equações 1 e 2:

$$V(t) = K_C \left[ E(t) + T_D E'(t) + \left( \frac{1}{T_I} \int_0^t E(t) dt \right) \right] + V_S \quad (1)$$

$$E(t) = \frac{C(t) - S(t)}{NC} \quad (2)$$

onde  $V(t)$  é o sinal de saída,  $KC$  é o ganho,  $TI$  é o tempo reset,  $TD$  é o tempo derivativo,  $VS$  é o bias,  $T_D E'(t)$  é o termo derivativo,  $\frac{1}{T_I} \int_0^t E(t) dt$  é o termo integrativo,  $E(t)$  é o erro,  $C(t)$  é o sinal de entrada,  $S(t)$  é o ponto de ajuste da PCV,  $NC$  é a constante de normalização. Estes parâmetros devem ser ajustados para cada caso, garantindo o funcionamento da válvula de controle no tempo de resposta certo.

Como exemplo, diversos valores de  $NC$  foram testados, para o mesmo ponto de ajuste ( $95 \text{ kgf/cm}^2$ ) da PCV de recebimento no oleoduto OSSP-T 18" (38 km entre São Caetano do Sul e Cubatão). Pode-se observar na Figura 7 a variação de pressão na PCV de recebimento ao longo do tempo após o desligamento da última bomba (procedimento de parada do duto). Verifica-se que apesar do valor de ajuste ser o mesmo, numa situação é possível parar o duto com coluna fechada e na outra ( $NC=500$ ) o duto para com coluna aberta, como verificado através das curvas de pressão ao longo do tempo para o ponto crítico. A Figura 8 apresenta as variações de pressões nas PCV's de envio e de recebimento, identificando o tempo de reação da PCV de recebimento e o tempo necessário para a informação propagar de um extremo à outro do duto.

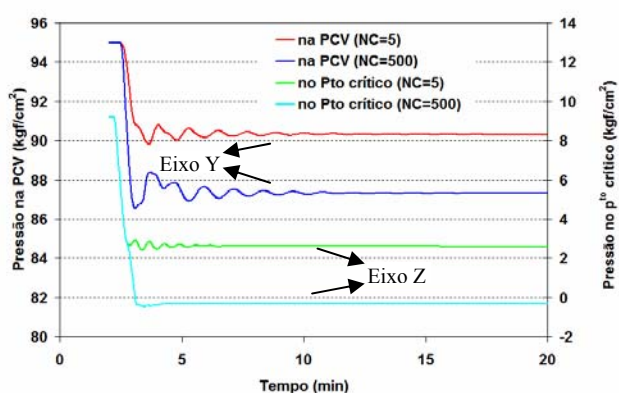


Figura 7 – Variação de pressão na PCV para diferentes  $NC$

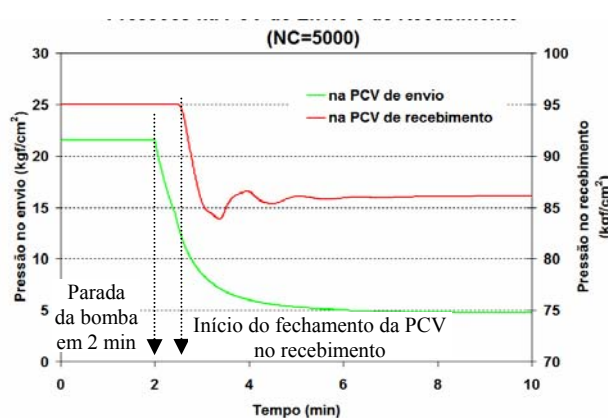


Figura 8 – Variação de pressão nas PCV's de envio e recebimento

#### 4. Efeito da Variação da Temperatura

Com o duto parado pressurizado, e com coluna cheia, variações de temperatura devido a ciclagem dia-noite ou devido ao resfriamento observado em dutos que transportam produtos aquecidos produzem variações do perfil de pressão. Uma expressão que leva em conta a variação da pressão em função das dimensões do duto e da variação de temperatura (MOHITPOUR et al., 2000) é apresentada na Equação 3:

$$\Delta P = \frac{[\gamma - 2\alpha(1 + \nu)]\Delta T}{\frac{D(1 - \nu^2)}{Et} + \frac{1}{K}} \quad (3)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido ( $8,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação linear do aço ( $1,14 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\nu$  é o coeficiente de Poisson (0,3),  $E$  é o módulo de elasticidade do aço (200 GPa),  $D$  é o diâmetro (0,4 m),  $t$  é a espessura ( $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ) e  $K$  é o módulo de bulk. Com a substituição dos valores entre parêntesis, típicos de um duto operando com hidrocarboneto líquido, chega-se a relação:

$$\Delta P(\text{kgf/cm}^2) = 9,8\Delta T \quad (4)$$

que para uma variação de  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  produziria uma redução de pressão de  $1,96 \text{ kgf/cm}^2$ . Assim, caso o duto pare com coluna fechada, com uma folga de  $2 \text{ kgf/cm}^2$  no ponto mais crítico, ele abriria coluna caso a temperatura média caia cerca de  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para determinar o tempo típico em que isto ocorrerá, foi realizada a simulação computacional de um

duto 16 polegadas e 99,5 km de extensão que transporta produtos aquecidos. As propriedades térmicas do produto e do duto estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Propriedades do óleo combustível A1

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (cP)	Capacidade Térmica (kJ/kg.K)	Condutividade Térmica (kJ/h.m.K)	Módulo de bulk (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pressão de Vapor (kgf/cm <sup>2</sup> )
1012,6	589,9	1,926	0,3863	15600	0,6

