

# **EFEITO DO DISTRIBUIDOR DE GÁS DE UMA COLUNA DE BOLHAS NA VELOCIDADE 2D DA FASE LÍQUIDA POR *FLUORESCENT PIV***

A. D. BARBUTTI<sup>1</sup>, R. L. AMARAL<sup>2</sup>, G. J. CASTILHO<sup>1</sup> e M. MORI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química: Departamento de Engenharia de Processos, Av. Albert Einstein, 500 - CEP 13083-852 - Campinas - SP – Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química: Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos, Av. Albert Einstein, 500 - CEP 13083-852 - Campinas - SP – Brasil.

E-mail para contato: [rodrigo.amaral01@hotmail.com](mailto:rodrigo.amaral01@hotmail.com) / [guilhermejc@feq.unicamp.br](mailto:guilhermejc@feq.unicamp.br)

**RESUMO** – Colunas de bolhas são muito utilizadas em indústrias química permitindo o contato entre o gás e o líquido, por difusão dos componentes na interface. Contudo elas possuem uma complexa fluidodinâmica e sua modelagem e escala não estão bem desenvolvidos, surgindo a necessidade de estudar o comportamento hidrodinâmico para otimizar o projeto e prever parâmetros relacionados à transferência de calor e massa. O *Fluorescent PIV*, além de ser uma técnica não-intrusiva, tem a vantagem de permitir um melhor controle de gravação da luz emitida pelo traçador, sem a reflexão das bolhas ou objetos próximos à região investigada. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de dois distribuidores de gás (5 e 27 furos) de uma coluna de bolhas na velocidade 2D da fase líquida por *Fluorescent PIV*. Experimentos foram feitos usando uma coluna cilíndrica de acrílico com diâmetro interno de 145 mm e altura de 1 m. O sistema gás-líquido consiste de ar e água (25°C e 1 atm) com uma vazão de gás igual a 1 L/min. Foram analisados os campos de velocidade média, flutuação de velocidade e campo de vorticidade para os dois distribuidores.

## **1. INTRODUÇÃO**

As colunas de bolhas são usadas amplamente como reatores na indústria química, petroquímica e bioquímica (Degaleesan *et. al*, 2001). Conhecer o comportamento hidrodinâmico de uma coluna de bolhas (*holdup*, perfil de velocidade, etc) é um fator importante para predizer tanto os parâmetros do projeto como aqueles referentes às taxas de reação química, transferência de massa e transferência de calor. O distribuidor de gás é um parâmetro importante que pode interferir na concentração e no tamanho da bolha alterando as características do escoamento dentro da coluna (Kantarci *et. al*, 2005). A *Fluorescent PIV*, técnica similar a velocimetria por imagem de partícula (PIV) que usa partículas fluorescentes como traçadores, tem sido bastante utilizada na investigação de estruturas de escoamento em colunas de bolhas. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de dois distribuidores de gás (5 e 27 furos) de uma coluna de bolhas na velocidade da fase líquida por *Fluorescent PIV*.

## 2. EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais para a análise do efeito do distribuidor na velocidade do fluido foram feitos em uma coluna de acrílico com 14,5 cm de diâmetro e 1 m de altura. A Figura 1 apresenta o esquema da coluna e do sistema PIV utilizado. A seção investigada tem um tamanho igual a 14,5 x 10 cm e esta localizada a 55,2 cm do distribuidor (Figura 1.a e Figura 1.b). O sistema gás-líquido consiste de ar e água (25°C e 1 atm) com uma vazão de gás igual a 1 L/min. Foram utilizados dois distribuidores, um com 5 furos (experimento 1) e outro com 21 furos (experimento 2). Os furos possuem 1 mm de diâmetro e estão igualmente distribuídos na área da seção transversal da coluna em um arranjo quadrado. O espaço imediatamente anterior ao distribuidor foi preenchido com esferas de vidro, com diâmetro médio de 2 mm, para promover uma melhor distribuição do gás inserido no escoamento.

