

**Copyright 2014, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014**, realizado no período de 15 a 18 de setembro de 2014, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). 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, Sócios 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 2014*.

---

## Resumo

Dentre os diversos meios de transporte de fluidos, os dutos se destacam pelo baixo custo. A segurança do duto é garantida por procedimentos operacionais e por equipamentos. Neste contexto, as válvulas de alívio tem a função de manter a pressão de operação na faixa determinada de projeto durante eventos que provoquem elevações de pressão. O comportamento da válvula, isto é, o tempo de resposta, e o comportamento da descarga em função da abertura, são fundamentais para se definir o valor máximo das pressões resultantes. Este comportamento dinâmico não é estabelecido em normas e raramente encontra-se disponível, mesmo pelo fabricante. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de testes e certificação de válvulas de alívio do tipo mola em um circuito fechado já existente, levantando seus comportamentos estáticos e dinâmicos em instalações experimentais com escala 1:1. Com estes procedimentos, as características das válvulas de alívio serão melhores conhecidas, o que aumentará a confiabilidade nos novos projetos e nas verificações de segurança operacional das instalações existentes.

## Abstract

Among the several transportation methods available, pipeline stands out due to its low cost and operational security. Changes in operating conditions generate undesirable effects such as sudden pressure rise to critical levels that can compromise the integrity of the pipeline. In this context, the relief valve has the function of maintaining the operating pressure within the specified range of design in order to ensure safety. The behaviors of the valve, i.e., the response time, and the behavior of the discharge due to opening, are key for proper definition of maximum resultant pressure values. This dynamic behavior is not currently established in standards and rarely available even by the manufacturer. The purpose of the present work is to develop a testing and certification system of pressure relief valves on an existing pipeline loop, by determining their static and dynamic behaviors in experimental installations 1:1 scale. Through this procedure, the characteristics of the relief valves will be better known, which will increase the reliability of future designs and operational safety checks of existing facilities.

## 1. Introdução

As válvulas de alívio de pressão (Pressure Relief Valves – PRV) em oleodutos tem por objetivo a proteção à vida e à propriedade, garantindo a confiabilidade do sistema. Em eventos no qual o oleoduto é bloqueado de forma acidental, a pressão interna se eleva rapidamente numa situação chamada de salto de pressão (surge pressure). A função das PRVs é retirar parte do fluido transportado no oleoduto para evitar o aumento da pressão de operação acima de um limite pré-estabelecido no projeto.

Os fabricantes de válvulas desenvolvem seus processos de fabricação e testes para se adequarem às normas destes equipamentos. O dimensionamento correto dessas válvulas seguem as normas ASME Seção VIII e API 520,

---

<sup>1</sup> Engenharia Mecânica - SIMDUT – PUC-Rio

<sup>2</sup> Mestre, Engenheiro Mecânico - SIMDUT – PUC-Rio

<sup>3</sup> PHD, Engenheiro Mecânico - SIMDUT – PUC-Rio

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico - CTDUT



Para verificar os valores operacionais de projeto e as faixas de PRVs que poderiam ser testadas, foram estudadas as condições operacionais normais e incidentais do Oleoduto de Teste utilizando um programa comercial de simulação termo-hidráulica, Stoner Pipeline Simulator (SPS), a fim de calcular a vazão e o perfil de pressão do Oleoduto de Teste nessas condições. O modelo do circuito desenvolvido para esse programa utiliza as características físicas do duto e seus principais equipamentos. O escoamento foi modelado a 20°C não existindo troca de calor com o ambiente. Como o SPS não trabalha com a configuração de um circuito fechado, foi necessário modelar um tanque somente para o envio e outro para o recebimento. O desenho do fluxograma do modelo de simulação é apresentado na Figura 2.

