

1 Introdução

Escoamentos bifásicos em padrão *slug*, ou de golfadas, ocorrem em muitas aplicações de engenharia tais como no transporte de fluidos hidrocarbonetos em tubulações, escoamento líquido-vapor em usinas de potência, etc (Dukler e Fabre, 1992). Este é um padrão de escoamento altamente intermitente no qual grandes bolhas de gás escoam alternadamente com bolsões de líquido (*slug*) em frequências aleatórias flutuantes (Fabre e Liné, 1992; Woods et al., 2000). A Figura 1.1 ilustra o padrão *slug* obtido em um laboratório. Os bolsões de líquido podem ser puro líquido ou ser “*areado*”, ver Figura 1.2, como o resultado da entrada do gás na forma de pequenas bolhas dispersas, originadas das grandes bolhas (Nydal e Andreussi, 1991; Andreussi et al., 1993; Bendiksen et al., 1996).

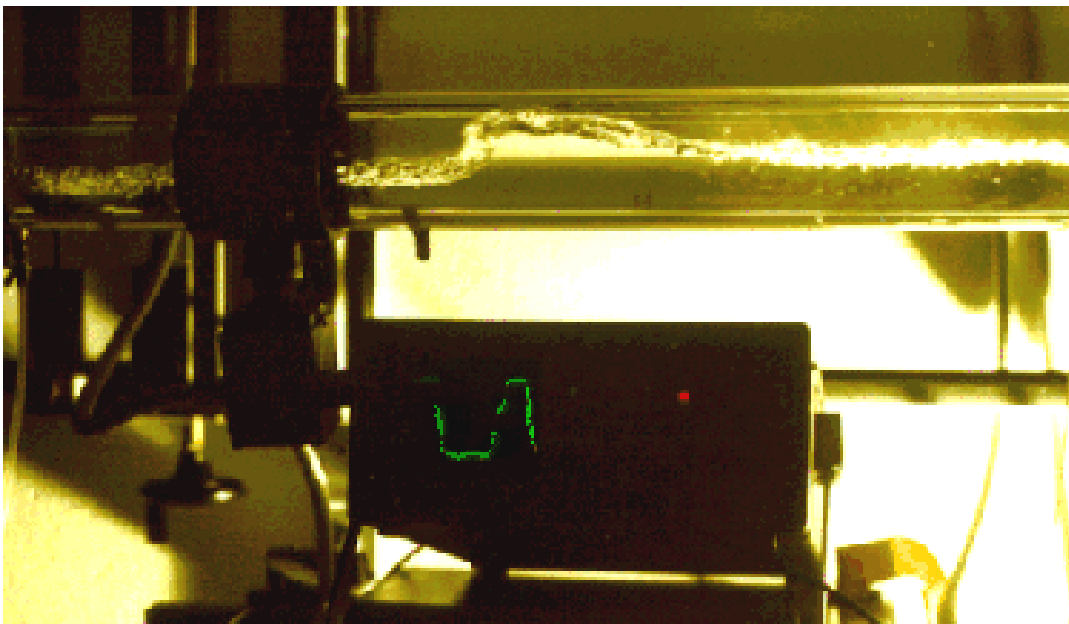


Figura 1.1 – Ilustração do padrão *slug*, obtido em laboratório

Em tubulações horizontais e inclinadas o padrão *slug* pode ser gerado a partir de um padrão estratificado basicamente por dois mecanismos: o natural crescimento das instabilidades hidrodinâmicas e a acumulação do líquido causada pela ondulação da tubulação. No primeiro caso, pequenas perturbações na forma

de pequenas ondas surgem naturalmente, podendo crescer em ondas de maior tamanho na superfície do líquido (Ansari, 1998). O mecanismo deste crescimento é a clássica instabilidade de Kelvin-Helmholtz (KH) (Lin e Hanratty, 1986; Fan et al., 1993a,b). Tais ondas podem continuar crescendo capturando líquido que escoava na frente das mesmas, até saturar a secção transversal com líquido, desse modo formando *slugs*. Estes *slugs* podem crescer se os *slugs* de jusante viajarem mais rápido do que os de montante, caso contrário eles podem colapsar. Escoamento estável de *slugs* pode ocorrer se os *slugs* de jusante e os de montante viajarem com a mesma velocidade. Na realidade, todos estes casos podem acontecer em diferentes momentos e por conseguinte, alguns *slugs* crescem, outros colapsam e outros viajam a diferentes velocidades, levando desse modo a fundir uns *slugs* nos outros (Moissis e Griffith, 1962; Taitel e Barnea, 1990; Zheng et al., 1994).

