



## ESTUDO DINÂMICO DA PRESSÃO EM VASOS SEPARADORES VERTICAIS GÁS-LÍQUIDO UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO

Thales Cainã dos Santos Barbalho<sup>1</sup>; Álvaro Daniel Teles Pinheiro<sup>2</sup>; Izabelly Larissa Lucena<sup>2</sup>; Rafael Barbosa Rios<sup>2</sup>; Marcelo Rodrigues de Lima<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - [tbarbalhoeq@live.com](mailto:tbarbalhoeq@live.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Agrotecnologia e Ciências Sociais - [alvaro\\_eq@hotmail.com](mailto:alvaro_eq@hotmail.com)

<sup>3</sup> Petróleo Brasileiro S.A., Operação Riacho da Forquilha - [marcelo.rodrigueseq@gmail.com](mailto:marcelo.rodrigueseq@gmail.com)

### RESUMO

Este trabalho avaliou o comportamento dinâmico da pressão em vasos separadores bifásicos verticais gás-líquido de uma estação de processamento primário de petróleo, verificando a influência de variáveis como vazão de gás de entrada e de saída do vaso, abertura de uma válvula de controle específica e pressão à jusante desta. Foi desenvolvido um modelo matemático para descrever a relação entre a pressão dentro do vaso e o tempo, sendo observado que este se adequou aos dados reais obtidos em testes de campo variando-se a abertura da válvula de controle (de característica inerente linear) de 70% e 80%. Para a abertura de 85%, o modelo proposto não se adequou devido à mudança de característica instalada da válvula, que se afasta do comportamento linear fora do limite de 10% a 80% de abertura.

**Palavras-chave:** Vasos separadores, Pressão, Válvula de controle.

### 1. INTRODUÇÃO

O petróleo é uma matéria prima essencial à vida moderna, sendo o componente básico de mais de 6.000 produtos. Gasolina, combustível de aviação, gás de cozinha, lubrificantes, borrachas, plásticos, tecidos sintéticos, tintas e até mesmo energia elétrica são exemplos de produtos oriundos de tal matéria prima [GAUTO, 2011].

O processamento primário de petróleo consiste na primeira etapa da fase de produção, na qual o petróleo passa, após sair do reservatório. Normalmente, observa-se a produção simultânea de gás, óleo e água, juntamente com impurezas [BRASIL *et al.*, 2011].

Dependendo do tipo de fluidos produzidos e da viabilidade técnico-

econômica, uma planta de processamento primário pode ser simples ou complexa; as mais simples efetuam apenas a separação gás/óleo/água, enquanto que as mais complexas incluem o condicionamento e compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo, assim como o tratamento da água para injeção no reservatório ou descarte [THOMAS, 2004].

Os fluidos produzidos passam, inicialmente, por separadores que podem ser bifásicos ou trifásicos, atuando em série ou paralelo. No separador bifásico ocorre a separação gás/líquido, enquanto que no separador trifásico ocorre, a separação água/óleo/gás [THOMAS, 2004]. Por se tratar de uma etapa importante no processamento primário, tal processo precisa ser bem controlado de modo a evitar problemas operacionais,



tais como deficiência na separação gás-líquido e cenários de insegurança operacional.

### 1.1. Controle de processos

Controle de processos é um campo do conhecimento de engenharia. É fortemente relacionado à operação e à instrumentação. A operação, de uma forma abrangente, sempre envolve algum modelo do processo: é a prática da engenharia de modelagem de processo. A instrumentação, por sua vez, é uma importante área da engenharia de equipamentos, voltada para os dispositivos que permitem realizar a tarefa de regulação do processo [SPANDRI, 2003].

De maneira geral, um controlador de processo calcula o erro entre uma variável medida do processo com o seu valor desejado, e em função deste erro gera um sinal de controle de forma a eliminar este desvio. A pressão é uma das principais variáveis a ser controlada em um vaso separador, pois em caso de valores elevados, a depender das especificações de projeto do equipamento, pode haver rompimento deste causando acidentes com danos materiais, pessoais e ambientais. Além disso, a oscilação da pressão em faixas elevadas pode gerar ineficiência na separação gás-líquido.

