

## Estudo da transferência de calor durante a injeção de vapor em poços de petróleo

Elcio Dias Junior, Oldrich Joel Romero\*

Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES campus São Mateus, Rodovia BR 101 Norte, km 60, Litorâneo, CEP 29.932-540, São Mateus, ES, Brasil

\*Autor para correspondência

Endereço eletrônico: [elcio.diasjunior@gmail.com](mailto:elcio.diasjunior@gmail.com) (Dias Jr., E.), [oldrich.romero@ufes.br](mailto:oldrich.romero@ufes.br) (Romero, O. J.)

*Os métodos térmicos são fundamentais quando o assunto em pauta é a produção de óleos pesados. Uma das principais tecnologias utilizadas é a de injeção de vapor, que visa principalmente diminuir a viscosidade do óleo e consequentemente aumentar sua mobilidade. Um desafio enfrentado pelas companhias que geram e injetam vapor é a redução da perda de calor para o ambiente. Através da otimização do layout ou da utilização de unidades de geração de vapor móveis, o objetivo maior é reduzir as perdas para o meio ambiente de modo que o vapor saturado chegue até a zona produtora com o título mais próximo possível ao original. Para isso, torna-se necessário entender os mecanismos de transferência de calor e as principais causas das perdas de calor e de carga que ocorrem ao longo da injeção. Com esta finalidade foi utilizado o simulador Pipesim® da Schlumberger considerando informações de campos de produção onshore de petróleo. Os resultados obtidos relacionam o título, a pressão e a temperatura do vapor com o comprimento total da linha e da coluna de injeção. De acordo com o comprimento total e as condições de contorno o vapor perderá consideravelmente sua qualidade e consequentemente poderá tornar a operação inviável do ponto de vista produtivo.*

Palavras-chave: EOR. Métodos térmicos. Injeção de vapor. Perdas de calor. Qualidade do vapor.

### 1. Introdução

No mundo, as reservas conhecidas de óleos pesado e extrapesados são de cerca de 3,396 trilhões ( $10^{12}$ ) de barris *in situ*, Opec (2012). Os métodos térmicos de recuperação avançada vêm sendo utilizados desde meados do século XX, sendo os métodos mais desenvolvidos dentre os métodos avançados de recuperação e preferencialmente aplicados para óleos pesados e areias betuminosas. Eles fornecem calor ao reservatório, onde o princípio está baseado na diminuição da viscosidade e consequente aumento da mobilidade do óleo (THOMAS, 2008).

Vapor saturado à alta pressão é injetado no poço através de uma coluna de injeção ou pelo espaço anular até que o mesmo seja entregue na formação produtora. O dimensionamento de um projeto de injeção exige o cálculo da quantidade de calor transportada pelo fluido, assim como o conhecimento da temperatura, título/qualidade e pressão do vapor na região dos canhoneados.

Dependendo das características e propriedades do sistema de injeção de vapor, tais como comprimento, geometria e parâmetros operacionais nas linhas de distribuição e de injeção, o desempenho do sistema será alterado, e para sua correta compreensão são necessárias modelos matemáticos e numéricos adequados.

Como pode ser visto na Fig. 1, o processo de injeção de vapor inicia-se na unidade de geração de vapor – UGV (1) onde a água é bombeada para o gerador de vapor e transforma-se em vapor úmido. As linhas de distribuição (2) transportam o vapor para os poços injetores. Após passar pelo sistema árvore de natal/cabeça do poço, o vapor percorre a coluna de injeção até ser inserido na formação produtora (3). Em (4) o vapor escoar no interior de reservatório e, à medida que troca calor com a formação e com o óleo, parte do vapor condensa transformando-se em água quente. O óleo, agora com viscosidade reduzida, é produzido (5) e enviado para a estação de separação (6) em superfície através dos poços produtores.

