

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO EM COLUNA DE BOLHAS UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA

Renato Soccol Junior, renatosoccol@yahoo.com.br

Ana Carolina Galliani Pische, carolinagalliani@gmail.com

FURB-Universidade Regional de Blumenau, Rua São Paulo 3250

Dirceu Noriler, noriler@furb.br

FURB-Universidade Regional de Blumenau, Rua São Paulo 3250

Henry França Meier, meier@furb.br

FURB-Universidade Regional de Blumenau, Rua São Paulo 3250

Milton Mori, mori@feq.unicamp.br

UNICAMP-Universidade Estadual de Campinas, Av. Alberto Einstein 500

Resumo. Colunas de bolhas são empregadas em várias etapas da cadeia produtiva onde é necessário o contato entre as fases gás e líquido. A principal característica das colunas de bolhas é o baixo custo de operação e manutenção. Um estudo experimental em uma coluna de bolhas foi realizado através da técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) para determinar os campos de velocidade da fase líquida, os momentos de segunda ordem, intensidade turbulenta e energia cinética turbulenta (k). A técnica de Imagens por contraste foi utilizada para determinar o diâmetro médio das bolhas. Associado ao estudo de experimentação física foi realizado um estudo de experimentação numérica utilizando o CFX-12. Ainda tem-se como objetivo a validação do modelo apresentado para posterior utilização em casos generalizados. Foi avaliado o efeito da vazão da fase gás sobre o perfil médio de velocidade axial da fase líquida e energia cinética turbulenta e para as condições de 1,5 e 3,0 l min⁻¹. De forma que os resultados numéricos obtidos apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

1. INTRODUÇÃO

Colunas de bolhas são equipamentos que propiciam o contato contínuo entre uma fase líquida e uma fase gás dispersa, com o intuito de promover altas taxas de transferência de calor e massa entre as fases. São equipamentos de baixo custo operacional, de fácil construção e são encontrados em diversos processos na indústria de petróleo, química, farmacêutica, biotecnológica, eletrônica e de alimentos (Kantarci *et al.*, 2005).

Na sua forma mais simples, uma coluna de bolhas é um cilindro vertical, onde o gás entra pela base da coluna através de um distribuidor, que pode variar de configuração dependendo da aplicação. O líquido pode estar estacionário ou então mover-se concorrente ou contracorrente ao escoamento de gás (Deckwer, 1985). O comportamento hidrodinâmico das colunas de bolhas é altamente dependente dos regimes de escoamento, que são classificados e mantidos de acordo com a velocidade superficial da fase gasosa aplicada à coluna.

Em geral, o projeto de uma coluna de bolhas depende de uma série de fatores, onde os mais importantes são as taxas de transferências de calor e massa, as características de mistura e a cinética química, sendo que os dois primeiros são fortemente dependentes da fluidodinâmica local (Degaleesan *et al.*, 2001).

Apesar de ser um equipamento de simples concepção, existe uma grande dificuldade em seu estudo fluidodinâmico pela complexidade dos padrões de escoamento, como por exemplo, altas zonas de recirculação de líquido e a flutuabilidade das plumas de bolhas devido aos fenômenos turbulentos da fase líquida. Devido a este fato, enormes esforços experimentais são despendidos com o objetivo de obter informações sobre a dinâmica das colunas de bolhas para posterior dimensionamento e otimização desses tipos de equipamentos (Kantarci *et al.*, 2005).

A respeito disso, Fluidodinâmica Computacional (CFD), se torna uma ferramenta essencial para essa finalidade, apresentando algumas vantagens sobre a experimentação física ao fornecer respostas mais rápidas, baratas e com um nível de observação muito mais apurado. Como desvantagens, existem algumas incertezas em relação ao comportamento da fase líquida, ocasionadas pela passagem das bolhas e as relações de interação entre as fases tratadas empiricamente (Sokolichin *et al.*, 2004).

Deste modo, este trabalho tem por objetivo desenvolver um estudo experimental em uma coluna de bolhas por meio da técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV), para predição dos perfis de velocidade média, momentos de segunda ordem, intensidade turbulenta e a energia cinética turbulenta (k) para fase líquida, assim como determinar os diâmetros das bolhas através da técnica de Imagem por contraste. Somado a isso foi realizado um estudo numérico utilizando um modelo de CFD com características tridimensionais, transiente e turbulenta para possibilitar comparação com os dados experimentais objetivando a validação do modelo numérico para posteriores estudos em casos generalizados desse tipo.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para determinação das características fenomenológicas do escoamento gás-líquido, as equações fundamentais da conservação da massa e quantidade de movimento são resolvidas para um sistema tridimensional, turbulento, sob uma abordagem Euleriana-Euleriana.

É necessário adotar a hipótese do contínuo; da interpenetrabilidade entre as fases; diâmetro médio; fase dispersa laminar; transferência de quantidade de movimento entre fases representada somente pela força de arraste, negligenciando a transferência de calor e massa. Desta forma, para um sistema bifásico gás-líquido as equações médias temporais são escritas como:

$$\frac{\partial(f_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0 ; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(f_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_l \rho_l \mathbf{v}_l) = 0 ; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(f_g \rho_g \mathbf{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -f_g \nabla \cdot (\mathbf{T}_g) + f_g \rho_g \mathbf{g} + \mathbf{F}_{g-l} - f_g \nabla \cdot p_g ; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(f_l \rho_l \mathbf{v}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_l \rho_l \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l) = -f_l \nabla \cdot (\mathbf{T}_l^{ef}) + f_l \rho_l \mathbf{g} + \mathbf{F}_{l-g} - f_l \nabla \cdot p_l , \quad (4)$$

onde \mathbf{v} representa o vetor velocidade, ρ é a massa específica, \mathbf{g} é aceleração gravitacional, f é a fração volumétrica da fase, \mathbf{T} representa o tensor tensão, \mathbf{T}^{ef} é o tensor tensão efetivo, \mathbf{F} representa as forças interfaciais e p é pressão. Os subscritos g e l representam a fase gás e a fase líquida respectivamente.