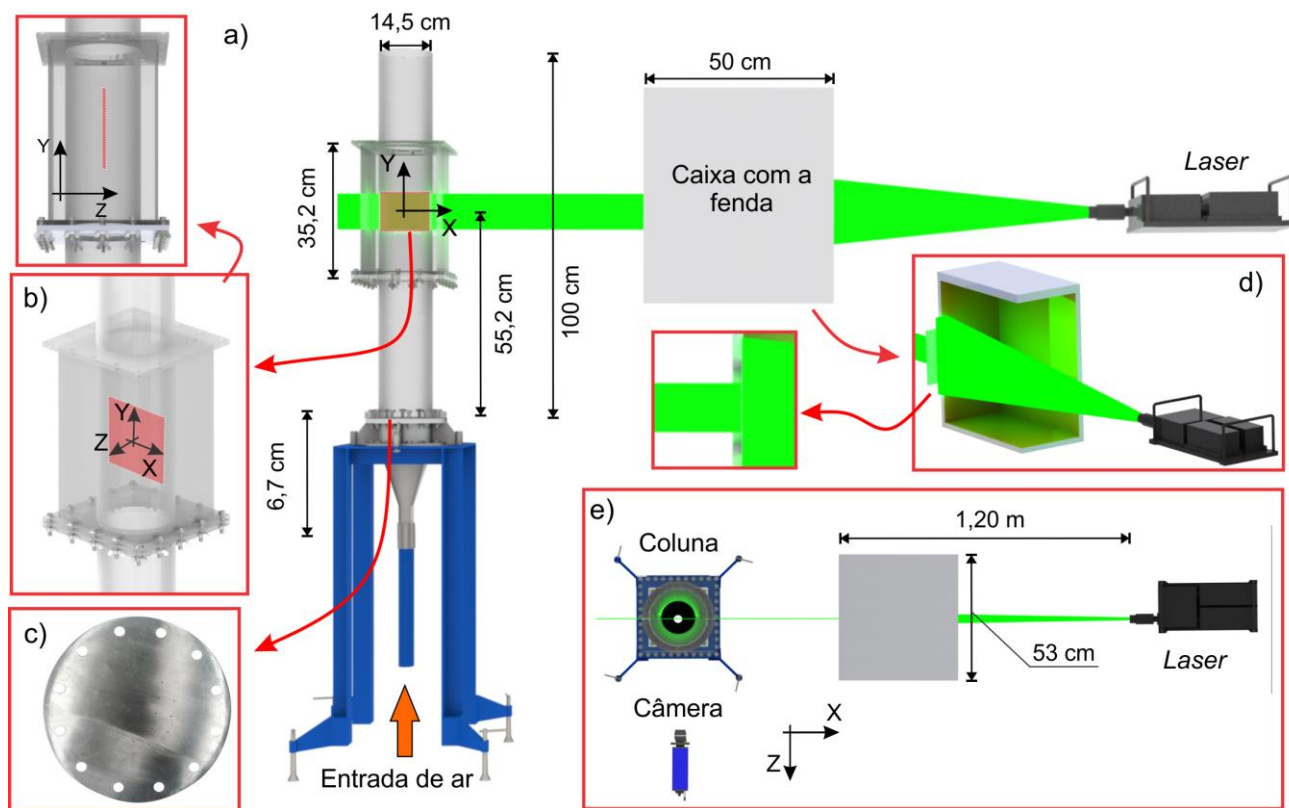


Figura 1 - (a) Coluna, sistema *laser* e a caixa com a fenda. (b) Área de investigação. (c) Distribuidor da fase gasosa. (d) Detalhe da caixa com a fenda. (e) Arranjo do sistema PIV na coluna.

O sistema PIV utilizado foi desenvolvido pela LaVision e possui um sensor CCD (1376 x 1040 *pixels*) e um sistema *laser* Nd:YAG (200 mJ/pulso). As câmeras e o *laser* foram controlados com uma unidade de tempo programável (PTU) pelo *software* DaVis 7.2. A frequência de gravação foi de 4,92

Hz. Foi utilizada uma lente objetiva da Nikon com distância focal de 60 mm (F/2.8D). O sistema *laser* dispunha de duas lentes com distância focal de -10 e -20 para expandir o feixe de luz *laser* e uma caixa com a fenda de 1 mm de espessura (Figura 1.d), localizada a 1,20 m do *laser* (Figura 1.e). O objetivo da caixa com a fenda é o de formar um plano de luz *laser* com espessura definida de 1 mm e com um perfil de intensidade homogêneo (*Top-Hat*). Além disso, o uso da caixa com a fenda facilita o alinhamento da folha de luz *laser* com o plano calibrado. A câmera CCD foi posicionada a 90° do plano de luz *laser* (Figura 1.e).

