

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DA PERDA DE CALOR EM LINHAS DE SUPERFÍCIE AÉREAS DE INJEÇÃO DE VAPOR

AUTORES:

Josan Carvalho de Figueiredo Filho

Kaique Dantas Silva

Larissa Ferreira Torres

Leonardo de Araújo Lisboa

Lílian Lima Bomfim

Maria Luiza Pinto da Silva

Mario Celso Neves de Andrade

Ronnie Matos Tavares Feitosa

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE TIRADENTES

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPEURO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPEURO.

ANÁLISE DA PERDA DE CALOR EM LINHAS DE SUPERFÍCIE AÉREAS DE INJEÇÃO DE VAPOR

Abstract

The present work consists of numerically calculating the rates of heat loss in surface lines of steam injection in oil reservoirs. These lines are from the generator to the well head and, for the calculations of this work, was considered a primary line with 1000 m of total extension. The convective losses inside the pipes, pipe conduction and thermal insulation and convection outside the pipes were calculated. The rates found were analyzed as a function of the length of the pipe, since, when distancing from the generator, these losses are intensified and the quantification of the vapor quality that reaches the wellhead is of fundamental importance to attest to the efficiency of this secondary recovery method. The conduction loss rate was found to be 66.74 W / m, convection loss 66.80 W / m and radiation 66.78 W / m, summing a loss of 200.32 W / m. The loss involved in the same pipe length was also analyzed when doubled the insulation thickness, with a total of 131.50 W/m. The reduction of losses shows the efficiency of the calculation methods used.

Introdução

O uso dos métodos de recuperação em reservatórios é bastante necessário, visto que ele irá manter ou aumentar a energia de elevação. A recuperação por injeção de vapor é utilizada visando a diminuição da viscosidade do óleo, o que provoca um aumento da eficiência de varrido e pela expansão e dilatação do óleo (ROSA, 2002). O vapor saturado à alta temperatura e pressão é injetado no poço por meio de uma coluna de injeção com isolamento para que, ao final, seja entregue à formação produtora.

No entanto, por ser um método térmico, são observadas sempre perdas de calor nas linhas de injeção, no poço e na formação produtora. Por isso, é requerido que um mínimo de calor seja perdido nas linhas de superfície, nos poços e para as formações adjacentes. Sobre esse aspecto, torna-se bastante importante efetuar uma análise aprofundada da estimação das perdas de calor que ocorrem durante todo o percurso do vapor de água injetado para que, assim, seja possível buscar métodos que possam diminuir essa dissipação de energia, aumentando então a eficiência do método de recuperação.

Nas linhas de superfície aérea irão ocorrer determinados métodos de transferência de calor, haverá a convecção com relação ao fluido escoado por dentro da tubulação, representado pela seta verde; logo após, ocorrerá a condução através da parede da tubulação e do isolamento; em seguida a convecção e radiação na parte externa da tubulação com relação ao ar ambiente presente.

Para o presente artigo, faz-se necessário o estudo da transferência de calor nas tubulações de injeção de vapor, para poder calcular a taxa de perda de calor por unidade de comprimento.

Para tal, a linha aérea do sistema de geração de vapor tornou-se objeto de estudo.

É importante salientar que há três mecanismos de transferência de calor que estão presentes na linha aérea: condução, convecção e radiação. A transmissão de calor por condução refere-se à transmissão de calor, que ocorre a nível molecular, de uma região para outra através de um meio material, ocorrendo sempre da zona de maior temperatura para a de menor temperatura.

Por convecção entende-se que é a troca de energia térmica entre um fluido e uma superfície sólida. Podendo esse mecanismo ser dividido em dois tipos: natural ou forçada. De acordo com Incropera (2014), a convecção natural remete que o escoamento do fluido ocorre devido a variações de

seu peso específico decorrente de variações de temperatura, enquanto que na convecção forçada o escoamento do fluido se dá por meios externos (ventiladores, bombas).

O mecanismo de radiação difere do de convecção pelo fato de que não há necessidade de contato físico entre os sistemas que apresentam diferentes temperaturas. A transferência de calor por radiação pode, então, pode ocorrer até mesmo no vácuo. Enquanto que a condução e a convecção necessitam de um meio material para se propagarem, a radiação não precisa, pois a radiação é emitida por ondas eletromagnéticas (GALARÇA, 2006; INCROPERA, 2014).

