



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

HELDER LIMA DE MOURA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE MEDIDAS F-PIV E DA
FLUIDODINÂMICA EM COLUNA DE BOLHAS UTILIZANDO
INVARIANTES CAÓTICOS**

**QUALITY ANALYSIS OF F-PIV MEASUREMENTS AND FLUID
DYNAMICS STUDY IN A BUBBLE COLUMN USING CHAOTIC
INVARIANTS**

**CAMPINAS – SP
2017**

HELDER LIMA DE MOURA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE MEDIDAS F-PIV E DA
FLUIDODINÂMICA EM COLUNA DE BOLHAS UTILIZANDO
INVARIANTES CAÓTICOS**

**QUALITY ANALYSIS OF F-PIV MEASUREMENTS AND FLUID
DYNAMICS STUDY IN A BUBBLE COLUMN USING CHAOTIC
INVARIANTS**

*Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos exigidos
para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Química.*

*Thesis presented to the School of Chemical
Engineering of the University of Campinas as
part of the in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Doctor in
Chemical Engineering.*

Supervisor/Orientador: Prof. Dr. Guilherme José de Castilho
Co-Supervisor/Coorientador: Prof. Dr. Milton Mori

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL TESE DEFENDIDA PELO ALUNO HELDER
LIMA DE MOURA, ORIENTADA PELO PROF. DR.
GUILHERME JOSÉ DE CASTILHO E CO-
ORIENTADA PELO PROF. DR. MILTON MORI

CAMPINAS – SP
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 140325/2013-1

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M865a Moura, Helder lima de, 1987-
Análise da qualidade de medidas F-PIV e da fluidodinâmica em coluna de bolhas utilizando invariantes caóticos / Helder Lima de Moura. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Guilherme José de Castilho.

Coorientador: Milton Mori.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Sistemas caóticos. 2. Bolhas. 3. escoamento multifásico. I. Castilho, Guilherme José de, 1983-. II. Mori, Milton, 1947-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Quality analysis of F-PIV measurements and fluid dynamics study in a bubble column using chaotic invariants

Palavras-chave em inglês:

Chaotic systems

Bubbles

Multiphasic flow

Área de concentração: Engenharia de Processos

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora:

Guilherme José de Castilho

Henry França Meier

Maria Regina Parise

João Lameu da Silva Júnior

Erick de Moraes Franklin

Data de defesa: 30-06-2017

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta tese:

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho

Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Dr. Henry França Meier

Instituição: Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB)

Profa. Dra. Maria Regina Parise

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campus de Ponta Grossa/Ponta Grossa

Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin

Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Dr. João Lameu da Silva Júnior

Instituição: IFSULDEMINAS - Campus Pouso Alegre/Pouso Alegre

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Aos meus familiares e amigos pela torcida e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme José de Castilho, pela oportunidade e por ter confiado no meu trabalho desde o começo. Também o agradeço pela orientação e por toda liberdade que me foi dada, fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Milton Mori, coordenador do projeto, por todo suporte no desenvolvimento desse e de todos os trabalhos relacionados a esse.

Ao CNPq pelo suporte financeiro (140325/2013-1).

À Unicamp e à Faculdade de Engenharia Química pela estrutura e oportunidade cedida.

À PETROBRAS pelo suporte financeiro relativo ao projeto (0050.0070828.11.9).

Ao meu amigo/irmão, Rodrigo de Lima Amaral, por me acompanhar nessa luta desde 2005 e pela parceria nesse projeto. Sua contribuição foi decisiva no sucesso desse trabalho.

A minha esposa Camila Albuquerque e ao meu filho Paulo Henrique pela paciência por tanto tempo ausente.

A minha segunda mãe, Anna Csoknyai Guimarães.

Aos amigos Raphael Ribeiro, Harrson Santana, Hugo Valença, Erik “China”, Jean, Ivanei “Miguelis”, Alex “Plancknelson”, Dira, Diogo “Balotelli”, Ana “Chefa”, Bruno Guzzo, Murilo Ferrari, Rhelvis Oliveira, “Clairone Cigano” e, em especial, a Carlos “Maranhão” pelo companheirismo, amizade, pelas risadas e pelas brincadeiras.

RESUMO

Coluna de bolhas são amplamente utilizadas em processos químicos, bioquímicos e petroquímicos por fornecer diversas vantagens durante o processo de transferência de massa e calor. A determinação da distribuição da velocidade em sistemas gás-líquido presentes nesses processos a partir da técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV) é relevante para a identificação de estruturas de escoamentos e para validação de modelos numéricos (fluidodinâmica computacional - CFD). A PIV é uma técnica de medida não intrusiva que determina a distribuição de velocidade em uma área ou volume de investigação. A PIV pode determinar, por exemplo, a distribuição de velocidade 2D-2C (2 dimensões - 2 componentes) ou 2D-3C (2 dimensões - 3 componentes). Além disso, a velocidade da fase líquida em sistemas gás-líquido pode ser obtida empregando partículas traçadoras fluorescentes no fluido e um filtro passa-alta na câmera (*fluorescent-PIV* ou F-PIV). Contudo, em condições operacionais com grandes velocidades superficiais de gás, o desempenho da técnica F-PIV fica comprometida. Esse fato decorre, principalmente, devido à hidrodinâmica não-linear e às altas concentrações de bolhas. Além disso, a qualidade dos campos vetoriais PIV pode se agravar com a presença de fontes de erros na gravação, pré-processamento, processamento e no pós-processamento PIV. De uma forma geral, em experimentos PIV o erro de medição não é conhecido. Determinar o intervalo que contém o erro de medida, isto é, a quantificação da incerteza, é abordado em diversos métodos recentes: superfície de incerteza (US) – 2012, disparidade de partícula (PD) – 2013, razão de pico (PPR) – 2013, estatística de correlação (CS) – 2015 e informação mútua (MI) – 2015. Além desses métodos, o valor/coeficiente de correlação e a razão sinal-ruído (*Signal-Noise Ratio* - SNR) são utilizados como indicadores de qualidade PIV. Porém, esses métodos e indicadores possuem sua aplicação limitada na etapa de correlação PIV e, conseqüentemente, erros devido ao processo de interpolação, suavização e a presença de falsos vetores no pós-processamento PIV são desconsiderados. Este trabalho propõe uma alternativa ao unir conceitos da análise de caos e qualidade de medidas PIV para obter um indicador mais robusto. Para tal, uma nova interpretação da integral de correlação foi utilizada a partir de flutuações de velocidade. Além disso, a dimensão de correlação foi empregada para análise da complexidade do sistema gás-líquido e a entropia de Kolmogorov foi utilizada para classificar e identificar as diversas estruturas de escoamentos em uma coluna de bolhas. Os resultados demonstraram que é possível obter um limite operacional do sistema PIV e campos de velocidade confiáveis na investigação das características dos diversos escoamentos (padrões de escoamento de borbulhantes e turbulento) presentes em uma coluna de bolhas com a análise de caos.

Palavras chaves: PIV, invariantes caóticos, qualidade PIV, coluna de bolhas, ruídos.

ABSTRACT

Bubble columns are widely used in chemical, biochemical, and petrochemical processes by providing various advantages during the mass transfer and heat process. The determination of the velocity distribution in gas-liquid systems present in these processes using the particle image velocimetry (PIV) technique is relevant for the identification of flow structures and numerical model validation (computational fluid dynamics - CFD). The PIV is a non-intrusive measurement technique that determines the velocity distribution in an area or volume of investigation. The PIV can establish, for example, the 2D-2C (2 dimensions - 2 components) or 2D-3C (2 dimensions - 3 components) velocity distribution. In addition, the liquid phase velocity in gas-liquid systems can be obtained by employing fluorescent tracer particles in the flow and a high-pass filter on the camera (fluorescent-PIV or F-PIV). However, under operational conditions with high gas velocities in the column, the performance of the F-PIV technique is compromised. This fact is mainly due to the nonlinear hydrodynamics and high concentrations of the bubbles. Moreover, the PIV quality of the vector fields can worsen by the error sources in the recording, pre-processing, processing, and post-processing. In general, the measurement error is not known in PIV experiments. The determination of the interval containing the measurement error, i. e., the uncertainty quantification, has been approached by several recent methods: uncertainty surface (US) - 2012, particle disparity (PD) - 2013, primary peak ratio (PPR) - 2013, correlation statistics (CS) – 2015, and mutual information (MI) - 2015. In addition to these methods, the correlation value/coefficient and signal-to-noise ratio (SNR) are used as indicators of PIV quality. However, these methods and indicators have limited application in the PIV correlation step and, consequently, errors due to the interpolation process, smoothing, and the presence of false vectors in the PIV post-processing are disregarded. This thesis proposes an alternative to unite concepts of the chaos analysis and PIV quality to obtain a more robust indicator. Therefore, a new interpretation of the correlation integral was used from velocity fluctuations. In addition, the correlation dimension was used to analyze the complexity of the gas-liquid system and the Kolmogorov entropy was used to classify and identify the various flow structures in a bubble column. The results demonstrated that it is possible to obtain an operational limit of the PIV system and reliable velocity fields in investigating the characteristics of the various flows (flow patterns bubbly and churn-turbulent) present in a bubble column using the chaos analysis.

Keywords: PIV, chaotic invariants, PIV quality, bubble column, noises.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1 - Possibilidades de aplicação do indicador de qualidade proposto neste trabalho para as medidas PIV: Standard Cross-Correlation (SCC); Sliding-Average Correlation (SAC); Pyramid Correlation (PC).----- 20

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 - Padrões de escoamento gás-líquido em uma coluna de bolhas (Adaptado Mudde, 2005).----- 24

Figura 2. 2 - Mapa de regime de escoamentos para colunas de bolhas (Adaptado de Shah et al., 1982).----- 25

Figura 2. 3 - Regimes de escoamentos em uma coluna de bolhas 3-D (Adaptado de Chen et al., 1994).----- 26

Figura 2. 4 - (a) Representação das estruturas de escoamento em 2D em uma coluna de bolhas proposta por Chen et al. (1994) em regime de escoamento vórtice-espiral e (b) estrutura de escoamento em uma coluna de bolhas 3D proposta por Tzeng et al. (1993). ----- 27

Figura 2. 5 - Diagrama da passagem da bolha e os fenômenos associados (adaptado de Cui e Fan, 2004).----- 29

Figura 2. 6 - Campos de escoamento instantâneo para as velocidades da fase líquida e da fase gasosa (indicados com os respectivos vetores) com os contornos de vorticidade para a fase líquida em $z/D = 4,5$ (a) caso 2 ($d_b = 2,7$ mm e $\alpha = 0,1\%$) e (b) caso 3 ($d_b = 3,1$ mm e $\alpha = 0,17\%$) e para $z/D = 21$ (c) caso 2 e (d) caso 4 ($d_b = 3,7$ mm e $\alpha = 0,64\%$) (Kim et al., 2016). ----- 31

Figura 2. 7 - Campos de escoamento instantâneo para as velocidades da fase líquida e da fase gasosa (indicados com os respectivos vetores) com os contornos de vorticidade para a fase líquida em $z/D = 42$ (a) caso 1 ($d_b = 2,2$ mm e $\alpha = 0,05\%$), (b) caso 2, (c) caso 3 e (d) caso 4 (Kim et al., 2016).----- 32

Figura 2. 8 - Imagens típicas de bolhas capturadas pela técnica PIV para os casos: (a) S-4, (b) S-3, (d-f) S-2 e (g-i) S-1 (Liu et al., 2005). ----- 33

Figura 2. 9 - Campos instantâneos sequenciais (com intervalo $\Delta t = 133$ ms) de velocidade do líquido destacando a passagem da bolha, trajetória e zonas de vorticidade e circulação de líquido para a configuração (a) S-4, (b) S-3, (c) S-2 e (d) S1 com $U_G = 7,42 \times 10^{-3}$ cm/s (adaptado de Liu et al., 2005).----- 34

Figura 2. 10 - (a) Campo 2D-2C de velocidade da fase líquida (água) e velocidade 3D das bolhas aproximadamente de 0,3 m/s (ou 30 cm/s). (b) Distribuição de vorticidade e vetor velocidade

na região da esteira para $U_G = 0,1$ m/s (ou 10 cm/s) (adaptado de Lindken e Merzkirch, 2000).	35
Figura 2. 11 - Trajetória da bolha para os casos (i) S-4, (ii) S-3, (iii) S-2 e (iv) S-1; E representação da trajetória: (a) trajetória linha reta no líquido S-4; (b) trajetória em ziguezague no líquido S-3; (c) trajetória em espiral nos líquidos S-2 e S-1 (Liu et al., 2005).	36
Figura 2. 12 - Sucessivas imagens de uma bolha (diâmetro equivalente igual a 2 mm) em ascensão apresentando movimento em ziguezague com suas respectivas estruturas de esteiras (Vries et al., 2002).	37
Figura 2. 13 - Diferentes regimes de forma e de comportamento da bolha em função dos números de E_o e de G_a (Tripathi et al., 2015).	38
Figura 2. 14 - Características de uma bolha da região III com $G_a = 100$ e $E_o = 0,5$. (a) velocidade axial oscilantes (ziguezague) da bolha, (b) trajetória semelhante ao comportamento em espiral, (c) iso-superfícies do componente dos pares de vorticidade de contra-rotação na direção z no tempo $t = 15$ e 26 (d) a evolução da forma da bolha (adaptado de Tripathi et al., 2015).	40
Figura 2. 15 – Diagrama com os métodos experimentais para análise de coluna de bolhas de acordo com Shaikh e Al-Dahhan (2007).	43
Figura 2. 16 - Técnicas de medidas não-intrusivas usadas para obtenção de campos de velocidade em uma coluna de bolhas.	50
Figura 2. 17 - Ilustração da técnica PIV (Adaptado de Boutelier, 2016).	52
Figura 2. 18 - Princípio de funcionamento do F-PIV 2D-2C e 2D-3C.	53
Figura 2. 19 - (a) Caixa de acrílico externa à coluna de bolhas, (b) pontos da placa de calibração e (c) placa de calibração inserida na caixa de acrílico.	55
Figura 2. 20 - Distribuição de intensidade de uma única imagem de partícula (a) original e pré-processada por um filtro (b) Gaussiano 3x3 pixels, (c) SSM 3x3 pixels e (d) RMS 3x3 pixels.	56
Figura 2. 21 - Comparação da distribuição de intensidade de uma única imagem de partícula original e pré-processada pelos filtros da Figura 2.20 (a) eixo X e (b) eixo Y.	56
Figura 2. 22 - Sequências de processamento de imagem para determinar a distribuição do tamanho da bolha (a - c) e (d) exemplo de imagens de bolhas detectadas para várias velocidades superficiais de gás (0,5 – 2,5 cm/s) (adaptado de Liu et al., 2013a).	58
Figura 2. 23 - Algoritmo de segmentação de Watershed: (a) uma imagem parcial com um grupo de três bolhas, (b) escala de cinza (intensidade) da imagem invertida com imagem individual da bolha individuais mascarada, (c) imagem após o processo de limiarização para adquirir os limites do grupo das bolhas com os mínimos locais, (d) imagem com mínimos locais e a borda do grupo de bolhas, (e) a imagem preenchida com três bolhas distintas (adaptado de Liu et al., 2013a).	59

Figura 2. 24 - Diagrama de fluxo do algoritmo SCC (Adaptado de Eckstein et al., 2008 e Thielicke e Stamhuis, 2014).	61
Figura 2. 25 - Princípio do Ensemble Correlation para um escoamento de duas fases. (Adaptado de Deen et al., 2002).	62
Figura 2. 26 - Exemplo arbitrário de um resultado de medição PIV contendo falsos vetores de deslocamento.	64
Figura 2. 27 - Processo de obtenção das séries temporais em campos de velocidade PIV e sua representação hipotética no espaço de fase a partir do método de Takens (1981).	72
Figura 2. 28 - Principais características dos invariantes caóticos.	73
Figura 2. 29 - Dimensão de correlação (a) e entropia de Kolmogorov (b) em função da velocidade superficial do gás em uma coluna de bolha (Adaptado de Letzel et al., 1997).	75

CAPÍTULO 3

Artigo 3.1: Using chaos analysis for evaluating the quality of F-PIV measurements in a bubble column.

