

## Simulação numérica do transiente em dutos *Numerical simulation of transient in pipelines*

Carolina Andrade de Sousa<sup>1\*</sup>, Stephany Medeiros Miranda<sup>2\*</sup>, Uly Misse Moreno Benedito<sup>3\*</sup>, Oldrich Joel Romero<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Graduandas em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES

<sup>4</sup>Professor, Engenharia de Petróleo e Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES

\*Autor para correspondência, E-mail: [as.carol@hotmail.com](mailto:as.carol@hotmail.com), [stephany.medeiros@gmail.com](mailto:stephany.medeiros@gmail.com), [ullymisse@gmail.com](mailto:ullymisse@gmail.com)

### Article history

Received: 23 April 2017

Accepted: 07 June 2017

Available online: 25 June 2017

**Resumo:** Os dutos são altamente utilizados na indústria petrolífera para o transporte de óleo, gás natural e produtos provenientes de refinarias. Uma das principais áreas de estudo na engenharia de dutos é a garantia de escoamento, além da otimização deste escoamento ao longo da tubulação. É de extrema importância o estudo no modo transiente na tubulação, a fim de determinar e analisar possíveis mudanças nos dutos com o decorrer do tempo. O presente estudo apresenta a modelagem matemática e numérica de um escoamento monofásico em uma tubulação *offshore* de 346 km e 14 pol de diâmetro que transporta querosene, impulsionado por três estações de bombeamento. Foram feitas análises no modo transiente sobre o efeito de bombas e válvulas na pressão e vazão ao longo da tubulação, além de um estudo do surgimento de vazamento no duto e seu crescimento com o tempo. Os resultados, obtidos com o *software* PipelineStudio®, mostram que a pressão e a vazão são bastante influenciados pelo comportamento das bombas e válvulas, e principalmente pelo presença do vazamento.

Palavras chave: Tubulações, modo transiente, vazamento, PipelineStudio.

**Abstract:** Pipelines are highly used in the oil industry for the transportation of oil, natural gas and products from refineries. One of the main areas of study in pipeline engineering is the flow assurance, as well as the optimization of the flow along the pipeline. It is of utmost importance to study the transient mode in pipelines in order to determine and analyze changes in the pipes with time. The present study presents a mathematical and numerical modeling of a single-phase flow in a pipeline buried in a certain soil. Analyzes were made on the influence of pumps and valves on pressure and flow along the pipeline, as well as a study of appearance of leaks in the pipes with time. The simulations and analyzes were accomplished by the use of the software PipelineStudio®. The results show that pressure and flow rate along a pipe are influenced by equipment such as pumps and valves, which must be constantly monitored in order to increase the flow efficiency.

Keywords: Pipelines, transient, leakage, PipelineStudio.

## 1. Introdução

Os dutos constituem um importante meio de recolhimento e transporte de vários tipos de mercadorias, desde petróleo, gás natural, produtos químicos até água e esgotos. O seu uso expandiu-se com o tempo porque são mais eficientes em termos energéticos do que os outros meios de transporte concorrentes (Kyriakides e Corona, 2007). O uso de tubulações é cada vez mais evidente na indústria devido à crescente necessidade de transportar materiais, geralmente fluidos, de um ponto a outro, distantes entre si.

Desde o início da indústria petrolífera os oleodutos têm se provado o método mais econômico para a distribuição e transporte de gás natural e óleo em grandes quantidades (Stewart, 1933). Embora exijam um investimento inicial significativo, os dutos de forma geral têm uma vida útil de até 40 anos e requerem uma manutenção relativamente pequena (Kyriakides e Corona, 2007). Por esse motivo é considerado o meio mais prático, seguro e adequado no que se refere ao transporte do petróleo bruto e gás natural, desde os campos de produção até às refinarias e fábricas de transformação assim como à chegada dos derivados do petróleo até seus consumidores.

Uma das principais linhas de estudo da engenharia de dutos é a garantia do escoamento, com destaque para o vazamento de fluidos que são propícios de acontecer devido ao ambiente agressivo em que os dutos estão geralmente expostos. A perda de fluido para o meio externo interfere diretamente nos campos de velocidade, pressão e temperatura, e principalmente na diminuição da volume transportado.

Em virtude da dificuldade de analisar, mediante experimentos, o efeito do vazamento devido principalmente à extensão dos dutos, faz-se necessário a utilização de ferramentas computacionais. Esta é a proposta deste trabalho. Neste sentido, a metodologia se inicia com a definição do modelo físico, que traduz de forma simplificada o problema real. Em seguida as equações que governam o fenômeno, assim como seus limites de validade, devem ser especificadas. A continuação, a abordagem numérica é descrita e por fim os resultados adequadamente justificados são relatados.

