

# ESTUDO DO ESCOAMENTO INTERMITENTE EMPREGANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

Aluno: Lívia Pereira Tardelli  
Orientador: Luis Fernando A. Azevedo

## 1. Introdução

Entende-se por escoamento multifásico o escoamento onde há mais de uma fase, sendo seu caso mais simples o escoamento bifásico. Escoamentos multifásicos acontecem em toda parte e a todo instante na natureza como em chuvas, ciclones, poluição atmosférica, e também em inúmeros processos industriais como combustão interna, transporte e produção de óleo e gás.

Na indústria de petróleo, o escoamento multifásico ocorre durante o processo de produção e transporte do óleo e do gás, tanto nos poços quanto nas linhas que interligam o poço à plataforma. Ao longo da produção do poço, o fluxo passa por um processo de depressurização fazendo com que parte do hidrocarboneto líquido dissocie-se e passe a se apresentar também na forma gasosa, escoando junto com a parte líquida inicial.

Quando gás e líquido escoam simultaneamente numa tubulação, várias configurações de escoamento podem existir caracterizando-os padrões de escoamento ou padrões de fluxo. Estes padrões dependem de variáveis operacionais, notadamente da velocidade do líquido e do gás, das propriedades dos fluidos e de alguns aspectos geométricos, tais como, diâmetro da tubulação e ângulo de inclinação. A hidrodinâmica do escoamento, assim como as equações de momento, transferência de calor, massa e energia, mudam drasticamente para cada padrão de escoamento.

A caracterização dos padrões de escoamento é obtida a partir de ensaios experimentais. Os dados obtidos experimentalmente são mapeados em gráficos relacionando-se as velocidades superficiais de líquido e gás, conforme a Figura 1 (Mandhane et al, 1974).

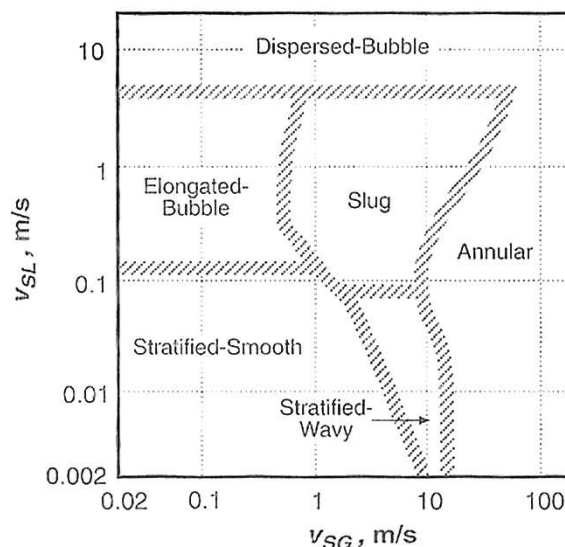


Figura 1 Mapa do padrão de escoamento (Mandhane et al, 1974).

O escoamento horizontal tende a ser mais complexo que o vertical, por conta da assimetria no escoamento induzida pela gravidade agindo normal à direção do escoamento. Por conta desta força, o fluido mais pesado (líquido) tende a se depositar no fundo da tubulação. Os padrões de escoamento observados para este tipo de escoamento são exemplificados na Figura 2.