Para diminuir o efeito das distorções ocorridas pela curvatura da coluna cilíndrica, foi utilizada uma caixa de acrílico preenchida com água a 25 °C que envolve a coluna na região investigada. Além disso, foi feito também um procedimento de calibração. O erro de calibração foi de 0,587 e 0,662 *pixel* para o experimento 1 e 2, respectivamente, utilizando uma função polinomial de 3º grau como função de mapeamento. A resolução do sistema de imagem para os dois experimentos é de 24 *pixels*/mm. A partícula traçadora utilizada foi a Rodamina B (diâmetro da partícula  $dp = 20 - 50 \mu\text{m}$ ), conciliada a um filtro passa-alta, na câmera, que só permite a passagem da luz emitida por esta partícula ( $\lambda = 620 \text{ nm}$ ). O diâmetro de imagem de partícula no *frame* gravado é de 2 - 3 *pixels*. O tempo *inter-frame* foi de 1000  $\mu\text{s}$  produzindo um deslocamento máximo de imagem de partícula de 15 - 20 *pixels*. Depois da gravação das imagens, foi feito o pré-processamento e a correlação cruzada para determinação da distribuição da velocidade do líquido. A **Error! Reference source not found.** apresenta os principais parâmetros utilizados do sistema PIV nos experimentos 1 e 2.

**Tabela 1.** Principais parâmetros utilizados do sistema PIV

Tempo entre os frames (dt)	1000 $\mu\text{s}$
Deslocamento máximo da imagem de partícula	15 – 20 <i>pixels</i>
Frequência de gravação	4,92 Hz
Tamanho do <i>pixel</i>	6,45 $\mu\text{m}$
Diâmetro da partícula traçadora (Rodamina B)	20 - 50 $\mu\text{m}$
Potência do laser	35 %
Espessura da folha de luz	1 mm
Abertura da lente (f#)	2.8
Diâmetro da imagem de partícula	2- 3 <i>pixels</i>
Resolução do sistema de imagem (Experimento 1 e 2)	24 <i>pixels</i> /mm
Tamanho da área investigada	14,5 x 10 cm
Erro da calibração (Experimento 1 e 2)	0,587 e 0,662 <i>pixel</i>

Na correlação cruzada, foi utilizada uma estratégia de interrogação com dois passos, sendo o primeiro com um tamanho de 128 *pixels* (sobreposição de 50 % das janelas adjacentes) e o segundo com 64 *pixels* (sobreposição de 75 % das janelas adjacentes) produzindo uma média de 5000 vetores válidos (95% do total). No pós-processamento, utilizou-se o teste da mediana (Westerweel e Scarano, 2005) para remover os vetores falsos do campo vetorial. Segundo o autor, um limite de remoção igual a 2 é apropriado na detecção de vetores falsos em uma vizinhança de 3 x 3 *pixels*.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo da velocidade média, foi analisado o perfil de  $V_y$  e  $V_x$  médio variando o tempo de gravação (Figura 2). Essa análise tem como objetivo principal obter os valores estacionários da velocidade e diminuir o tempo computacional no processamento da imagem PIV. Percebe-se que existe pouca diferença entre o perfil de  $V_y$  e  $V_x$  médio para um tempo superior a 6,7 min de gravação (um tempo de 8,4 min equivale a 2500 imagens processadas em aproximadamente 5 horas). Observa-se também que, por apresentar uma menor escala, as oscilações de  $V_x$  são maiores que as de  $V_y$ .