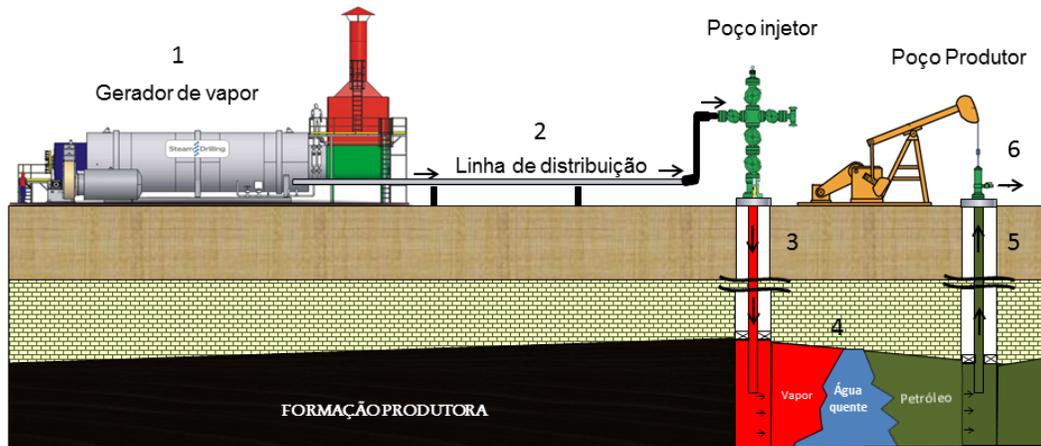


Figura 1: Esquema de injeção de vapor contínua.

As perdas de calor no processo de injeção desde os geradores até o reservatório são apresentadas na Fig. 2. O vapor gerado na UGV troca calor com o meio que o rodeia ao longo de todo seu percurso, sendo mais intenso nas linhas de superfície.

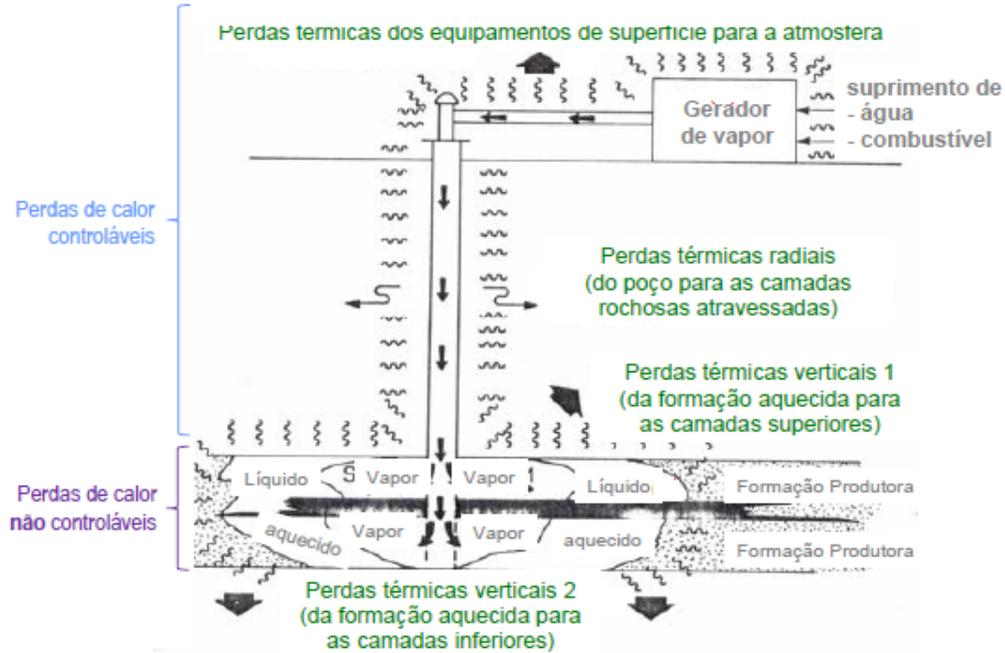


Figura 2: Perdas de calor no sistema (ROMERO, 2013).