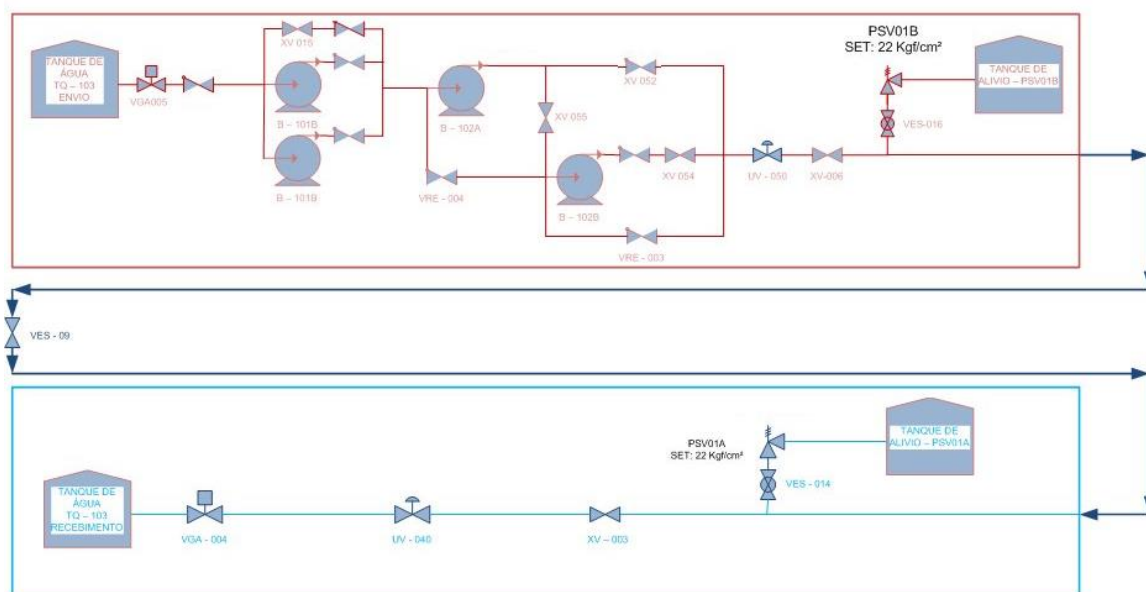


Figura 2. Fluxograma do modelo de simulação termo-hidráulica

Tabela 1: Variáveis operacionais em regime permanente com água no Oleoduto de Teste

ARRANJO DE BOMBAS (Todos com duas bombas auxiliares em paralelo)	CASO	ROTAÇÃO (rpm)	VÁLVULA DE CONTROLE UV-50 (ENVIO)			VÁLVULA DE CONTROLE - UV40 (RECEBIMENTO)			VAZÃO [m³/h]
			P- [kgf/cm²]	P+ [kgf/cm²]	FR [%]	P- [kgf/cm²]	P+ [kgf/cm²]	FR [%]	
1 bomba principal (B102A)	1	1800	12,04	9,00	100,0	5,50	1,00	94,5	689
2 bombas principais em paralelo	2a	1800	14,29	9,77	98,6	5,00	1,0	100,0	800
	2b	1800	14,35	10,31	100,0	5,70	1,0	97,9	800
2 bombas principais em série	3a	1800	17,14	9,77	91,8	5,00	1,0	100,0	800
	3b	1800	17,22	13,15	100,0	8,50	1,0	91,5	800
1 bomba principal (B102A)	4	1800	16,36	15,77	100,0	15,00	1,0	58,0	311
2 bombas principais em paralelo	5a	1800	16,89	7,60	59,7	7,00	1,0	65,3	270
	5b	1800	16,71	15,95	100,0	15,00	1,0	60,7	346
2 bombas principais em série	6a	1800	28,27	7,60	49,8	7,00	1,0	65,3	270
	6b	1800	20,05	18,25	100,0	15,00	1,0	77,8	662
1 bomba principal (B102A)	7	991	8,07	7,60	100,0	7,00	1,0	65,3	270
2 bombas principais em paralelo	8	1345	10,57	8,70	100,0	6,50	1,0	85,0	270
2 bombas principais em série	9	760	8,07	7,60	100,0	7,00	1,0	65,4	270

Foram realizadas simulações termo-hidráulicas para definir as variáveis operacionais em regimes permanentes do oleoduto. A Tabela 1 apresenta os resultados da simulação para três tipos de arranjo de bombas com as seguintes variáveis operacionais: pressão a montante (P-), pressão a jusante (P+) e fração de abertura das válvulas de controle de envio e recebimento, além da rotação do motor acoplado à bomba e a vazão do oleoduto. Os *setpoint* das válvulas de alívio do oleoduto são de 22 kgf/cm<sup>2</sup> e as PRVs que se pretendem testar podem ter sobrepensões de até 25%. Logo, o *setpoint* da PRV a ser testada não pode ser superior a 17kgf/cm<sup>2</sup>, para não haver a abertura da PRV de segurança do Oleoduto de Teste. Como é recomendado que a pressão máxima operacional (PMO) fique à no máximo 90% do *setpoint* da PRV, a PMO no recebimento será de 15kgf/cm<sup>2</sup>. As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os gráficos de gradientes hidráulicos em regime permanente para os casos 3a, 3b, 6a e 6b da Tabela 1

