

# 1 Introdução

Diz-se que um escoamento é multifásico quando existe deslocamento simultâneo de fluidos que se apresentam em mais de uma fase. Água e ar escoando através de uma tubulação, por exemplo, formam uma mistura bifásica, com uma fase líquida e uma gasosa. A ocorrência de escoamentos multifásicos em tubulações verticais, horizontais e inclinadas é muito comum em diversas atividades industriais. Dentre essas podem ser citadas a indústria química, a indústria de geração de energia e a indústria do petróleo.

Na indústria química, o escoamento multifásico está presente em diversos equipamentos, tais como reatores, torres de fracionamento, condensadores, caldeiras, colunas de destilação e absorção e trocadores de calor.

Na indústria de geração de energia através da conversão de vapor, os escoamentos multifásicos ocorrem amplamente nos circuitos primários de geração de vapor, bem como nos secundários de conversão do mesmo em energia, notadamente na forma de energia elétrica. Assim, tem-se como comum a ocorrência de escoamento bifásico em revedores, reatores térmicos e outros equipamentos de troca de calor. Na área nuclear encontramos escoamento multifásico no circuito secundário de geradores de vapor.

Na indústria do petróleo, notadamente uma indústria de manuseio de fluidos, o escoamento multifásico está presente em todo o percurso dos fluidos produzidos e é freqüentemente encontrado nas instalações de produção, transporte e processamento de hidrocarbonetos de um campo petrolífero. O escoamento normalmente encontrado na produção de petróleo é o multifásico, com duas fases líquidas (água e óleo) e uma gasosa (gás), a depender da composição e das condições de pressão e temperatura. O conceito de fase não é relativo ao estado da matéria (gás, líquido ou sólido), mas sim ao número de fases imiscíveis. Nos sistemas da produção, o escoamento multifásico ocorre quando os fluidos existentes nos reservatórios escoam até as instalações de superfície passando por poços, linhas de surgência e ainda em *risers*, no caso de campos ligados às plataformas marítimas.

A capacidade de entender e modelar o comportamento de escoamentos multifásicos permite o dimensionamento das tubulações, dos equipamentos de

elevação artificial e a determinação das vazões de operação de um poço ao longo de sua vida produtiva. Nas instalações de movimentação registram-se escoamentos multifásicos quando os fluidos produzidos são transferidos para outras áreas por meio de dutos. As unidades de processamento de óleo e gás natural experimentam tais escoamentos, quando do condicionamento dos fluidos produzidos em desidratadores, tratadores, vasos separadores e torres de fracionamento.

Os padrões de escoamento bifásico observados em tubulações horizontais (Taitel e Dukler, 1976) são apresentados na figura 1.1 e descritos a seguir:

- Estratificado (*Stratified flow*): o escoamento estratificado se caracteriza pela separação gravitacional total das fases líquida e gasosa com escoamento contínuo de cada fase.
- Ondulado (*Wave flow*): com o aumento da velocidade da fase gasosa, no escoamento estratificado, ondas são formadas na interface de separação líquido-gás, gerando o regime ondulado.
- Golfada (*Slug flow*): aumentando ainda mais a velocidade do gás no escoamento ondulado, as ondas passam a ocupar, em alguns casos, toda a seção transversal da tubulação formando golfadas, que são rapidamente deslocadas dentro da tubulação. Golfadas de gás e líquido se sucedem na tubulação com a de líquido carreando pequenas bolhas dispersas.
- Bolhas alongadas (*Elongated bubble flow*): com o aumento da velocidade da fase gasosa no escoamento em bolhas, há coalescência, formando bolhas alongadas em forma de balas, que tendem a escoar no topo da tubulação.
- Bolhas (*Bubble flow*): no escoamento em bolhas, a fase gasosa se encontra dispersa na fase líquida em forma de bolhas dispersas, mas devido ao efeito gravitacional estas tendem a se dispersar no topo da tubulação.
- Anular (*Annular flow*): o escoamento anular ocorre com altas vazões de gás. O líquido escoar na superfície interna da tubulação, formando um filme com bolhas dispersas, e o gás escoar no centro da tubulação, carreando líquido atomizado. Devido ao efeito gravitacional, a espessura do filme formado pela fase líquida diminui quando se caminha para o topo da tubulação.

