

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

**ESTUDO DA INSTABILIDADE DE KELVIN-HELMHOLTZ EM
GOLFADAS HIDRODINÂMICAS NO ESCOAMENTO DE PETRÓLEO**

AUTORES:

Jamille Ludimila Lopes de Almeida
Yanka Thereza Bentes Martins
Jéssica Nascimento Pereira
Samuel Sarmento de Jesus

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Pará – Campus Salinópolis

ESTUDO DA INSTABILIDADE DE KELVIN-HELMHOLTZ EM GOLFADAS HIDRODINÂMICAS NO ESCOAMENTO DE PETRÓLEO

Abstract

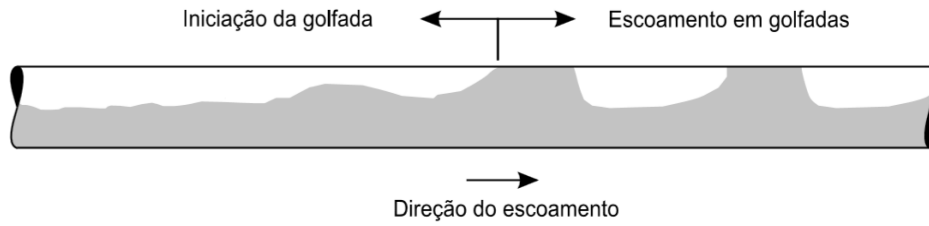
Hydrodynamic slug are among the biggest problems affecting various processes in the oil industry, extending from projects to operations in two-phase flow systems. Its occurrence is a result of *Kelvin-Helmholtz* instability, a phenomenon in which an unstable behavior at the interface between fluids flowing at different velocities and densities is observed. The emergence of slug in the pipelines is related to the kinetic force along these, as well as pressure variations, instability in control systems and inadequate phase separation. Large variations in the fractions and / or stability of oil and gas flow cause excessive demands on processing facilities that makes it difficult the flow in the pipelines due to the generation of violent mechanical vibrations and may even cause equipment damage. Despite the *Kelvin-Helmholtz* instability is a widely known general phenomenon, due to its complexity, there are specific applications such as occurrence in ducts that have not been strongly studied. Thus, this work aims to study the *Kelvin-Helmholtz* instability and the propagation of linear perturbations on the media that allow the interaction between two systems under certain flow conditions, considering the equations governing the flow and including a perturbation. For the analysis of *Kelvin-Helmholtz* instability, the perturbation equations were developed and the normal modes analysis. The obtained results contribute to the understanding of *Kelvin-Helmholtz* instability phenomena, which occur at the interface between two flows, initially horizontal and uniform parallels, and show themselves as an exponential amplification in the time of the disturbance amplitude, having the possibility of vortex sheet formation and, as consequence of flow turbulence.

Introdução

Em reservatórios de petróleo, os hidrocarbonetos podem existir em três fases: líquida, sólida e gasosa. Esta característica física resulta sobretudo das condições de pressão e temperatura e de sua composição. Além disso, o petróleo encontra-se associado com água também presente no reservatório. Durante a produção os fluidos são escoados pelo meio poroso (fluxo Darciano) até chegarem ao poço onde em seguida são escoados através de tubulações. A variação das condições de pressão e temperatura que ocorrem durante os diferentes segmentos do escoamento pode fazer com que haja formação ou aparecimento de fase gasosa. Portanto, ao produzir-se em um poço de petróleo há o escoamento simultâneo de óleo, gás e de água da formação, caracterizando assim um escoamento multifásico (ROSA, 2012).

Devido ao escoamento de diferentes fases conjuntamente, podem ocorrer diferentes padrões de fluxo, diante das condições operacionais como vazões do líquido e do gás e dos diâmetros e ângulo de inclinação dos tubos. Dentre os possíveis padrões de escoamento encontra-se o regime de golfadas, que configura-se pelo escoamento no qual existem intervalos de líquido ocupando todo o diâmetro do duto, isolados por grandes bolhas de gás que apresentam uma camada de líquido escoando na interface junto as paredes da tubulação (NASCIMENTO, 2015). Este regime pode ser observado na Figura 1 a seguir.

Figura 1: Transição para escoamento em regime de golfadas



Fonte: Conte (2014).