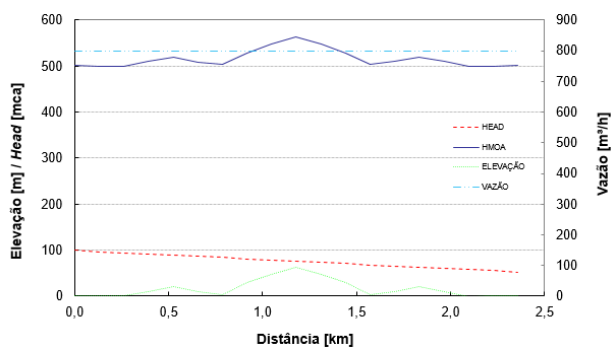


Figura 3. Gradiente hidráulico – Caso:3a

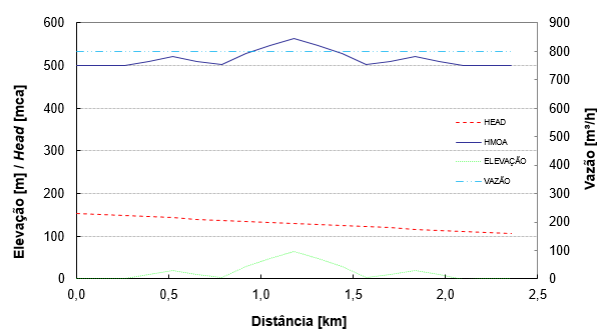


Figura 4. Gradiente hidráulico – Caso: 3b

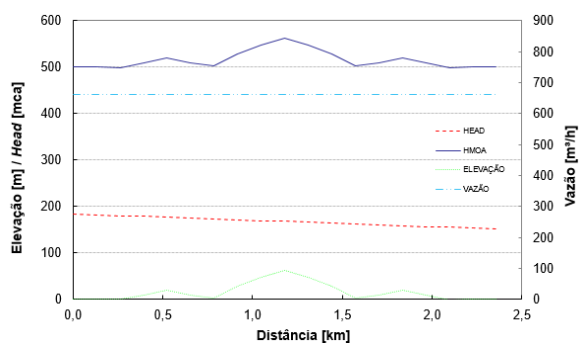


Figura 5. Gradiente hidráulico – Caso: 6a

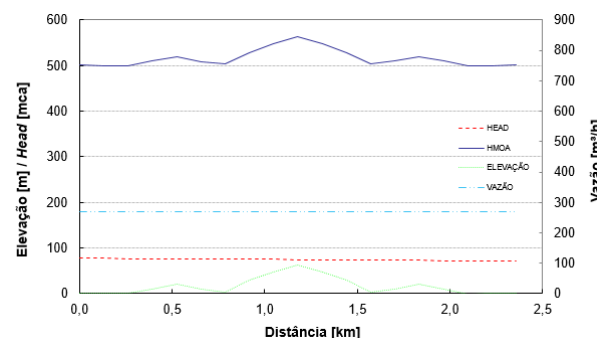


Figura 6. Gradiente hidráulico – Caso: 6b

F

A partir das condições dos regimes permanentes dos casos 3a e 6b, foram gerados os cenários de transientes incidentais do bloqueio da válvula XV-003 em 60s, localizada a jusante da válvula de alívio do oleoduto no recebimento (PSV01A). As figuras 7 e 8 apresentam o comportamento da pressão e da vazão ao longo do tempo, a montante da válvula de alívio PSV1A, nos cenários incidentais descritos. Para essas simulações utilizou-se o modelo de válvulas de alívio padrão existente no programa de simulação.