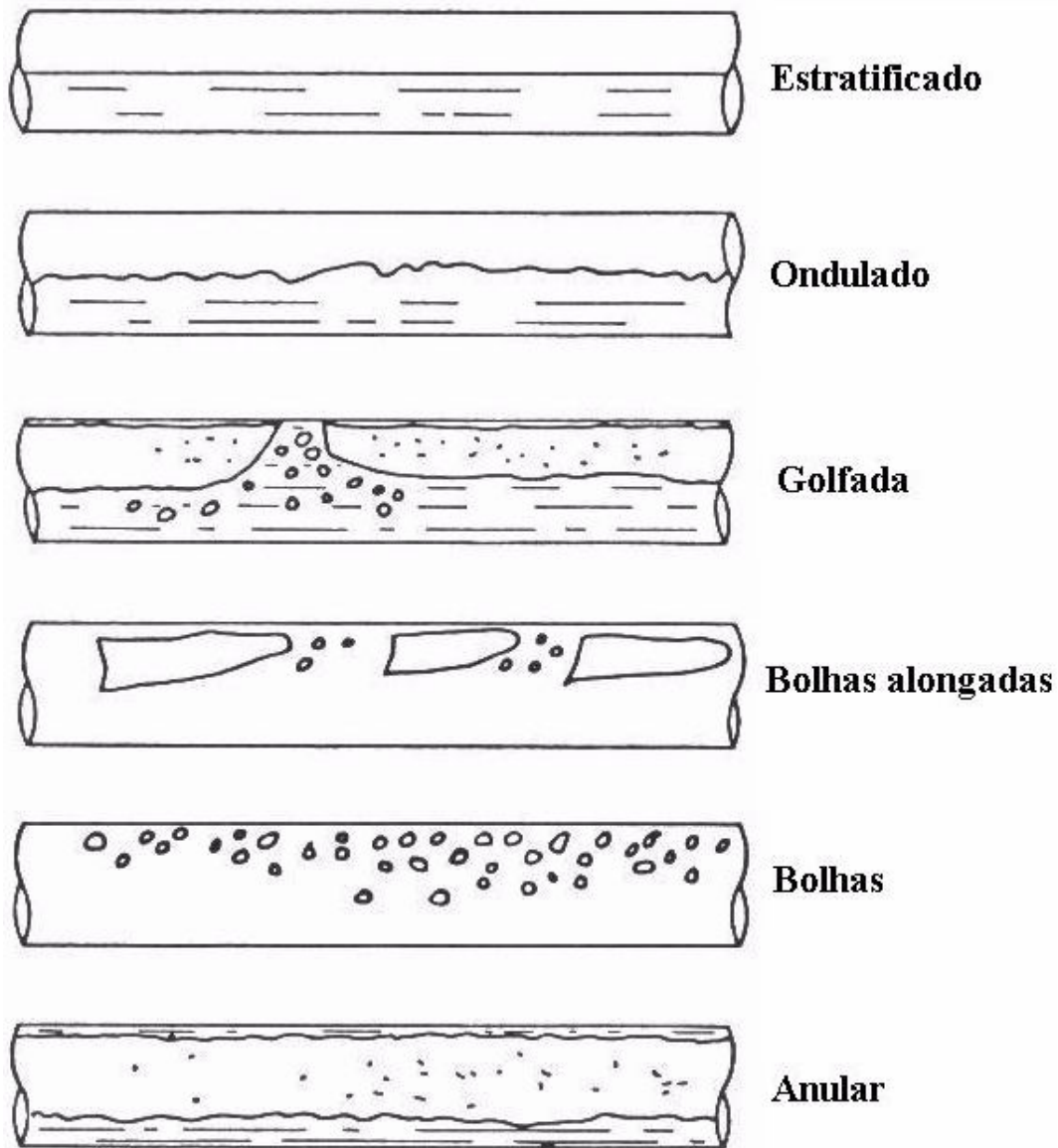


Figura 1.1 – Padrões de escoamento multifásico horizontal (Fonte: Tong e Tang, 1997).