O presente trabalho estuda a transferência de calor nas etapas (2) e (3) apresentadas na Fig. 1, ou seja, na distribuição e injeção até a interface poço-reservatório. A perda de calor no processo de injeção de vapor será avaliada a partir da determinação da quantidade de calor, em forma de título, perdida nas linhas de transferência e na coluna de injeção. Para tanto será utilizada o *software* comercial Pipesim<sup>®</sup>.

## 2. Modelo matemático

O principal parâmetro de transferência de calor é o coeficiente de transferência de calor  $U$ , Eq. (1), o qual é determinado a partir da analogia com associação em série de resistências, como: resistência da parede da tubulação, resistência do isolamento ao redor do tubo e a resistência a perda de calor para a atmosfera.

$$U = \left[ \frac{d_o \ln \frac{d_o}{d_l}}{k_s} + \frac{d_o \ln \frac{d_e}{d_o}}{k_i} + \frac{d_o}{d_e(h_e+h_r)} \right] \quad (1)$$

sendo  $d_o$  o diâmetro externo do tubo;  $d_l$  o diâmetro interno do tubo;  $d_e$  o diâmetro do tubo incluindo isolamento;  $k_s$  a condutividade termal do aço do tubo;  $k_i$  a condutividade termal do isolamento;  $h_e$  o coeficiente de transferência de calor por convecção; e  $h_r$  o coeficiente de transferência de calor por radiação.

Para projetos de injeção de vapor, os poços de injeção usualmente são completados de uma maneira tal que possibilite minimizar as perdas de calor. A perda de calor para a formação atravessada pelo poço, ocorre por condução através do tubo, por radiação e convecção através do anular, condução através do revestimento de aço e pelo cimento. A transferência de calor entre o fluido e a interface cimento/formação é assumida como permanente, isto é, mudanças de temperatura no fluido são propagadas instantaneamente através do anular. A transferência de calor nessa região é dada por

$$Q_l = 2\pi r_{to} U_{to} (T_s - T_h) \quad (2)$$

sendo a temperatura  $T_h$  e o coeficiente  $U_{to}$  definidas pelas Eqs. (3) e (4).

$$T_h = [T_s f(t) + (k_{hf} r_{to} / U_{to}) T_e] / f(t) + (k_{hf} r_{to} / U_{to}) \quad (3)$$

$$U_{to} = \left[ \frac{r_{to}}{r_{ti} h_f} + \frac{r_{to} \ln \frac{r_{to}}{r_{ti}}}{k_{htub}} + \frac{1}{(h_{nc} + h_r)} + \frac{r_{to} \ln \frac{r_{co}}{r_{ci}}}{k_{hcas}} + \frac{r_{to} \ln \frac{r_{hd}}{r_{co}}}{k_{hcem}} \right] \quad (4)$$

Tal como mostrado na Fig. 2, pouco controle pode ser exercido sobre a maior fonte de perda de calor, a formação produtora, onde o calor é perdido por condução através das rochas não produtoras adjacentes. A taxa de perda depende da área aberta ao fluxo e aumenta com o crescimento da zona de vapor (RODRIGUES, 2008).

Maiores informações referentes ao equacionamento e nomenclatura podem ser encontradas em Dias Jr. (2014).

### 3. Descrição do problema

O problema a ser estudado compreende um campo de produção *onshore* de óleos pesados, onde existem diversos poços de produção e/ou injeção numa determinada região. Próximo a esses poços situam-se unidades de geração de vapor (UGV) acopladas a uma estação de tratamento de petróleo (unidade de processamento primário).

São avaliados duas configurações com posicionamentos diferentes da UGV. **Caso 1:** UGV móvel operando a no máximo 10 m do poço injetor; e **Caso 2:** UGV fixa instalada a uma dada distância do poço injetor. Os dados utilizados são apresentados nas Tabelas 1 e 2, e são relativos à geometria do sistema, condições iniciais e propriedades dos materiais.