## 2. Metodologia

### 2.1 Especificação do problema

O problema abordado refere-se ao escoamento de 670 bbl/h de querosene, em uma tubulação de 346 km e 14 pol de diâmetro que interliga uma refinaria a um aeroporto. No destino final o querosene é utilizado como combustível para as aeronaves. O sistema de transporte é composto por uma tubulação com três estações de bombeamento, três válvulas reguladoras, seis válvulas de checagem e uma válvula de bloqueio, como mostra a Fig. 1. A tubulação é dividida em cinco segmentos (L1, L2, L3, L4 e L5), cujas características são detalhadas na Tabela 1. O fluido ingressa com pressão máxima de 100 psig e temperatura ambiente 26,67 °C. A pressão na saída é 100 psi ou 14,7 psig a depender da condição analisada (Tabela 2).

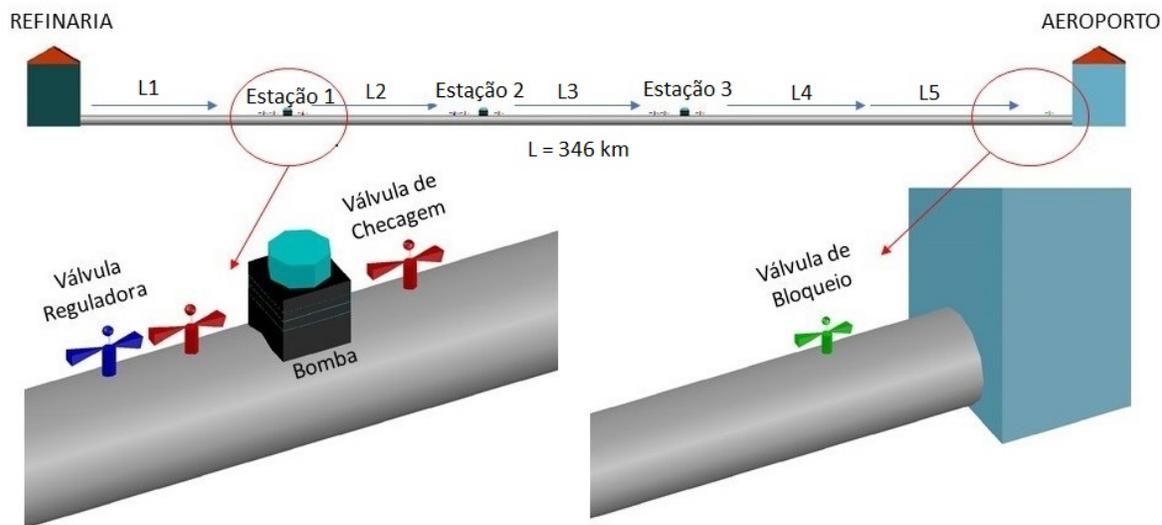


Figura 1. Esquema da tubulação com os cinco segmentos e os equipamentos principais.

Tabela 1. Geometria da tubulação.

| Segmento da tubulação | Diâmetro, pol | Comprimento, km | Espessura da parede, pol | Rugosidade, pol |
|-----------------------|---------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| L1                    | 14            | 85,3            | 0,5                      | 0,0014          |
| L2                    | 14            | 115,87          | 0,5                      | 0,0014          |
| L3                    | 14            | 101,39          | 0,5                      | 0,0014          |
| L4                    | 14            | 12,87           | 0,5                      | 0,0014          |
| L5                    | 14            | 30,58           | 0,5                      | 0,0014          |

A mudança de relevo é mínima tal que não afeta a horizontalidade da tubulação que encontra-se soterrada em um solo argiloso com temperatura de 60°F (15°C). O fluido sendo transportado é o querosene de °API 47 e viscosidade inicial de 2,01 cS.

Na Fig. 1 são mostrados os equipamentos envolvidos, onde as bombas e válvulas de checagem e reguladoras encontram-se ao final dos trechos L1, L2 e L3, e a válvula de bloqueio ao final da tubulação L5. As bombas, inicialmente trabalham a 3.565 rpm e a uma pressão máxima de entrada de 50 psig. Existe uma válvula reguladora antes de cada bomba, e uma válvula de checagem antes e após cada bomba. As válvulas reguladoras controlam a pressão na entrada das bombas, e as válvulas de checagem evitam o fluxo reverso. A válvula de bloqueio localizada na parte final da tubulação é responsável pelo controle do fluxo de fluido.