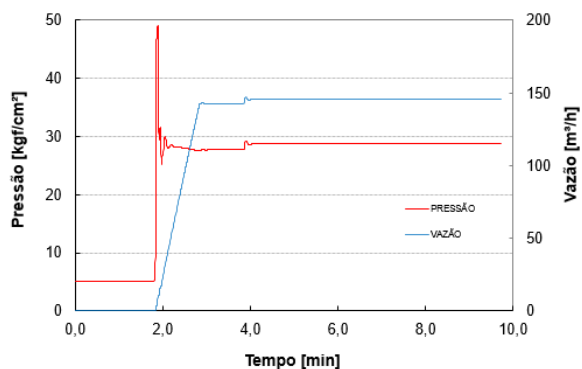


Figura 7. Cenário Incidental – Caso:3a

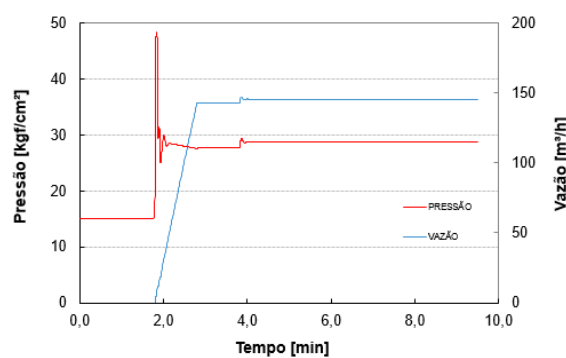


Figura 8. Cenário Incidental – Caso: 6b

Fi

### 3. Descrição do Procedimento Experimental para Testes de Válvulas de Alívio do Tipo Mola

O projeto para elaboração de testes de válvulas de alívio em escala 1:1 teve uma primeira etapa realizada em escala experimental. Desta maneira, para a descrição do procedimento experimental para testes de PRV's, será tomada como base a bancada construída na PUC-Rio por Carneiro e Azevedo (2011), que teve como objetivo a determinação dos procedimentos experimentais para execução dos testes. Essa bancada (Figuras 9 e 10) permitiu também realizar o levantamento das características dinâmicas de uma válvula de alívio comercial e modelar esse comportamento num programa de simulação comercial. Com base nesse trabalho será possível estudar e verificar quais adaptações que serão necessárias para a construção de um sistema de testes destas válvulas em escala real dentro da instalação do CTDUT no Oleoduto de Teste.

Na bancada de teste em escala laboratorial o fluido de trabalho, água, movimentada por uma bomba com variador de velocidade, escoava num circuito fechado de diâmetro nominal de 2" de aço com uma válvula de bloqueio tipo esfera com tempo de fechamento controlado. A válvula de alívio foi instalada a montante da válvula de bloqueio com a linha de alívio retornando o fluido para o mesmo tanque de alimentação.

A instrumentação era composta de transdutores de pressão a montante e jusante da válvula de alívio, medidor de vazão tipo turbina na linha de alívio e um transdutor linear de deslocamento instalado na haste da válvula de alívio. Os sinais foram registrados num sistema multicanal de alta frequência no qual todos os pontos eram aquisitados simultaneamente. Assim, foi possível correlacionar a vazão de alívio com o diferencial de pressão na válvula em função da fração de abertura.

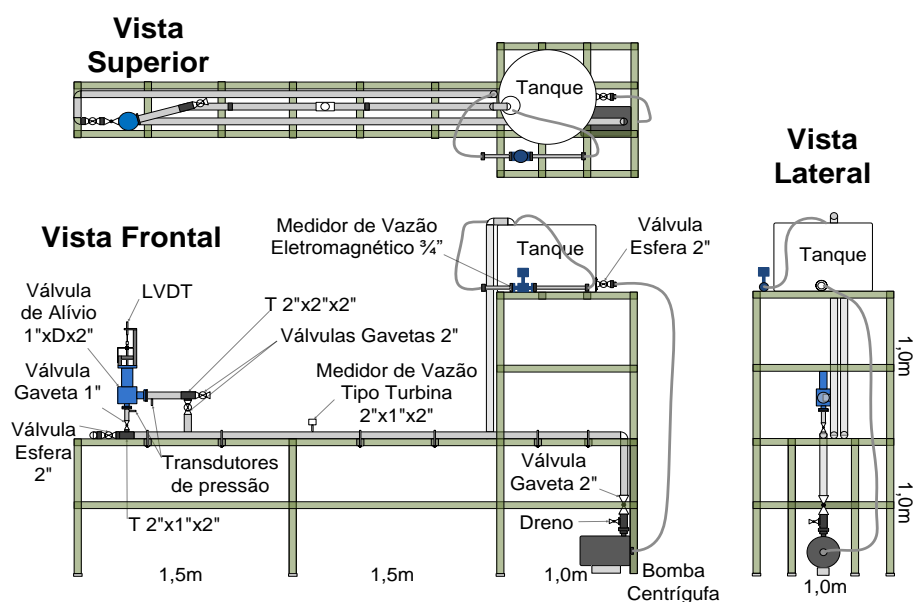


Figura 9. Desenho esquemático da bancada experimental



Figura 10. Fotografia da bancada experimental e detalhe da PSV instrumentada

Trabalhos anteriores (Shi, 1991; Dasgupta, k. e Karmakar, R, 2002; Maiti, R., Saha, R. e Watton, J., 2002; Ortega, A. J., Azevedo, B. N., Pires L. F. G., Nieckele, A. O. e Azevedo, L. F. A., 2008) demonstraram que o

comportamento dinâmico de uma válvula de alívio tipo mola pode ser representado pela formulação de um sistema massa-mola-amortecido, conforme Equação 1.