Em caso de pressão baixa associada ou não à indisponibilidade da malha de controle de nível, pode ocorrer a passagem de líquido na saída de gás, causando graves problemas para os equipamentos do sistema de compressão de gás.

### 1.2. Válvula de controle

Válvulas de controle são usadas para controlar uma variável de processo. Devem ser operadas remota e automaticamente, requerendo atuadores, que podem ser de diafragma

(pneumáticos), pistão, hidráulico ou eletro-hidráulico [NUNES *et al.*, 2010].

#### 1.2.1. Coeficiente de vazão

Este é utilizado para indicar a quantidade de água a 60°F (15,56°C) que pode fluir através de uma válvula totalmente aberta e com uma queda de pressão de 1psi (0,07 kgf/cm<sup>2</sup>), sendo essa quantidade de fluxo indicada nas tabelas dos fabricantes em galões por minuto (GPM). Para outros líquidos a densidade do fluido deve ser corrigida em relação àquela da água e em sua temperatura de escoamento real na entrada da válvula, se o fluido for compressível os valores de  $C_v$  são os mesmos, porém a equação para dimensionamento será diferente e sua densidade também deve ser corrigida, mas agora em relação ao ar [MATHIAS, 2014].

No caso dos fluidos compressíveis existem fatores que podem alterar o valor desse coeficiente de vazão, como o fator de compressibilidade que é o desvio de comportamento do gás real em relação ao gás perfeito. O fator de expansão relaciona a variação da densidade do fluido durante a passagem através da válvula entre o ponto de entrada da mesma e o ponto da *vena contracta* (seção de menor contração da tubulação), relacionando também a variação na área de fluxo nesse ponto em função da variação de pressão [TYCO, 2012].

Geralmente, as válvulas de controle são instaladas em pontos de redução e de expansão da tubulação causando certa perda de carga no fluido, então o fator de geometria da tubulação adjacente a esse equipamento pode alterar o valor do  $C_v$  na hora do dimensionamento da válvula. Esse fator relaciona a capacidade de vazão através da válvula instalada entre a redução e a expansão e a capacidade de vazão da válvula instalada sem redução e expansão.



### 1.2.2. Característica inerente

A característica inerente da válvula,  $f(x_v)$ , define como a vazão varia em função da fração de abertura dessas, podendo-se destacar as características: linear, igual porcentagem ou abertura rápida.

Na característica linear a vazão é diretamente proporcional à abertura da válvula, ou seja, quando a posição for de 50%, a vazão através da válvula é de 50% de sua vazão máxima, sendo apropriada para aplicações onde a variação de pressão é praticamente constante [RIBEIRO, 2003].

Em relação à característica de igual porcentagem a vazão é proporcional exponencialmente à abertura da válvula, sendo aplicado quando a variação de pressão decresce com a abertura. Quando essa característica é utilizada temos que para pequenas aberturas a variação de vazão é baixa, porém quando próximo de sua abertura total, produz altas variações de vazão [RIBEIRO, 2003].

A válvula de abertura rápida possui característica oposta à da válvula de igual porcentagem, sendo que produz uma grande vazão com pequeno deslocamento da haste da válvula, sendo aplicada em situações que a um aumento na queda de pressão simultaneamente a um aumento de vazão [MATHIAS, 2014].

### 1.2.3. Característica instalada

Na prática, as condições de operação do processo influenciam as características de vazão, e devem ser considerados na seleção da característica inerente a ser empregada. Uma mudança de vazão ocasiona variação na queda de pressão através da válvula, dessa forma, quando instalada, a válvula apresenta característica diferente da sua, ou seja, diferente da inerente [NUNES *et al.*, 2010].

Usualmente, uma válvula com característica inerente de igual porcentagem se torna linear, quando instalada. A exceção, quando a característica inerente é igual à instalação, ocorre quando se tem um sistema com bombeamento com velocidade variável, onde é possível se manter uma queda de pressão constante através da válvula, pelo ajuste da velocidade da bomba [RIBEIRO, 2003].

Em virtude do que foi explicado anteriormente, este trabalho buscou realizar um estudo da relação pressão pelo tempo em vasos separadores verticais da Estação de Processamento Primário X de uma empresa Y, de modo a equacionar o comportamento dinâmico da pressão do vaso, levando em considerações variáveis como vazão de gás de entrada, pressão à jusante da válvula de controle e abertura de uma válvula de controle especificada, dentre outros, e validar o modelo desenvolvido a partir de dados operacionais obtidos em testes de campo.