Segundo Bai (2016), as golfadas hidrodinâmicas iniciam-se quando ocorre uma instabilidade de onda na interface gás/líquido, em que o crescimento da onda é provocado pela instabilidade de *Kelvin-Helmholtz*. Quando a onda chega ao topo do duto a golfada é impulsionada pelo gás que supera a velocidade do filme de líquido, sendo assim ampliada. Esta região de turbulência causa fricção ao escoamento, a qual atribui-se grande perda de pressão. As golfadas também podem causar sobrecarga das instalações de recebimento e tratamento de líquido pelo aumento da vazão de forma intermitente. Portanto, o conhecimento do tamanho das golfadas, bem como sua frequência e velocidade tem grande importância no projeto de equipamentos e na elaboração do layout das instalações. Apesar da importância do tema, poucos estudos reportam sobre a instabilidade de *Kelvin-Helmholtz* em golfadas hidrodinâmicas no fluxo de petróleo.

Desta forma, este trabalho, tem como objetivo estudar a instabilidade de *Kelvin-Helmholtz* em golfadas hidrodinâmicas no fluxo de petróleo, provendo um maior entendimento sobre o tema.

Metodologia

O fenômeno da instabilidade de *Kelvin-Helmholtz* constitui estados básicos não-perturbados e perturbados (com a inserção de uma perturbação linear). Seja V_g e ρ_g a velocidade e a densidade no estado básico da camada de gás do plano (x, y) e V_o , ρ_o , da camada de óleo, no qual não há a presença de gás dissolvido (óleo morto). Essas velocidades possuem um potencial de velocidade dado por ϕ_g e ϕ_o , originado das camadas de gás e óleo, respectivamente.

Formulação Matemática

Segundo Kundu et al. (2011), um escoamento infinitesimal perturbado acima e abaixo da interface, é dado pelas equações:

$$\phi_g = V_g x + \phi'_g, \quad (1)$$

$$\phi_o = V_o x + \phi'_o. \quad (2)$$

Tomando a máxima variação e considerando o escoamento dos fluidos irrotacional e incompressível, as condições de contorno são dadas pela equação:

$$\nabla \phi'_g = 0, \text{ se } y \rightarrow \infty, \quad (3)$$

$$\nabla \phi'_o = 0, \text{ se } y \rightarrow -\infty. \quad (4)$$

A perturbação acústica ϕ'_g pode ser dada na forma de funções de amplitude, onde k é o número de ondas e w a frequência angular da oscilação que se propaga na camada de gás e óleo. Considerando o escoamento irrotacional e incompressível, assumindo uma dependência harmônica em (x, t) , as funções de amplitude são fornecidas por:

$$\phi'_g = \lambda_1 e^{i(kx-wt)-ky}, \quad (5)$$

$$\phi'_o = \lambda_4 e^{i(kx-wt)+ky}, \quad (6)$$

onde λ_1 e λ_4 são os coeficientes de integração e a frequência angular w pode ser escrita como $w = v/k$, sendo v a velocidade de fase. Desta forma, a análise da frequência angular w depende da análise velocidade de fase v .

Supondo que a interface deformada por uma perturbação acústica é descrita pela equação $y = c(x, t)$, na qual retrata o deslocamento da onda, a equação paramétrica que representa essa interface é dada pela função $f(x, y, t) = 0$. Nesta perspectiva, ambas se relacionam da seguinte forma:

$$f(x, y, t) = y - c(x, t). \quad (7)$$

Considerando a variação de velocidade de uma partícula na interface perturbada, onde os termos $\frac{\partial \phi'_g}{\partial y}$ e $\frac{\partial \phi'_o}{\partial y}$ representam a componente vertical da velocidade, obtêm-se a relação para a camada de óleo e gás, conhecidas como condições cinemática de interface:

$$\frac{\partial \phi'_o}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial t} + V_o \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi'_g}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial t} + V_g \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (9)$$