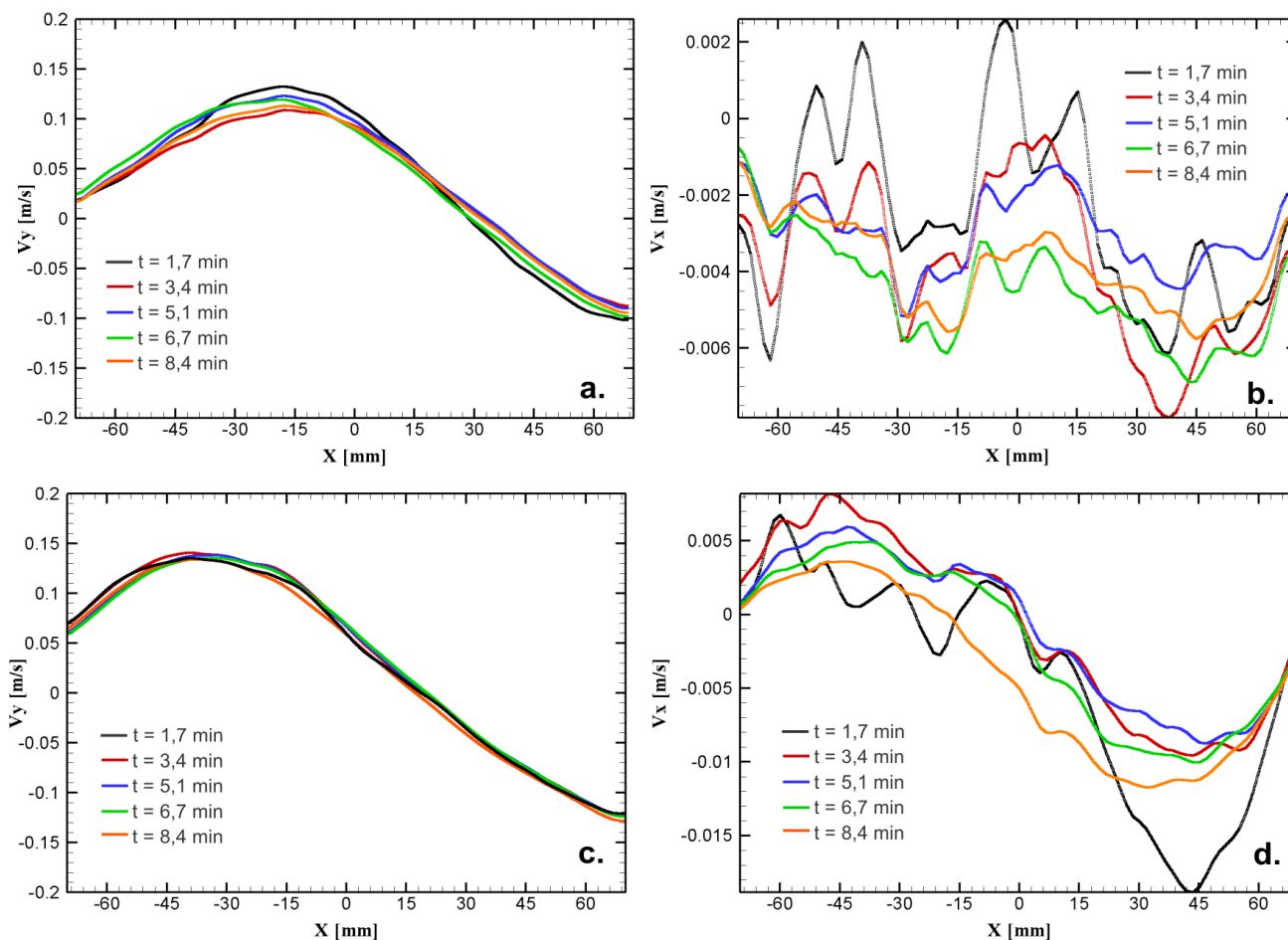


Figura 2 - Cálculo de  $V_y$  e  $V_x$  média do líquido em função do tempo de gravação a  $Y = 55,2$  cm do distribuidor de 5 furos (a-b) e de 21 furos (c-d).

Alguns trabalhos têm mostrado que o escoamento dentro de coluna de bolhas é caracterizado por flutuações com um amplo espectro de frequência. O estudo das flutuações de baixa frequência exige um tempo de aquisição de dados (gravação das imagens) relativamente alto com o objetivo de alcançar o estado estacionário (Broder e Sommerfeld, 2002). O sistema PIV utilizado nesse trabalho é limitado pela frequência máxima do *laser* (4,92 Hz). O estudo das

flutuações de velocidade de alta frequência exige o uso de sistemas PIV resolvidos no tempo (*Time-Resolved PIV*) com frequências na ordem de kHz. A Figura 3 apresenta a série temporal da componente Y da velocidade do líquido, obtido pela partícula traçadora, para os dois distribuidores em  $X = -50, 0$  e  $50$  mm. Na Figura 3a e 3b, observa-se um fluxo ascendente em  $X = -50$  mm e descendente em  $X = 50$  mm.