## 2. METODOLOGIA

Para o presente trabalho foi realizado um estudo de caso para um vaso separador vertical pertencente à Estação de Processamento Primário X de uma empresa Y. Esse equipamento é utilizado para testar os poços de petróleo com o intuito de verificar sua produção atual, a fim de atender a um requisito legal da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), acompanhar desvios de produção e avaliar a sua viabilidade econômica.

### 2.1. Balanço material de gás no vaso separador

Aplicando o balanço molar para o gás no vaso separador, têm-se:



$$\frac{dn_g}{dt} = n_e - n_s \quad [1]$$

A pressão absoluta do vaso separador no qual ocorre teste de um determinado poço neste estudo não ultrapassa o valor de 10 kgf/cm<sup>2</sup>, logo podemos considerar o comportamento ideal do gás (Z = 1). Assim:

$$n = \frac{PV_g}{RT} \quad [2]$$

$$n_e = \frac{PG}{RT} \quad [3]$$

Substituindo as Equações 2 e 3 na Equação 1, e admitindo que para a variação de tempo no qual ocorreu o estudo de caso a temperatura seja constante e que a malha de controle de nível do vaso mantenha este controlado (assim, o volume do vaso ocupado pelo gás é constante), então:

$$\frac{V_g dP}{RTdt} = \frac{P}{RT} (G_e - G_s) \quad [4]$$

Considera-se que as condições de temperatura e pressão das correntes de entrada e saída de gás (à montante da válvula de controle de pressão) são as mesmas condições do interior do vaso. Simplificando a Equação 4, chegamos a:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P}{V_g} (G_e - G_s) \quad [5]$$

O gás na saída do vaso separador passa por uma válvula de controle. A vazão que passa por esta pode ser calculada através de uma relação que considere a queda de pressão no escoamento. Segundo Pinto [2009] a vazão de saída do gás pode ser calculada

pela Equação 6, considerando que a função de abertura da válvula é linear.

$$G'_s = 0,0002881x_v \cdot C_v \cdot \sqrt{A} \quad [6]$$

Onde:

$$A = \frac{(P + P_j) \cdot (P - P_j) \cdot T \cdot MM_{ar}}{P^2 \cdot MM_g}$$

Sabe-se que a vazão obtida pela Equação 6 está referenciada a 15°C (T<sub>ce</sub>) e 1,013 bar (P<sub>ce</sub>), portanto é necessário calcular este nas condições de operação do vaso. Então:

$$\frac{P_{ce} G'_s}{T_{ce}} = \frac{PG_s}{T} \therefore G_s = \frac{P_{ce} T G'_s}{T_{ce} P} \quad [7]$$

Finalmente, substituindo a Equação 7 na Equação 5 chegamos ao modelo proposto para a variação pressão em relação ao tempo.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P}{V_g} \left( G_e - \frac{P_{ce} T G'_s}{T_{ce} P} \right) \quad [8]$$

## 2.2. Validação do Modelo

A Tabela 1 mostra os dados do vaso separador vertical utilizado para o estudo de caso, bem como os valores referentes ao processo e das especificações do fluido de acordo com o relatório de teste de um poço Z. Para o cálculo do volume levou-se em consideração que a malha de controle de nível do vaso atua perfeitamente mantendo este em 30% da altura compreendida entre a tomada superior e inferior do indicador e transmissor de nível.

Tabela 1: Dados referentes aos parâmetros do modelo proposto.

Cv da válvula de controle	34
---------------------------	----



MM <sub>g</sub> (kg/kmol)	17,58
MM <sub>ar</sub> (kg/kmol)	29
Temperatura de operação do vaso (K)	304
Volume ocupado pelo gás (m <sup>3</sup> )	1,35

Para validação do modelo proposto (MP), foram realizadas rotinas no Excel utilizando o método numérico de Euler para resolver a equação diferencial, a fim de verificar a variação de pressão do vaso em relação ao tempo. Para tanto, os resultados obtidos foram comparados com os valores coletados no *software Plant Information (PI)*, que é um banco de dados das variáveis de processo, dentre outras, da planta industrial.

