



DIANA ISABEL SANCHEZ FORERO

**EXPERIMENTAÇÃO FÍSICA DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO EM UMA
COLUNA DE BOLHAS RETANGULAR UTILIZANDO A TÉCNICA PIV E A
TÉCNICA DE SOMBRAS *SHADOW***

CAMPINAS, 2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

DIANA ISABEL SANCHEZ FORERO

**EXPERIMENTAÇÃO FÍSICA DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO EM UMA
COLUNA DE BOLHAS RETANGULAR UTILIZANDO A TÉCNICA PIV E A
TÉCNICA DE SOMBRAS *SHADOW***

Orientador: Prof. Dr. Milton Mori

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas
para obtenção de título de Mestre na área de Desenvolvimento de Processos Químicos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFINIDA PELA ALUNA DIANA ISABEL SÁNCHEZ FORERO
E ORIENTADA PELO PROF. DR. MILTON MORI

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Milton Mori", is written over a horizontal line. Below the line, the text "Prof. Dr. Milton Mori" is printed in a black, sans-serif font.

Prof. Dr. Milton Mori

CAMPINAS, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Sa55e Sánchez Forero, Diana Isabel
Experimentação física do escoamento gás-líquido em
uma coluna de bolhas retangular utilizando a técnica PIV
e a técnica de sombras SHADOW / Diana Isabel
Sánchez Forero. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Milton Mori.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Bolhas. 2. Escoamento multifásico. I. Mori,
Milton, 1947-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Gas- liquid experimentation in a rectangular bubble
column using PIV and Shadow techniques

Palavras-chave em Inglês: Bubble, Multiphase flow

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

Titulação: Mestra em Engenharia Química

Banca examinadora: Rodrigo Koerich Decker, Vinicyus Rodolfo Wiggers

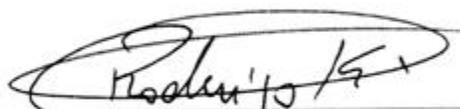
Data da defesa: 16-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Diana Isabel Sánchez Forero e aprovada em 16 de Julho de 2012 pela banca examinadora constituída pelos Doutores:



Prof. Dr. Milton Mori



Prof. Dr. Rodrigo Koerich Decker



Prof. Dr. Vinicyus Rodolfo Wiggers

Este exemplar corresponde a versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.



Prof. Dr. Milton Mori

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais por sempre acreditar em mim e por me dar força nos momentos difíceis.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de realizar meus estudos de pós-graduação.

Aos meus Pais pelo apoio e a confiança durante minha estadia no Brasil.

À minha irmã e ao meu irmão pelo apoio e as palavras de alento.

Ao Prof. Dr. Milton Mori, pela oportunidade de trabalhar em sua equipe e pelo apoio durante o desenvolvimento deste projeto.

À Dra. Marcela Kotsuka pelo apoio, orientação e ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas de laboratório, em especial ao João Lameu da Silva pela colaboração e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Em geral, a todos meus amigos que fizeram parte desta etapa da minha vida e que contribuíram para finalizar este trabalho com êxito.

*" O mundo está nas mãos daqueles que tem a coragem de sonhar e correr o risco de viver
seus sonhos"*

-Paulo Coelho.

RESUMO

Colunas de bolhas são dispositivos de contato multifásico para transferência de massa e calor, intensamente utilizados em diferentes áreas industriais. O escoamento e a turbulência destes equipamentos são induzidos pelo movimento ascendente das bolhas. A hidrodinâmica e o comportamento das bolhas em regime homogêneo foram analisados em uma coluna de bolhas retangular em escala de laboratório (50 cm x 20 cm x 220 cm), utilizando as técnicas de velocimetria por imagem de partícula (PIV) e a técnica de sombras *Shadow* para o estudo das fases contínua e dispersa, respectivamente. O gás foi alimentado através de um distribuidor de 18 furos a várias condições de velocidade superficiais de gás na entrada. As propriedades do escoamento para as duas fases foram determinadas por meio de uma quantidade suficiente de imagens duplas. O campo de velocidade para a fase contínua (líquido) foi obtido por adição de partículas traçadoras fluorescentes. Além disso, a intensidade de turbulência, energia cinética turbulenta e os tensores de Reynolds, foram determinados a partir dos dados obtidos pelas medições experimentais. Os resultados mostram o perfil típico da velocidade axial média do líquido, ascendente na região central e descendente nas proximidades das paredes da coluna. Também, foram encontradas diferenças entre os perfis normal e axial dos tensores, o que sugere que o fenômeno turbulento na coluna de bolhas é produzido pelo caráter anisotrópico desta. Finalmente, o comportamento das bolhas foi analisado determinando a distribuição e o tamanho destas. Verificou-se que o tamanho das bolhas decresce ao longo da coluna devido aos efeitos da deformação e fenômenos de coalescência. Igualmente, encontrou-se o diâmetro médio da bolha na faixa dos 4 milímetros, tamanho típico no regime homogêneo.

Palavras- Chave: Coluna de bolhas, regime homogêneo, escoamento gás-líquido, PIV, *Shadow*

ABSTRACT

Bubble columns are multiphase contact devices for mass and heat transfer, which are intensively used in different industrial areas. Flow and turbulence in these equipments are induced by the bubble rise motion. The hydrodynamics and bubble behavior in a homogeneous bubbly flow regime was analyzed in a rectangular laboratory-scale bubble column (50 x 20 x 220 cm) using Particle Image Velocimetry (PIV) and Shadow techniques to study continuous and dispersed phase, respectively. The bubble column was aerated by using 18 holes gas sparger for several superficial gas velocities. The flow properties for both phases were determined by sufficient number of double images. The velocity field for continuous phase (liquid) was achieved by adding fluorescing tracer particles. In addition, turbulence intensities of the fluid, turbulent kinetic energy and tensors profiles were deduced from experimental measurements. Results show typical axial mean velocity profiles of the liquid, upward flow in the core region and a down-flow near the walls. Also, it was found differences between axial and normal tensors profiles that suggest the turbulent phenomena in the bubble column is produced by the anisotropic behavior. Finally the bubble performance was further analyzed by determining bubble distribution and bubble size. It was found a decreasing bubble size along the bubble column due to the coalescence and deformation effects. Furthermore, is determined that the bubble diameter is around 4 mm, typical bubble size in a homogeneous bubble flow regime.

Key-Words: Bubble columns, homogeneous bubble flow regime, gas-liquid flow, PIV, Shadow.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
NOMENCLATURA.....	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 HIDRODINÂMICA EM COLUNA DE BOLHAS	5
2.1.1 Regimes de Fluxo	6
2.2 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO EM COLUNAS DE BOLHAS	9
2.2.1 Fração volumétrica de gás (<i>Gas hold-up</i>).....	9
2.2.2 Efeito da velocidade superficial do gás e das propriedades físicas do sistema.....	10
2.2.3 Parâmetros geométricos	11
2.2.4 Distribuidores de Gás.....	12
2.3 DISTRIBUIÇÃO E TAMANHO MÉDIO DAS BOLHAS	14
2.3.1 Propriedades das bolhas	16
2.4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO	18
2.4.1 Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV)	19
2.4.2 Técnica de Medição de Sombras (<i>Shadow</i>)	20

2.5	PONTOS DE INVESTIGAÇÃO	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL.....	25
3.1.1	Materiais.....	25
3.1.2	Estrutura Experimental e Equipamentos.....	26
3.2	METODOLOGIA.....	36
3.2.1	Calibração do Sistema de Medição PIV	36
3.2.2	Calibração do Sistema de Medição de sombras (<i>Shadow</i>)	37
3.2.3	Parâmetros operacionais:	39
3.3	DETECÇÃO DA BOLHA E MEDIÇÃO DA VELOCIDADE	44
3.3.1	Algoritmos para obtenção de dados.....	44
3.4	ANÁLISE DOS ERROS.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	VELOCIDADE DA FASE LÍQUIDA	47
4.1.1	Velocidade Média da Fase Líquida	49
4.1.2	Flutuação da Velocidade (RMS)	57
4.1.3	Intensidade de Turbulência	60
4.2	TENSORES DE REYNOLDS E ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA DA FASE LÍQUIDA.....	63
4.2.1	Tensores de Reynolds	63
4.2.2	Energia Cinética Turbulenta.....	70
4.3	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA BOLHA NA COLUNA DE BOLHAS	73
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	86
5.1	CONCLUSÕES.....	86
5.2	SUGESTÕES	88

6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
----------	---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Regimes de Escoamento em Coluna de Bolhas.	6
Figura 2.2 Variação dos regimes de fluxo.....	7
Figura 2.3 Escoamento bifásico em colunas de bolhas (a) 2D e (b) 3D.....	9
Figura 2.4 Influencia do distribuidor na hidrodinâmica do sistema	13
Figura 2.5 – Formato básico de bolhas.	17
Figura 2.6 Forma das bolhas segundo os números adimensionais.	18
Figura 2.7 Princípio de funcionamento do sistema PIV/ <i>Shadow</i>	21
Figura 3.1 Diagrama Representativo da unidade da Coluna de bolhas – PIV e <i>Shadow</i>	26
Figura 3.2 Imagem da coluna de bolhas do laboratório experimental do LPQGe.	27
Figura 3.3 Diagrama Representativo da geometria do distribuidor de placa (18 furos).....	28
Figura 3.4 Esquema representativo da configuração do sistema PIV 2D	30
Figura 3.5 Componentes do sistema PIV 2D.	33
Figura 3.6 Componentes do sistema <i>Shadow</i>	34
Figura 3.7 <i>Laser</i> e difusor óptico para sistema <i>Shadow</i>	35
Figura 3.8 Imagem de calibração do sistema PIV.	36
Figura 3.9 Imagem de calibração do sistema <i>Shadow</i>	37
Figura 3.10 Imagem de referência do <i>Shadow</i>	38
Figura 3.11 Imagem Invertida <i>Shadow</i>	38
Figura 3.12 Esquema representativo das regiões de medição da coluna.	40
Figura 3.13 Esquema representativo das regiões de medição da coluna para o PIV.....	41
Figura 3.14 Esquema representativo das regiões de medição da coluna para o <i>Shadow</i>	43

Figura 3.15 (a) Imagem capturada pelo <i>Shadow</i> , (b) imagem tratada pelo algoritmo de segmentação.	45
Figura 4.1 Mapa vetorial da velocidade instantânea do líquido	48
Figura 4.2 Teste de fotos PIV para velocidade superficial do gás de 0,13 cm/s.	49
Figura 4.3 Mapa vetorial da velocidade média do líquido (a) lado esquerdo-(b) centro-(c) lado direito ($U_{sup}=0,05$ cm/s, $H=40$ cm).	50
Figura 4.4 Mapa vetorial da velocidade média do líquido (a) lado esquerdo-(b) centro-(c) lado direito ($U_{sup}=0,09$ cm/s, $H=40$ cm).	52
Figura 4.5 Mapa vetorial da velocidade média do líquido (a) lado esquerdo-(b) centro-(c) lado direito ($U_{sup}=0,13$ cm/s, $H=40$ cm).	53
Figura 4.6 Perfil da velocidade axial do líquido para diferentes velocidades superficiais do gás;	54
Figura 4.7 Perfil da velocidade axial do líquido para diferentes velocidades superficiais do gás;	55
Figura 4.8 Perfil da velocidade axial do líquido para diferentes velocidades superficiais do gás;	56
Figura 4.9 Velocidade axial média do líquido com velocidade superficial do gás de 0,13 cm/s para as alturas (a) 40 cm – (b) 80 cm – (c) 120 cm.	57
Figura 4.10 Velocidades RMS para altura $H=40$ cm.	58
Figura 4.11 Velocidades RMS para altura $H=80$ cm.	59
Figura 4.12 Velocidades RMS para altura $H=120$ cm.	60
Figura 4.13 Intensidade de Turbulência $H=40$ cm.	61
Figura 4.14 Intensidade de Turbulência $H=80$ cm.	62
Figura 4.15 Intensidade de Turbulência $H=120$ cm.....	62

Figura 4.16 Tensor normal na direção axial $H=40$ cm.	64
Figura 4.17 Tensor normal na direção radial $H=40$ cm.	65
Figura 4.18 Tensor normal na direção axial- radial $H= 40$ cm.	66
Figura 4.19 Tensor normal na direção axial $H=80$ cm	67
Figura 4.20 Tensor normal na direção radial $H=80$ cm	67
Figura 4.21 Tensor normal na direção axial-radial $H= 80$ cm	68
Figura 4.22 Tensor normal na direção axial $H=120$ cm	68
Figura 4.23 Tensor normal na direção radial $H=120$ cm	69
Figura 4.24 Tensor normal na direção axial-radial $H=120$ cm	69
Figura 4.25 Energia Cinética Turbulenta $H=40$ cm.....	71
Figura 4.26 Energia Cinética Turbulenta $H=80$ cm.....	71
Figura 4.27 Energia Cinética Turbulenta $H=120$ cm.....	72
Figura 4.28 Campo de visão da coluna na altura de 40 cm.....	73
Figura 4.29 Histograma da distribuição do tamanho de partícula ($H =40$ cm; $U_{sup}= 0,05$ cm/s).....	74
Figura 4.30 Histograma da distribuição do tamanho de partícula ($H =40$ cm; $U_{sup}= 0,09$ cm/s).....	74
Figura 4.31 Histograma da distribuição do tamanho de partícula ($H =40$ cm; $U_{sup}= 0,13$ cm/s).....	75
Figura 4.32 Divisão do campo de visão da coluna na altura $H=80$ cm.....	76
Figura 4.33 Histograma da distribuição do tamanho ($H =80$ cm; $U_{sup}= 0,05$ cm/s).....	77
Figura 4.34 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H =80$ cm; $U_{sup}= 0,09$ cm/s).	77
Figura 4.35 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H =80$ cm; $U_{sup}= 0,13$ cm/s).	78
Figura 4.36 Divisão do campo de visão da coluna na altura de 120 cm.	79

Figura 4.37 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H = 120$ cm; $U_{sup} = 0,05$ cm/s).....	80
Figura 4.38 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H = 120$ cm; $U_{sup} = 0,09$ cm/s).....	80
Figura 4.39 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H = 120$ cm; $U_{sup} = 0,13$ cm/s).....	81
Figura 4.40 Variação do diâmetro de <i>Sauter</i> na direção axial do escoamento.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Parâmetros operacionais utilizados na técnica de medição PIV.	41
Tabela 3.2 Parâmetros operacionais utilizados na técnica de medição <i>Shadow</i>	42
Tabela 4.1 Resumo das características da bolha ao longo da coluna.....	82
Tabela 4.2 Correlações para tamanho da bolha produzida em um orifício.....	83

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

A	Área da seção transversal da coluna de bolhas
d_b	Diâmetro da bolha
d_{bk}	Diâmetro da bolha k
\overline{d}_b	Diâmetro médio da bolha
d_e	Diâmetro do volume equivalente de uma esfera
d_o	Diâmetro do orifício
\overline{d}_s	Diâmetro médio de Sauter
D_{pi}	Diâmetro da partícula i
D_{10}	Diâmetro médio da bolha
D_{32}	Diâmetro médio de Sauter
E_o	Número de Eötvös
g	Aceleração da gravidade
k	Tipo de bolha
k	Energia Cinética Turbulenta
M	Número de Morton
n	Número de bolhas k
n_a	Número total de amostras
N	Número total de partículas
P	Probabilidade

Q_g	Vazão de fluxo volumétrico de gás
Re_∞	Número de Reynolds
S_t	Número de Stokes
S_x	Desvio padrão da mostra
$S_{\bar{x}}$	Desvio padrão dos valores médios
T_b	Intensidade de Turbulência
U	Velocidade da partícula relativa á fase continua
U_{sup}	Velocidade superficial do gás
v	Velocidade local da fase continua
\bar{v}	Velocidade média da fase continua
v'	Flutuação média da velocidade
v_i	Velocidade instantânea do fluido
V_l	Volume da fase líquida
V_g	Volume da fase gasosa
V_b	Volume de uma esfera
$v'_j v'_k$	Tensor normal médio axial ($v'_y v'_y$), radial ($v'_x v'_x$) e axial radial ($v'_y v'_x$)

LETRAS GREGAS

Δt	Intervalo de tempo entre duas imagens
Δx	Deslocamento da imagem
$\Delta \rho$	Diferença entre as massas especifica das fases
ε_g	Fração volumétrica global do gás
ρ	Densidade da fase continua

ρ_g	Densidade do gás
τ_{din}	Tempo de reação da partícula
τ_{esc}	Tempo característico de escoamento
μ	Viscosidade da fase continua
σ	Tensão superficial
x_i	Valor do dado i recoletado
x'	Variável a ser avaliada
\bar{x}	Valor médio do conjunto de dados recoletados

SIGLAS

CARPT	Computer Automated Radioactive Particle Tracking
CCD	Charge Coupled Device - Dispositivos de carga acoplados
CFD	Fluid Dynamic Computational – Fluida Dinâmica Computacional
LDA	Laser Doppler Velocimetry – Velocimetria <i>Laser Doppler</i>
LPQGe	Laboratório de Processos Químicos e Gestão Empresarial
Nd:YAG	Cristal Ítrio-Alumínio-Granada dopado com íons de Neodímio
PIV	Particle Image Velocimetry - Velocimetria por Imagem de Partícula
PTV	Particle Tracking Velocimetry – Velocimetria por Rastreamento de Partícula

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

O contato entre dois fluidos em operações gás-líquido é feito em dispositivos que permitem a difusão dos componentes na interface, um destes dispositivos é a coluna de bolhas. Neste equipamento o gás escoa na forma de bolhas através de um meio líquido, com o intuito de realizar operações de transferência de massa e/ou calor entre duas fases com ou sem a presença de reação química (Treybal, 1980). Sua utilização se estende a uma grande gama de indústrias, como, química, petroquímica, metalúrgica e biotecnológica, sendo a síntese de Fisher-Tropsch sua aplicação mais reconhecida (Kantarci *et al.* 2005).

Os processos que utilizam esse tipo de equipamentos aproveitam suas excelentes características de transferência de massa e calor ao propiciarem grandes áreas de contato entre as fases, além de não possuírem partes móveis e apresentar baixos custos operacionais. Colunas de bolhas são dispositivos de fácil operação, entretanto, apresentam uma complexa fluidodinâmica (Dionisio, 2008). Devido a esta complexidade, sua modelagem e escalonamento ainda não são bem desenvolvidos; assim surge a necessidade de estudar o comportamento hidrodinâmico da coluna a fim de otimizar seu projeto.

Propriedades físicas de transporte como a ascensão das bolhas, interação entre elas, seu tamanho e distribuição, dinâmica bolha-líquido e mecanismos de injeção do gás, são fatores que determinam a hidrodinâmica do sistema e afetam o comportamento do escoamento dentro da coluna. (Laín e Sommerfeld, 2004).

Nas investigações sobre colunas de bolhas, encontra-se como tópico central a fração volumétrica de gás (*gas holdup*), além das características da bolha, regimes de fluxo e comportamento dos parâmetros da fase líquida. Por outro lado, estudos numéricos relacionados à fluidodinâmica computacional (CFD) permitem fornecer subsídios para o projeto e otimizar as condições de operação do equipamento. As principais limitações nas simulações por CFD nas colunas de bolhas são referentes as excessivas simplificações

quanto ao comportamento dinâmico das bolhas e carência de dados experimentais do campo de fluxo, que permitam testar a aplicabilidade dos modelos matemáticos utilizados nas simulações.

A maioria dos estudos experimentais relacionados com as colunas de bolhas está dirigida a quantificar os efeitos das condições de operação, as propriedades do sistema e dimensionamento da coluna em relação a seu rendimento. Para o desenvolvimento de novos modelos matemáticos é preciso realizar medidas experimentais utilizando técnicas adequadas tanto para a fase líquida quanto para a fase gasosa. Técnicas de análise visual ou de correlação de imagens de escoamento são utilizadas para determinar campos de velocidade das duas fases, e a distribuição local do tamanho de partícula através do sistema considerado (Bröder e Somersfeld, 2007). Dependendo do tamanho da escala, se faz escolha do tipo de abordagem utilizada, por conseguinte, existem diferentes técnicas que tem sido desenvolvidas e aplicadas durante anos, entre estas se encontra a técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV) e a técnica *Shadow*.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é estudar o escoamento bifásico gás-líquido em uma coluna de bolhas retangular a diferentes velocidades superficiais do gás, aplicando velocimetria por imagem de partícula (PIV) e técnica de medição de *Shadow*, para determinar parâmetros da fase líquida e características das bolhas, respectivamente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de parâmetros físicos como a velocidade axial média, tensores de Reynolds, energia cinética turbulenta, diâmetro da bolha e distribuição do tamanho da bolha para o escoamento gás-líquido operando em regime homogêneo, em uma coluna de bolhas retangular a diferentes velocidades superficiais de gás utilizando um distribuidor de 18 furos centralizados. Desta forma, este estudo refere-se a análise do comportamento da fase líquida e da fase gasosa na coluna aplicando as técnicas de medição experimental PIV e *Shadow*, respectivamente.

1.1.2 Objetivos Específicos

- 1) Determinar a velocidade axial média, flutuação da velocidade, tensores de Reynolds e energia cinética turbulenta para a fase líquida no escoamento gás-líquido;
- 2) Determinar experimentalmente a distribuição do tamanho de bolha em coluna de bolhas retangulares;
- 3) Determinar o tamanho médio da bolha na coluna de bolhas;
- 4) Obter dados experimentais que permitam corroborar resultados posteriores obtidos através de simulações em CFD.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Durante o desenvolvimento deste trabalho os principais temas são apresentados da seguinte forma:

O *capítulo 2* oferece uma breve descrição teórica das colunas de bolhas, a revisão dos trabalhos experimentais feitos neste campo, os fundamentos teóricos das técnicas de medição experimental de velocimetria por imagem de partícula (PIV) e técnica de sombras (*Shadow*).

A metodologia e os materiais utilizados durante a experimentação na bancada de coluna de bolhas são apresentados no *capítulo 3*.

No *capítulo 4* são apresentados e discutidos os resultados obtidos da experimentação física, como velocidade média do líquido, distribuição do diâmetro da bolha, tensores de Reynolds, velocidades de flutuação do líquido e energia cinética do sistema, ao utilizar os métodos de medição PIV e *Shadow* a diferentes velocidades superficiais do gás.

Por último, no *capítulo 5* são apresentadas as conclusões finais do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros referentes ao tema.

Capítulo 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Neste capítulo serão apresentados os principais parâmetros relacionados ao comportamento hidrodinâmico e *design* em colunas de bolhas, assim como o princípio de funcionamento das técnicas experimentais de medição PIV e *Shadow*. Igualmente, serão apresentados os trabalhos publicados na literatura referentes a aplicação destas técnicas em escoamentos bifásicos em colunas de bolhas.

2.1 HIDRODINÂMICA EM COLUNA DE BOLHAS

Conhecer o comportamento hidrodinâmico de uma coluna de bolhas é fator importante para prever tanto os parâmetros do projeto como aqueles referentes à transferência de massa e calor, vazão máxima do fluxo de gás, entre outras. Este comportamento hidrodinâmico consiste dos fenômenos macroscópicos e microscópicos em uma coluna de bolhas. (Thet *et al.* 2006).

Devido à complexa hidrodinâmica e sua influência nas características de transporte nas colunas de bolhas; parâmetros tais como: geometria, tipo de distribuidor do gás, condições de operação e dados específicos do processo, são objeto de estudo. Estes parâmetros incorporam a fração volumétrica do gás, que refere-se a área interfacial, coeficientes de dispersão e coeficientes de transferência de calor e massa, além do diâmetro e a velocidade de ascensão da bolha (Deckwer, 1992).

Em colunas de bolhas, como dispositivos de escoamento multifásico, o padrão de fluxo é determinante na operação e no desempenho do equipamento. A caracterização fluidodinâmica tem influência significativa no comportamento hidrodinâmico, portanto, os

resultados experimentais vão depender do regime que prevaleça na coluna (Kantarci *et al.* 2005, Piedra *et al.* 2009).

2.1.1 Regimes de Fluxo

Os regimes de escoamento em uma coluna de bolhas são classificados e mantidos dependendo da velocidade superficial do gás¹. Três tipos de regimes são observados: homogêneo, heterogêneo e *slug*. (Kantarci *et al.* 2005). Na Figura 2.1 é possível verificar o comportamento macroscópico do escoamento nos diferentes regimes fluidodinâmicos nas colunas de bolhas.

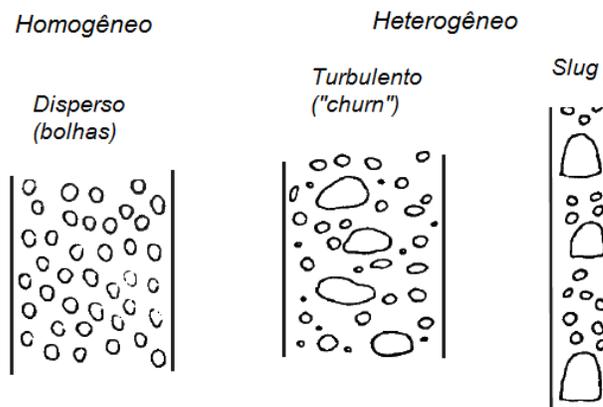


Figura 2.1 Regimes de Escoamento em Coluna de Bolhas.
(a) Homogêneo - (b) Heterogêneo- (c) *Slug*
(Adaptado de Shah *et al.*, 1982).

O regime de escoamento homogêneo (Figura 2.1 (a)) é caracterizado por bolhas pequenas e relativamente uniformes, geralmente, com tamanhos entre 1 e 7 mm (Krishna, 2000). Este regime é obtido a baixas velocidades superficiais do gás (geralmente menores que 5 cm/s), onde a velocidade de ascensão das bolhas é praticamente uniforme e com trajetória quase retilínea. Neste regime as bolhas interatuam pouco entre elas, e os fenômenos de quebra e coalescência podem ser desprezados. A fração volumétrica de gás é uniforme especialmente na direção transversal, enquanto, na zona de circulação do líquido, é praticamente ausente. O tamanho da bolha neste regime está influenciado pelo tipo e design do distribuidor e pelas propriedades físicas do sistema (Thorat e Joshi, 2004).

¹ Velocidade Superficial é definida pela relação entre a vazão de gás e a área da seção transversal da coluna.

Com o aumento na vazão de gás, o escoamento se torna instável e o regime homogêneo não consegue se manter, passando por um período de transição. Assim, quando a velocidade superficial do gás atinge a velocidade de transição os fenômenos de quebra e coalescência se tornam mais frequentes, gerando bolhas maiores que afetam o comportamento hidrodinâmico da coluna (Galliani, 2011).

A Figura 2.2 apresenta um mapa de padrão de escoamento, onde o regime varia com a velocidade superficial do gás e com o diâmetro da coluna. Este mapa permite identificar as diferentes áreas onde se desenvolve um regime. No primeiro regime de transição, de homogêneo para heterogêneo, a circulação da fase líquida aumenta, ascendendo pela região central e descendendo pelas paredes da coluna, assim, maior quantidade de gás entra pelo centro já que é a zona com menor resistência (Thorat e Joshi, 2004). A fração volumétrica de gás aumenta lentamente e a coalescência das bolhas ocorre perto do distribuidor.

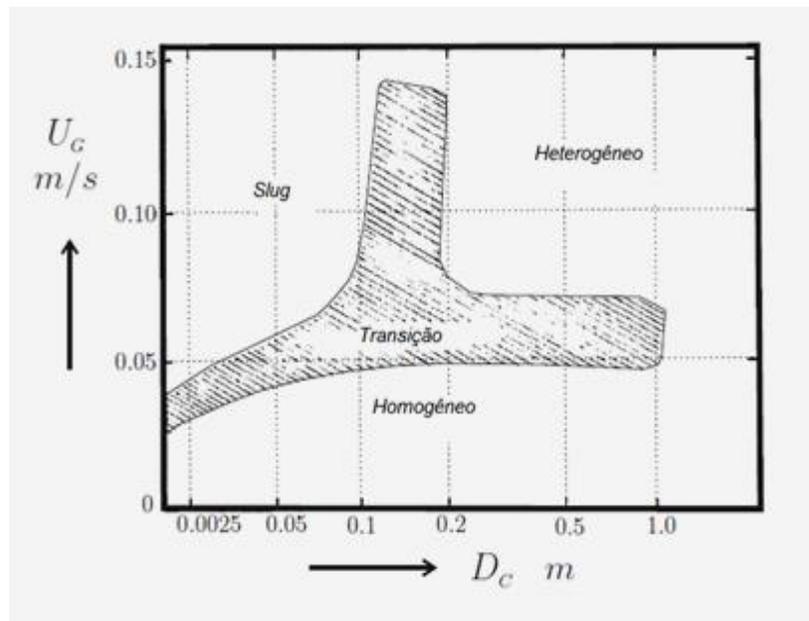


Figura 2.2 Variação dos regimes de fluxo (Adaptado de Rodriguez, 2006).

Devido à coalescência e à alta velocidade ascendente das bolhas, se origina um novo padrão de escoamento denominado de regime heterogêneo (Figura 2.1 (b)), o qual se desenvolve a mais alta velocidade superficial de gás. Neste regime, as bolhas apresentam diferentes formas e tamanhos, observando-se grandes bolhas na região central da coluna;

pequenos tempos de residência e aumento da turbulência devido ao movimento destas e à recirculação do líquido no interior da coluna. (Kantarci *et al.* 2005). Ao aumentar a velocidade superficial do gás, a fração volumétrica mantém um valor constante, enquanto, aumenta-se a altura da pluma de bolhas (aglomerado de bolhas), atingindo o segundo regime transitório de heterogêneo para *Slug* (Figura 2.2).

O regime de escoamento *slug* se apresenta quando o fluxo da fase gasosa é maior do que a fase líquida, aqui as bolhas coalescem, formando obstruções (*slugs*) os quais ocupam praticamente toda a seção transversal da coluna, como se observa na Figura 2.1 (c). A fase líquida permanece contínua e se movimenta a baixas velocidades na forma descendente. Este regime ocorre em colunas de pequeno diâmetro, quando grandes bolhas são estabilizadas pelas paredes da coluna (Sahah *et al.* 1982; Kantarci *et al.* 2009).

Alguns autores investigaram a formação e estabilidade dos regimes de escoamento. Franz *et al.* (1984) estudaram o campo de fluxo localizado em uma coluna tridimensional -3D e propõem uma estrutura conceptual do fluxo para colunas de bolhas. Mais tarde, Tzeng *et al.* (1993) e Chen *et al.* (1994) modificaram esta estrutura para colunas bi (2D) e tridimensionais (3D), respectivamente.

Chen *et al.* (1994) identificaram três regimes de fluxo: bolhas dispersas, vórtice-espiral e turbulento. Os autores propuseram uma estrutura de 4 regiões para o regime vórtice-espiral, além disso, apresentam similaridades entre o fluxo 2D e 3D. Enquanto, Lin *et al.* (1996) consideram dois regimes de escoamento: bolha dispersa e bolha unida, este último dividido em 3 e 4 regiões de fluxo. A Figura 2.3 apresenta as estruturas bi e tridimensionais em uma coluna de bolhas (2D e 3D).

Geralmente estas estruturas incluem 4 regiões (Figura 2.3 (a) e (b)): a região de pluma central, caracterizada por uma grande população de bolhas, as quais apresentam um movimento sinuoso e relativamente lento através do líquido; uma região de escoamento rápido das bolhas gerado pela presença de grandes bolhas formadas pela coalescência e diferenciadas por um movimento oscilatório; a região dos vórtices, na qual se formam turbilhões na direção axial ao longo da parede; e a região de escoamento descendente caracterizada pela recirculação do líquido, arrastando pequenas bolhas na região perto das paredes.

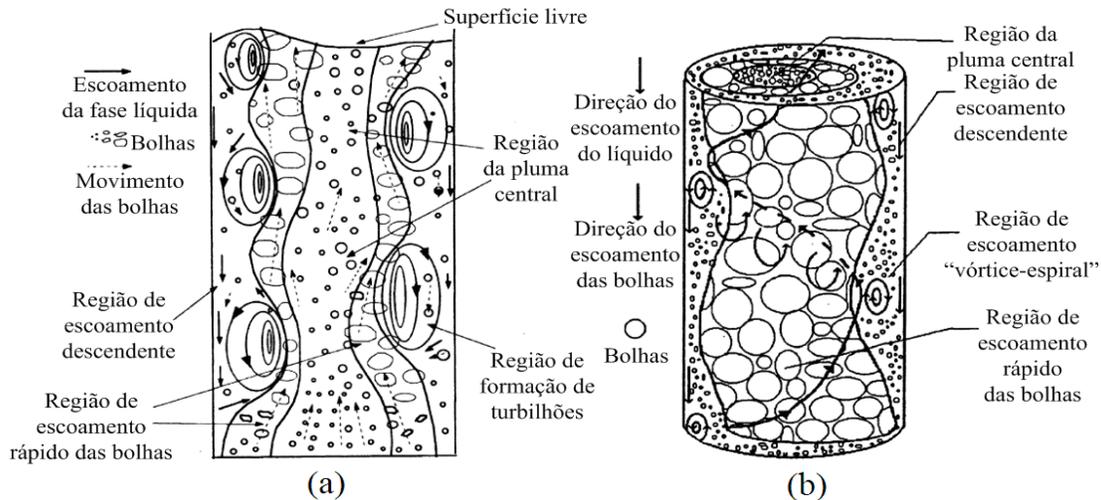


Figura 2.3 Escoamento bifásico em colunas de bolhas (a) 2D e (b) 3D (Lin *et al.* 1996).

Bakshi *et al.* (1995) estudaram a estrutura local e o regime de transição de uma coluna de bolhas relacionando a concentração intermitente da fração volumétrica de gás (*gas hold-up*) ao regime de transição.

2.2 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO EM COLUNAS DE BOLHAS

Parâmetros tais como a fração volumétrica de gás e a distribuição do tamanho das bolhas são fundamentais para determinar a área interfacial, fator essencial para obter as taxas de transferência de massa entre as fases líquida e gasosa do sistema.

2.2.1 Fração volumétrica de gás (*Gas hold-up*)

A fração volumétrica de gás define-se como a porcentagem de volume de gás na mistura de duas ou três fases na coluna, em outras palavras, é a soma dos volumes de todas as bolhas entre o volume total de fluido na coluna (Krishna *et al.*, 2002).

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{\sum_i^N V_g + V_l} \quad (2.1)$$

Em sistemas de duas fases, este parâmetro permite prever as transições dos padrões de fluxo e a quantidade de gás necessária para um determinado processo (Rodríguez, 2006). A fração volumétrica de gás depende principalmente da velocidade superficial do gás e das propriedades físicas da fase líquida (Dionisio, 2008).

Várias correlações apresentadas na literatura permitem prever a fração volumétrica de gás em colunas de bolhas, algumas destas correlações são apresentadas por Kantarci *et al.* (2005) e Shah. *et al.* (1982).

A magnitude da fração volumétrica é influenciada por diferentes fatores, principalmente por: parâmetros operacionais, como velocidade superficial do gás, altura inicial do líquido, temperatura e pressão de operação; propriedades do líquido, como viscosidade e tensão superficial; parâmetros geométricos, como dimensões da coluna e design do distribuidor de gás.