$$m\ddot{Y} + c\dot{Y} + kY = \frac{A}{L}(P_a - P_{SP}) \quad (1)$$

Onde:

$m$	Massa do conjunto móvel (disco + haste) (kg).
$c$	Coefficiente de amortecimento (kg/min).
$k$	Constante da mola (kg/min <sup>2</sup> ).
$A$	Área do orifício de entrada da válvula (m <sup>2</sup> ).
$L$	Curso total da mola (m).
$Y$	Deslocamento do disco
$P_a$	Pressão a montante da válvula
$P_{SP}$	Pressão de <i>setpoint</i>

A Equação 1 determina a variação da fração de abertura da válvula em função da força externa ( $P_a - P_{SP}$ ). Porém, para calcular a vazão de alívio é necessário estabelecer como essa varia em função da abertura da válvula. Essa relação é dada pelo coeficiente de descarga da válvula ( $C_d$ ), calculado pela Equação 2. Apesar dessa equação ser aplicável a regimes permanentes, Carneiro e Azevedo (2011) demonstraram que ela também é aplicável durante o regime transiente.

$$Q = C_d A \sqrt{2 \frac{(P_a - P_b)}{\rho}} \quad (2)$$

Onde:

$Q$	Vazão de alívio.
$A$	Área do orifício da válvula.
$C_d$	Coefficiente de descarga da válvula, função da fração de abertura.

Assim, o comportamento do  $C_d$  em função da abertura pode ser determinado fixando a haste da válvula em diferentes posições e medindo a vazão de alívio e o diferencial de pressão entre a entrada e a saída da válvula, de forma a se obter um comportamento como apresentado na Figura 11.

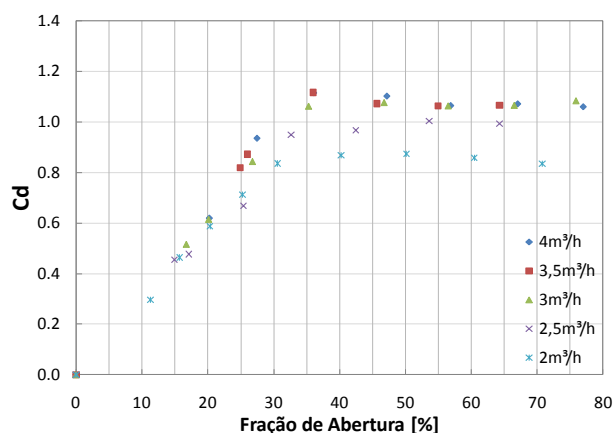


Figura 11. Coeficiente de descarga de uma PRV em função da fração de abertura para várias vazões (Carneiro e Azevedo, 2011)

Observou-se que para a válvula testada, o *setpoint* calibrado e certificado em bancada não era o valor da pressão para o qual a válvula começava a abrir nos transientes gerados na bancada. Além disso, dependendo do transiente gerado, a sobrepressão medida era maior que os 10% definidos na norma para válvulas certificadas. Logo, esses parâmetros também deverão ser avaliados para as válvulas a serem testadas no Oleoduto de Teste. Um resultado típico de um teste transiente está apresentado na Figura 12, onde são registradas as variações de pressão a montante e jusante da válvula de alívio, a vazão de alívio e a fração de abertura.