Tabela 3 – Características do oleoduto

	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidade Térmica (kJ/kg.K)	Condutividade Térmica (kJ/h.m.K)	Espessura (pol)	Discretização radial
Duto	7846	0,44	217,8	variável	3
Isolante	40	1,045	1	2	4
Solo	1396	3,2322	6,6855	214,55	6

Após a parada da bomba, observa-se que a temperatura começa a cair e a pressão vai sendo reduzida até o instante em que se verifica a abertura de coluna no ponto mais elevado. Este processo ocorre rapidamente, cerca de 90 min após a parada das bombas. A Figura 9 apresenta a variação de pressão na controlada de recebimento, indicando que após seu fechamento a pressão fica no valor desejado (22 kgf/cm<sup>2</sup>). Porém, com o passar do tempo observa-se que a temperatura do duto começa a baixar e a pressão nesta válvula, e em todo o duto, também cai.

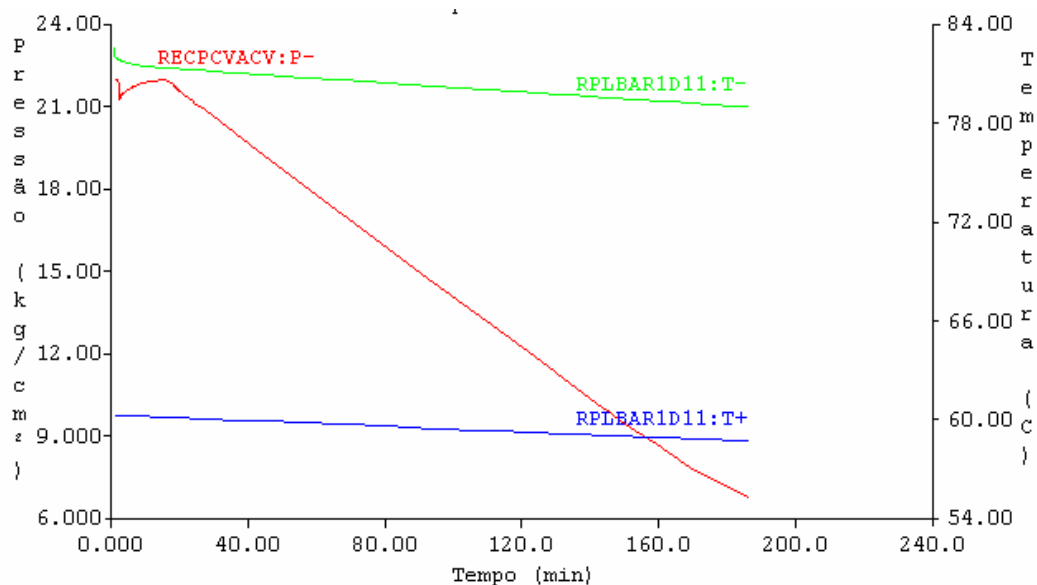


Figura 9 – Variação da temperatura no início e fim do duto e de pressão na PCV

## 5. Conclusão

Para um duto que opera com coluna aberta, os esquemas de bombeamento e os procedimentos de parada ou partida do duto afetam pouco a pressão de recebimento, que é normalmente baixa. Quando o controle no recebimento é introduzido neste duto, observa-se que as pressões de ajuste podem ser consideravelmente elevadas, principalmente quando se está trabalhando com um número reduzido de bombas e durante a parada do duto. Assim, estes dutos podem ser adaptados para trabalhar com coluna fechada, desde que se faça um estudo hidráulico para as novas condições. Estes estudos podem indicar a substituição de trechos do duto e/ou a alteração de parâmetros de segurança do duto, como o ajuste das válvulas de alívio.

A pressão de ajuste das válvulas de controle deve ser definida de acordo com os arranjos de bomba e os produtos transportados, normalmente avaliados em estado estacionário. Porém, o valor selecionado para o procedimento de parada do duto, uma condição transiente, depende não só destes parâmetros, mas também do comprimento do duto, do perfil de elevação e dos parâmetros PID da malha de controle das válvulas de controle.

Para um duto que transporta produtos aquecidos, a parada deste duto mantendo uma condição de pressurização, de forma que não ocorra abertura de coluna, pode ser extremamente difícil de ser obtida, uma vez que mínimas variações de temperatura podem provocar reduções consideráveis de pressão. Deve-se considerar, ainda, que a manutenção da pressurização implica na estanqueidade das válvulas, tanto na PCV de cabeça de duto como nas válvulas do lado da estação de bombeamento. Nesse caso não é recomendável manter o duto parado com produtos de ponto de fluidez próximo à temperatura ambiente, ou o duto seria inutilizado.

Desta forma, verifica-se que, para um duto projetado para trabalhar com coluna aberta e posteriormente adaptado para trabalhar com coluna fechada, a operação em regime permanente normalmente é possível. Porém, a parada com coluna fechada e a permanência nesta situação podem apresentar problemas que vão exigir várias outras adaptações, além da instalação da válvula controladora de recebimento.

## 6. Agradecimentos

Os autores desejam agradecer a TRANSPETRO Petrobrás Transportes S.A. pela colaboração técnica indispensável para a execução deste trabalho.

## 7. Referências

MOHITPOUR, M., GOLSHAN, H. and MURRAY, A. Pipeline Design & Construction: A practical Approach, ASME Press, New York, 2000