No presente estudo são avaliados o efeito das válvulas reguladoras, pressão na admissão da bomba e a presença de vazamento na tubulação. Estas alterações originam o transiente cujo comportamento é de interesse.

## 2.2 Formulação matemática

Por se tratar de um escoamento que é dominante na direção axial, o problema é considerado como unidimensional. Os efeitos de elevação são desconsiderados, portanto a tubulação é horizontal. Como o interesse é na captura de fenômenos dependentes do tempo, o regime é transiente e não isotérmico. Trata-se de um fluido Newtoniano, incompressível e com calor específico constante.

A equação da continuidade aplicada a um fluido com massa específica  $\rho$ , que escoar com velocidade  $v$  através de um volume elementar  $dV$  com área da seção transversal da tubulação  $A$  na presença de um vazamento  $Q_{leak}$  é (Romero, 1999)

$$\frac{1}{dV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho dV) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\rho Av) + \frac{1}{dV} Q_{leak} = 0, \quad (1)$$

a variável  $t$  denota o tempo e  $Q_{leak}$  é a vazão em massa do fluido perdida pelo furo, modelada mediante (*PipelineStudio*, 2016)

$$Q_{leak} = 0,525 D_{leak}^2 \left[ \frac{(p - P_{atm}) \rho}{C_{leak}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

em que  $D_{leak}$  é o diâmetro do furo,  $p$  é a pressão do fluido na tubulação,  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica e  $C_{leak}$  é o coeficiente de descarga através do furo.

A equação da quantidade de movimento linear simplificada para a situação estudada pode ser escrita como

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f |v|}{2 D}, \quad (3)$$

o fator de atrito de Moody  $f$  depende do número de Reynolds  $Re = \rho DV / \mu$ , parâmetro que classifica o escoamento como laminar ou turbulento, para um fluido com viscosidade dinâmica  $\mu$ . No regime laminar o fator de atrito é  $f = 64/Re$ . Na região de transição tem-se  $2.000 < Re < 2.400$ . Já para um regime turbulento,  $Re \geq 2.400$ , o fator de atrito é aproximado pela correlação de Miller  $f = 0,25 \left[ \log \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}$  (Fox e McDonald, 2001). Neste estudo, o número de Reynolds está entre 39.202 e 53.186, isso é, o escoamento é turbulento.

Como condições de contorno adotadas são vazão prescrita de 670 bbl/h na entrada; pressão na saída antes do início do vazamento de 100psig e 14,7psig com vazamento, isso porque a pressão na saída e na posição do furo são iguais.

E como condições iniciais tem-se as três bombas operando a 3.565 rpm e pressão na entrada das válvulas de 50 psig.

Os nove cenários analisados são detalhados na Tabela 2.

Tabela 2. Cenários considerados.

| Cenário / Caso | Pressão na válvula reguladora, psi | Pressão na admissão da bomba, psi | Rotação da bomba, RPM | $D_{leak}$ , % | Pressão na saída, psig |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------|------------------------|
| 1 / 1          | 50                                 |                                   | 3365                  | 0              | 100                    |
| 1 / 2          | 70                                 |                                   | 3365                  | 0              | 100                    |
| 1 / 3          |                                    | 70                                | 3365                  | 0              | 100                    |
| 1 / 4          | 30                                 |                                   | 3365                  | 0              | 100                    |
| 2 / 5          |                                    |                                   | 3365                  | 0              | 100                    |
| 2 / 6          |                                    |                                   | 1000                  | 0              | 100                    |
| 3 / 7          |                                    |                                   |                       | 1              | 14,7                   |
| 3 / 8          |                                    |                                   |                       | 5              | 14,7                   |
| 3 / 9          |                                    |                                   |                       | 10             | 14,7                   |

### 2.3 Abordagem numérica

É utilizado o PipelineStudio 4.0, um *software* de gerenciamento de projetos de tubulações e solução de engenharia que integra respostas gráficas e análise por relatórios de forma rápida, precisa e confiável para estudos realizados em estado permanente ou transiente. Permite analisar escoamento monofásico, laminar ou turbulento, com ou sem troca de calor, dentre outros. A licença acadêmica desta ferramenta se encontra instalado no Laboratório de Simulação Numérica da Engenharia de Petróleo – Labsim.

O problema proposto na simbologia do *software* é apresentado na Fig. 2.