Figure 1 - Representation of a 2D-2C F-PIV system.	83
Figure 2 - (a) Column, laser system and box with slit. (b) Investigation area. (c) Air distributor with 21 holes. (d) Details of the box with slit. (e) Arrangement of the F-PIV system in the column.	86
Figure 3 - Field of view and positions of extracted velocity time series.	90
Figure 4 - Velocity module time series at $r/R = 0$ for superficial gas velocities of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s.	90
Figure 5 - Distributions of (a) time-averaged velocity, $\langle \mathbf{u} \rangle$, and (b) its uncertainty, $\langle UQ_u \rangle$, estimated by the CS method. Distribution of (c) time-averaged cross-correlation coefficient, $\langle CCC \rangle$, and (d) signal-to-noise ratio, $\langle SNR \rangle$.	96
Figure 6 - Comparison between the average velocity fields calculated by the SCC, SCC* and EC methods for U_G of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s using 4000 images.	97
Figure 7 - (a) Correlation dimension and (b) standard deviation of the correlation integral in the analysis of the velocity module of the liquid.	99
Figure 8 - Comparison of the positions $r/R = 0.75$ and 1 for the convergence of the correlation integral for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s using SCC.	100
Figure 9 - Time-averaged horizontal velocity component $\langle u \rangle$, determined by the SCC, SCC* and EC methods for U_G of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s.	101

Figure 10 - Time-averaged vertical velocity component $\langle v \rangle$, determined by the SCC, SCC* and EC methods for U_G of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s. The highlighted region represents the area with high liquid recirculation. ----- 102

Figure 11 - Distribution of $\langle UQ_x^* \rangle$ and $\langle UQ_y^* \rangle$ along the column radius for (a) $U_G = 0.158$, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s. ----- 103

Figure 12 - (a) Wake region of the bubbles detailing the pair of vortices (b) Instantaneous vorticity field for $U_G = 5.28 \times 10^{-3}$ m/s.----- 103

Figure 13 - Instantaneous (a) horizontal and (b) vertical velocity field, u and v , without interpolation for $U_G = 2.106 \times 10^{-2}$ m/s. ----- 104

Figure 14 - Distribution of the maximum absolute value of horizontal and of vertical velocity, $Abs(u)_{max}$ and $Abs(v)_{max}$, from the time series along the column radius. ----- 104

Figure 15 - (a) Correlation dimension and (b) standard deviation of the integral correlation from horizontal and vertical velocity (u and v). ----- 107

Artigo 3.2: Influência da terceira componente de velocidade na qualidade de medidas F-PIV com base na análise da dimensão de correlação.

Figura 1 - Princípio de funcionamento do F-PIV 2C-2D e 3C-2D. ----- 123

Figura 2 - Esquema de uma gravação F-PIV 2C-2D e 3C-2D (Adaptado de Amaral et al., 2015). ----- 124

Figura 3 - (a) Coluna de bolhas, F-PIV 2C-2D (câmara A); F-PIV 3C-2D (Câmara B e C) e caixa com fenda; (b) O campo de visão (FoV); (c) distribuidor de ar com 21 furos; (d) arranjo do sistema PIV na coluna; (e) posições radiais de obtenção das séries temporais de flutuação de velocidade (Adaptado de Amaral et al., 2015). ----- 127

Figura 4 - Dimensão de correlação para F-PIV 2C-2D e 3C-2D na análise do módulo da velocidade do líquido. ----- 128

Figura 5 - Desvio normalizado da integral de correlação para F-PIV 2C-2D e 3C-2D na análise do módulo da velocidade do líquido. ----- 129

Artigo 3.3: Análise da entropia de kolmogorov a partir de medições piv no escoamento da fase líquida de uma coluna de bolhas.

Figura 1 - Princípio de funcionamento da técnica PIV 2D Clássico (Adaptado de AMARAL, 2013). ----- 135

Figura 2 - (a) Coluna, sistema PIV e caixa com a fenda. (b) Área de investigação. (c) Distribuidor da fase gasosa com 21 furos. (d) Arranjo do sistema PIV na coluna. (e) ponto central $r/R = 0$ (Adaptado de AMARAL et al., 2014a). ----- 138

Figura 3 - Média acumulada do módulo de velocidade para uma vazão de 40 L/min. -----	138
Figura 4 - Entropia de Kolmogorov em função da vazão e velocidade superficial do gás. --	139
Figura 5 - Campos de velocidade do líquido com (a) 1,5 (b) 2,5 (c) 5,0 (d) 7,5 (e) 10,0 (f) 15,0 (g) 20,0 (h) 30,0 e (i) 40,0 L/min. -----	140
Figura 6 - Perfil de vorticidade para as vazões de 1,5, 15 e 40 L/min. -----	142
Figura 7 - Velocidade e sua incerteza em função da vazão e velocidade superficial do gás.	142

Apêndice A: Desafios da análise PIV na turbulência induzida pela passagem da bolha.

Figura A 1 - Para $U_G = 0,158 \times 10^{-2}$ m/s. (a) Raw image para o instantâneo t das bolhas no plano de luz destacando o seu formato e diâmetro. (b) Campo instantâneo de velocidade e vetorial. (c) Campo instantâneo de vorticidade. -----	163
Figura A 2 - Para $U_G = 0,158 \times 10^{-2}$ m/s. (a) Raw image para o instantâneo t + Δt ($\Delta t = 1/f = 0,238$ s) para um grupo de bolhas no plano de luz destacando o seu formato e diâmetro. (b) Campo instantâneo de velocidade e vetorial. (c) Campo instantâneo de vorticidade. -----	164

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2. 1 - Técnicas não – intrusivas aplicadas em colunas de bolhas. -----45

Tabela 2. 2 - Parâmetros analisados e fornecidos para os quatros métodos de incerteza (Adaptado de Wieneke, 2015). -----68

CAPÍTULO 3

Artigo 3.1: Using chaos analysis for evaluating the quality of F-PIV measurements in a bubble column.

Table 1 - Relative deviation of the time-averaged velocity modulus \mathbf{u}_a , calculated using the EC approach for different N_F and U_G .-----92

Table 2 - Previous studies on the liquid phase velocity in a bubble column by PIV using $N_F < 4000$ and different sampling frequencies f_a .-----92

Table 3 - Phenomena observed in a bubble column and their characteristic frequencies (Drahoš et al., 1991). -----94

Table 4 - Experimental studies identifying characteristic frequencies in flow structures of a bubble column.-----95

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 — Considerações iniciais.....	17
1.1 INTRODUÇÃO.....	17
1.2 OBJETIVOS GERAL.....	21
1.2.1 Objetivos específicos.....	21
1.3 ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DA TESE	22
CAPÍTULO 2 — Fundamentação teórica	23
2.1 REGIMES DE ESCOAMENTO EM COLUNAS DE BOLHAS	24
2.1.1 Análise das estruturas de escoamento em coluna de bolhas.....	26
2.1.2 Dinâmica e características das bolhas	27
2.2 MEDIÇÕES E ANÁLISES EM COLUNA DE BOLHAS	43
2.2.1 Técnicas de medidas aplicadas em coluna de bolhas	43
2.2.2 Técnicas de análises aplicadas em coluna de bolhas.....	48
2.3 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA (PIV)	50
2.3.1 Aplicações PIV em sistemas gás-líquido.....	50
2.3.2 PIV (2D-2C) e PIV (2D-3C)	52
2.3.3 Calibração.....	54
2.3.4 Pré-processamento.....	55
2.3.5 Correlações PIV.....	60
2.3.6 Pós-processamento PIV	62
2.3.7. Quantificação da incerteza PIV	65
2.4 ANÁLISE DE CAOS	70
CAPÍTULO 3 — Resultados e Discussão	76
3.1 USING CHAOS ANALYSIS FOR EVALUATING THE QUALITY OF F-PIV MEASUREMENTS IN A BUBBLE COLUMN	77
3.2 INFLUÊNCIA DA TERCEIRA COMPONENTE DE VELOCIDADE NA QUALIDADE DE MEDIDAS F-PIV COM BASE NA ANÁLISE DA DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO	122
3.3 ANÁLISE DA ENTROPIA DE KOLMOGOROV A PARTIR DE MEDIÇÕES PIV NO ESCOAMENTO DA FASE LÍQUIDA DE UMA COLUNA DE BOLHAS	132
CAPÍTULO 4 — Considerações Finais	147
4.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	147
4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
REFERÊNCIAS	150

APÊNDICE A — Desafios da análise PIV na turbulência induzida pela passagem da bolha	163
APÊNDICE B — Lista de trabalhos publicados	167
ANEXO A — Efeito do ruído nos invariantes caóticos e método da máxima verossimilhança para obtenção da dimensão de correlação (D_{ML}).....	168
ANEXO B — Método da máxima verossimilhança para obtenção da entropia de Kolmogorov (K_{ML}).....	171
ANEXO C — Direitos e acesso referente ao artigo publicado na revista Chemical Engineering Science e apresentado na seção 3.1 desta Tese de Doutorado.....	173

CAPÍTULO 1 — Considerações iniciais

Este capítulo apresenta uma introdução onde se expõe principalmente a contextualização e a motivação pela escolha do tema desta Tese de Doutorado. Os objetivos gerais e específicos e a organização da apresentação da tese são expostos em seguida.

1.1 INTRODUÇÃO

Vários equipamentos tecnicamente importantes utilizados nas indústrias de geração de energia, químicas e bioquímicas envolvem sistemas gás-líquido com e sem mudança de fase, por exemplo, em colunas de bolha, agitadores, caldeiras e outros equipamentos de processo. Para uma concepção eficiente e ampliação destes reatores ou equipamentos de processo, o estudo das características de escoamento é importante para o controle da transferência de calor, transferência de massa e taxa de reação química. A coluna de bolhas é um dos equipamentos de processo que é amplamente utilizado como reator devido a várias vantagens como baixos custos operacionais e de manutenção além das altas taxas de transferência de calor e massa. As diferentes interações no sistema gás-líquido em colunas de bolhas são de natureza inerentemente instáveis e a dinâmica de tais escoamentos influencia diretamente a mistura das fases, na troca de calor e no desempenho de transferência de massa. Desse modo, configura-se a importância da caracterização da dinâmica e das estruturas presentes nos diferentes regimes de escoamento em coluna de bolhas (Kantarci et al., 2005; Montoya et al., 2016).

Nesse cenário, extensos estudos experimentais têm sido realizados (com várias técnicas intrusivas e não-intrusivas) com o objetivo de fundamentar a compreensão dos escoamentos de sistemas gás-líquido. Esses estudos incluem observações visuais e aplicações de várias técnicas de análise de séries temporais lineares e não-lineares, tais como análise espectral, análise de caos, modelagem estocástica e análises multiresolução (*Wavelets*, por exemplo). Embora grandes avanços tenham sido feitos em métodos teóricos e computacionais, passando de modelos unidimensionais para abordagens 2D e 3D completas, capazes de explicar as não-uniformidades em diferentes tipos de escoamentos, ainda assim, as correlações obtidas mostraram grandes discrepâncias nas suas previsões para as mesmas condições operacionais e de *design* (Boyer et al., 2002; Kantarci et al., 2005; Montoya et al., 2016).

As discrepâncias mencionadas anteriormente tornam-se ainda mais evidentes em escoamentos turbulentos, devido ao seu comportamento caracteristicamente transitório tanto no espaço como no tempo. A aplicação de códigos de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) nesse tipo de regime padece de uma compreensão completa dos complexos mecanismos físicos. A falta de um melhor entendimento juntamente com a ausência de dados experimentais confiáveis para regimes considerados turbulentos, tornam a modelagem extremamente desafiadora devido à dificuldade de estabelecer modelos robustos para representar toda a gama de estruturas (vórtices, turbilhões, zonas de recirculação e escoamento de bolhas coalescidas) encontradas em colunas de bolhas. Além disso, a Simulação Numérica Direta (DNS) de tais escoamentos com configurações realistas, ainda não é possível devido às grandes exigências de resolução espacial e temporal (inviável do ponto de vista prático).

Nesse contexto, a velocimetria por imagem de partícula (PIV) – ou F-PIV, medindo somente a velocidade do líquido utilizando partículas fluorescentes como traçadores – tem sido utilizada como uma poderosa ferramenta experimental não-intrusiva para investigar a fluidodinâmica por meio campos de velocidade 2D ou 3D. Para tal, pode-se utilizar da técnica PIV 2D-2C (duas dimensões - dois componentes), *Stereo*-PIV 2D-3C (duas dimensões - três componentes) ou Tomo-PIV 3D-3C (três dimensões - três componentes). Além disso, frequentemente utilizam-se as medições PIV ou F-PIV para validar simulações CFD, analisando padrões espaciais e temporais relacionados ao escoamento/fenômeno. Em coluna de bolhas, resultados confiáveis de campos de velocidade do líquido podem ser obtidos por meio da F-PIV em escoamentos com baixa velocidade superficial de gás. Nesse caso, entre outros fatores, os erros aleatórios/randômicos (principalmente esses) são minimizados devido à interferência das bolhas não ser relevante. Contudo, em altas velocidade superficiais de gás (escoamentos turbulentos), os erros associados, como por exemplo, com o ruído nas gravações, grandes espalhamentos de luz devido às bolhas, movimento das partículas traçadoras para fora do plano de luz e gradientes de deslocamento, amplificam-se e degradam os campos de velocidade obtidos. Desse modo, muitas questões precisam ser investigadas, principalmente o limite de operação do sistema PIV em quantificar de forma segura o escoamento em questão com a intenção de fornecer dados mais confiáveis para validações via CFD.

No que se segue, o objetivo da quantificação da incerteza PIV é produzir uma estimativa de um intervalo que contém o erro. O esforço para essa quantificação culminou na criação de uma nova área de pesquisa que se iniciou recentemente com alguns métodos, a saber: superfície de incerteza – US (2012), razão de pico – PPR (2013), disparidade de partícula – PD (2013),

estatística de correlação – CS (2015) e informação mútua – MI (2015). Segundo Sciacchitano et al. (2015), os quais realizaram comparações com os diferentes métodos de quantificação de incerteza mencionados anteriormente, o método da estatística de correlação (CS), proposto por Wieneke (2015), demonstra ser o mais robusto para a quantificação de incerteza de medidas PIV. No entanto, a grande limitação desse método é a sua aplicação apenas no algoritmo de correlação PIV denominado *Standard Cross Correlation* (SCC). Além disso, o método CS possui restrições quanto ao ruído de imagem e o efeito do movimento das partículas traçadoras para fora do plano. Além do SCC, existe ainda os algoritmos de correlação mais recentes como o *Sliding-Average Correlation* (SAC) e *Pyramid Correlation* (PC) (desenvolvidos por Sciacchitano et al., 2012) que ainda não possuem métodos robustos de quantificação de incerteza. O ponto em comum em relação aos algoritmos de correlação é que todos podem ser avaliados por meio de indicadores de qualidade como valor/coeficiente de correlação e o SNR (razão sinal – ruído). Entretanto, essa avaliação somente pode ser realizada na etapa de correlação PIV. Vale ressaltar que os algoritmos de correlação PIV são os responsáveis por determinar o módulo, a direção e o sentido de cada vetor de velocidade. Os mesmos não se aplicam na etapa seguinte, que é a de obtenção dos campos de velocidade, denominada de pós-processamento. O pós-processamento PIV é composto basicamente de procedimentos para validar, interpolar, suavizar o campo vetorial, além de corrigir os vetores faltantes (falsos vetores). É importante ressaltar que muitas vezes esses procedimentos podem ocasionar perda significativa de vetores que podem ser interpretados como falsos (quando na verdade não os são) e, conseqüentemente, descaracterizar os campos de velocidade com a real representação da dinâmica do escoamento.

Para tentar preencher essa lacuna, em relação a um indicador de qualidade (geral e robusto) de medidas PIV, propõe-se utilizar conceitos de análise não-linear, especificamente em princípios que regem os sistemas caóticos. A análise de caos baseia-se em sinais cujo comportamento é aperiódico e sensível às condições iniciais ou às pequenas perturbações (Abarbanel, 1996). A partir do caos determinístico, várias propriedades conhecidas como invariantes caóticos podem ser determinadas, como a dimensão de correlação (D) e a entropia de Kolmogorov (K). A dimensão de correlação relaciona-se com os graus de liberdade do sistema e a entropia de Kolmogorov quantifica a perda de informação em função do tempo. Por essa propriedade, a entropia de Kolmogorov é frequentemente utilizada para estabelecer limites de transições de regimes em coluna de bolhas enquanto a dimensão de correlação é utilizada para quantificar a complexidade das interações no sistema gás-líquido. De forma semelhante às

aplicações PIV, estudos têm mostrado que ruídos (dinâmico ou de medição) limitam o desempenho da análise de caos (assim como em outras técnicas de análise) na identificação e previsão de sistemas determinísticos e, portanto, influenciando no cálculo dos invariantes caóticos (Moura, 2013). Para contornar essa dificuldade, os algoritmos proposto por Schouten et al. (1994a,b), no qual utilizam conceitos de máxima verossimilhança (D_{ML} e K_{ML}), visam diminuir a interferência do ruído na representação da dinâmica subjacente do sistema por meio da limitação em amplitude do sinal ruidoso. Em consequência desse fato, a dimensão de correlação (D_{ML}) possui um potencial que pode ser estendido como indicador da qualidade das medidas PIV no pós-processamento bem como na etapa de qualquer correlação PIV – desde que forneça uma série temporal de flutuações de velocidade. Além de ser uma abordagem mais geral, o uso da dimensão de correlação com essa finalidade possibilita estabelecer um limite de confiabilidade das medidas PIV em função da velocidade superficial do gás em uma coluna de bolhas. O cenário da viabilidade da aplicação do indicador de qualidade com a análise de caos é representado na Figura 1.1.