2.2.2 Efeito da velocidade superficial do gás e das propriedades físicas do sistema

A velocidade superficial do gás é a medida da velocidade de gás distribuído dentro da coluna e é expressa como a vazão de fluxo volumétrico dividido pela seção transversal da coluna (Equação 2.2). Geralmente um incremento na velocidade superficial do gás, supõe um incremento na sua fração volumétrica dentro da coluna. (Prakash *et al.* 2001).

$$U_{Sup} = \frac{Q_g}{A} \quad (2.2)$$

Estudos experimentais para colunas de bolhas (Saxena *et al.* (1990); Li *et al.* (2000); Sun Qi, e Wang Shuli, (2008); Behnoosh Moshtari. *et al.* (2009)) mostram que a velocidade superficial do gás tem um efeito positivo no comportamento da fração volumétrica total, devido ao seu incremento com o aumento da velocidade. Este efeito é menos pronunciado no regime turbulento, porém, a quantidade de grandes bolhas aumenta e, por consequência, a fração volumétrica global do gás.

As propriedades da fase líquida tem influência na formação das bolhas e na sua tendência para coalescer, fato que afeta a fração volumétrica de gás. A viscosidade da fase líquida é um parâmetro que influencia o fluxo das estruturas microscópicas. Assim, o incremento na viscosidade do líquido, produz um incremento na velocidade da bolha (diminui efeitos de quebra, gerando maiores bolhas) e uma diminuição da fração volumétrica de gás (Kantarci *et al.* 2005).

Por outro lado, adicionando-se um agente surfactante, a fração volumétrica de gás tende a aumentar (Mouza *et al.* 2005).

As condições de operação e o efeito na fração volumétrica de gás são objeto de muitos estudos, dos que se pode estabelecer que um incremento na pressão de operação da coluna, igual a um incremento na temperatura de operação gera um aumento nesta fração (Lin *et al.* 1998). Saxena *et al.* (1990) encontraram que a dependência da fração volumétrica do gás com a temperatura só ocorre em sistemas de duas fases.

2.2.3 Parâmetros geométricos

As dimensões da coluna são usualmente expressadas como diâmetro D, altura H e relação de aspecto $A = H/D$. A influência destes fatores é importante para o projeto e *scale-up* da coluna de bolhas. Seu efeito na hidrodinâmica tem sido amplamente estudado na literatura, assim, o tamanho da coluna não é considerado no caso que H, D e A, sejam maiores que alguns valores mínimos (Ruzicka *et al.* (2001)). Segundo os dados reportados por Shah *et al.* (1982) e Deckwer, (1992), o valor mínimo de D se encontra na faixa de 0,1 e 0,2 m. A influência da altura é insignificante se esta for de 1-3 m (Luo *et al.* (1999)), enquanto, a relação de aspecto deve ser maior que 5 (Wilkinson *et al.* (1992); Kastanek *et al.* (1993); Kumar *et al.* (1997); Zahradnik *et al.* (1997); Thorat *et al.* (1998); Parasu Veera e Joshi, (1999)).

No trabalho experimental de Ruzicka *et al.* (2001), os autores mostraram que o tamanho da coluna tem um efeito adverso na estabilidade do regime homogêneo e acelera a formação do regime de transição. A estabilidade foi expressa em valores críticos de fração volumétrica de gás (fração de vazio) e taxa de fluxo de gás. Os experimentos foram feitos

em o sistema ar- água em colunas de 0,14; 0,29 e 0,4 m de diâmetro com alturas entre 0,1 e 1,2 m.

2.2.4 Distribuidores de Gás

O projeto do distribuidor influencia tanto a fração volumétrica do gás como a área interfacial e os fenômenos de transferência de massa na coluna (Deckwer, 1992). Estes dispositivos são empregados na injeção de gás dentro da coluna, processo o qual gera altos níveis de turbulência devido à dispersão do gás, portanto esta região de alimentação da fase gasosa apresenta altas taxas dos fenômenos de coalescência e conseqüentemente existe maior transferência de massa.

Existem dois tipos básicos de distribuidores de gás: os estáticos, onde o gás pode ser disperso através de poros ou orifícios, e os dinâmicos, que distribuem a fase gasosa por meio da energia cinética gerada pela força do líquido. Assim, os distribuidores comumente utilizados são de pratos perfurados (distribuidores estáticos), eles produzem pequenas bolhas e uma distribuição de gás uniforme. Normalmente são feitos de vidro ou metal e ocupam uma área transversal entre 0,5 e 5% da coluna, com furos entre 1 e 5 mm de diâmetro. (Deckwer, 1992).

O distribuidor pode ser considerado eficiente se todos seus furos estão borbulhando. Para baixas velocidades superficiais do gás os furos são parcialmente ativos (só alguns furos permitem a passagem do gás), motivo pelo qual a dispersão do sistema gás-líquido prevalece a um lado da coluna, e o incremento gradual do fluxo de gás produz um aumento dos furos ativos. A presença das zonas inativas restantes, afeta a mistura e a homogeneidade na coluna (Waheed e Emad, 2007). No caso dos distribuidores multifuros, se consideram eficientes pelo fato de produzir uma distribuição uniforme de gás através da coluna.

A influência do distribuidor na hidrodinâmica da coluna de bolhas tem sido estudada por vários autores. Camarasa *et al.* (1999) mostram em seu estudo experimental o efeito de três tipos de distribuidores de gás na hidrodinâmica de uma coluna de bolhas para o sistema ar-água. Os autores mostraram que o incremento da fração volumétrica de gás é maior quando se utiliza um prato poroso, quando comparado a utilização de um distribuidor

multifuros, pois, o primeiro distribuidor produz bolhas pequenas que não coalescem no regime homogêneo. A Figura 2.4 apresenta a influência do distribuidor de gás na hidrodinâmica do sistema. O máximo das curvas que descrevem o comportamento da coluna, quando são utilizados distribuidores múlti-furos e distribuidores de pratos porosos, representam a transição entre o regime homogêneo e o regime heterogêneo. O regime homogêneo neste estudo está descrito pela linearidade da curva \mathcal{E}_G-U_G , quando a velocidade superficial do gás é menor do que 3 cm/s. No caso do distribuidor de um furo, se observa que este não apresenta linearidade nem valor máximo, o que significa que o regime heterogêneo prevalece incluso para baixas velocidades superficiais de gás.

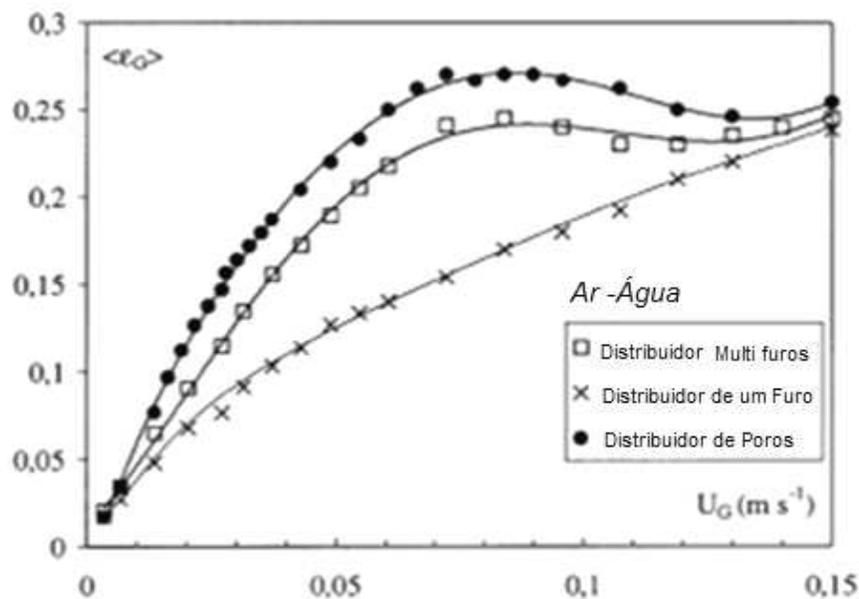


Figura 2.4 Influência do distribuidor na hidrodinâmica do sistema (Camarasa *et al.* 1999).

Em seu trabalho Buwa e Ranade, (2002) estudaram o efeito do fluxo de gás e a configuração do distribuidor na dinâmica do escoamento gás – líquido em uma coluna de bolhas retangular, e encontraram que o tamanho da bolha e o distribuidor são fatores importantes na determinação da dinâmica deste equipamento. Observaram que os períodos de oscilação da pluma de bolhas não são sensíveis ao diâmetro e ao espaçamento entre os furos quando o espaçamento for maior que 3 mm e o diâmetro de furo for menor que 1,2 mm. No caso do distribuidor com pequeno espaçamento, os autores obtiveram bolhas grandes, devido á imediata coalescência no distribuidor.

Segundo Kantarci *et al.* 2005, em colunas de bolhas o efeito do tamanho da coluna é desprezível quando o diâmetro da coluna é maior que 10 cm. A baixa velocidade, a fração volumétrica de gás depende do diâmetro dos orifícios do distribuidor e do espaçamento entre eles; para orifícios de diâmetros maiores que 1 mm, seu efeito começa ser significativo.

2.3 DISTRIBUIÇÃO E TAMANHO MÉDIO DAS BOLHAS

O tamanho da bolha é um fator importante em equipamentos de escoamento gás-líquido, pois a transferência de massa está diretamente relacionada com a área superficial das bolhas. Baixas taxas de transferência de massa são atingidas quando as bolhas são pequenas e possuem uma superfície relativamente rígida. Bolhas com diâmetros maiores geram níveis de turbulência maiores o que constitui aumento nas taxas de transferência de massa. Assim, a distribuição do tamanho é função das condições de operação. Usualmente, esta distribuição é não uniforme. A forma e a velocidade de ascensão das bolhas variam conforme existam mudanças no tamanho da bolha, além disto, a distribuição é resultado da convecção devido à coalescência do fluxo de bolhas e aos processos de ruptura no sistema. (Lage *et al.* 1999).

As bolhas podem ser agrupadas de acordo com as classes de tamanhos, assim o diâmetro médio de bolha pode ser calculado como (Galliani, 2011):

$$\bar{d}_b = \frac{\sum n_k d_{bk}}{\sum n_k} \quad (2.3)$$

Onde n corresponde ao número de bolhas k e d_{bk} ao diâmetro da bolha k .

Por outro lado o diâmetro médio de *Sauter* o qual define o diâmetro médio em relação volume/superfície (\bar{d}_s) é obtido por:

$$\bar{d}_s = \frac{\sum n_k d_{bk}^3}{\sum n_k d_{bk}^2} \quad (2.4)$$

Inicialmente, as bolhas que deixam os orifícios do distribuidor têm tamanhos diferentes das bolhas que ascendem através da coluna sob as condições normais de operação. O tamanho da maioria das bolhas em uma distribuição de equilíbrio depende principalmente do tamanho de bolha que entra e do balanço entre as taxas de quebra e coalescência. (Azad e Syeda 2006).

Em seu trabalho Camarasa *et al.* (1999) encontraram que para os três tipos de distribuidores utilizados (multifuros, de furo e prato poroso), quando o regime heterogêneo está plenamente desenvolvido em altas velocidades do gás, o tamanho da bolha tende alcançar um valor comum o qual é determinado pelos fenômenos de quebra e coalescência, e pela circulação de fluxo de líquido. Os autores concluíram que o tamanho da bolha e sua distribuição são fortemente modificados pela adição de álcool na água e propõem uma distribuição bimodal de tamanho de bolha para todos os casos avaliados.

Lage *et al.* (2004) estudaram a distribuição e o tamanho das bolhas e encontraram que o efeito do diâmetro do orifício é menos significativo quando se incrementa a velocidade superficial do gás, devido à intensificação dos fenômenos de quebra e coalescência. Portanto, durante a etapa de ascensão da bolha se altera a distribuição do tamanho originalmente gerado pelo distribuidor.

Al-Masry e Ali (2007) observaram que o raio médio da bolha diminui ao aumentar a velocidade superficial do gás, comportamento atribuído à turbulência do gás e coalescência das bolhas, a qual é propagada com a velocidade do gás. Maiores velocidades superficiais do gás produzem maiores taxas de propagação dos efeitos de coalescência.

Bröder e Sommerfeld (2007) estudaram dois arranjos de colunas de bolhas para diferentes condições de fluxo com uma fração volumétrica de gás até de 5%, e encontraram mudanças na distribuição do tamanho de bolhas maiores, o que revela a existência do fenômeno de coalescência das bolhas. A flutuação de trajetórias da bolha torna-se fortemente anisotrópica quando o seu tamanho é maior que 2mm, pelo fato das trajetórias serem em zig-zag ou helicoidais, isto faz com que a flutuação média horizontal seja duas vezes o valor da componente vertical. Para a mesma fração volumétrica de gás, nos casos onde se apresentam maiores diâmetros da bolha, os níveis de turbulência global são maiores, embora a quantidade de bolhas seja menor (Bröder e Sommerfeld, 2009).

2.3.1 Propriedades das bolhas

As bolhas suspensas no líquido proporcionam fenômenos muito complexos e difíceis de serem formulados matematicamente, e que afetam as condições do campo local do escoamento. Por serem partículas fluidas, podem apresentar diferentes formas dentro de uma coluna. Estas formas podem ser agrupadas em três categorias (Clift *et al.* 1978):

- Esférica: quando a tensão interfacial e as forças viscosas são mais importantes que as forças de inércia. (Figura 2.5 (a))
- Elipsoidal: bolhas achatadas nos pólos com uma interface convexa em torno da superfície. (Figura 2.5 (b))
- Capa/Touca: grandes bolhas que tendem adotar formas planas e não parecem ter simetria na parte frontal. Observam-se como segmentos cortados de esferas ou esferóides ovulados, além de ter pouca excentricidade. (Figura 2.5(c))

A modelagem destas três formas de bolhas que se elevam livremente no meio contínuo infinito, é dependente de números adimensionais para uma coluna de bolhas. A Figura 2.6 mostra a relação destes números adimensionais para determinar a forma da bolha.

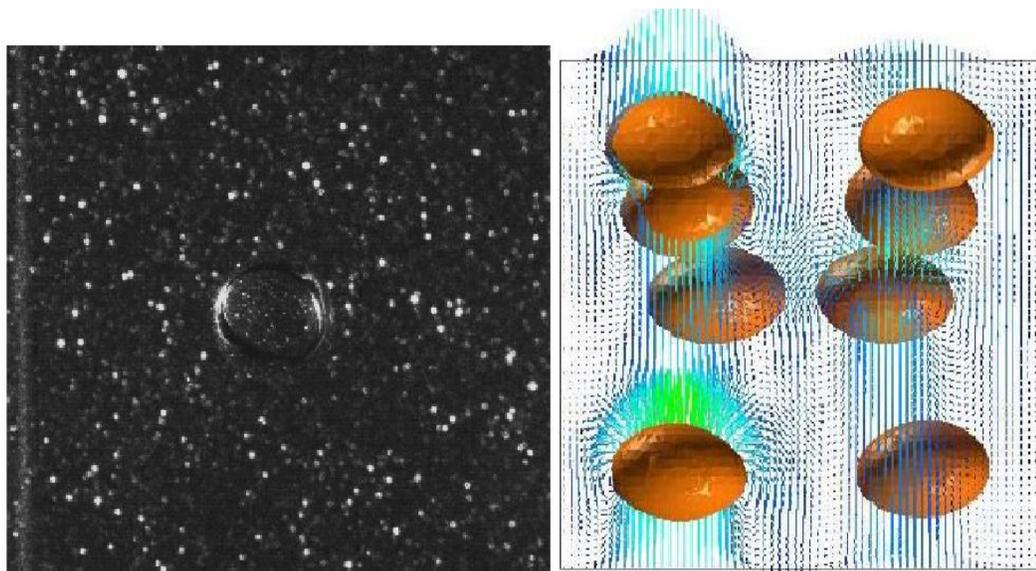
Estes números permitem determinar a forma da bolha, sendo o número de Eötvös quem representa a relação entre as forças de capilaridade e a da gravidade. Enquanto, o número de Morton somente depende das propriedades do fluido no qual a bolha se encontra imersa. Assim, os números de Eötvös (E_o), Morton (M) e Reynolds da bolha (Re_∞), são dados respectivamente por:

$$E_o = \frac{g\Delta\rho d_e^2}{\sigma} \quad (2.5)$$

$$M = \frac{\mu^4 g\Delta\rho}{\rho^2 \sigma^3} \quad (2.6)$$

$$Re_{\infty} = \frac{\rho U d_e}{\mu} \quad (2.7)$$

Onde g é a aceleração da gravidade, ρ é a densidade da fase contínua, $\Delta\rho$ é a diferença entre as densidades das fases, d_e é o diâmetro do volume equivalente de uma esfera, σ é a tensão superficial entre as fases, μ é a viscosidade da fase contínua e U é a velocidade da bolha relativa à fase contínua (Clift, 1978).



a) Esférica

b) Elipsoidal



c) Touca/CAP

Figura 2.5 – Formato básico de bolhas (Pelcastre, 2006).

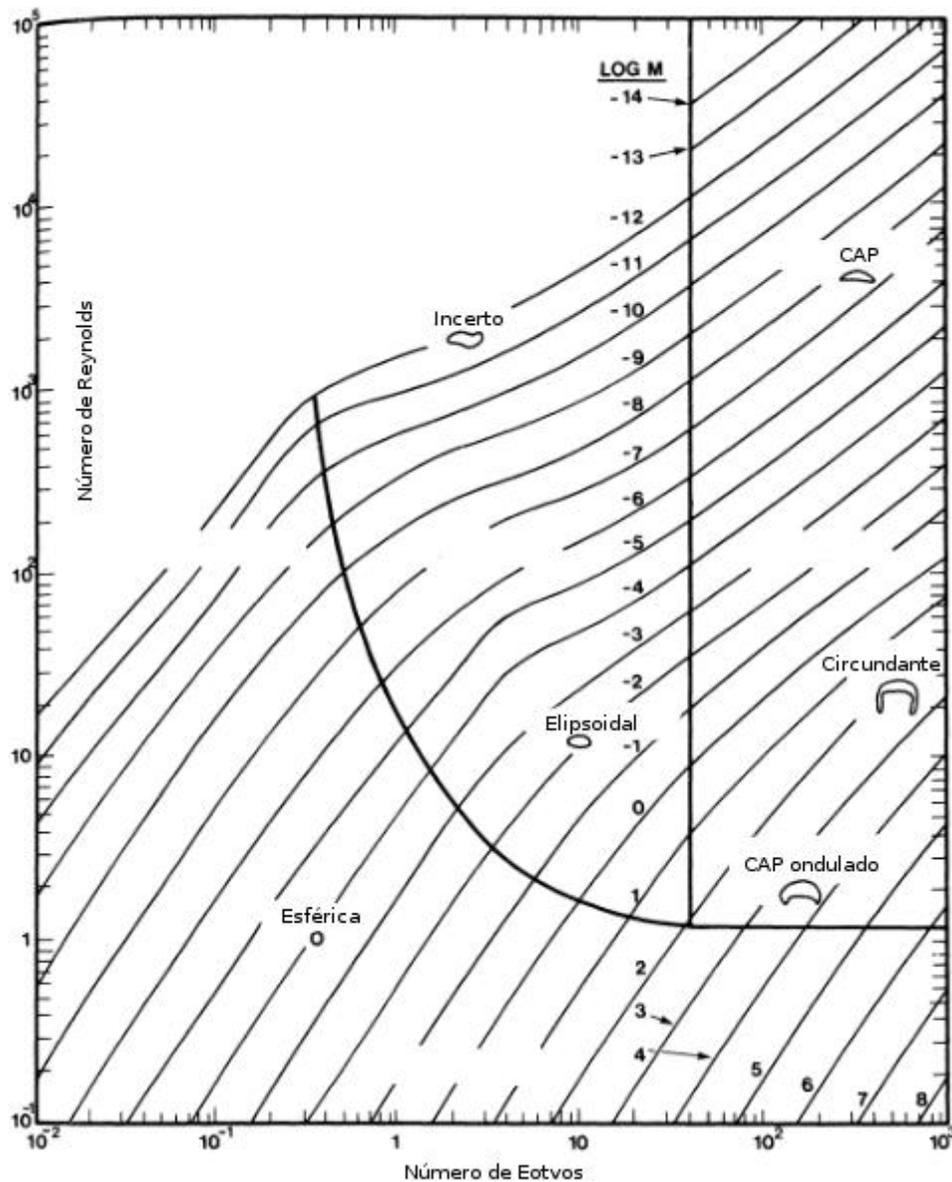


Figura 2.6 Forma das bolhas segundo os números adimensionais (Clift, 1978).

2.4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO

A maioria das investigações relacionadas com colunas de bolhas está dirigida a quantificar os efeitos das condições de operação, propriedades do sistema e dimensionamento da coluna em relação ao seu rendimento. Técnicas de análise visual ou de correlação de imagens são utilizadas para determinar campos de velocidade das duas fases,

e a distribuição local do tamanho de partícula através do sistema considerado (Bröder e Somerfeld, 2007). Dependendo do tamanho da escala, faz-se a escolha do tipo de abordagem a ser empregada. Os métodos comumente utilizados para a medição da velocidade da bolha incluem fotografias de alta resolução e uso de métodos intrusivos e não intrusivos (Kulkarni e Joshi, 2005).

Os métodos não intrusivos são aqueles que utilizam um traçador ou indicador, o qual é introduzido no escoamento para transformar o padrão de fluxo visível através de um equipamento de detecção adequado localizado fora do campo de fluxo. O uso desta técnica permite medir a intensidade da turbulência, tamanhos de bolha e velocidades ascendentes em sistemas transparentes (Joshi *et al.* (2005)).

Nas medições com métodos intrusivos um elemento detectante é introduzido no campo do escoamento. Assim, os perfis da velocidade e intensidade da turbulência se determinam pelas mudanças da natureza mecânica, física e química do elemento (Soares, 2005).

Dentre estes dois métodos, pode-se destacar as técnicas: Phase-Doppler, técnicas de medição acústica, velocimetria por imagem de partícula (PIV), velocimetria por rastreamento de partícula (PTV), e técnicas holográficas. Muitas destas registram somente as propriedades de uma fase, deste modo, se faz necessário a combinação de mais de uma técnica de medição (Bröder e Somerfeld, 2002).

Neste trabalho será utilizada a técnica não intrusiva PIV e a técnica de sombras *Shadow*, como ferramentas para obter dados do escoamento multifásico em uma coluna de bolhas retangular.

2.4.1 Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV)

A técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV) é utilizada para captar o campo de velocidade instantânea do fluido através da medição do deslocamento de partículas inseridas no escoamento. Alguns destes sistemas possuem como principal desvantagem a baixa frequência de aquisição de dados, pelo fato de analisar um campo espacial e não um único ponto (Galliani, 2011).

As principais características que fazem desta técnica uma boa ferramenta para o desenvolvimento dos estudos e investigações são:

1. A margem da velocidade vai desde zero até a condição de fluxo supersônico.
2. Os mapas dos vetores da velocidade são obtidos instantaneamente sobre a seção transversal do fluido.
3. Pode-se obter os três componentes dos vetores da velocidade mediante o acoplamento de duas câmeras CCD.
4. Permite se obter a sequência dos mapas de velocidade, realizar estudos estatísticos e correlações espaciais.
5. Uma característica importante está relacionada à similaridade dos dados microscópicos com os dados obtidos através de fluidodinâmica computacional.

Uma das dificuldades de utilizar esta técnica no estudo de fluxo de bolhas se deve à forte absorção dos penetrantes feixes de luz pela dispersão na superfície das bolhas, por isso as medições limitam-se à pequenas seções de fluxo e pequenas frações de gás (Bröder e Sommerfeld, 2002). Além de não poder-se fazer medidas a altas frações volumétricas de gás.

2.4.2 Técnica de Medição de Sombras (*Shadow*)

A técnica de medição *Shadow* é empregada para visualizar partículas e baseia-se na diferença de contrastes entre a partícula e o meio. O sistema *Shadow* atua como um projetor de contorno da partícula. Esta técnica é independente da forma e material da partícula, e permite estudar partículas com tamanhos menores de 5 μm . Sua vantagem deriva da simplicidade experimental combinada com a percepção integral do processo examinado (Constantin, 2002).

O acoplamento das técnicas *Shadow* e PIV permite obter resultados com alta precisão sem a presença de interferência entre os sinais das fases (Nogueira *et al.* 2003). A Figura 2.9 mostra o princípio de aquisição de imagens combinando uma capa de luz *laser* que ilumina as partículas traçadoras fluorescentes e a imagem da sombra das bolhas. A

parte superior mostra o registro das imagens das partículas e a inferior o registro das imagens das bolhas.

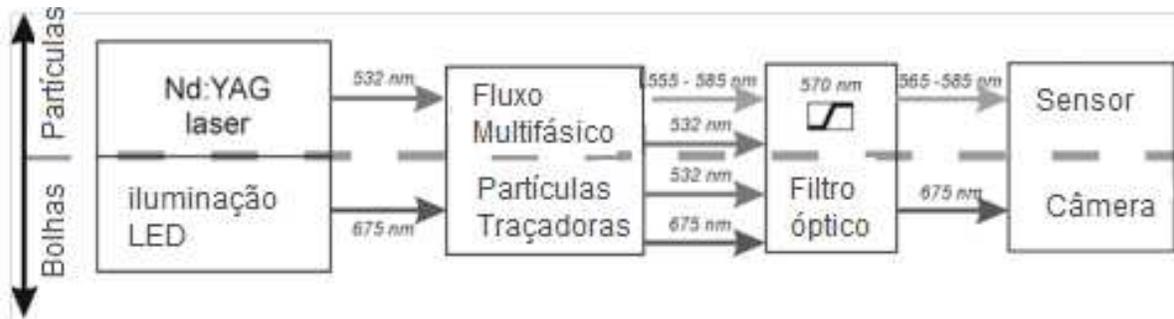


Figura 2.7 Princípio de funcionamento do sistema PIV/Shadow
(Adaptado de Lindken e Merzkirch, 2002).

Vários estudos referentes à aquisição experimental de dados em sistemas multifásicos gás-líquido, têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Chen *et al.* (1999), comparam o comportamento hidrodinâmico de uma coluna de bolhas usando as técnicas CARPT/ CT e PIV, encontram que as velocidades medidas através de CARPT (computer automated radioactive particle tracking) são obtidas em uma faixa de coluna maior e com maior número de partículas traçadoras em grandes períodos de tempo (mais de 20 horas). Enquanto, o uso da técnica PIV permite obter perfis de velocidade de uma pequena seção da coluna utilizando menor número de partículas traçadoras para períodos de tempo entre 8-15 s. Assim, pode-ser utilizada a técnica CARPT para obter um conjunto confiável de quantidades médias que avaliam o comportamento em longo prazo do fluxo do líquido no campo de escoamento em uma coluna de bolhas. Em comparação, a técnica PIV se adapta a toda a estrutura do campo instantâneo de escoamento da fase líquida em um plano dado, devido a sua capacidade de avaliar o acoplamento dos efeitos do campo de fluxo. Os autores concluíram que o uso das técnicas CARPT, PIV e CT, em conjunto permite obter uma perspectiva integral da complexa estrutura turbulenta de escoamentos bifásicos em colunas de bolhas.

Deen *et al.* (2000) compararam os métodos de medição multifásica PIV e LDA (Velocimetria Laser Doppler) com o objetivo de proporcionar resultados que possam ser utilizados para simulações multifásicas em CFD, e para avaliar os diferentes métodos de aquisição e análise em medições multifásicas. Os autores combinaram o método de

fluorescência induzida por *laser* e a técnica PIV (PIV/LIF), usando duas câmaras e partículas traçadoras. Encontraram que as duas técnicas apresentam a mesma tendência qualitativa, porém, as medições com LDA exibem maiores valores das flutuações. Além disto, a técnica PIV/LIF serve para medições de vários pontos de um campo de velocidade, em comparação à técnica LDA.

Bröder e Sommerfeld, (2002) desenvolveram um sistema combinado PIV e PTV para medir simultaneamente o tamanho, velocidade da bolha, e velocidade do líquido, com o objetivo de obter modelos mais confiáveis dos processos de coalescência em fluxos turbulentos de bolhas utilizando uma unidade experimental *Double Loop*. Sugerem que este tipo de técnica pode ser aplicado a vários modos de operação, especialmente para altos *hold-up*. Afirmam que medições simultâneas de tamanho de bolha, sua velocidade e velocidade do líquido permitem um sofisticado pós-processamento de dados para analisar parâmetros como taxas de colisão e correlações entre os componentes flutuantes.

Thet *et al.* (2006) realizaram estudos experimentais relacionados à hidrodinâmica e ao regime de transição em coluna de bolhas. Analisaram o efeito do número e da posição dos furos na hidrodinâmica utilizando a técnica PIV. Concluíram que a técnica é útil para caracterizar as propriedades médias de areação com resolução apropriada para os diversos estudos.

Alguns autores mostram os resultados obtidos ao utilizar juntamente a técnica de sombras (*Shadow*) e a técnica PIV no estudo do comportamento de fluxos borbulhantes. Lindked e Merzkirch (2002) utilizam uma montagem para caracterizar a influência das bolhas na turbulência da fase líquida, conhecida também por pseudo-turbulência. Combinaram o princípio de uso de partículas fluorescentes como traçador (PIV) e o mascaramento digital *Shadow* em fluxos borbulhantes de duas fases. A distribuição da velocidade da fase contínua (água) e dispersa (bolhas) foram determinadas simultaneamente por uma câmera em preto e branco. Eles demonstraram que a vantagem deste método se deve a não interferência entre os sinais das fases, e sua alta precisão no cálculo de derivações turbulentas a partir dos dados.

Nogueira (2003) aplicou simultaneamente a técnica PIV e de impulso de sombras (PTS) para determinar a forma da bolha e estudar o padrão de fluxo de líquido ao redor das

bolhas ascendentes em uma solução aquosa de glicerol. As medições foram feitas usando uma câmara CCD em preto e branco obtendo resultados com uma alta precisão. A técnica PTS captura a imagem sombra das bolhas pela câmara CCD, e o comportamento das bolhas de gás é avaliado pelo algoritmo de velocimetria de rastreamento de partícula (PTV). Enquanto, a técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV) é empregada para determinar a velocidade da fase líquida.

Bröder e Sommerfeld, (2007) desenvolveram uma técnica de alta resolução baseada em iluminação de fundo combinando as técnicas *Shadow*, PTV e PIV. Suas medições permitem obter os campos de velocidade do líquido e das bolhas, assim como o tamanho, forma e orientação destas. Utilizaram uma câmara CCD de imagem dupla e um *software* associado de processamento de imagem para realizar medições em linha dos fluxos borbulhantes trabalhando a altos valores de *hold-up*. Os autores determinaram a distribuição do tamanho da bolha, velocidades médias e flutuantes para as duas fases a partir da avaliação de 500 imagens duplas, proporcionando dados detalhados da hidrodinâmica dos fluxos sendo dirigidos por bolhas. Encontraram a ocorrência da coalescência das bolhas pela mudança na distribuição do tamanho da bolha, além do seu caráter fortemente anisotrópico. Observaram também, que este método permite obter resultados adequados da hidrodinâmica de fluxos borbulhantes e informação detalhada do comportamento e propriedades das bolhas.

Em estudos posteriores Bröder e Sommerfeld, (2009), realizaram análises experimentais utilizando PIV e a técnica PTV para determinar a hidrodinâmica de uma coluna de bolhas de 140 mm de diâmetro interno. Estudaram diferentes distribuidores de gás e estabeleceram que as flutuações das bolhas na direção radial são maiores devido ao movimento helicoidal (*zig-zag*) das bolhas. Além disso, mostraram que se pode determinar a velocidade das bolhas em uma fração volumétrica de gás de até 16%, fenômeno que se associa ao incremento na absorção da luz pelas bolhas de gás. O sistema utilizado conta com uma iluminação de fundo com uma matriz LED e uma câmera CCD que permite capturar ao mesmo tempo as imagens do traçador e da bolha. Os resultados obtidos indicam a influência da flutuação das bolhas no comportamento do escoamento e na produção da turbulência. Os autores encontraram que a resolução da técnica *Shadow* foi suficiente para determinar o contorno da bolha e, portanto, estudar com maior detalhe seu comportamento.

Em seu trabalho Sathe *et al.* (2010), apresentaram dados da forma, tamanho, velocidade e aceleração das bolhas utilizando a técnica *Shadow* e a técnica PIV/LIF com partículas traçadoras fluorescentes para determinar a velocidade do líquido. As medições foram feitas numa coluna retangular com fração volumétrica de gás de 6%, e uma variação de tamanho de bolha entre 0,1-15 mm. Seus resultados mostram que depois de grandes tempos de medição e uma média de 1000 campos de vetores para ambas as fases, a estrutura na coluna não é simétrica, indicando a sensibilidade no movimento das bolhas em relação a pequenos distúrbios.

2.5 PONTOS DE INVESTIGAÇÃO

Com base na fundamentação teórica apresentada anteriormente, pode-se observar que mesmo a literatura sendo ampla neste assunto, ainda é necessária a aquisição de medidas experimentais confiáveis que permitam testar a aplicabilidade dos modelos matemáticos utilizados nas simulações, e assim, realizar posteriores validações numéricas.

A obtenção de dados experimentais microscópicos será realizada através da técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV) e pela técnica de medição de sombras (*Shadow*), para adquirir dados da velocidade axial média, flutuações da velocidade, tamanho de bolha e distribuição do tamanho da bolha para a fase líquida e gás, respectivamente.

Esta pesquisa vai ajudar a compreender a fenomenologia de escoamentos multifásicos por meio de dados experimentais em dispositivos como colunas de bolhas, que permitam corroborar dados numéricos obtidos através de estudos com fluidodinâmica computacional.

Capítulo 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo deste capítulo apresenta-se uma descrição detalhada dos materiais utilizados durante a experimentação, os parâmetros e a metodologia empregada para a obtenção dos dados estudados.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

3.1.1 Materiais

Para o desenvolvimento experimental do sistema gás/líquido, têm-se ar como gás alimentado à coluna e água destilada como fase líquida inicialmente estacionária na coluna.

Para permitir as medições dos campos de velocidade do líquido foram utilizadas como partículas traçadoras, uma resina de carboxiacrilato modificada, com diâmetro médio de 15 μm , massa específica de 1100 Kg/m^3 , índice de refração de 1,560 e fluorescência devido à presença de Tetraetil Rodamina B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$).

A escolha da partícula é feita pelo comprimento de onda emitido pelo *laser* para a iluminação do sistema que é de 532 nm, e por representar o escoamento dado ao baixo número de Stokes. Portanto, devido às suas características de absorção, forte na faixa de comprimento de onda entre 460 e 590 nm, e emissão na faixa de 610 a 740 nm, permitem que a partícula absorva a radiação na cor verde (532 nm) e emita em torno do laranja avermelhado ($590 \text{ nm} < \lambda_{\text{laranja}} < 625 \text{ nm} < \lambda_{\text{vermelho}} < 740 \text{ nm}$).

3.1.2 Estrutura Experimental e Equipamentos

A estrutura da bancada experimental consta de uma coluna de bolhas ligada a um sistema de medição PIV e ao sistema de medição *Shadow*, como se apresenta na Figura 3.1.