**Tabela 1:** Dados PVT.

Parâmetro	Valor
Razão Gás/Líquido (RGL), m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0
Corte de água, %	100
Densidade da água	1,02
Capacidade calorífica da água, J/g/K	4,18
Condutividade térmica da água, W/m/K	0,61

**Tabela 2:** Geometria da linha de distribuição de vapor para uma temperatura ambiente de 30 °C.

Comprimento UGV fixa / cabeça do poço, m	Comprimento UGV Móvel / cabeça do poço, m	Diâmetro interno, pol	Inclinação, graus
1.000	10	12, 10 e 8	0

Os dados referentes à geometria da coluna de injeção são: profundidade total fixa de 750 m, diâmetro interno fixo de 4,5 pol e a inclinação de 90 graus. A condutividade térmica do isolante é 0,22 W/m/K e sua espessura de 1,968 pol. A condutividade térmica da linha de distribuição é 50 W/m/K e da coluna de injeção é 60 W/m/K. Para o reservatório a pressão estática é 50 kgf/cm<sup>2</sup> e a temperatura é 45 °C.

É utilizado o programa computacional Pipesim® para estudar o efeito dos seguintes parâmetros de campo:

- ✓ Diâmetro interno da linha de distribuição e da coluna de injeção (*Inner Diameter ID*);
- ✓ Comprimento da linha de distribuição;
- ✓ Espessura da parede da linha;
- ✓ Condições iniciais de temperatura e pressão;
- ✓ Espessura do isolante térmico;
- ✓ Propriedades do isolante térmico.

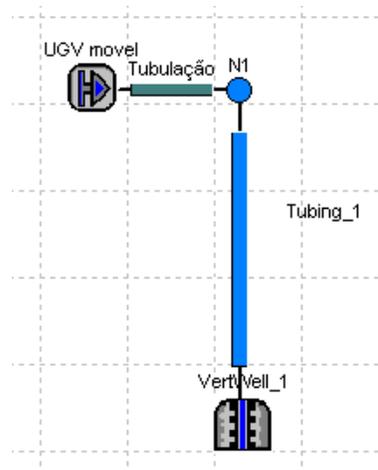
Para que o simulador interprete o fluido como sendo água, a razão gás-líquido (RGL) foi considerada 0 e o corte de água 100. Adicionalmente é inserido um comando específico para interpretar a água como sendo vapor.

## 4. Resultados e discussões

### 5.1 Caso 1: Sistema de injeção com UGV móvel

A utilização de UGV móvel diminui o efeito negativo da troca de calor pois reduz o comprimento das linhas de distribuição. O caso 1 possui as condições de entrada apresentadas anteriormente e sua diferença para o caso 2 é o comprimento da linha de distribuição (10 metros no caso 1 e 1.000 metros no caso 2).

Na Fig. 3, tem-se o modelo interpretado pelo simulador contendo uma fonte que representa a UGV móvel, um nó (N1), que representa a cabeça do poço, o *tubing* que é a coluna de injeção e o *VertWell* que é a interface poço-reservatório.



**Figura 3:** Representação do caso 1 no ambiente Pipesim®.

As Figs. 4a e 4b mostram a temperatura do vapor variando ao longo do comprimento da linha de distribuição e ao longo da coluna de injeção para um diâmetro de 12 polegadas (pol na figura). Nota-se uma leve diminuição na temperatura no trecho de superfície de 5 m a 10 m entre a UGV móvel e o poço. Já na descida ao longo do poço até a profundidade do reservatório, há um pequeno aumento da temperatura até 750 m, fato relacionado à compensação termodinâmica devido ao aumento da pressão hidrostática e a mudança de fase vapor-líquido. Vale destacar que esta resposta é idêntica para os diâmetros de 8 pol e 10 pol testados.