No escoamento vertical, o regime estratificado desaparece e um novo padrão pode ser observado (Caótico). Os padrões de escoamento bifásico vertical ascendente (Taitel, Barnea e Dukler, 1980) são apresentados na figura 1.2 e definidos a seguir:

- Bolhas (*Bubble flow*): no escoamento em bolhas, a fase gasosa se encontra dispersa na fase líquida em forma de bolhas dispersas, sendo a fase líquida contínua. Esse escoamento ocorre tipicamente para baixas velocidades superficiais de gás. É pouca a influência do gás no gradiente de pressão.
- Golfada (*Slug flow*): o regime de golfadas, em escoamento vertical, é normalmente simétrico em relação à linha de centro da tubulação. Aumentando a velocidade da fase gasosa, as bolhas pequenas tendem a se aglomerar e o diâmetro desta nova bolha atinge dimensão similar ao da tubulação. Quando isto ocorre, formam-se bolhas grandes em formato de “projétil”, também denominadas bolhas de Taylor. Com isto, golfadas de gás e líquido se sucedem na tubulação com a golfada de líquido apresentando pequenas bolhas dispersas. Entre as bolhas de Taylor e a parede da tubulação uma fina camada de líquido que escoar para baixo. Ambas as fases têm influência no gradiente de pressão.
- Transição ou Caótico (*Churn flow*): o escoamento caótico é um tanto similar ao de golfadas. É, entretanto, muito mais caótico e desordenado. Com as velocidades de gás e líquido maiores do que no caso anterior, a quebra das bolhas do escoamento em golfadas conduz a um padrão instável e desordenado, onde existe um movimento oscilatório de líquido para cima e para baixo na tubulação. No padrão caótico, ambas as fases são descontínuas e têm influência no gradiente de pressão.
- Anular (*Annular flow*): o escoamento anular é caracterizado por uma fase contínua de gás escoando ao longo do núcleo da tubulação. O líquido escoar na periferia do duto formando um filme com bolhas dispersas, e o gás escoar no centro da tubulação, carreando gotículas de líquido. Este padrão de escoamento ocorre com altas velocidades de gás e altas concentrações de gás. O gás tem influência predominante no gradiente de pressão.

Hasan e Kabir (1988) apresentam um modelo para prever os padrões de escoamento, fração volumétrica *in-situ* de líquido (*holdup*) e perda de carga em escoamento vertical multifásico.