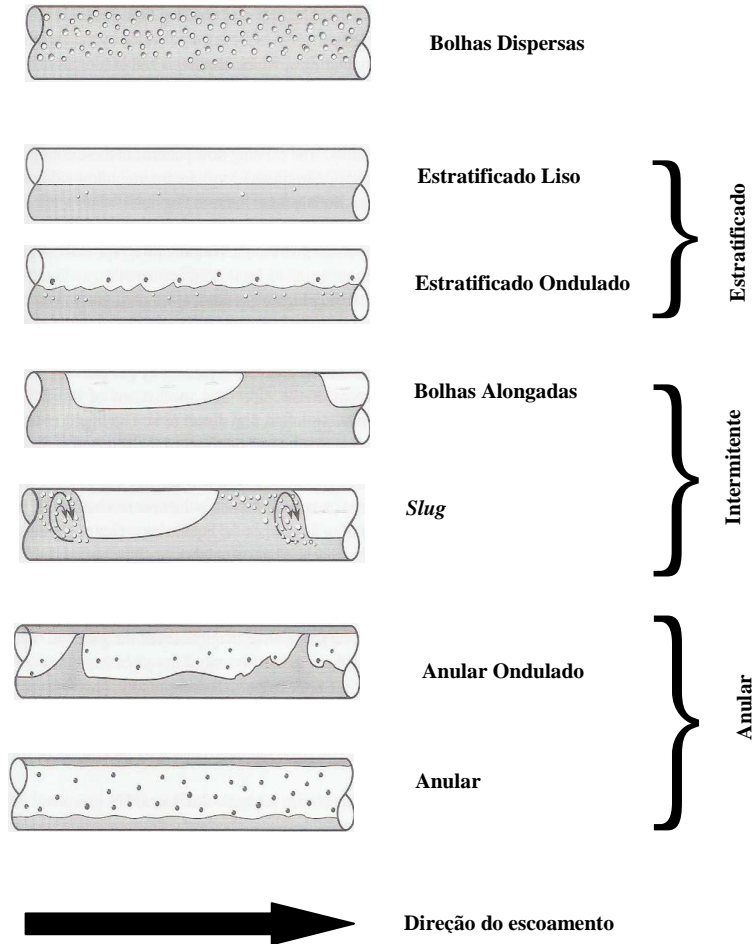


Figura. 2: Padrões de escoamento na horizontal

O padrão Intermitente em escoamento horizontais é caracterizado pela alternância entre líquido e gás. Pistões de líquido, que ocupam todo o diâmetro do tubo são separados por bolhas de gás, que contêm uma camada de líquido estratificada escoando no fundo do tubo. O mecanismo do escoamento é caracterizado por uma alta velocidade do pistão de líquido, ultrapassando o líquido presente no filme que escoava lentamente à sua frente. O padrão apresenta-se subdividido em *slug* e bolhas alongadas. O comportamento do escoamento é o mesmo para os dois padrões no que diz respeito ao mecanismo. O escoamento de bolhas alongadas é considerado como um caso limite do escoamento *slug*, quando o pistão de líquido apresenta-se livre de bolhas em seu interior. Isto ocorre para baixas vazões de gás, quando o escoamento é mais suave. Para altas vazões de gás, o líquido se apresenta aerado por pequenas bolhas, as quais se concentram na frente do pistão de líquido e na parte superior da tubulação.

Dentre os diversos padrões observados nas figuras anteriores este padrão de escoamento horizontal é observado com grande frequência ao longo do escoamento para um sistema típico de produção de petróleo. Por conta disso, o escopo deste trabalho irá se concentrar neste padrão de escoamento. A principal característica desse padrão de escoamento é o fato de que os pistões de líquido bem como as bolhas de gás não ocorrem com tamanho e

frequência definidos. Essa irregularidade é oriunda de interações entre bolhas vizinhas e também devido ao seu processo de formação.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo experimental com a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV – do inglês *Particle Image Velocimetry*), que não é intrusiva ao escoamento, para a estimativa do perfil de velocidade do pistão de líquido e do filme de líquido. Na busca por uma melhor definição da interface entre líquido e gás, foram utilizadas as técnicas de Fluorescência Induzida por Laser (*Laser Induced Fluorescence* – LIF) e a iluminação pulsada de fundo (do inglês, *Pulsed Shadow Technique* – PST). Ambas as técnicas também não interferem no escoamento e, além disso, permitem um incremento qualitativo na determinação do formato da bolha.

## 2.

### Revisão da Literatura

A pesquisa bibliográfica revela um grande número de investigações experimentais no estudo do comportamento do escoamento intermitente. Os trabalhos experimentais são conduzidos com o objetivo de dar suporte ao desenvolvimento de modelos para o escoamento slug na configuração horizontal. Provavelmente, devido à natureza complexa do padrão de escoamento intermitente, foram encontrados relativamente poucos trabalhos que apresentassem uma abordagem sobre medições do campo instantâneo de velocidade na região do pistão e no filme de líquido. Informações detalhadas sobre o fluxo de comportamento é fundamental para o bom entendimento dos mecanismos físicos que regem o escoamento. Kvernfold et al (1984) realizaram um estudo em que os perfis de velocidade foram medidos no filme e líquidos da região do pistão. Uma sonda LDV (*Laser Doppler velocimetry*) foi empregada em conjunto com um algoritmo especialmente concebidos para validação de dados levando em conta a luz espalhada pelas bolhas dispersas indesejadas presentes no líquido. A técnica apresentou bons resultados apenas em situações em que houve uma baixa concentração de bolhas arrastadas pelo líquido.

Kawaji et al (1995) estudaram também o perfil de velocidade do líquido, através da técnica não intrusiva conhecida como PDA (Photochromic Dye Activation), a qual utiliza um corante dissolvido no líquido. A técnica é apresentada pelos autores como possuindo potencial para medição de perfil de velocidade instantânea, especialmente próximo à interface gás-líquido. Os resultados apresentados são oriundos da média de 20 testes analisados.

Sharma et al 1998 utilizaram a técnica de anemometria de filme quente para medição do perfil de velocidade.

Gomez (2003) apresentou um estudo experimental detalhado da distribuição de velocidade tanto do pistão quanto do filme de líquido, utilizando a técnica LDV.

A medição do perfil de velocidade utilizando as técnicas de PIV (*Particle Image Velocimetry*), PST (*Pulsed Shadowgraph*) e LIF (*Laser Induced Fluorescence*) foi realizada por Carpintero Rogero (2006). Neste trabalho, as três técnicas ópticas foram empregadas para produzir dados médios e de campos de velocidades instantâneos para o pistão e filme de líquido.

Tal como indicado neste breve resumo dos principais trabalhos voltados para a determinação de informações detalhadas sobre o campo de velocidade da fase líquida no escoamento *slug*, o caráter transitório do regime de fluxo intermitente representa uma limitação à utilização de técnicas de medições pontuais, tais como LDV e anemometria de filme quente. As possibilidades abertas pelo domínio de técnicas tais como PIV, agora largamente empregada nas medições monofásicas poderá contribuir para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos deste complexo padrão de escoamento.