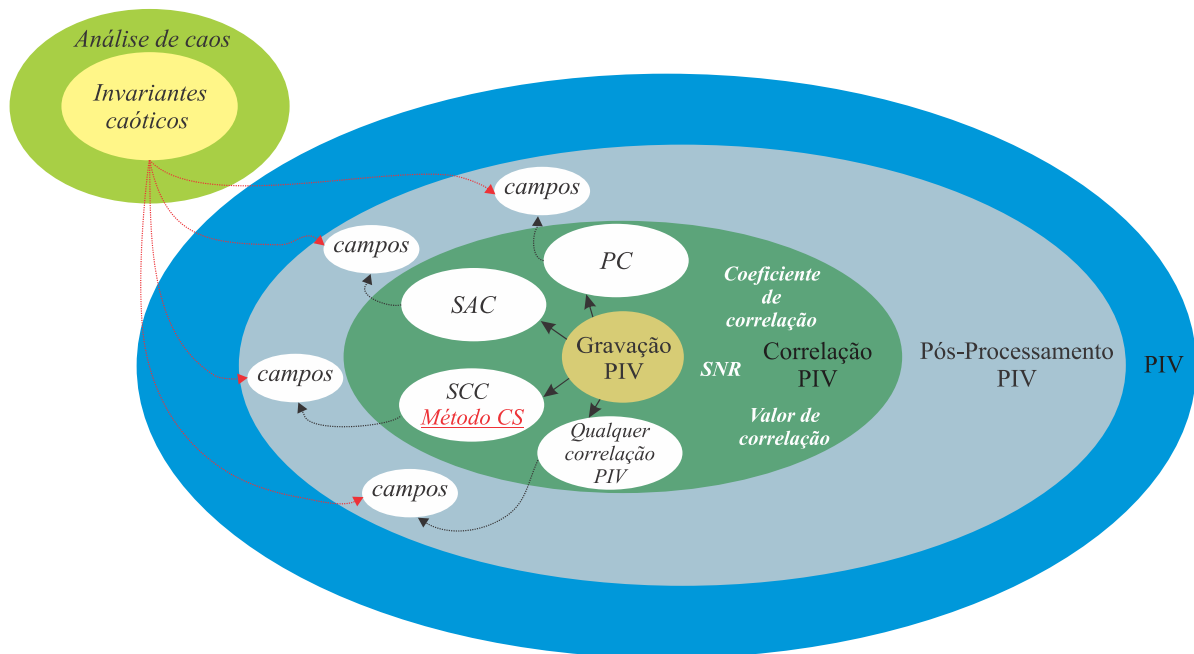


Figura 1. 1 - Possibilidades de aplicação do indicador de qualidade proposto neste trabalho para as medidas PIV: *Standard Cross-Correlation* (SCC); *Sliding-Average Correlation* (SAC); *Pyramid Correlation* (PC).

Estabelecido o limite de operação do sistema PIV, a entropia de Kolmogorov (K_{ML}) pode então ser aplicada para estudar as transições de regime assim como as características de cada escoamento. Vale ressaltar que frequentemente K_{ML} é utilizado para estudo de flutuações de

pressão obtidas por transdutores de pressão (Vial et al., 2000; Lin et al., 2001a,b; Wu et al., 2005) ou por técnicas mais avançadas, como o caso da utilização da técnica *Nuclear Gauge Densitometry* – NDG (Nedeltchev et al., 2011) e Tomografia Computadorizada – CT (Nedeltchev e Shaikh, 2013; Nedeltchev, 2015). O uso das flutuações de velocidade, advindas do sistema PIV, como forma de classificar e estudar regimes de escoamento a partir de K_{ML} é uma aplicação inédita, assim como a proposta de um indicador geral de qualidade PIV para todas as etapas do processo de obtenção dos campos de velocidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é empregar a integral de correlação e a dimensão de correção para garantir a qualidade das medidas F-PIV e, em seguida, utilizar a entropia de Kolmogorov para classificar e estudar as características dos regimes fluidodinâmicos em coluna de bolhas a partir das flutuações de velocidade.

1.2.1 Objetivos específicos

- Determinação da velocidade 2D-2C e 2D-3C da fase líquida.
- Estabelecer uma metodologia para garantir a qualidade das medidas.
- Aplicar o método de estatística de correlação (CS) nas medidas F-PIV (componentes radial e axial).
- Aplicar a dimensão de correlação (D_{ML}) para quantificar o grau de complexidade das medidas F-PIV PIV (componentes radial e axial).
- Associar o comportamento de D_{ML} com os indicadores de qualidade PIV (valor/coeficiente de correlação e SNR).
- A partir da integral de correlação, derivar um método para quantificar a qualidade das medidas F-PIV (componentes radial e axial).
- Avaliar o conjunto das técnicas F-PIV (2D-2C) e F-PIV (2D-3C) com esse novo indicador de qualidade com intuito de minimizar as incertezas referentes às medições F-PIV (2D-2C e 2D-3C).
- Avaliar as estruturas de escoamentos e velocidades de transição de regimes com a entropia de Kolmogorov (K_{ML}) após estudar a melhor configuração que diminua os erros.

1.3 ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DA TESE

Esta Tese de Doutorado possui três capítulos além dos anexos. Sendo o Capítulo 1 a presente introdução, os demais capítulos estão organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 2** fornece uma ampla revisão da literatura e fundamentação teórica sobre a fluidodinâmica de coluna de bolhas no que diz respeito à formação de diferentes regimes, dinâmica de bolhas, dinâmica das bolhas e identificação de transição regimes em coluna de bolhas com métodos experimentais e de análise. Em seguida, a técnica PIV têm os seus conceitos apresentados de forma detalhada (método experimental) e, por fim, os princípios da análise de caos são dispostos (método de análise).
- **Capítulo 3** apresenta os resultados obtidos. Na presente Tese optou-se por seguir o formato alternativo de apresentação. A estrutura para apresentação dos resultados no formato de artigos publicados ou submetidos segue o Art. 2º do Parecer nº 1985/96. Desse modo, a seção 3.1 apresenta um artigo publicado em revista internacional e as seções 3.2 e 3.3 apresentam artigos publicados em congressos nacionais. Vale ressaltar que o idioma de cada artigo apresentado na tese é o mesmo exigido pelo veículo de divulgação, como disposto no § 2º do Art. 2º. Além disso, no caso de documento já publicado, deve-se dispor em anexo a autorização da Editora para a sua inclusão na Tese (§ 3º do Art. 2º).
- **Capítulo 4** apresenta as considerações finais das seções 3.1, 3.2 e 3.3 e trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 — Fundamentação teórica

Para contextualizar o tema da presente Tese, este capítulo apresenta o significado de cada conceito-chave e como eles estão relacionados entre si. Inicialmente apresenta-se uma revisão das diferentes estruturas e regimes encontrados em uma coluna de bolhas. Adicionalmente, é realizada uma análise das principais técnicas experimentais aplicadas na investigação do escoamento neste processo. A utilização das técnicas de velocimetria por imagem de partícula (PIV 2D-2C e 2D-3C) em coluna de bolhas e os métodos de quantificação de incerteza experimental das medidas obtidas com as técnicas PIV são discutidos detalhadamente. Em seguida, a dimensão de correlação é apresentada como alternativa para avaliar a qualidade das medidas PIV a partir de séries temporais de flutuações de velocidade. Por último, sugere-se e justifica-se a utilização da entropia de Kolmogorov para diferenciar os regimes fluidodinâmicos presentes no sistema gás-líquido.

2.1 REGIMES DE ESCOAMENTO EM COLUNAS DE BOLHAS

O desempenho dos reatores multifásicos é diretamente afetado pelo regime de escoamento e pela qualidade da distribuição de gás (Briens et al., 1997). A previsão das velocidades de transição de regimes, U_{trans} , em reatores multifásicos (colunas de bolhas, reatores de leito fluidizado, etc.) é de grande importância para a sua concepção, *scale-up*, assim como o seu funcionamento eficaz. As taxas de transferência de calor e massa, mistura e conversão são bastante diferentes nos principais regimes fluidodinâmicos. É essencial conhecer a gama de propriedades físicas e parâmetros de operação sobre a qual os regimes de escoamento principais prevalecem (Nedeltchev, 2015).

Especificamente nas colunas de bolhas, são observados quatro tipos de padrões de escoamento: homogêneo (borbulhante), heterogêneo (*churn-turbulent*), *slug* (apenas em colunas de pequeno diâmetro) e escoamento anular, sendo os dois primeiros regimes os mais frequentemente encontrados. Dependendo das condições de funcionamento, estes dois regimes podem ser separados por um regime de transição. De maneira geral, nos diferentes regimes de escoamento, a interação da fase gasosa (dispersa) com a fase líquida (contínua) varia consideravelmente (Shaikh e Al-Dahhan, 2007). A Figura 2.1 apresenta os regimes de escoamento em colunas de bolhas.

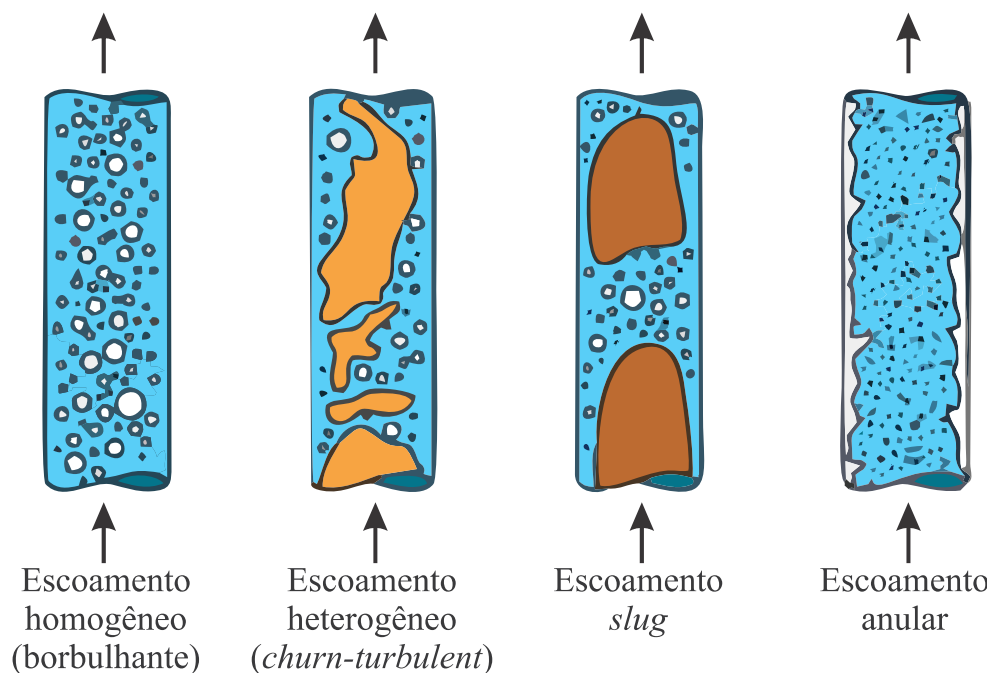


Figura 2. 1 - Padrões de escoamento gás-líquido em uma coluna de bolhas (Adaptado de Mudde, 2005).

As velocidades de transição U_{trans} dependem do diâmetro da coluna (Figura 2.2). Além disso, outros fatores influenciam U_{trans} como a altura de dispersão, propriedades físicas do sistema de gás-líquido e do distribuidor (Shah et al., 1982; Thorat e Joshi, 2004). Simonnet et al. (2008) relataram que os perfis médios de velocidade são planos no regime homogêneo e, em seguida, tornam-se parabólicos com o aumento da velocidade superficial do gás (U_G). O regime homogêneo é caracterizado pela presença de pequenas bolhas uniformes e por não apresentar macroestruturas de líquido (relativamente sem recirculação de líquido), ao passo que no regime de transição tais macroestruturas de líquidos começam a surgir. O regime heterogêneo é caracterizado pela degradação das macroestruturas de escoamento de líquido e forte não-estacionariedade do sistema. O início da transição de regime em colunas de bolhas é principalmente consequência de uma medida crescente da coalescência das bolhas (Ribeiro, 2008; Simonnet et al., 2008; Nedeltchev e Shaikh, 2013). Drahoš et al. (1992) demonstraram que a concepção do distribuidor possui uma influência notável sobre as estruturas de escoamento numa coluna de bolhas. Tanto a área interfacial e os coeficientes de transporte nesse tipo de reator são altamente dependentes do regime de escoamento prevalecente (Ribeiro e Mewes, 2007).

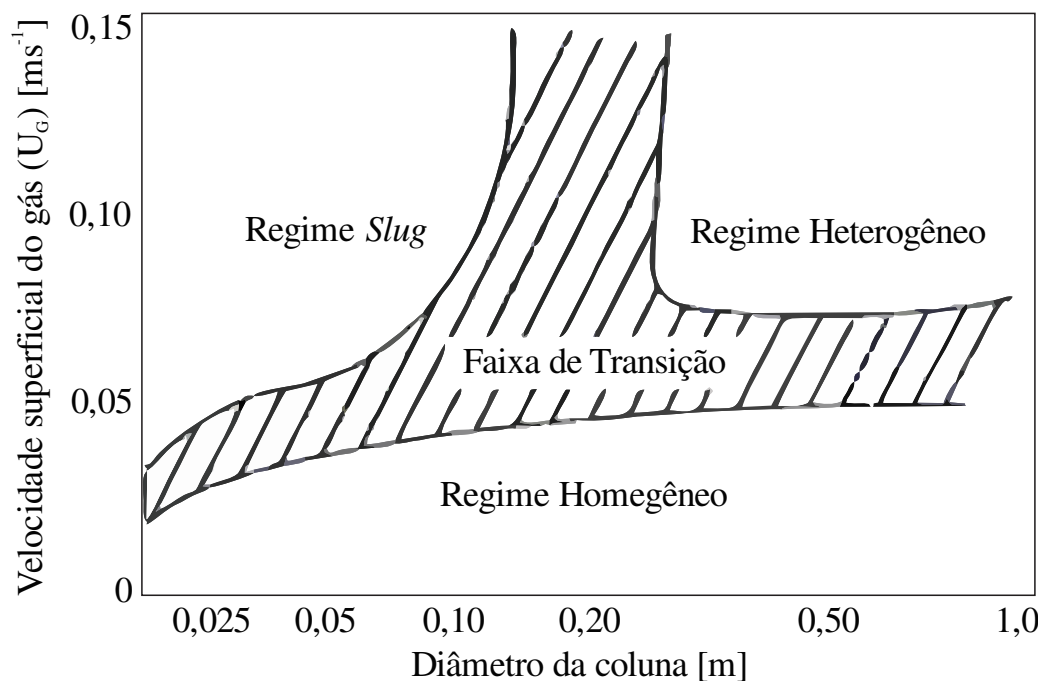


Figura 2. 2 - Mapa de regime de escoamentos para colunas de bolhas (Adaptado de Shah et al., 1982).

2.1.1 Análise das estruturas de escoamento em coluna de bolhas

Tzeng et al. (1993), Chen et al. (1994) e Lin et al. (1996) usaram a técnica de PIV para identificação, caracterização de regimes e análises das estruturas de escoamento em coluna de bolhas. Análises visuais e com modelos teóricos também foram empregados. Chen et al. (1994) estudaram as estruturas do escoamento na coluna de bolhas 3-D utilizando a técnica de medição PIV. Os autores observaram três regimes de escoamento: escoamento de bolha dispersa, escoamento em vórtice-espiral e escoamento turbulento (Figura 2.3). Em comparação com a classificação de regime apresentada na Figura 2.1, o escoamento heterogêneo foi dividido nos regimes vórtice-espiral e turbulento. No escoamento de bolhas dispersas, as bolhas sobem linearmente com o líquido circulando na direção oposta por entre as correntes de bolhas. No escoamento vórtice-espiral, os aglomerados de bolhas formam a corrente central (ou pluma central) que se move em espiral juntamente com o líquido em um padrão oscilatório (Figura 2.4b). Além da região da pluma central, regiões de escoamento rápido de bolhas (geradas pela coalescência) e as regiões de formação de vórtices estão presentes. Nesse último, os surgimentos dos turbilhões podem ser observados próximo à parede da coluna, enquanto a região de escoamento descendente é caracterizada pela recirculação do líquido, o qual arrasta consigo pequenas bolhas em regiões próximas à parede. No escoamento turbulento, a coalescência da bolha torna-se dominante com alta complexidade entre as interações das fases. Os autores também apontaram semelhanças com as estruturas de escoamento 2-D descritas por Tzeng et al. (1993) (Figura 2.4a). A única diferença entre ambos consiste no movimento em forma de onda na região de escoamento rápido de bolha na coluna 2-D, que se torna um espiral na coluna de bolha 3-D (Chen et al., 1994; Shaikh e Al-Dahhan, 2007).

