**PROCESSO SELETIVO N° 04/2024**

Área de Conhecimento: Engenharia ou Ciências Exatas ou da Terra (B)

PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA

## Questão 1

As perdas de carga, que representam a perda de energia do fluido em movimento devido ao atrito e às interações fluido-parede, devem ser minimizadas para otimizar a eficiência energética e reduzir custos operacionais.

A utilização de modelos cinemáticos, como os modelos homogêneo e de fases separadas, permite simular e prever o comportamento das fases dentro das tubulações, facilitando a escolha de equipamentos e a definição de parâmetros operacionais que acomodem as características específicas do escoamento monofásico e bifásico.

No escoamento bifásico, a interação entre as fases gás e líquido resulta em diferentes padrões de fluxo, como bolha, anular e estratificado.

Cada padrão apresenta características únicas de perda de carga e troca de calor, influenciando diretamente a eficiência do sistema.

A compreensão desses padrões é fundamental para prever possíveis oscilações e garantir a estabilidade operacional das tubulações. Além disso, variáveis básicas do escoamento bifásico, como a fração volumétrica das fases, a viscosidade e a densidade de cada fase, são determinantes para a análise e modelagem do comportamento do fluxo.

A escolha adequada de equipamentos e a configuração dos parâmetros operacionais baseiam-se nesse conhecimento detalhado, impactando significativamente a segurança e a eficiência do transporte de fluidos na indústria de óleo e gás.

## Questão 2

Para fluxos de deslizamento, sabe-se que:

$$J_G = \alpha\,(v_G - v_M) = v_{SG} - (\alpha \cdot v_M) \tag{1}$$

$$J_L = (1 - \alpha)\,(v_L - v_M) = v_{SL} - (1 - \alpha)\,v_M \tag{2}$$

de (1):

$$v_{SG} = \alpha \cdot v_M + J_G \tag{3}$$

de (2):

$$v_{SL} = (1 - \alpha) \cdot v_M + J_L \tag{4}$$

A partir de (3):

$$\alpha = \frac{v_{SG}}{v_M} - \frac{J_G}{v_M} \tag{5}$$

A partir de (4):

$$(1 - \alpha) = \frac{v_{SL}}{v_M} - \frac{J_L}{v_M}$$

Sabe-se que $J_L = -J_G$

$$(1 - \alpha) = \frac{v_{SL}}{v_M} + \frac{J_G}{v_M} \tag{6}$$

$$\rho_M = (1 - \alpha)\,\rho_L + \alpha\,\rho_G$$

$$\rho_M = \left(\frac{v_{SL}}{v_M} + \frac{J_G}{v_M}\right)\rho_L + \left(\frac{v_{SG}}{v_M} - \frac{J_G}{v_M}\right)\rho_G$$

$$\rho_M = \frac{v_{SL}}{v_M}\,\rho_L + \frac{J_G}{v_M}\rho_L + \frac{v_{SG}}{v_M}\,\rho_G - \frac{J_G}{v_M}\rho_G$$

$$\rho_M = \frac{v_{SL}}{v_M}\,\rho_L + \frac{v_{SG}}{v_M}\,\rho_G + (\rho_L - \rho_G)\,\frac{J_G}{v_M}$$

$$\rho_{homogêneo} = \frac{v_{SL}}{v_M}\,\rho_L + \frac{v_{SG}}{v_M}\,\rho_G = \lambda_L\,\rho_L + (1 - \lambda_L)\,\rho_G$$

$$\rho_M = \rho_{homogêneo} + (\rho_L - \rho_G)\,\frac{J_G}{v_M}$$

Definindo $\rho = \frac{(\rho_L - \rho_G)}{v_M}$

$$\rho_M = \rho_{homogêneo} + \rho \cdot J_G$$

**Questão 3**

Analisando os resultados expostos na Figura 1, verifica-se que no início do riser, comprimento ($L$) igual a zero na Figura 1, o escoamento é monofásico de líquido visto que o holdup é igual a 1. Além disso, usando as relações de fechamentos:

$$\alpha + H_L = 1$$

e

$$v_M = v_{SG} + v_{SL}$$

pode-se afirmar que $\alpha = 0$ e, consequentemente, $v_{SG} = 0$ o que garante que $v_{SL} \approx 2{,}7\ m/s$. Essa condição de fluxo monofásico ocorre até $L \approx 1600\ m$ quando a condição de pressão no interior da tubulação torna-se inferior a pressão de saturação do fluido e inicia-se a formação de uma fase gás livre formada pelas frações leves de hidrocarbonetos.

Ainda analisando o trecho de escoamento monofásico, observa-se que a velocidade do fluido varia de forma decrescente até inferior a 2,5 m/s. Esta variação ocorre porque a vazão in-situ do fluido não é constante. Sabe-se que em uma discretização de malha, a vazão in-situ ($Q$) em uma dada seção de comprimento $dL$ é:

$$Q = Q_{SC} \cdot B_o(P, T)$$

em que $Q_{sc}$ é a vazão total na condição padrão (1 atm e 15,5 °C) e $B_o$ é o fator volume-formação do óleo que representa o fator de inchamento do óleo e depende da pressão e temperatura na seção $dL$. Portanto, como as propriedades do fluido são dependentes de pressão e temperatura, o $B_o$ varia ao longo da tubulação, o que torna a vazão in-situ variável e, consequentemente, varia a velocidade do fluido no interior da tubulação.