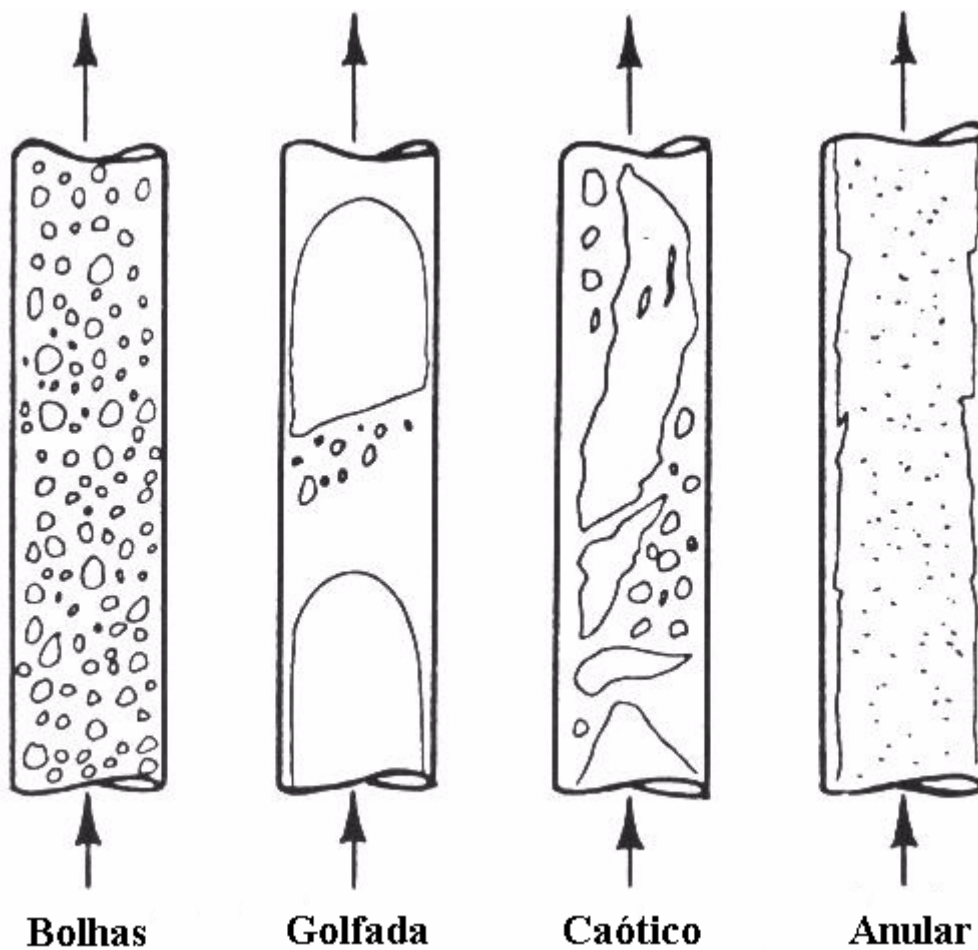


Figura 1.2 – Padrões de escoamento multifásico vertical ascendente (Fonte: Tong e Tang, 1997).

Em poços produtores de óleo, diferentes padrões de escoamento normalmente existem em diferentes profundidades. Por exemplo, no fundo do poço teremos apenas fluxo monofásico de óleo. Durante o escoamento ascendente a pressão cai gradualmente. Quando a pressão atinge um ponto onde fica igual à pressão de saturação, o gás que estava em solução começa a sair gerando bolhas. À medida que a pressão continua caindo e mais gás sai de solução outros padrões de escoamento começam a surgir, ilustrado na figura 1.3.

O regime de escoamento mais freqüente e complexo é o em golfadas, que causa maiores perturbações em equipamentos que lidam com escoamentos multifásicos, daí ser importante sua caracterização e capacidade de previsão destes escoamentos.

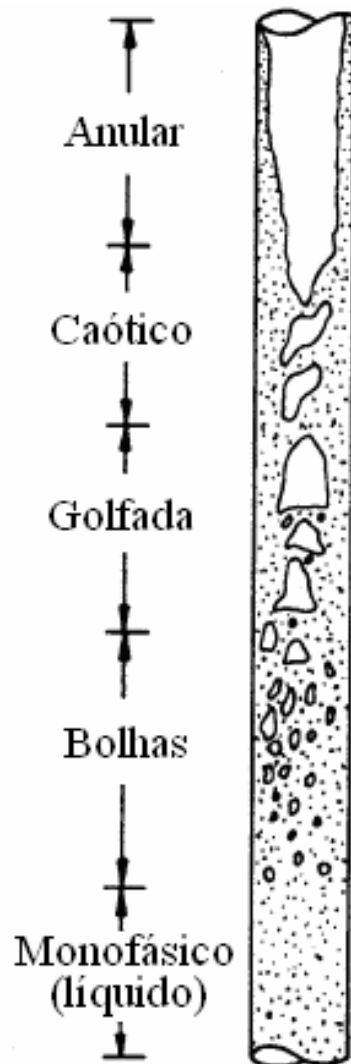


Figura 1.3 – Padrões de escoamento em um poço produtor de óleo vertical (Fonte: Hasan e Kabir, 1988).