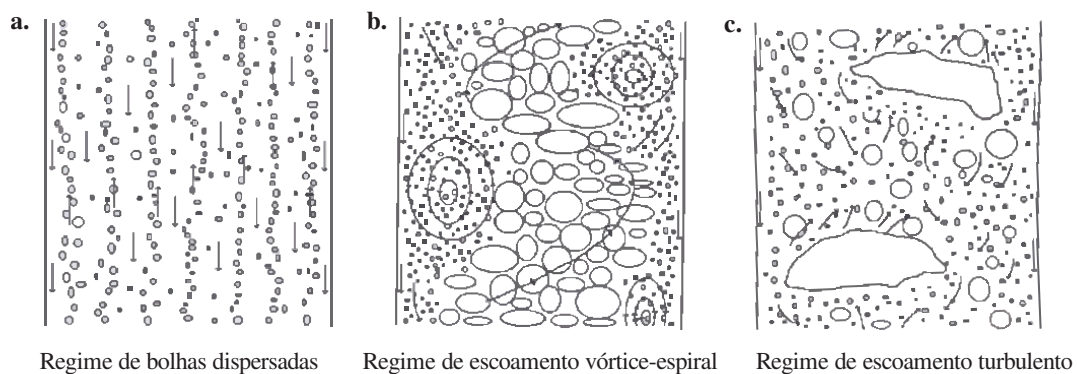


Figura 2. 3 - Regimes de escoamentos em uma coluna de bolhas 3-D (Adaptado de Chen et al., 1994).

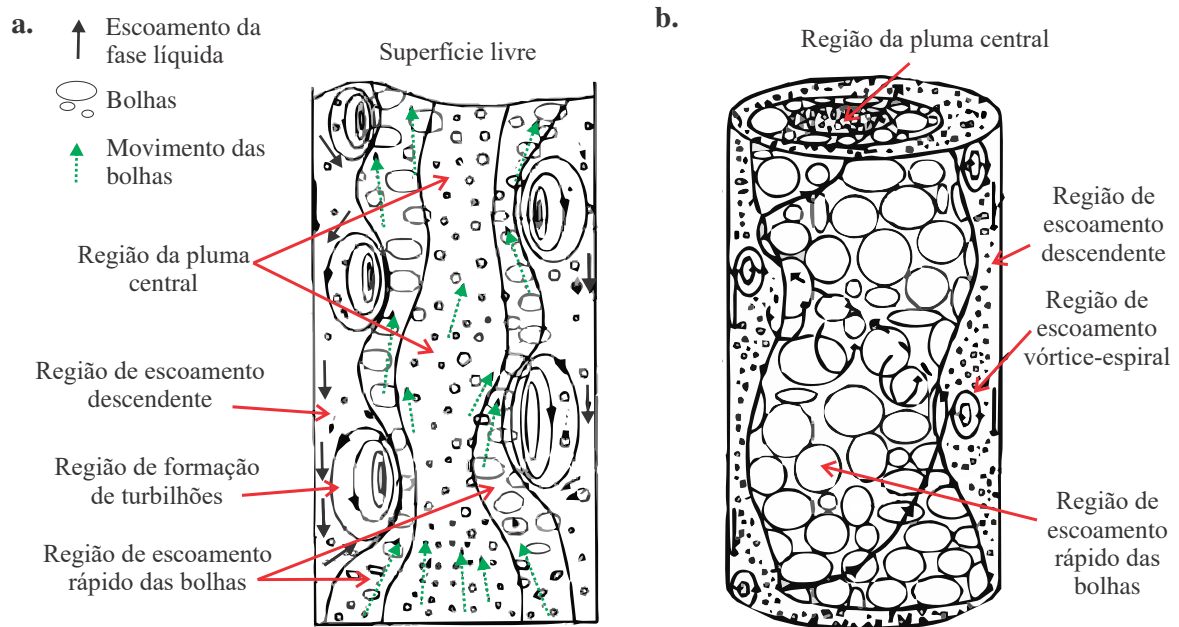


Figura 2. 4 - (a) Representação das estruturas de escoamento em 2D em uma coluna de bolhas proposta por Chen et al. (1994) em regime de escoamento vórtice-espiral e (b) estrutura de escoamento em uma coluna de bolhas 3D proposta por Tzeng et al. (1993).

Posteriormente, Lin et al. (1996) realizaram análises experimentais e computacionais das características hidrodinâmicas macroscópicas de uma coluna de bolhas 2-D. Os autores dividiram os regimes em bolhas dispersas e escoamento de bolhas coalescidas. Sendo esse último ainda dividido em duas condições de escoamento, escoamento de 4-regiões e de 3-regiões. Esta descrição é semelhante à proposta por Tzeng et al. (1993) e Chen et al. (1994). No primeiro, o escoamento divide-se em 4 regiões: descendente, com presença de vórtices, escoamento de bolha rápida e região de pluma central com forma semelhante ao regime de escoamento vórtice-espiral (Chen et al., 1994). No escoamento de 3-regiões, Lin et al. (1996) observaram que duas regiões de escoamento rápido de bolhas se fundem a partir de uma corrente de bolhas central que se move de forma oscilatória seguido do desaparecimento da região da pluma central. Além disso, outras duas regiões, de escoamento descendente e de escoamento vórtice-espiral ainda foram evidenciadas nesse regime.

2.1.2 Dinâmica e características das bolhas

O movimento das bolhas em um sistema gás-líquido é um dos tópicos mais importantes no que diz respeito às suas características de escoamento irregular e complexo. Apesar da complexidade das estruturas observadas em escoamentos gás-líquido, esse tipo de sistema é uma opção atraente para aplicações industriais devido às altas taxas de mistura em grandes

escalas que podem ser alcançadas com relativa facilidade. A variedade das estruturas de escoamento, tais como a interação mútua entre as bolhas e vórtices muitas vezes afetam consideravelmente o desempenho de operação das colunas de bolhas. Desse modo, diversas pesquisas têm sido realizadas para compreender essas características e as suas implicações no fenômeno da turbulência (Serizawa et al., 1975; Theofanous e Sullivan, 1982; Wang et al., 1987; Lance e Bataille, 1991; Liu e Bankoff, 1993; So et al., 2002; Hosokawa e Tomiyama, 2004; Shawkat et al., 2008; Hosokawa e Tomiyama, 2013). Embora alguns problemas ainda não tenham soluções, os esforços anteriores mostraram que as bolhas aumentam ou suprem a turbulência da fase líquida, dependendo dos seus tamanhos (alteração volumétrica), do movimento de translação (trajetória), das diferenças de densidade entre as fases, da distribuição de vazios, da deformidade da bolha e dos efeitos localizados no centro e regiões próximas à parede da coluna (Abdulmouti, 2014).

Considerando que a turbulência em escoamentos gás-líquido possui duas contribuições, da turbulência induzida pelo cisalhamento (*shear-induced turbulence* – SIT) existente em escoamento monofásico (como contribuição individual de cada fase) e o outro a partir da turbulência induzida por bolhas (*bubble-induced turbulence* – BIT), é necessário investigar o acoplamento dessas duas vias. Uma vez que a maioria dos modelos de turbulência pressupõe na predominância da SIT, o principal problema nos modelos de turbulência de duas fases reside na BIT e na compreensão de suas estruturas (Theofanous e Sullivan 1982; Michiyoshi e Serizawa, 1986; Lance e Bataille, 1991; Martínez-Mercado et al., 2007; Riboux et al., 2010, 2013; Hosokawa e Tomiyama, 2013; Tripathi et al., 2015; Kim et al., 2016). De acordo com Wijngaarden (1998), em escoamentos borbulhantes, o movimento relativo entre bolhas e líquido provoca flutuações de velocidade no líquido, produzindo tensões de Reynolds e outros fenômenos inerentes as flutuações. Isso é denominado de pseudo-turbulência. Turbulência porque compartilha com a turbulência ordinária seu caráter flutuante, "pseudo" porque não é devido aos processos complexos, apenas parcialmente conhecidos até agora, dos quais resulta a turbulência ordinária, mas simplesmente do deslocamento do líquido pelas bolhas em movimento.

Cui e Fan (2004) descreveram os possíveis mecanismos que induzem a turbulência devido à passagem das bolhas. Utilizando as técnicas de LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) e PIV, os autores investigaram as distribuições de energia turbulenta no sistema gás-líquido a partir de uma coluna de bolha 2D. O diagrama de uma bolha em movimento ascendente com a presença das esteiras e as flutuações de velocidade ocasionadas pela passagem da bolha é apresentado na

Figura 2.5. Neste caso, a técnica LDV foi utilizada para obter a energia de turbulência na esteira da bolha e no escoamento em geral, enquanto que a técnica PIV foi utilizada para obter a velocidade e o tamanho da bolha a partir de uma área de medição. Na análise dos resultados das técnicas LDV e PIV, os autores consideraram as seguintes premissas: a velocidade da esteira é igual a velocidade de ascensão da bolha; o movimento horizontal da esteira é irrelevante; a bolha não muda de forma; e as esteiras possuem formatos redondos ou elípticos. Na parte experimental, a faixa de velocidade superficial do gás foi de $0,75 \leq U_G \leq 7,5$ cm/s e o diâmetro médio das bolhas foi de 5,32 mm, obtido a partir de medições PIV. Os resultados apresentados deram indícios que os fenômenos associados à BIT eram predominantes na geração de energia turbulenta em relação à SIT. Segundo os autores, para uma velocidade superficial de gás baixa (0,75 cm/s) o líquido é acelerado pela ascensão das bolhas e a energia turbulenta na fase líquida também sofre um aumento devido à presença das esteiras induzidas pela sua passagem. No entanto, para velocidades superficiais de gás elevadas (7,5 cm/s), a perda de energia na fase líquida (tanto cinética quanto energia turbulenta) devido à dissipação não pode ser compensada pela BIT. Além disso, o pico da energia turbulenta foi observado na região central da coluna, em contraste com a energia turbulenta na região próxima à parede em que foi obtido um valor apenas 10% em comparação com o da região central.

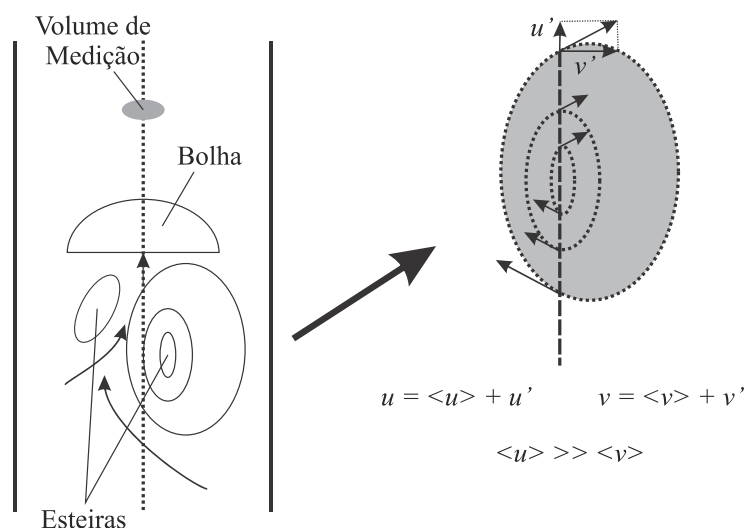


Figura 2. 5 - Diagrama da passagem da bolha e os fenômenos associados (adaptado de Cui e Fan, 2004).

Kim et al. (2016) investigaram fenômenos associados por BIT em um tubo (diâmetro $D = 90$ mm e altura $z = 1730$ mm) utilizando as técnicas PIV (fase líquida) e LIF – *Laser-Induced Fluorescence* (fase gasosa) em condição de escoamento laminar ($Re \leq 750$). Foram investigados quatro casos que, entre outros fatores, dependem do diâmetro das bolhas d_b (2,2;

2,7; 3,1 e 3,7 mm) e da fração de vazão volumétrica média $\bar{\alpha}$ (0,05; 0,1; 0,17 e 0,64 %). Em todos os casos a velocidade superficial do gás u_b foi igual a 1,88 cm/s. As medições foram realizadas no plano central em três localizações: $z/D = 4,5, 21$ e 42 , das quais as duas primeiras pertenceram às regiões em desenvolvimento e a última região estaria inserida na condição de escoamento completamente desenvolvido. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram os campos de escoamento instantâneos representando os vetores de velocidade (fases gás e líquido) e contorno de vorticidade para a fase líquida (*contour of spanwise vorticity* – ω). Neste caso, os autores calcularam ω subtraindo a vorticidade no tempo médio do escoamento laminar monofásico da vorticidade instantânea do escoamento bifásico.

Na Figura 2.6a, para o caso 2 ($d_b = 2,7$ mm e $\bar{\alpha} = 0,1\%$), na região do escoamento em desenvolvimento em $z/D = 4,5$, a fração de vazão médio é relativamente baixa e as estruturas de escoamento induzidas pelo movimento de bolhas individuais (as linhas contínuas denotam o caminho ascendente da bolha individual) são retidas durante uma duração relativamente longa (indicado com uma seta aberta). No caso 3 ($d_b = 3,1$ mm e $\bar{\alpha} = 0,17\%$), a interação entre as esteiras ocasionou um maior vetor de velocidade próximo às bolhas. Os autores destacam que apenas no caso 3 foi observado estruturas de recirculação de líquido na região com poucas bolhas (retângulo tracejado apresentado na Figura 2.6b). À medida que o escoamento se desenvolveu (em $z/D = 21$), os autores observaram que a distribuição das bolhas se tornaram mais simétricas, caso 2 e caso 4 ($d_b = 3,7$ mm e $\bar{\alpha} = 0,64\%$) representados nas Figuras 2.6c e 2.6d, respectivamente. Para o caso 2 (Figura 2.6c), no entanto, as estruturas devido à presença dos vórtices induzidos ao longo da trajetória das bolhas ainda mantiveram suas características observadas na Figura 2.6a (Kim et al., 2016).

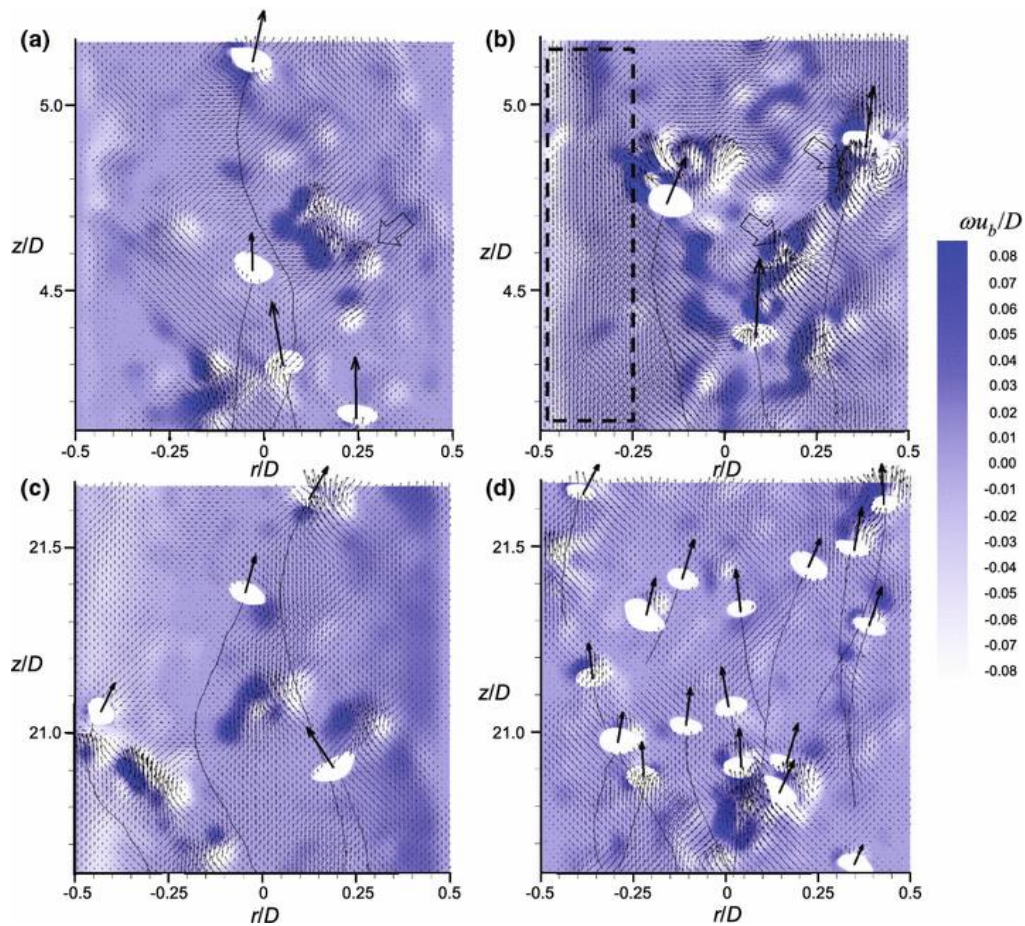


Figura 2. 6 - Campos de escoamento instantâneo para as velocidades da fase líquida e da fase gasosa (indicados com os respectivos vetores) com os contornos de vorticidade para a fase líquida em $z/D = 4,5$ (a) caso 2 ($d_b = 2,7$ mm e $\bar{\alpha} = 0,1\%$) e (b) caso 3 ($d_b = 3,1$ mm e $\bar{\alpha} = 0,17\%$) e para $z/D = 21$ (c) caso 2 e (d) caso 4 ($d_b = 3,7$ mm e $\bar{\alpha} = 0,64\%$) (Kim et al., 2016).