### **3. Técnica de Medição**

A técnica selecionada para a medição dos campos instantâneos de velocidade da fase líquida foi uma variação da técnica óptica utilizada com sucesso em anos recentes para a medição de escoamentos monofásicos, conhecida com Velocimetria por Imagem de Partículas, ou PIV, do inglês Particle Image Velocimetry. A presença das fases líquida e gasosa no escoamento, no entanto, produz espalhamentos de luz indesejáveis que exige a incorporação de artifícios experimentais para que a medição do campo de velocidade na fase líquida seja realizada com sucesso.

A seguir é apresentada uma descrição das técnicas utilizadas, a saber, PIV, para a medição dos campos instantâneos de velocidade na fase líquida, Fluorescência Induzida por Laser – LIF (Laser-Induced Fluorescence), para separação as imagens da fase líquida e da fase gasosa e Técnica da Sombra Pulsada – PST (Pulsed Shadow Technique), para realçar as interfaces líquido-gás.

#### **3.1. Velocimetria por Imagem de Partículas**

A técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (Particle Image Velocimetry, conhecida também como PIV) vem sendo largamente utilizada na última década para realizar medições instantâneas do campo de velocidade em regiões extensas do escoamento. O seu princípio básico consiste em iluminar uma seção do escoamento em dois instantes de tempo próximos (da ordem de micro segundos de intervalo entre pulsos) por meio de um plano de luz laser pulsada, registrando a posição de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido, geralmente por meio de câmera digital (Raffel et al 2007).

Esta técnica apresenta como principais características o fato de ser não intrusiv, a possibilidade da medição de regiões extensas do escoamento e a possibilidade da medição de campos instantâneos de velocidade. Trata-se de um grande avanço em relação às técnicas tradicionais que somente fornecem medições pontuais do campo de velocidade.

Como limitações da técnica PIV podem ser mencionadas a necessidade do fluido de trabalho e da seção de testes serem transparentes ao comprimento de onda da fonte de iluminação e a limitação da resolução temporal das medidas, ainda inferior àquelas obtidas por técnicas pontuais como anemometria a laser ou de fio quente.

O princípio geral de funcionamento da técnica PIV pode ser mais bem compreendido com o auxílio da Figura 3.

No fluido em escoamento, são introduzidas partículas traçadoras de pequeno diâmetro que devem acompanhar fielmente o escoamento. A região onde se deseja medir a velocidade do escoamento é iluminada com o plano de laser e as imagens são capturadas por uma câmera situada em posição ortogonal à seção de testes. Duas imagens são adquiridas num pequeno intervalo de tempo e armazenadas no computador.

As imagens armazenadas são divididas em pequenas áreas, chamadas de janelas de interrogação, que são tratadas por métodos estatísticos (correlação cruzada) para determinação do deslocamento das partículas e, por conseguinte, o campo de velocidade desejado.

Através da aplicação de algoritmos de pós-processamento, o campo de velocidade é analisado para identificar a possível presença de vetores espúrios que podem ser obtidos em regiões com baixa visibilidade ou falta de partículas. Estes vetores, que se espera de serem em número desprezível, são eliminados nesta etapa e substituídos por vetores interpolados. Na etapa de pós-processamento, caso desejável, o campo de velocidade é filtrado para atenuar a presença de ruído (Raffel et al.2007).

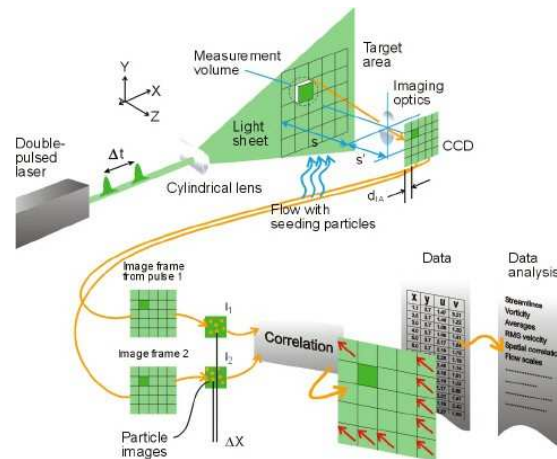


Figura 3 - Princípio de funcionamento da técnica PIV. (Fonte: [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com))

A Figura 4 apresenta um par de imagens típicas para instantes de tempo consecutivos obtidas de uma medição de escoamento utilizando a técnica PIV. Nestas imagens, consideradas de boa qualidade, ressaltam-se a distribuição homogênea das partículas traçadoras e o excelente contraste das imagens, requisitos necessários para uma medição bem sucedida. O processamento de imagens como as apresentadas nesta figura fornece campos de velocidade formados por, tipicamente, dezenas de milhares de vetores velocidade, o que produz resoluções espaciais da ordem de frações de milímetros em regiões com dimensões da ordem de dezenas ou centenas de milímetros. O nível de resolução espacial obtido com a técnica PIV é equivalente àquele obtido com as técnicas pontuais convencionais.