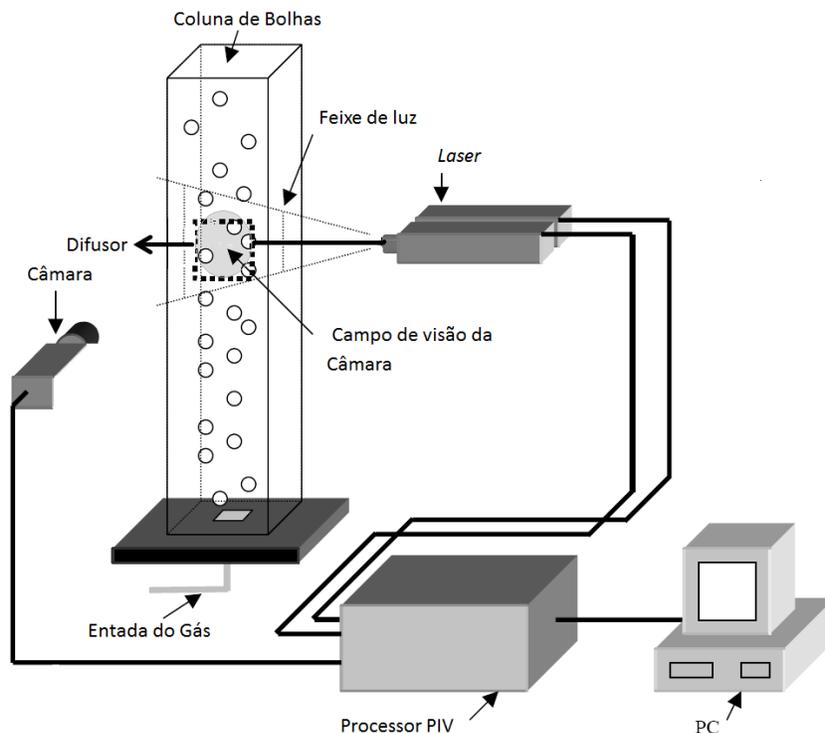


Figura 3.1 Diagrama Representativo da unidade da Coluna de bolhas – PIV e *Shadow* (Adoptado de Deen, 2000).

3.1.2.1 Coluna de Bolhas.

A coluna utilizada tem geometria retangular é feita de acrílico, esta geometria garante a eliminação de distorções óticas geradas pelas curvaturas da parede do equipamento. Possui uma área transversal de 1000cm^2 e uma altura de 220 cm, e a base da coluna se encontra conectada uma linha de injeção de gás (Figura 3.2).

Para o desenvolvimento dos experimentos, o distribuidor da fase dispersa (gás) é feito de 18 furos, dispostos em três linhas com 6 cada. Os furos possuem 1 mm de diâmetro, e o espaçamento entre eles é de 20 mm. Esta disposição visa conseguir melhores resultados em análises realizadas pela técnica *Shadow*. Para direcionar a fase gás para os furos do distribuidor é acoplado ao sistema um difusor na parte inferior deste, isolando uma

área do distribuidor que não há furos. A Figura 3.3 mostra um diagrama representativo da placa distribuidora.

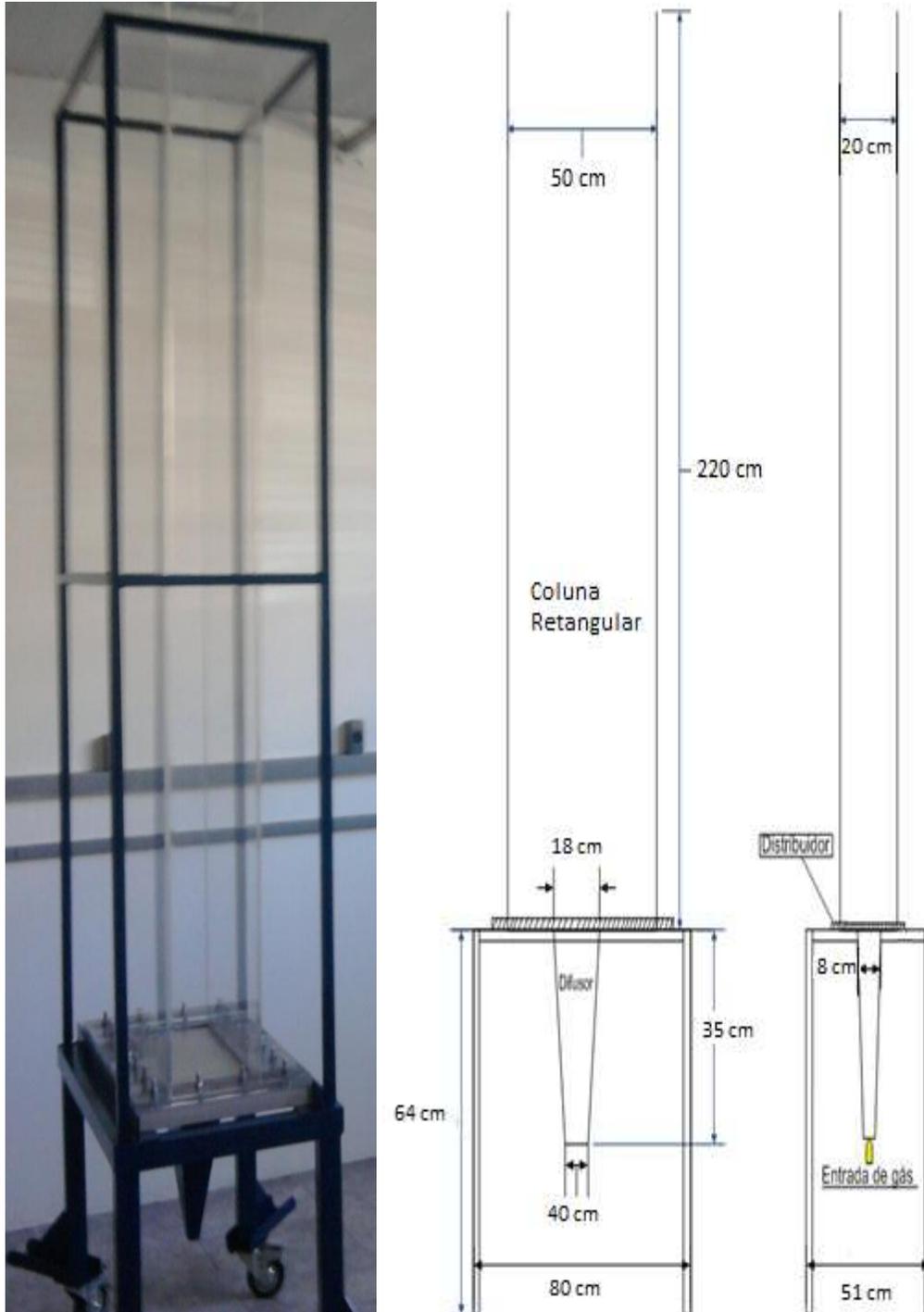


Figura 3.2 Imagem da coluna de bolhas do laboratório experimental do LPQGe.

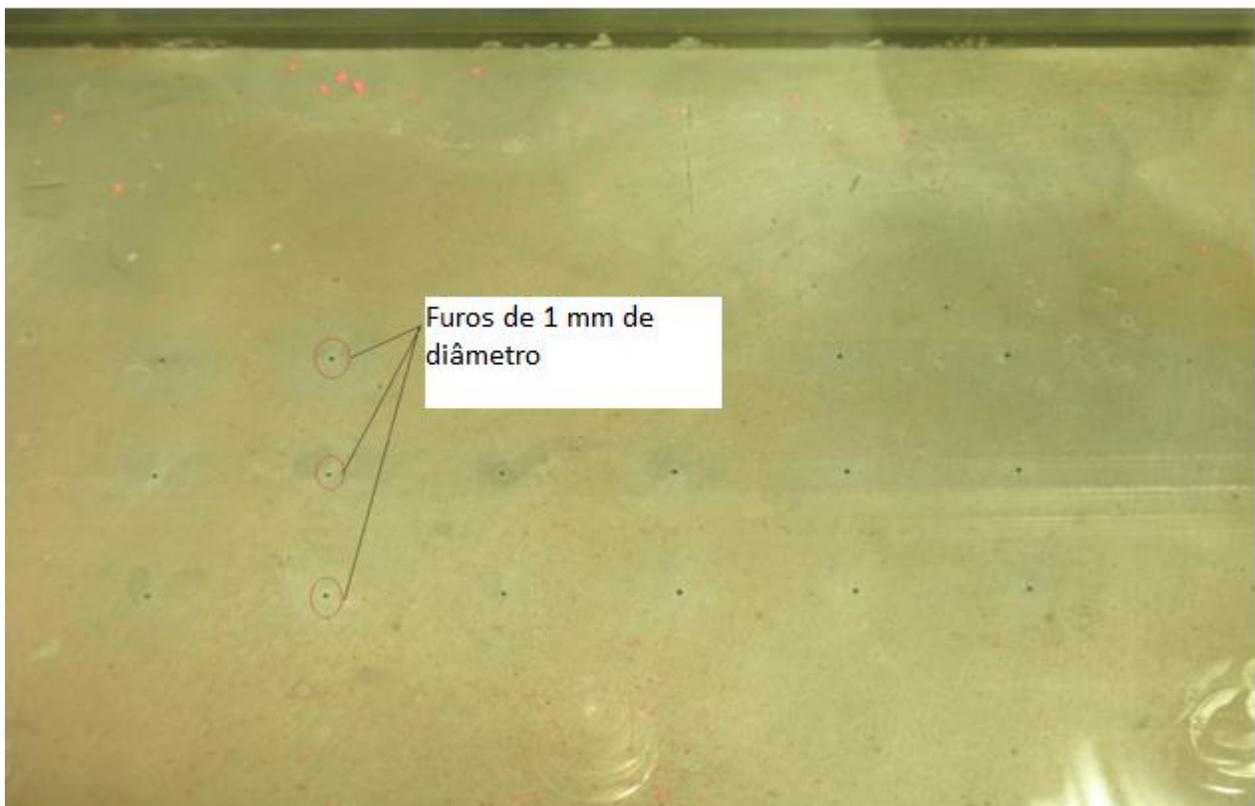
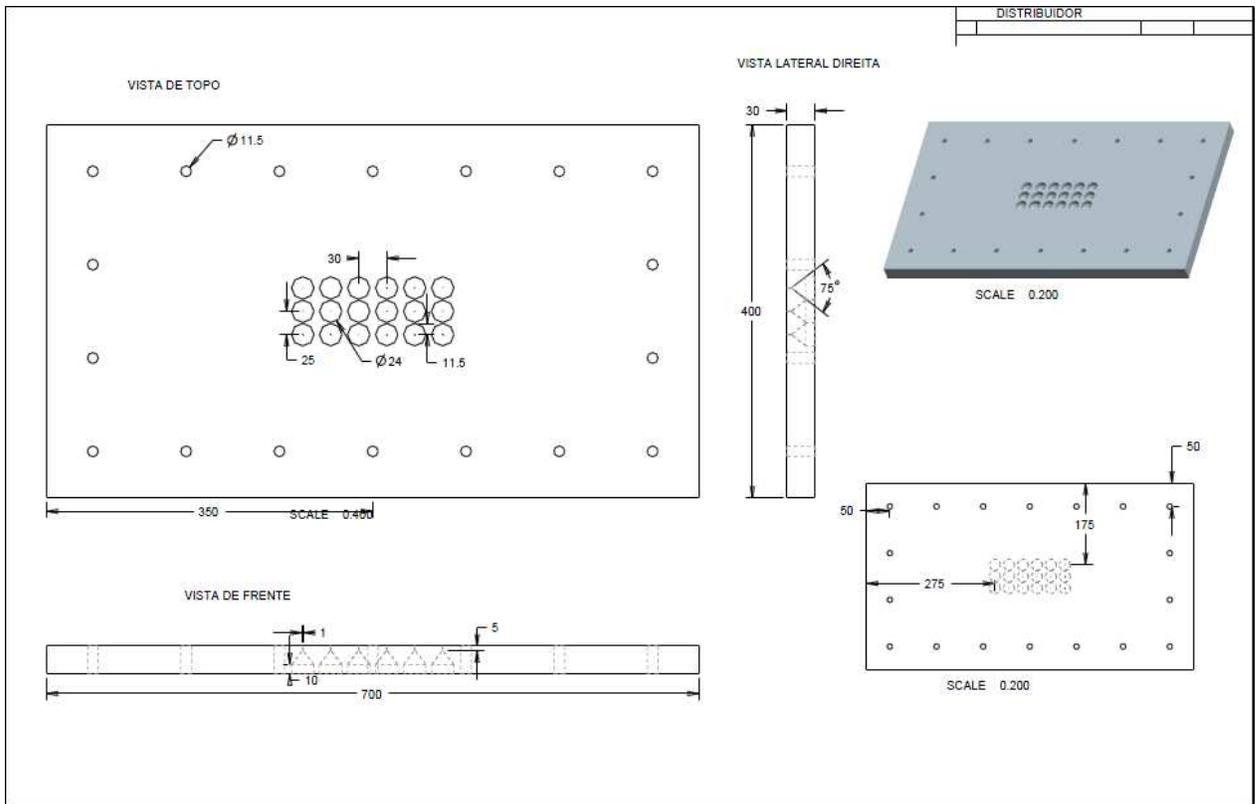


Figura 3.3 Diagrama Representativo da geometria do distribuidor de placa (18 furos).

3.1.2.2 Sistema de Ar Comprimido

O ar alimentado a coluna de bolhas provém de um sistema de ar comprimido que consta de um compressor de parafuso modelo GX2 P CSA/UL da *Atlas Copco*, que trabalha a 20 bar como pressão de operação. Na saída do compressor há uma válvula de redução de pressão para manter a pressão constante à jusante.

A linha de ar se encontra dividida em duas partes, uma direcionada para o ramo de injeção de ar na coluna e outra para o ramo utilizado para condições extremas de vazão. Após a válvula reguladora de pressão é instalado o medidor de vazão, tipo microturbina de 0 a 100L/min, modelo M, da *Alicat Scientific*, que por sua vez é conectado por uma tubulação de aço carbono de diâmetro 19,05mm que leva o ar até a câmara de mistura na base da coluna, localizada abaixo da placa distribuidora.

3.1.2.3 Sistema de Destilação de água

A água (fase líquida) utilizada para preencher a coluna é água destilada com objetivo de se evitar qualquer tipo de interferência nas medições, esta água é obtida de um processo de destilação efetuado no laboratório experimental do grupo LPQGe.

O sistema de destilação consta de um destilador FADEM modelo 724, um tonel de 200L e dois barriletes de armazenamento de 50L cada. Para aproveitar a água descartada da destilação usa-se uma bomba de recirculação Nikkiso Magpan modelo CP30-PPRE-10.

3.1.2.4 Sistema de medição PIV

3.1.2.4.1 Princípio de funcionamento

O princípio da técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV) é mostrado na Figura 3.4. Esta técnica consiste em um feixe de luz *Laser* aplicado diretamente no fluxo, iluminando as pequenas partículas traçadoras que estão suspensas no fluido, permitindo capturar imagens cada dois instantes de tempo consecutivos (Liu *et al.* 2007). A luz refletida pelas partículas precisa ser gravada numa sequencia de imagens, etapa chamada de pós-processamento.

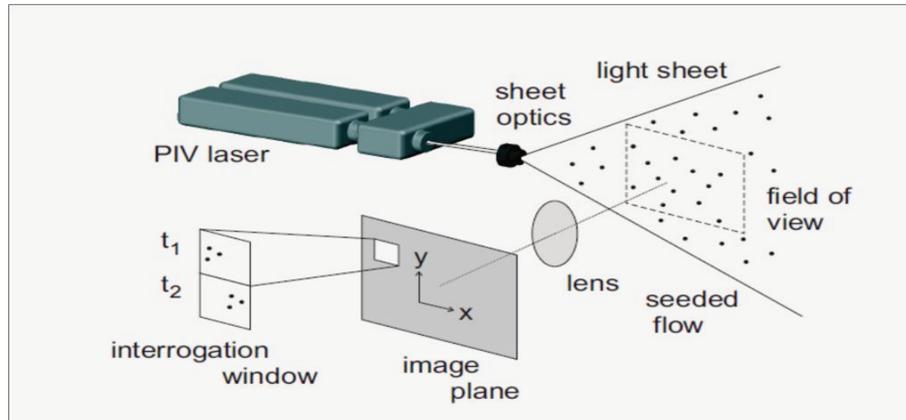


Figura 3.4 Esquema representativo da configuração do sistema PIV 2D (LaVision, 2007).

Partículas traçadoras

Velocimetria por imagem de partícula é uma técnica não intrusiva que se baseia em partículas traçadoras suspensas no fluido, as quais se movimentam através do campo de fluxo turbulento (Kulkarni e Joshi, 2005). Numa situação ideal, estas partículas devem ser marcadoras do escoamento de modo perfeito, sendo homogeneamente distribuídas para não alterar as propriedades do fluxo, as quais influenciam na sua escolha, além das características do laser e a capacidade de dissipação da luz. Estas partículas devem ter um tamanho ótimo, suficientemente pequeno para seguir o escoamento sem que haja efeito sobre o escoamento e o suficientemente grandes para assim dissipar a quantidade de luz necessária para gerar as imagens (Jensen, 2004).

Esta habilidade das partículas de seguir o escoamento está dada por o número de Stokes da partícula (St), que relaciona o tempo de reação da partícula (τ_{din}) e o tempo característico de escoamento (τ_{esc}) (Albrecht *et al.* 2002), conforme:

$$St = \frac{\tau_{din}}{\tau_{esc}} \quad (3.1)$$

Para partículas com $St < 0,1$ a densidade da partícula é desprezada. Assim, o movimento do traçador representa a fase fluida. No caso que o número de Stokes este entre

0,1 e 0,5, as partículas apresentam um comportamento intermediário, estando mais dispersas que as partículas fluidas. Quando $St > 0,1$, a partícula possui comportamento próprio e não se encontra afetado pelo fluxo de gás, não representando as características do escoamento.

Câmera CCD

A captura das imagens é feita por uma câmera com sensores elétricos CCD (charge coupled device), que convertem luz em carga elétrica. Um sensor CCD tem elementos de resolução, denominados *pixel*, cuja ordem de tamanho é de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$. A resolução deste tipo de câmeras é de até 4096×4096 *pixels*, e a taxa de repetição é aproximadamente de 33ms. Quanto maior for o número de *pixels*, maior será a resolução da imagem, já que o *pixel* é um elemento de resolução bidimensional da imagem.

Laser

Em sistemas PIV, o *laser* é utilizado pela sua habilidade em emitir luz monocromática com alta densidade de energia na forma de finos feixes de luz para iluminar as partículas traçadoras. Geralmente, este laser é de um cristal chamado Ítrio-Alumínio-Granada dopado com íon de Neodímio, Nd:YAG. A excitação de seus átomos é conseguida através da adição de energia fornecida por uma fonte de radiação eletromagnética que emite luz branca. Em condições normais de operação, este *laser* emite um comprimento de onda de 1064 nm, frequência dobrada por cristais especiais quando o comprimento de onda corresponde a 532 nm (Raffel *et al.*, 1998).

Em aplicações para sistemas PIV 2-C o sistema *laser/câmera* esta acoplado via unidade sincronizadora que dispara os eventos na sequência correta. O sincronizador conecta o computador, o captador de quadros, a câmera e o laser. Seu controle é feito através de um *software*, no caso o *Davis 7* da *LaVision*, que permite gerenciara as medições e o qual é manipulado pelo usuário.

Processador digital de imagens

Durante o processamento das imagens são extraídos os perfis de velocidade do escoamento. As imagens capturadas são divididas em subáreas, chamadas de “áreas de interrogação”. Para obter informação dos vetores locais de deslocamento são realizadas

análises estatísticas de correlação cruzada para cada uma destas áreas. Assume-se que todas as partículas localizadas dentro de uma área de interrogação se movimentam homogeneamente entre as duas iluminações (Jensen, 2004). Assim, a velocidade local do fluido v , é obtida dividindo o deslocamento medido, Δx , pelo intervalo de tempo entre as duas imagens Δt , como se expressa na Equação (3.2):

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.2)$$

A velocidade média (\bar{v}) é calculada aplicando a média aritmética, segundo:

$$\bar{v} = \frac{1}{n_a - 1} \sum_1^{n_a} v_i \quad (3.3)$$

Onde n_a corresponde ao número total de amostras e v_i à velocidade instantânea do fluido.

Enquanto a flutuação média da velocidade (v') está definida por:

$$v' = \left[\frac{1}{n_a - 1} \sum_1^{n_a} (v_i - \bar{v})^2 \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

Apesar desta técnica permitir determinar os vetores da velocidade nas proximidades da interface gás-líquido e das paredes, esta não determina a posição exata da interface e em consequência o tamanho da bolha. Por esta razão se utilizam técnicas complementares como a técnica de medição *Shadow* (Nogueira *et al.* 2003).

O sistema de medição PIV mostrado na Figura 3.5 está composto por:

- Câmera CCD - *Charged Couple Device* - ou Dispositivo de Carga Acoplado. A resolução da câmera é de 1376x104 pixel, modelo *Imager Intense Cross-Correlation*, da *LaVision*. A distância focal da lente é de 60 mm, modelo Micro-NIKKOR *f/2.8 D*, da *Nikon*. A lente objetiva está acoplada a um filtro, modelo VZ070132 da *LaVision*. Assim, permite-se eliminar a luz refletida pelas bolhas e deixar passar por o sensor CCD unicamente o comprimento de onda da luz emitida pela partícula traçadora.
- Sincronizador interno PTU-9, com 10ns de tempo de resolução, da *LaVision*. Sua função é emitir um sinal com tempo definido para emissão da luz da cavidade do laser e o início da captura da imagem pela câmera CCD.
- *Laser* pulsado de Ítrio-Alumínio-Granada dopado com íons de Neodímio, codificado como Nd:YAG. Com duas cavidades, modelo *Big Sky Ultra PIV 50*, da *Quantel*. Cada cavidade gera um pulso de 50 mJ à 532 nm, e é alimentada por uma fonte de energia, modelo ICE 450, da *Quantel*.
- Computador, *INTEL quad core 2*, com 4 Gb de memória e 250 Gb de disco rígido; no qual é controlado o sistema de iluminação e aquisição de imagens através do software *DAVIS 7*, da *LaVision*.

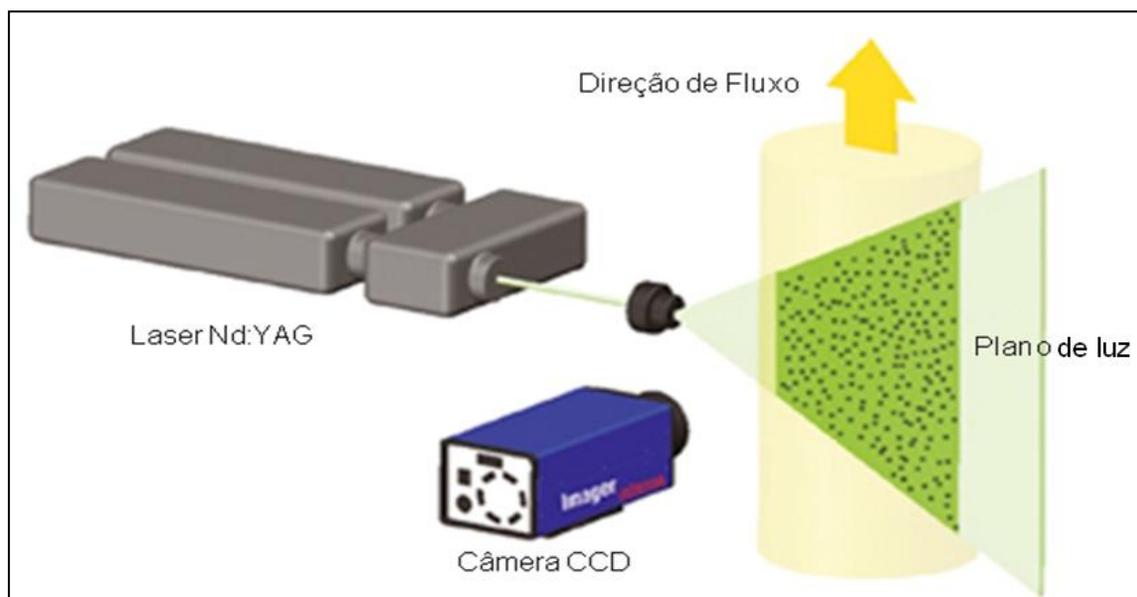


Figura 3.5 Componentes do sistema PIV 2D.
(*LaVision*, 2007).

3.1.2.1 Sistema de medição de sombras (*Shadow*)

Este sistema consiste de um Sistema PIV associado a difusor de *laser* (Figura 3.6). O filtro é acoplado à cabeça do *laser* e a luz filtrada é transportada até o difusor por uma fibra ótica, desta forma se captam e gravam as imagens sombra projetadas pelas bolhas quando são iluminadas.

Analogamente à técnica PIV, é realizada uma sincronização e, neste caso controlada pelo módulo *Shadow* da empresa *LaVision*.

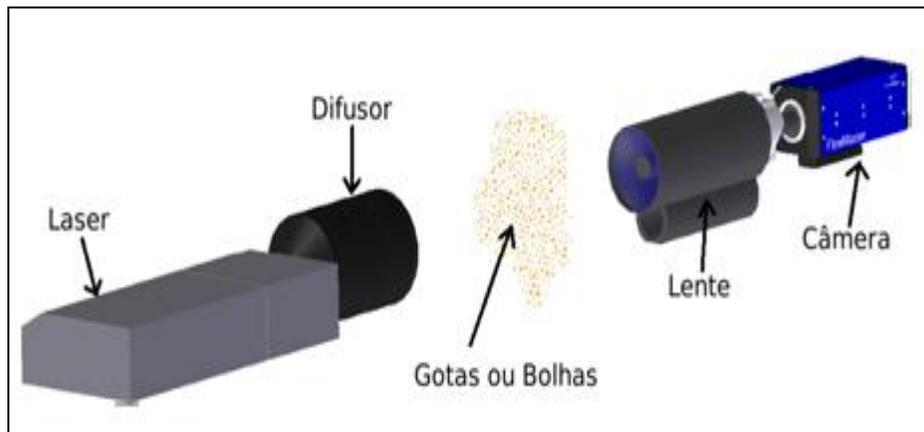


Figura 3.6 Componentes do sistema *Shadow*.
(Adaptada de *LaVision*, 2007).

A fonte fornecedora da luz depende do tamanho e velocidade da partícula, como um *laser* pulsado. A combinação de um *laser* de pulso duplo com uma câmera de *double-frame* permite obter dados da dependência do tamanho com a velocidade, e fornece informações relacionadas à forma, tamanho, distribuição e velocidade da partícula. A iluminação deve atingir o campo completo de visão de escoamento e permitir congelar o movimento das partículas observadas. Geralmente se utiliza um difusor com comprimento de onda deslocado do feixe de luz gerado pelo laser. O difusor é um suporte para uma lente negativa, cujo comprimento pode variar, obtendo assim a expansão necessária do feixe de laser de entrada. A Figura 3.7 mostra o difusor combinado com a frequência dupla de laser Nd: YAG ($\lambda=532\text{nm}$) (manual *DAVIS 7*, da *LaVision*).



Figura 3.7 Laser e difusor óptico para sistema *Shadow*.

A aplicação desta técnica permite obter dados estatísticos relacionados às características das bolhas como o diâmetro médio e o diâmetro de *Sauter*, calculados pelas Equações 3.5 e 3.respectivamente.

$$D_{p10} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{pi} \quad (3.5)$$

$$D_{p32} = \sum_{i=1}^N \frac{D_{pi}^3}{D_{pi}^2} \quad (3.6)$$

Com N igual ao número total de partículas, D_{pi} diâmetro da partícula i , D_{p10} diâmetro médio e D_{p32} diâmetro de *Sauter*.

3.2 METODOLOGIA

A fim de detalhar a dinâmica do escoamento na coluna de bolhas, propõe-se avaliar os efeitos da vazão volumétrica da fase gás e altura de líquido na coluna de bolhas sobre as respostas do sistema. Antes de tomar as medidas precisas da velocidade das duas fases e do diâmetro da bolha, deve-se calibrar o sistema de medição PIV e *Shadow*.

3.2.1 Calibração do Sistema de Medição PIV

O objetivo de calibrar o sistema de medição PIV é associar a imagem capturada com uma escala de tamanho real associada ao objeto medido. O resultado obtido depende da distância da câmera em relação à coluna e ao ajuste do foco. Assim, posiciona-se no plano de medida um dispositivo com espaçamento conhecido, fita métrica, e ajusta-se o foco da câmera. A imagem capturada permitirá associar uma grandeza real a um comprimento em pixels e chegar à escala imagem/objeto (Figura 3.8).

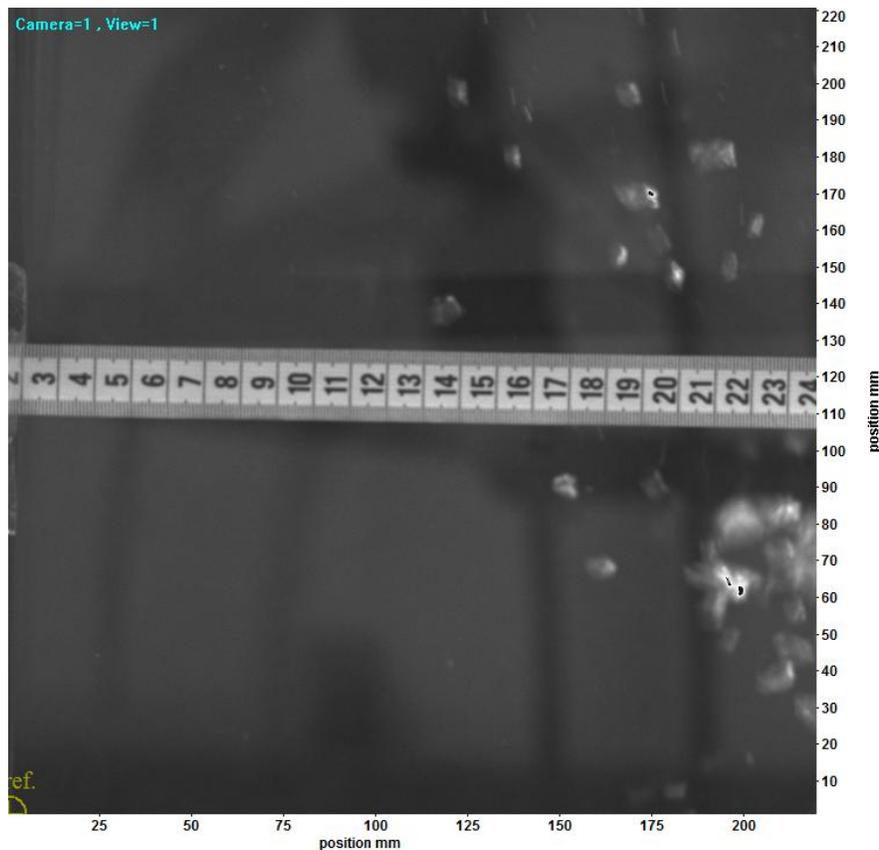


Figura 3.8 Imagem de calibração do sistema PIV.

3.2.2 Calibração do Sistema de Medição de sombras (*Shadow*)

A calibração do *Shadow* é feita da mesma maneira que a descrita para a técnica PIV. Feito o ajuste do foco, captura-se uma imagem para determinar a relação *pixel/comprimento* (Figura 3.9)

Para a amostragem dos dados precisa-se de uma imagem de referência sem a presença de partículas (Figura 3.10). Com esta, inverte-se a imagem capturada, subtraindo assim à imagem de referência a capturada. Assim, com a imagem invertida, as maiores intensidades da escala de cinza estão na partícula e os menores no fundo (Figura 3.11).

A imagem obtida pode ser normalizada pela imagem de referência para evitar erros sistemáticos de iluminação não homogênea do fundo.

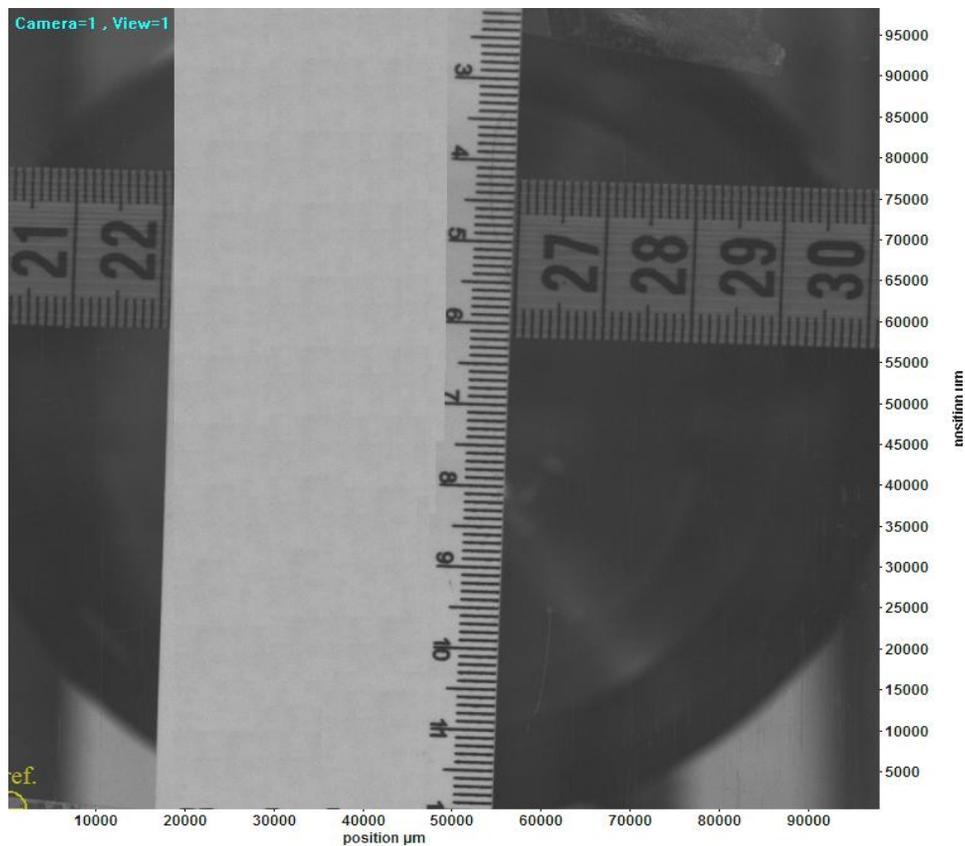


Figura 3.9 Imagem de calibração do sistema *Shadow*.

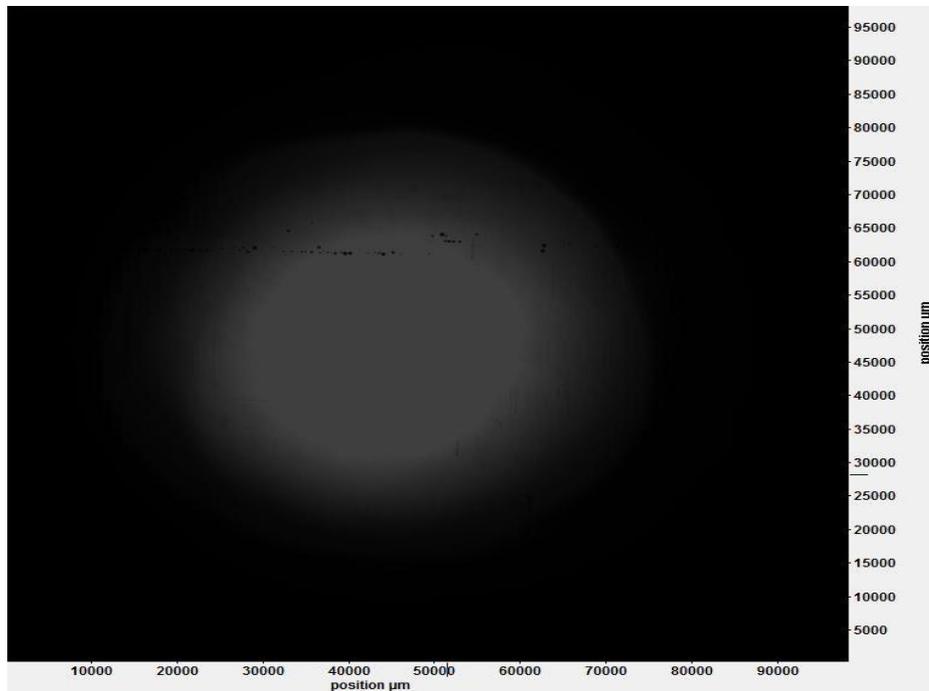


Figura 3.10 Imagem de referência do *Shadow*.