A Figura 2.7 apresentaram os campos de velocidade e contorno de vorticidade para a região do tubo com o escoamento já desenvolvido ($z/D = 42$). As estruturas de escoamento induzidas pelas bolhas se tornam mais complexas à medida que o valor de $\bar{\alpha}$ aumenta devido à uma maior interação bolha-bolha. Para os casos 1 ($d_b = 2,2$ mm e $\bar{\alpha} = 0,05\%$) e 2, devido ao pequeno valor de $\bar{\alpha}$, a velocidade substancial do líquido ocasionada pela passagem das bolhas foi confirmada nas proximidades destas. Além disso, as estruturas de vorticidade, como consequência das esteiras de cada bolha, permaneceram reclusas durante algum tempo (designadas por setas nas Figuras 2.7a e 2.7b) de forma semelhante ao que foram observadas na Figura 2.6a. Com o aumento de $\bar{\alpha}$, as interações esteira-esteira foi observado de forma mais relevantes (Figuras 2.7c e 2.7d) com as trajetórias das bolhas sendo afetadas mutuamente (retângulo tracejado, por exemplo, na Figura 2.7d). Os autores ainda relataram que em todos os casos o comportamento dominante das bolhas em ascensão apresentou características de um

movimento em ziguezague bidimensional (ou às vezes tridimensionais, como um movimento helicoidal). Além disso, uma vez que a imagem da bolha foi capturada, constatou-se que a sua trajetória não desaparece do campo de visão, o que indicou um efeito pequeno do movimento para fora do plano (Kim et al., 2016).

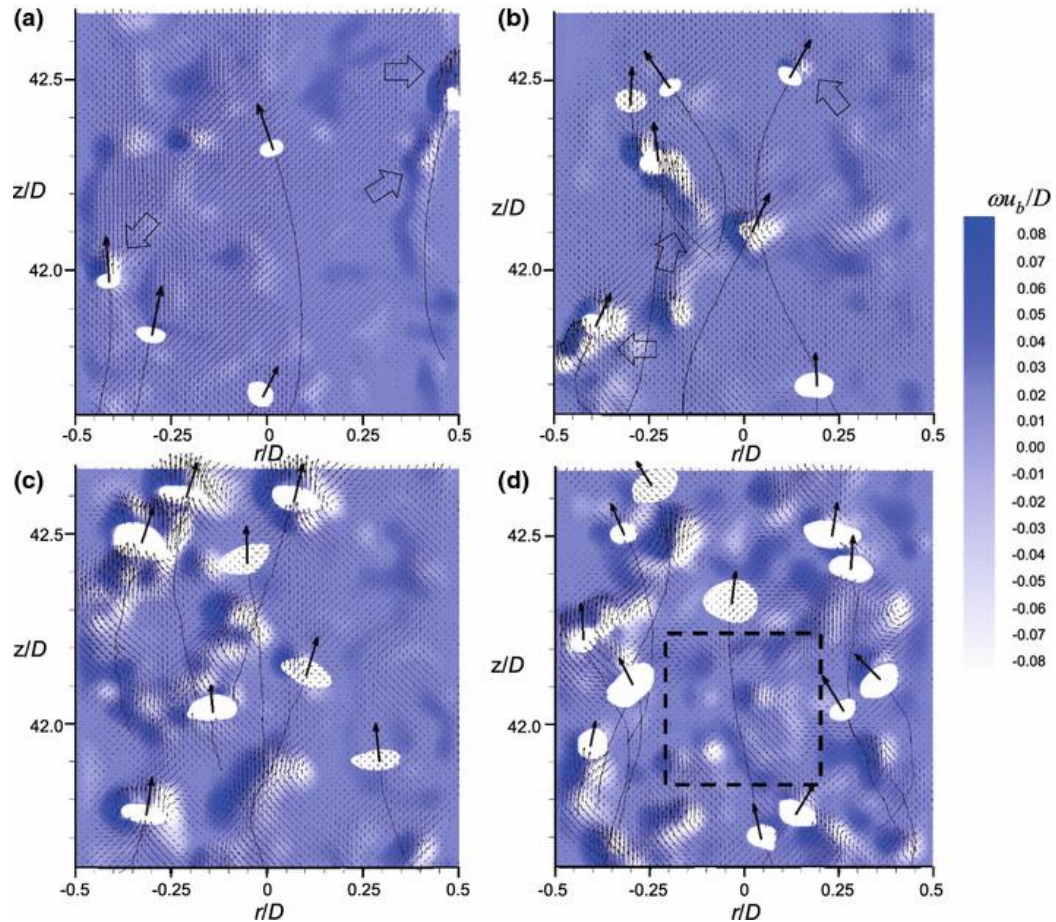


Figura 2. 7 - Campos de escoamento instantâneo para as velocidades da fase líquida e da fase gasosa (indicados com os respectivos vetores) com os contornos de vorticidade para a fase líquida em $z/D = 42$ (a) caso 1 ($d_b = 2,2$ mm e $\bar{\alpha} = 0,05\%$), (b) caso 2, (c) caso 3 e (d) caso 4 (Kim et al., 2016).

Kim et al. (2016) concluíram que as bolhas interferiram significativamente nas estatísticas de escoamento da fase líquida, com a BIT sendo afetada diretamente com o aumento de $\bar{\alpha}$; tornando-se comparável ao de um escoamento turbulento de fase única com moderados números de Reynolds (por exemplo, $0,3-1 \times 10^4$, considerando o intervalo do valor de $\bar{\alpha}$ que foi investigado). Conclusão semelhante foi relatada por Pang e Wei (2013). Os autores investigaram, a partir de medidas PIV, a turbulência induzida por bolhas possuindo pequenos diâmetros (0,5 – 1,0 mm) em um canal (seção 10 x 20 mm e 2000 mm de altura) para um

sistema água/ar. Métodos de identificação de vórtices como *Lambda2* e POD (decomposição ortogonais – para identificar estruturas coerentes) possibilitaram identificar uma redução da intensidade de turbulência na fase líquida e uma redução na tensão de cisalhamento de Reynolds perto da parede do canal com uma fração de vazios elevada. Em compensação, a turbulência induzida pelas bolhas destacou-se por ter grande influência nas estruturas de grande escala, enquanto que a contribuição das estruturas de pequena escala, que denota a dissipação de energia, tornou-se menor (Pang e Wei, 2013).

Liu et al. (2005) investigaram as estruturas de escoamento induzida pela passagem de uma única bolha (de forma controlada) em uma coluna de bolhas 2D (68×88 mm e altura de 450 mm) utilizando PIV. Foram analisados quatro líquidos com viscosidade diferentes: S1 (água/ $\mu = 0,95 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), S2 (50% em peso de glicerina em água/ $\mu = 5,4 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), S3 (64% em peso de glicerina em água/ $\mu = 12,3 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) e S4 (72% em peso de glicerina em água/ $\mu = 24,8 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Em todos os casos, os campos de velocidade apresentados foram obtidos com uma velocidade superficial de gás igual a $7,42 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. O diâmetro das bolhas variou de 5,1 a 6,0 mm. Os autores analisaram o formato típico de cada bolha em função da viscosidade do líquido e destacaram as diferentes formas das bolhas em baixa viscosidade (Figura 2.8d-i).

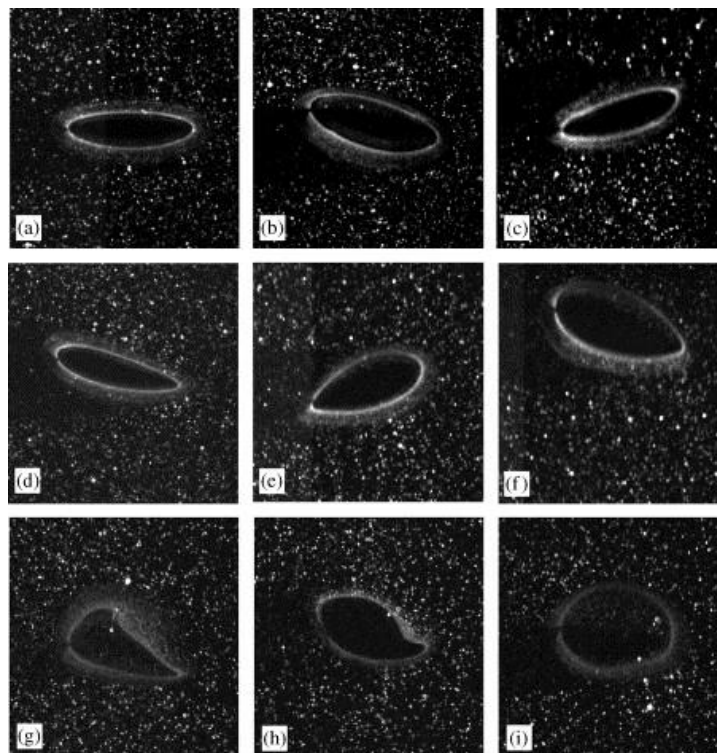


Figura 2. 8 - Imagens típicas de bolhas capturadas pela técnica PIV para os casos: (a) S-4, (b), c) S-3, (d-f) S-2 e (g-i) S-1 (Liu et al., 2005).

A Figura 2.9 apresenta os campos instantâneos sequenciais de velocidade do líquido induzidos pelas passagens das bolhas para as diferentes viscosidades investigados por Liu et al., (2005).

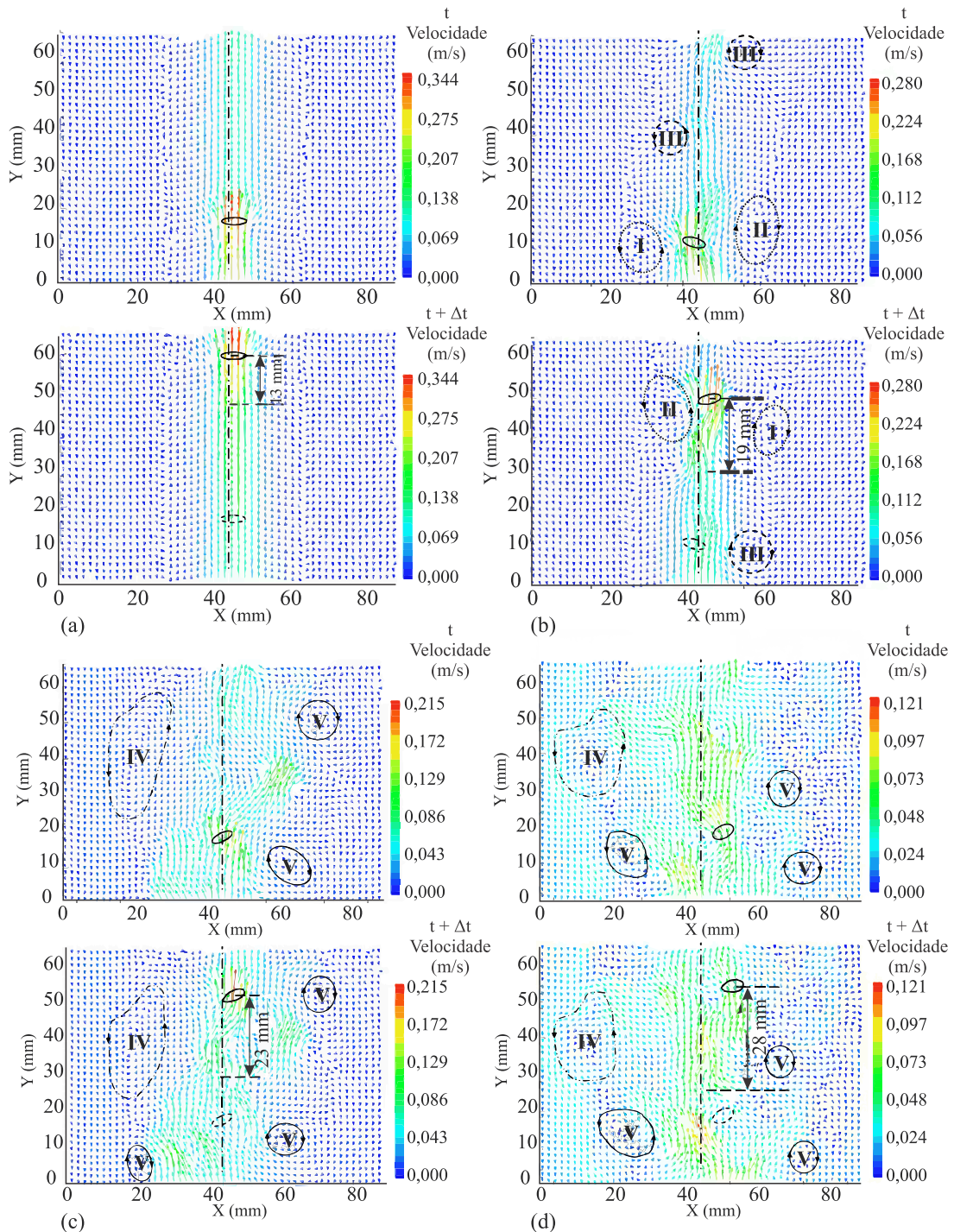


Figura 2.9 - Campos instantâneos sequenciais (com intervalo $\Delta t = 133$ ms) de velocidade do líquido destacando a passagem da bolha, trajetória e zonas de vorticidade e circulação de líquido para a configuração (a) S-4, (b) S-3, (c) S-2 e (d) S1 com $U_G = 7,42 \times 10^{-3}$ cm/s (adaptado de Liu et al., 2005).

De uma forma geral, os autores observaram a ascensão do líquido juntamente com a bolha no centro e movimento no sentido contrário (apenas para o líquido) próximo à parede da coluna. O líquido na parte superior da bolha foi empurrado para cima em decorrência da sua trajetória. Na parte inferior da bolha, o deslocamento do líquido para cima possuiu relação direta com a formação das esteiras. Como consequência, foi notado um aumento da velocidade em torno das bolhas em movimento ascendente.

Esse fenômeno também foi observado por Lindken e Merzkirch (2000), Seol e Socolofsky (2008). Lindken e Merzkirch (2000) utilizaram um método experimental para determinar simultaneamente a velocidade 2D-2C do líquido e a velocidade 3D das bolhas (Figura 10a). Os autores identificaram as estruturas das esteiras a partir das passagens das bolhas (e mudanças da sua forma) destacando as regiões de vorticidade (Figura 2.10b) como consequência da pseudo-turbulência induzida na fase líquida.

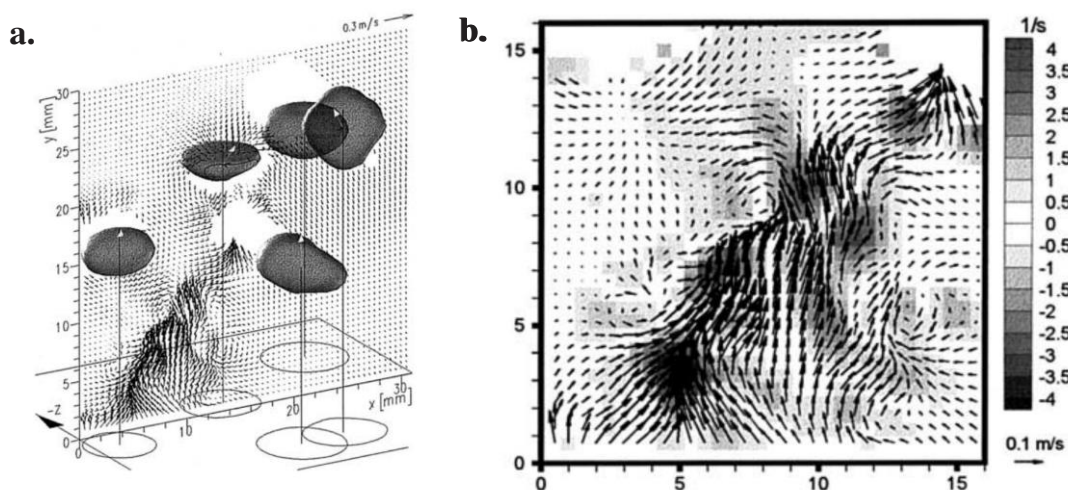


Figura 2. 10 - (a) Campo 2D-2C de velocidade da fase líquida (água) e velocidade 3D das bolhas aproximadamente de 0,3 m/s (ou 30 cm/s). (b) Distribuição de vorticidade e vetor velocidade na região da esteira para $U_G = 0,1$ m/s (ou 10 cm/s) (adaptado de Lindken e Merzkirch, 2000).