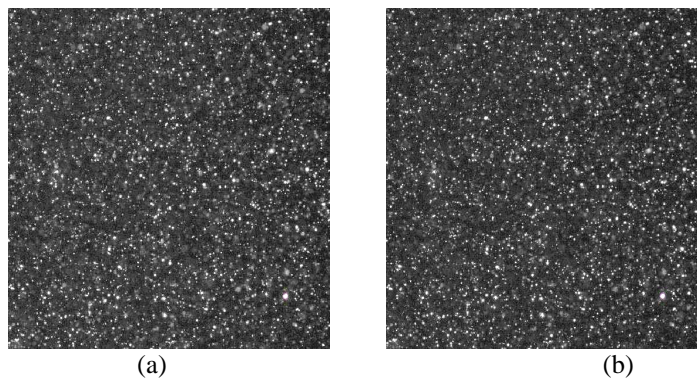


Figura 4 – Exemplo de par de imagens obtidas para utilização da técnica PIV (a) Instante  $t=t_0$ . (b) Instante  $t=t_0+\Delta t$  (Aniceto P.H. 2007).

A montagem típica de um sistema de Velocimetria por Imagem de Partícula consiste na utilização de subsistemas que trabalham de forma integrada e sincronizada, e são eles: o subsistema de iluminação (laser), o subsistema de aquisição de imagens (câmera CCD) e o subsistema de processamento e visualização de dados (computador).

### 3.2.

#### Fluorescência Induzida por Laser

A Fluorescência Induzida por Laser (do inglês Laser Induced Fluorescence, ou LIF) é uma técnica óptica não intrusiva utilizada em vários experimentos envolvendo visualização. Esta técnica baseia-se na propriedade de algumas moléculas orgânicas que quando excitadas

por determinados comprimentos de onda de luz, emitem luz em comprimentos de ondas distintos, conforme pode ser visto na figura 5.

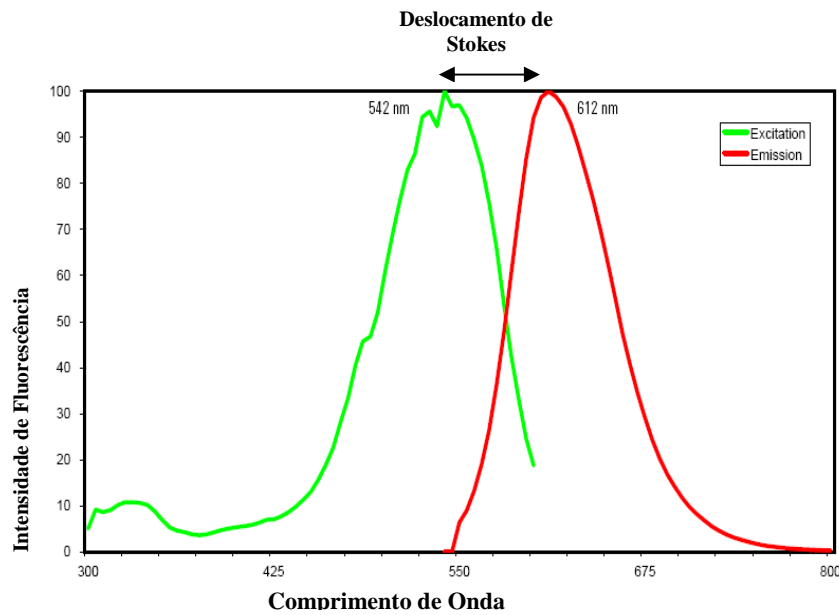


Figura 5– Espectro de absorção e fluorescência (Fonte: Thermo Scientific).

Para maximizar a intensidade da fluorescência capturada pela câmera é necessária a escolha de um filtro óptico que apresente uma curva de transmissividade adequada, de modo a bloquear a iluminação proveniente da excitação, permitindo a passagem somente da luz no comprimento da fluorescência. Portanto o conhecimento do comprimento de onda da excitação e emissão é importante para a especificação do filtro.

### 3.3.

#### Iluminação Pulsada de Fundo (PST)

A iluminação pulsada de fundo (do inglês, *Pulsed Shadow Technique* – PST) é uma técnica não intrusiva complementar que permite a determinação da forma da bolha, isto é, a interface gás-líquido. Consiste em utilizar uma iluminação de fundo uniforme para adquirir uma imagem com melhor contraste do contorno da bolha registrada com uma câmera CCD posicionada no lado oposto (Figura 6).

Um painel com LED's (*Light Emitting Diode*) de alta potência e baixo ângulo de emissão, emitindo no comprimento de onda do vermelho, foi utilizado como fonte luminosa.

Para garantir que a luz emitida fosse homogênea, foi usada uma placa difusora montada na frente do painel. A imagem gerada pelo painel de LED's apresentava na imagem preta e branca registrada pela câmera digital níveis de cinza intermediários, distintos dos níveis da luz espalhada pelas partículas traçadoras fluorescentes utilizadas na técnica de PIV, que geram elevados valores para os níveis de cinza. O painel de LED era operado em forma pulsada, garantindo assim que a imagem das partículas traçadoras iluminadas pelo laser do sistema PIV não ficassem distorcidas por conta do longo tempo de exposição da câmera.