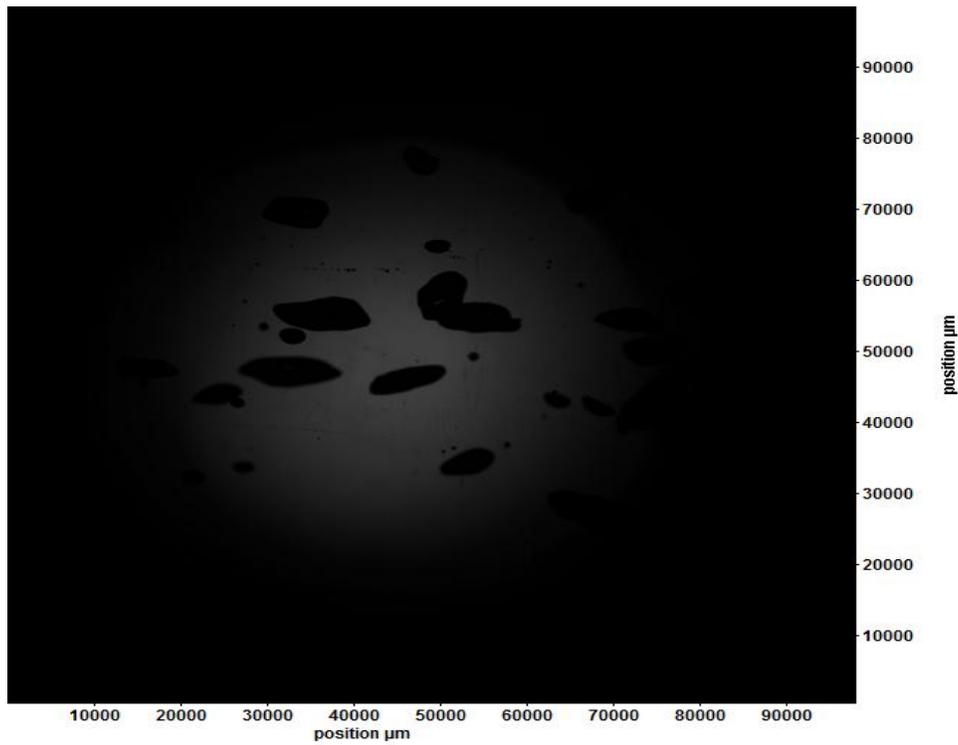


Figura 3.11 Imagem Invertida *Shadow*.

3.2.3 Parâmetros operacionais:

Realizada a calibração dos sistemas de medição, prossegue-se um teste de fotos para estabelecer a mínima quantidade de imagens que permitam atingir resultados coerentes.

Assim, a amostragem de dados e o processamento das imagens são realizados na seguinte maneira; inicialmente são coletadas e processadas 2500 imagens duplas (técnica PIV), número suficiente para obter os perfis estatísticos confiáveis da velocidade e valores médios de velocidade, flutuação da velocidade, intensidade de turbulência, tensores de Reynolds e energia cinética turbulenta da fase contínua. Enquanto que, para a o estudo da fase dispersa são validadas 3000 imagens (técnica *shadow*), para garantir dados suficientes nas medições de distribuição de tamanho da bolha, diâmetro médio aritmético e diâmetro de *Sauter*.

Com o objetivo de avaliar a dinâmica do escoamento gás-líquido na coluna de bolhas se estudaram três velocidades superficiais do gás com uma variação de 0,04 cm/s, assim, as velocidades utilizadas foram 0,05; 0,09; 0,13 cm/s, assegurando regime homogêneo na operação (velocidades menores de 5 cm/s (Thorat e Joshi, 2004)). Neste estudo a altura inicial do líquido foi de 150 cm desde o distribuidor. Para realizar um estudo detalhado da coluna, dividiu-se esta em três regiões, onde cada região corresponde a uma respectiva altura (40, 80, 120 cm desde o distribuidor), como se apresenta na Figura 3.12.

3.2.3.1 Técnica de medição PIV

Para a aplicação desta técnica no escoamento gás-líquido na coluna de bolhas retangular anteriormente descrita, foi necessário dividir cada região vertical em varias seções a fim de se obter todo o campo de escoamento do gás e do líquido (Figura 3.13).

Foi necessário ajustar a intensidade do laser a fim de se garantir imagens com boa resolução. Deste modo, com a coluna em operação, são capturadas imagens e o ajuste da intensidade do *laser* é feito pela observação destas, lembrando que a primeira e a segunda imagem devem ter a mesma qualidade.

Para determinar o intervalo de tempo entre as duas imagens (dt), foi coletado um conjunto de duplas imagens com intervalos diferentes a fim de determinar o melhor

intervalo para a condição experimental. Essa determinação é feita por observação visual de forma que a partícula traçadora movimente-se aproximadamente cinco *pixels*.

No caso da técnica de medição de velocimetria por imagem de partícula os parâmetros utilizados se resumem na Tabela 3.1

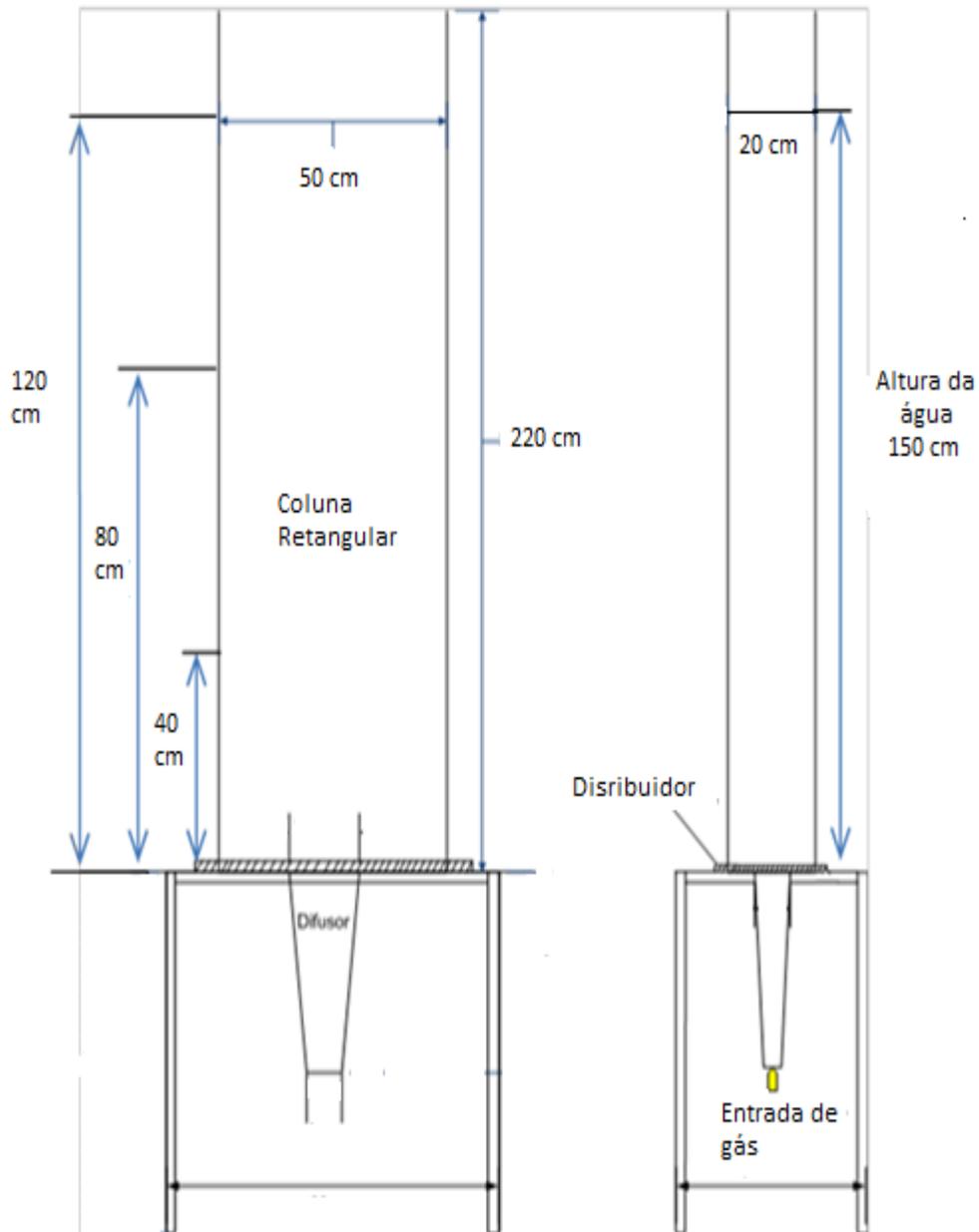


Figura 3.12 Esquema representativo das regiões de medição da coluna.

Tabela 3.1 Parâmetros operacionais utilizados na técnica de medição PIV.

Altura Coluna [cm]			Posição de medição [cm]			Intensidade do Laser [%]		Velocidade Superficial do gás [cm/s]	dt[μ s]
						Laser A	Laser B		
40	80	120	0-19 [E]	19-40 [C]	31-50 [D]	45	43	0,05	7000
								0,09	6000
								0,13	5000

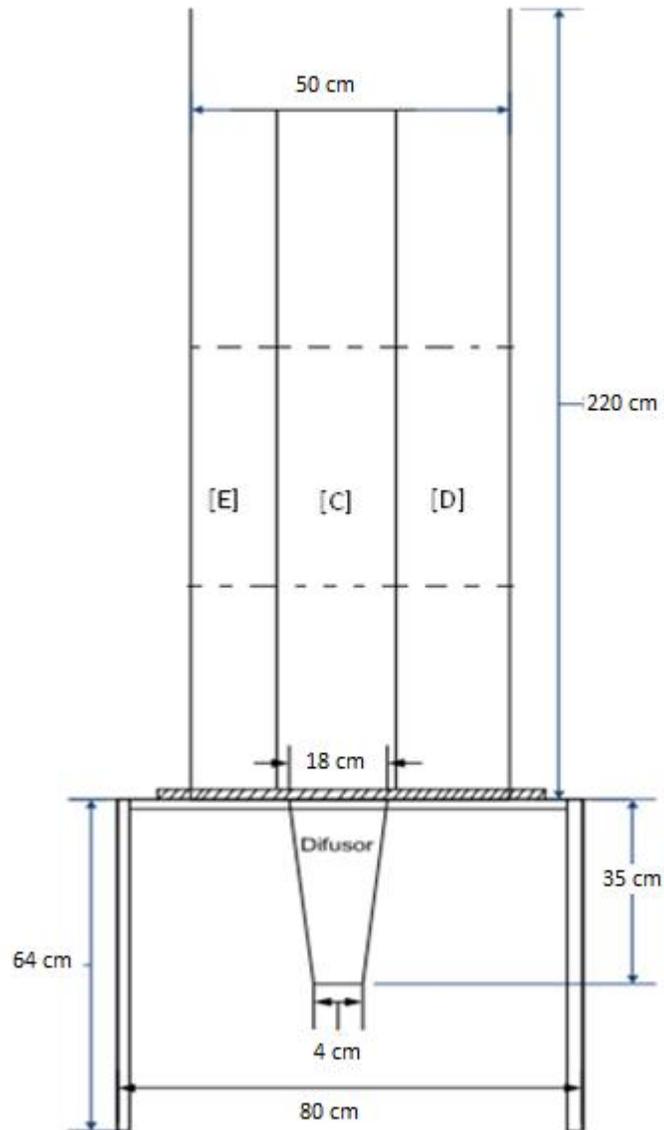


Figura 3.13 Esquema representativo das regiões de medição da coluna para o PIV.

3.2.3.2 Técnica de medição de Sombras (*Shadow*)

Para esta técnica foram utilizadas as velocidades superficiais do gás aplicadas na obtenção de dados experimentais com a técnica PIV, enquanto, o atraso do tempo (dt) é de 7 ms para todos os casos. As condições operacionais utilizadas são listadas na Tabela 3.2. Para a análise do comportamento da fase dispersa (bolhas) se realiza um estudo local, dividendo o campo de escoamento por secções (Figura 3.14), devido à propagação uniforme das bolhas lateralmente.

Tabela 3.2 Parâmetros operacionais utilizados na técnica de medição *Shadow*.

Altura Coluna [cm]	Posição do Difusor [cm]		Intensidade do Laser [%]	
			Laser A	Laser B
40	Centro	20	19	19
80	Esquerda	12,5	19	20
	Direita	37,5		
120	Esquerda(1)	0	23	27
	Esquerda(2)	12,5		
	Direita (1)	25		
	Direita (2)	37,5		

Depois de estabelecer os parâmetros operacionais, prosseguiu-se um estudo em triplicata para cada uma das vazões de ar estabelecidas.

As imagens captadas são enviadas para o computador através do “captador de quadros”, assim, podem ser tratadas e analisadas. Assumindo que as partículas movimentam-se com a velocidade local de fluido, a velocidade média da fase líquida é calculada pelo *software Davis da LaVision*, de acordo com a equação 3.1.

$$\bar{V}_l = \frac{\sum_{i=1}^N V_{li}}{N} \quad (3.1)$$

Onde \bar{V}_l é a velocidade média do líquido, N o número total de amostras e V_{li} é a velocidade instantânea do líquido.

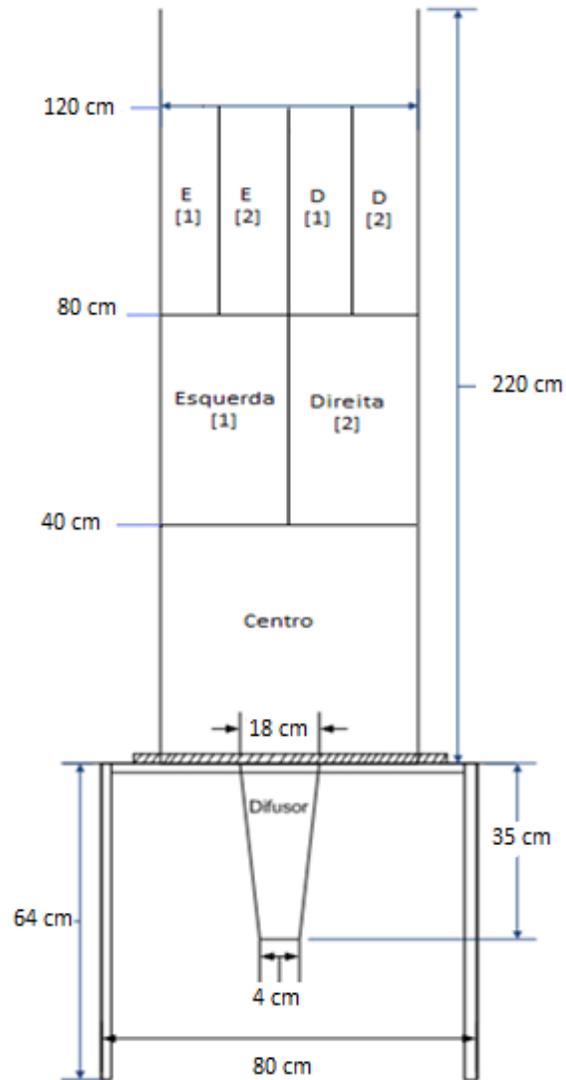


Figura 3.14 Esquema representativo das regiões de medição da coluna para o *Shadow*.

A determinação da velocidade instantânea é realizada pela razão entre o deslocamento da partícula entre as duas imagens e o intervalo de tempo entre elas. A identificação de cada partícula é realizada por técnicas de correlação cruzada. Cada imagem é subdividida em áreas de interrogação, onde são realizadas as minimizações dos erros da intensidade entre as duas imagens. A área em que é realizada a varredura nas imagens é determinada pelo usuário para cada caso. Os parâmetros escolhidos são definidos conforme observações nos campos avaliados

3.3 DETECÇÃO DA BOLHA E MEDIÇÃO DA VELOCIDADE

A metodologia que se utiliza para determinar o tamanho de bolha é similar à usada pela técnica PIV para aquisição de dados.

3.3.1 Algoritmos para obtenção de dados

O algoritmo utilizado é o algoritmo de segmentação. Este algoritmo é aplicado à imagem invertida (Figura 3.11) e sugere dois passos, uma segmentação primária e uma segmentação secundária.

- Segmentação Primária: Para a primeira segmentação, o usuário define os valores de máxima e mínima intensidade de sombra na imagem invertida, assim, o *software* faz uma varredura na imagem e identifica as regiões onde se encontram as partículas. A região de máxima intensidade corresponde à partícula identificada.
- Segmentação secundária: trata cada região separadamente a fim de determinar o diâmetro e a esfericidade. (Manual DavisHelp 7.2, *LaVision*).

A identificação de partículas manualmente é outra forma para determinar o diâmetro da bolha e da velocidade da partícula. Para isto se utiliza um aplicativo incorporado ao software *DAVIS 7 da LaVision*. Nesta técnica o usuário deve inserir quatro pontos em cada partícula capturada, determinando o maior e o menor eixo. Com esta definição o *software* irá determinar a esfericidade e o diâmetro de uma esfera com mesma área daquela marcada pelo usuário, para depois se aplicar as relações de calibração.

A Figura 3.15 (a) e (b) apresenta a imagem captada pela técnica *Shadow* e a imagem depois de ser tratada pelo algoritmo de segmentação, respectivamente.

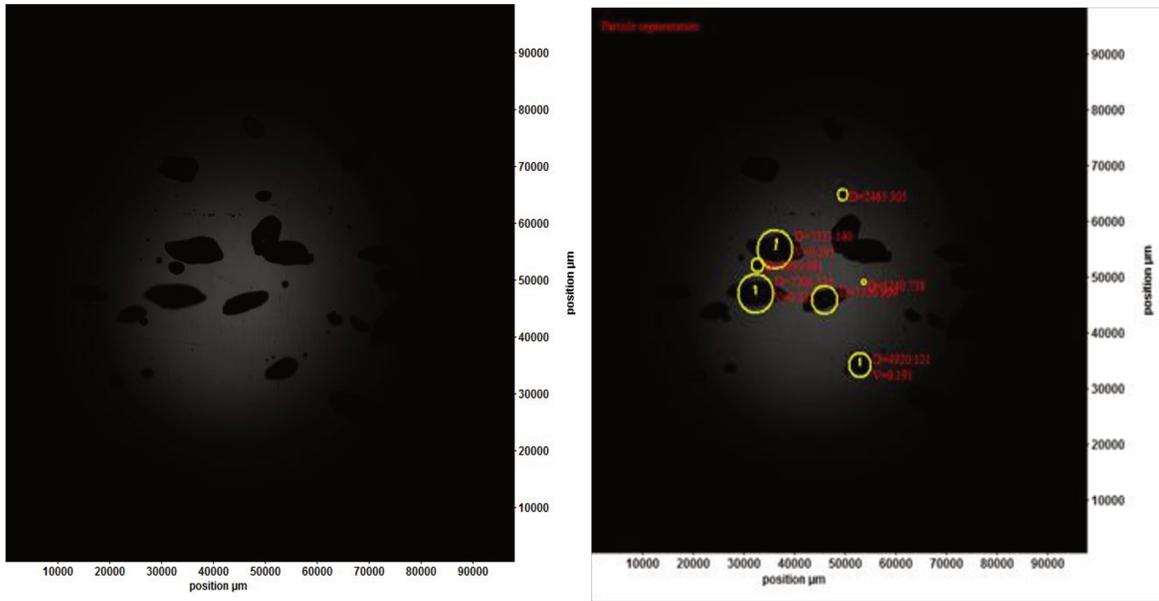


Figura 3.15 (a) Imagem capturada pelo *Shadow*, (b) imagem tratada pelo algoritmo de segmentação.

3.4 ANÁLISE DOS ERROS

Para a análise estatística dos parâmetros estudados (velocidade axial média do líquido, RMS, k , tensores de Reynolds e intensidade de turbulência) leva-se em consideração o efeito dos erros em cada um das medidas.

Estimando o efeito dos erros aleatórios e negligenciando o erro sistemático na medição, pode-se avaliar qualquer uma das variáveis (x') como:

$$x' = \bar{x} \pm t_{v,P} S_{\bar{x}} \quad (P\%) \quad (3.3)$$

Onde \bar{x} é o valor médio do conjunto de dados recoletados e $\pm t_{v,P} S_{\bar{x}}$ representa o intervalo de confiança, probabilidade $P\%$, dentro do qual se deve esperar que o valor de x' esteja. O valor de t é função da probabilidade (P), e dos graus de liberdade (v) no conjunto de dados. O valor de t foi tomado da tabela “*Student’s Distribution*” desenvolvida por William S. Gosset (1876 apud Figliola e Beasley, 2006).

Para N número de amostras se tem:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.4)$$

$$S_x = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{N}} \quad (3.6)$$

Capítulo 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na experimentação física efetuada na coluna de bolhas retangular a qual se encontra no laboratório experimental de Processos Químicos e Gestão Empresarial (LPQGe) da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, além, da discussão dos mesmos ao utilizar os métodos de medição PIV e *Shadow*, a diferentes velocidades superficiais de gás (0,05; 0,09; 0,13 cm/s).

A variação das condições de operação da coluna foi analisada por meio dos perfis da velocidade axial média, flutuações da velocidade, tensores de Reynolds e energia cinética turbulenta da fase líquida, em as três seções verticais acima do distribuidor correspondentes às alturas de 40, 80, e 120 cm. Do mesmo modo, determinam-se algumas características das bolhas (gás) como diâmetro médio, diâmetro de *Sauter* e a distribuição do tamanho da bolha nestas seções.

4.1 VELOCIDADE DA FASE LÍQUIDA

Os dados experimentais foram tratados estatisticamente, através da rotina de pós-processamento do *software Davis 7.2 da La Vision*. Assim, são obtidos resultados da velocidade instantânea apresentados na forma de mapa de vetores.

A Figura 4.1 apresenta um mapa vetorial da velocidade instantânea do líquido em um instante qualquer. Neste caso, a velocidade instantânea foi determinada para velocidade superficial do gás de 0,13 cm/s na altura $H= 80$ cm, região de estudo correspondente à seção central da coluna onde é possível ter uma idéia geral do escoamento em seu interior. Pode-se observar que o escoamento é descendente nas proximidades das paredes, e a geração de vórtices pela passagem das bolhas.

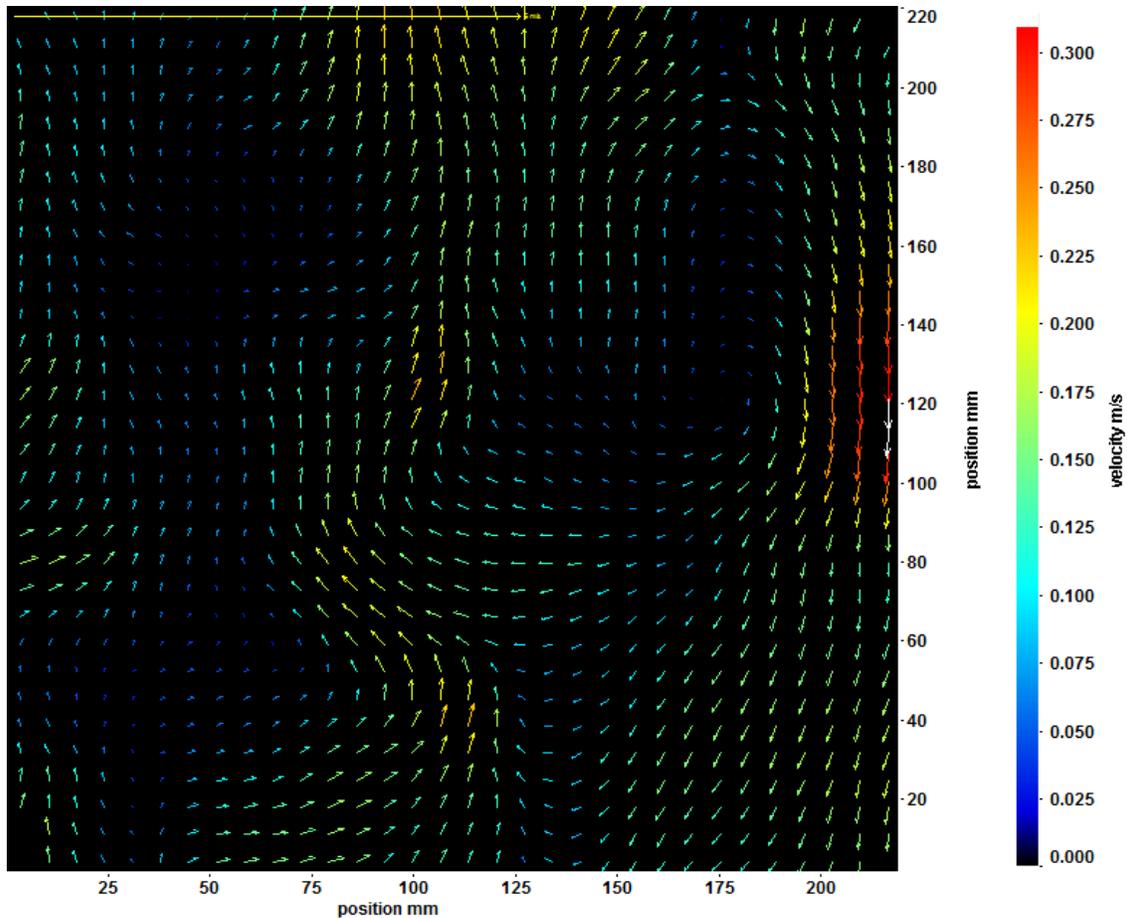


Figura 4.1 Mapa vetorial da velocidade instantânea do líquido ($H=80$ cm; $U_{sup}= 0,13$ cm/s).

Devido às oscilações os perfis instantâneos da velocidade e fração volumétrica de gás tornam-se instáveis, portanto é necessário o cálculo dos valores médios dos parâmetros de medição. Assim, realizaram-se inicialmente testes para determinar a quantidade de fotos necessárias que forneçam uma boa representação do escoamento.

Para o desenvolvimento dos testes foram processadas 1000, 2500 e 5000 imagens a uma velocidade superficial de gás de 0,13 cm/s, e assim, garantir que sendo esta a velocidade mais alta, os resultados obtidos para as outras velocidades possam representar de forma adequada o comportamento do escoamento (item 3.2.3).

A Figura 4.2 apresenta os perfis da velocidade axial média da fase líquida obtidos ao realizar os testes de fotos.

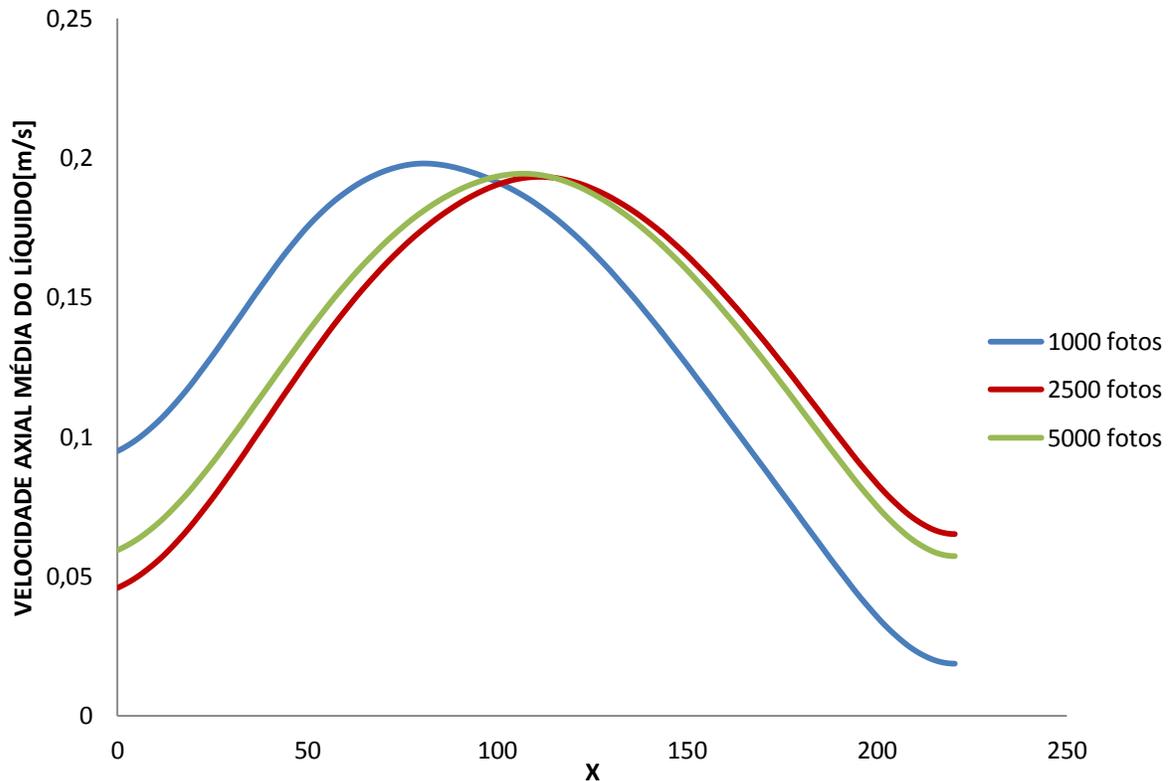
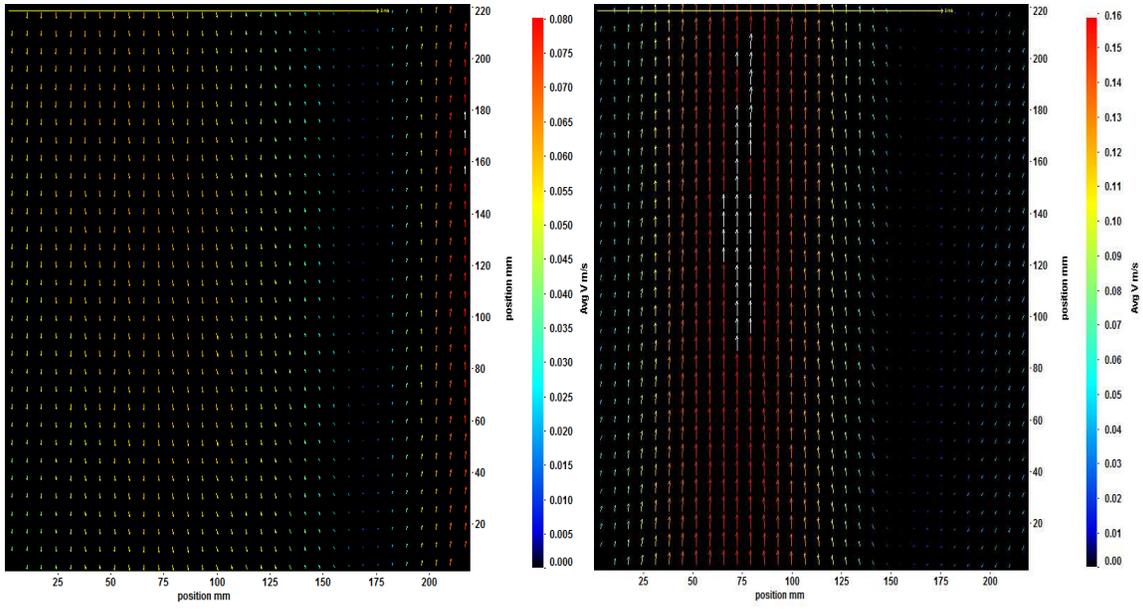


Figura 4.2 Teste de fotos PIV para velocidade superficial do gás de 0,13 cm/s.

A análise da Figura 4.2 permite determinar que 2500 fotos é uma quantidade suficiente de imagens para estudar o comportamento da fase líquida na coluna devido à proximidade entre perfis obtidos tratando 2500 e 5000 fotos. A assimetria do perfil correspondente a 1000 fotos está relacionada ao fato de serem abordados dados com pouco tempo de amostragem.

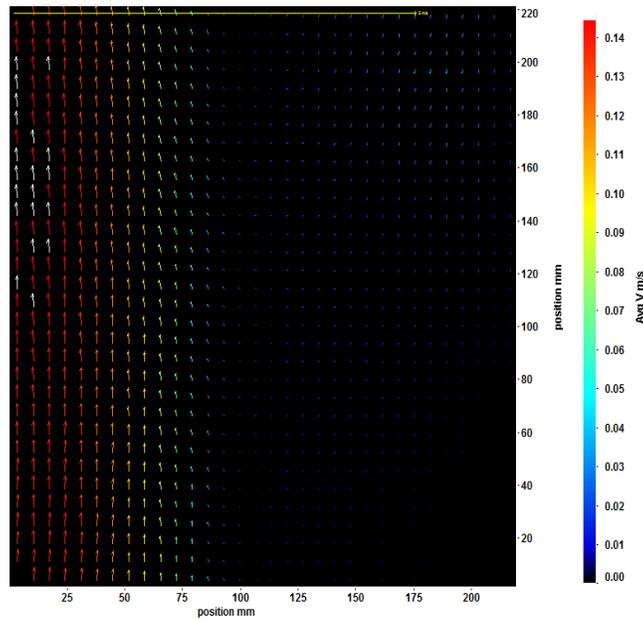
4.1.1 Velocidade Média da Fase Líquida

O movimento do líquido está definido por um campo vetorial de velocidades correspondentes ao movimento das partículas traçadoras que seguem a trajetória do fluido. A Figura 4.3 representa o campo vetorial da velocidade média do líquido em colunas de bolhas. Este campo corresponde à região mais próxima do distribuidor ($H=40$ cm). Onde, lado esquerdo, direito e centro, obedecem às seções nas quais foi dividido o campo de visão como ilustrado no item 3.2.3 da metodologia.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.3 Mapa vetorial da velocidade média do líquido (a) lado esquerdo-(b) centro-(c) lado direito ($U_{sup}=0,05$ cm/s, $H=40$ cm).