De acordo com A. Salih (2010), o deslocamento também pode ser interpretado como uma função de amplitude. Sendo assim, pode ser escrito como:

$$c = \gamma e^{i(kx-wt)}. \quad (10)$$

Aliado a este fato, os coeficientes de integração podem ser obtidos, substituindo as equações (5), (6) e (10) nas equações (8) e (9), os coeficientes são fornecidos por:

$$\lambda_1 = \frac{i\gamma}{k}(w - kV_g), \quad (11)$$

$$\lambda_4 = -\frac{i\gamma}{k}(w - kV_o). \quad (12)$$

Analisando a equação de Bernoulli para escoamentos irrotacionais e transitórios, aplicada as camadas de gás e de óleo e supondo que a interface deformada por uma perturbação é descrita pela equação $y = c(x, t)$, resulta em uma expressão para a pressão em ambos os fluidos:

$$P_g = -\rho_g \left(\frac{\partial \phi'_g}{\partial t} + \frac{1}{2} V_g^2 + V_g \frac{\partial \phi'_g}{\partial x} + gc - C_g \right), \quad (13)$$

$$P_o = -\rho_o \left(\frac{\partial \phi'_o}{\partial t} + \frac{1}{2} V_o^2 + V_o \frac{\partial \phi'_o}{\partial x} + gc - C_o \right). \quad (14)$$

Considerando uma relação similar para a superfície não perturbada, $c = 0$, e a pressão atuante nos dois fluidos igual, temos a relação de interface dinâmica:

$$\rho_g \left(\frac{\partial \phi'_g}{\partial t} + V_g \frac{\partial \phi'_g}{\partial x} + gc \right) = \rho_o \left(\frac{\partial \phi'_o}{\partial t} + V_o \frac{\partial \phi'_o}{\partial x} + gc \right). \quad (15)$$

Utilizando essa relação e substituindo as equações de amplitude com os seus respectivos coeficientes de integração λ_1 e λ_4 tem-se:

$$w = k \frac{\rho_g V_g + \rho_o V_o}{\rho_g + \rho_o} \pm \sqrt{k g \left(\frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_o + \rho_g} \right) - \rho_g \rho_o k^2 \left(\frac{V_g - V_o}{\rho_o + \rho_g} \right)^2}, \quad (16)$$

e como a velocidade de fase é dada por $v = w/k$, segue que

$$v = \frac{\rho_g V_g + \rho_o V_o}{\rho_g + \rho_o} \pm \sqrt{\frac{g}{k} \left(\frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_o + \rho_g} \right) - \rho_g \rho_o \left(\frac{V_g - V_o}{\rho_o + \rho_g} \right)^2}. \quad (17)$$

Resultados e Discussão

Existem algumas formas teóricas de deduzir a transição entre as golfadas. A análise da instabilidade de Kelvin-Helmholtz para um escoamento invíscido, irrotacional e incompressível pode obter esses resultados. A equação (17) pode ser escrita da forma:

$$v^\pm = \frac{\rho_g V_g + \rho_o V_o}{\rho_g + \rho_o} \pm \sqrt{a_k - b}, \quad (18)$$

onde,

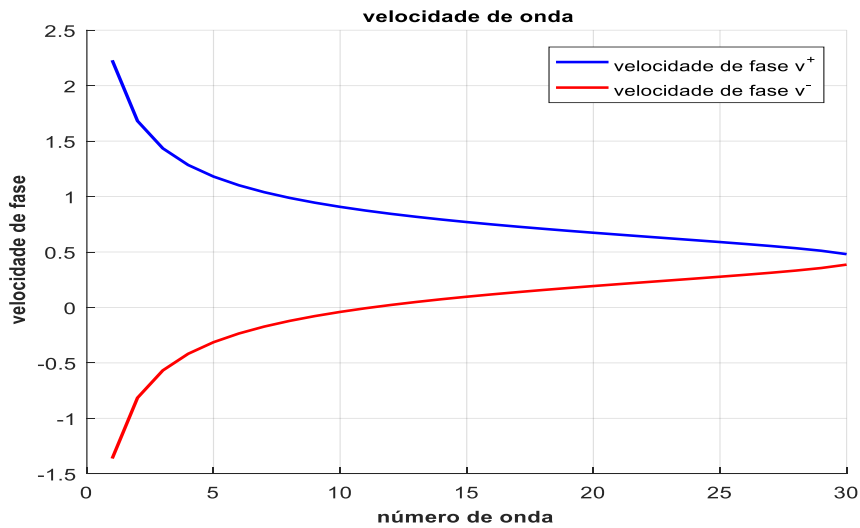
$$a_k = \frac{g}{k} \left(\frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_o + \rho_g} \right) \quad e \quad b = \rho_g \rho_o \left(\frac{V_g - V_o}{\rho_o + \rho_g} \right)^2. \quad (19)$$