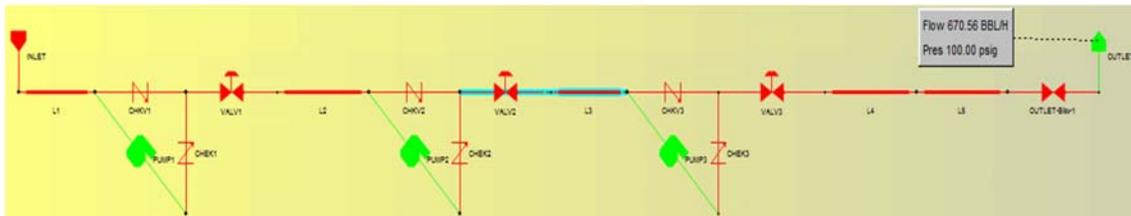


Figura 2. Esquema da tubulação na simbologia do PipelineStudio®.

### 3. Resultados e discussões

Inicialmente a rotação das bombas são mantidas constantes em 3.565 rpm por 45 minutos. A variação da pressão ao longo dos 350 km do duto para esta condição é mostrada na Fig. 3. Nota-se que nas distâncias de 84,8 km, 200 km e 300,8 km locais da primeira, segunda e terceira bomba respectivamente, a pressão de entrada das bombas é de 50 psig, devido à presença da válvula reguladora de pressão. Estes dispositivos controlam o fluxo de líquidos ou gases de forma automática, regulando o fluxo até que um nível de pressão determinado seja atingido.

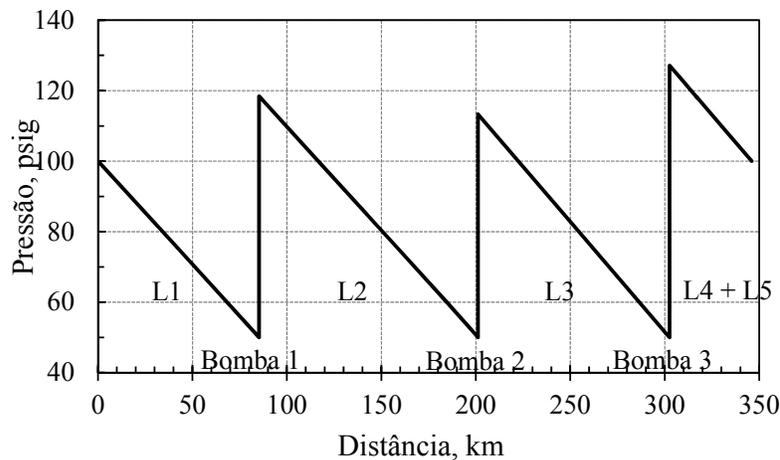


Figura 3. Pressão ao longo dos cinco segmentos do duto.

A fim de constatar a influência que os equipamentos e o aparecimento de furos na tubulação exercem nos campos de pressão e vazão ao longo do escoamento, foram realizadas três modificações no cenário inicial. Nas duas primeiras foram realizadas alterações nos parâmetros das bombas e válvulas com o objetivo de evidenciar sua influência no escoamento do querosene ao longo da tubulação. A terceira simulação foi feita uma análise do aparecimento e do aumento gradativo do diâmetro de um furo nos trechos L4 e L5.

### 3.1 Cenário 1: Alteração da pressão mínima da válvula reguladora 1

Neste cenário alterou-se a pressão mínima de entrada na válvula primeira reguladora a fim de mostrar que ela controla a pressão de entrada na bomba. Pode-se observar através da Fig. 4 que com o aumento da pressão mínima da válvula de 50 psig para 70 psig, a pressão de entrada na bomba também foi alterada para 70 psig. A mesma análise pode ser feita para a redução da pressão da válvula reguladora de 50 psig para 30 psig.