Apesar da variação da velocidade no trecho de 0 a 1600 metros, a perda de carga por fricção apresentou pequenas variações mantendo-se em torno de -0,003 bar/m (energia desprendida pelo fluido). Dada a formulação para a perda de carga por fricção:

$$-f_{TP} \cdot \frac{\rho_m \cdot v_m^2}{2 \cdot d_h}$$

Verifica-se que esse comportamento ocorreu porque a velocidade e a massa específica apresentam relações inversamente proporcionais com as condições PT. E, para esse trecho de escoamento monofásico acontece uma relação próxima ao equilíbrio entre a influência das variáveis.

Retornando para a posição de comprimento $L \approx 1600\ m$, onde inicia-se a saturação do fluido, observa-se uma redução nos valores de holdup que significa aumento da fração de gás livre no interior da tubulação. O valor do holdup na posição de chagada na FPSO é de aproximadamente 0,5. Desta forma, sabe-se que o aumento da fração de vazios altera o padrão de escoamento bifásico podendo ocorrer transições desde o padrão de bolhas até a formação de padrão pistonado (slug). Ademais, a liberação de gás de solução aumenta a velocidade da mistura visto que o gás tem uma menor resistência ao escoamento (menor massa específica e viscosidade) e, consequentemente, maior velocidade ascendente em geometrias de escoamento inclinado e vertical (riser) do que o óleo. Esse aumento de velocidade da mistura reflete diretamente na curva de perda de carga por fricção. No entanto, o aumento da fração de vazios (ou redução do holdup) reduz significativamente a massa específica da mistura, dada por:

$$\rho_m = \rho_L \cdot H_L + \rho_G \cdot (1 - H_L)$$

O que ocasiona uma redução da perda de carga por fricção até em torno de $L \approx 3800\, m$ e $\alpha \approx 0{,}25$. A partir desta posição na tubulação, ocorre uma inversão na curva do gradiente de pressão por fricção que aumenta significativamente nos comprimentos finais do riser devido ao aumento brusco da velocidade da mistura

## Questão 4

A solução parte da Eq. de Fourier:

$$\vec{Q} = -k \cdot \vec{\nabla}\,\mathrm{T}$$

No sentido radial, meio isolante, torna-se:

$$\dot{Q}' = -k \cdot 2\pi r \frac{dT}{dr}$$

Realizando o desenvolvimento algébrico, tem-se:

$$dT = -\frac{\dot{Q}'}{2\pi k}\frac{d\mathrm{r}}{\mathrm{r}}$$

Integrando na temperatura e no raio, obtém-se:

$$\int_{T}^{T_\infty} dT = -\frac{\dot{Q}'}{2\pi k}\int_{\mathrm{r}_i}^{\mathrm{r}_i+\delta_i}\frac{d\mathrm{r}}{\mathrm{r}}$$

$$(T_\infty - T) = -\frac{\dot{Q}'}{2\pi k}\ln\left(\frac{\mathrm{r}_i + \delta_i}{\mathrm{r}_i}\right)$$

$$T - T_\infty = \frac{\dot{Q}'}{2\pi k} \ln\left(\frac{\mathrm{r}_i + \delta_i}{\mathrm{r}_i}\right) \rightarrow \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{\mathrm{r}_i + \delta_i}{\mathrm{r}_i}\right)} = \frac{\dot{Q}'}{T - T_\infty}$$

A definição da taxa de perda de calor por comprimento é:

$$-\dot{Q}' = \rho \cdot q \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dL} + \rho \cdot q \cdot g \cdot \sin\theta = -U_i \cdot \pi \cdot d_i \cdot (T - T_\infty)$$

$$\mathrm{TEC} = \frac{\dot{Q}'}{T - T_\infty}$$

Logo, a espessura da parede metálica é:

$$\mathrm{TEC} = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{\mathrm{r}_i + \delta_i}{\mathrm{r}_i}\right)} \rightarrow \ln\left(\frac{\mathrm{r}_i + \delta_i}{\mathrm{r}_i}\right) = \frac{2\pi k}{\mathrm{TEC}}$$

$$\frac{r_i + \delta_i}{r_i} = e^{\frac{2\pi k}{\mathrm{TEC}}}$$

$$\delta_i = \frac{d_i}{2}\left[e^{\frac{2\pi k}{\mathrm{TEC}}} - 1\right]$$

**Assinatura Membros da Banca**

**Rafael Rodrigues Francisco**
**Membro 1**

**Antonio Marinho Barbosa Neto**
**Membro 2**

**Oseias Pessoa**
**Presidente**