A Tabela 2 mostra as condições iniciais para aplicação do método numérico proposto, uma vez que foram realizados testes para uma determinada abertura da válvula, e um intervalo de tempo de 16 minutos (960 segundos). Foi utilizada uma variação de tempo para cada iteração de 30 segundos. A vazão média de entrada encontra-se na T e P do vaso.

Tabela 2: Condições iniciais para aplicação do método de Euler.

x <sub>v</sub> (%)	Pressão inicial (kgf/cm <sup>2</sup> )	Vazão Média de entrada (m <sup>3</sup> /s)
70	2,864	0,03043
80	2,899	0,03417
85	2,889	0,03176

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 mostram o comportamento da pressão do vaso separador vertical de acordo com o modelo proposto, para uma abertura da válvula de 70% e 80%, respectivamente sendo comparado com os valores coletados do PI.

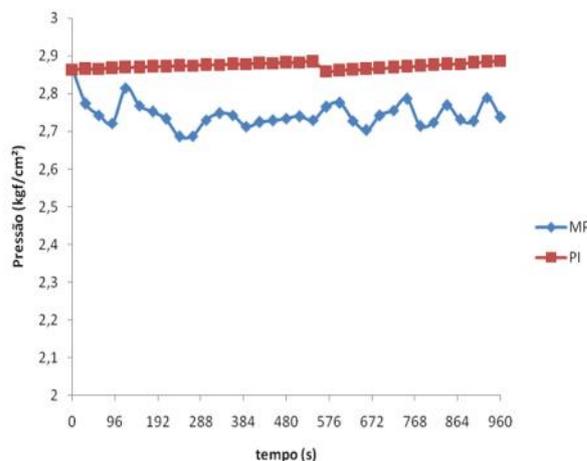


Figura 1: Relação Pressão (absoluta) x Tempo para uma abertura da válvula de 70%.

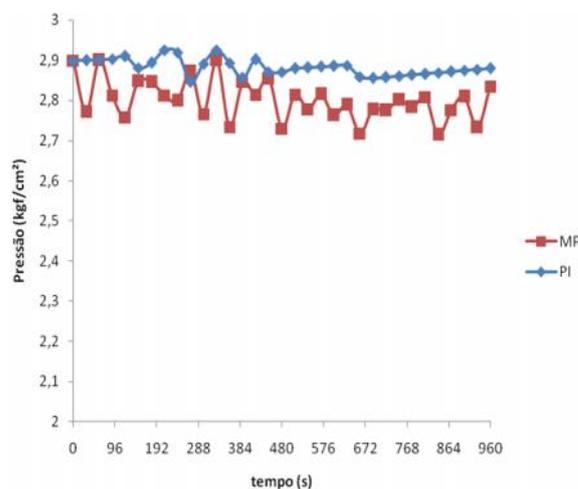


Figura 2: Relação Pressão (absoluta) x Tempo para uma abertura da válvula de 80%.

Pode-se perceber pelos gráficos que qualitativamente o modelo proposto consegue descrever o comportamento do sistema para as aberturas de 70% e 80%, uma vez que o erro entre os valores



calculados e os encontrados no PI foi menor que 5%, como podemos observar pela representação quantitativa presente na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre o MP e o PI para os valores de pressão.

$X_v$ (%)	Pressão média pelo MP (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pressão média pelo PI (kgf/cm <sup>2</sup> )	Erro Relativo (%)
70	2,74	2,87	4,53
80	2,80	2,88	2,78

Devemos observar que variações na vazão de entrada no vaso também acontecem devido às chamadas “golfadas”, e uma vez que isso ocorrerá haverá uma variação também no volume ocupado pelo gás por causa da variação do nível do líquido. A simulação foi feita sendo fixada a vazão de entrada e o volume ocupado pelo gás.

Outro ponto a ser considerado é que um modelo mais rigoroso para o cálculo da vazão de saída do gás leva em consideração o fator de geometria da tubulação adjacente à válvula, fator de compressibilidade e de expansão do gás.

A Figura 3 mostra as variações da pressão no vaso com o tempo para uma abertura de 85% da válvula de controle.