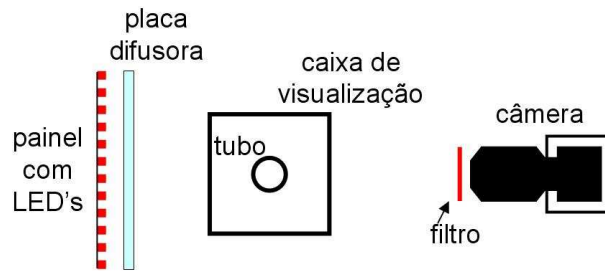


Figura 6 – Desenho esquemático da técnica *PST* (Aniceto P.H 2007).

#### 4. Montagem Experimental

Uma visão geral do experimento é apresentada na figura 7. Água e ar escoam separados, tendo as suas respectivas vazões medidas por rotâmetros e, depois se encontram em um misturador passando a escoar juntos numa tubulação de acrílico com diâmetro interno de 24 mm e 10 metros de comprimento. As setas indicadas em azul representam o caminho percorrido pelo ar, enquanto que as setas em verde representam o escoamento da água. Ao final da tubulação estava situado o sistema de aquisição de imagens que foi utilizado para as medições dos perfis de velocidade do escoamento através da técnica de PIV anteriormente explicada. Ao final da tubulação foi instalado um tanque, onde água e ar eram separados por gravidade e retornavam ao sistema multifásico individualmente, através de uma bomba e um compressor, respectivamente.

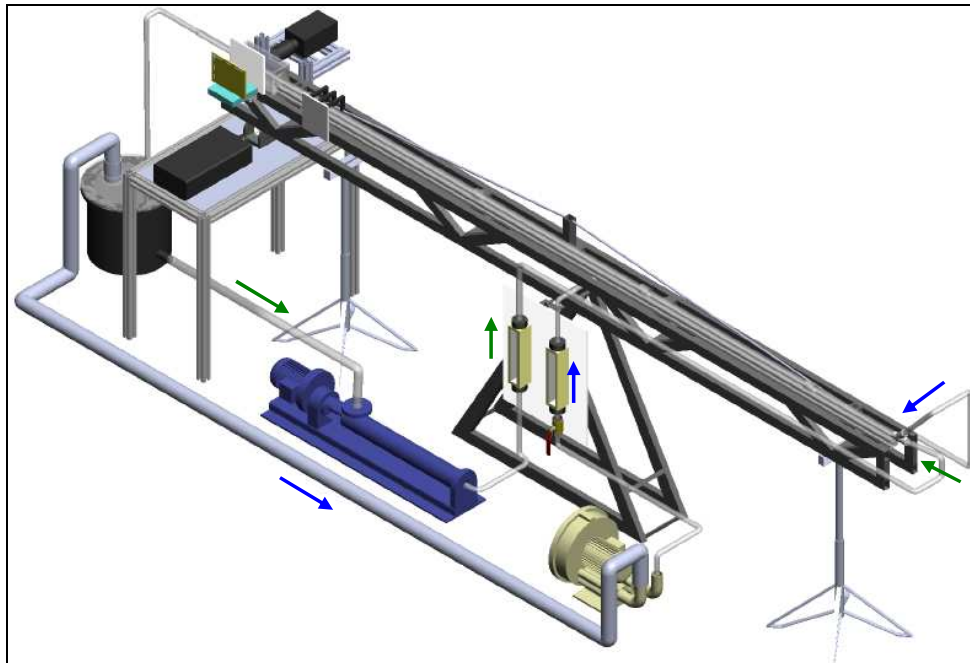


Figura 7 – Visão geral do aparato experimental

Os equipamentos utilizados para a medição pela técnica de PIV estão destacados na Figura 8.

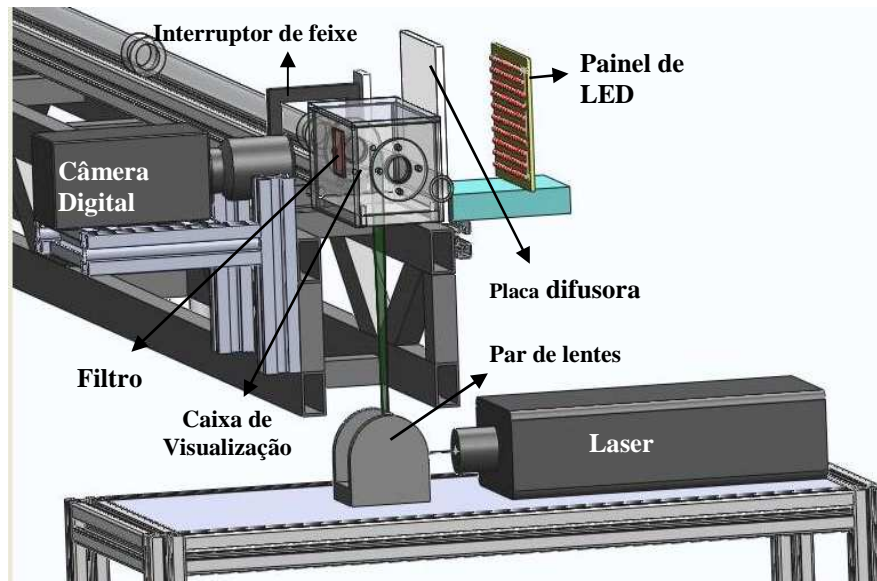


Figura 8 – Elementos constituintes da metodologia de medição do PIV.