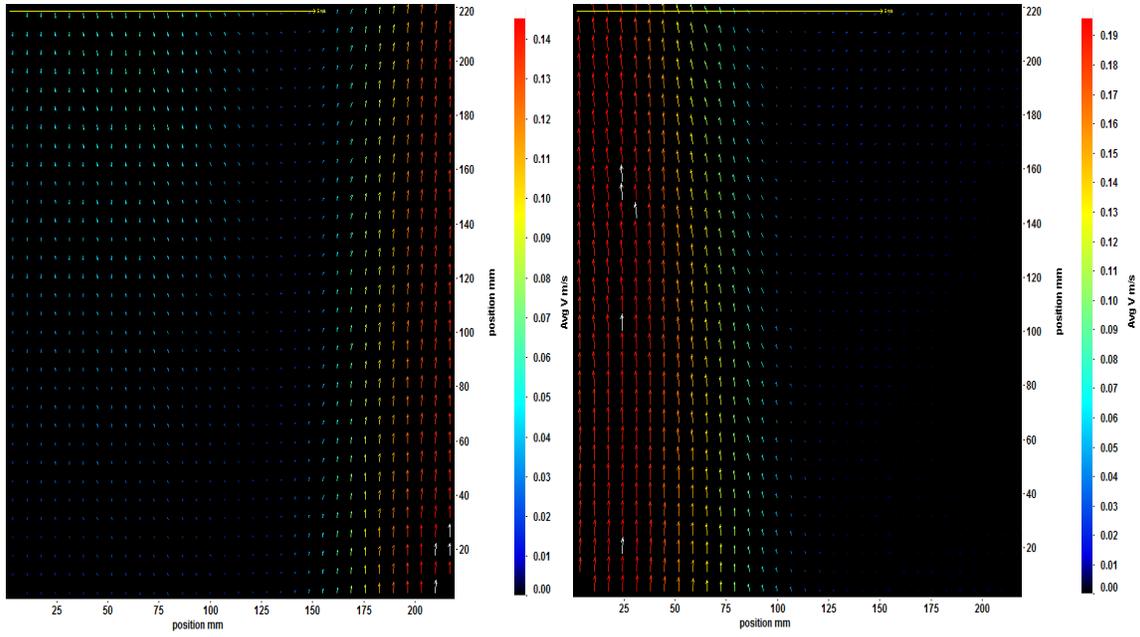
Nota-se que para esta altura ($H=40$ cm) supõe-se que o escoamento é turbulento devido ao caráter intermitente da velocidade de entrada de gás e pela instabilidade inerente ao fluxo nesta região. O comportamento da velocidade da fase líquida diminui do centro para a parede da coluna, confirmando o perfil hidrodinâmico clássico das colunas de bolhas (Ueyama e Miyauchi, 1979), onde na região central, o escoamento é ascendente e na região da parede é descendente.

Observa-se que nas proximidades da posição horizontal $X(\text{NORM}) = 175$ existe menor concentração de vetores, o que obedece a presença de zonas de inversão de fluxo, comportamento igualmente encontrado por outros autores. (Galliani, 2011, Silva, 2011). A presença destes vórtices se deve à transferência de momentum desde a região central da coluna até a parede (Thet *et al.* 2006). A máxima velocidade está na seção horizontal central atingindo um valor de 0,16 m/s, confirmando uma vez mais o comportamento típico das colunas de bolhas, ascensão do fluxo no centro e descenso nas regiões perto das paredes.

O comportamento dos campos vetoriais da velocidade média do líquido para as velocidades superficiais de 0,09 e 0,13 cm/s são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5.

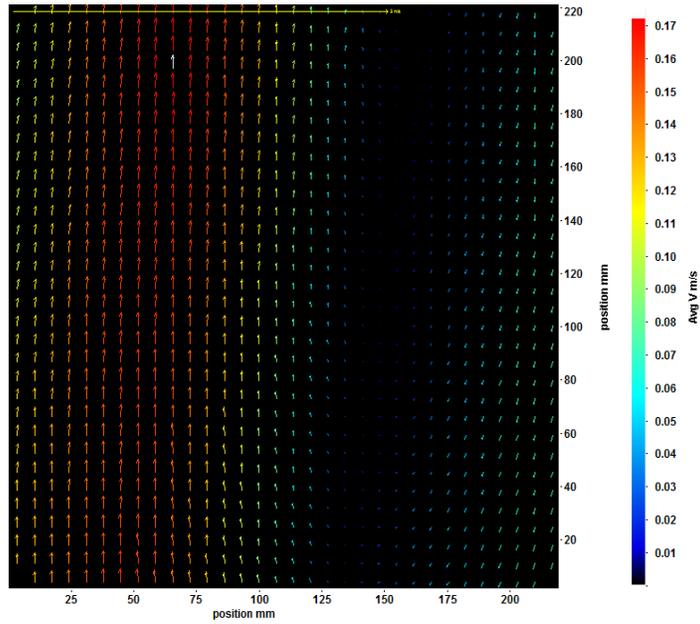
Comparando as Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, observa-se que a velocidade média do líquido aumenta com a velocidade superficial do gás, atingindo valores próximos a 22 cm/s para uma velocidade superficial de gás de 0,13 cm/s (dados correspondentes aos vetores de cor brancos). Em todos os casos o pico de velocidade encontra-se no centro da coluna aproximadamente na posição horizontal entre 20 e 31 cm, e velocidades negativas na região das paredes.

A Figura 4.6 apresenta a variação do perfil da velocidade axial média do líquido para as três velocidades superficiais estudadas, na região de estudo correspondente à altura $H=40$ cm. A coordenada $X(\text{NORM})$, se define como a posição x dividida pela metade da largura da coluna, onde $x=0$ é considerada o centro.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.4 Mapa vetorial da velocidade média do líquido (a) lado esquerdo-(b) centro-(c) lado direito ($U_{sup}=0,09$ cm/s, $H=40$ cm).

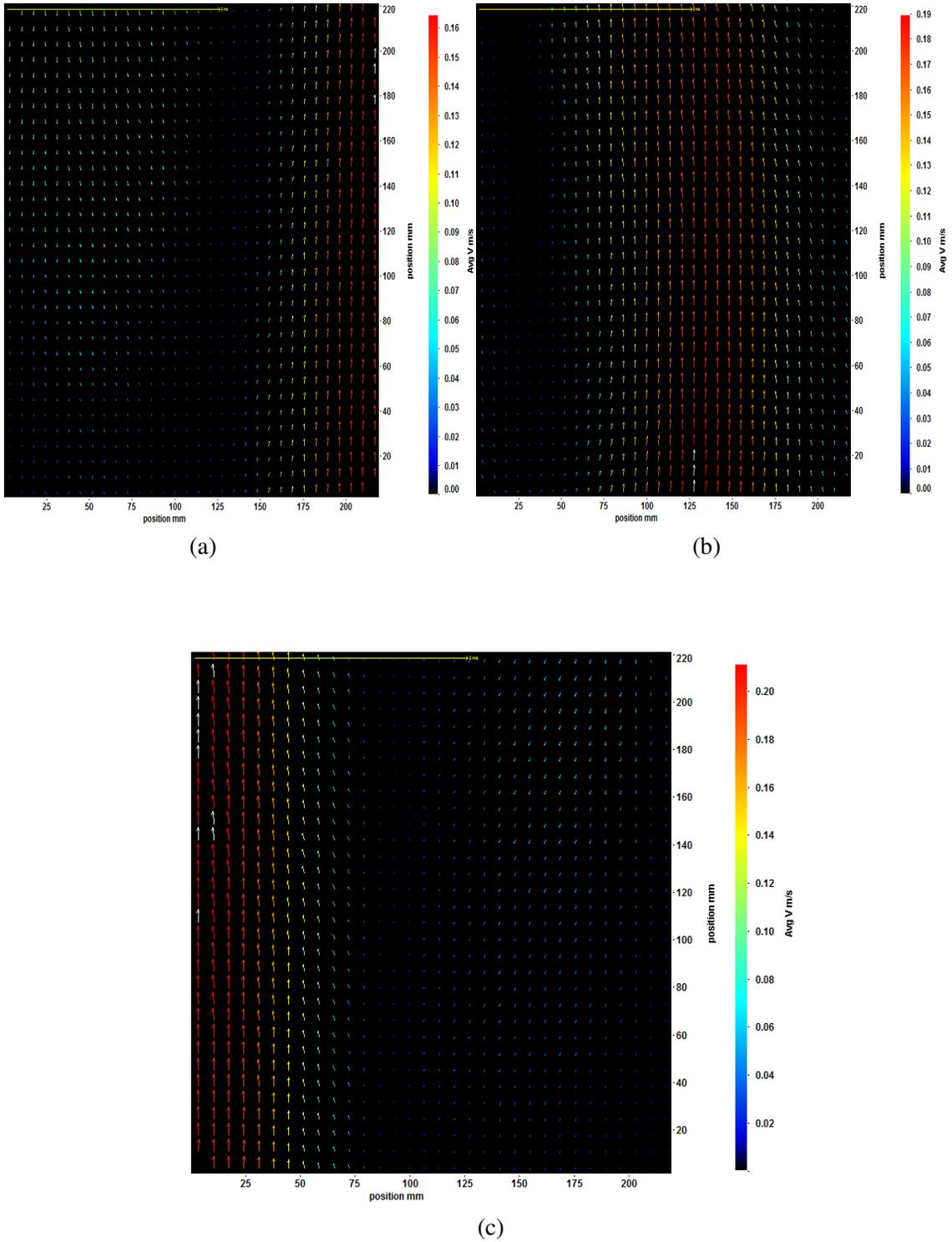


Figura 4.5 Mapa vetorial da velocidade média do líquido (a) lado esquerdo-(b) centro-(c) lado direito ($U_{sup}=0,13$ cm/s, $H=40$ cm).

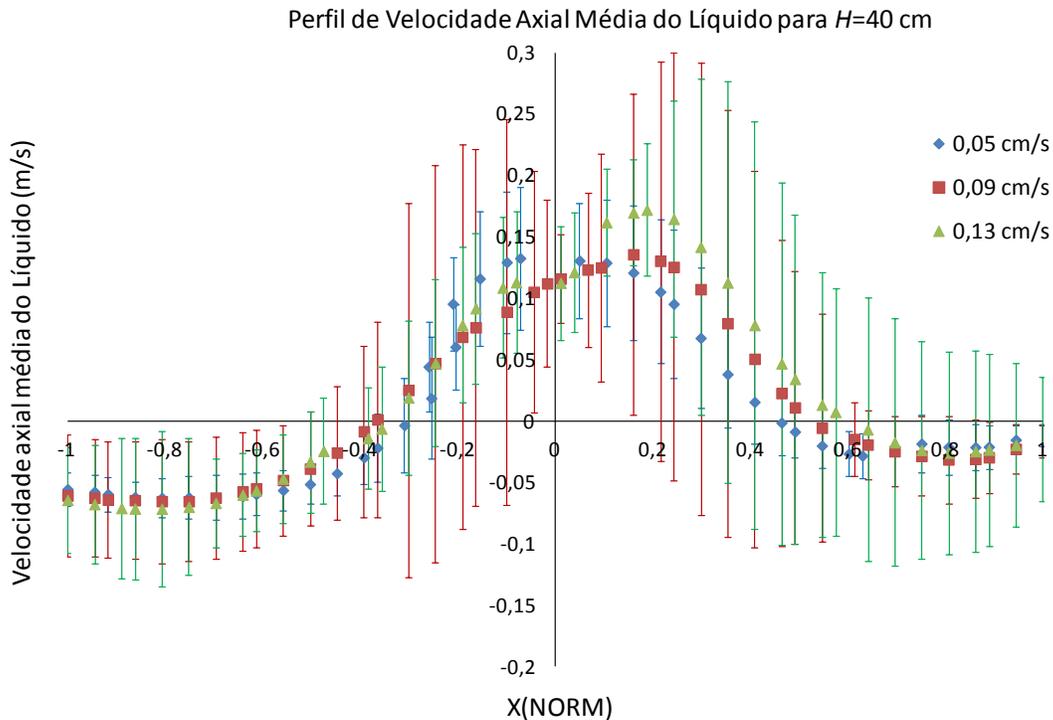


Figura 4.6 Perfil da velocidade axial do líquido para diferentes velocidades superficiais do gás; $H=40$ cm.

Nesta figura (Figura 4.6) pode-se observar que a velocidade média do líquido aumenta com a velocidade superficial do gás, chegando a picos de até 0,17 m/s na posição $X(NORM) = 0,18$, devido ao incremento de energia na entrada do sistema. Nota-se, que o escoamento não é desenvolvido e geralmente o perfil mostra uma tendência de deslocamento fora da região central da coluna, fenômeno devido à não homogeneidade na aeração e a contínua entrada de gás.

Nota-se, que próximo ao centro da coluna existem pontos onde os valores são maiores para a menor velocidade (0,05 cm/s), devido a maior condição de turbulência encontrado em velocidades superiores, e consequente aumento da difusão de quantidade de movimento (lado esquerdo da figura) (Soccol *et al.* 2010).

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam o comportamento dos perfis de velocidade do líquido nas seções de estudo $H=80$ cm e $H=120$ cm, respectivamente.

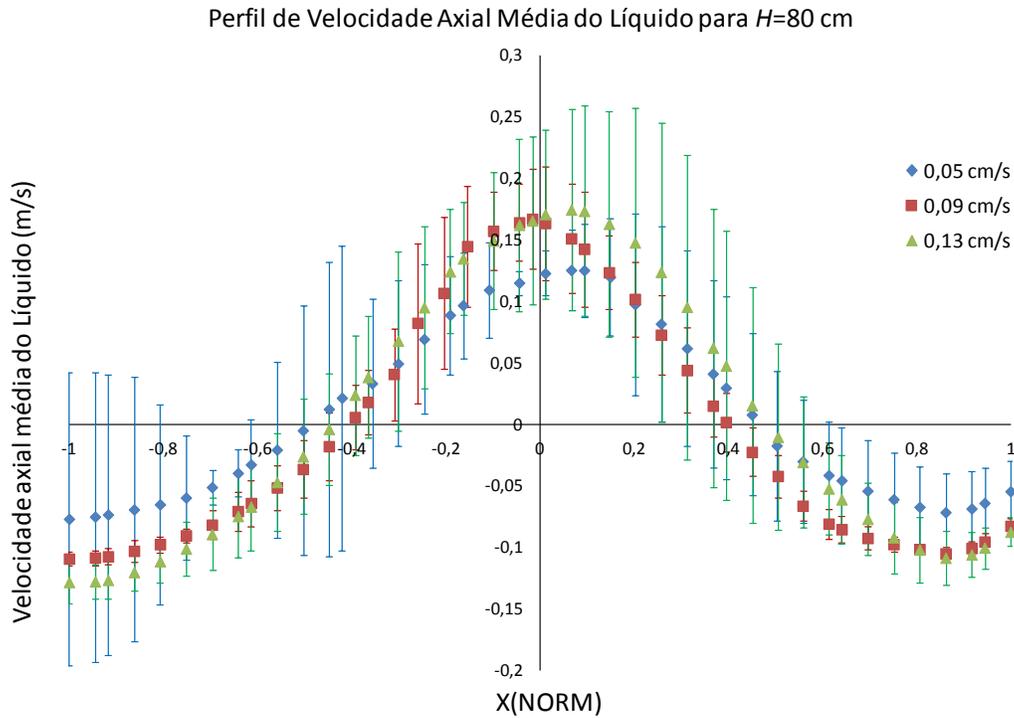


Figura 4.7 Perfil da velocidade axial do líquido para diferentes velocidades superficiais do gás; $H=80$ cm.

Do mesmo modo que os perfis apresentados anteriormente (Figura 4.6), estes mostram o comportamento qualitativo esperado para uma coluna de bolhas, fluxo ascendente na região central e descendente nas proximidades das paredes (Bröder e Sommerfeld, 2009). Não obstante, estes perfis são parabólicos e apresentam uma condição de homogeneidade ao longo da coluna comparada com o caso de $H= 40$ cm. Observa-se que os pontos de reversão do fluxo para todas as velocidades superficiais do gás, encontram-se aproximadamente na direção horizontal correspondente à faixa entre $X(NORM) = 0,4-0,6$.

Para a altura de $H=120$ cm (Figura 4.8), observa-se novamente o perfil parabólico clássico, simétrico na largura da coluna. Nesta altura, a condição de homogeneidade permanece similar comparando-se com a altura $H=80$ cm, concluindo que acima desta o escoamento é completamente desenvolvido.

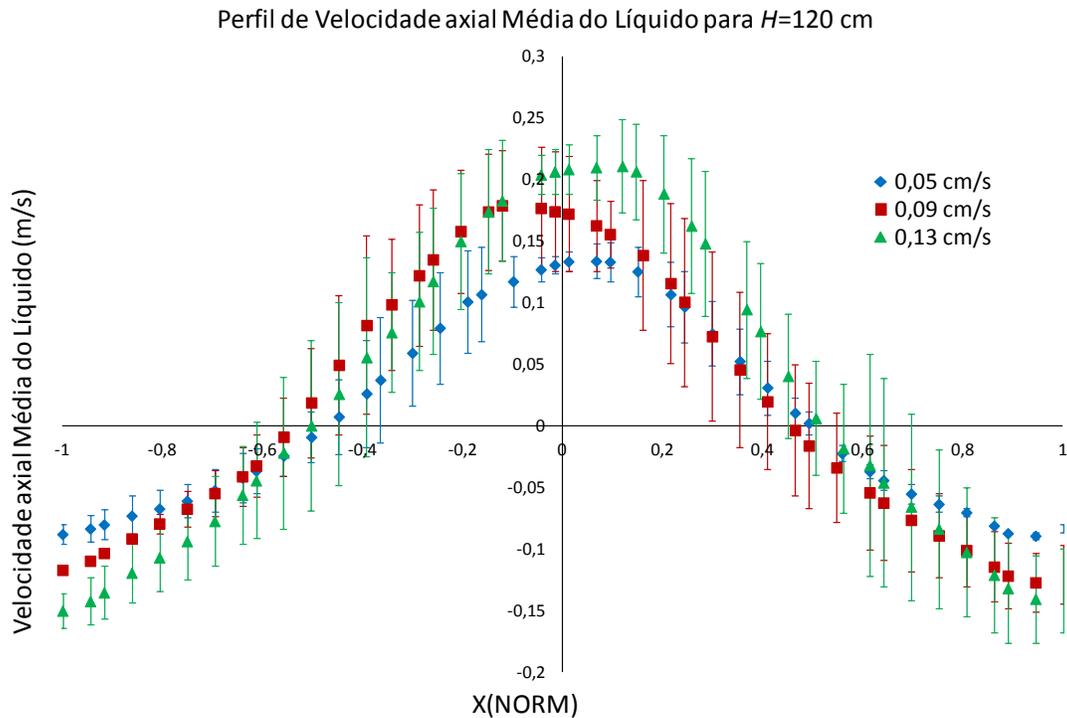


Figura 4.8 Perfil da velocidade axial do líquido para diferentes velocidades superficiais do gás; $H=120$ cm.

Das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, pode-se analisar que aumentando a velocidade superficial do gás de 0,05- 0,13 cm/s, a velocidade do líquido é ligeiramente maior no centro do plano, aumentando na direção axial (altura), devido há influência das bolhas ascendendo, comportamento também encontrado em outros trabalhos da literatura (Lindken e Merzkirch 2001). Enquanto, na região próxima à parede a velocidade do líquido diminui gradativamente pela reversão do fluxo. Este ponto de reversão varia dependendo da velocidade e altura que foram medidas. Para a velocidade superficial do gás 0,05 cm/s a reversão ocorre em $X(NORM)$ entre 0.3-0.5; para 0,09 cm/s em $X(NORM)$ entre 0.36-0.55, e para 0,13 cm/s em $X(NORM)$ entre 0.35-0.57. O perfil que amostra maior uniformidade foi o perfil correspondente a velocidade superficial do gás de 0,13 cm/s na altura de 120 cm, apresentando um pico de velocidade de 20 cm/s e reversão de fluxo na posição $X(NORM) = [0,5]$ (Figura 4.8).

A Figura 4.9 apresenta a variação da velocidade axial média do líquido para diferentes alturas de medição mantendo constante a velocidade superficial do gás ($U_{sup}=0,13\text{cm/s}$).

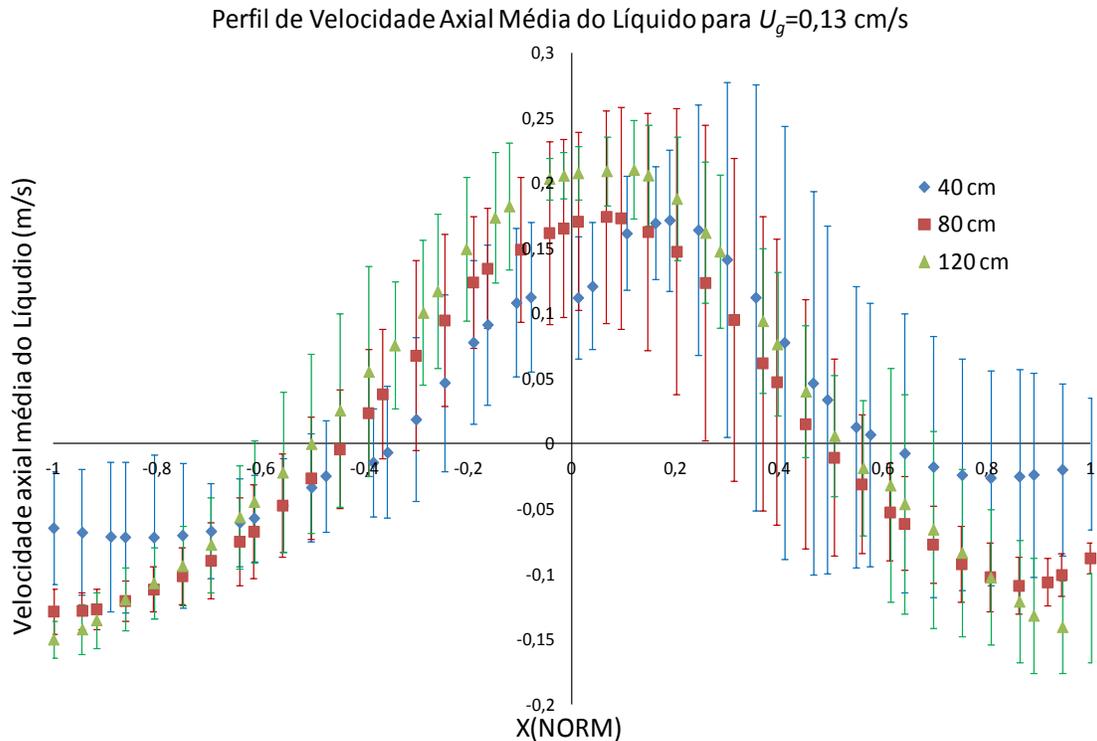


Figura 4.9 Velocidade axial média do líquido com velocidade superficial do gás de 0,13 cm/s para as alturas (a) 40 cm – (b) 80 cm – (c) 120 cm.

Novamente se observa (Figura 4.9) que o comportamento qualitativo mostrado é igual para as três alturas estudadas, perfil parabólico e assimétrico ao eixo vertical. Além disso, nota-se que os perfis apresentam pouca variação com relação ao aumento da altura na coluna, atingindo valores de aproximadamente 0,2 m/s em todos os casos.

Na região mais afastada do distribuidor ($H=120$ cm), os perfis apresentam maior simetria com o eixo vertical pela homogeneidade na distribuição das bolhas através da coluna. Além disso, se observa que a variação da velocidade do líquido em respeito ao aumento da velocidade superficial do gás é mais significativa que a variação em relação à altura da coluna.

4.1.2 Flutuação da Velocidade (RMS)

Em escoamentos bifásicos a flutuação das variáveis é provocada pela presença intermitente das fases em certa posição espacial do escoamento independente do regime de cada fase da mistura (transiente ou turbulento). No caso de colunas de bolhas, a passagem

das bolhas por uma determinada localização da coluna afeta diretamente o comportamento da fase líquida, modificando tanto a magnitude como a direção de seu escoamento.

A flutuação dos perfis da velocidade da fase líquida é avaliada pela análise do RMS (*Root Mean Square*) conforme a seguinte expressão:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_N^1 (v_i - \bar{v})^2} \quad (4.1)$$

sendo N o número de amostras, e v a velocidade

Seguindo a amostragem da velocidade axial média do líquido, os dados do RMS são tirados em três posições verticais da coluna (alturas). As Figuras 4.10 - 4.12 apresentam os perfis para a flutuação da velocidade axial do líquido ao longo da coluna quando se varia a velocidade superficial do gás.

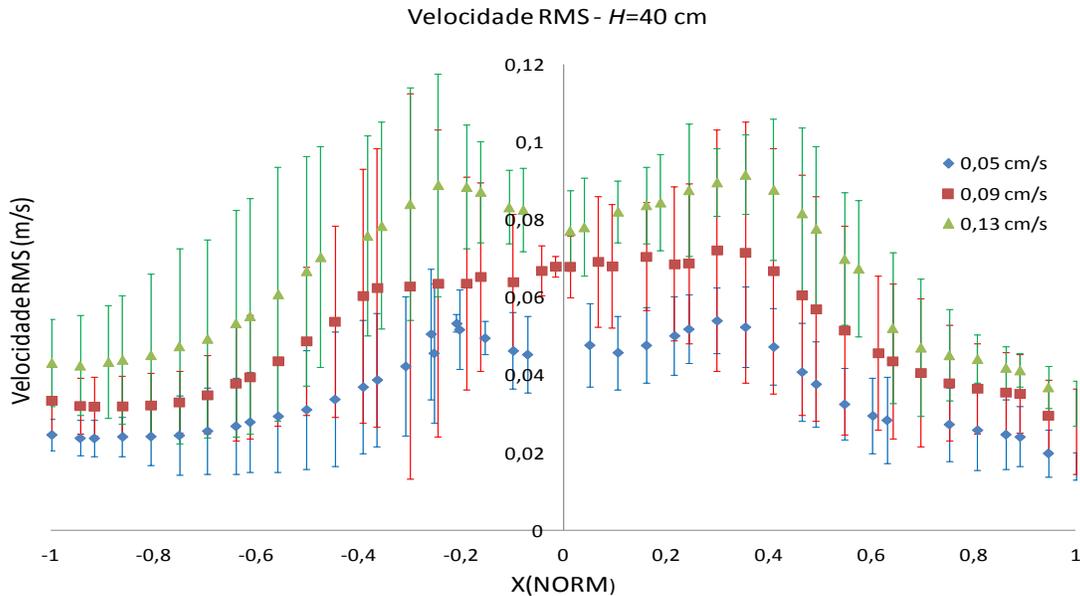


Figura 4.10 Velocidades RMS para altura H=40 cm.

Na Figura 4.10 se observa como incremento a velocidade superficial do gás em uma mesma região de estudo ($H=40$ cm), o valor do RMS aumenta significativamente,

devido, possivelmente, há uma maior quantidade de bolhas movimentando-se ocasionando maiores flutuações na velocidade do líquido. A Figura mostra dois picos próximos do centro da coluna ($X(NORM) \approx 0,3$), como resultado do fluxo sendo conduzido principalmente pelo movimento ascendente das bolhas. Esta região apresenta maior cisalhamento entre os fluidos devido à existência de estruturas de longa escala.

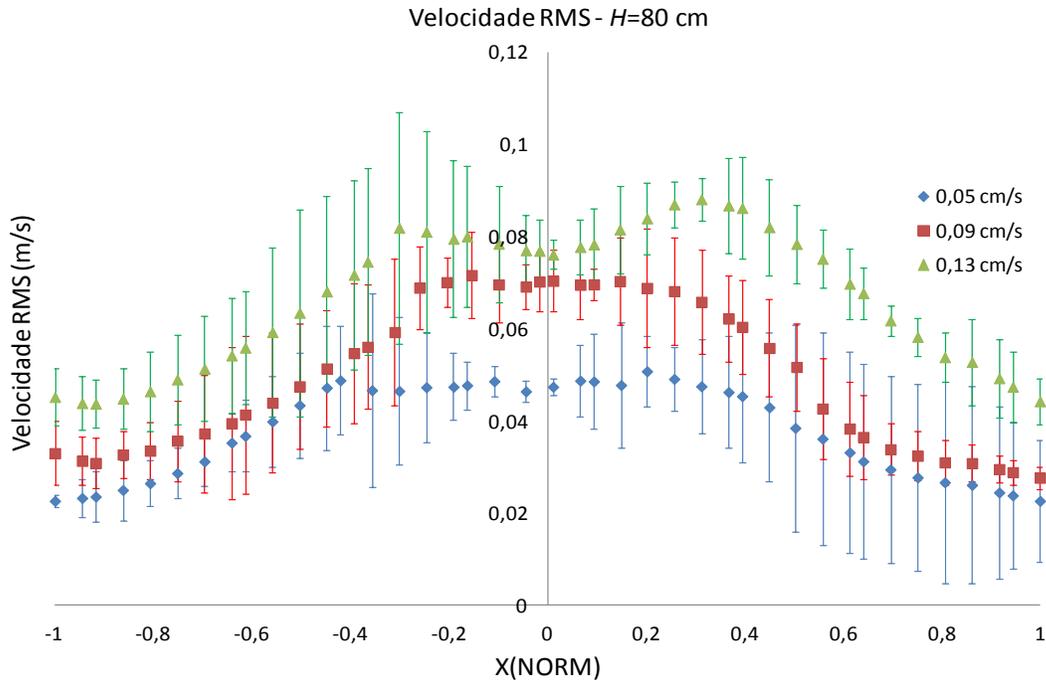


Figura 4.11 Velocidades RMS para altura H=80 cm.

A Figura 4.11 mostra que um aumento na altura de medição origina perfis mais homogêneos. O RMS diminui sutilmente e conserva o comportamento dos perfis apresentados anteriormente (Figura 4.10), decrescentes desde o ponto de inversão ($X(NORM) \approx 0,3$) até a parede.

Nas proximidades da região central da coluna $X(NORM)=0$, a flutuação da velocidade é maior pelo fato de se apresentar o fenômeno de quebra e coalescência entre as bolhas, efeito que aumenta com o incremento da vazão de alimentação do ar

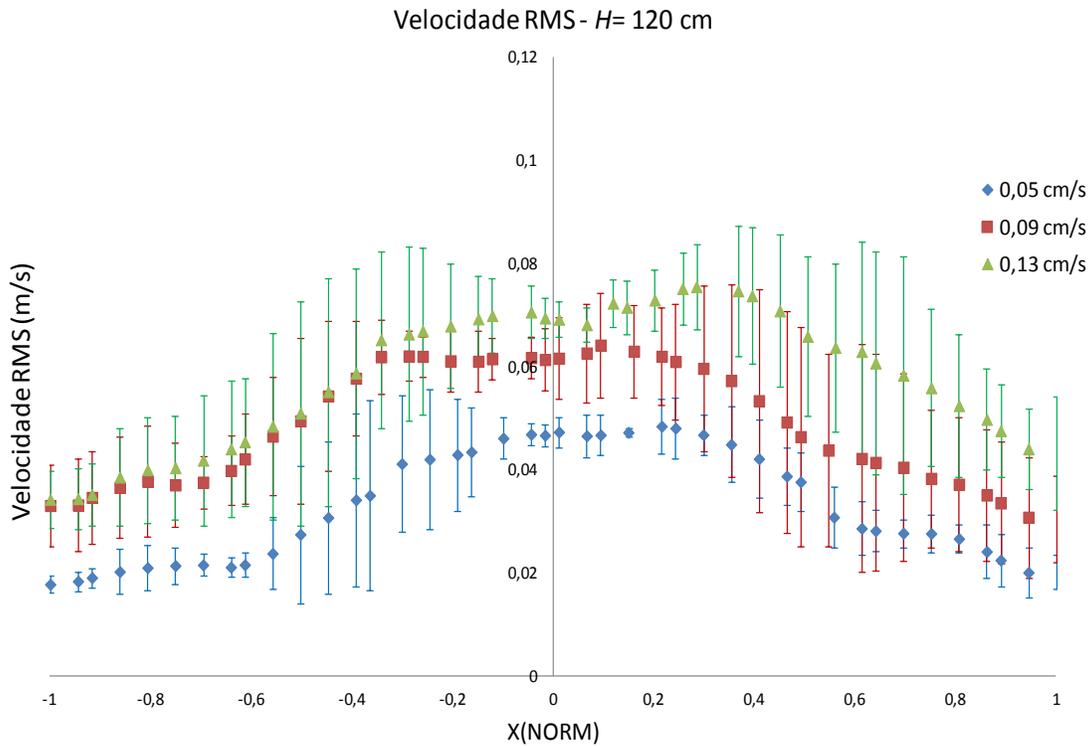


Figura 4.12 Velocidades RMS para altura H=120 cm.

Comparando as Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, observa-se que para uma velocidade superficial do gás, os perfis da flutuação da velocidade a diferentes alturas apresentam maior uniformidade, diminuindo a presença dos picos próximos à região central, devido à distribuição das bolhas ao longo da coluna ser mais homogênea. Além disso, pode se notar que os perfis apresentam uma tendência parabólica e achatada, cada vez mais pronunciada, observando-se que os efeitos de cisalhamento diminuem com o aumento da distância da altura de alimentação.

4.1.3 Intensidade de Turbulência

A intensidade de turbulência (Tb) se define como a razão entre a flutuação média axial do líquido (v') e a velocidade superficial da fase gasosa (U_{Sup}) inserida na coluna (Socol *et al.* 2010). De esta forma, foram obtidos os respectivos perfis radiais para cada uma das velocidades do gás em cada região vertical de medição.

$$\%Tb = \frac{v'}{U_{Sup}} \quad (4.2)$$

A Figura 4.13 apresenta a intensidade de turbulência na região perto do distribuidor $H=40$ cm.

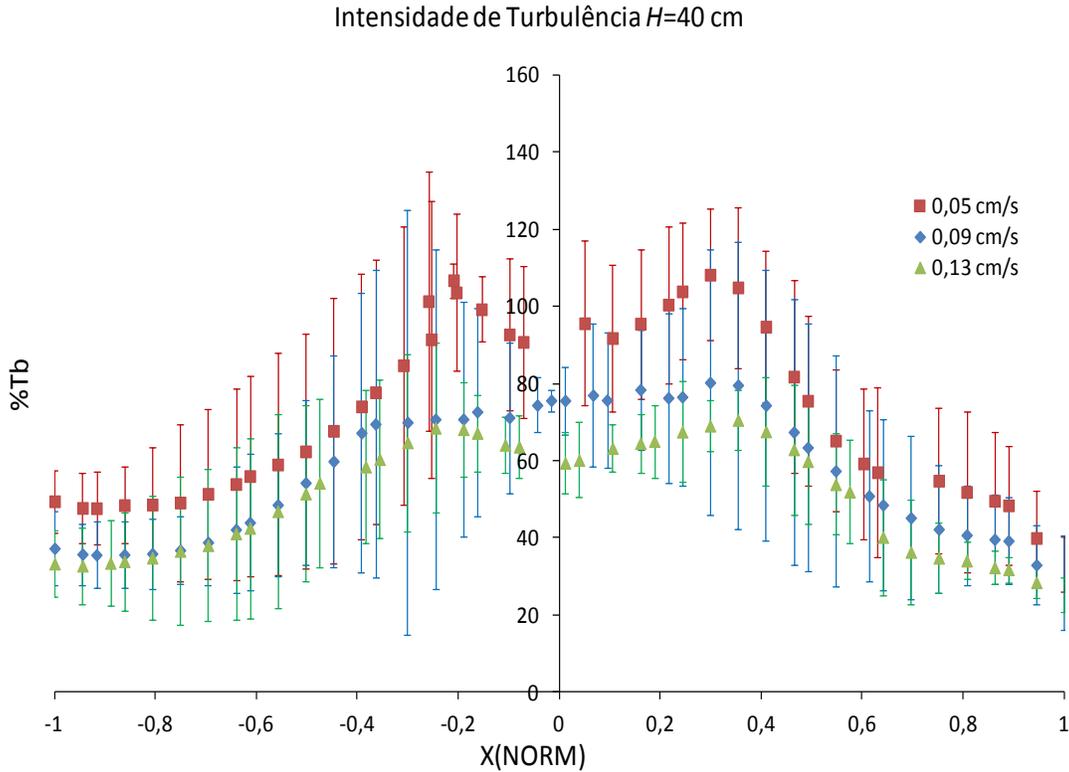


Figura 4.13 Intensidade de Turbulência $H=40$ cm.

Como era de se esperar, as alterações de flutuação de velocidade são proporcionalmente maiores a baixas velocidades, o que leva ao aumento da intensidade de turbulência (Figura 4.13).

As Figuras 4.14, 4.15 apresentam o comportamento da intensidade de turbulência para as diferentes alturas de medição. Pode-se observar que à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, a intensidade turbulenta diminui, quando é avaliada para uma mesma altura.