Equações de restrição devem ser adicionadas ao modelo e referem-se à restrição do volume e pressão respectivamente:

$$\sum_{k=1}^{n_f} f_k = 1 , \quad p_k = p \quad \text{para todo } k = 1, \dots, n_f . \quad (5)$$

Ao assumir-se a hipótese de Boussinesq, a qual aproxima o tensor turbulento ao modelo de viscosidade de Newton, o tensor tensão e o tensor tensão efetivo podem ser escritos da seguinte forma:

$$\mathbf{T}_g = -\mu_g (\nabla \mathbf{v}_g + (\nabla \mathbf{v}_g)^T) \quad \text{e} \quad \mathbf{T}_l^{ef} = -\mu^{ef} (\nabla \mathbf{v}_l + (\nabla \mathbf{v}_l)^T) , \quad (6)$$

sendo

$$\mu^{ef} = \mu_l + \mu^{(t)} , \quad (7)$$

onde $\mu^{(t)}$ representa a viscosidade turbulenta e o sobrescrito T representa o transposto.

O modelo $k-\epsilon$ foi utilizado para determinar a viscosidade turbulenta. Para o modelo $k-\epsilon$, a $\mu^{(t)}$ relaciona-se com k e ϵ por meio das expressões

$$\mu^{(t)} = C_\mu \rho_l \left(\frac{k_l^2}{\epsilon_l} \right) , \quad (8)$$

$$\frac{\partial(f_l \rho_l k_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_l \rho_l k_l \mathbf{v}_l) = f_l \nabla \cdot \left(\frac{\mu^{ef}}{\sigma^k} \nabla k_l \right) + f_l (G_l - \rho_l \epsilon_l) , \quad \text{e} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(f_1 \rho_1 \varepsilon_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_1 \rho_1 \varepsilon_1 \mathbf{v}_1) = f_g \nabla \cdot \left(\frac{\mu^{\text{eff}}}{\sigma^\varepsilon} \nabla \varepsilon_1 \right) + f_1 (C_1 G_1 - C_2 \rho_1 \varepsilon_1) \frac{\varepsilon_1}{k_1}, \quad (10)$$

onde k representa a energia cinética turbulenta, ε a dissipação de energia cinética, C_μ , σ^k , σ^ε , C_1 e C_2 as constantes com valor de 0,09, 1, 1,30, 1,44 e 1,92 respectivamente (Sokolichin e Eigenberger, 2004) e G_1 por

$$G_1 = -T_{1(t)} : \nabla \mathbf{v}_1. \quad (11)$$

Diversas forças interfaciais são propostas para o termo de transferência de quantidade de movimento entre fases, das quais pode-se mencionar a força de arraste, massa virtual, ascensão (“lift”), lubrificação e dispersão turbulenta.

Há questionamentos físicos sobre a existência de todos esses fenômenos atuando sobre uma fase dispersa, sendo que a força de arraste, F_{l-g}^D , possui maior influência dentre as apresentadas. Boutet *et al.* (2009) afirma que a força de arraste tem magnitude numérica 100 vezes maior do que as demais e ainda tem validade física comprovada (Sokolichin *et al.*, 2004). Devido a isso, apenas a força de arraste será levada em consideração e modelada pela seguinte expressão:

$$F_{l-g}^D = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_b} f_g \rho_1 |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_g| (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_g), \quad (12)$$

onde d_b é o diâmetro médio das bolhas e C_D o coeficiente de arraste, sendo este último tratado empiricamente pela correlação apresentada por Ishii e Zuber (1976), dada pelas seguintes relações:

$$C_D = \max \left[\min \left(\frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}), 0.44 \right), \min \left(\frac{2}{3} E_O^{0.5}, \frac{8}{3} \right) \right], \quad (13)$$

$$E_O = \frac{g(\rho_l - \rho_g) d_b^2}{\sigma_{l-g}} \quad \text{e} \quad \text{Re} = \frac{\rho_g |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_g| d_b}{\mu_g}, \quad (14)$$

onde σ_{l-g} representa a tensão superficial.

3. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS DE MEDIDAS

3.1 Aparato experimental

O aparato experimental consiste de uma coluna de bolhas de bancada feita em acrílico com diâmetro interno de 145 mm e altura de 1000 mm. Neste trabalho a coluna contou com um distribuidor de líquido com apenas um furo de 1 mm de diâmetro localizado ao centro da base de coluna. Medidor de vazão tipo micro turbina com capacidade de 0 a 10 l min^{-1} é usado para medir a vazão de gás. Na região de coleta de dados é adaptada uma caixa em acrílico envolvendo a coluna, a qual é preenchida com água para compensação da difração do acrílico, evitando qualquer distorção das imagens. A Figura 1 apresenta um esquema da bancada experimental de coluna de bolhas, onde: (1) coluna de bolhas, (2) caixa acrílica, (3) entrada de ar comprimido, (4) medidor de vazão, (5) distribuidor de gás, (6) câmera CCD, (7) laser e (8) computador.