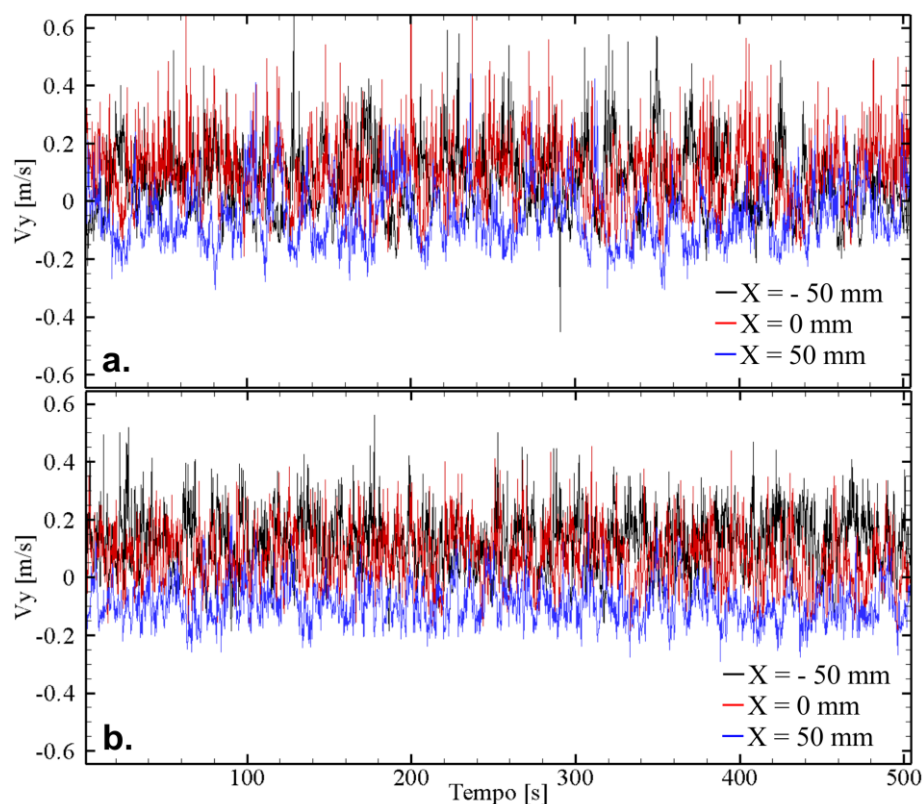


Figura 3 - Série temporal de  $V_y$  do líquido em  $X = -50, 0$  e  $50$  mm e  $Y = 55,2$  cm para o distribuidor com (a) 5 e (b) 21 furos.

A Figura 4 apresenta uma distribuição assimétrica do módulo da velocidade média do líquido,  $V = (V_x^2 + V_y^2)^{0.5}$ , para o distribuidor com 5 e 21 furos e para uma vazão de 1 L/min. Esse comportamento, não ideal, também foi observado por Broder e Sommerfeld (2002) e por Sommerfeld e Broder (2009) que atribuíram a natureza altamente instável do escoamento em coluna de bolhas como possível causa da não simetria. O distribuidor mal projetado também pode ser a causa da não simetria do perfil de velocidade.

É importante destacar que para o cálculo do módulo da velocidade ( $V$ ) nesse trabalho não foi considerada a componente de velocidade  $V_z$ . O uso de técnicas PIV 2D-3C (2 dimensões – 3 componentes) ou 3D, além de fornecer o  $V_z$ , diminuiria o erro de projeção e a perda de pares de imagens de partícula causada pelo movimento da partícula para fora do plano de luz *laser*.