A previsão numérica completa de escoamentos multifásicos é ainda uma tarefa longe de ser alcançada, apesar dos significativos avanços observados nas últimas décadas (Taha e Cui, 2006; Brauner e Ullmann, 2004). Cada fase que compõe o escoamento é governada por equações bem conhecidas que representam os princípios básicos de conservação de massa, energia e quantidade de movimento linear e angular. Caso cada fluido fosse bem representado por uma equação constitutiva adequada, seria possível, em princípio, prever o movimento dos fluidos e, conseqüentemente, caracterizar completamente o escoamento multifásico. Entretanto, o desconhecimento da posição das interfaces que delimitam as fases, da natureza dos fluxos de massa,

energia e quantidade de movimento entre as fases e a natureza muitas vezes turbulenta do escoamento torna necessária a utilização de informações oriundas de experimentos de laboratório.

Existem diversas técnicas experimentais desenvolvidas para caracterizar escoamentos bifásicos gás-líquido. Uma referência clássica para métodos experimentais aplicados a escoamentos bifásicos pode ser encontrada na compilação preparada por G. F. Hewitt e apresentada em Hetsroni (1982). Neste artigo são mencionadas as técnicas mais utilizadas até aquela data para a medição dos parâmetros de interesse. O autor apresenta uma classificação dos parâmetros de interesse segundo a sua utilização final pelos usuários. Assim, são relacionados como parâmetros de interesse para projetos, a queda de pressão no escoamento, a fração de vazio e a taxa de transferência de calor, no caso de escoamentos bifásicos não isotérmicos. Na lista de parâmetros de interesse para estudos científicos são relacionadas as taxas de escoamento nos filmes de líquido, as taxas de entranhamento de líquido e gás (*entrainment rate*), a tensão cisalhante na parede, as taxas de transferência de massa de líquido para a fase gasosa, a velocidade local das fases e a dimensão de bolhas e gotas. Em seguida, o autor apresenta os métodos disponíveis para a medição destes parâmetros que são classificadas em:

- Métodos óticos
- Métodos de espalhamento e absorção de radiação
- Métodos elétricos baseados em condutância e capacitância
- Métodos utilizando traçadores
- Métodos baseados em transferência de calor e massa
- Métodos baseados na separação das fases do escoamento
- Métodos utilizando sensores térmicos

Em particular, para o caso da medição da velocidade locais das fases, o trabalho de revisão de Y. Y. Hsu apresentado também na compilação preparada por Hetsroni (1982) indica que o padrão de escoamento é fator fundamental na escolha da técnica de medição a ser utilizada. Além disto, indica que a escolha da técnica de medição depende da necessidade da medição da velocidade da fase contínua ou da dispersa, ou se acesso ótico ao escoamento é possível.

Três técnicas principais são mencionadas: tubo de Pitot, correlação cruzada de sinais e anemometria laser-Doppler. No caso do tubo de Pitot, utiliza-se o mesmo instrumento empregado na medição local de velocidade em

escoamentos monofásicos, com as devidas correções para a massa específica que é calculada com a hipótese de mistura homogênea de fases. A técnica de correlação cruzada faz uso de sinais transientes obtidos de sondas de temperatura ou fração de vazio, medidos em duas posições distintas com afastamento conhecido. O valor máximo da função de correlação cruzada dos sinais obtidos das duas sondas indica o tempo de trânsito de uma perturbação da grandeza medida, a qual é admitida como possuindo a velocidade do escoamento desejada. De acordo com o autor, a anemometria laser Doppler tradicionalmente utilizada em escoamentos monofásicos necessita de adaptações para fornecer informações combinadas das fases líquida e gasosa. É sugerido o uso de uma célula fotomultiplicadora para converter o sinal ótico de cada fase.