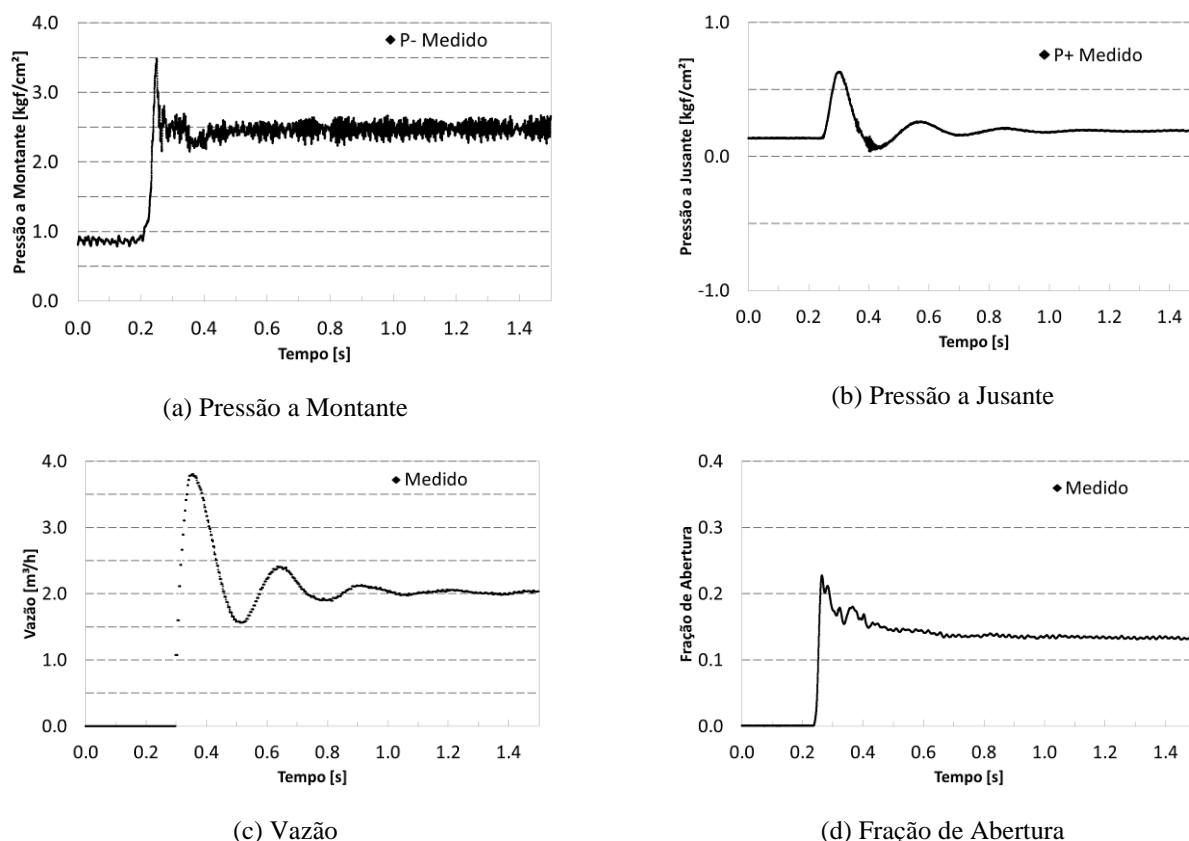


Figura 12. Resultados típicos de um ensaio transiente (Carneiro e Azevedo, 2011)

#### 4. Adequação da Instalação Existente

Para adequar as instalações existentes do Oleoduto de Teste inicialmente é necessário verificar a faixa de orifícios de válvulas de alívio tipo mola que poderão ser testadas, o que depende basicamente das condições operacionais do circuito, apresentadas na Tabela 1. Verifica-se que poderão ser testadas as válvulas de alívio de orifício L, M, N, P, Q e R com classes de pressão para a entrada de até #300 e classe de pressão de saída de #150

Verifica-se pelos catálogos de alguns fabricantes que essas válvulas podem ter a sua linha de entrada com diâmetros de 3", 4" e 6" e linhas de alívio com diâmetros de 4", 6" e 8". Além disso, de acordo com o orifício e a classe de pressão, as válvulas possuem dimensões diferentes. Essas variações devem ser acomodadas no projeto. Deve-se considerar ainda a possibilidade de realizar mais de uma montagem de forma simultânea. O Oleoduto de teste foi concebido para possibilitar grande flexibilidade de alinhamentos. Dessa forma, o próprio sentido de circulação do fluido pode ser invertido, de forma que os *scrapers* podem ser considerados tanto de recebimento como de lançamento. Assim, a escolha do local da montagem foi balizada pela disponibilidade de área física e pela facilidade em realizar as intervenções necessárias na tubulação. A solução definida está apresentada na Figura 13. Nessa figura, a tubulação em verde refere-se à bancada de teste a ser construída sendo que as válvulas de alívio que poderão ser testadas estão em azul. Uma parte da tubulação já existente do galpão dos *scrapers* está em cinza para uma maior contextualização de onde a bancada ficará.

A tubulação é quase toda flangeada para facilitar a montagem e desmontagem. Para cada válvula de alívio a ser testada foi instalada uma válvula de bloqueio do tipo gaveta a montante e a jusante. A montante das PRVs a classe de pressão é 300# e a jusante é 150#, porém toda tubulação é SCH 40, assim como a tubulação já existente no Oleoduto de Teste. As seguintes intervenções deverão ser feitas nas instalações já existentes:

- Retirada da válvula VES-11 (já prevista pela operação do Oleoduto de Teste devido a redundância) junto com os flanges e no lugar será inserido um Toco de 440 mm, 12" e classe 300#; além de um Te de redução 12x12x8", classe 300#.
- Na linha de alívio do próprio duto (8"- HC-8101.01-043-Ba) será inserido um Te comum 8", classe 150#.