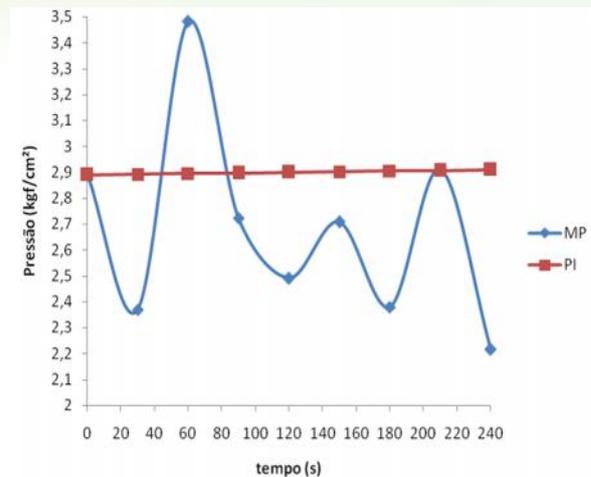


Figura 3: Relação Pressão (absoluta) x Tempo para uma abertura da válvula de 85%.

Observa-se que para uma abertura de 85% o modelo proposto não consegue mais descrever o comportamento real do processo, tendo em vista que nesta porcentagem de abertura, a válvula apresenta característica instalada muito diferente da sua característica inerente. Na simulação realizada, foi considerada uma característica linear, porém com essa porcentagem essa hipótese fornece grandes erros.

Segundo Bishop *et al* [2002] o melhor desempenho de controle das válvulas ocorre entre 10 e 80% de abertura, evitando-se assim usar valores diferentes desse intervalo para que não ocorra essa mudança na característica da válvula.

Nota-se também que após 240 segundos de teste, o modelo gerou valores de pressão do vaso menores que a jusante da válvula. Desse modo, não foi mais possível calcular a vazão de saída do gás, e, conseqüentemente, de continuar as iterações.

Para todas as aberturas há também o erro inerente ao método utilizado para a resolução da equação diferencial, pois à medida que se avança com as iterações a



tendência é ocorra um acúmulo desse erro, uma vez que o passo posterior depende do anterior.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre vasos separadores, tendo como objetivo a compreensão de como este equipamento funciona e como ele está envolvido no processo de separação do petróleo em óleo, gás e água produzida. Ficou claro também a importância de um controle adequado para esse tipo de equipamento.

Foi desenvolvido um modelo matemático para estudar a relação da pressão dentro do vaso separador com o tempo de processo, sendo verificado que o mesmo conseguiu descrever com o comportamento real do processo quando a abertura da válvula foi de 70% e 80%, sendo que para uma porcentagem de 85% o modelo não conseguiu descrever o processo real, uma vez que a consideração de que a característica da válvula linear é válida para um intervalo entre 10% e 80%.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISHOP, T.; CHAPEAUX, M.; JAFFER, L.; NAIR, K.; PATEL, S. Ease control valve selection. Disponível em: <<http://www.cepmagazine.org>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

BRASIL, N. I do; ARAÚJO, M. A. S.; DE SOUSA, E. C. M. **Processamento Primário de Petróleo e Gás**. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2011.

GAUTO, M. A. **Petróleo S.A – Exploração, produção, refino e derivados**. 2011, 130p, Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.

MATHIAS, A. C. **Controle de fluxo através de válvulas manuais e automáticas**. 22f, 2014.

NUNEZ, G. C.; MEDEIROS, J. L.; ARAÚJO, O. Q. F. **Modelagem e controle na produção de petróleo – aplicações em MATLAB**. São Paulo: Blucher, 2010.

PINTO, D. D. D. **Estratégias de Controle Contra Intermitência Severa na Alimentação de Separadores Offshore**. 2009, 179p, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro-RJ.

RIBEIRO, M. A. **Medição de petróleo e gás natural**. 297f, 3ed, Salvador-BA: TEK, 2003.

RIBEIRO, M. A. **Válvula de controle**. 259f, 5ed, Salvador-BA: TEK, 2003.

SPANDRI, R. **Sintonia de controladores regulatórios**. 28f, Curso técnico Petrobras, 2003.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ed, Rio de Janeiro-RJ: Interciência, Petrobras, 2004.

TYCO FLOW CONTROL. **Manual de dimensionamento de válvula**. 32f, 2012.