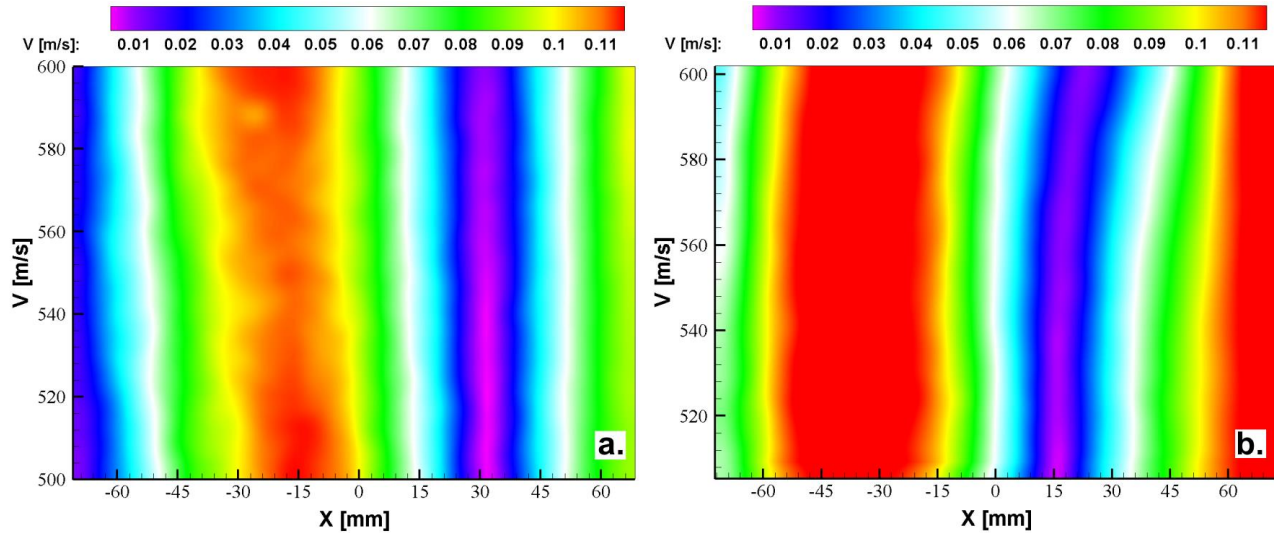


Figura 4 - Distribuição do módulo da velocidade média do líquido,  $V = (V_x^2 + V_y^2)^{0.5}$ , para o distribuidor com (a) 5 furos e (b) 21 furos para uma vazão de 1L/min.

A Figura 5 apresenta  $V_y$  e  $V_x$  média e RMS (*roots mean square*) do líquido para os dois distribuidores. O perfil de  $V_y$  mostra um fluxo máximo ascendente próximo à parede esquerda da coluna ( $-45 \text{ mm} < X < 15 \text{ mm}$ ) e um máximo descendente próximo à parede direita ( $15 \text{ mm} < X < 70 \text{ mm}$ ) para o distribuidor com 5 furos. O mesmo comportamento é encontrado para o distribuidor com 21 furos em  $-60 \text{ mm} < X < -15 \text{ mm}$  e  $45 \text{ mm} < X < 70 \text{ mm}$ , respectivamente. Esse comportamento também pode ser visto na série temporal de  $V_y$  (Figura 3) em  $X = -50, 0$  e  $50 \text{ mm}$ . Percebe-se também que o perfil de  $V_y$  do distribuidor de 21 furos é mais assimétrico do que o de 5 furos.