Segundo Liu et al. (2005), a partir da Figura 2.9 foi possível notar que com o aumento da viscosidade o comprimento da esteira diminuiu (28 mm para S1 e 13 mm para S4). Para o caso da viscosidade elevada (Figura 2.9a), os autores relatam a ausência das estruturas ocasionadas por vórtices e uma trajetória em linha reta com o formato da bolha praticamente constante (Figuras 2.11a e 2.11i). Contudo, à medida que a viscosidade diminuiu, zonas contendo pares de vórtices irregulares de contra-rotação (zonas I e II) surgiram devido ao movimento ascendente das bolhas (Figura 2.9b). Segundo os autores, esses pares de vórtices facilitaram o

movimento em ziguezague das bolhas (Figuras 2.11b e 2.11ii) e, como consequência, ocasionou a manifestação de estruturas de vórtices orientadas de forma opostas e alternadas (zonas III). Esse fenômeno foi observado a partir do caso S3 (Figura 2.9b). Para os casos S2 e S1 (Figuras 2.9c e 2.9d), com viscosidade baixa, as estruturas se apresentaram de forma mais complexas. Os autores relataram movimentos das bolhas em espiral (tridimensional) com movimentos de vibração e de rotação (Figuras 2.11c, 2.11iii e 2.11iv), vórtices com formatos esféricos e elipsoidais (zonas IV) e regiões de circulação de líquido irregulares (zonas V). Em todos os casos os formatos das bolhas foram predominantemente elipsoidais (Liu et al., 2005).

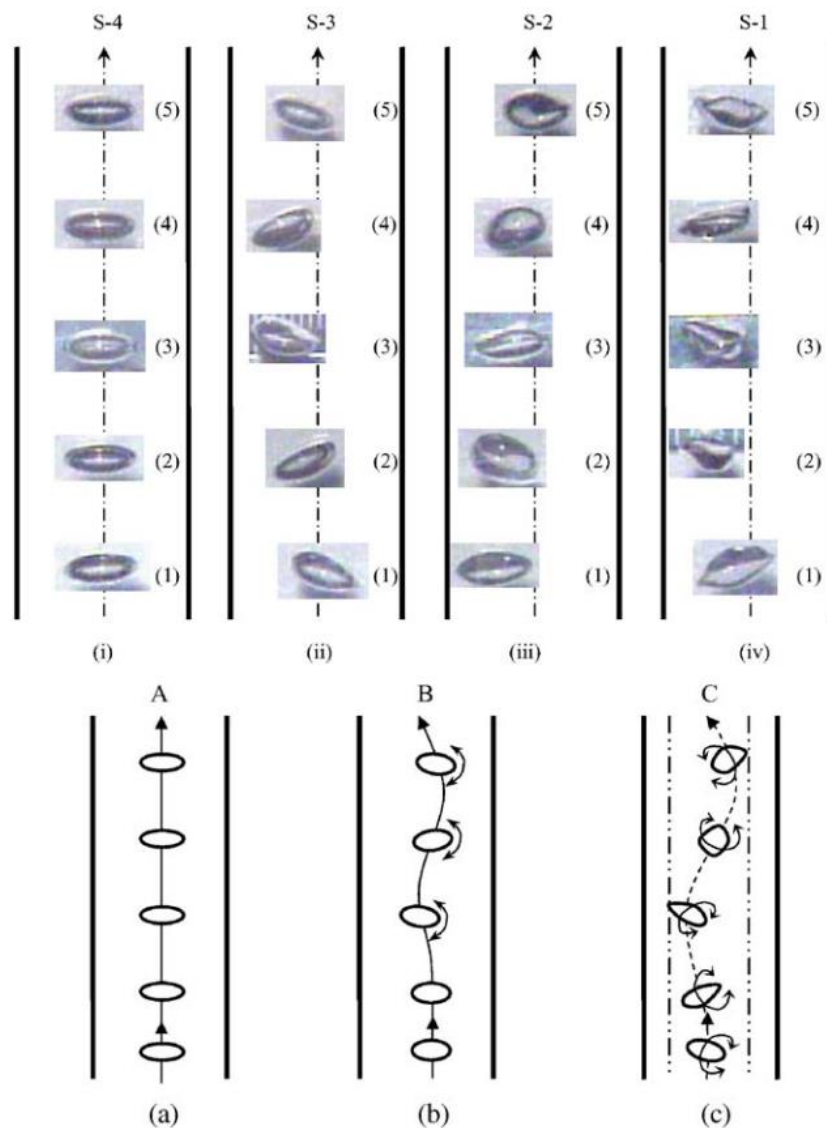


Figura 2. 11 - Trajetória da bolha para os casos (i) S-4, (ii) S-3, (iii) S-2 e (iv) S-1; E representação da trajetória: (a) trajetória linha reta no líquido S-4; (b) trajetória em ziguezague no líquido S-3; (c) trajetória em espiral nos líquidos S-2 e S-1 (Liu et al., 2005).

Em relação às diferentes trajetórias, comportamento semelhante (Figura 2.12) foram evidenciados por Vries et al. (2002). Neste caso, os autores analisaram de forma visual as estruturas das esteiras, ocasionadas pela passagem das bolhas, com uma câmera de alta frequência em uma coluna 2D (15 × 15 × 50 cm) contendo água deionizada. Os autores relataram que a trajetória não retilínea (espiral e/ou em ziguezague) foi mantida por uma força de sustentação e não pelo desprendimento de vórtices, como observado em esferas sólidas, por exemplo. Em relação à essa analogia, as diferenças entre bolhas e esferas em trajetória ascendente residiu nas condições de contorno: não deslizante e rígido para esferas sólidas e tensão tangencial zero e assimetria de forma (deformável) para bolhas (Tokuhiro et al., 1998). Essas diferenças influenciaram a formação de vórtices tanto na superfície quanto na região de arrasto da bolha (Vries et al., 2002). A partir da Figura 2.12 os autores identificaram a formação de dois filamentos de vórtices de contra-rotação com estruturas semelhantes a vórtices do tipo *hairpin*¹. Contudo, trabalhos como Tripathi et al. (2015), associaram essas estruturas com as instabilidades de *crow* (instabilidades ocasionadas pela interação mútua de vórtices na esteira contra-rotativos).

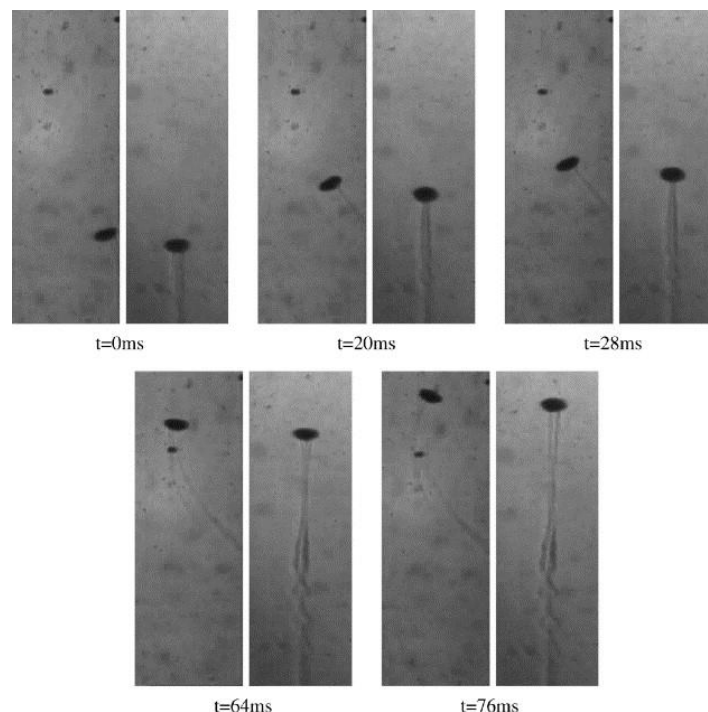


Figura 2. 12 - Sucessivas imagens de uma bolha (diâmetro equivalente igual a 2 mm) em ascensão apresentando movimento em ziguezague com suas respectivas estruturas de esteiras (Vries et al., 2002).

¹ Padrão de escoamento encontrado na camada limite turbulenta possuindo coerência espacial e temporal (estruturas coerentes) (Adrian, 2007).

Com o intuito de esclarecer a origem dos desvios do movimento vertical em uma bolha (desprendimento de vórtices, assimetria de formas ou ambos), Wichterle et al. (2014) concluíram que o desprendimento dos vórtices na zona de arraste foi o efeito e não a causa da instabilidade na trajetória da ascensão das bolhas (o diâmetro da bolha nesse estudo variou entre 1 e 3 mm em sistemas com viscosidades diferentes em um canal cônico). A frequência das oscilações das bolhas não foi controlada pelas relações de viscosidade – inércia e, portanto, o desprendimento de vórtices não desempenhou um papel primário no processo. Para líquidos com baixa e moderada viscosidade, as frequências de oscilações na trajetória da bolha foram controladas, principalmente, por forças superficiais (Wichterle et al., 2014). De acordo com Tripathi et al. (2015), existe uma conexão próxima entre a perda de simetria e de uma trajetória não retilínea. Qualquer assimetria no plano perpendicular à gravidade deve resultar em um desequilíbrio das forças coplanares na superfície da bolha. Similarmente, qualquer assimetria nas forças coplanares, devido ao desprendimento dos vórtices, deve resultar em assimetria de forma.

Tendo a forma da bolha como ponto determinante na formação de zonas de arraste, formação de pares de vórtices e estabilidade da sua trajetória, Tripathi et al. (2015) realizaram simulações 3D da dinâmica de uma bolha em ascensão a partir do número de Galilei (Ga)² e do número de Eötvös (Eo)³ com o intuito de investigar em detalhes os vários fatores que podem contribuir para formações de padrões nesse tipo de escoamento (Figura 2.13).

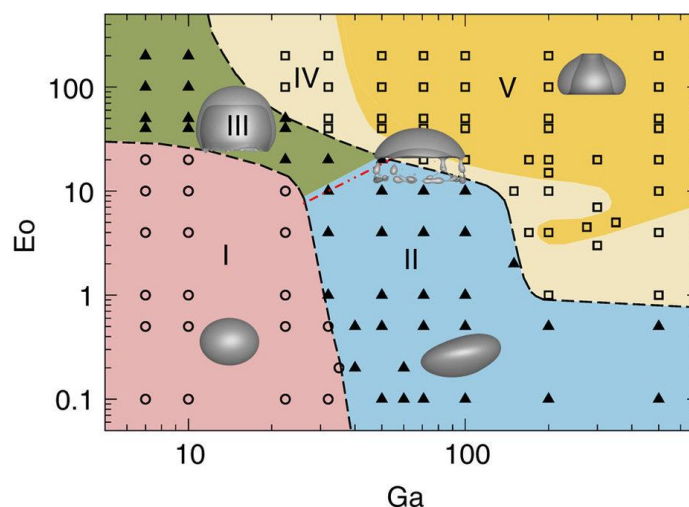


Figura 2. 13 - Diferentes regimes de forma e de comportamento da bolha em função dos números de Eo e de Ga (Tripathi et al., 2015).

² O número de Galilei (Ga) é uma relação entre a força gravitacional e a força viscosa.

³ O número de Eötvös (Eo) é uma relação entre a força gravitacional e a força de tensão superficial.

De acordo com Tripathi et al. (2015), as simulações evidenciaram cinco regiões:

- A região I, com números baixos de Eötvös e Galilei, é apresentada na região na cor rosa. Nessa região, a tensão superficial é elevada e a gravidade é baixa, portanto, a bolha retém a sua integridade. A bolha nesta região exibe uma simetria em torno de seu eixo (indicado com círculo na Figura 2.13).
- A região II, representada na cor azul, ocupa Eötvös mais baixo e números de Galilei mais elevados. Nesta região a tensão superficial e as forças inerciais são ambas significativas e da mesma ordem. As bolhas exibem fortes desvios em relação à simetria em torno de seu eixo (geralmente na forma de um elipsoide – indicado como triângulos na Figura 2.13) e frequentemente exibem trajetórias em ziguezague ou em espiral.
- A Região III, com números elevados de Eötvös e números baixos de Galilei, é demarcada na cor verde. A bolha possui duas características distintas, uma “tampa” simétrica em torno de seu eixo com uma “saia” fina que precede o corpo principal da bolha. A “saia” apresenta pequenos desvios de simetria e de direção (os autores relataram que as modificações na forma dessas estruturas sob a forma de ondas “saias” ainda é um grande desafio numérico). As bolhas nesta região se movem para cima em uma trajetória vertical.
- Na região IV, apresentada na cor amarelo claro, para baixo G_a e alto valor de E_o , foi observado uma quebra da bolha (indicado com quadrados na Figura 2.13) em um grande tampão esférico, simétrico em torno de seu eixo, com o desprendimento de várias pequenas bolhas satélites na esteira. Para valores altos de G_a e baixos de E_o , foi verificado uma nova dinâmica de ruptura. Nessa parte da região IV, após a quebra da bolha, a simetria foi recuperada com a bolha possuindo um formato esférico constante.
- A região V, apresentada na cor amarelo escuro, as bolhas mostradas estão sob a ação de alta força inercial e baixa força de tensão superficial. Uma formação de ondulação no centro da parte inferior da bolha leva a uma mudança de topologia: para uma forma de rosca ou toroidal. No limite perto da região IV é observado também a presença de pequenas bolhas satélites.

O formato das bolhas evidenciadas por Vries et al. (2002), Liu et al. (2005), Wichterle et al. (2014) e Kim et al. (2016), por exemplo, se aproximam de classificação do tipo III de Tripathi et al. (2015) tanto no formato da bolha quanto no tipo de trajetória apresentada. De fato, os resultados numéricos das simulações tridimensionais obtidos por Tripathi et al. (2015)

corresponderam aos resultados experimentais obtidos pelos trabalhos mencionados. Na Figura 2.14, Tripathi et al. (2015) apresentam a evolução da forma e da trajetória para bolhas para essa região. Na Figura 2.14d, r_s é a distância radial do centro de gravidade da bolha medida no plano horizontal. Como referência, a bolha é considerada estacionária em $t = 0$ e a gravidade age na direção negativa de z no sistema cartesiano (x,y,z) .

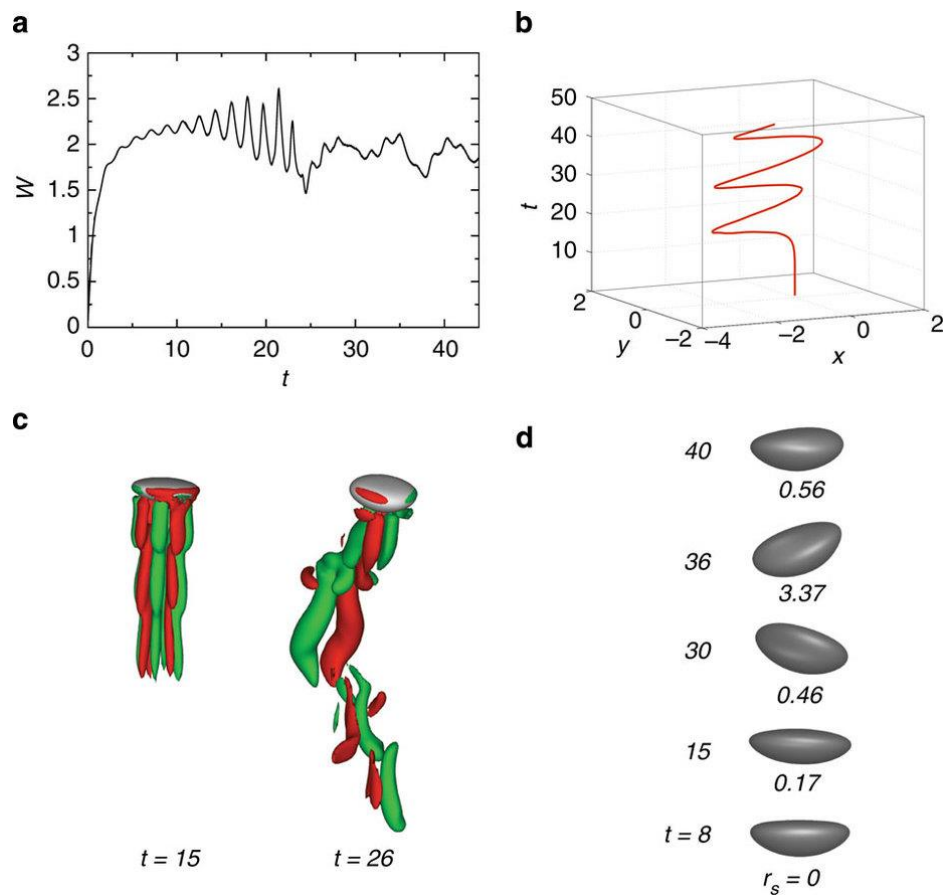


Figura 2. 14 - Características de uma bolha da região III com $Ga = 100$ e $Eo = 0,5$. (a) velocidade axial oscilantes (zig-zague) da bolha, (b) trajetória semelhante ao comportamento em espiral, (c) iso-superfícies do componente dos pares de vorticidade de contra-rotação na direção z no tempo $t = 15$ e 26 (d) a evolução da forma da bolha (adaptado de Tripathi et al., 2015).