De acordo à Equação 4.2 os perfis de intensidade de turbulência seguem a mesma tendência dos perfis da flutuação da velocidade, os pontos máximos correspondem aos máximos valores de flutuação onde existe maior concentração das bolhas.

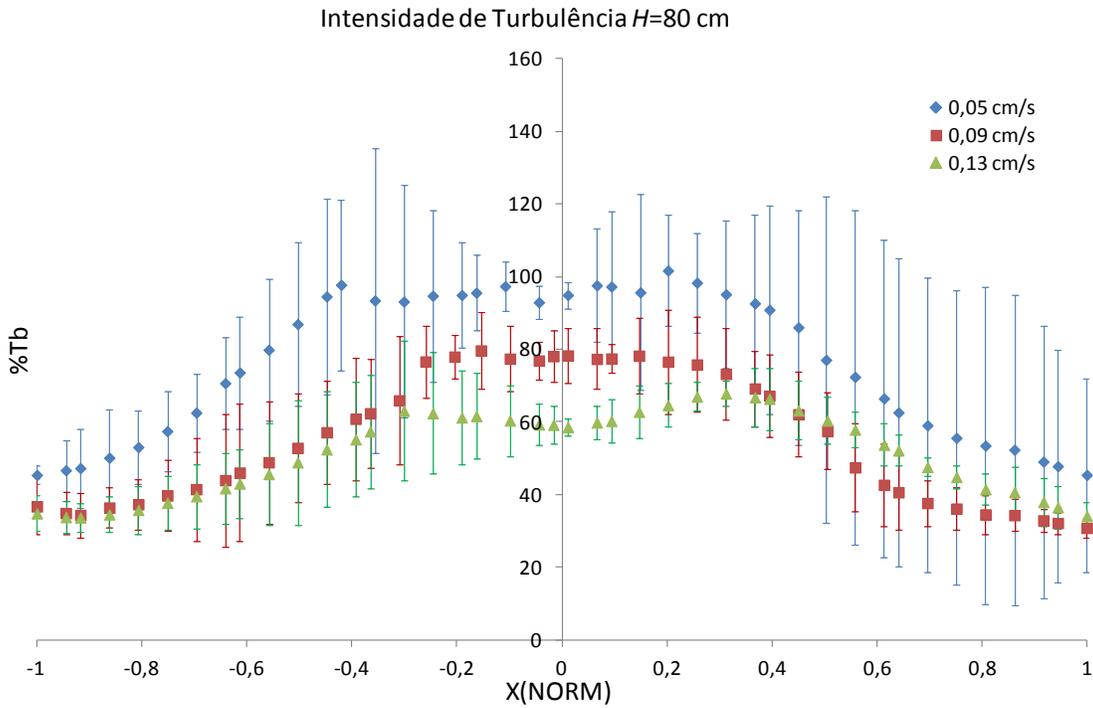


Figura 4.14 Intensidade de Turbulência $H=80$ cm.

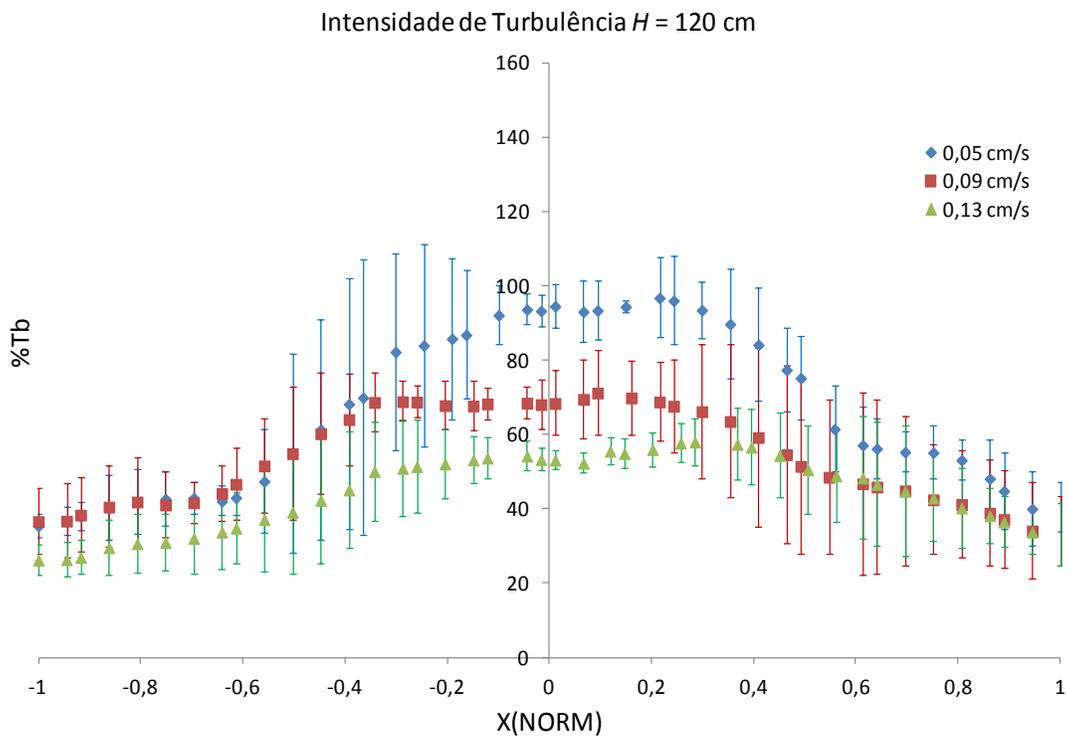


Figura 4.15 Intensidade de Turbulência $H=120$ cm.

Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, observa-se que a intensidade de turbulência diminui à medida que a medição é feita próximo ao topo da coluna ($H=120$ cm). Nesta região as bolhas estão dispersas uniformemente pela seção transversal, enquanto na região próxima ao distribuidor ($H=40$ cm), o movimento das bolhas é caótico devido à instabilidade e saída intermitente pelo distribuidor o que gera maiores níveis de turbulência no escoamento.

Da mesma forma que para os perfis da flutuação da velocidade, os picos de intensidade de turbulência apresentados nas proximidades do centro da coluna $X(NORM)\approx 0$, vão diminuindo gradativamente à medida que se aproxima do topo da coluna, alcançando perfis mais parabólicos.

4.2 TENSORES DE REYNOLDS E ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA DA FASE LÍQUIDA.

Análises dos tensores de Reynolds e da energia cinética turbulenta permitem estudar a estrutura turbulenta induzida pelas bolhas em um campo de escoamento gás-líquido.

4.2.1 Tensores de Reynolds

Os momentos de segunda ordem representam características do escoamento quanto à movimentação do líquido na coluna, causado pela passagem das bolhas, e contribuem para o cálculo da energia cinética turbulenta (Bolhe *et al.* 2006). Estes tensores normais estão representados matematicamente pela Equação 4.3.

$$\overline{v'_j v'_k} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_j - \bar{v}_j)(v_k - \bar{v}_k) \quad (4.3)$$

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam os tensores normais axial, radial e axial-radial, respectivamente, para a altura $H=40$ cm.

Na Figura 4.16, observa-se que os perfis do tensor normal axial apresentam dois picos situados entre a linha central da coluna e a parede. Além disso, pode-se notar que os picos tendem a ser mais pronunciados quando se incrementa a vazão de ar, comportamento também encontrado por Lindken e Merzkirch, (2001).

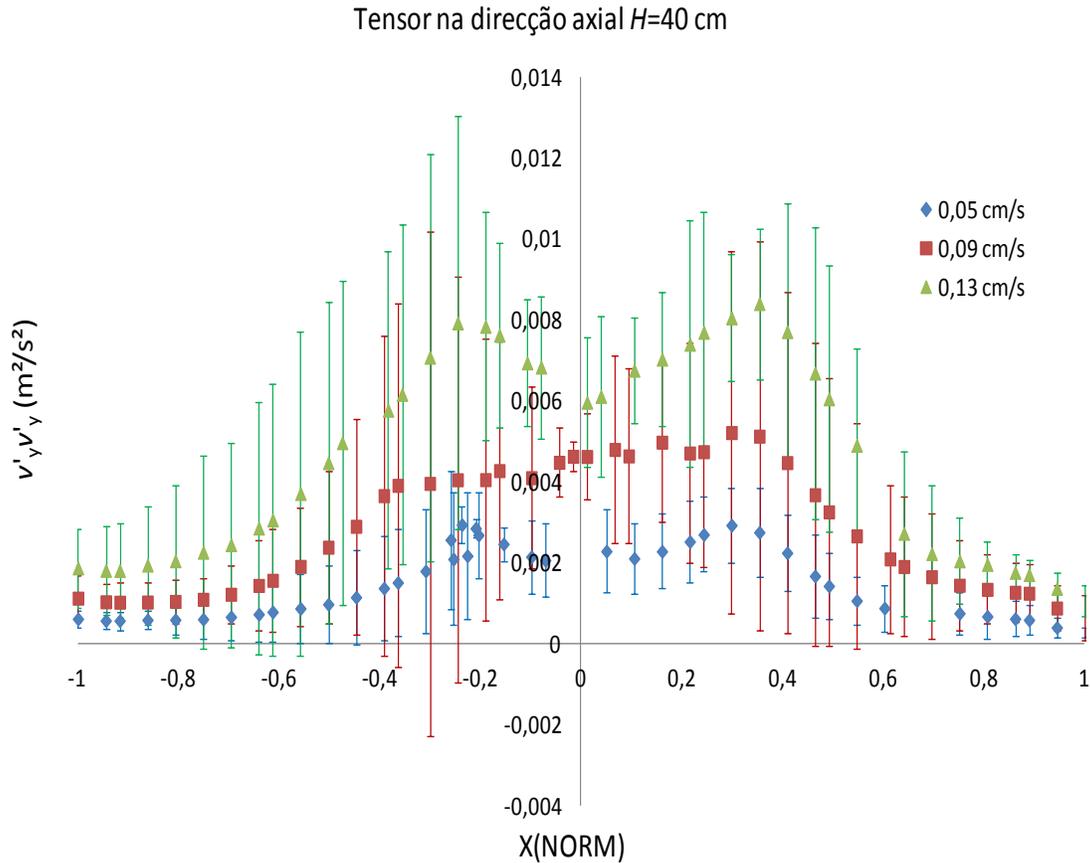


Figura 4.16 Tensor normal na direção axial $H=40$ cm.

Devido à dinâmica ascendente e descendente do fluxo, a velocidade do líquido experimenta grandes flutuações nas proximidades da parede ($X(NORM) \approx 0,3$), portanto os tensores de Reynolds ($v'_y v'_y$) apresentam picos maiores nesta região comparados com o centro da coluna, onde o movimento do líquido é principalmente ascendente (Figura 4.16). Este comportamento foi encontrado em outros estudos relacionados com coluna de bolhas (Mudde *et al.* 1997 e Zhou *et al.* 2002)

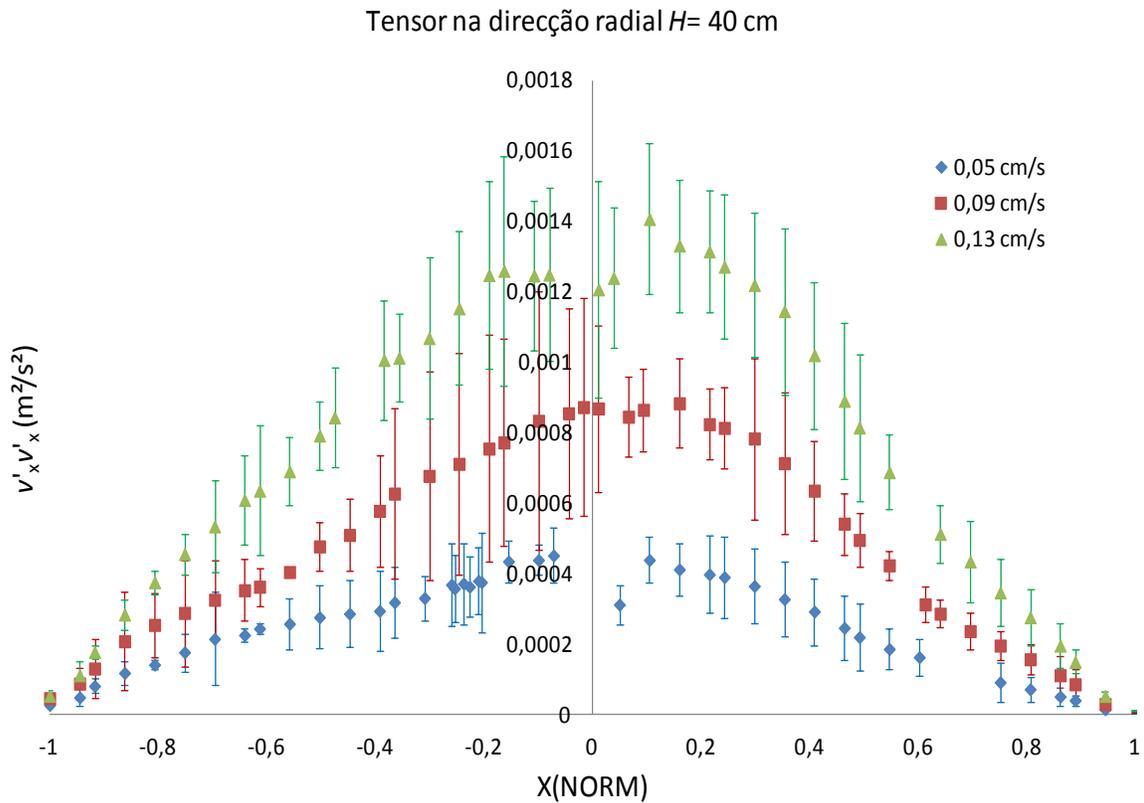


Figura 4.17 Tensor normal na direcção radial $H=40$ cm.

Conforme a Figura 4.17, o movimento oscilatório da corrente de bolhas pelo centro da coluna ($X(NORM) \approx 0$), conduz a presença de picos do tensor normal radial nesta região pelo fato da velocidade horizontal do líquido atingir seu valor mais alto no centro. Enquanto que as flutuações do fluxo ascendente e descendente nas proximidades da parede não contribuem significativamente ao comportamento destes tensores (Cui, 2005).

A diferença entre os perfis do tensor normal axial e normal radial sugere que os fenômenos turbulentos neste equipamento apresentam um comportamento anisotrópico. Como encontrado por Mudde *et al.* (1997) e Zhou *et al.* (2002).

Na Figura 4.18 se representa o tensor normal axial-radial. Segundo Bhole *et al.* (2006) este tensor é o responsável pela circulação da fase líquida na coluna.

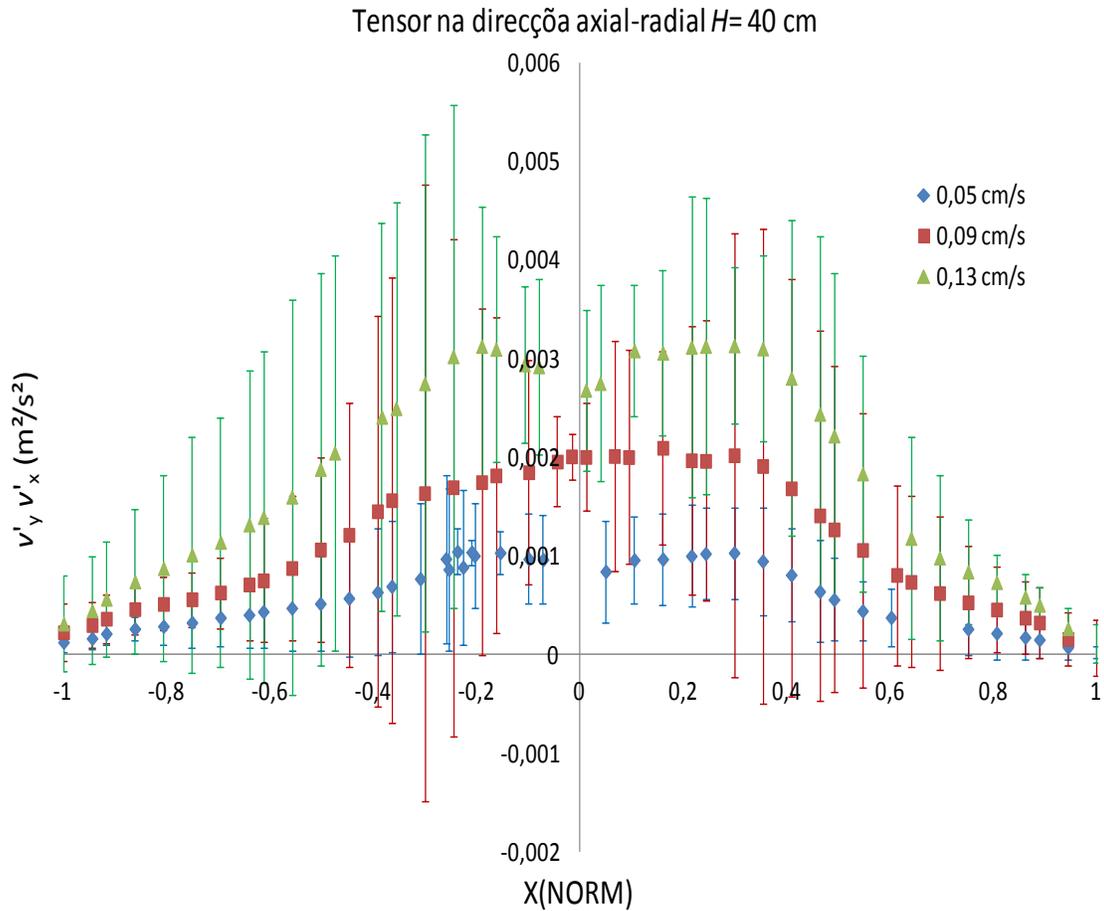


Figura 4.18 Tensor normal na direção axial- radial $H=40$ cm.

Confrontando os resultados obtidos nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, observa-se que a magnitude do tensor normal axial é maior comparada com os tensores normal radial e axial-radial. Assim, para uma velocidade superficial de gás de 0,05 cm/s, o tensor axial é 5 vezes maior que o tensor radial e duas vezes maior que o tensor axial-radial, concluindo que este tensor tem maior influência no comportamento do escoamento.

As Figuras 4.19-4.24 apresentam os perfis dos tensores normais para as alturas $H=80$ cm e $H=120$ cm.

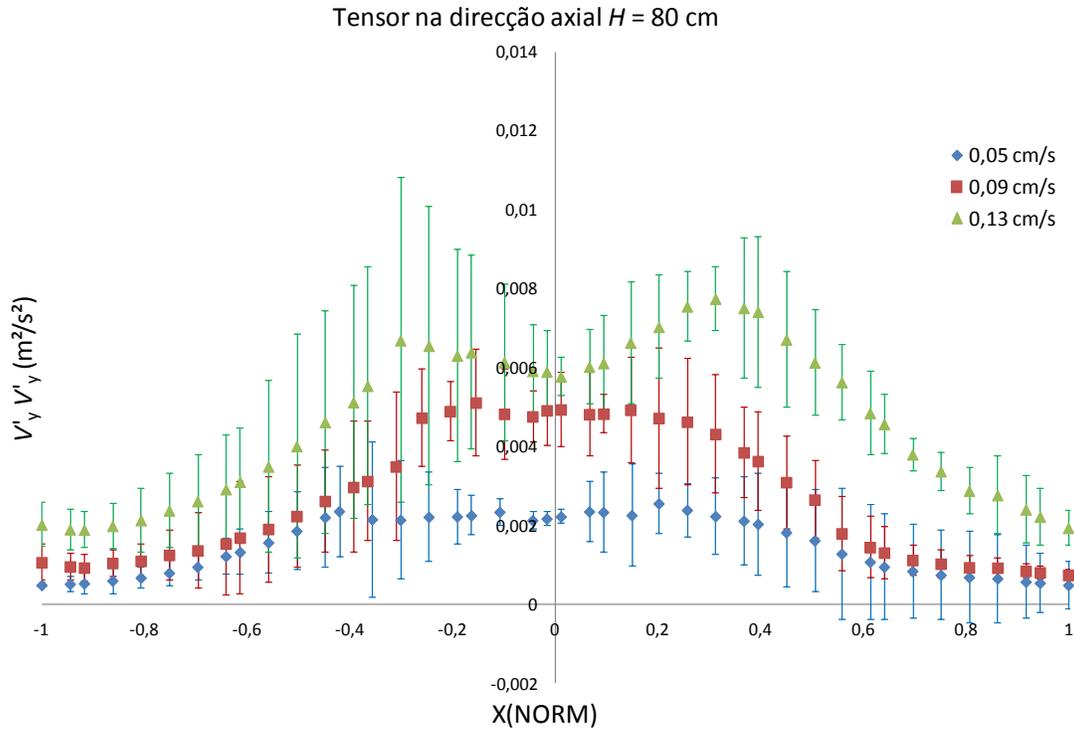


Figura 4.19 Tensor normal na direção axial $H=80$ cm

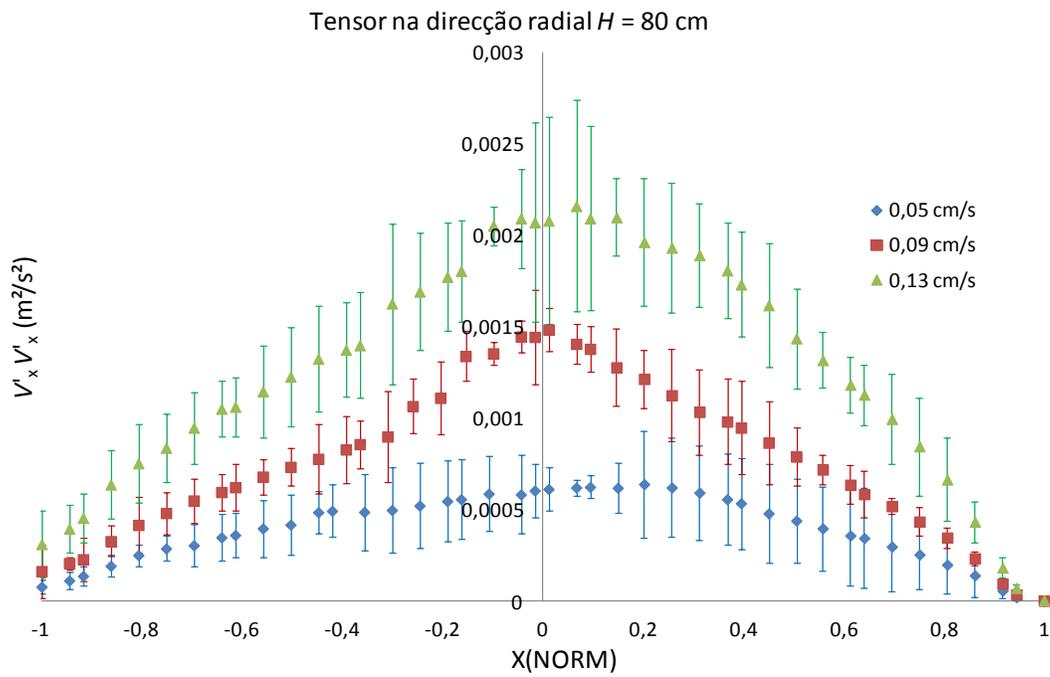


Figura 4.20 Tensor normal na direção radial $H=80$ cm

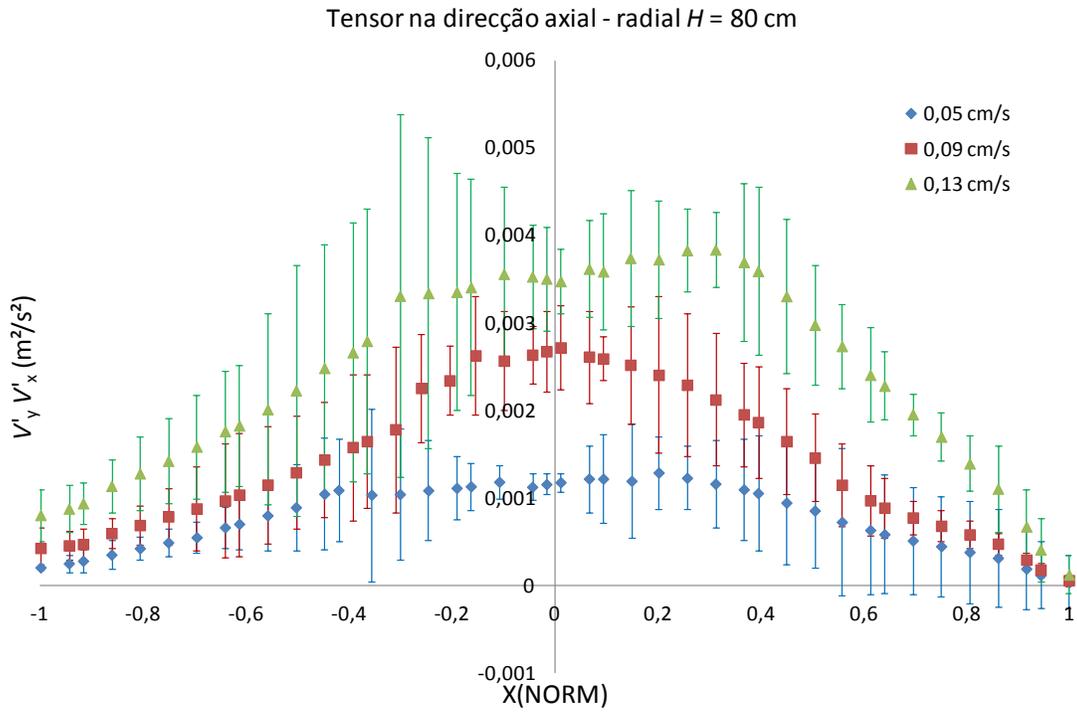


Figura 4.21 Tensor normal na direcção axial-radial $H= 80$ cm

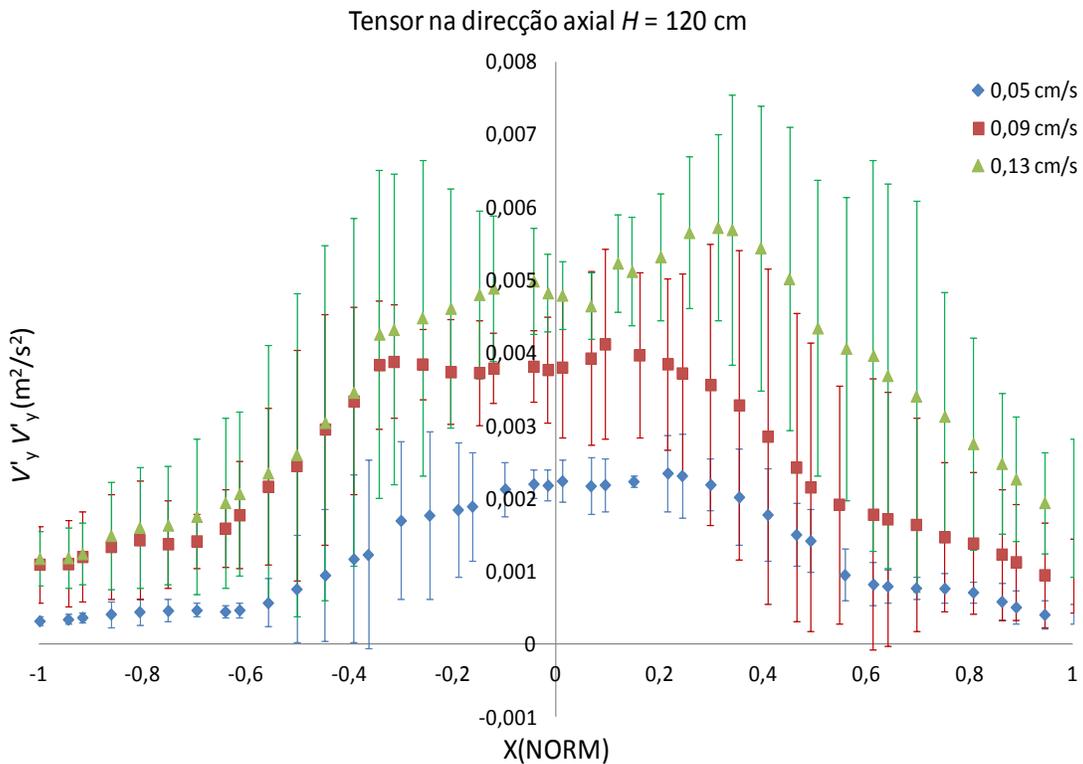


Figura 4.22 Tensor normal na direcção axial $H=120$ cm

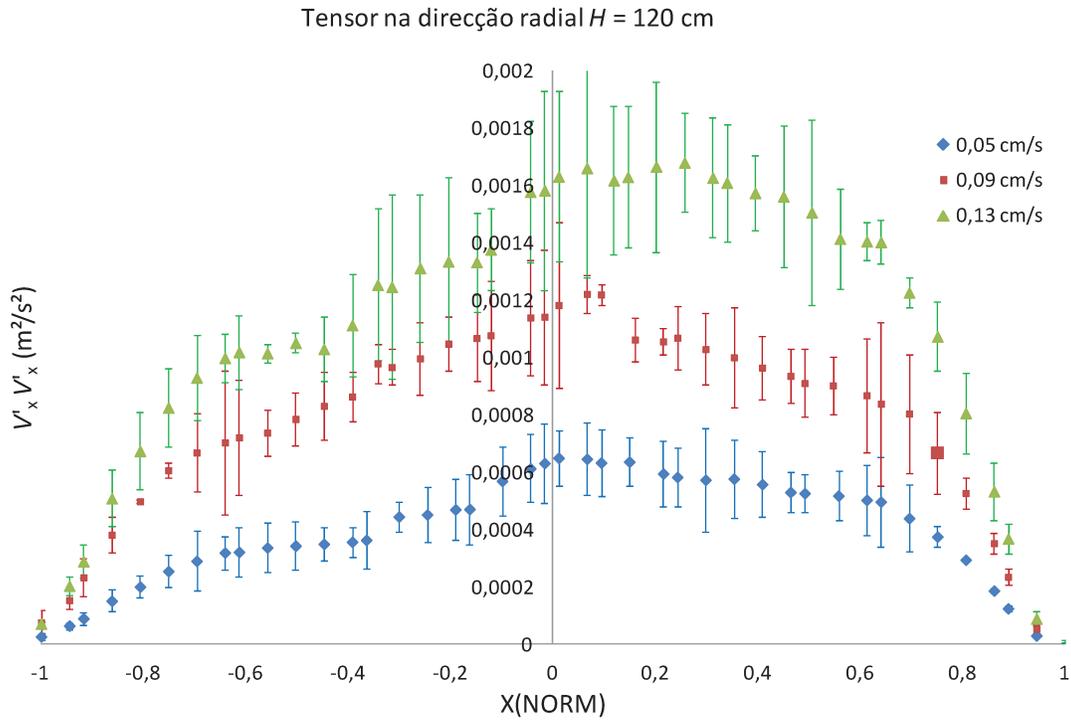


Figura 4.23 Tensor normal na direcção radial $H=120$ cm

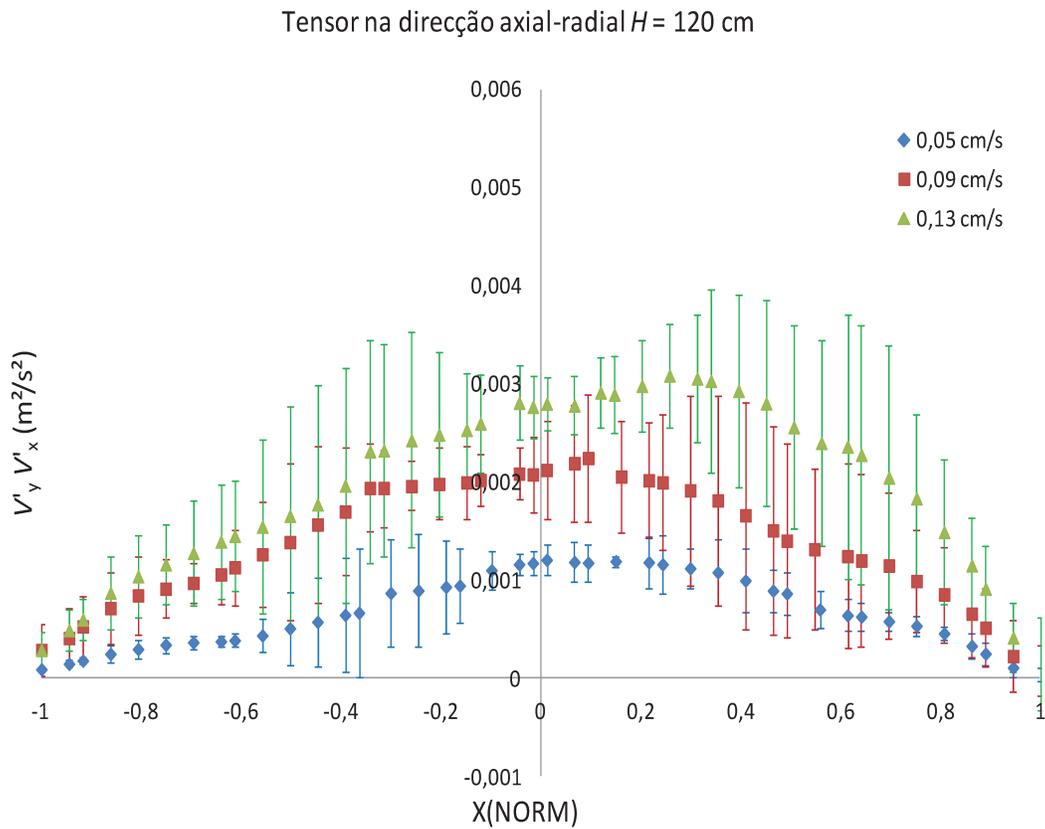


Figura 4.24 Tensor normal na direcção axial-radial $H=120$ cm

Das Figuras 4.19 - 4.24 se observa que os perfis dos tensores normais preservam sua tendência qualitativa, devido que a estrutura da velocidade do líquido se mantém quando a altura de medição aumenta. O comportamento qualitativo dos perfis dos momentos de segunda ordem para as alturas correspondentes a $H=80$ cm e $H=120$ cm, apresenta-se semelhantes. Não se apresentando diferenças significativas para os tensores radial e radial-axial.

A variação dos perfis axiais (v'_y, v'_y) corresponde ao fato do campo de escoamento estar completamente desenvolvido (na região $H=120$ cm), sendo a distribuição do gás e a turbulência induzida pelas bolhas mais uniforme, concordando assim com os resultados obtidos no estudo dos perfis da flutuação da velocidade anteriormente descritos. A análise dos tensores radiais (v'_x, v'_x) mostra a não simetria do escoamento, apresentando deslocamento dos perfis para o lado direito da coluna.

4.2.2 Energia Cinética Turbulenta

O cálculo dos valores do RMS permite a determinação da energia cinética turbulenta do sistema. A variação desta energia é parâmetro importante nos modelos de turbulência que caracterizam o escoamento. Segundo Albrecht *et al.* (2002), a energia cinética turbulenta (k) se define como:

$$k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{3}{4} (v'_j)^2 + \frac{3}{4} (v'_k)^2 \right) \quad (4.4)$$

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram os perfis k ao longo da largura da coluna para as três velocidades superficiais trabalhadas.