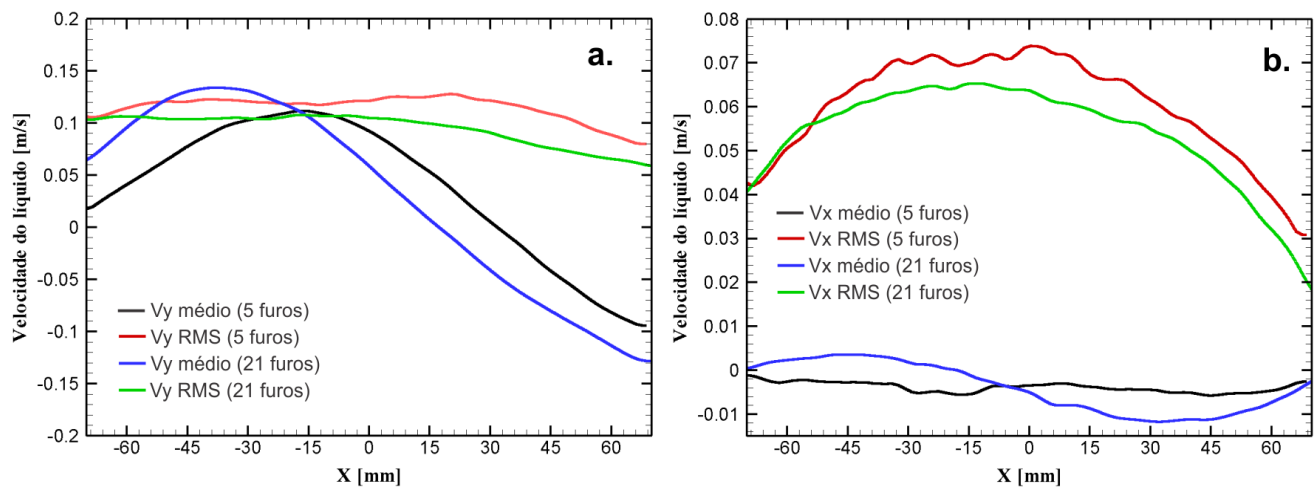


Figura 5 - (a)  $V_y$  e (b)  $V_x$  média e RMS (*roots mean square*) para o distribuidor com 5 e 21 furos.

Para os dois distribuidores, a componente X e Y de  $V$  média e RMS são diferentes. Esse comportamento pode ser explicado pela região de arraste criada no escoamento ascendente das bolhas (Figura 6a) resultando em um  $V_y$  maior que  $V_x$ . É possível indentificar a passagem de uma bolha pelo par de vórtices da região de arraste no campo de vorticidade instantâneo (Figura 6b). É observada também uma diferença nas estruturas de recirculação da seção investigada para os dois distribuidores (Figura 7) no campo de vorticidade médio.

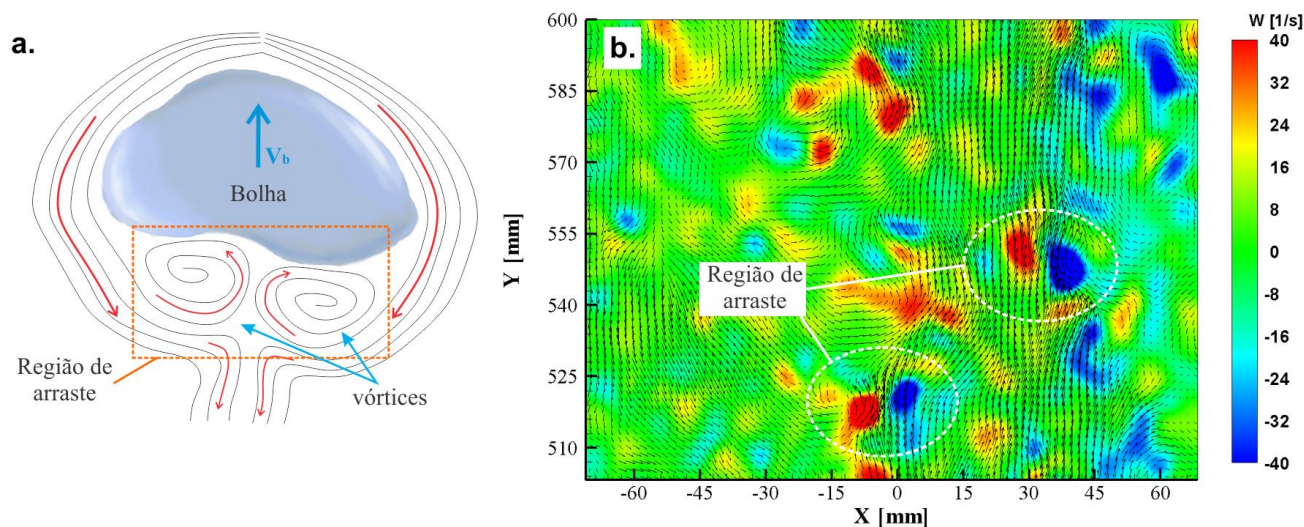


Figura 6 – (a) Esquema do escoamento ascendente de uma bolha destacando a região de arraste.  
(b) Campo de vorticidade instantâneo ( $W$ ) para o distribuidor com 5 furos