A frequência máxima de aquisição de cada cavidade laser foi de 15 Hz. O laser de dupla cavidade permite um intervalo de tempo muito curto entre os disparos do laser, podendo ser alcançado intervalo de tempo da ordem de micro-segundos entre os disparos, o que é adequado para medir velocidades significativamente superiores aos níveis encontrados nos experimentos realizados. O laser foi operado a emitir luz verde a uma onda de 532nm. As imagens das partículas foram adquiridas por uma câmera digital PIVCAM 10/30 fabricado pela TSI. A câmera apresentava uma resolução 1000 x 1000 pixels. Conforme indicado na figura 8, a câmera foi montada ortogonalmente ao plano de luz laser. Foi utilizada uma lente com distância focal de 50 mm foi utilizado nos experimentos. O painel de LED's para iluminação de fundo exigida pela técnica de PST foi montado no lado oposto da câmera. Uma placa difusora foi posicionada na frente do painel LED para melhorar a uniformidade de iluminação de fundo. Um filtro óptico passa-alta também era necessário para a técnica LIF e foi fixado sobre a caixa de vidro retangular, no raio de visão da câmera. No presente estudo foram utilizadas partículas fluorescentes de 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro com comprimento de onda de excitação de 542nm e pico de fluorescência de emissão em 612nm. A densidade das partículas era de 1,05  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Um sensor foi instalado ao redor do tubo, a montante da caixa de vidro. Esta célula (não é mostrado na figura) funcionava com objetivo de acionar os sinais de medição. A célula gera um sinal alta tensão de saída quando gás passa através da célula, e um sinal de baixa tensão quando a água flui através dela. A transição de um grande sinal de baixa tensão é uma indicação da passagem de uma interface gás-líquido na posição do sensor. Foi montado um sistema para acionamento do laser a partir da detecção da interface gás-líquido, de forma que o sistema de medição da velocidade era acionado depois de um tempo pré-estabelecido. Ao controlar o tempo, era possível medir o campo de velocidade do líquido em uma posição pré-determinada em relação à bolha de gás.

## 5. Resultados

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os campos de velocidade na vizinhança da bolha.

### 5.1. Região do nariz da bolha

As figuras 9, 10 e 11 apresentam os resultados para os campos de velocidade instantâneos para escoamento horizontal na região a montante do nariz da bolha. Para facilitar a visualização da região da bolha, foi incluída na figura a imagem binarizada usada da bolha que foi utilizada como máscara durante o processamento na técnica PIV. Cada figura apresenta cerca de 7500 vetores velocidade coloridos por módulo da velocidade, referenciados à escala de cores na parte direita da figura. As cores situadas acima representam maiores velocidades.

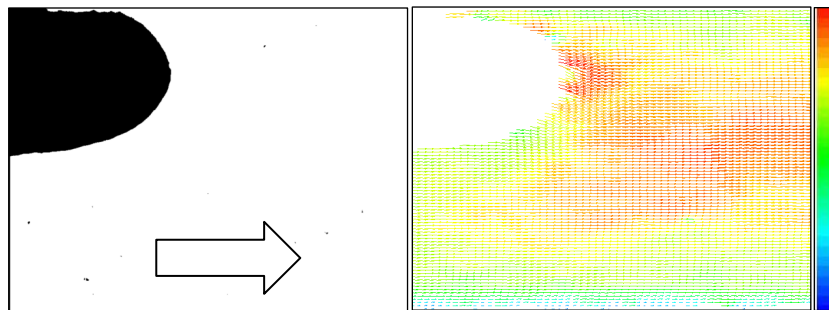


Figura 9 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região do nariz da bolha para escoamento horizontal.  $USL=0.3$  m/s e  $USG = 0.5$  m/s.

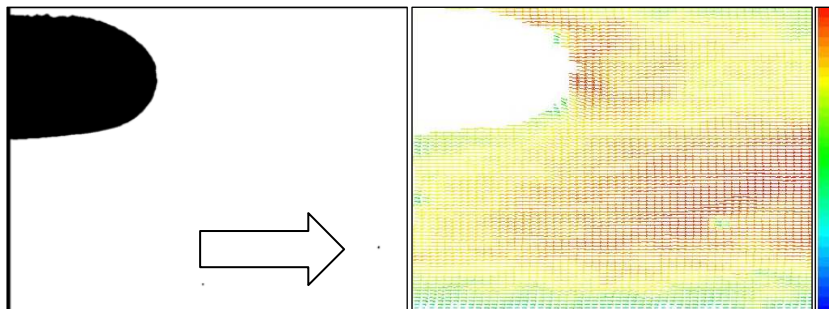


Figura 10 - Campo instantâneo de velocidade de líquido na região do nariz da bolha para escoamento horizontal.  $USL=0.4$  m/s e  $USG = 0.5$  m/s.