O detalhamento dos tubos, acessórios e equipamentos estão apresentados na Figura 14 e 15.



Figura 13. Projeto do sistema de teste de PRVs montado no Oleoduto de Teste

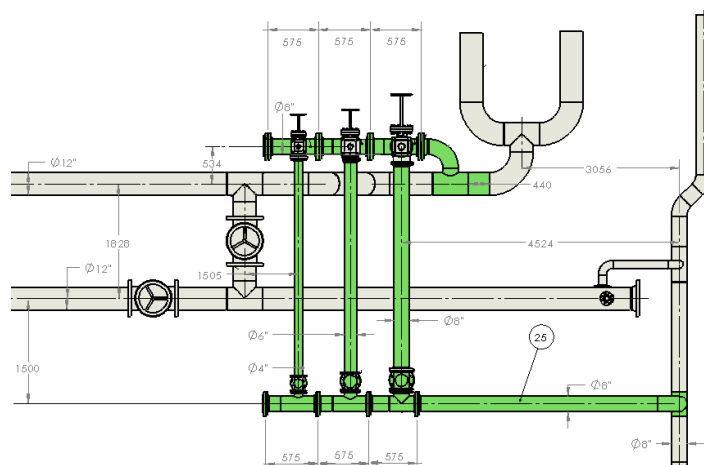


Figura 14. Vista superior do sistema de teste de PRVs montado no Oleoduto de Teste

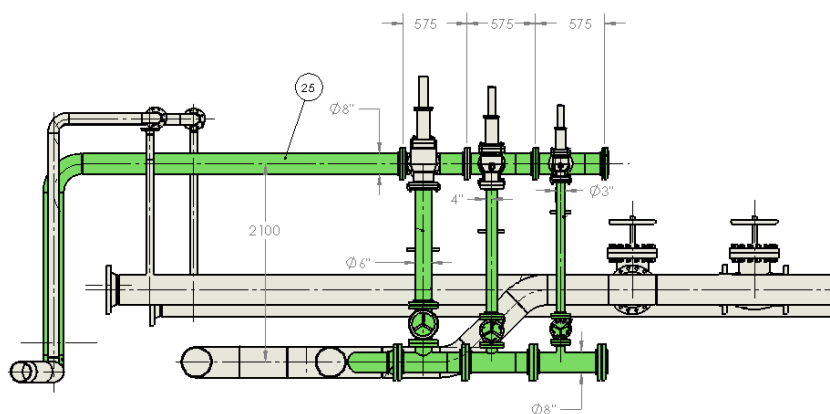


Figura 15. Vista direita do sistema de teste de PRVs montado no Oleoduto de Teste

## 5. Instrumentação

O sistema de aquisição de dados poderá ser o mesmo utilizado na bancada de teste em escala experimental, uma vez que foi adquirido com essa finalidade. Esse é um sistema fabricado pela HBM, série QUANTUM X, modelo MX-840. Trata-se de um aparelho de condicionamento e aquisição de dados, com 8 canais multifuncionais, oferecendo um conversor analógico/digital de 24 bits por canal, taxa de amostragem de até 19.200 Hz por canal, filtros de 0,01 Hz a 3,2 kHz, com alimentação para transdutores de 5 a 24 Vdc, interface *Ethernet* e *Firewire*.



Os transdutores de pressão deverão trabalhar numa faixa de 0 a 50 kgf/cm<sup>2</sup> com classe de precisão de 0,3% e deverão ter conexão ao processo através de rosca NPT. Os transdutores de deslocamento linear (LVDT) que serão instalados nas hastes das válvulas deverão ter faixas compatíveis com o deslocamento máximo das hastes das válvulas de alívio que serão testadas e uma frequência mínima de 2 kHz. O deslocamento da haste da válvula varia de acordo com o modelo e fabricante.