No contato fundo do poço com o reservatório, representado por (\*) no gráfico, nota-se uma queda acentuada da temperatura, o que evidencia a transferência de calor do vapor para a formação.

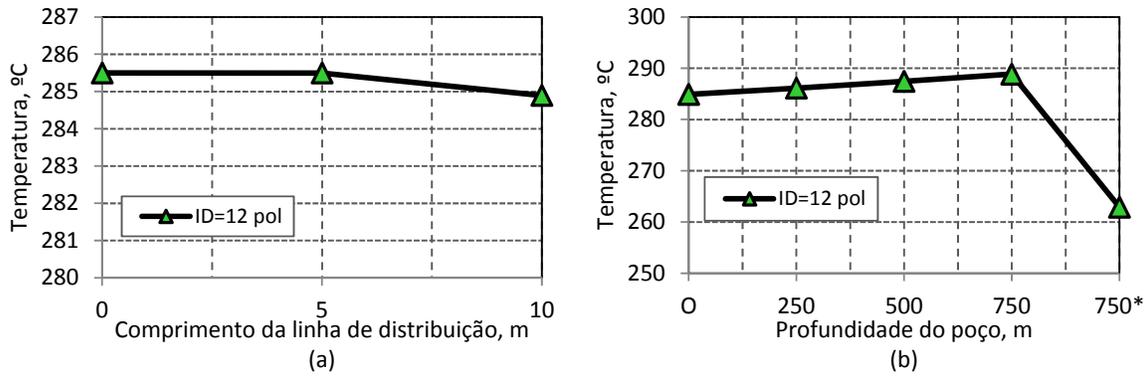


Figura 4: Temperatura do vapor ao longo (a) da linha de distribuição, e (b) da profundidade do poço, caso 1.

A Fig. 5a apresenta os resultados de qualidade do vapor ao longo do comprimento da linha de distribuição, enquanto que a Fig. 5b a qualidade do vapor com a profundidade do poço. Conforme esperado, a qualidade do vapor não teve alteração visível com o comprimento da linha de distribuição mantendo-se em 80 %, como produzido pela UGV.

A queda mais acentuada foi no trecho de escoamento vertical por ser 75 vezes mais longo que o de superfície, e por tanto maiores perdas de calor foram experimentadas para a formação atravessada pelo poço perfurado, resultando em que o vapor entregue na formação produtora tenha uma qualidade de 74,5 %.

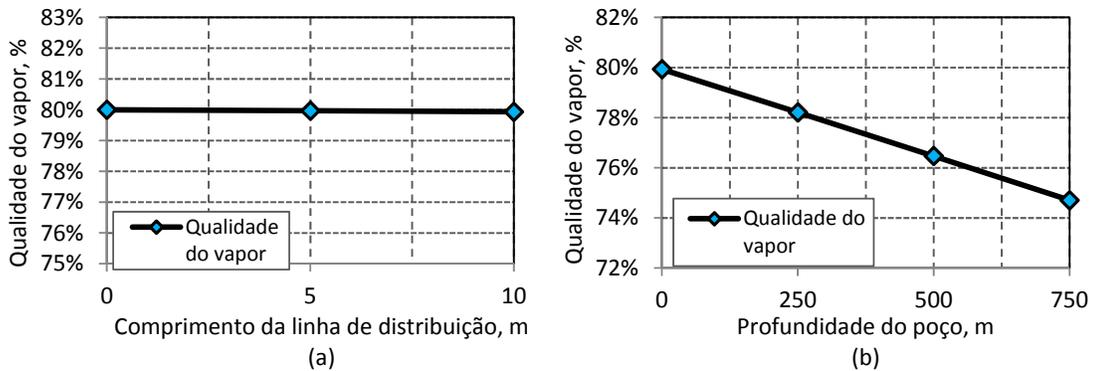


Figura 5: Qualidade do vapor ao longo (a) da linha de distribuição; e (b) da profundidade do poço, caso 1.