O perfil radial da energia cinética turbulenta da fase líquida, apresentado na Figura 4.25, mostra que à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, incrementa-se a energia cinética turbulenta do sistema, fato que pode ser atribuído à maior quantidade de bolhas agitadas dentro do escoamento (Bröder e Sommerfeld, 2009). Além disso, observa-se a presença de dois picos próximos ao centro, gerados devido à turbulência induzida pelos gradientes máximos de velocidade e às interações entre as bolhas.

Nas Figuras 4.26 e 4.27 se analisam os perfis de k as alturas de medição correspondentes a $H= 80$ cm e $H=120$ cm.

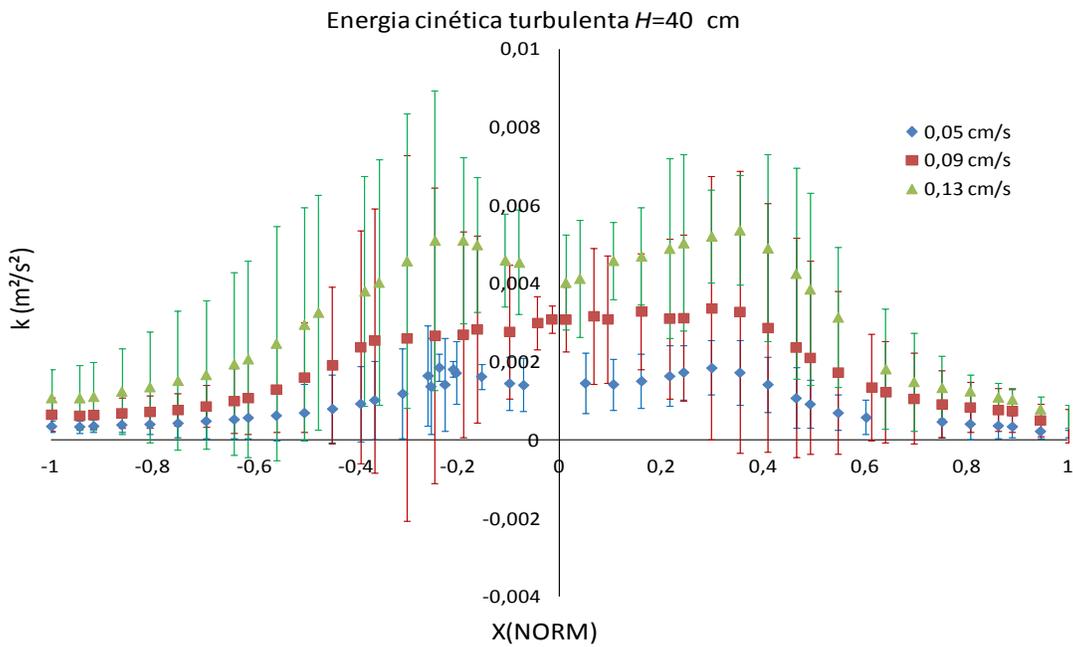


Figura 4.25 Energia Cinética Turbulenta $H=40$ cm.

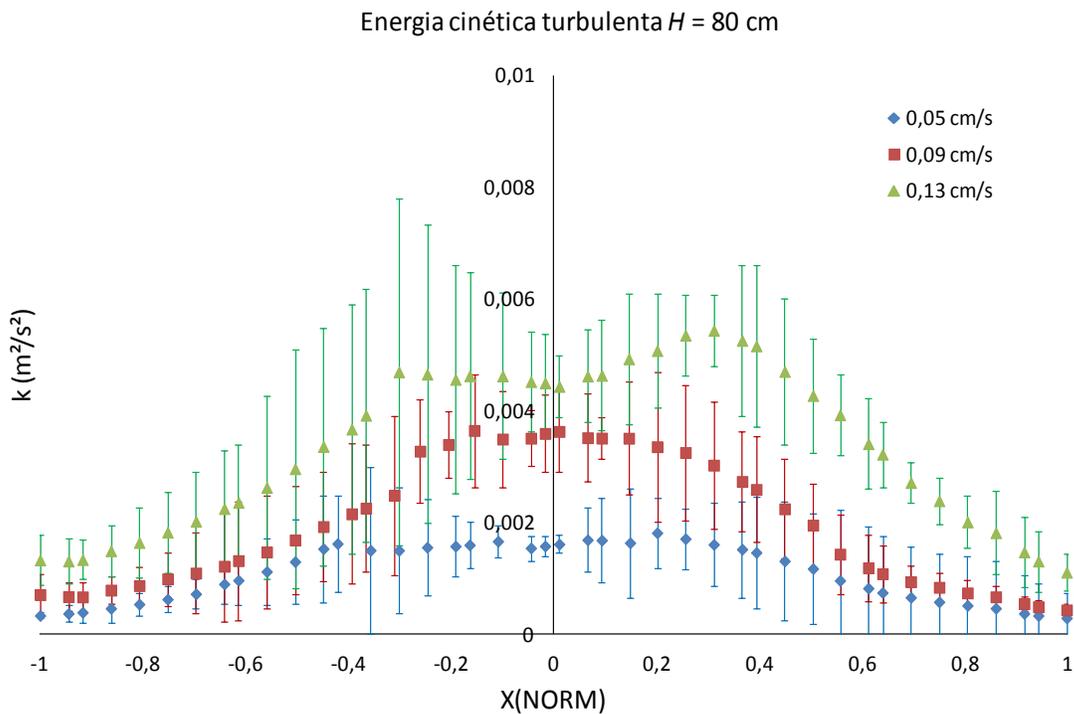


Figura 4.26 Energia Cinética Turbulenta $H=80$ cm.

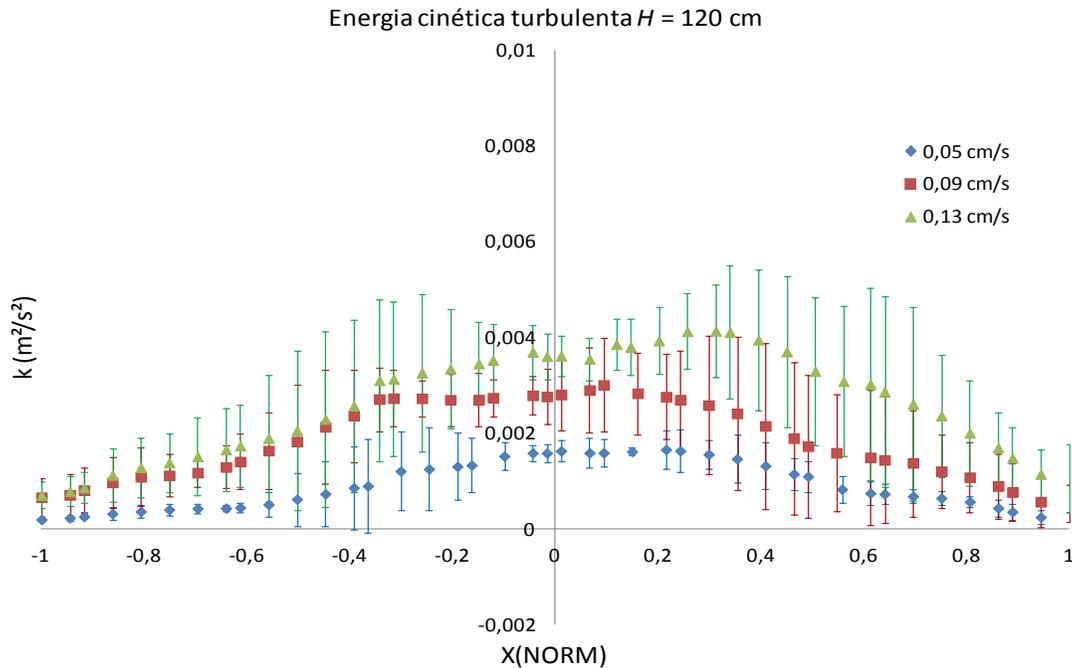


Figura 4.27 Energia Cinética Turbulenta $H=120$ cm.

Para todos os casos os perfis apresentam picos nas proximidades do centro da coluna onde há maior concentração de bolhas, e picos locais aproximadamente na região de 0,2 - 0,4 $X(NORM)$ onde se dá a inversão do fluxo.

Comparando as Figuras 4.25, 4.26, 4.27, observa-se que a energia cinética turbulenta decresce desde a região do distribuidor até a superfície do líquido pelo fato de se encontrar maior dispersão das bolhas através da seção transversal da coluna. Por outro lado, os máximos são atingidos perto do centro da coluna, onde existem maiores flutuações, perfil que coincide com os máximos apresentados para os tensores normais, na região dos vórtices, concluindo que o fluxo tem mudanças dinâmicas dependendo da localização da pluma de bolhas.

Neste trabalho de pesquisa, as medições foram feitas com um intervalo de confiança de 95%. Assim, da análise das propriedades avaliadas (Figuras 4.6- 4.27), observa-se que os maiores erros se apresentam nas proximidades do centro da coluna onde são superpostas as imagens, e na região próxima ao distribuidor ($H=40$ cm) devido à entrada intermitente do gás na coluna. A grandeza final dos erros obtidos durante a avaliação das propriedades do escoamento é afetada pelos erros intrínsecos das medições de

tipo indireto (medidas obtidas através de equações com base em medições realizadas diretamente do equipamento).

4.3 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA BOLHA NA COLUNA DE BOLHAS

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos para a fase gasosa utilizando a técnica de medição de sombras (*Shadow*). A distribuição do tamanho de partícula na coluna é analisada por meio de histogramas, onde o eixo y corresponde ao número normalizado de bolhas da amostra (número de bolhas correspondentes a uma classe de tamanho em relação ao número total de bolhas da amostra, N_i/N_0), e o eixo x ao diâmetro correspondente a determinada classe de tamanho de bolha. Assim, foram analisadas três seções da coluna dependendo da estrutura do fluxo observada para cada seção variando a velocidade superficial do gás (0,05; 0,09; 0,13 cm/s).

Conforme se apresenta na Figura 4.28, na primeira seção (40 cm de altura desde o distribuidor) foi estudado todo o campo de visão da coluna.

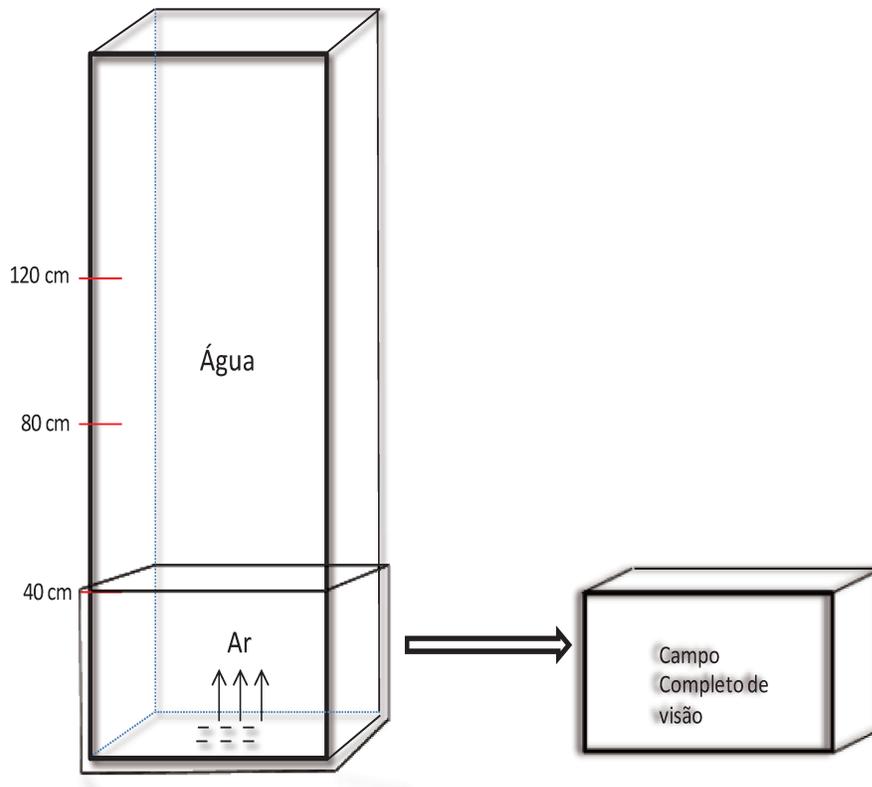


Figura 4.28 Campo de visão da coluna na altura de 40 cm.

As Figuras 4.29, 4.30 e 4.31, apresentam a distribuição do tamanho da bolha nesta seção para as três velocidades superficiais avaliadas.

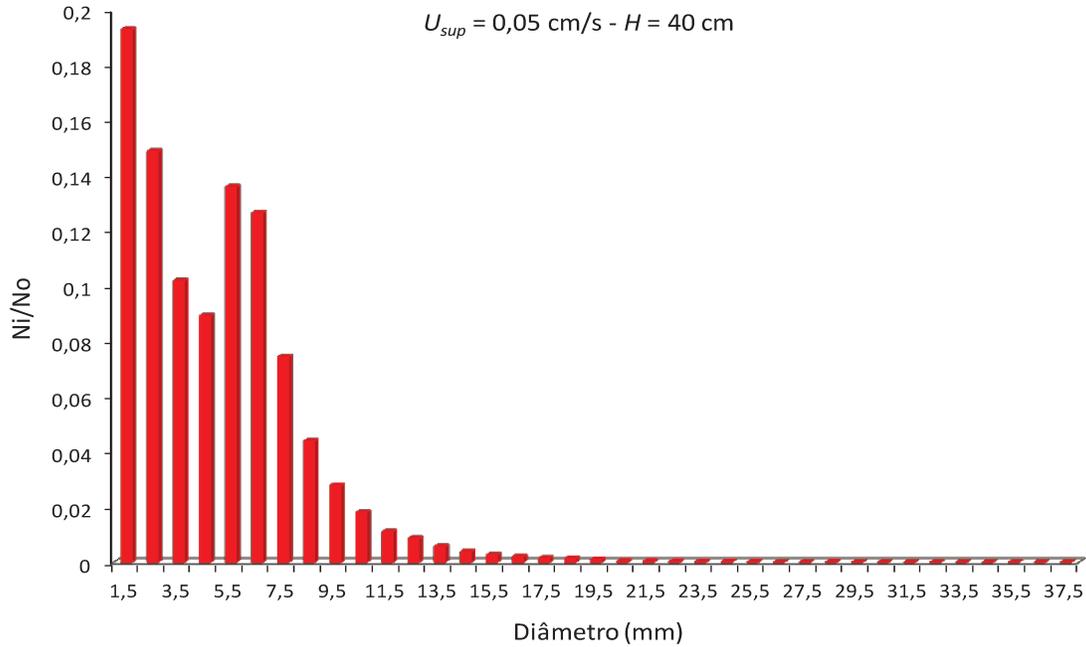


Figura 4.29 Histograma da distribuição do tamanho de partícula ($H = 40 \text{ cm}$; $U_{sup} = 0,05 \text{ cm/s}$).

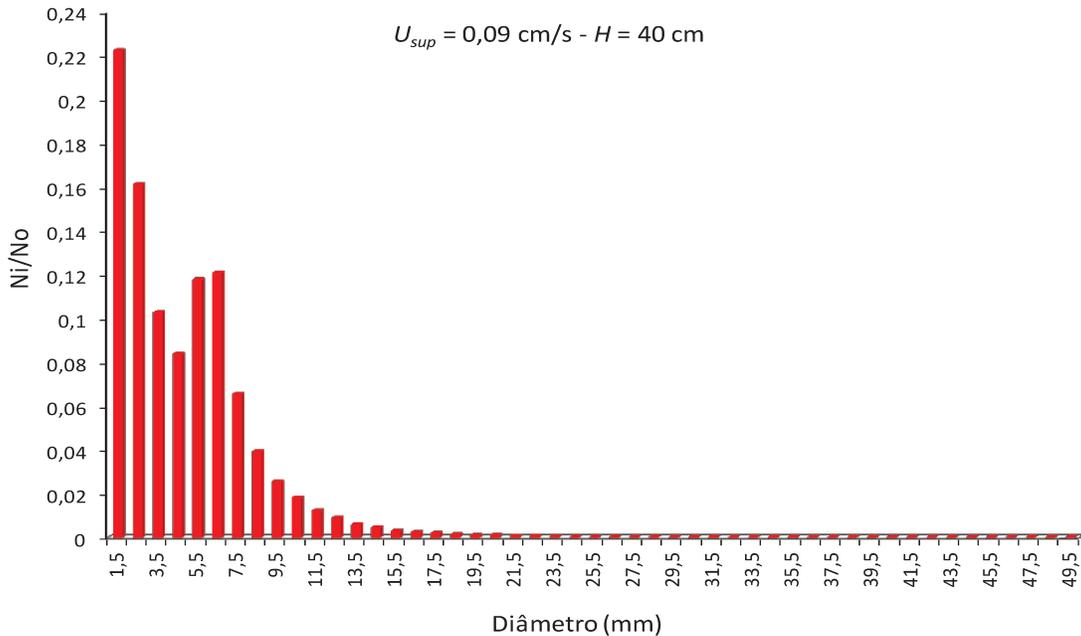


Figura 4.30 Histograma da distribuição do tamanho de partícula ($H = 40 \text{ cm}$; $U_{sup} = 0,09 \text{ cm/s}$).

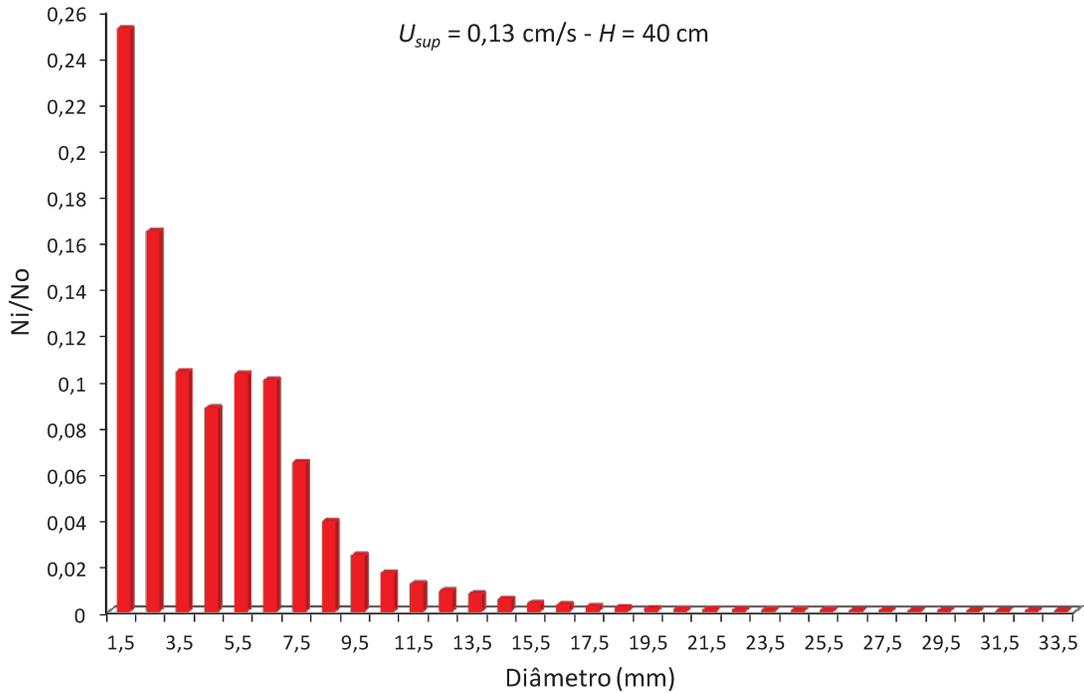


Figura 4.31 Histograma da distribuição do tamanho de partícula ($H = 40$ cm; $U_{sup} = 0,13$ cm/s).

Conforme as Figuras 4.29, 4.30 e 4.31, nota-se uma distribuição assimétrica, devido que as frequências dos diâmetros medidos se distribuem em forma desigual em torno da média. Além disso, observa-se que as distribuições são de tipo bimodal por apresentar dois picos que representam duas classes de tamanho de bolha uma ao redor de 1,5 mm e outra próxima aos 6 mm. O deslocamento para a esquerda, sugere que não há ocorrência de bolhas com tamanhos inferiores a 1 mm de diâmetro dentro da coluna, concordando com as restrições dadas ao *software*. Também se observa que à medida que incrementa a velocidade superficial do gás a presença do segundo pico (bolhas de 6 mm de diâmetro) diminui.

Para analisar a distribuição do tamanho da bolha das seguintes seções da coluna foi feito um estudo local dividindo o campo de visão do equipamento, com o intuito de analisar as variações locais da fase gasosa, pois as bolhas se propagam mais uniformemente ao longo da lateral. Assim, para a altura de 80 cm a coluna foi dividida em duas partes chamadas de esquerda [1] e direita [2] como representado na Figura 4.32.

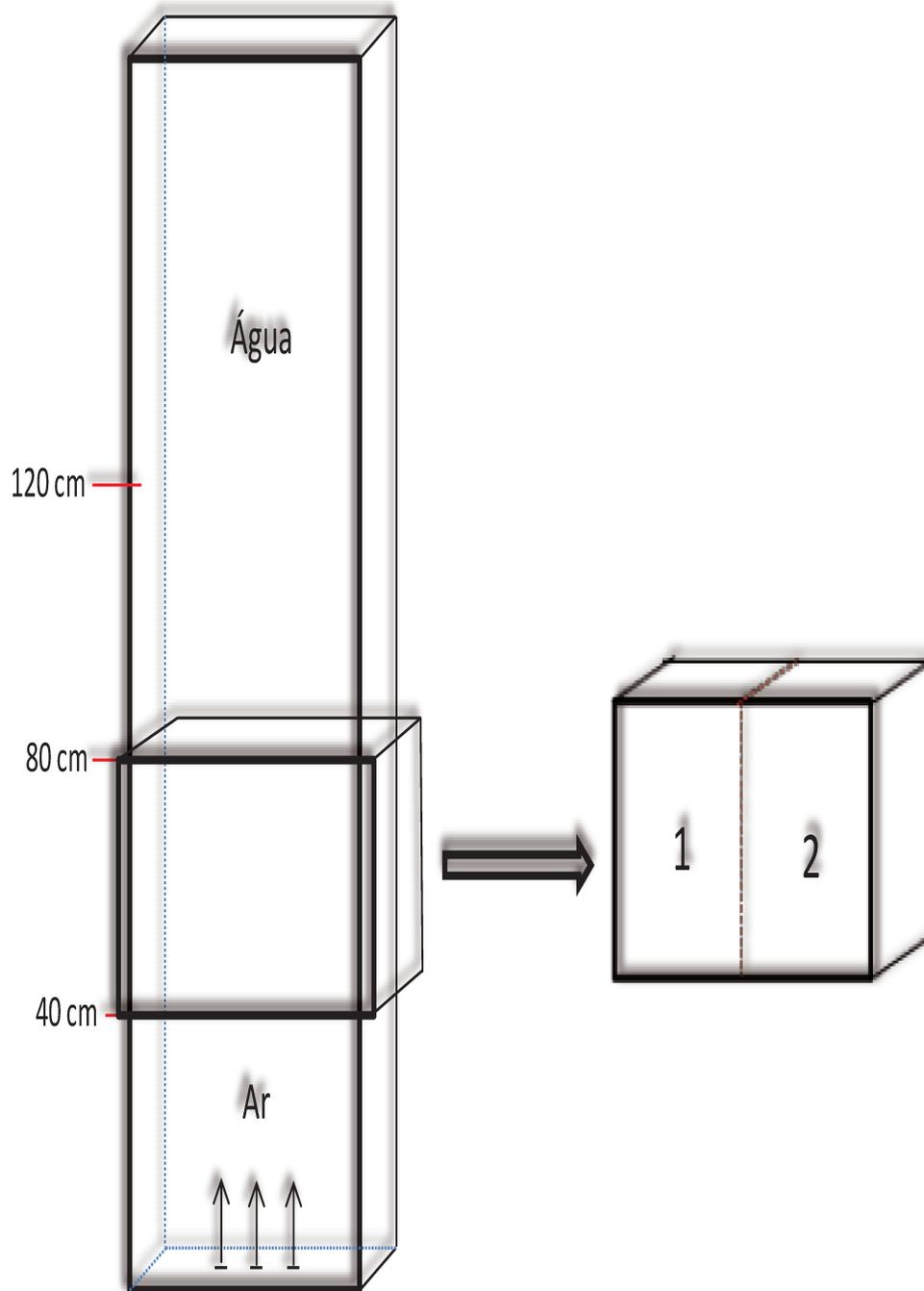


Figura 4.32 Divisão do campo de visão da coluna na altura $H=80$ cm.

As distribuições do tamanho de bolha obtidas para esta região são mostradas nas Figuras 4.33-4.35, para variações da velocidade superficial do gás na entrada da coluna de 0,05; 0,09 e 0,13 cm/s.

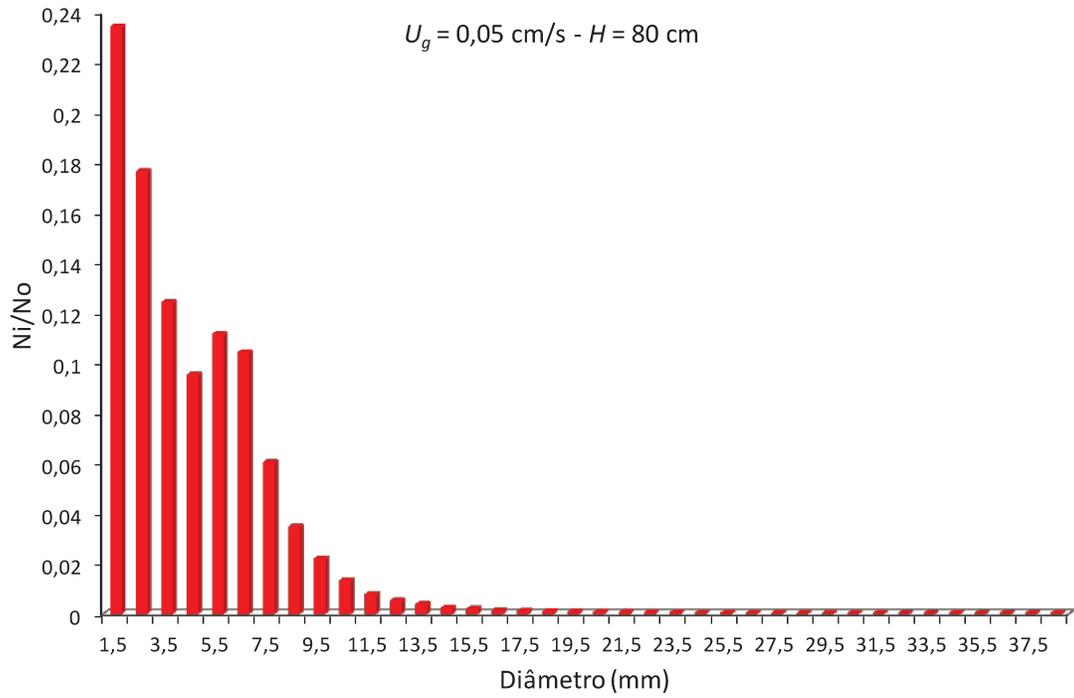


Figura 4.33 Histograma da distribuição do tamanho ($H = 80 \text{ cm}$; $U_{sup} = 0,05 \text{ cm/s}$).

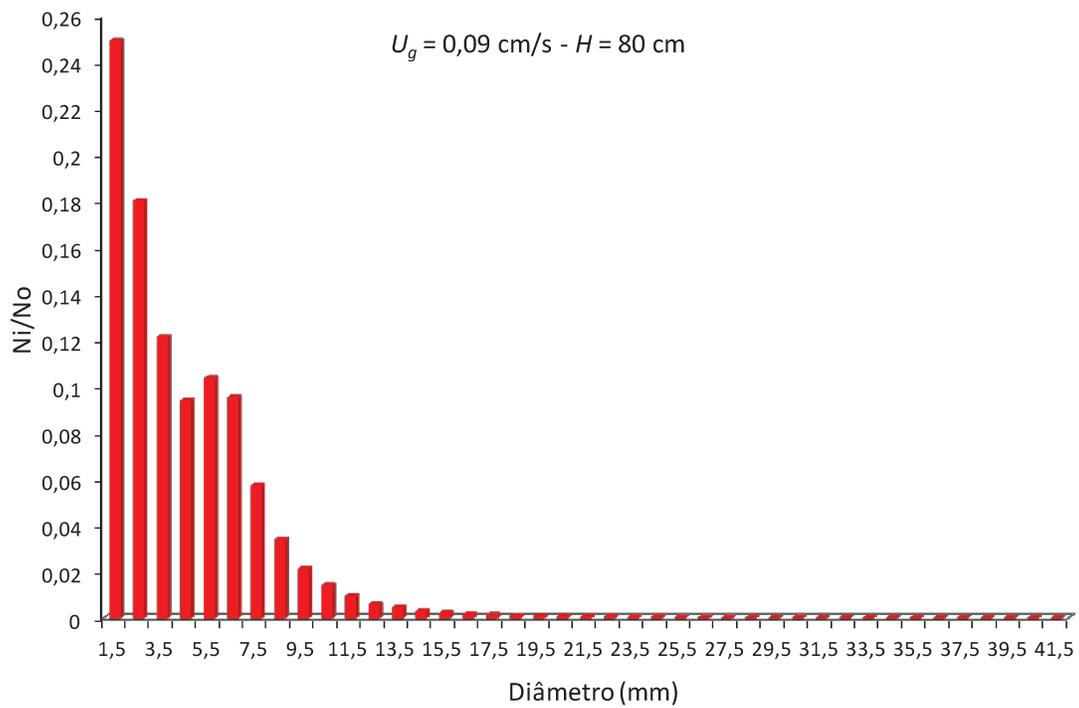


Figura 4.34 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H = 80 \text{ cm}$; $U_{sup} = 0,09 \text{ cm/s}$).

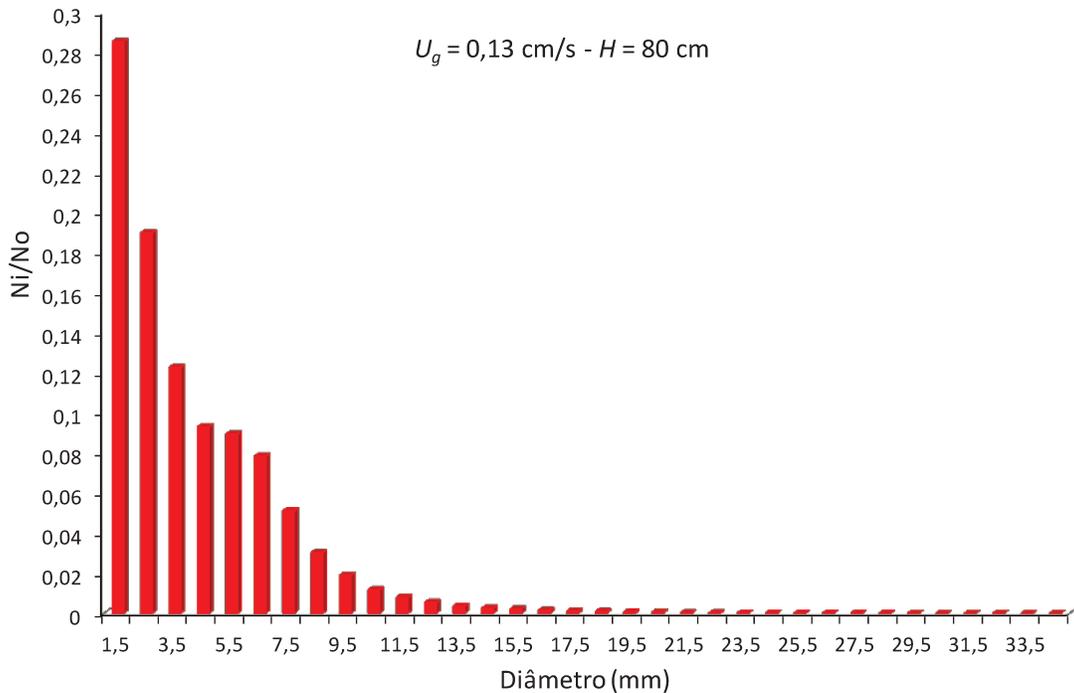


Figura 4.35 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H=80 \text{ cm}$; $U_{sup}=0,13 \text{ cm/s}$).

Analisando os resultados pode-se observar que entre a região de entrada da fase gás (região de alimentação) e a altura intermediária de medição ($H = 80\text{cm}$), as bolhas sofrem uma maior deformação, modificando assim seu tamanho. Fato que pode ser atribuído à força de empuxo, que apresenta sua maior influência na região de entrada do gás. Para as três velocidades, o aumento da altura provoca a diminuição do tamanho médio das bolhas, o que pode ser relacionado com o desenvolvimento do escoamento.

Para estudar a última seção da coluna na altura de 120 cm o campo de visão foi dividido em quatro regiões (Esquerda [1], Esquerda [2], Direita [1], Direita [2]) como se mostra na Figura 4.36. Isto, devido à fase gasosa se encontrar dispersa pela região transversal da coluna.

As distribuições do tamanho de bolha para cada uma das velocidades superficiais estudadas na altura de medição correspondente a $H=120 \text{ cm}$ são apresentadas nas Figuras 4.37, 4.38 e 4.39.

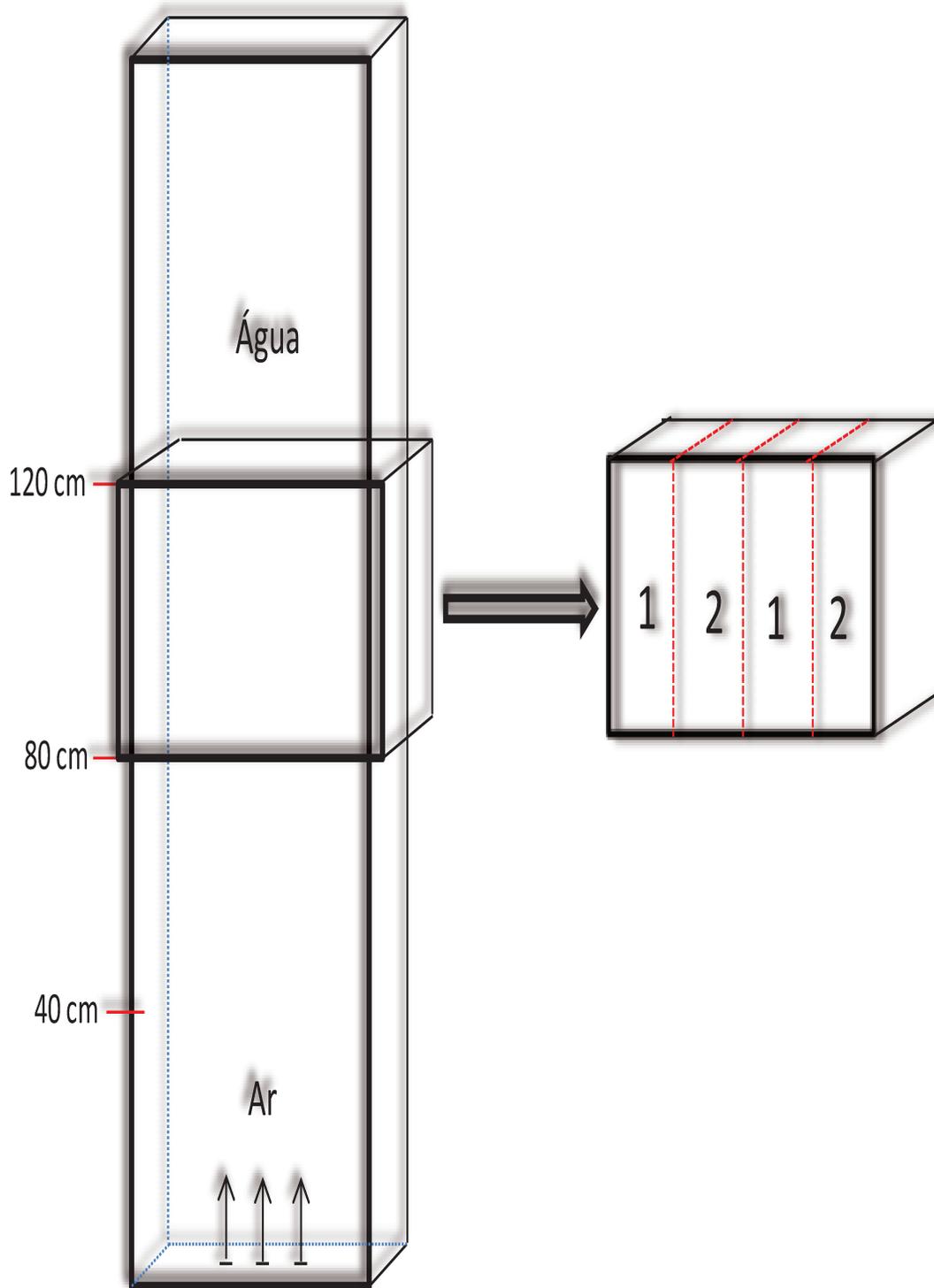


Figura 4.36 Divisão do campo de visão da coluna na altura de 120 cm.