Outros trabalhos como o de Zhou e Dušek (2017), apresentaram uma curva de estabilidade para uma bolha deformável ascendendo livremente em um líquido Newtoniano viscoso. Os resultados mostraram o papel crucial da deformação superficial na perda de estabilidade da trajetória da bolha. Destaca-se nesse trabalho o modelo matemático empregado, que apesar da completa abstração da dinâmica do gás dentro da bolha, a sua superfície foi realisticamente modelada por condições de contorno de superfície livre e nenhum limite foi

definido para a sua deformação. Em complemento ao trabalho realizado por Tripathi et al. (2015), os resultados obtidos por Zhou e Dušek (2017) forneceram informações significativamente mais precisa sobre o início da instabilidade na trajetória da bolha, em comparação com o diagrama dos números de Ga e de Eo, por exemplo.

Por fim, uma revisão detalhada sobre o tema envolvendo os fenômenos de turbulência e/ou pseudo-turbulência em sistemas gás-líquido pode ser encontrado em Joshi et al. (2017). Os autores destacam os seguintes pontos:

- As características das esteiras de uma única bolha subindo em um líquido quiescente (ambiente controlado) são geralmente bem conhecidas, juntamente com os seus efeitos sobre a força de arrasto experimentada pela bolha. Neste caso, o desenvolvimento de camadas limite são largamente laminares e ligadas à interface da bolha. Essa condição prevalece a menos que a inércia da bolha faça com que se deforme suficientemente, levando a um aumento na vorticidade na superfície da bolha e/ou na separação da camada limite que a rodeia (com a condição de interface e deslizamento total em sua superfície).
- O desenvolvimento da vorticidade na superfície de bolhas (deformação) influencia a formação das esteiras assim como no aumento da instabilidade da sua trajetória. As esteiras ocasionadas pelas passagens das bolhas turbulentas e instáveis tendem a atingir movimentos helicoidais e/ou em ziguezague ao longo da trajetória de subida com oscilações significativas de forma. Essas oscilações de forma e de trajetória tendem a transferir energia cinética ao longo da esteira. Subseqüentes bolhas subindo nessa mesma região, portanto, experimentam alguns distúrbios de velocidade (valores destoantes), agravando a forma e as oscilações da trajetória e flutuações de velocidade.
- Diversos fatores contribuem para a complexidade da análise da hidrodinâmica em uma coluna de bolha. Em primeiro lugar, a presença de impurezas e tensoativos no domínio líquido pode alterar a condição de interface de deslizamento da bolha, afetando assim o desenvolvimento da vorticidade. Além disso, as variações nos campos de velocidade, comumente encontrados em regimes heterogêneos, afetam diretamente as forças de arrasto e de elevação que atuam sobre a bolha assim como a forma da interface. As características da esteira também podem ser diretamente influenciadas, com o campo de velocidade atrás da bolha decaindo mais rapidamente do que no caso de ambientes quiescentes. A interação das bolhas que se elevam em campos turbulentos pode, portanto, ser significativamente diferente das condições laminares.

- A análise da interação das bolhas como resultado da formação de esteira, inércia e vorticidade próximo à superfície é crucial. Isto é especialmente importante, pois a interação bolha-bolha influencia a probabilidade de colisão, o que por sua vez afeta a tanto a geração de energia turbulenta quanto no mecanismo físico da coalescência em um sistema de múltiplas bolhas.

2.2 MEDIÇÕES E ANÁLISES EM COLUNA DE BOLHAS

2.2.1 Técnicas de medidas aplicadas em coluna de bolhas

De acordo com Shaikh e Al-Dahhan (2007), os métodos experimentais utilizados para identificação da transição de regime, em coluna de bolhas, podem ser classificados nos seguintes grupos: observação visual; evolução dos parâmetros fluidodinâmicos globais; assinaturas temporais de parâmetros relacionados à fluidodinâmica; técnicas de medição avançadas (Figura 2.15).

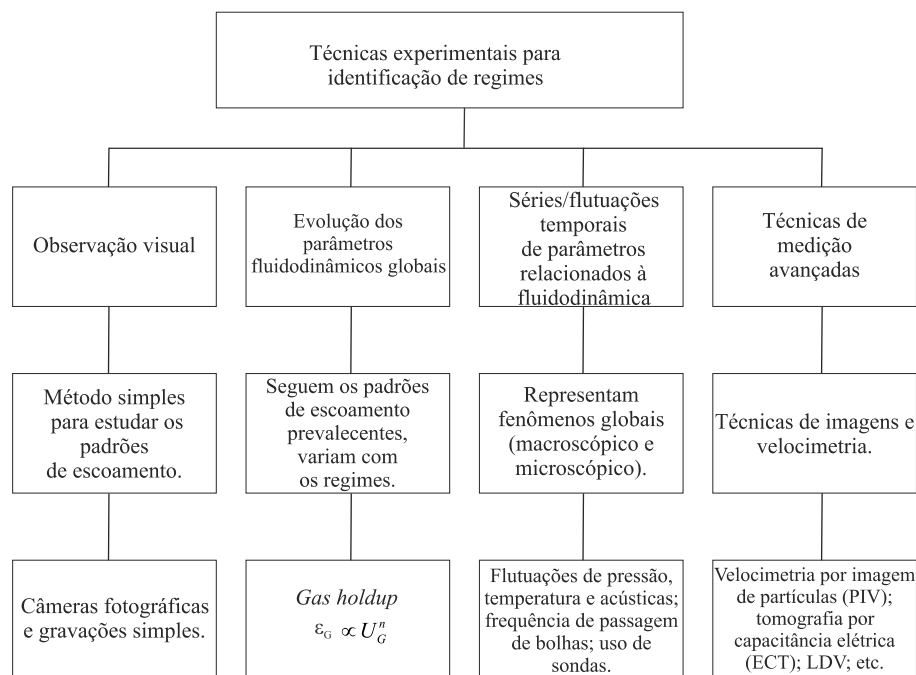


Figura 2. 15 – Diagrama com os métodos experimentais para análise de coluna de bolhas de acordo com Shaikh e Al-Dahhan (2007).

Trabalhos como os realizados por Boyer et al. (2002) propuseram uma visão geral das técnicas de instrumentação desenvolvidas para análise de escoamento multifásico. Inicialmente distinguem-se técnicas de medições estacionárias (representadas pela média), transientes, medições locais e globais, com as seguintes características: aspecto do estado estacionário global do reator (*holdup* ou retenção de gás e/ou líquido, queda de pressão, regime de escoamentos a ser analisado etc.); espaço unidimensional, valores médios da seção transversal em um dado nível no reator (sondas); espaço bidimensional ou tridimensional, valores médios locais sobre uma seção transversal do reator (técnicas tomográficas e de velocimetria); características locais e transitórias do campo de escoamento. Boyer et al. (2002) relatam que para escoamentos mais

estáveis as medições de cunho local são satisfatórias, por outro lado, para escoamentos mais heterogêneos o mais indicado são as medições de natureza global, contrapondo as medições do tipo local e transiente que podem variar amplamente dependendo da escala espacial e do tempo. Uma vez que a classificação entre medição local e global (com as correspondentes características listadas) não é sempre possível, os autores optam por estender a classificação em medições intrusivas e não-intrusivas.

Sobre as técnicas intrusivas, a principal limitação reside na interferência causada no escoamento investigado. Contudo, em instalações industriais muitas vezes o uso desse tipo de técnica se torna mais viável em comparação com as técnicas não-intrusivas. Segundo Boyer et al. (2002), as técnicas intrusivas aplicadas em coluna de bolhas são compostas basicamente pela utilização de sondas do tipo agulha (óptica e resistivas), de ultrassom e de transferência de calor. A aplicação de sondas do tipo agulha torna-se limitada por alguns problemas físicos. Especialmente em colunas de bolhas, essas sondas devem possuir uma estrutura muito fina em comparação com dimensão média da população das bolhas. Sondas do tipo óptica possuem limitação quanto à fase líquida, principalmente quando essa é orgânica (devido a uma diferença muito pequena no índice de refração com a fase gasosa). Além disso, a condutividade da fase líquida orgânica é demasiadamente pequena para o uso de sondas resistivas. Os dois tipos de sondas são passíveis de erros causados pela interação bolha-sonda (a ponta das sondas é propensa a romper as maiores bolhas em relação as pequenas): erros devido ao formato das bolhas e erros ocasionados pela não-estacionariedade do escoamento (principalmente no escoamento turbulento) (Buchholz et al., 1981; Cartellier et al., 1996; Hogsett e Ishii, 1997; Boyer et al., 2002). Em relação às sondas de ultrassom, essas possuem limitações em escoamentos turbulentos devido à perda de sinal acústico pelas repetidas reflexões do sinal (Bröring et al., 1991). Sondas de calor ou anemometria de fio quente podem descrever experimentalmente a fase líquida dentro de um escoamento bifásico com velocidades superficiais moderadas. Apesar de ser uma técnica intrusiva, dentre as sondas apresentadas, essa apresenta boa precisão de medição (0,1 a 0,2% para as experiências rigorosas) e uma boa relação sinal-ruído (Boyer et al., 2002). Inclusive, trabalhos recentes como o proposto por Neal et al. (2015), utilizaram a técnica de anemometria de fio quente para validar dados de medição PIV de alta frequências (resolvido do tempo e no espaço).

Em relação às técnicas não-intrusivas, a Tabela 2.1 apresenta um resumo e definições com as principais aplicações em coluna de bolhas.

Tabela 2. 1 - Técnicas não – intrusivas aplicadas em colunas de bolhas.

Técnica	Global/ Local	Descrição	Limitações	Algumas referências
Queda de pressão	Global	A queda de pressão entre dois níveis de um reator é uma variável muito utilizada para projeto de bombas e compressores, informações sobre o <i>holdup</i> das diferentes fases ou sobre o escoamento.	Requer um modelo	Joshi et al. (1990) Zahradník et al. (1997)
Flutuações de sinal	Global	Analisar as flutuações de um sinal, dependendo fluidodinâmica, é uma maneira relativamente direta de determinar o regime de escoamento em um reator multifásico.	Atenção requerida na interpretação das flutuações: cada técnica de medição tem uma inércia e, portanto, um limite de resolução temporal. Para técnicas de alta frequência a amostragem pode ser um problema não-trivial.	Thimmapuram et al. (1992) Drahoš et al. (1992) Vial et al. (2001) Park e Kim (2003) Al-Masry et al. (2005)
<i>Dynamic gas disengagement technique (DGD)</i>	Global	O princípio básico desta técnica é medir o nível de líquido ou a pressão em diferentes níveis no reator em função do tempo.	Requer um modelo	Camarasa et al. (1999)
Técnicas de rastreamento	Global	São utilizadas com dois objetivos: determinar o <i>holdup</i> do líquido e caracterizar a mistura de uma fase. Rastreamento da fase líquida é a técnica mais comum em coluna de bolhas, realizada a partir da distribuição do tempo de residência (DTR).	Eventualmente sofisticada, requer um modelo e um traçador adequado.	Blet et al. (1999) Pant et al. (2000)
Condutimetria	Global	Se o líquido num reator de gás-líquido ou de gás-líquido-sólido é eletricamente condutor e apresenta uma concentração iônica constante, a condutividade entre dois níveis do reator é uma função crescente da retenção de líquido (<i>holdup</i>).	Somente líquido eletricamente condutor, necessita-se calibrar.	Uribe-Salas et al. (1994) Shen e Finch (1996)

Tabela 2.1 – continuação.

Técnicas de atenuação de radiação (raio-x, raio- γ e feixe de nêutrons)	Global	Ao cruzar uma mistura de duas fases, todos os tipos de radiação são atenuados. Dependendo do tipo de radiação utilizada, a atenuação é função da densidade ao longo do percurso de radiação ou da área interfacial.	Necessidade de fonte de nêutrons, além disso os fatores como segurança e preço são limitantes.	Boyer et al. (2000)
Técnicas ultrassônicas	Global	Técnicas de ultrassom para a medição de características de bolhas são baseadas nas leis de propagação de ondas sonoras em um meio de duas fases.	Líquido em fase contínua e coluna de pequeno diâmetro.	Bouillard et al. (2001)
Técnicas fotográficas e análise de imagem	Local	As técnicas de visualização produzem forma e tamanho da bolha. Eles podem ser classificados em técnicas fotográficas (incluindo, por exemplo, em vídeo), radiográficas, velocimetria de imagens de partículas (PIV) e técnicas baseadas em ressonância magnética nuclear (RMN).	Principalmente na região perto da parede, parede transparente e apenas no regime homogêneo, análise de imagem quantitativa nem sempre está disponível.	Miyahara et al. (1986) Lage e Espósito (1999)
Técnicas radiográficas	Local	Utilizar tipos de radiação mais energéticos para observar formas de bolhas; é uma extensão da técnica fotográfica.	Segurança e escoamentos com baixas velocidades.	Heindel (2000)
Velocimetria por imagem de partículas (PIV)	Local	Uma folha de laser é usada para iluminar uma fatia bem definida do fluido contendo partículas traçadoras; duas ou mais fotos da região investigada são realizadas em intervalos de tempo curtos. As distâncias entre as posições das partículas traçadoras produzem o campo de velocidade instantâneo do líquido.	Escoamentos com baixas velocidades.	Bröder et al. (2000) Delnoij et al. (2000)
Ressonância magnética nuclear (RMN)	Local	Baseia-se na determinação da quantidade de determinados núcleos (<i>voxel</i> por <i>voxel</i>); pulsos de radiofrequência e impulsos de gradiente do campo magnético interage com os spins dos núcleos posicionado num campo magnético estático.	Preço e tamanho do equipamento	Sederman et al. (1997)
<i>Laser Doppler anemometry</i> (LDA)	Local	Partículas traçadoras do tamanho do micron são introduzidas em um meio contínuo a fim de medir as características cinemáticas de escoamento.	Líquido transparente e escoamento com baixa velocidade	Mudde et al. (1997) Joshi (2001) Vial et al. (2001) Olmos et al. (2003)

Tabela 2.1 – continuação.

Técnica polarográfica	Local	A polarografia pode ser usada para medir a tensão de cisalhamento na parede da coluna.	Suporte para eletrólitos necessário, apenas em soluções aquosas.	Magaud et al. (2001)
Rastreamento de partículas radioativas (CARPT)	Local	Raios emitidos pelo traçador de partículas são seguidos por um número de detectores em torno da coluna. Os resultados destas técnicas são as trajetórias das partículas.	Complexa calibração necessária; uso de partículas radioativas.	Cassanello et al. (2001) Nedeltchev et al. (2003)
Técnicas tomográficas: <i>Electrical capacitance tomography</i> (ECT); <i>Electrical resistance tomography</i> (ERT); <i>Computed tomography</i> (CT)	Local	Consiste em medir através da coluna uma propriedade física que pode estar relacionado à fase. As medições são realizadas em diferentes posições angulares e fornecem os valores médios da propriedade ao longo dos diâmetros correspondentes.	Calibração complexa e preço.	Bennett et al. (1999) Shaikh e Al-Dahhan (2005) Vijayan et al. (2007)

2.2.2 Técnicas de análises aplicadas em coluna de bolhas

Diversos estudos têm investigado as transições de regime em colunas de bolhas com diferentes técnicas de análise visando descrever as principais características desse tipo de escoamento. Vários autores propuseram técnicas numéricas dedicadas principalmente à interpretação das flutuações em termos de regimes multifásicos. As possibilidades são diversas e variam desde técnicas clássicas como a análise estatística (por exemplo, Drahoš et al., 1991; Letzel, et al., 1997) ou análise espectral (Bigot et al., 1990; Latifi et al., 1992) até técnicas de análises modernas com uma formulação matemática sofisticada, que incluem a análise fractal (Drahoš et al., 1992; Briens et al., 1997; Maucci et al., 1999; Latifi et al., 1994; Luewisuthichat et al., 1995), análise de caos (Luewisuthichat et al., 1996; Letzel et al., 1997; Johnsson et al., 2000; Lin et al., 2001a,b; Kluytmans et al., 2001; Nedeltchev et al., 2003, 2006, 2007, 2011; Nedeltchev e Shaikh, 2013), teoria da informação (Nedeltchev, 2015; Nedeltchev et al., 2016) e análise de tempo-frequência (Bakshi et al., 1995; Vial et al., 2000).