Para poder encontrar tais perdas, foram utilizados modelos de equações propostos por Moura, 1991.

Metodologia

A primeira etapa de transferência de calor corresponde à convecção que ocorre no interior da tubulação e é dada em função do movimento molecular aleatório e do movimento global do fluido. Além disso, é representada pela Lei Empírica de Resfriamento de Newton:

$$\frac{q}{l} = 2\pi r_i h_c (T_f - T_i) \quad (1)$$

$\frac{q}{l}$: representa fluxo de calor por unidade de comprimento (W/m)

r_i : representa o raio interno da tubulação (m)

T_f : representa a temperatura do fluido (K)

T_i : representa a temperatura da parede interna da tubulação (K)

h_c : representa a propriedade convectiva do fluido (W/m² · K)

Já na segunda etapa, em que ocorre a condução na parede da tubulação e no isolamento, é utilizado o coeficiente global de transferência de calor, U , pelo fato de ser um sistema composto. Assim, a equação abaixo será análoga à Lei de Fourier que representa a transferência por condução:

$$\frac{q}{l} = 2\pi U (T_i - T_{iso}) \quad (2)$$

$$U = \left[\frac{\ln(r_t/r_{iso})}{k_t} + \frac{\ln(r_{iso}/r_t)}{k_{iso}} \right]^{-1} \quad (3)$$

r_t : raio externo da tubulação (m)

r_{iso} : raio do isolante (m)

k_t : propriedade de condutividade térmica da tubulação (W/m · K)

k_{iso} : propriedade de condutividade térmica do isolamento (W/m · K)

Por fim, haverá a convecção e a radiação na parte externa da linha aérea de injeção de vapor, sintetizada pela equação a seguir:

$$\frac{q}{l} = 2\pi r_{iso} \left[\frac{Nu \cdot k_{ar}}{2 \cdot r_{iso}} (T_{iso} - T_{ar}) + e_{iso} \cdot \sigma (T_{iso}^4 - T_{ar}^4) \right] \quad (4)$$

k_{ar} : representa a propriedade convectiva do ar (W/m · K)

e_{iso} : representa a espessura do isolamento (m)

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

O Número de Nusselt, Nu , proporciona uma medida da transferência convectiva de calor na superfície, e pode ser obtido por uma relação empírica entre o número de Prandtl e o número de Reynolds, através da equação a seguir:

$$Nu = C \cdot (Re)^m \cdot (Pr)^{1/3} \quad (5)$$

Entretanto, para se calcular a relação de Nusselt dentro da tubulação aérea, deve-se utilizar a correlação de Dittus-Boelter, devido à transferência de calor ser do tipo convecção forçada em fluxo turbulento, com Reynolds entre 10.000 e 120.000 e Prandtl do líquido entre 0,7 e 120, que é expressa por:

$$Nu = 0,023 \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{0,4} \quad (5.1)$$

O número de Reynolds do ar, Re_d , é obtido através da equação a seguir:

$$Re_d = \frac{V_{ar} \cdot D_{ext}}{\vartheta_{ar}} \quad (6)$$

Sendo que:

V_{ar} : representa a velocidade do ar atmosférico (m/s)

D_{ext} : diâmetro externo da tubulação (m)

ϑ_{ar} : viscosidade cinemática do ar (m^2/s)

O número de Prandtl do ar, Pr , assim como o valor da viscosidade cinemática do ar a pressão normal e a temperatura de 20°C são obtidos a partir de tabelas padrões.

As variáveis “C” e “m” presentes na equação 5 são valores empíricos, que dependem da geometria e do Número de Reynolds do fluido.