Água e ar a temperatura ambiente foram utilizadas como fase líquida e gás respectivamente, sendo a fase líquida estática na coluna, ocupando 800 mm de altura, e a fase gás coletada do meio ambiente por um compressor de parafuso modelo GX2 P CSA/UL da Atlas Copco.

O equipamento da técnica de PIV é composto por duas fontes de alta potências Big Sky Ultra PIV 50 da Quantel com potência de 50 mJ e um sistema ótico com duas cabeças modelo Nd:YAG Dual Cavity pulsed laser também da Quantel com ajuste da luz para 532 nm, uma câmera CCD modelo Imager Intense cross-correlation da Lavision que conta com uma objetiva Nikon Micro Mikkor 60 mm focal length, F/2.8, F-mount e uma sincronizadora PTU-9 Internal, 10 ns de tempo de resolução produzida pela La Vision. O sistema esta todo acoplado a um computador de alto desempenho e é controlado pelo Software DAVIS 7 da La Vision. Para a técnica de Imagem por contraste, a fonte de luz é o mesmo laser Nd:YAG utilizado pelo PIV, acoplado a um sistema de filtro e um difusor de luz que condiciona um contraste adequado entre os fundo e as partículas.

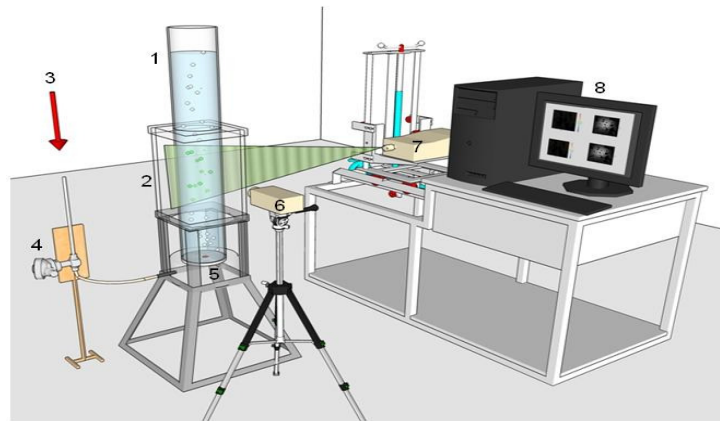


Figura 1: Esquema da bancada de coluna de bolhas.

3.1 Metodologia e calibração

A velocimetria por imagem de partícula (PIV) é uma técnica não intrusiva de medição de campos de velocidades instantâneas. Pelas características da técnica, partículas traçadoras são necessárias para determinação dos campos de velocidades. Essas partículas precisam ser iluminadas num plano do escoamento por pelo menos duas vezes dentro de um curto intervalo de tempo. Desta forma o deslocamento das partículas entre as duas imagens é então determinado (Raffel *et al.*, 1999). Segundo Prasad (2000), as partículas traçadoras devem satisfazer dois requisitos, (1) elas devem ser capazes de seguir as linhas de corrente do escoamento sem deslizamento excessivo e (2) elas devem funcionar como eficientes refletoras da iluminação da luz proveniente do laser.

Neste trabalho, como traçadores utilizou-se esferas uniformes fluorescentes de resina carboxi-acrilato modificada, com diâmetro médio de $15 \mu\text{m}$ e massa específica de 1100 kg m^{-3} . O índice de refração é de 1560 e a fluorescência é resultado da presença da rodamina B (excitação a 550 nm /emissão a 580 nm).

Faz-se necessário a calibração do equipamento, tendo como procedimentos o ajuste do foco da câmera CCD no plano a qual será realizada a medida, capturando uma imagem para a definição do espaço real correspondente a um pixel da imagem. Avalia-se então o laser, por observação de duas imagens subseqüentes, ajustando a intensidade da luz e o intervalo de tempo entre as imagens, que deve permitir que as partículas se desloquem em média por 5 pixels. A Figura 2a apresenta uma imagem obtida pela câmera CCD, com o foco e o laser ajustados e as Fig. 2b e 2c apresentam os campos de velocidade instantânea e média respectivamente.

Em relação à técnica de imagem por contraste, essa técnica baseia-se na diferença de contraste entre a partícula e o meio, proporcionada pela presença de uma luz de fundo. Essa técnica necessita de uma imagem de referência sem a presença das partículas. Esta imagem de referência é utilizada para inverter a imagem contrastada, subtraindo da imagem de referência a imagem capturada. Com a imagem invertida, as maiores intensidades da escala de cinza estão nas partículas e as menores no fundo. Com a imagem invertida, um algoritmo é proposto, o algoritmo de segmentação. O algoritmo sugere dois passos: uma segmentação primária que identifica uma região onde se encontra uma partícula; e uma segmentação secundária que trata cada região de forma separada a fim de determinar o diâmetro e a excentricidade.

Na calibração é tomada uma imagem fundo de referência, ajustada a intensidade do laser e adquiridos os dados. Quando as imagens são adquiridas é realizado um tratamento para identificação e determinação do tamanho da bolha. A Figura 3a demonstra a imagem captada pela técnica de imagem por contraste, enquanto a Fig. 3b apresenta a imagem pós-processada, mostrando a identificação das bolhas.