Dessa maneira, é notório que as soluções estáveis e instáveis são devido ao comportamento de a_k , uma vez que para valores de $a_k \geq b$ têm-se um escoamento estável, já que a solução é um valor relacionado aos números reais. No entanto, para valores de v pertencentes ao conjunto dos números complexos, isto é, quando $a_k < b$, obtêm-se escoamentos instáveis e, conseqüentemente, turbulentos. Observando este fato, a partir da relação para escoamentos turbulentos pode-se complementar que os escoamentos instáveis dependem do valor de k :

$$k > \frac{gA}{\rho_g \rho_o (V_g - V_o)^2}, \quad (20)$$

onde A é o número de Atwood. O gráfico seguinte nos mostra o comportamento das duas velocidades de fase $v^\pm$ dadas em (18) para o caso de estabilidade $a_k > b$.

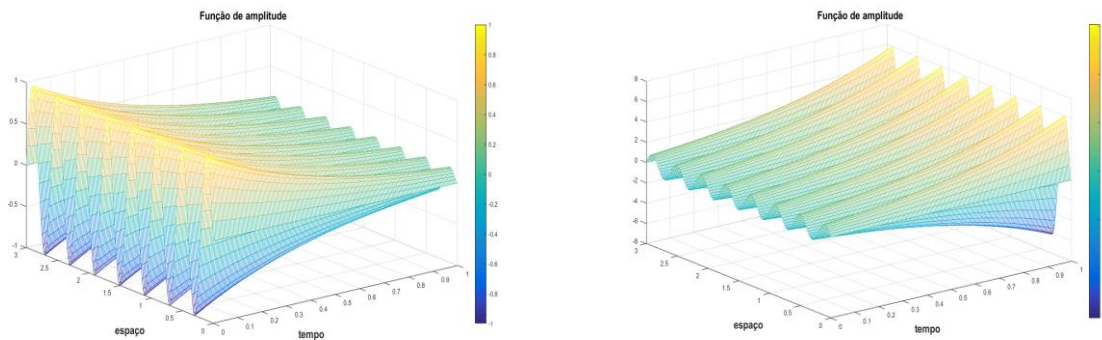
Figura 2: Velocidade de fase x número de ondas



Observação: No caso de instabilidade $a_k < b$, as velocidades de fase $v^\pm$ assumem valores complexos.

Para melhor entendermos como os valores de $a_k > b$ e $a_k < b$ afetam o comportamento do sistema alternando entre estabilidade e instabilidade, plotamos a seguir o gráficos das curvas de amplitude para os respectivos casos.

Figura 3: Função de amplitude: estabilidade x instabilidade



Segundo *Kelvin* e *Hermann Von Helmholtz*, quando duas camadas de um fluido deslizam sobre si com movimentos relativos e velocidades diferentes ($V_g > V_o$), existe a presença de uma descontinuidade tangencial no campo de velocidade (separação entre as duas camadas). Sendo assim, esta estrutura é instável e pequenas perturbações ocorrem constantemente na superfície da descontinuidade, aumentando suas amplitudes exponencialmente ao transcorrer o tempo (SUDBRACK, 2018).

Nesta perspectiva, a velocidade de fase do problema estudado, considerando as análises acima, denota uma componente imaginária que caracteriza uma situação de instabilidade pois mostra que uma perturbação nas camadas de gás e óleo, por menor que seja, cresce com o progresso do tempo. Como há um ponto do fluido em rotação, há a contribuição da vorticidade e consequente variação da velocidade de um ponto a outro, resultando em uma turbulência de caráter incomum que se auto organizam em

estruturas, cada vez maiores, à medida que o tempo avança. Essas estruturas são conhecidas como folhas de vórtices.

Fluidos com viscosidades baixas apresentam comportamentos parecidos com fluidos ideais, então, ao aumentar a viscosidade, a descontinuidade perde o formato de superfície sobre a outra e incorpora uma camada de transição, de largura finita, encontradas nas golfadas hidrodinâmicas do riser. O escoamento em golfadas é caracterizado por uma repetição inconstante de duas estruturas distintas que resultam a um comportamento único, isto é, um pistão líquido compelido por uma bolha gasosa que ocupa grande parte da secção transversal do tubo. Por sua vez, este filme possui um comportamento de queda livre, logo, possuindo uma velocidade negativa (CONTE, 2014).