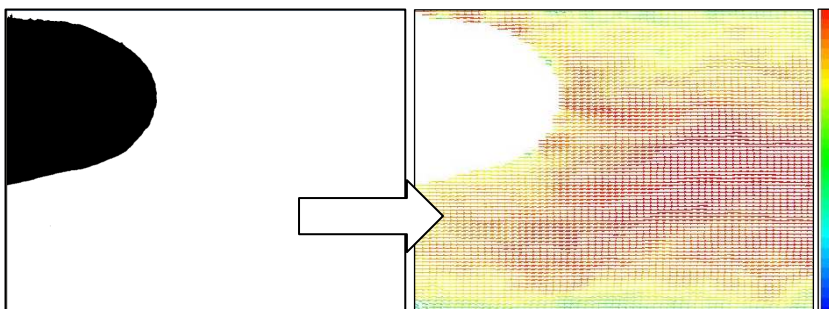


Figura 11 - Campo instantâneo de velocidade de líquido na região do nariz da bolha para escoamento horizontal.  $USL=0.5$  m/s e  $USG = 0.5$  m/s.

Uma análise global da Figura 9 mostra que a região do escoamento apresenta sempre escoamento movendo-se na direção positiva no referencial do laboratório, com uma zona de velocidade máxima (vetores vermelhos na figura) próxima ao ponto mais pronunciado do nariz da bolha e outra zona próxima à linha de centro do tubo, à frente da posição da bolha de gás. Uma observação conjunta das Figuras 9, 10 e 11 oferecem uma indicação da influência sobre o campo de escoamento e forma da bolha do aumento da velocidade superficial do líquido para uma velocidade superficial de gás constante e de baixo valor. Como pode ser observado, à medida que a velocidade de líquido aumenta a região de velocidade mais alta (região vermelha) tende a ocupar uma maior porção do tubo, indicando a formação de um escoamento com perfil de velocidade plano (*plug flow*).

## 5.2.

### Região da esteira da bolha

A seguir são apresentados os resultados de campos instantâneos de velocidade referentes à região da esteira da bolha. As Figuras 12 a 14 referem-se aos resultados para escoamento horizontal.

Os resultados para a menor velocidade superficial de gás investigada apresentados nas Figuras 12, 13 e 14 para a configuração horizontal mostram uma forma de cauda de bolha íntegra, apresentando uma fronteira bem definida e de forma alongada, como reportado por Fagundes-Netto (1999) para estes baixos valores do número de *Froude*.

Os campos de velocidade mostram uma região de velocidade elevada (região vermelha) junto à parede superior do tubo, a montante da cauda da bolha. Abaixo desta região e até a parede inferior do tubo, há regiões com magnitudes de velocidade significativamente menores.

A agitação promovida pela presença das bolhas na esteira produz impactos nos campos de velocidade instantâneos. A Figura 15 apresenta um campo de velocidade instantâneo, onde foi incluída uma vista ampliada da região do escoamento na esteira da bolha, junto à parede inferior do tubo. Pode-se notar a presença de escoamento recirculante e de inúmeros vórtices induzidos pela presença das bolhas dispersas.

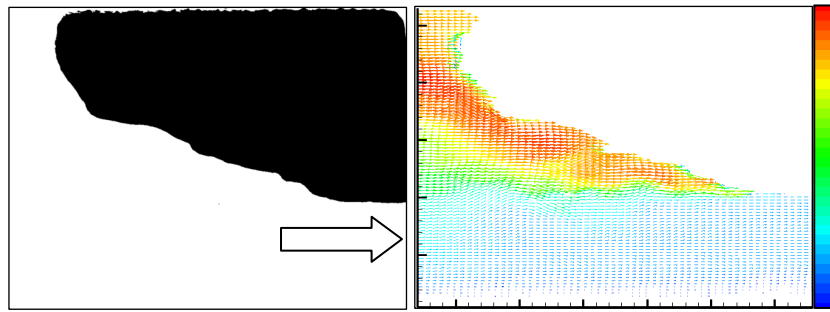


Figura 12 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha para escoamento horizontal.  $USL = 0.3 \text{ m/s}$  e  $USG = 0.5 \text{ m/s}$ .

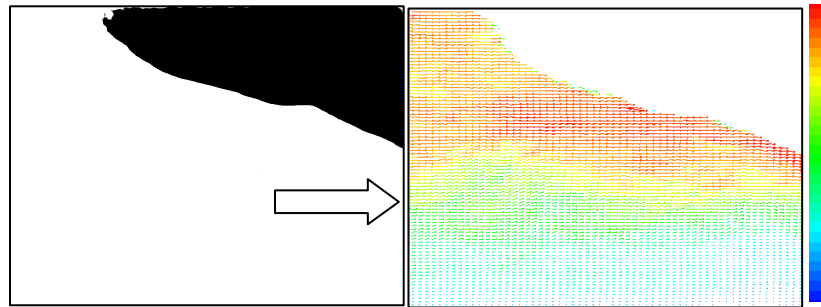


Figura 13 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha para escoamento horizontal.  $USL = 0.4 \text{ m/s}$  e  $USG = 0.5 \text{ m/s}$ .