A Fig. 6a exibe os resultados de pressão versus comprimento da linha de distribuição e a Fig. 6b a pressão versus profundidade do poço. Nota-se uma diminuição da pressão em superfície (até 10 m), devido à perda de carga para a tubulação durante o escoamento, e posteriormente um aumento da pressão com o aumento da profundidade do poço, isso se deve ao fato de tratar-se de injeção no reservatório e não produção, onde o fluxo se dá da superfície (menor pressão) para o fundo do poço (maior pressão).

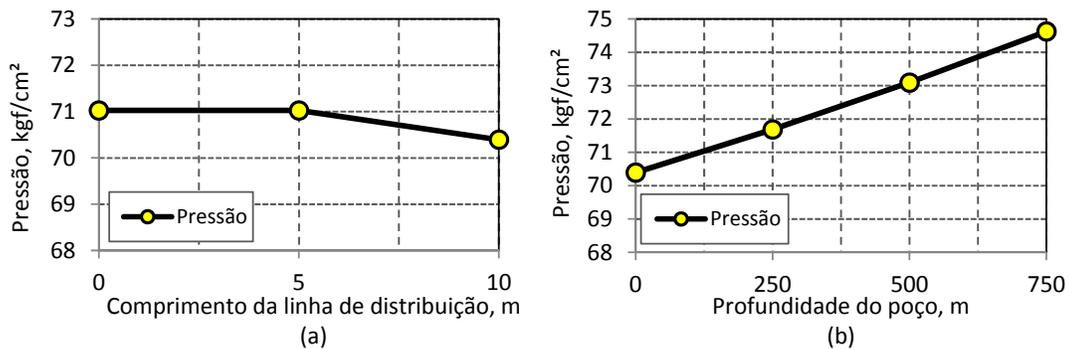


Figura 6: Pressão do vapor ao longo (a) da linha de distribuição; e (b) da profundidade do poço, caso 1.

5.2 Caso 2: Sistema de injeção com UGV fixa

Nesta segunda configuração utiliza-se uma UGV fixa, com um trecho de linha de maior comprimento que irá ocasionar uma maior perda de calor, que somada às perdas na coluna, promoverão uma queda mais relevante na qualidade do vapor injetado. A Fig. 7 mostra o modelo físico interpretado pelo simulador.



Figura 7: Representação do caso 2 no ambiente Pipesim®.

A Fig. 8a exibe os resultados de temperatura do vapor ao longo do comprimento da linha de distribuição para três diâmetros internos. Neste caso é perceptível uma queda de temperatura do vapor mais acentuada conforme se reduz o diâmetro interno da tubulação. Na Fig. 8b é mostrada a temperatura ao longo da profundidade do poço. Para este trecho, e de modo similar ao apresentado no caso 1, há uma compensação termodinâmica acarretada pelo aumento da pressão e pela mudança de fase vapor-líquido. No contato fundo do poço com o reservatório (\*) também nota-se uma queda acentuada da temperatura, o que evidencia a transferência de calor do vapor para a formação.