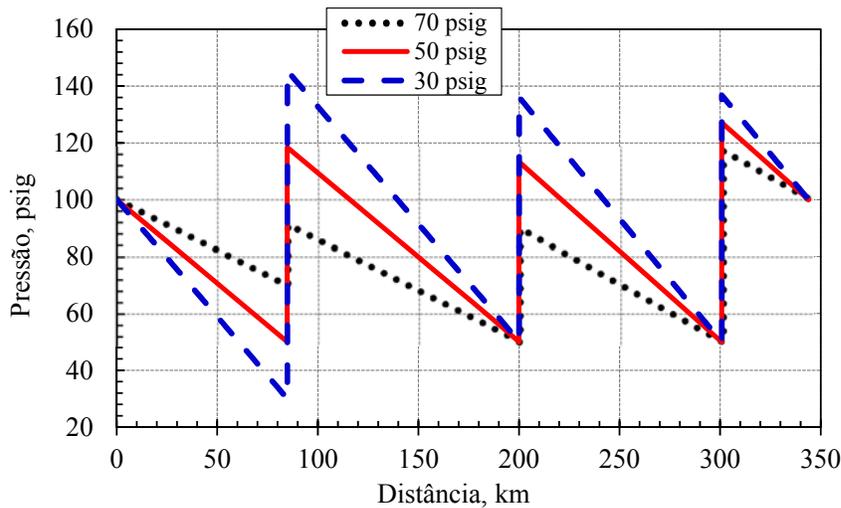


Figura 2. Variação da pressão ao longo dos 350 km do duto para o cenário 1.

A queda ou o aumento da pressão de entrada na bomba altera, por sua vez, a vazão como pode ser verificado na Fig. 5.

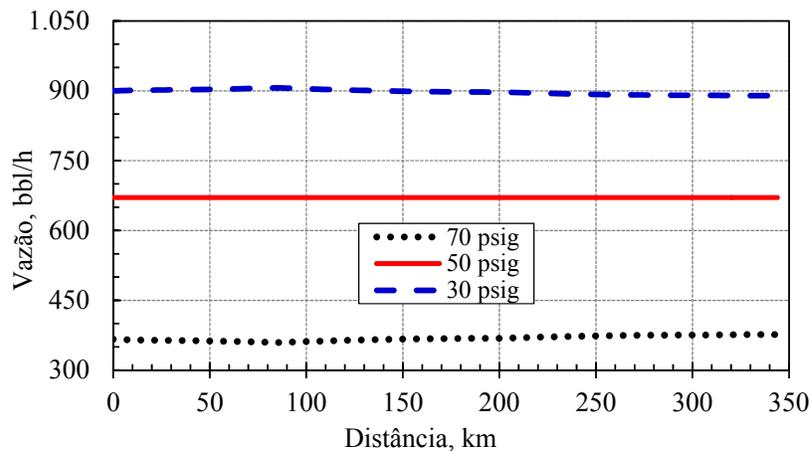


Figura 3. Comportamento da vazão ao longo dos 350 km do duto para o cenário 1.

Quando a pressão da válvula reguladora é aumentada para 70 psig nota-se uma diminuição da vazão. Observa-se o contrário para a diminuição da pressão na válvula para 30 psig. Esse fato é decorrente da diferença entre as pressões de entrada da tubulação (100 psi) e da válvula reguladora (70,50 ou 30 psig). Quanto maior for esse diferencial de pressão, maior também será a vazão.

### 3.2 Cenário 2: Alteração da rotação da bomba 3

No segundo cenário alterou-se a rotação da terceira bomba a fim de indicar um possível desgaste desse equipamento com o passar do tempo. Diante disso, após 45 minutos de simulação a rotação por minuto da bomba 3 diminuiu de 3565 rpm para 1000 rpm. Com essa diminuição da rotação, espera-se que ocorra um aumento de pressão e consequentemente a diminuição da vazão.

De acordo com a Fig. 6, percebe-se um aumento da pressão de saída da bomba 2 com a diminuição do rpm da bomba 3. Isso pode ser explicado pelo fato de que o problema está definido a partir de pressões prescritas na entrada e na saída da tubulação (100 psig). Com a rotação menor, a bomba 3 não seria capaz de aplicar uma pressão suficiente para fazer com que o fluido chegasse com 100 psig na válvula de bloqueio. Por esse motivo, a fim de solucionar o problema, a bomba 2 aumenta a pressão fornecida ao fluido para manter a mesma queda de pressão ao longo da tubulação. Dessa forma, mesmo com a redução da rotação por minuto da bomba 3, o fluido continua chegando a 100 psig na válvula de bloqueio, garantindo assim o escoamento até o objetivo final.