O progresso observado nas técnicas óticas desde a publicação do trabalho de compilação de Hetsroni em 1982 foi significativo. A disponibilidade de fontes de laser pulsadas de alta energia e de câmeras digitais com resolução espacial e temporal elevadas, aliadas a um aumento exponencial na capacidade de processamento digital de imagens, possibilita a obtenção de medidas instantâneas em áreas extensas de escoamentos. O acesso ótico ao escoamento é uma limitação óbvia destas técnicas, mas que, ainda assim, constituem-se em ferramentas cada vez mais importantes para a investigação detalhada de escoamentos bifásicos. A literatura mostra diversos trabalhos recentes que fazem uso das mais variadas combinações de técnicas que utilizam fontes pulsadas, filtros óticos, câmeras digitais e processamentos de imagens aplicadas à medição de escoamentos bifásicos (Lindken e Merzkirch, 2002; Nogueira et al., 2003; Nogueira et al., 2006a; Nogueira et al. 2006b; Fujiwara et al., 2004)

### **1.1. Objetivo**

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver uma técnica experimental ótica baseada no processamento digital de imagens para a medição instantânea do campo de velocidades gerado em escoamento bifásico. O trabalho concentrou-se no escoamento em golfadas por duas razões principais: em primeiro lugar, como já mencionado, trata-se de um dos padrões de escoamento mais importantes nas aplicações industriais, especialmente aquelas relacionadas com a produção de petróleo e em segundo lugar, o



desenvolvimento deste tipo de técnica visa a contribuir para a capacitação do Laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio na medição de escoamentos bifásicos. Este laboratório possui experiência acumulada na aplicação de técnicas ópticas e de processamento digital de imagens para a medição de escoamento monofásico de líquido e gás, notadamente na utilização da técnica conhecida como Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*). A aplicação desta técnica para escoamentos bifásicos líquido-gás não é tarefa trivial e o escoamento de golfadas apresenta-se como um dos padrões mais adequados para sua utilização. O domínio desta técnica possibilitará a realização de estudos avançados pelo Laboratório na área de escoamentos bifásicos.

A aplicação da técnica *PIV* na medição de escoamentos bifásicos líquido-gás exige a utilização de soluções que permitam a separação das imagens da fase gasosa – normalmente de alta intensidade luminosa – das imagens de baixa intensidade produzidas pelas pequenas partículas traçadoras dispersas na fase líquida que são fundamentais para a obtenção dos campos de velocidade do líquido. O método de separação das imagens das fases utilizado fez uso da técnica de Fluorescência Induzida por Laser (*Laser Induced Fluorescence – LIF*) em conjunto com Iluminação Pulsada de Fundo (*Pulsed Shadow technique – PST*) que visa melhorar a determinação da forma da interface líquido-gás.

Deve ser enfatizado que a utilização conjunta das três técnicas mencionadas, a saber, *PIV*, *LIF*, e *PST*, não constitui trabalho original, tendo sido já reportada em publicações de alguns poucos pesquisadores atuantes em laboratórios no exterior. Ainda assim, acreditamos que a contribuição apresentada no presente trabalho é relevante em face das possibilidades que abre para a pesquisa na área de escoamento bifásico no País.

## **1.2. Organização do trabalho**

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução. No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de técnicas utilizadas na caracterização de escoamentos bifásicos. No terceiro capítulo são descritas as técnicas de medição utilizadas para caracterizar o escoamento. No quarto capítulo é realizada uma descrição da montagem experimental assim como o procedimento experimental para a obtenção das principais variáveis do problema. O quinto capítulo mostra os

resultados obtidos no trabalho. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e no sétimo capítulo a referência bibliográfica.