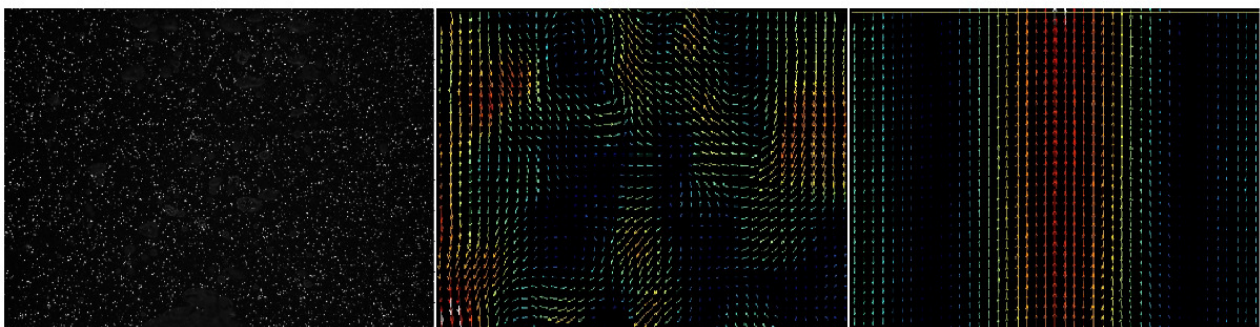


Figura 2: (a) Imagem típica capturada pela CCD com ajuste de foco e intensidade do laser; (b) Campo de velocidade instantânea; (c) campo de velocidade média.

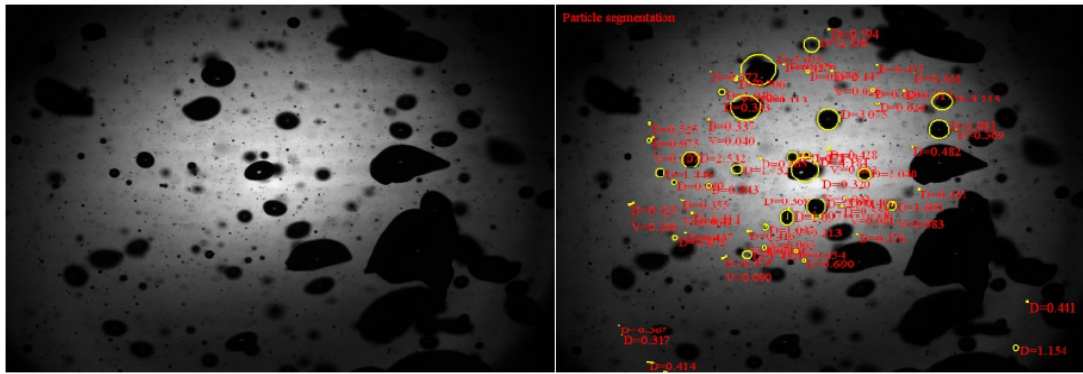


Figura 3: (a) Imagem capturada pela técnica de imagem por contraste; (b) Imagem por contraste tratada pelo algoritmo de segmentação.

3.1 Aquisição e tratamento de dados

A Tabela 1 apresenta o planejamento dos experimentos. São realizados três experimentos em triplicata variando a condição de vazão de gás. Os dados foram obtidos em uma janela de observação que compreende todo o diâmetro da coluna a uma altura em relação ao distribuidor de 400 a 500 mm, onde os dados são retirados na posição 450 mm do distribuidor de gás. Para a avaliação dos perfis médios de velocidade da fase líquida e as características turbulentas são coletados 1500 conjuntos de duas imagens, que geram 1500 amostras instantâneas de velocidade.

Tabela 1: Estudos de Caso.

Experimento	Q_g (l min ⁻¹)	v_s (cm s ⁻¹)
1	0,5	0,050
2	1,5	0,150
3	3,0	0,303

A média é realizada sobre todas as amostras aplicando a seguinte relação:

$$\bar{v}_j = \frac{1}{N-1} \sum v_j \quad (15)$$

Já as características turbulentas do sistema são avaliadas através dos momentos de segunda ordem. O tensor normal na direção axial ($\overline{v'_z v'_z}$), o tensor normal na direção radial ($\overline{v'_x v'_x}$), que contribuem para a energia cinética turbulenta, e o tensor na direção axi-radial ($\overline{v'_x v'_z}$). Esse último é responsável pela circulação da fase líquida na coluna (Bhole *et al.*, 2006), apresentado genericamente pela seguinte relação:

$$\overline{v'_j v'_k} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_j - \bar{v}_j)(v_k - \bar{v}_k) \quad (16)$$

A intensidade turbulenta na direção axial, I_z , é apresentada por:

$$I_z = \frac{\sqrt{\overline{(v'_z)^2}}}{U} \quad (17)$$

onde U representa uma velocidade representativa qualquer, sendo escolhida a velocidade de entrada de ar no furo da coluna para o caso de vazão a 3 l min⁻¹.

A energia cinética turbulenta, k , pode ser definida para dois componentes, definida como (Albrecht *et al.*, 2002)

$$k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{3}{4} (v'_j)^2 + \frac{3}{4} (v'_k)^2 \right] \quad (18)$$

onde N representa o número de amostras.

Para determinação do diâmetro das bolhas, em cada experimento foram coletadas 50 duplas de imagens, que foram processadas pelo método da segmentação (Fig. 3b). O diâmetro médio aritmético e o diâmetro médio de Sauter são determinados respectivamente por:

$$D_{p10} = \frac{1}{N} \sum D_{pi} \quad \text{e} \quad D_{p32} = \frac{1}{N} \sum \frac{D_{pi}^3}{D_{pi}^2}, \quad (19)$$

onde D_{p10} é o diâmetro médio aritmético, D_{p32} é o diâmetro médio de Sauter, N é o número total de partículas detectadas e D_{pi} é o diâmetro da i^{th} partícula.

4. PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

O método numérico utilizado para resolução do sistema de equações foi o método dos volumes finitos, implementado pelo software comercial CFX 12.0 da Ansys Tech. A discretização temporal é realizada de maneira totalmente implícita de segunda ordem (“second order backward Euler”). Os termos convectivos são discretizados utilizando um esquema de interpolação de alta resolução, que apesar de mais custoso computacionalmente, minimizam os problemas de difusão numérica, conforme apresentado por Díaz *et al.* (2008).

O tempo de simulação foi de aproximadamente 25 dias para 135 segundos de tempo real da dinâmica na coluna. O passo de tempo utilizado foi 0,0001 s para os primeiros 15 s de simulação, de 0,001 s até o tempo de 80 segundos, e após isto manteve-se um passo de tempo de 0,005 segundos. O critério de convergência adotado foi de 10^{-5} em relação aos resíduos para todas as variáveis.

A condição inicial adotada nas simulações numéricas consiste no preenchimento da coluna com a fase líquida até uma altura de 800 mm. A fase gasosa entra na coluna com uma velocidade normal à fronteira. É imposto pressão atmosférica de 101,3 kPa no topo da coluna, condição de não-deslizamento para o líquido e de deslizamento livre para a fase gás adotados nas paredes. A Figura 4 esquematiza as condições de contorno e demonstra a malha numérica utilizada, que é composta por 64 mil elementos hexaédricos.

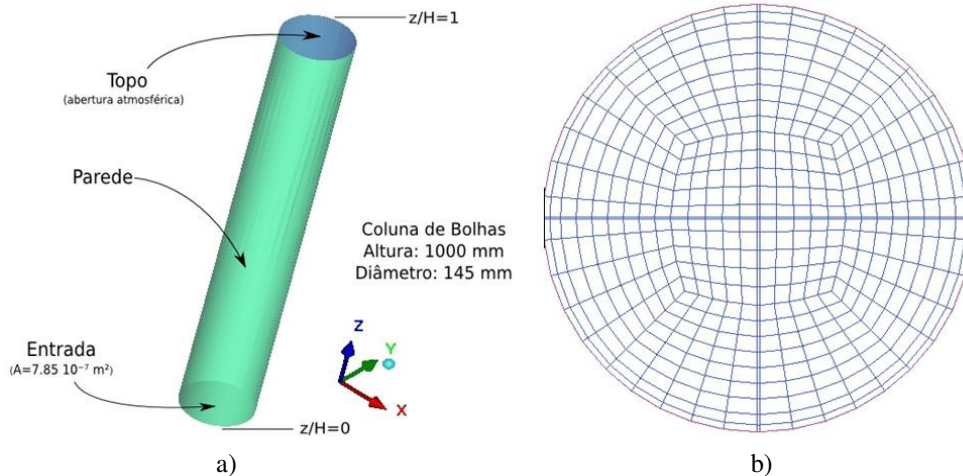


Figura 4: Condições de contorno e detalhes da malha numérica.

5. RESULTADOS

Os estudos de Imagem por contraste permitiram a determinação do diâmetro médio do conjunto de partículas detectadas nos ensaios. A Tabela 2 apresenta o diâmetro médio aritmético e o diâmetro médio de Sauter para os estudos de caso.

Tabela 2: Diâmetro médio das bolhas

Experimento	Q_g (l min ⁻¹)	D_{p10} (mm)	D_{p32} (mm)
1	0,5	2,66	6,66
2	1,5	2,08	3,74
3	3,0	2,17	3,92

Pode-se notar por observação da Tabela 2 que o diâmetro tende a diminuir com o aumento da vazão. O diâmetro médio de Sauter apresenta valores superiores aos da média aritmética por levar em consideração a fração de massa de cada grupo de diâmetros. O D_{p32} foi utilizado nas simulações.

Para avaliar o efeito da vazão de gás sobre o perfil médio de velocidade axial do líquido, a Fig. 5 apresenta o perfil de velocidade média do líquido a 450 mm da base da coluna para vazão de gás de 0,5, 1,5 e 3,0 l min⁻¹. Nota-se um comportamento qualitativo similar para todos os casos, com velocidades ascendentes na região central da coluna e reversão do fluxo médio de líquido nas regiões próximas a da parede. Para as vazões de gás de 0,5 e 1,5 l min⁻¹, os perfis apresentam simetria, mas diferenciam-se na intensidade da velocidade. Observam-se maiores velocidades ascendentes no centro e descendentes junto as paredes para a vazão de 1,5 l min⁻¹, quando comparada com a vazão de 0,5 l min⁻¹. Isto deve-se a maior energia que o gás acumula quando entra no sistema, já que as condições geométricas da entrada são as mesmas.

Quando observa-se os resultados para vazão de 3,0 l min⁻¹, nota-se uma assimetria, tanto em relação a intensidade de velocidade junto a parede quando a posição do pico de velocidade ascendente no centro da coluna. Ainda, verifica-se o aumento da velocidade descendente em relação as demais vazões e um decaimento da intensidade de velocidade de ascensão em relação a vazão de 1,5 l min⁻¹. Este último está relacionado a maior condição de turbulência, e conseqüente aumento da difusão de quantidade de movimento, ocasionando o achatamento do perfil, conforme mostrado na Fig. 5.