De acordo com Lúcio G. Nascimento (2015), este tipo de escoamento resulta numa acumulação de líquidos geradas pelas forças gravitacionais, bloqueando a passagem de gás. Este fenômeno é um grande problema para a indústria do petróleo, sua ocorrência é responsável por períodos sem produção de petróleo no separador, seguido de grande vazão de líquido, no momento em que a golfada é produzida, afetando o aumento de nível do separador, transbordando-o. Bem como, a influência nas vibrações na tubulação; desgaste e corrosão dos equipamentos, reduzindo seu tempo de uso e aumentando seu custo com manutenção.

É possível diminuir os efeitos causados pela instabilidade de *Kelvin-Helmholtz* por meio de uma instalação de um sistema de gás-*lift*. O uso deste método de elevação reduz a pressão hidrostática da coluna de líquido e, assim, reduz a pressão no *pipeline* (NASCIMENTO, 2015). Ao analisar a equação (17), aumentando a velocidade do líquido, o termo que gera a instabilidade (b) diminuirá, logo, reduzirá as golfadas hidrodinâmicas. Contudo, é necessário injetar uma quantidade de gás suficiente para que o líquido seja continuamente elevado e o escoamento contínuo ocorra.

Conclusões

Neste trabalho estudou-se o fenômeno da instabilidade de *Kelvin-Helmholtz* que é muito importante para entender melhor o comportamento das golfadas hidrodinâmicas, no que diz respeito aos processos petrolíferos e em um aperfeiçoamento do desenvolvimento de equipamentos na área de petróleo e gás. Para a indústria de petróleo, a acumulação de líquido ocasionada pelo deslizamento das camadas de gás e óleo em um riser diminui a passagem do gás, prejudicando o escoamento no duto.

A análise foi realizada por meio de equações que governam o escoamento mediante alguns fenômenos que também se relacionam com uma certa perturbação, favorecendo os seguintes resultados: uma pequena perturbação se propaga e cresce exponencialmente com uma velocidade de fase que pode assumir valores do campo dos números complexos, no qual gera um comportamento instável e turbulento caracterizado pelo surgimento de vórtices que circundam um ao outro.

Por meio da equação (17) observamos que ao aumentar a velocidade do líquido a instabilidade é reduzida, em consequência, as golfadas hidrodinâmicas similarmente são contidas. Portanto, a injeção contínua de gás pelo sistema de gás-*lift* resultará em uma suavização da instabilidade de *Kelvin-Helmholtz* e de modo consequente, do regime de escoamento em golfadas.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Anderson de Jesus Araújo Ramos por ter nos auxiliado a construir os gráficos presente no artigo.

Agradecemos também ao professor Dr. Leandro Amador de Oliveira por ter nos apresentado a instabilidade de Kelvin-Helmholtz e nos ajudado com a compreensão deste fenômeno.

Aos professores Dr. Pedro Tupã Pandava Aum e Me. Cláudio Regis dos Santos Lucas por terem nos apoiado tecnicamente e nos incentivado a desenvolver este trabalho, a ajuda deles foi de extrema importância.

Referências Bibliográficas

BAI, YOUNG. QJANG, BAI. **Sistemas Marítimos de Produção de Petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

CONTE, M. C. **Estudo numérico e experimental da geração de golfadas em um escoamento bifásico de gás-líquido**. 2014. 133 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

KUNDU, P. K. COHEN, I. M. **Fluid Mechanics**, 5 ed. Estados Unidos da América: Academic Press, 2011.

NASCIMENTO, L. G. **Análise e Estudo de Estabilidade do Padrão de Escoamento Golfadas Severas Num Sistema Pipeline-riser Acoplado ao Vasps**. 108f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ROSA, E. S. **Escoamento Multifásico Isotérmico: Modelos de multifluidos e de misturas**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SALIH, A. **Kelvin-Helmholtz Instability**. Indian Institute of Space Science and Technology, Thiruvananthapuram, 2010.

SUDBRACK, V. O. **Estudo de turbulência bidimensional na instabilidade de Kelvin-Helmholtz: descrição fenomenológica**. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.