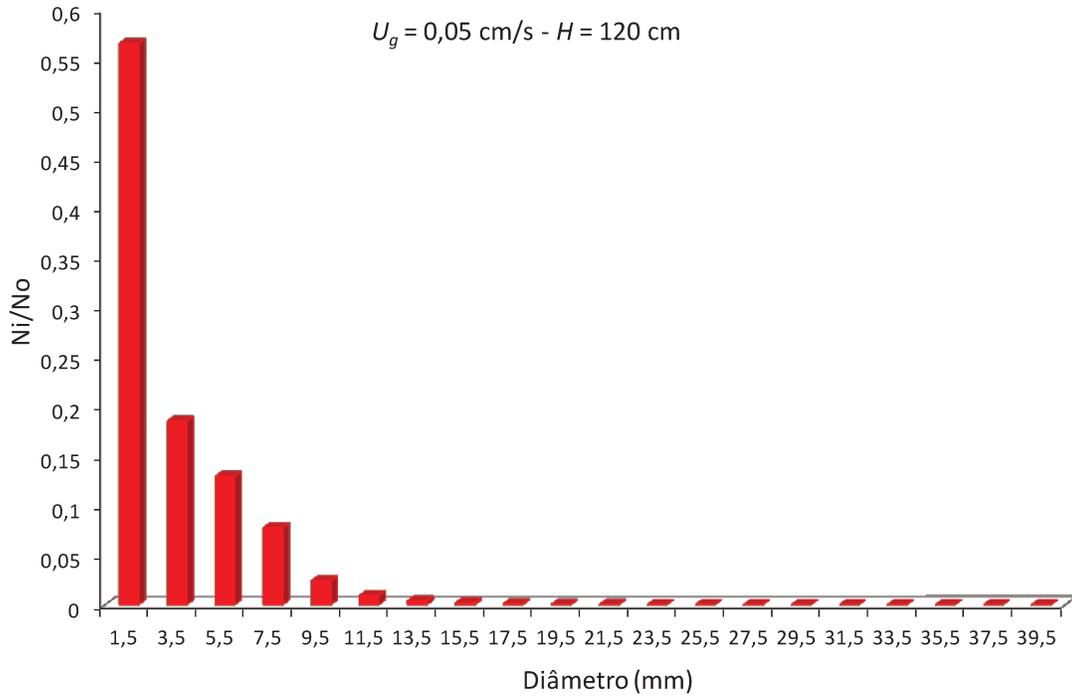


Figura 4.37 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H = 120$ cm; $U_{sup} = 0,05$ cm/s).

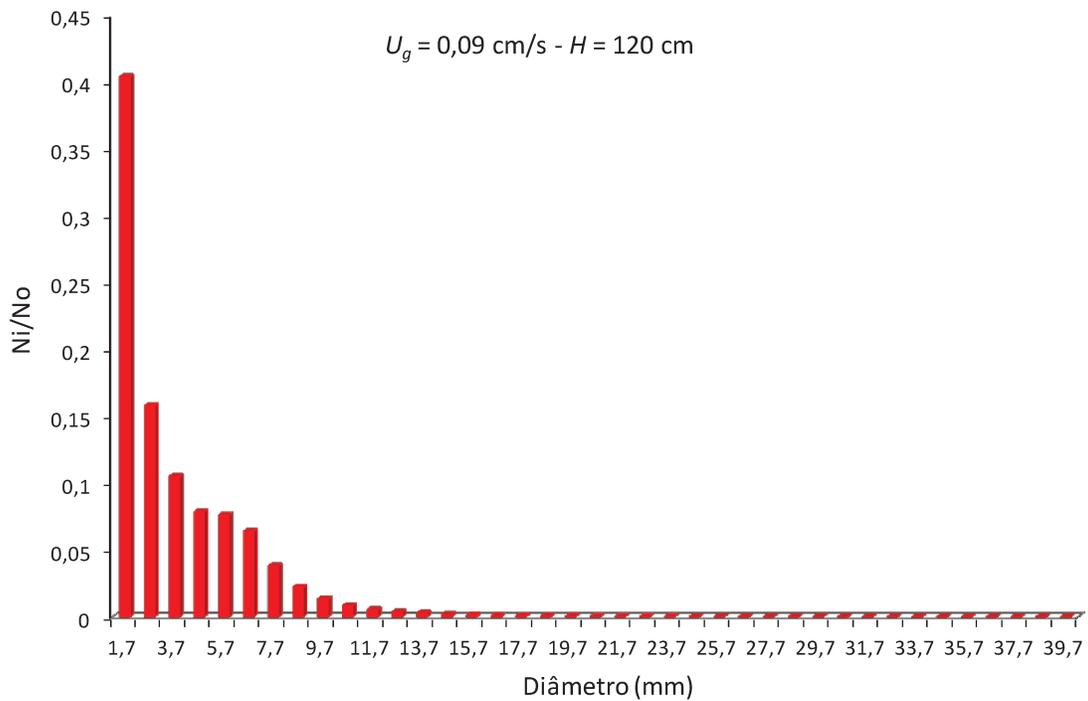


Figura 4.38 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H = 120$ cm; $U_{sup} = 0,09$ cm/s).

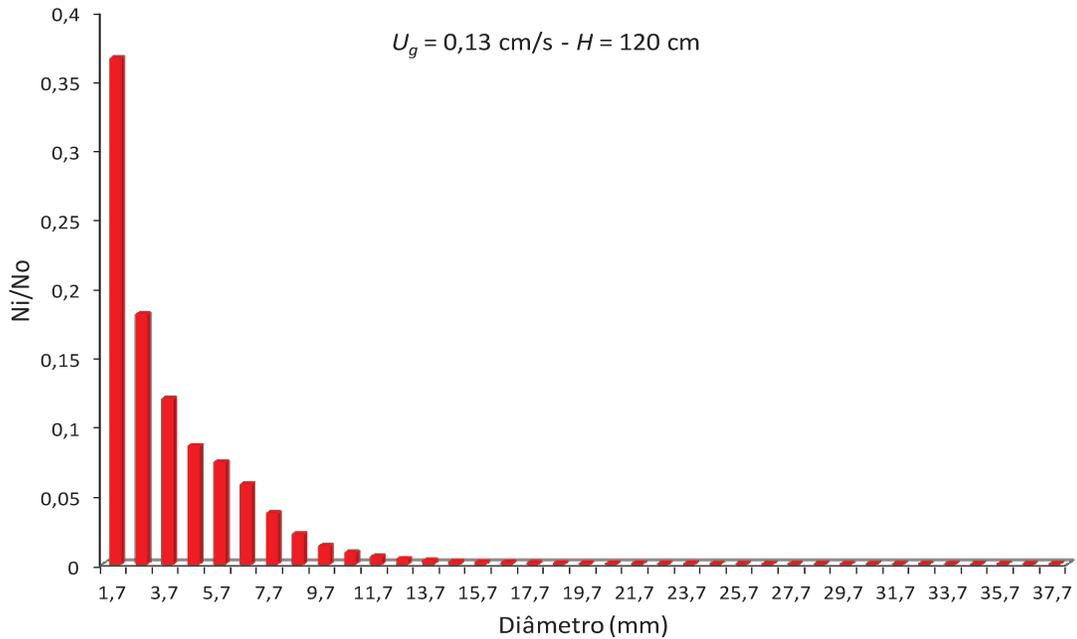


Figura 4.39 Histograma da distribuição do tamanho da bolha ($H=120$ cm; $U_{sup}=0,13$ cm/s).

Conforme se observa nas Figuras 4.37, 4.38 e 4.39 o pico que representa uma segunda classe de tamanho de bolha, desaparece, e a distribuição já não segue sendo bimodal, e sim de tipo Poisson. Observa-se que, apesar de medidos separadamente, os perfis obtidos entre as “divisões” são semelhantes e assimétricos com desvio a esquerda.

Para esta região ($H=120$ cm), onde o escoamento está plenamente desenvolvido, o diâmetro médio das bolhas aumenta conforme a velocidade, concordando com a correlação de Kumar e Kullor, (1970). Estes comportamentos podem ser novamente justificados pelo desenvolvimento do escoamento.

A análise da distribuição do tamanho de bolha deve se distinguir entre as regiões perto do distribuidor e a distribuição nas regiões mais distantes (Akita e Yoshida, 1974). A presença de maior quantidade de bolhas com grandes diâmetros médios nesta região ($H=40$ cm - $H=80$ cm), pode ser explicada pelo fato das bolhas não ter se deformado, nem quebrado, ou pela sobreposição das bolhas captadas pela câmara.

Para todas as distribuições (Figuras 4.29-4.39) se encontram pequenas reduções no tamanho da bolha através da altura da coluna, fenômeno associado provavelmente à ruptura das bolhas (Bröder e Sommerfeld, 2009), ou ao fato do escoamento se encontrar completamente desenvolvido na região próxima ao topo da coluna. Além disso, observa-se

que a presença (Ni/No) das pequenas bolhas incrementa desde o distribuidor até o topo da coluna. A Tabela 4.1 apresenta um resumo das características das bolhas ao longo da coluna, para as diferentes velocidades superficiais de gás. Pode-se concluir que os valores dos diâmetros da bolha (D_{10}) se encontram na faixa de 3-5 mm, apresentando uniformidade de tamanho ao longo da coluna, característica importante das colunas de bolhas operando em regime homogêneo (Xu *et al.* 2005). Nota-se que para todos os casos 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.

Tabela 4.1 Resumo das características da bolha ao longo da coluna.

DADOS MÉDIOS			
Resultados Estatísticos	Altura $H=40$ cm		
	$U_{sup}= 0,05$ cm/s	$U_{sup}= 0,09$ cm/s	$U_{sup}= 0,13$ cm/s
N° Partículas	37197	59171	56943
D10 [mm]	4,931	4,766	4,615
D32 [mm]	8,968	9,283	9,487
RMS	3,099	3,200	3,780
Altura $H=80$ cm			
N° Partículas	76138	135843	161830
D10 [mm]	4,376	4,343	4,079
D32 [mm]	8,327	8,919	8,582
RMS	2,850	2,958	2,897
Altura $H=120$ cm			
N° Partículas	178861	254275	355570
D10 [mm]	3,197	3,659	3,679
D32 [mm]	7,837	8,075	8,049
RMS	2,625	2,691	2,655

Algumas correlações foram avaliadas para comparar os dados de tamanho de bolha com os dados obtidos experimentalmente. Neste caso foram utilizadas as correlações de Miller, (1974) (Equação 4.9) e Kumar e Kullor, (1970) (Equação 4.10) e os resultados são apresentados na Tabela 4.2.

$$d_b = \left[\frac{6\sigma d_0}{g(\rho - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (4.9)$$

$$V_b = \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} \left(\frac{15\mu Q}{2\rho g} \right)^{3/4} \quad (4.10)$$

Com V_b corresponde ao diâmetro de uma esfera

$$V_b = \frac{1}{6} \pi d_e^3 \quad (4.11)$$

Tabela 4.2 Correlações para tamanho da bolha produzida em um orifício.

<i>Velocidade Superficial do gás</i>	<i>Altura H=40 cm</i>	<i>Altura H=80 cm</i>	<i>Altura H=120 cm</i>	<i>Diâmetro médio total</i>	<i>Miller</i>	<i>Kumar e Kullor</i>
0,05 cm/s	4,931 mm	4,376 mm	3,197 mm	4,168 mm		3,621 mm
0,09 cm/s	4,766 mm	4,343 mm	3,659 mm	4,256 mm	3,548 mm	4,213 mm
0,13 cm/s	4,615 mm	4,079 mm	3,679 mm	4,124mm		4,625 mm

Comparando o diâmetro médio total ao longo da coluna com o obtido por meio das correlações apresentadas na Tabela 4.2, observam-se diferenças entre 3 até 15%, o que representa boa concordância entre os dados experimentais com aqueles calculados pelas correlações. Além disso, observa-se que o diâmetro médio no campo de fluxo total é praticamente constante ($D_{10} \approx 4.2$ mm), caracterizando o regime homogêneo do escoamento.

Os diâmetros obtidos para cada região de estudo se encontram dentro da faixa (3-5 mm). As grandes bolhas mostram uma redução consistente de tamanho devido a sua deformação e possível ruptura, diminuindo assim o diâmetro médio em função da altura. O efeito da velocidade superficial do gás melhora o incremento da interação bolha-bolha, o que se reflete no decrescimento da média na distribuição, comportamento também encontrado por Colella *et al.* (1999).

Já na região superior da coluna ($H=120$ cm), o escoamento está plenamente desenvolvido, e a presença dos possíveis fenômenos de quebra e deformação das bolhas pode ser negligenciada. A tendência do comportamento da distribuição é contrária às alturas anteriores, e concorda com a maioria dos trabalhos em colunas de bolhas. O diâmetro médio da bolha aumenta com a velocidade superficial do gás, observando-se maior uniformidade no tamanho da bolha ao longo da seção transversal. Devido ao valor do diâmetro na região do distribuidor estar próximo ao diâmetro médio total, os efeitos de coalescência podem ser negligenciados. (Camarasa *et al.* 1999).

O diâmetro médio de *Sauter* foi analisado variando tanto a posição axial de medição quanto a velocidade superficial do gás, como mostra a Figura 4.40.

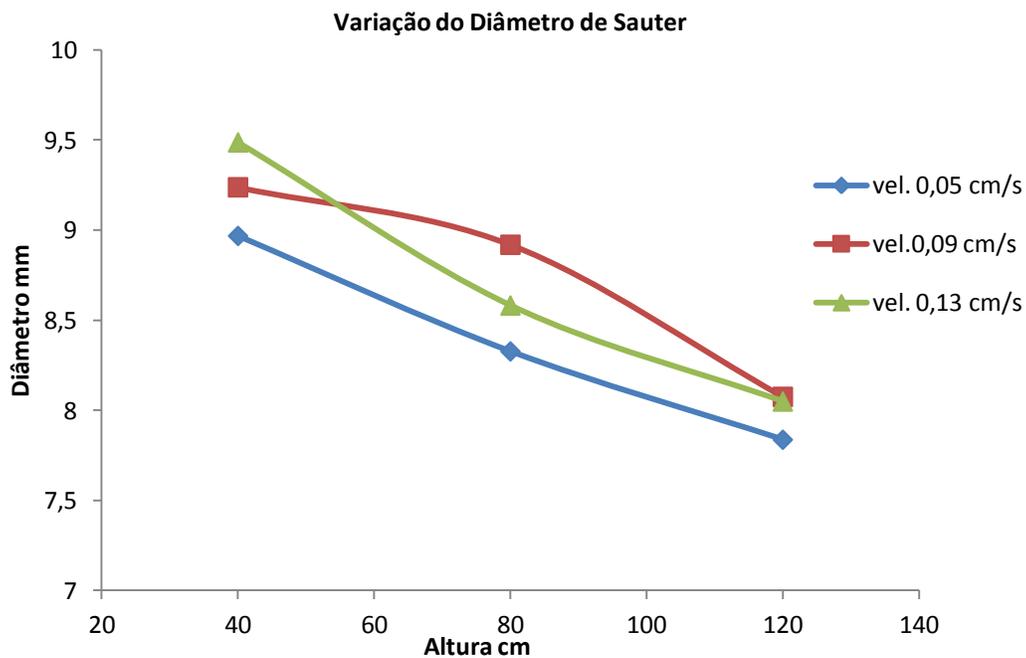


Figura 4.40 Variação do diâmetro de *Sauter* na direção axial do escoamento.

Conforme a Figura 4.40, em geral o diâmetro médio de *Sauter* aumenta com o incremento da velocidade superficial de gás. Enquanto, na região próxima ao distribuidor ($H=40$ cm) o diâmetro de *Sauter* é maior que no topo da coluna ($H=120$ cm). Para a velocidade correspondente a $0,09$ cm/s, se apresenta um máximo no médio da coluna ($H=80$ cm), comportamento não esperado, devido que se espera que o diâmetro diminua ou permaneça constante com o incremento da altura, este efeito pode corresponder a presença de maiores efeitos de quebra.

Em geral, as metodologias aplicadas e os experimentos realizados apresentaram resultados coerentes, em conformidade com a literatura, como discutidos neste capítulo. O que demonstra que a unidade experimental de coluna de bolhas, acoplada dos sistemas de aquisição de dados (PIV e *Shadow*) fornece uma boa representação do escoamento multifásico destes equipamentos.

Capítulo 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento da metodologia aplicada na unidade experimental de coluna de bolhas retangular. Além disso, são descritas algumas sugestões para dar continuidade a trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Realizou-se experimentos em uma coluna de bolhas retangular aplicando técnicas visuais de medição como a técnica PIV e de sombras *Shadow*, com o intuito de estudar o comportamento hidrodinâmico do escoamento bifásico, e algumas características das bolhas tais como distribuição e tamanho, variando o fluxo de entrada do gás. Para que fosse possível tais medidas, foi necessária a divisão da coluna, para assim obter dados de todo o campo de escoamento e estudar as variações locais gás-líquido.

Os perfis da velocidade axial média do líquido descrevem o comportamento hidrodinâmico clássico das colunas de bolhas onde na região central, o comportamento é ascendente e na região da parede é descendente. A máxima velocidade se encontra no centro da coluna, enquanto nas regiões próximas as paredes há presença de zonas de inversão de fluxo.

Do estudo observou-se que os perfis da velocidade axial média do líquido são parabólicos e assimétricos ao eixo vertical, apresentando pouca variação com relação à altura, sendo assim, mais significativa a variação com o aumento da velocidade superficial do gás.

A passagem das bolhas por uma determinada localização da coluna afeta diretamente o comportamento da fase líquida, modificando tanto a magnitude como a

direção de seu escoamento. Assim, observa-se que o valor do RMS aumenta significativamente com a velocidade superficial do gás, sendo os perfis mais homogêneos à medida que se aproxima ao topo da coluna.

A análise dos perfis correspondentes aos tensores de Reynolds permite concluir que a diferença entre o tensor normal radial e axial sugere um comportamento anisotrópico deste equipamento. Além disto, observou-se que o tensor normal axial possui maior influência na dinâmica do escoamento. Em todos os casos os máximos são atingidos no centro da coluna ou próximos a ele, devido a maior concentração de bolhas aumentando as flutuações neste ponto.

Os perfis da energia cinética turbulenta possuem máximos perto do centro da coluna, região onde existem maiores flutuações, correspondentes aos máximos apresentados nos perfis dos tensores normais, concluindo que o fluxo tem mudanças dinâmicas dependendo da localização da pluma de bolhas.

As distribuições do tamanho da bolha mostram-se assimétricas, devido que as frequências dos diâmetros médios se distribuem em forma desigual em torno da média, apresentado um deslocamento para a esquerda, determinando-se que não há ocorrência de bolhas com tamanhos inferiores a 1 mm.

Nas regiões perto do distribuidor observou-se que as bolhas sofrem maior deformação, modificando assim seu tamanho. Aumento da velocidade gera uma diminuição do tamanho da bolha. Enquanto, no topo da coluna, onde o escoamento supõe-se completamente desenvolvido esta tendência muda, concordando com correlações propostas na literatura.

Além disso, verificou-se que o tamanho da bolha decresce ao longo da coluna devido aos efeitos da deformação e fenômenos de coalescência. Igualmente, se encontrou o diâmetro médio da bolha na faixa dos 4 milímetros, tamanho típico no regime homogêneo.

A técnica de velocimetria por imagem de partícula permite obter dados quantitativos referentes a uma área do escoamento, e assim, estabelecer parâmetros do comportamento da fase líquida no sistema bifásico.

A técnica PIV tem a capacidade de realizar estudos detalhados das características da fase líquida em um campo de fluxo turbulento ao mesmo tempo em que permite determinar o campo de velocidade instantâneo do fluido.

Os estudos relacionados com a aplicação da técnica *Shadow*, permitiram a determinação do diâmetro médio de um conjunto de partículas detectadas nos ensaios.

Em geral, as metodologias aplicadas e os experimentos realizados apresentaram resultados coerentes, em conformidade com a literatura. O que demonstra que a unidade experimental de coluna de bolhas, acoplada a os sistemas de aquisição de dados (PIV e *Shadow*) fornece uma boa representação do escoamento multifásico nestes equipamentos.

5.2 SUGESTÕES

Ressalta-se a necessidade de pesquisas futuras com o intuito de analisar os efeitos de fatores tais como a adição de substâncias surfactantes ou estudos do escoamento gás-líquido com substâncias de maior viscosidade que a água, para determinar o comportamento hidrodinâmico da coluna de bolhas.

Estudar a dinâmica do escoamento em regime heterogêneo e estabelecer os efeitos dos fenômenos de quebra e coalescência na distribuição do tamanho da bolha na coluna retangular.

Examinar propriedades da bolha, como excentricidade e velocidade aplicando a técnica *Shadow* com duas câmaras CCD, e assim, obter uma representação mais realística do escoamento gás-líquido em colunas de bolhas.

Corroborar dados obtidos através de experimentação numérica por CFD, a partir dos dados determinados experimentalmente.

Capítulo 6

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, H.E; BORYS, M.; DAMASCHKE, N.; TROPEA, C. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Ed. Springer, 2002.

Al-MASRY W.; E. ALI. Identification of hydrodynamic characteristics in bubble columns through analysis of acoustic sound measurements—Influence of the liquid phase properties. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 46, p. 127-138, 2007.

AKITA, K.; YOSHIDA, F. Bubble size, interfacial area and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns. *Ind. Eng. Chem. Process*, v. 12, p. 76-80, 1974.

AZAD, M., SYEDA, S. A numerical model for bubble size distribution in turbulent gas-liquid dispersion. *Journal of Chemical Engineering*, v. 24, p. 25-34, 2006.

BAKSHI, B. R.; ZHONG, H., JIANG, P.; FAN, L.-S. Analysis of flow in gas-liquid bubble columns using multi-resolution methods. *Tans. Inst. Chem. Engrs.*, v. 73, p. 608-614, 1995.

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.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. An advanced LIF-PIV system for analysing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fractions. *Experiments in fluids*, v.33, p. 826-837, 2002.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubble flows. *Meas.Sci.Technol.*, v.18, p. 2513-2528, 2007.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Analysis of hydrodynamics and microstructure in a bubble column by planar shadow image velocimetry. *Ind, Eng. Chem.*, v. 48, p. 330-340, 2009.

BUWA, V.V.; RANADE, V.V. Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations. *Chem. Eng. Science*, v. 57, p. 4715-4736, 2002.

CAMARASA, E.; VIAL, C.; PONCIN, S.; WILD, G.; MIDOUX, N.; BOUILLARD, J. Influence of coalescence behaviour of the liquid and of gas sparging on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing*, v. 38, p. 329-344, 1999.

CHEN, R.C.; REESE, J.; FAN, L.-S. Flow structure in a three-dimensional bubble column and threephase fluidized bed. *AIChE. Journal*, v. 40, p. 1093-1104, 1994.

CHEN, J.; KEMOUN, A.; AL-DAHMAN, M. H.; DUDUKOVIC, M. P.; LEE, D. J.; FAN, L.-S. Comparative hydrodynamics study in a bubble column using computer-automated radioactive particle tracking (CARPT)/computed tomography (CT) and particle image velocimetry (PIV). *Chemical Engineering Science*, v. 54, p. 2199-2207, 1999.

CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M.E. *Bubbles, Drops, and Particles*. Academic Press, San Diego, CA, USA, 1978.

COLELLA, D.; VINCI, D.; BAGATIN, R.; MASI, M.; BAKR, E. A study on coalescence and breakage mechanisms in three different bubble columns, *Chemical Engineering Science*, v. 54, p. 4767-4777, 1999.

CONSTANTIN. C. Multiple weak shock waves induced by heavy ion beams in solid matter. Darmsadt: Departamento de Física/Universidade Técnica em Darmsadt, 2002. 87p. Tese (Doutorado).

DEEN, N. G.; HJERTAGER, B. H.; SOLBERG, T, Comparison of PIV and LDA Measurement Methods Applied to the Gas-Liquid Flow in a Bubble Column, 10th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mech., Lisbon, Portugal, 2000.

DECKWER, W.D. Bubble Column Reactors, Chichester: Jhon Wiley & SonsLtd., 1992.

DIONÍSIO, R. P. Simulação tridimensional de uma coluna de bolhas – Diferentes abordagens geométricas e modelagem. Campinas: FEQ/UNICAMP, 2008. 79 p. Dissertação (Mestrado).

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. Theory and design for mechanical measurements. Wiley Asia Student Edition, 4 th. Ed, 2006.

FRANZ, K.; BORNER, T.; KANTOREK, H. J.; BUCHHOLZ. R. Flow structures in bubble columns. Ger. Chem. Eng., v. 7, p. 365-374, 1984.

GALLIANI, A. Desenvolvimento de metodologia experimental para estudo de validação de modelos CFD para o escoamento multifásico em coluna de bolhas. Blumenau: Engenharia Química / FURB, 2011, 145p. Dissertação (Mestrado).

GÖTTINGEN. LaVision GmbH. Sizing Master Shadow: product- manual for Davis 7.2. Göttingen, 2006.

JENSEN, K. D. Flow measuremnts. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng., v. 26, p. 400-419, 2004.

JOSHI, J. B; KULKARNI, A.A. Bubble formation and bubble rise velocity in gás'liquid systems: A review. Ind.Eng.Chem. Res., v. 44, p. 5873-5931, 2005.

KANTARCI, N.; BORAK, F.; ULGEN, K.O. Bubble Column Reactors. Process Biochemistry, v. 40, p. 2263-2283, 2005.

KASTENEK, F.; ZAHRADNÍK, J.; KRATOCHVÍL, J.; CERMAK, J. Chemical reactors for gas-liquid systems. Ellis Horwood, New York, 1993.

KRISHNA, R.; van BATEN, J. M.; URSEANU, M. I. Three-phase Eulerian simulations of bubble column reactors operating in the churn-turbulent regime: a scale-up strategy. *Chemical Engineering Science*, v. 55, p. 3275-3286, 2000.

KRISHNA, R.; van BATEN, J. M. Mass transfer in bubble columns. *Catalysis Today Journal*, v. 79, p. 67-75, 2002.

KULKARNI, A.A.; JOSHI, J.B. Bubble formation and bubble rise velocity in gas liquid systems: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 44, p. 5873-5931, 2005.

KUMAR, R.; KULLOOR, N. R. The formation of bubbles and drops. *Adv. Chem. Eng.*, v. 8, p. 256-368, 1970.

KUMAR, S.B.; MOSLEMIAN, D.; DUDUKOVIC, M. P. Gas-holup measurements in bubble columns using computed tomography. *AIChE Journal*, v. 43, p. 1414-1425, 1997.

LAÍN, S.; SOMMERFELD, M. Simulación del flujo en un reactor de columna de burbujas. *El hombre y la máquina*, v. 22, p. 34-47, 2004.

LAGE, P.L.C.; ESPÓSITO, R.O. Experimental determination of bubble size distributions in bubble columns: prediction of mean bubble diameter and gas hold up. *Powder Technology*, v. 101, p.142-150, 1999.

LI, H.; PRAKASH, A. Influence of slurry concentrations on bubble population and their rise velocities in a three-phase slurry bubble column. *Powder Technology*, v. 113, p. 158-167, 2000.

LIN, T. J.; REESE, J.; HONG, T.; FAN, L. S. Quantitative Analysis and Computation of Two-Dimensional Bubble Columns. *AIChE. Journal*, v. 42, p. 301-318, 1996.

LIN, T.J.; TSUCHIYA, K.; FAN, L.-S. Bubble flow characteristics in bubble columns at elevated pressure and temperature. *AIChE Journal*, v. 44, p. 545–50, 1998.

LINDKEN, R.; MERZKIRCH, W. A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in fluids*, v. 33, p. 814-825, 2002.

LIU, Z.; ZHENG, Y.; JIA, L.; ZHANG, Q. An experimental method of examining three-dimensional swirling flows in gas cyclones by 2D-PIV. *Chemical Engineering Journal*, v. 133, p. 247-256, 2007.

LUO, X.; LEE, D. J.; LAU, R.; YANG, G.; FAN, L. Maximum stable bubble size and gas holdup in high-pressure slurry bubble columns. *AIChE. Journal*, v. 45, p. 665-685, 1999.

MARETTO, C.; KRISHNA, R. Modelling of a bubble slurry reactor for Fisher-Tropsch synthesis. *Catalysis Today*, v. 52, p. 279-289, 1999.

MILLER, D. N. Scale-up of agitated vessels gas-liquid mass transfer. *AIChE Journal*, v. 20, p. 445-53, 1974.

MOSTHARI, B.; BABAKHANI, E. G.; MOGHADDAS, J. S. Experimental study of gas hold-up and bubble behavior in gas-liquid bubble column. *Petroleum & Coal*, v. 51, p. 27-32, 2009.

MOUZA, A. A.; DALAKOGLU, G. K.; PARAS, S. V. Effect of liquid properties on the performance of bubble column reactors with fine pore spargers. *Chemical Engineering Science*, v. 60, p. 1465-1475, 2005.

MUDDE, R.F.; GROEN, J.S.; Van DEN AKKER, H.E.A. Liquid velocity field in a bubble column: LDA experiments. *Chemical Engineering Science*, v. 52, p. 4217-4224, 1997.

NOGUEIRA, S.; SOUSA, R. G.; PINTO, A. M. F. R.; RIETHMULLER, M.L.; CAMPOS, J. B. L. M. Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems. *Experiments in Fluids*, v. 35, p. 598-609, 2003.

PARASU VEERA, U.; JOSHI, J. B. Measurement of gas hold-up profiles by gamma ray tomography: effect of sparger design and height of dispersion in bubble columns. *Transaction of Institution of Chemical Engineering*, v. 77, p. 303-315, 1999.

PELCASTRE. Análisis de um fluxo vertical burbujante concorrente y em contra corriente. México. D.F.: Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica /Instituto Politécnico Nacional, 2006. 78 p. Dissertação (Mestrado).

PIEDRA, M.; GARCÍA, N.; CASTRO, L.; COLLAZO, A. Caracterización hidrodinámica de una columna de burbujeo agua aire. *Redalyc. Ingeniería Mecánica*, v.12. No. 1, p. 27-36, 2009.

PRAKASH, A.; LI, H. Survey of heat transfer mechanisms in a slurry bubble column. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 79, p. 171-725, 2001.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. Particle image velocimetry: a practical guide. 2ª ed., New York: Ed Springer Verlag, 448 p., 2007.

RUZICKA, M. C.; ZAHRADNIK, J.; DRAHOS, J.; THOMAS, N. H. Homogeneous Heterogeneous Regime Transition in Bubble Columns. *Chem. Eng. Sci.*, v. 56, p. 4609-4626, 2001.

RODRIGUEZ, J.C. Ondas de presión en una columna de burbujas. México D.F: Depto. Ingeniería de Procesos e Hidráulica/Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado).

SATHE M.J.; THAKER I.H.; STRAND T.E.; JOSHI J. B. Advanced PIV/LIF and shadowgraphy system to visualize flow structure in two-phase bubbly flows, *Chemical Engineering Science*, v. 65, p. 2431-2442, 2010.

SAXENA, S. C.; RAO, N. S.; SAXEN, A.C. Heat transfer and gas holdup studies in a bubble column: air-water-glass bead system. *Chem Eng Commun.*, v. 96, p. 31-55, 1990.

SHAH, Y.T.; KELKAR, B.G.; GODBOLE, S.P. Design parameters estimations for bubble column reactors. *AIChE Journal*, v. 28, No. 3, p. 353-379, 1982.

SILVA, M. K. Estudo numérico e experimental de colunas de bolhas operando em regime heterogêneo. Campinas: FEQ/UNICAMP, 2011. 158 p. Tese (Doutorado).

SOARES, C. Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação numérica e experimental do escoamento líquido/vapor em colunas de destilação. Campinas: FEQ/UNICAMP, 2005. 79 p. Tese (Doutorado).

SUN QI.; WANG, S. Measurement of turbulent of Gas-liquid two-phase flow in a bubble column with a Laser velocimeter. *Advances in Natural Science*, v. 1, p. 89-96, 2008.

SOCOL, R.; GALLIANI, A.; NORILER, D.; MEIER, H.; MORI, M. estudo experimental e numérico do escoamento gás-líquido em coluna de bolhas utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partícula. VII Escola Primavera de Transição e Turbulência, Anais da EPTT, 2010.

THET, M. K.; WANG, C.-H.; TAN, R. B. H. Experimental Studies of Hydrodynamics and Regime Transition in Bubble Columns. *Can. J. Chem. Eng.*, v. 84, p. 63-72, 2006.

THORAT, B. N.; SHEVADE, A. V.; BHILEGAONKAR, K. N.; AGLAWE, R. H.; PARASU VEERA, U.; THAKRE, S. S.; PANDIT, A. B.; SAWANT, S .B.; JOSHI, J .B. Effect of sparger design and height to diameter ratio on fractional hold-up in bubble columns. *Transaction of Institution of Chemical Engineering*, v. 76, p. 823-834, 1998.

THORAT, B. N.; JOSHI, J. B. Regime transitions in bubble columns: experimental and predictions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 28, p. 423-430, 2004.

TREYBAL, R. E. *Operações de transferência de massa*. McGraw-Hill Book Co. México, p.858. 1980.

TZENG, J-W.; CHEN, R.C.; FAN, L.-S. Visualization of flow characteristics in a 2-D bubble column and three-phase fluidized bed. *AIChE Journal*, v. 39, p. 733-744, 1993.

UEYAMA, K.; MIYAUCHI, T. Properties of recirculating turbulent two phase flow in gas bubble columns. *AIChE J.*, v. 25, p. 258–266, 1979.

WILKINSON, P. M.; SPEK, A. P.; van DIERENDONCK, L.L. Design parameters estimation for scale-up of high-pressure in bubble columns, v. 38, p. 544-554, 1992.

XU, S.; QU, Y.; CHAOUKI, J.; GUY, C. Characterization of Homogeneity of Bubble Flows in Bubble Columns Using RPT and Fibre Optics. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, v. 3, p. 1-14, 2005.

ZAHRADNIK, J.; FIALOVA, M.; RUZICKA, M.; DRAHOS, J.; KASTANEK, F.; THOMAS. N. H. Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 52:, p. 3811-3826, 1997.

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.