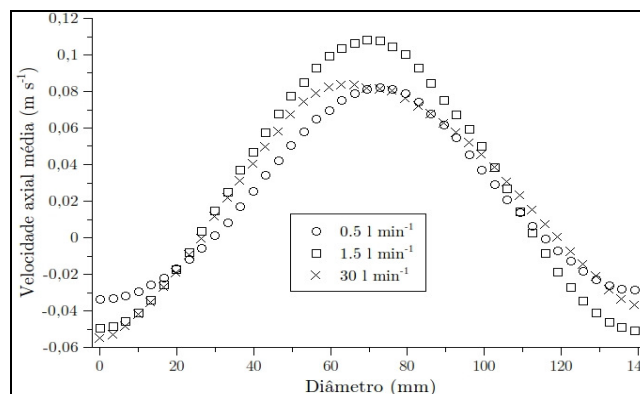


Figura 5: Perfil de velocidade axial média do líquido a 450 mm da base da coluna.

A Figura 6 mostra a comparação do perfil de velocidade média de líquido a 450 mm da base entre os experimentos numéricos e físicos para os casos de 1,5 e 3,0 l min⁻¹.

Para o caso de 1,5 l min⁻¹, Fig. 6a, nota-se que o comportamento do perfil de velocidade média numérica apresenta boa concordância qualitativa e quantitativa com os resultados obtidos experimentalmente. Observa-se o perfil parabólico com a velocidade central de valor mais elevado, cerca de 0,1 m s⁻¹, e a mesma tendência de velocidade descendente nas paredes, que sendo comparada com dados experimentais apresenta valores pouco superior, -0,04 m s⁻¹ ao passo de -0,05 m s⁻¹ do experimental.

Para o caso de 3,0 l min⁻¹, essa característica é novamente notada. Observa-se que o pico de velocidade acompanha a assimetria apresentada pelos dados experimentais e a mesma condição de achatamento do perfil de velocidade média. Nota-se que para o experimento numérico nas bordas da coluna o perfil de velocidade se sobressai, em comparação com os dados experimentais, em valores nas regiões de diâmetro inferior a 40 mm e apresenta valores superiores a posição 80 mm.

A avaliação dos momentos de segunda ordem mensurados são apresentados pela Fig. 7. Nota-se que para ambos os casos, apresenta-se um pico localizado em regiões centrais da coluna, fato esse explicado pela forma em que o gás entra no equipamento, ou seja, por apenas um furo de entrada. Essa característica de entrada propicia que a pluma de bolhas tenha ascensão preferencial ao centro, fazendo com que as características de flutuação de velocidade aumentem nessa região pela passagem das bolhas (Zhou *et al.*, 2002). Essa característica pode ser vista também pela análise da intensidade turbulenta, vista pela Fig. 8.

Observa-se também que ao aumentar-se a vazão de gás, os fenômenos turbulentos tendem a ser mais pronunciados, promovendo maiores taxas de recirculação líquida na coluna. Isto faz com que o perfil de velocidade média do líquido

tenha as características de maior achatamento e uniformidade ao longo do diâmetro da coluna ao aumentar-se a vazão de gás, conforme observado na Fig. 5.

Na Figura 7b, observa-se que a tensão normal na direção axial mostra-se mais pronunciadas na comparação com a tensão normal para direção radial (Fig. 7a), para todos os casos, tendo assim uma maior contribuição nos fenômenos turbulentos na coluna.

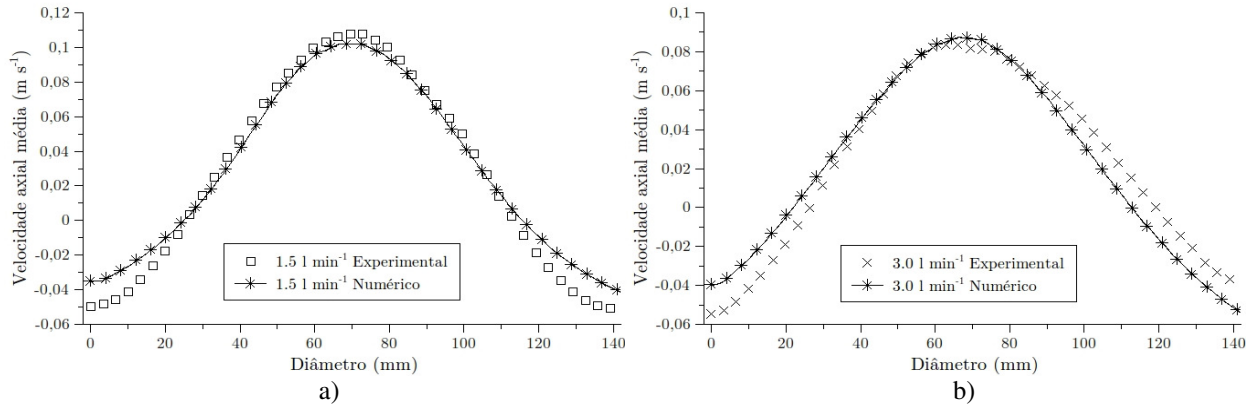


Figura 6: Comparação entre resultados numéricos e experimentais do perfil de velocidade axial média do líquido a 450 mm da base da coluna, para (a) vazão de $1,5 \text{ l min}^{-1}$ e (b) vazão de $3,0 \text{ l min}^{-1}$.