Igualando as equações 1 e 2, e 2 e 4 obtém-se duas equações, respectivamente, com duas incógnitas (T_i e T_{iso}).

$$F_1(T_i, T_{iso}) = \frac{r_i}{U} h_c T_f - \left(1 + \frac{r_i}{U} h_c \right) T_i + T_{iso} \quad (7)$$

$$F_2(T_i, T_{iso}) = K_2(T_i - T_{iso}) - Nu(T_{iso} - T_{ar}) - K_1(T_{iso}^4 - T_{ar}^4) = 0 \quad (8)$$

Sendo que:

$$K_1 = \frac{2e_{iso}r_{iso}\sigma}{k_{ar}} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{2U}{k_{ar}} \quad (10)$$

A fim de obtermos o hc , referente à propriedade convectiva do fluido, circulando dentro da tubulação de injeção, que está contido na Eq.7, deve-se calcular primeiramente a vazão mássica de vapor (G_g) e a vazão mássica de água saturada presente (G_l) através das equações 11 e 12 a seguir:

$$G_g = \rho_g Q_g T \quad (11)$$

$$G_l = \rho_l Q_l (1 - T) \quad (12)$$

ρ_g e ρ_l : correspondem à massa específica de vapor e água saturada, respectivamente, dadas em Kg/m³.

Q_g e Q_l : representam as vazões volumétricas de gás e água saturada, respectivamente.

T: corresponde ao título do vapor.

Desse modo, através das Equações 11 e 12, encontra-se o Número de Reynolds da mistura, Re_m :

$$Re_m = \frac{d}{\mu_{fi}} \left[G_l + G_g \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (13)$$

Onde o μ_{fi} representa a viscosidade do filme formado na parede da tubulação durante o escoamento, levando-se em consideração a viscosidade do vapor e da água presentes.

Ao encontrar o Número de Reynolds da mistura, utiliza-se a Equação 5 e a Tabela 3, a fim de se determinar o Número de Nusselt. Já o número de Prandtl, também presente na Equação 5, será obtido através da Equação 14 a seguir:

$$Pr = \frac{c\mu}{k} \quad (14)$$

A variável “c” representa o calor específico da mistura, μ corresponde à viscosidade e k à condutividade térmica.

Desta forma, torna-se possível encontrar a propriedade convectiva da mistura, h_c , através da Equação 15 a seguir:

$$Nu = \frac{h_c L}{k} \quad (15)$$

Onde L é o comprimento da linha aérea.

Resultados e Discussão

Os dados geométricos propostos por Moura, 1991, da linha aérea padrão, são mostrados na Tabela 1:

Tabela 1: Linha aérea padrão

Dados de Entrada	
Comprimento da Linha	1000 m
Diâmetro Interno da Tubulação	0,0667 m
Diâmetro Externo da Tubulação	0,0762 m
Espessura do Isolamento Térmico	0,0508 m
Condutividade Térmica do Isolamento	0,04 W/m/K
Condutividade Térmica do Tubo	43,3 W/m/K
Emissividade da Superf. Externa do Isol.	0,2
Temperatura Ambiente	293,15 K
Velocidade do Vento	8,33 m/s
Vazão Volumétrica Total	170 m ³ /s

Fonte: Moura, 1991

Para a temperatura de 20 °C, e utilizando os dados de entrada juntamente com as equações apresentadas, são obtidos os seguintes valores para o desenvolvimento da Equação 8.

Tabela 2: Dados para o desenvolvimento da Equação 8.

Dados de Entrada da Equação 8	
Número de Prandtl	0,709
Viscosidade cinemática do ar	1,53. 10 ⁻⁵ m ² /s
Número de Reynolds do ar	41486,67
Número de Nusselt	125,60
Variável K₁	1,992.10 ⁻⁸
Variável K₂	3,673
Variável U	0,0472

Para se obter os valores da Equação 7, obteve-se as propriedades referentes à água e ao vapor, envolvidas no processo, temperatura de 300 °C e pressão de 1000 psia.

Tabela 3: Dados para o desenvolvimento da Equação 7.