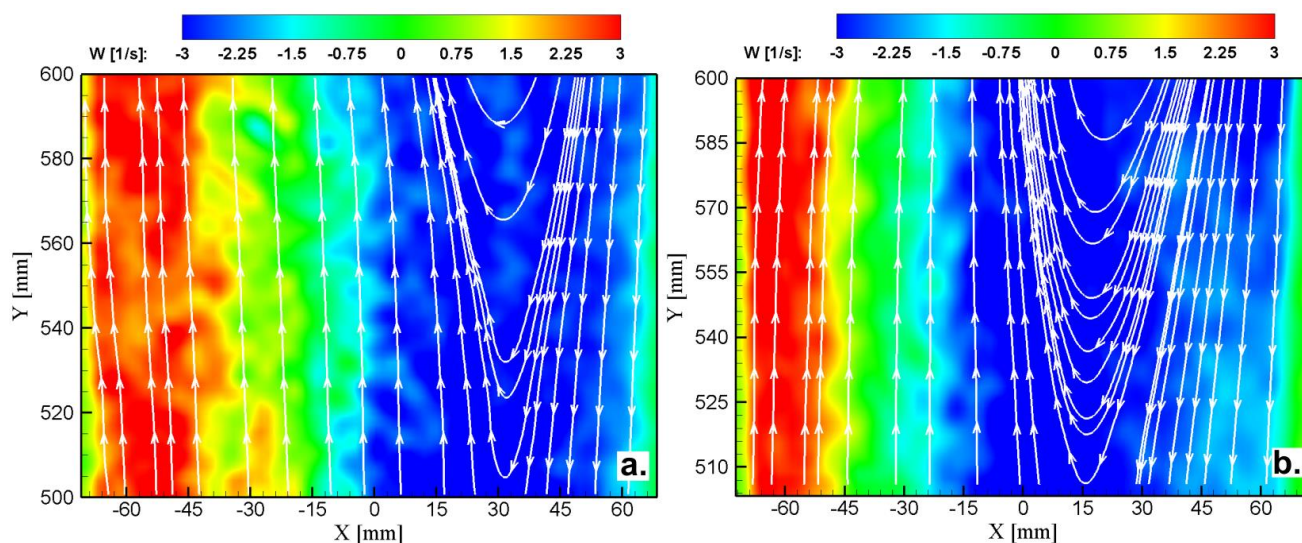


Figura 7 – Campo de vorticidade médio para o distribuidor com (a) 5 e (b) 21 furos.

Os diferentes perfis de velocidade e estruturas de escoamento para os dois distribuidores podem ser explicados pela concentração (*hold-up*) desigual das bolhas na coluna. Os

distribuidores também podem ter um efeito considerável no tamanho das bolhas e consequentemente na velocidade do líquido (região de arraste). Na Figura 5, as  $V_{RMS}$ 's podem ser relacionadas com as velocidades das bolhas, que é maior que a velocidade do líquido.

## 4. CONCLUSÃO

Esse trabalho avaliou o efeito de dois distribuidores de gás (5 e 27 furos) de uma coluna de bolhas na velocidade da fase líquida por *Fluorescent PIV*. Foram observados perfis de velocidade assimétricos (não ideal) na coluna para os dois distribuidores com uma flutuação de velocidade ( $V_{RMS}$ ) maior para o distribuidor com 5 furos. Foi observada também uma diferença nas estruturas de recirculação da seção investigada para os dois distribuidores (Figura 7) analisando o campo de vorticidade médio. As estruturas de escoamento variam consideravelmente com o número de furos do distribuidor.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Petróleo Brasileiro S. A. – PETROBRÁS, termo de compromisso 0050.0070828.11.9, que garantiu o desenvolvimento deste trabalho, à FAPESP (Processo 2013/11457-1) e à CAPES.

## 6. REFERÊNCIAS

- Broder, D.; Sommerfeld, M. An advanced LIF-PLV system for analysing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fraction. *Experiments in Fluids*. v. 33, p 826. 2002.
- Degaleesan S, Dudukovic M, Pan Y. Experimental study of gas induced liquid-flow structures in bubble columns. *AIChE J.* v. 47, pp. 1913–31. 2001
- Kantarci, N; Borak, F; Ulgen, O. K. Bubble column reactors (Review). *Process Biochemistry*. Vol. 40 pp 2263–2283. 2005
- Sommerfeld, M.; Broder, D. Analysis of Hydrodynamics and Microstructure in a Bubble Column by Planar Shadow Image Velocimetry. *Experiments in Fluids*. v. 48, pp 330-340. 2009.
- Westerweel, J.; Scarano, F. Universal outlier detection for PIV data. *Experiments in Fluids*, v. 39, n. 6, p. 1096-1100, 2005.