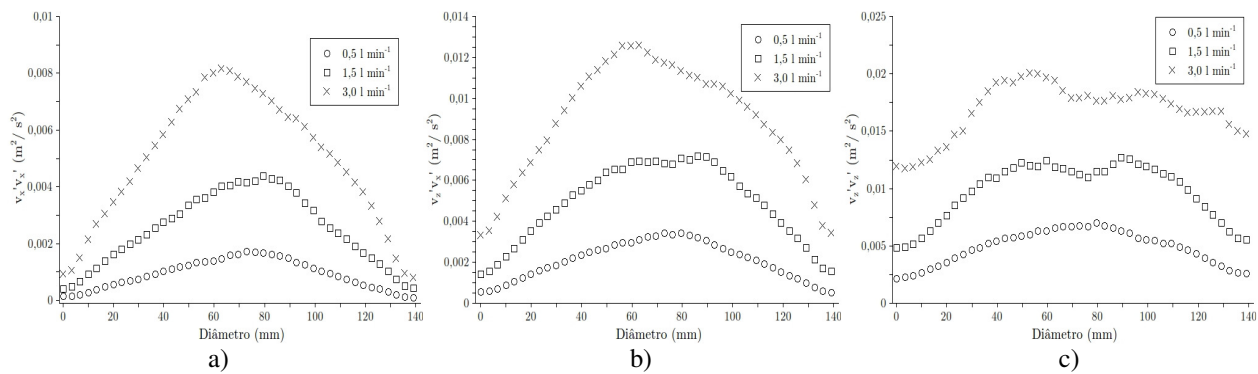


Figura 7: Momentos de segunda ordem, para (a) Tensor normal na direção radial, (b) Tensor normal na direção axial e (c) Tensor normal na direção axial.

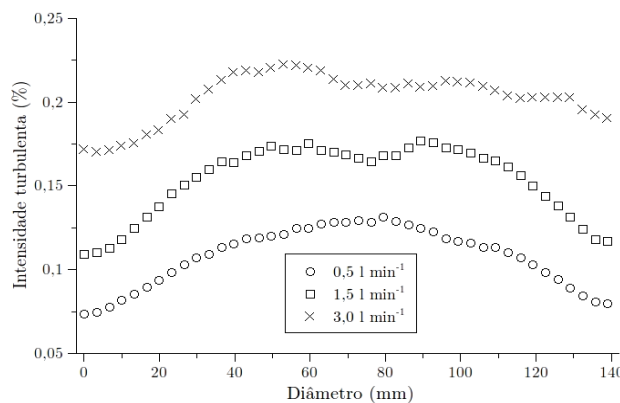


Figura 8: Intensidade turbulenta axial para fase líquida a 450 mm da base da coluna.

Pela observação dos dados experimentais, indica-se que os fenômenos turbulentos neste equipamento com estas configurações apresenta comportamento anisotrópico, fato esse também observado por Zhou *et al.* (2002).

A Figura 9 apresenta o perfil de energia cinética turbulenta ao longo do diâmetro da coluna na posição a 450 mm da base da coluna e compara os resultados obtidos experimentalmente com dados numéricos. Como os momentos de

segunda ordem, o perfil experimental apresentou a tendência de pico central, além disso, percebe-se que há um incremento de energia cinética turbulenta com o aumento da vazão do gás.

Em relação aos dados obtidos pelos experimentos numéricos, na comparação feita pela Fig. 9a para o caso com vazão de gás igual a $1,5 \text{ l min}^{-1}$, observa-se uma boa concordância com o experimento físico. A tendência de pico central é notada e, quantitativamente nesta região, os dados apresentam boa similaridade. Observa-se certa discrepância em regiões próximas a parede, fato decorrente do modelo de turbulência que por definição é aplicado para escoamentos desenvolvidos.

Já para o caso com vazão de gases a 3 l min^{-1} , nota-se que o perfil experimental demonstra ser mais plano, tendo nas regiões próximas a parede da coluna valores maiores que o apresentado para o caso a $1,5 \text{ l min}^{-1}$.

Para maiores vazões de gases, conseqüentemente maiores efeitos turbulentos apresentados na coluna, o modelo numérico mostra uma maior discrepância com os dados experimentais, demonstrando que o modelo de turbulência carece em resultados para essas condições.

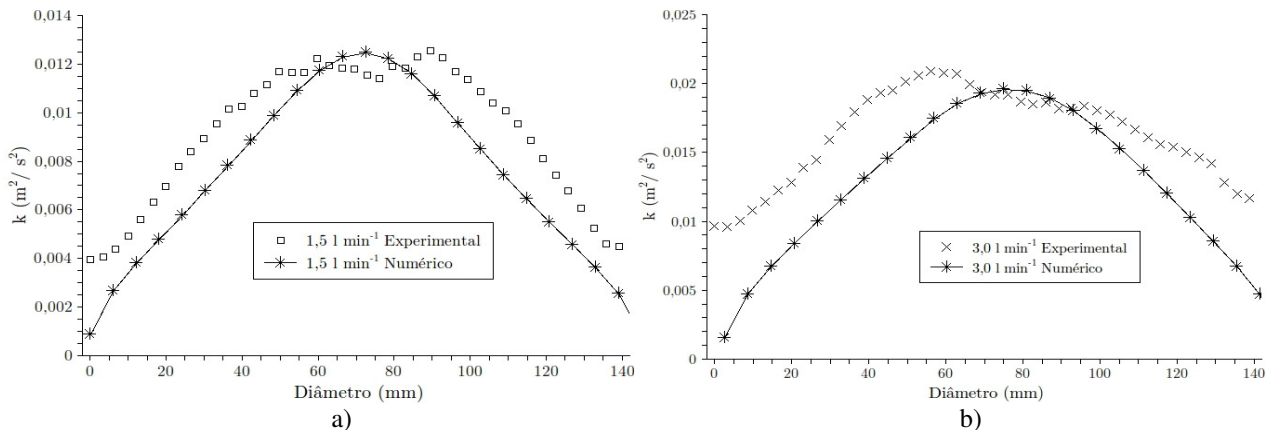


Figura 9: Energia cinética turbulenta para fase líquida e comparação com dados numéricos, para (a) vazão de $1,5 \text{ l min}^{-1}$ e (b) vazão de $3,0 \text{ l min}^{-1}$.