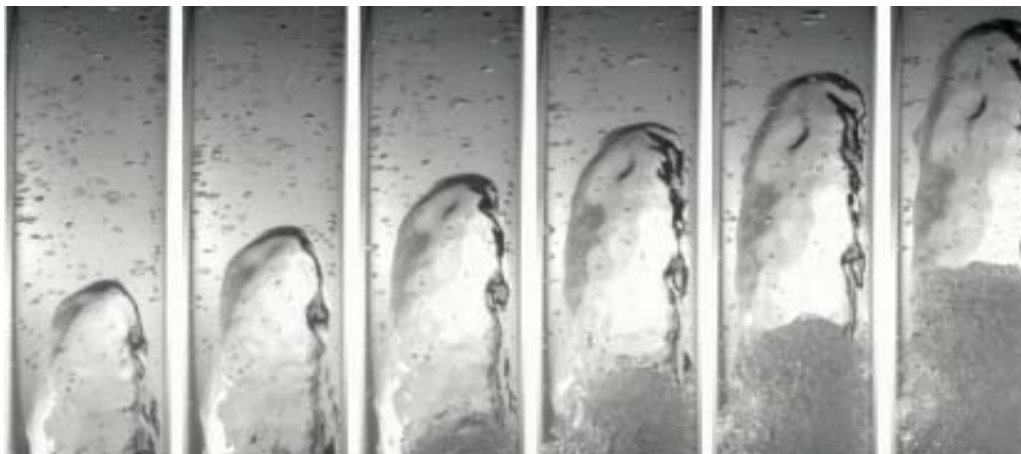


Figura 1.2 – Escoamento slug “arredado”

Em tubulações inclinadas os *slugs* podem se formar devido ao retardo e à subsequente acumulação de líquido nos declives, levando a completação da secção transversal com líquido, Figura 1.3. Um exemplo extremo deste caso de padrão *slug* induzido no terreno é chamado “*slug severo*” (“*severe slugging*”) e acontece quando uma tubulação ligeiramente inclinada encontra um *riser*, isto é, tubulação vertical, (Schmidt et al., 1985; Jansen et al., 1996).

O escoamento em padrão *slug* pode também surgir simultaneamente dos mecanismos anteriormente mencionados no transporte de hidrocarbonetos em grandes tubulações. Leves ondulações no terreno podem levar à geração de *slugs* em adição àqueles gerados pela inerente instabilidade do escoamento. Em tais

casos os *slugs* gerados por um mecanismo interagem com aqueles surgidos no outro levando a um complexo padrão de *slug*. Os *slugs* também sofrem mudanças em suas características quando viajam através de curvas e ondulações nas tubulações (Taitel e Barnea, 1990; Zheng et al., 1994).

A intermitência do escoamento em padrão *slug* causa intensas instabilidades, as quais se propagam pelas tubulações e outros dispositivos. Isto freqüentemente aumenta os problemas de projeto e usualmente leva ao sacrifício da eficiência e ou tamanho da planta de processamento. É, portanto, importante ser capaz de prever o início e subseqüente desenvolvimento do padrão *slug*, assim como prever suas características, como seu comprimento e freqüência.