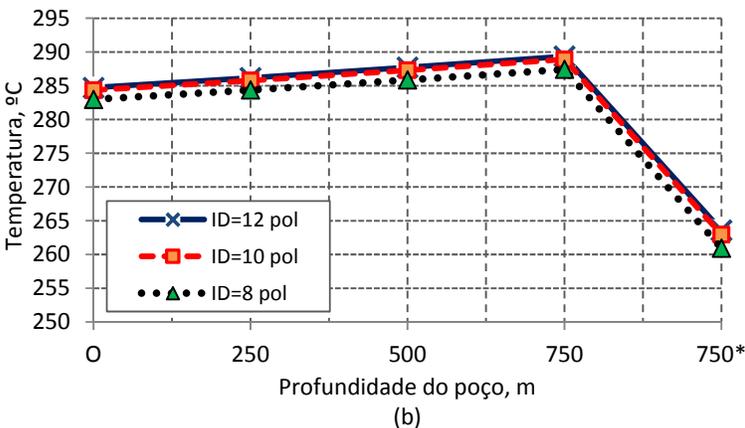
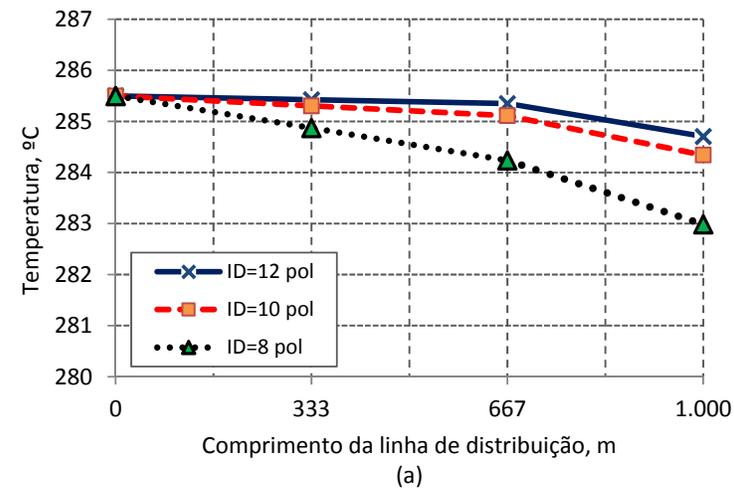


Figura 8: Temperatura do vapor ao longo (a) da linha de distribuição, e (b) da profundidade do poço, caso 2.

Na Fig. 9a é possível notar que devido ao maior comprimento da linha de distribuição a queda na qualidade do vapor é mais acentuada em comparação com o caso 1. Este efeito na qualidade do vapor é também observada no escoamento ao longo da coluna de injeção, Fig 9b. Novamente, isso é devido a uma maior área para a troca de calor com o meio externo.

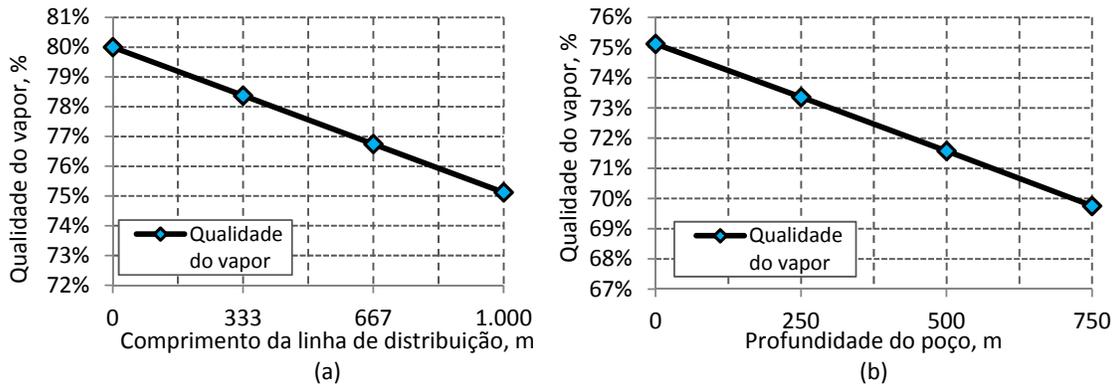


Figura 9: Qualidade do vapor ao longo (a) da linha de distribuição, e (b) da profundidade do poço, caso 2.

Na Fig. 10a observa-se uma pequena redução da pressão devido à perda de carga durante o escoamento, queda essa mais acentuada devido ao maior comprimento da linha. Já no ambiente de poço, Fig. 10b, observa-se o aumento da pressão (assim como no caso 1), devido à coluna hidrostática que se forma no poço de injeção.