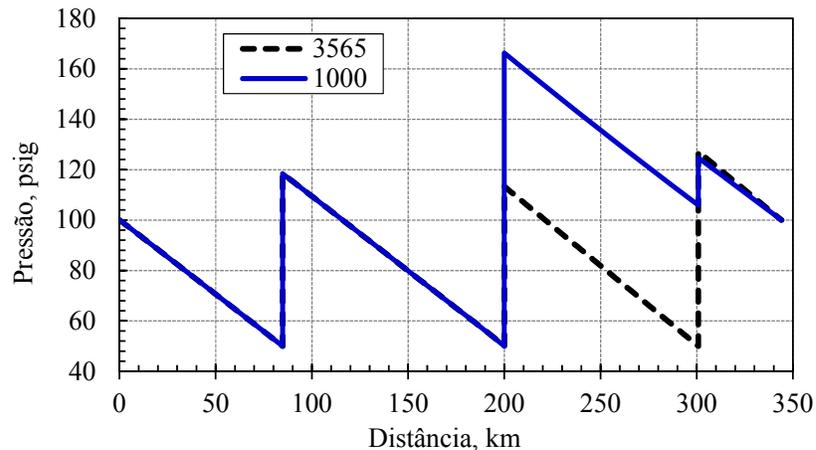


Figura 6. Variação da pressão ao longo dos 350 km do duto para o cenário 2 com duas RPM.

### 3.3 Cenário 3: Análise do vazamento

Neste último cenário simulou-se uma situação de vazamento na tubulação que é um problema recorrente devido ao ambiente extremamente agressivo em que esse tipo de tubulação está inserida. O vazamento pode ocorrer em qualquer ponto da tubulação e em qualquer instante de tempo (Romero, 1999). O objetivo deste cenário é analisar a variação das grandezas que são relevantes ao processo de monitoramento diante do aparecimento e do aumento ao longo do tempo de um furo na tubulação, situado entre os trechos 4 e 5, a 313,6 km do início da tubulação. Inseriu-se o furo nesta posição já que há uma maior probabilidade do seu aparecimento em junções entre tubulações.

Considerou-se o crescimento gradativo ao longo do tempo para esse furo a partir de proporções do diâmetro da própria tubulação. Portanto o diâmetro do furo varia de 1%, 5% até 10% do diâmetro original da tubulação (Romero, 1999). Vale ressaltar que se alterou as condições de contorno do problema para a situação de vazamento, em que a pressão prescrita no final do escoamento de 100 psig, mudou para 14,7 psig que é a pressão ambiente. Essa alteração foi realizada a fim de viabilizar a simulação do vazamento já que o furo deve estar nas mesmas condições de contorno da saída da tubulação.

Com base na Fig. 7, percebe-se a redução da pressão com o tempo no trecho 5 que contém o vazamento na medida em que ocorre o aumento do diâmetro do furo. Na Fig. 8 observa-se uma queda de pressão significativa no final do perfil justamente devido a presença do vazamento de 10% do diâmetro.

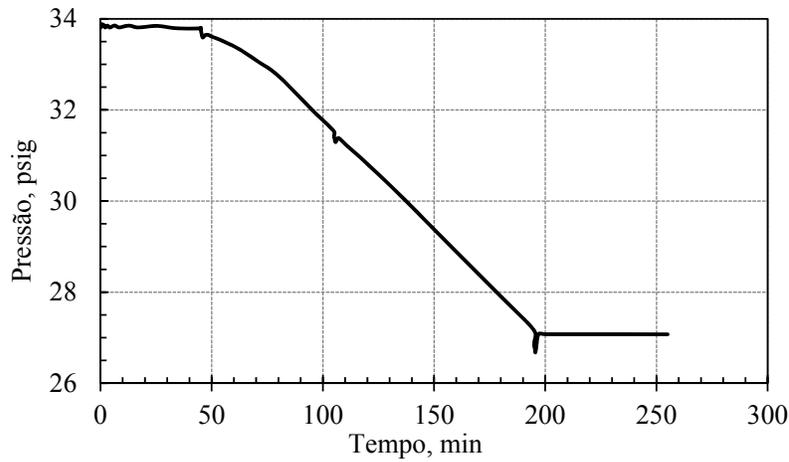


Figura 4. Variação de pressão ao longo do tempo no trecho 5 da tubulação.