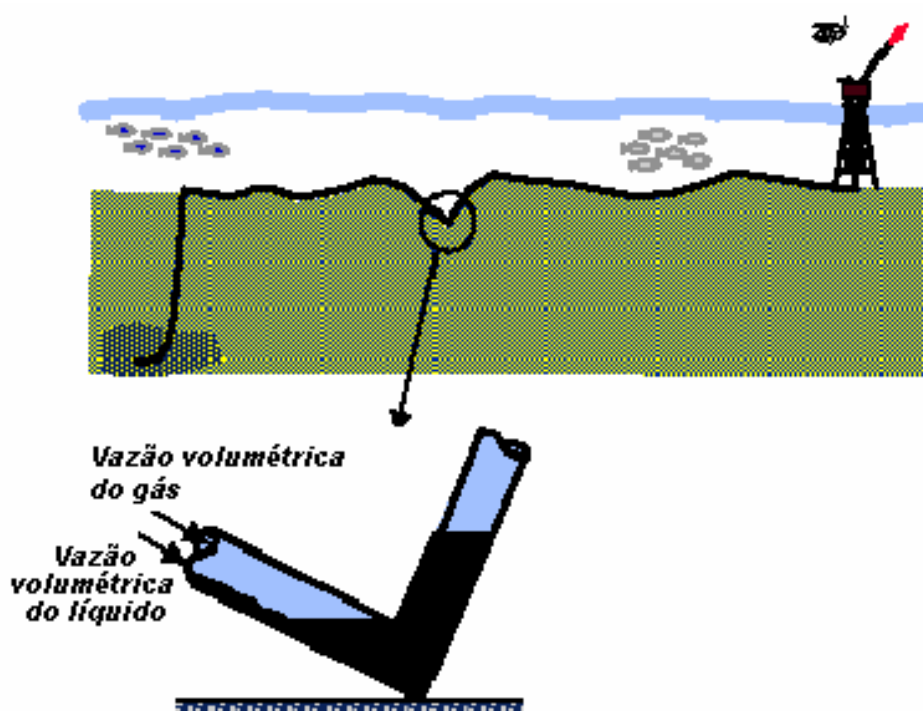


Figura 1.3 – Tubulação inclinada submarina

1.1 Revisão Bibliográfica

Métodos tradicionais de escoamento em padrão *slug* são normalmente baseados numa *célula* unitária (“*unit-cell*”), utilizando a aproximação de escoamento em padrão *slug* totalmente desenvolvido. Neste caso, analisa-se um volume de controle que engloba uma região com uma grande bolha de gás e uma

região de líquido *slug* (Wallis, 1969). O regime permanente é obtido ao selecionar um sistema de referência que viaja com a velocidade da célula (a qual é desconhecida a priori); isto possibilita uma análise em regime permanente baseada em balanços de massa e quantidade de movimento sobre o volume de controle. Muitos outros modelos foram desenvolvidos utilizando diferentes aproximações, como, por exemplo, utilizando o conceito de uma célula unitária equivalente (“*equivalent-unit-cell*”) (Dukler e Hubbard, 1975; Taitel e Barnea, 1990).

Outra forma para se modelar escoamentos em padrão *slug* em regime permanente é baseada na média estatística das propriedades físicas das fases separadas e dispersas do escoamento. Um “modelo estatístico celular” prediz as variáveis dependentes e as características das intermitências baseadas nas condições médias das equações de conservação (Ferschneider, 1983; Fabre et al., 1983; Liné, 1983). Fabre et al. (1992) refinou esta aproximação para aplicar em escoamentos transientes. A maioria dos modelos de regime permanente utiliza esquemas unificados, baseados em modelos de predição geral de padrão de escoamento e para cada tipo de padrão predominante utiliza-se diferentes modelos (Gómez et al. 1999). Os modelos de regime permanente não são capazes de prever a transição de um padrão de escoamento a outro, nem são necessariamente capazes de prever o fenômeno que acontece em tubulações inclinadas, tal como na dissipação de *slug* em escoamentos inclinados, como mostrado por Taitel et al. (2000).

Modelos transientes para escoamento em padrão *slug* podem ser classificados nas seguintes categorias: (i) especificação empírica de *slug* (“*empirical slug specification*”), (ii) perseguição de *slug* (“*slug tracking*”), e (iii) captura de *slug* (“*slug capturing*”).

Os modelos de “*empirical slug specification*” são usados para descrever a formação, crescimento, decaimento e a forma do *slug*. Estes modelos podem ser subdivididos em *transição estratificado-slug* (“*stratified-slug transition*”) e *crescimento de slug* (“*slug growth*”). A maioria dos métodos pertencente à primeira aproximação usa a clássica teoria de estabilidade Kelvin-Helmholtz para escoamento não viscoso (Kordyban e Ranov, 1970; Taitel e Dukler, 1976; Mishima e Ishii, 1986; Lin e Hanratty, 1986; Espedal e Bendiksen, 1989; Watson, 1989). De-Henau e Raithby (1995 a,b) desenvolveram um modelo de dois fluidos unidimensional com um sub-modelo de escoamento em padrão *slug*, o qual

fornece as relações constitutivas e os parâmetros necessários para o fechamento das relações incorporadas no modelo de dois fluidos. Em geral, nos modelos propostos para prever o *crescimento do slug* considera-se que o *slug* é gerado por algum mecanismo, e introduzem correlações para descrever a cauda e frente do *slug* (Ruder et al., 1989; Jepson, 1989; Lunde e Asheim, 1989; Bendiksen e Espedal, 1992).