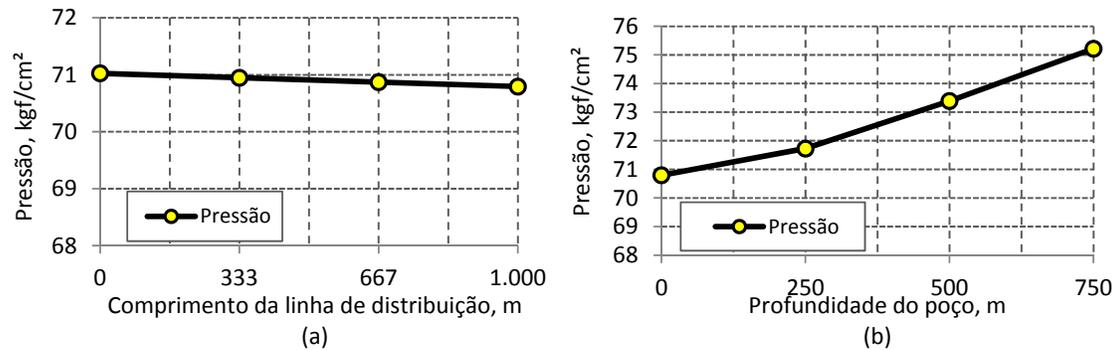


Figura 10: Pressão do vapor ao longo (a) da linha de distribuição, e (b) da profundidade do poço, caso 2.

## 5. Considerações finais

Os resultados obtidos com este trabalho, que está ainda em estágios iniciais, demonstram que a abordagem numérica utilizada, para estudar o efeito da perda de calor na qualidade do vapor em operações de injeção de vapor no contexto dos métodos térmicos, é satisfatória.

Pontualmente, a redução do comprimento da linha de distribuição contribuiu para manter a qualidade do vapor em padrões próximos ao entregue pela UGV. Enquanto que para o caso 1 (modelo com UGV móvel) a qualidade final do vapor foi de 75 %, no caso 2 (modelo com UGV fixa e conseqüente maior comprimento da linha de distribuição) a qualidade do vapor não ultrapassou 69 %. Através destes resultados conclui-se que linhas de distribuição muito longas devem ser evitadas. Entretanto, outros parâmetros, tais como tipos de isolantes térmicos, espessura do isolante, espessura da tubulação, profundidade do poço, pressão inicial do vapor dentre outros, que influenciam na perda de calor e por conseqüência na qualidade do vapor devem ser melhor explorados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Schlumberger pela concessão das licenças acadêmicas do *software* Pipesim<sup>®</sup>. Professor Oldrich Joel Romero agradece à FAPES pelo suporte financeiro concedido.

## Referências bibliográficas

ALVES, M. Estudo da produção de óleos pesados por injeção cíclica de vapor na região norte do Espírito Santo. Projeto de Graduação em Engenharia de Petróleo, UFES, São Mateus, ES, 2013.

ATTANASI, E. D. *Natural bitumen and extra-heavy oil*. World Energy Council, p.119-143, 2007.

DIAS JR, E. Estudo da transferência de calor durante a injeção de vapor em poços de petróleo. São Mateus – ES: UFES, 2014.

MEYER, R. F. *Heavy Oil and Natural Bitumen Resources in Geological Basins of the World*. Virginia: U. S. Geological Survey, 2007.

OPEC Acesso em 30 de Novembro de 2013, disponível em [https://.opec.org/opec\\_web/staic\\_files\\_project/media/downloads/publication/OB08\\_092012.pdf](https://.opec.org/opec_web/staic_files_project/media/downloads/publication/OB08_092012.pdf)

RODRIGUES, M. A. Estudo Paramétrico da Segregação Gravitacional na injeção Contínua de Vapor. Rio Grande do Norte - RN: UFRN, 2008.

THOMAS, S. *Enhanced Oil Recovery - An overview*. IFP, 9-19, 2008.