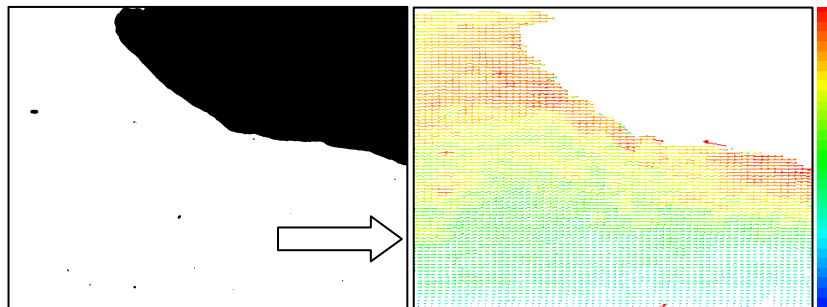


Figura 14 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha para escoamento horizontal.  $USL = 0.5 \text{ m/s}$  e  $USG = 0.5 \text{ m/s}$ .

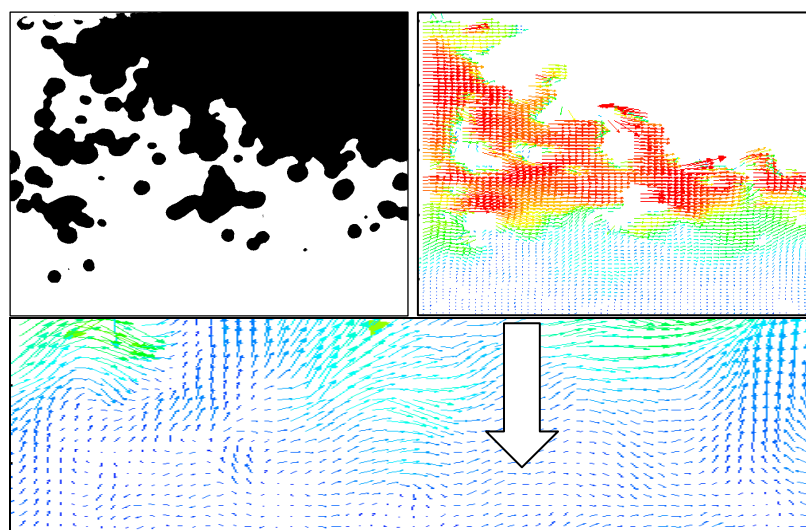


Figura 15 - Ampliação da região inferior do tubo mostrando zona de recirculação do escoamento.

## 6.

### Conclusões

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os campos de velocidade na vizinhança da bolha. No presente trabalho, o escoamento intermitente foi avaliado sob diversos aspectos, indo desde seu comportamento estatístico, avaliado com a utilização de interruptores de feixe, até a medição dos campos de velocidade, obtida por meio da utilização da técnica experimental de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV).

A partir da utilização da técnica de PIV, adaptada para escoamento multifásico, foi possível avaliar o comportamento do campo de velocidade na frente da bolha de gás e na sua cauda. Foi constatado que a bolha tende a apresentar seu nariz direcionado para o centro da tubulação conforme o aumenta da velocidade de mistura, enquanto que a cauda vai deixando de apresentar um perfil alongado.

## 7.

### Referências Bibliográficas

ANICETO, P. H; **Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência para Medição de Escoamento Bifásico em Regime de Golfada**. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

CARPINTERO-ROGERO, E.; KROESS, B.; SATTELMAYER, T. **Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurements of gas-liquid flows in a horizontal pipe**. 13<sup>th</sup> Int. Symp. on Applications of Laser techniques to Fluid Mechanics, 2006

GOMEZ, A. H. **Interaction hydrodynamique entre deux poches de gaz en tube**. Tese de Doutorado - Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.

KAWAJI, M. et al. **Study of liquid flow structure in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow**. ANS Proc. 30th ASME/AICHE/ANS/AIAA National Heat Transfer Conference, 5–9 August, Portland, Oregon, pp. 79–88, 1995.

KVERNOLD, O. et al. **Velocity Distribution in Horizontal Slug flow**. International Journal of Multiphase flow, vol.10, n°. 4, pp. 441-457, 1984.

MANDHANE, J.M.; GREGORY, G.A. and AZIZ, K. **Flow-pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes**, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 1, pp-537, 1974.

RAFFEL, M. et al **Particle Image Velocimetry – A Practical Guide**. Second Edition, ed. Springer, ISBN 978-3-540-72307-0, 2007.

SHARMA, S.; LEWIS, S.; KOJASOY G. **Local studies in horizontal gas-liquid slug flow**. Nuclear Engineering and Design, Vol. 184, pp. 305-318, 1998.