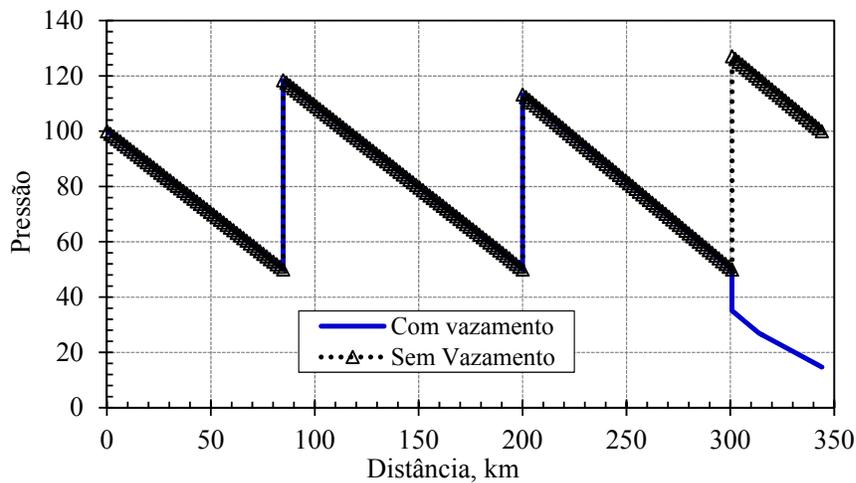


Figura 5. Variação da pressão final com e sem vazamento.

De forma similar, sabe-se que a vazão será decrescente já que há perda de fluido para o ambiente através do furo (Fig. 9). Essa perda de material é comprovada a partir Fig. 10 em que a vazão no vazamento aumenta gradativamente a partir de 45 minutos, momento quando surge o furo de 0,35 cm. Nota-se picos quando há a alteração dos diâmetros devido a sua mudança abrupta. A queda de vazão final é constatada na Fig. 11 onde a mesma decai de aproximadamente 670,57 bbl/h para 349,26 bbl/h devido à presença do vazamento final de 10% na junção das tubulações L4 e L5 (313,6 Km).

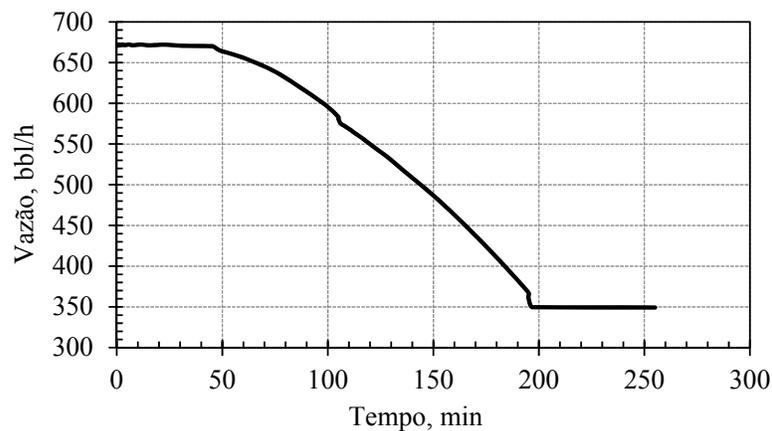


Figura 6. Variação da vazão ao longo do tempo no trecho 5 que contém o vazamento.

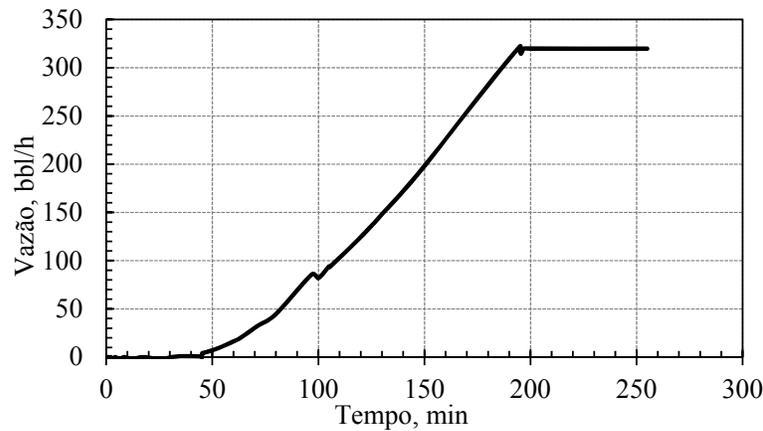


Figura 7. Variação da vazão ao longo do tempo no vazamento.

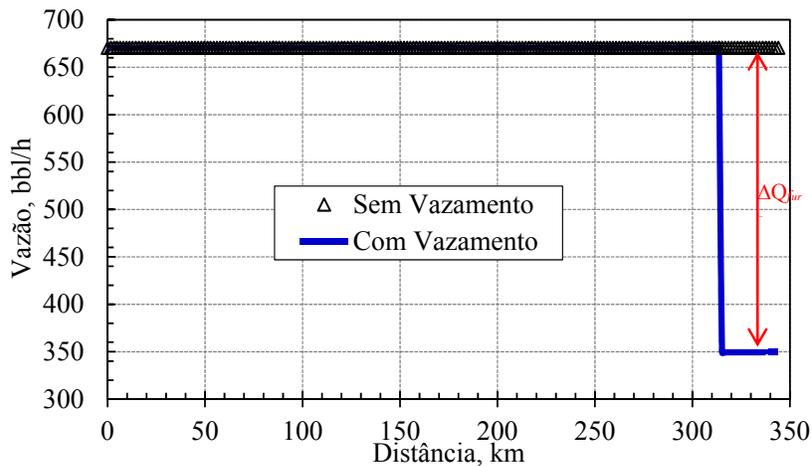


Figura 8. Variação da vazão final com e sem vazamento.