Apesar da utilização do modelo k-epsilon para tratar dos efeitos turbulentos ser questionável (Sokolichin *et al.*, 2004), pelas razões de negligenciar a indução turbulenta pela fase gasosa, os resultados observados apresentaram boa concordância com os dados experimentais principalmente para baixas vazões de gás, e apresenta ótima concordância na obtenção das médias de velocidade da fase líquida, como apresentadas pela Fig. 6.

6. CONCLUSÃO

Os perfis de velocidade média da fase líquida obtidos experimentalmente apresentam concordância com os dados encontrados em todas as literaturas, como Sokolichin *et al.* (2004), Zhou *et al.* (2002) e Boutet *et al.* (2009), ou seja, um perfil parabólico onde ao centro apresentam-se maiores velocidades e nas posições próximas as paredes apresentando velocidades descendentes. A comparação entre os dados obtidos para diferentes vazões mostram que para os casos $0,5$ e $1,5 \text{ l min}^{-1}$, quando se aumenta a vazão de gás na entrada da coluna, maiores são as velocidades ascendentes no centro da coluna e descendentes nas bordas. Ao observarmos o caso de 3 l min^{-1} esse efeito não é observado e os dados mostram um perfil mais plano e não simétrico.

Nestas condições de vazão um maior grau de turbulência é encontrado e neste caso fazendo com que as oscilações aconteçam de modo mais freqüente e intenso, afetando assim a média obtida. Os dados sobre as características turbulentas mostram também que a condição de entrada de um único furo faz com que o grau de mistura na coluna seja menor, devido a um menor grau de turbulência apresentado nas regiões próximas a parede, uma característica indesejável na construção de um equipamento para finalidade industrial. Nota-se que os dados experimentais indicam que os fenômenos turbulentos neste equipamento com estas configurações se comportam anisotropicamente.

Em relação aos dados numéricos obtidos, os resultados de velocidade média para os casos de $1,5$ e $3,0 \text{ l min}^{-1}$ apresentaram boa concordância com os dados experimentais apresentando pequenas discrepâncias nas regiões próximas a parede. Na comparação com a energia cinética turbulenta para os dados numéricos, o modelo k-epsilon obteve boa concordância com os dados experimentais para o caso de menor vazão de gás, mas não observou-se essa relação para maiores vazões de gás.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FURB, FUNCAMP e UNICAMP pelo apoio e à PETROBRAS, termo de cooperação 0050.0045548.08.4, pelo suporte financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, H.E.; BORYS, M.; DAMASCHKE, N.; TROPEA, C. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Ed. Springer, 2002.
- BHOLE, M.R.; ROY, S.; JOSHI, B.J. Laser Doppler Anemometer Measurements in Bubble Column: Effect of Sparger. *Ind. Eng. Chem. Res.* v.45, p. 9201-9207, 2006.
- BOUTET C.L, LARACHI F., DROMARD N., DELSART O., SCHWEICH D. CFD simulation of bubble column flows: Investigations on turbulence models in RANS approach. *Chemical Engineering Science*, v. 64, p. 4399-4413, 2009.
- DECKWER W.D. Bubble columns Reactors. New York: Ed. Wiley, 1985.
- DEGALEESAN D., DUDUKIVIC M., PAN Y. Experimental Study of Gas-Induced Liquid-Flow Structures in Bubble Columns. *AIChE Journal*. v. 47, p. 1913-1931, 2001.
- DIAZ, M. E.; IRANZO, A.; CUADRA, D.; BARBERO, R.; MONTES, J.F.; GALÁN M.A. Numerical simulation of the gas-liquid flow in a laboratory scale bubble column Influence of the bubble size distribution and non-drag forces. *Chemical Engineering Journal*, v. 139, p. 363-379, 2008.
- KANTARCI N., BORAK F., ULGEN K. O. Bubble column reactors – Review. *Process Biochemistry*. v. 40, p. 2263–2283, 2005.
- RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. Particle image velocimetry: a practical guide. Berlin: Springer, 1998, 253p.
- SOKOLICHIN A., EIGENBERGER G., LAPIN A., Simulation of Buoyancy Driven Bubbly Flow: Established Simplifications and Open Questions. *AIChE Journal*. v. 50, 2004.
- SOKOLICHIN A., EIGENBERGER G. Applicability of the standart k- ϵ turbulence model to the dynamic simulation of bubble columns: Part I. Detailed numerical simulations. *Chemical Engineering Science*, v. 54, p. 2273-2284, 1999.
- ZHOU, L.X.; YANG, M.; LIAN, C.Y.; FAN, L.S.; LEE D.J. On the second-order moment turbulence model for simulating a bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 57, p. 3269-3281, 2002.