Dados de Entrada da Equação 7	
Vazão mássica do vapor	0,3096 Kg/s
Vazão mássica do líquido	0,05341 Kg/s
Número de Reynolds no escoamento interno	11050,07
Número de Prandtl	0,8427
Número de Nusselt	36,87
Coefficiente convectivo	$6,32344 \cdot 10^{-3}$ W/m ² .K

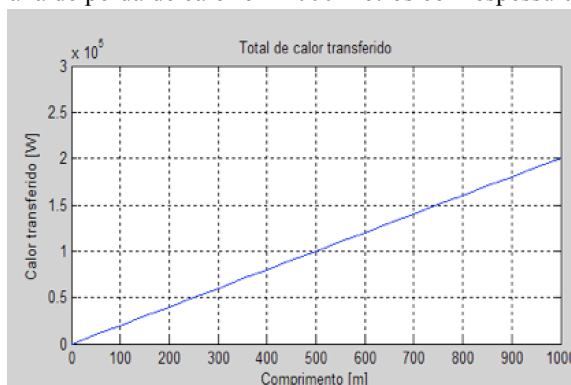
O modelo em questão foi resolvido pelo método de Newton, por ser um método que traz boa aproximação para problemas não lineares. Desse modo, fez-se o uso do MATLAB na versão R2016a (9.0.0) para solucionar o sistema das Eqs. 7 e 8. Isto resultou em:

Tabela 4: Resultados com espessura do isolamento de 0,0508m.

Resultados	Espessura de 0,0508m	Espessura de 0,1016m
Temperatura interna da tubulação (Ti)	524,37 K	523,56 K
Temperatura do isolamento (Tiso)	299,33K	294,83 K
Perda de calor por convecção	66,80 W/m	68,67 W/m
Perda de calor por condução	66,74 W/m	44,13 W/m
Perda de calor por convecção e radiação	66,78 W/m	18,70 W/m
Perda total	200,32 W/m	131,50 W/m

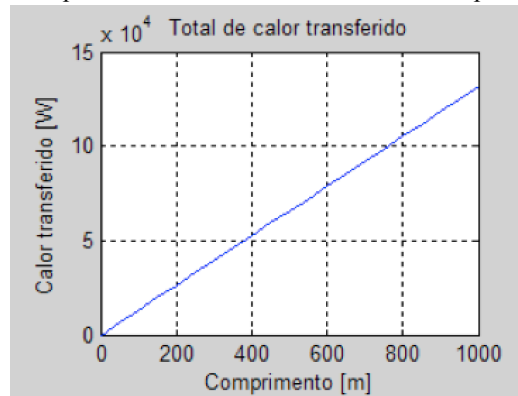
A vista disso, pôde-se constatar que com o aumento da espessura de isolamento da parede da tubulação aérea, houve a redução da perda de calor, como mostrado pelos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1: Taxa de perda de calor em 1000 metros com espessura de 0,0508m.



Fonte: MATLAB versão R2016a (9.0.0)

Gráfico 2: Taxa de perda de calor em 1000 metros com espessura de 0,1016m.



Fonte: MATLAB versão R2016a (9.0.0)

Conclusões

Através do estudo realizado, foi possível verificar a veracidade do método algébrico desenvolvido e da importância no dimensionamento do isolamento, sendo que o mesmo tem grande importância quando se objetiva um melhor aproveitamento do vapor. Quando a espessura do isolamento foi dobrada, a perda de calor diminuiu 68,82 W/m, equivalente a -34,35 %, assim atestando a eficiência do isolamento, ou seja, uma diminuição na quantidade de vapor necessária, e consequentemente uma redução de tempo e custo.

Agradecimentos

A Universidade Tiradentes, que oportunizou esta janela.

Aos orientadores Mario Celso Neves de Andrade e Josan Carvalho de Figueiredo Filho, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte, o nosso muito obrigado.

Referências Bibliográficas

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS – CONTEC. **Projeto de Isolamento Térmico à alta Temperatura: Norma PETROBRAS N-550**. 50p. 2001

DIAS, E. J.; ROMERO, O. J. **Perda de calor no trecho UGV – fundo do poço e seu impacto na qualidade do vapor injetado em reservatórios de petróleo**. Latin American Journal of Energy Research 1 (2014) 46 – 53.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6º ed. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 643p. 2008.

Matrix Laboratory – MATLAB. Versão R2016 (9.0.0)

MOURA, L. S. S. **Estudo Numérico da Transferência de Calor e do gradiente de pressão na injeção de vapor saturado em poços de petróleo**. Campinas, 1991.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. de S. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2002.