O sistema de medida de vazão de alívio deve ser selecionado com grande cuidado. Isso porque o que se pretende medir é a variação da vazão e os sensores são projetados para medir vazão em regime permanente. Assim, o sensor escolhido e sua eletrônica associada deverá ter um tempo de resposta extremamente baixo, compatível com os transientes que serão analisados. Outro problema em relação a esses medidores é a definição da faixa calibrada. O objetivo é medir a vazão de alívio que vai de zero (quando a válvula estiver fechada) até o valor de vazão de projeto da válvula. Para a bancada experimental foi selecionado um sensor tipo turbina com uma frequência para o final da faixa de 168 Hz. Esse sensor ainda não foi definido para a montagem no Oleoduto de Teste, mas sua localização será na linha de alívio horizontal (peça 25 das Figuras 14 e 15).

## 6. Estimativa de Custos

Foi realizada a estimativa de custo da implementação da bancada de teste transiente de válvulas de alívio no Oleoduto de Teste do CTDUT. Todos os equipamentos orçados estão de acordo com a norma ASME-B16.9, para conexões e flanges, e com a norma API 526, para determinação dos flanges de conexão ao processo das válvulas de alívio. O custo total estimado é apresentado discriminadamente na Tabela 2.

Tabela 2: Estimativa de custos para construção da Bancada de Teste

Projeto e administração	R\$ 50.972,50
Material e equipamentos	R\$ 61.522,00
Montagem	R\$ 50.000,00
Instrumentação	R\$ 40.000,00
Impostos (3%)	R\$ 5.025,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 207.500,00</b>

Tomando por base o teste de bancada realizado por Carneiro e Azevedo (2011), estimou-se que cada válvula poderia ser testada separadamente em uma semana. Porém, o custo operacional dependerá de outros fatores como a quantidade e o tamanho das válvulas de alívio que serão testadas.

## 7. Conclusões

As válvulas de alívio de mola são utilizadas como elementos de segurança em dutos em caso de transientes que gerem elevação de pressão. Porém, essas válvulas não são testadas e certificadas nessas condições transientes. Além disso, a modelagem computacional dessas válvulas necessita de um grau de informação não disponível atualmente e de uma modelagem própria. Essas informações podem ser obtidas através de ensaios específicos. A montagem experimental projetada para ser instalada no Oleoduto de Teste do CTDUT poderá realizar o ensaio transiente de válvulas de alívio com orifícios L, M, N, P, Q e R, com classes de pressão na entrada de até #300 e classe de pressão na saída de #150, com *setpoints* de até 17 kgf/cm<sup>2</sup>. Essa faixa foi definida após a modelagem termo-hidráulica computacional do circuito que definiu as variáveis de processo e após consulta aos catálogos de fabricantes. O custo previsto para a instalação é de R\$ 207.500,00.

## 8. Agradecimentos

Agradecimento especial ao CTDUT por todo o suporte e disponibilidade que garantiu o desenvolvimento deste trabalho.

## 9. Referências

- ORTEGA, A. J., AZEVEDO, B. N., PIRES L. F. G., NIECKELE, A. O., AZEVEDO, L. F. A. *A Numeral Model About the Dynamic Behavior of a Pressure Relief Valve*. In: *Congress of Thermal Engineering and Sciences*, Belo Horizonte, Brasil. 12<sup>th</sup> Eighth. November, 2008.
- AL-MUHAMMEDAWI, H. B. M., SARKIS, Z. A., KENDOUSH, A.A. *The Thermohydraulic Effects of Safety Relief Valv*. In: *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1999.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API-STANDART 520 Sizing, Selection and Installation of Pressure relieving Devices in Refineries*. Eighth Edition, December, 2008.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API STANDART 526 Flanged Steel Pressure-relief Valves*. Sixth Edition, May, 2009.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME B16.5. Pipe Flanges and Flanged Fittings*. 2009.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME B16.9. Factory-Made Wrought Butt welding Fittings*. 2012.
- CARNEIRO, L. M., AZEVEDO, L. F. *Estudo do Comportamento Dinâmico de Válvula de Mola para Alívio de Pressão em Dutos*, 187f., Dissertação - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.
- DASGUPTA, K., KARMAKAR, R. *Dynamic Analysis of Pilot Operated Pressure Relief Valve*, Simulation Modelling Practice, Vol.10, 2002.
- MAITI, R., SAHA, R., WATTON, J., *The Static and Dynamic Characteristics of a Pressure Relief Valve with a Proportional Solenoid-controlled Pilot Stage*, Proc Instn Mech Engers, Vol. 216, Part I, Wales, UK, 2002.
- PETHERICK, P., M., BIRK, A., M. *State-of-the-Art Review of Pressure Relief Valve Design, Testing and Modeling*. In: *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol.113, p.46. February, 1991.
- SHIN, Y.C., *Static and Dynamic Characteristics of a Two Stage Pilot Relief Valve*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 280-288, 1991