#### 4. Conclusões

O modo transiente mostrou-se extremamente importante na realização de simulações devido sua facilidade em avaliar cenários que podem acontecer durante a operação de transporte de fluido em uma tubulação, como por exemplo, o desgaste de algum equipamento e o surgimento de vazamentos com o decorrer do tempo.

O transporte de fluidos por longas distâncias é possível desde que o número de estações de bombeamento, e potência de cada uma, seja adequadamente definida para a entrega dos fluidos na vazão e pressão requeridas.

Vazamentos são prejudiciais pois significam volumes de fluidos perdidos para o meio externo, isso tem impacto nas receitas e no meio ambiente. Entretanto o tamanho do furo e o tempo em que ficam vazando antes da sua detecção definem a magnitude do impacto.

A grande influência de equipamentos como bombas e válvulas também ficou evidente ao analisar como a mudança de seus parâmetros modifica a pressão e a vazão ao longo da tubulação e do tempo. Isso mostra que tais equipamentos devem ser monitorados constantemente a fim serem usados para aumentar a eficiência do transporte por tubulações.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a *Energy Solutions International* pela concessão da licença acadêmica do *software PipelineStudio®* no laboratório de Simulação Numérica da Engenharia de Petróleo/Ufes. Agradecemos também ao capítulo estudantil SPE Ufes <spe.ufes.br>, por viabilizar o uso gratuito da plataforma *OnePetro* <onepetro.org> da SPE – *Society of Petroleum Engineers* nas instalações da Ufes campus São Mateus.

## Referências bibliográficas

- M., Al-Khomairi. *Improving Leak Detectability in Long Liquids Pipelines*, Ph.D. Thesis, (Civil Eng.), Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1995.
- Ayub, M.; Bentsen, R. G. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 23, p.13-26, 1999.
- Baptista, R. M.; Quadri, M. B.; Machado, R. A. F.; Bolzan, A.; Nogueira, A. L.; Mariano, G. C.; Lopes, T. J. *Effective Interfacial Tension and Geometrical Parameters Relationship for the Description of Oil Leakages from Submarine Pipelines*. 8º International Conference on Chemical & Process Engineering. Napolis, Milano : AIDIC Servizi S.r.l, v. 11, p. 401-406, 2007.
- Escobedo, J. J. B.; Nieckele, A. O.; Azevedo, L. F. A. *Transient thermal analysis in subsea pipelines*. International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, Mg, v. 1, n. 1, p.1-8, 06 nov. 2005. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2005/PDF/COBEM2005-0166.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2017.
- Fortuna, A. R., 2000. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações*, Editora USP, São Paulo – SP.
- Fox, R.W.; McDonald, A.T., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Editora LTC., 5ª Edição, 2001.
- Jonsson, L.; Larson, M. *Leak Detection through Hydraulic Transient Analysis*. Pipeline Systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1992.
- Kyriakides, S.; Corona, E. *Mechanics of Offshore Pipelines: Volume 1: Buckling and Collapse*. Austin: Elsevier, 2007.
- PipelineStudio, PipelineStudio – User’s guide, Energy Solutions® International, 2016.
- Quadri, M. B.; Baptista, R. M.; Machado, R. A. F.; Nogueira, A. L.; Lopes, T. J. 2004, Proceedings of the International Pipeline Conference, Calgary. 2004.
- Romero, O. J. *Um método conservativo para análise de transientes de gases/líquidos em tubulações*. 1999. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- Stewart, G. *Line-pipe*. Onepetro, Londres, p.540-541, jul. 1933.
- Washio, S.; Takahashi, S.; Yu, Y., Yamaguchi, S. *Study of Unsteady Orifice Flow Characteristics in Hydraulic Oil Lines*, *Journal of Fluids Engineering*, 118 (1996), pp. 743–747.
- Wylie, E.; Streeter, V., *Fluid Transients in Systems*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc., 1993.