Os modelos de “*slug tracking*” geralmente utilizam mapas de padrões de escoamento para determinar a geração dos *slugs*. Subseqüentemente, a posição de cada *slug* é monitorada ao longo da tubulação e tempo, utilizando coordenadas Lagrangianas. Esta informação é então alimentada dentro dos cálculos de fluxo de massa e quantidade de movimento na cauda e frente do *slug* (Bendiksen et al., 1990; Straume et al., 1992). Os modelos de “*slug tracking*” também podem utilizar correlações empíricas para avaliar certas propriedades do *slug*. Um exemplo da aplicação de tal modelo está no código comercial OLGA (Bendiksen et al., 1987, 1991). Zheng et al. (1994) sugerem uma técnica de “*slug tracking*”, a qual prediz o crescimento, geração e dissipação de cada *slug* em forma individual. Uma aproximação similar, porém aplicada à análise da distribuição longitudinal do *slug* foi proposto por Barnea e Taitel (1993). Nydal e Banerjee (1996) propõem um método “*slug tracking*” Lagrangiano para escoamento no padrão *slug* usando uma aproximação “objeto orientado”, onde *slugs* e bolhas são tratados como objetos computacionais discretos e organizados em listas entrelaçadas. Em 1993, Taitel e Barnea propuseram outro modelo, o qual simula os mecanismos básicos de geração, crescimento e dissipação do *slug*, com particular ênfase nos efeitos da compressibilidade do gás.

O modelo de “*slug capturing*” utilizado por Issa e Kempf (2003), é baseado no modelo de dois fluidos transiente e unidimensional (Ishii, 1975), para descrever escoamentos bifásicos. Neste modelo, cada fase é descrita por um conjunto de equações de conservação de massa, de quantidade de movimento linear e de energia, as quais são obtidas através de um processo de médias em cada fase. Em 2003, Bonnizi e Issa apresentaram dois trabalhos utilizando o modelo de “*slug capturing*”. O primeiro é a simulação trifásica do padrão *slug* utilizando um modelo de multi-fluido e o segundo é referente ao processo de ingresso de pequenas bolhas de gás no *slug* líquido. Procurando melhorar o rendimento do modelo de “*slug capturing*”, Oliveira e Issa (2003) fizeram um estudo dos

aspectos numéricos dos algoritmos utilizados na solução do modelo de dois fluidos, e apresentaram formas alternativas para resolver as equações de conservação. Apresentaram também técnicas numéricas para limitar o valor da fração volumétrica para permanecer dentro dos limites físicos.

Pesquisas experimentais com escoamentos ar-líquido foram realizadas por Hand e Spedding (1991) que analisaram o efeito da viscosidade do líquido no padrão do escoamento, na fração volumétrica do líquido (*holdup*) e na queda da pressão. Outros trabalhos experimentais sobre *slugs* foram realizados por De Henau e Raithby (1994) que estudaram *slugs* induzidos no terreno para tubulações ascendentes e descendentes. Em 2003, Shemer realizou estudos experimentais com injeções controladas de grandes bolhas para o estudo dos parâmetros hidrodinâmicos e estatísticos dos *slugs*.

1.2 Objetivo

O propósito deste trabalho é investigar a capacidade do modelo de dois fluidos em prever o início e o desenvolvimento do padrão *slug*. Desenvolveu-se um código numérico baseado na metodologia proposta por Issa e Kempf (2003), a qual de acordo com os autores, prevê de forma automática o natural crescimento das instabilidades, a formação de *slugs* e a subsequente presença de séries de *slugs*.

Para a previsão da formação do padrão *slug* é necessário que o regime de escoamento seja instável e o resultante conjunto de equações governantes seja *bem posto* matematicamente. Para isso, é necessário realizar uma análise de estabilidade para definir as condições de contorno adequadas ao problema.

Para analisar o problema, considerou-se duas formulações, i.e., uma formulação conservativa e outra não conservativa. Adicionalmente, diferentes métodos para tratar o acoplamento velocidade-pressão também foram implementados, assim como diferentes formas de aproximar o fluxo de massa nas faces dos volumes de controle.

Os resultados numéricos obtidos foram comparados com dados numéricos disponíveis na literatura.

1.3 Organização do Trabalho

No próximo capítulo é apresentada a modelagem matemática que compreende as hipóteses propostas, a geometria considerada, juntamente com a apresentação do conjunto de equações governantes nas duas formulações, conservativa e não conservativa, e as condições iniciais e de contorno.

A seguir, o Capítulo 3 consiste na descrição do método numérico utilizado. Apresentam-se as equações de conservação em sua forma discretizadas (para os três algoritmos desenvolvidos), os critérios de definição dos passos de tempo, os critérios de convergência e o método empregado para as soluções dos sistemas algébricos.

No Capítulo 4 apresenta-se os resultados da análise de estabilidade do modelo matemático, visando identificar as condições de contorno adequadas ao problema. A seguir, os resultados numéricos obtidos com os três algoritmos desenvolvidos são analisados.

Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho juntamente com as recomendações e comentários finais.