A seguir, algumas das fontes disponíveis na literatura que abordam diferentes técnicas experimentais e de análise para a identificação de regimes em colunas de bolhas são descritas com mais detalhes. Por exemplo, em Drahoš et al. (1991), Lin et al. (1999) e Gourich et al. (2006), os autores usaram modelagem paramétrica de séries temporais dos dados de pressão em amplitude, além das análises estatísticas e análises no domínio da frequência. Em Drahoš et al. (1992), os autores utilizaram a análise fractal e o expoente de Hurst para identificar os diferentes regimes em coluna de bolhas. Shnip et al. (1992), Ruzicka e Thomas (2003), Thorat e Joshi (2004) e Shaikh e Al-Dahhan (2007) desenvolveram critérios teóricos para identificar U_{trans} . Wilkinson et al. (1992), Ityokumbul (1993), Reilly et al. (1994), Sarrafi et al. (1999) e Vial et al. (2001) propuseram correlações empíricas para a estimação de U_{trans} , além disso, apresentaram uma análise teórica aplicando a função de autocorrelação (ACF) na identificação de regimes. Thimmapuram et al. (1992), Bendjaballah et al. (1999), Camarasa et al. (1999), Shaikh e Al-Dahhan (2005) e Ribeiro e Mewes (2007) utilizaram flutuações de temperatura para a identificação de regimes e investigaram os efeitos da presença de eletrólitos na determinação de U_{trans} . Foram realizadas medições sistemáticas de tamanho da bolha, velocidade, frequência, *holdup*, distribuição de tamanho e forma das bolhas. Em Vial et al. (2000), os autores realizaram uma comparação detalhada entre a maioria dos métodos disponíveis na literatura (análise no tempo, frequência e estado de fase); utilizaram a função de

autocorrelação, expoente de Hurst e a dimensão de correlação para identificação dos limites do regime de escoamento. Modelo de CFD para a previsão de transições de regimes foram empregados por Monahan et al. (2005). Kazakis et al. (2007) e Ribeiro (2008) desenvolveram novas correlações para predição de U_{trans} . Em Simonnet et al. (2008), os autores realizaram estudos numéricos sobre transições de regime de escoamento em colunas de bolhas. Demonstraram que considerando as interações entre as bolhas (por meio de uma correlação de arrasto modificada) e a partir da evolução do tamanho da bolha é possível obter uma melhor descrição das transições do regime. Shaikh e Al-Dahhan (2013) utilizaram uma técnica avançada de medição, a densitometria nuclear (NGD), na identificação de transição de regimes com análises estatísticas, autocorrelação e espectral. Besbes et al. (2015) propuseram um modelo computacional tridimensional com base em uma abordagem de Euler-Lagrange (E-L) para simular as características dinâmicas das bolhas, além disso, os resultados foram comparados com medições PIV. Em um estudo recente, Singh et al. (2017) investigaram a dinâmica de uma coluna de bolhas utilizando a Tomografia de Resistência Elétrica (ERT) resolvida no tempo com a análise espectral. Uma revisão completa das principais técnicas de análise aplicadas em colunas de bolhas pode ser encontrada em Vial et al. (2000). É importante destacar que, segundo Nedeltchev e Shaikh (2013), apesar das tentativas para quantificar as transições de regime com diferentes abordagens/técnicas, critérios completamente estabelecidos ainda não estão disponíveis. Os autores ainda ressaltam que modelos de fluidodinâmica computacional (CFD) ainda são incapazes de prever as U_{trans} adequadamente.

2.3 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA (PIV)

2.3.1 Aplicações PIV em sistemas gás-líquido

A Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) é uma ferramenta não invasiva, quantitativa, de visualização de escoamentos utilizada para medir velocidades de fluidos em uma ampla gama de escalas de frequência e tempo. O termo PIV é utilizado para abranger a extensa família de métodos que se baseiam na avaliação de padrões do deslocamento de grupos de imagens de partículas utilizando algoritmos de processamento a partir de pares de imagens consecutivas. As técnicas PIV difundiram-se amplamente e as aplicações são conduzidas em vários tipos de escoamentos complexos, embora cada técnica possa ser diferente em muitos campos de investigação fundamentais, pode-se encontrar sua aplicação, por exemplo, na engenharia aeroespacial, ciências médicas e em diversos tipos de escoamentos em equipamentos industriais (Raffel et al., 2007; Schröder e Willert, 2008).

Em sistemas gás-líquido, a técnica PIV pode ser utilizada para obtenção da velocidade das duas fases bem como as estruturas (pares de vórtices, esteiras etc.) de escoamentos (Figura 2.16).

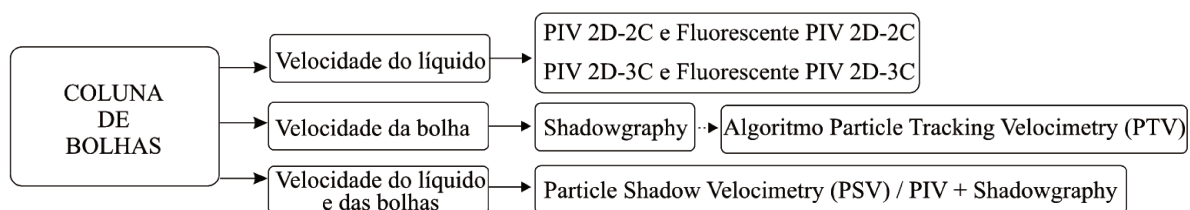


Figura 2. 16 - Técnicas de medidas não-intrusivas usadas para obtenção de campos de velocidade em uma coluna de bolhas.

Contudo, a opacidade da maioria dos sistemas multifásicos ocasiona um aumento do ruído nas imagens e, conseqüentemente, limita a aplicação da PIV ao estudo de sistemas gás-líquido em condições de baixa concentração de bolhas. Para sistemas gás-líquido, as medidas PIV são difíceis por conta da presença das bolhas que não permitem a penetração da luz *laser* ou a saída da luz espalhada pelas partículas traçadoras e por conta das regiões de interface das fases. Em relação ao espalhamento das partículas traçadoras, esse efeito pode danificar a câmera com o aumento da temperatura no sensor. Uma solução para esse problema é o uso da *Fluorescent PIV* que utiliza partículas traçadoras fluorescente – absorve a luz verde do *laser* ($\lambda = 530$ nm) e emite laranja ($\lambda = 640$ nm) – no escoamento combinado com um filtro passa-alta na câmera permitindo apenas gravar a luz emitida pelo traçador.

Outras técnicas, apresentadas na Figura 2.16, como o *Shadowgraphy* permitem que a velocidade da bolha seja determinada. Essa técnica registra as sombras das bolhas a partir do espalhamento da luz *laser* por meio de um difusor como iluminação de fundo e, em seguida, é aplicado um algoritmo semelhante ao utilizado em PTV (*Particle Tracking Velocimetry*). O Algoritmo PTV determina o deslocamento de uma única imagem e não de um grupo de imagens como em PIV. Por outro lado, técnicas como *Particle Shadow Velocimetry* (PSV) permitem obter os campos de velocidade de ambas as fases. A PSV é uma extensão da PIV com o uso da luz LED, geralmente pulsada como iluminação de fundo, com finalidade de aumentar o contraste da imagem bolha – líquido.

Além dos trabalhos realizados por Chen et al. (1994) e Lin et al. (1996) já mencionados na seção 2.1.1, vários outros experimentos foram realizados para caracterizar a dinâmica de escoamentos de gás-líquido usando a técnica PIV em colunas de bolhas. Mudde et al. (1997) utilizaram a técnica PIV para investigar a fluidodinâmica de uma coluna de bolhas de seção transversal quadrada (conhecidos como coluna de bolhas 2-D) operando em vários regimes de escoamentos. Os perfis de velocidade média e de tensão de Reynolds foram obtidos e discutidos em relação às estruturas de grande escala presentes no escoamento. Deen et al. (2000) realizaram uma comparação das medidas advindas das técnicas PIV e LDA em uma coluna de bolhas de seção transversal circular (conhecidos como coluna de bolhas 3-D). O objetivo do trabalho foi proporcionar resultados de medição que podem ser utilizados para validar simulações de sistemas multifásico por meio de CFD. Liu e Zheng (2006) avaliaram o comportamento de bolha com a variação da viscosidade do líquido em uma coluna de bolhas 2-D utilizando a técnica PIV. Os autores concluíram que a trajetória e a forma da bolha têm uma maior relação com a viscosidade do líquido do que com a frequência de formação das bolhas. Juliá et al. (2007) obtiveram os campos de velocidade por PIV em uma coluna de bolhas 2-D com o intuito de analisar a influência da velocidade superficial do gás, altura do líquido e do tipo de distribuidor sob as estruturas de escoamento. Seo e Socolofsky (2008) propuseram um algoritmo de separação de fases utilizando técnicas de pós-processamento para avaliar campos de velocidade em uma pluma de bolhas. Sathe et al. (2013) realizaram um estudo de caracterização da turbulência em uma coluna de bolhas 2-D por meio da técnica PIV. Os dados experimentais foram analisados a partir de funções de estruturas e espectro de energia visando a compreensão da natureza do escoamento turbulento. Besbes et al. (2015), validaram a abordagem de Euler-Lagrange para a caracterização da fluidodinâmica do escoamento de coluna de bolhas 2-D a partir das medições PIV. Outras aplicações da técnica PIV, como por

exemplo, na investigação da turbulência em escoamentos borbulhantes podem ser encontrados em Gui et al. (1997), Hassan et al. (1998), Delnoij et al. (1999), Khalitov e Longmire (2002), Kim et al. (2010) e Pang e Wei (2013). Em sistemas multifásico, Chen e Fan (1992) e Lindken et al. (1999) empregaram a técnica PIV para o estudo das estruturas de escoamentos e distribuição de velocidade das fases individuais. Outras técnicas de diagnóstico óptico, tais como LIF (fluorescência induzida por *laser*) e PLV (velocimetria de luz pulsada), foram utilizadas por Bröder e Sommerfeld (2002) no estudo da hidrodinâmica de uma coluna de bolhas. O emprego da técnica *Shadowgraphy* em coluna de bolhas pode ser encontrado, por exemplo, nos trabalhos realizados por Bröder e Sommerfeld (2003), Fujiwara et al. (2004) e Sathe et al. (2010).

2.3.2 PIV (2D-2C) e PIV (2D-3C)

De uma forma mais detalhada, a técnica PIV ou PIV 2D-2C (duas dimensões – duas componentes) permite visualizar o movimento do fluido por meio da adição de pequenas partículas traçadoras em dois momentos no tempo t e $t + \Delta t$ (Figura 2.17).

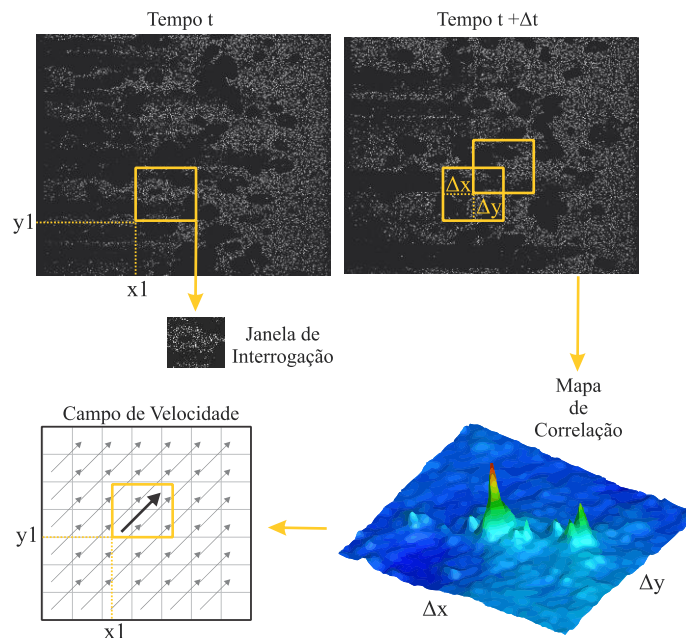


Figura 2. 17 - Ilustração da técnica PIV (Adaptado de Boutelier, 2016).

Um plano no interior do fluido é iluminado usando uma folha de *laser* pulsada e a luz dispersa pelas partículas é registrada em duas imagens sucessivas. Cada imagem é, então, dividida em áreas pequenas (conhecidas como janela de interrogação) e o vetor de deslocamento entre as duas imagens é determinado para cada janela de interrogação utilizando, por exemplo, o algoritmo de correlação PIV. Esse algoritmo calcula o deslocamento mais

provável das partículas dentro de uma região de interrogação. Dado o intervalo de tempo entre as duas imagens (Δt) e o dimensionamento da imagem, o vetor de velocidade do escoamento local (isto é, em unidades reais) pode ser deduzido (Adrian, 1991; Boutelier, 2016). As etapas do processo de obtenção dos campos de velocidade para o PIV 2D-2C (Figura 2.17) podem ser estendidas para a técnica *Stereo-PIV* (2D-3C). O princípio de funcionamento em detalhes, com a presença de partículas traçadoras fluorescentes e, portanto, se tornando F-PIV 2D-2C (câmera A) e F-PIV 2D-3C (câmera B e C) é ilustrado esquematicamente na Figura 2.18.

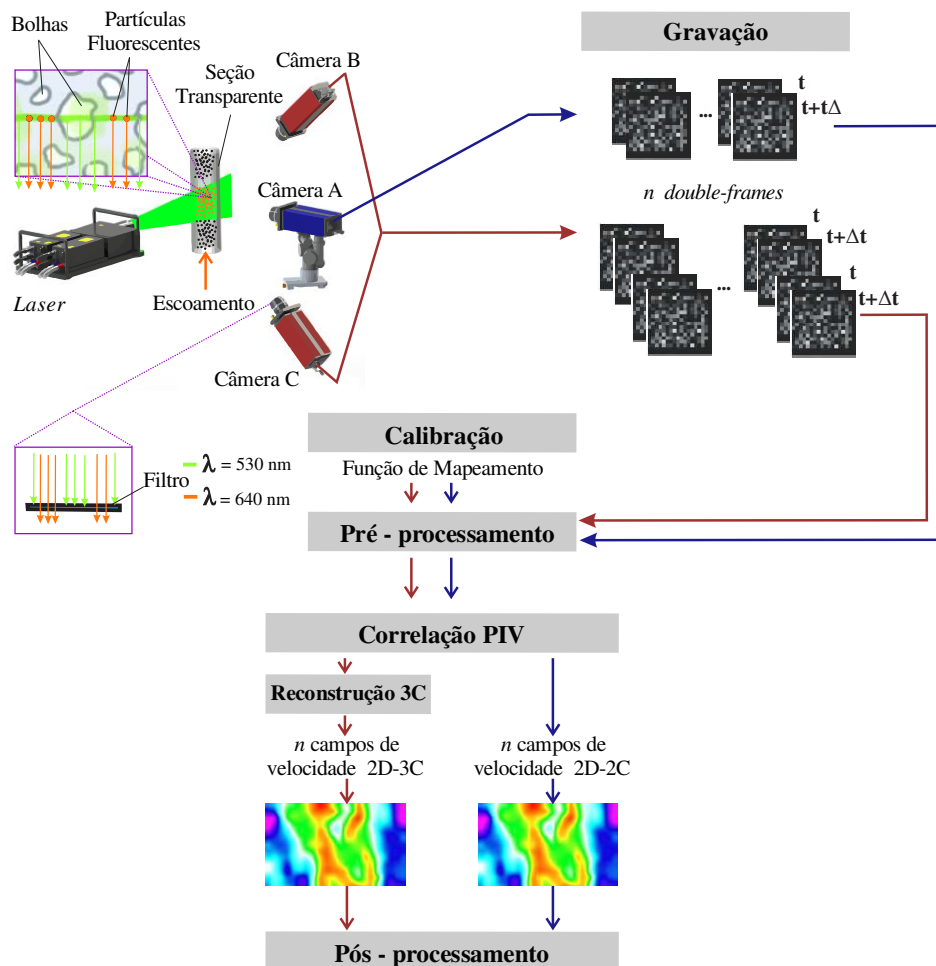


Figura 2. 18 - Princípio de funcionamento do F-PIV 2D-2C e 2D-3C.

A técnica *Stereo-PIV* aplica duas câmeras com diferentes projeções para gravar simultaneamente a mesma região de interesse determinando um campo vetorial 2D-3C (duas dimensões – três componentes). A combinação do deslocamento aparente da imagem de partícula das duas projeções fornece informação necessária para a reconstrução do terceiro componente de velocidade (componente do movimento para fora-do-plano de luz) (Adrian e Westerweel, 2011). O *Stereo-PIV* não é uma técnica 3D como, por exemplo, o *Tomographic-PIV* (3D-3C).

O desempenho da técnica PIV é determinado pela qualidade das imagens gravadas e pelo tratamento dos dados obtidos após a aquisição (Raffel et al., 2007). De acordo com Deen et al. (2010), o processamento das imagens será relativamente simples se a qualidade das imagens originais for adequada, isto é, iluminação homogênea, bom nível de contraste, baixo ruído de fundo, poucos objetos estacionários, deslocamento de partículas de um traçador adequado etc. Na prática, no entanto, estas condições nem sempre podem ser conseguidas. A intensidade do *laser* pode variar na imagem ou entre os pares de imagens devido à diferença de energia nos pulsos dos dois *lasers* (no caso de um sistema *laser* YAG de duplo pulso), à presença das bolhas que podem introduzir reflexos fortes de luz e/ou à reflexão causada pela distorção das paredes da coluna. Várias abordagens estão disponíveis na literatura para diminuir esses problemas (Westerweel, 1993; Lindken e Merzkirch 2002; Honkanen e Nobach, 2005; Seol e Socolofsky, 2008; Theunissen et al., 2008).

2.3.3 Calibração

Nesse contexto, é necessário considerar e otimizar todos os fatores de cada etapa do processo (Figura 2.18) para obter uma boa representação da dinâmica em estudo. O primeiro passo consiste na calibração (Figura 2.19). A etapa de calibração serve para estabelecer uma relação entre o deslocamento, em *pixels* entre as imagens correlacionadas no plano de imagem, e a taxa de deslocamento real em dimensões físicas, isto é, atribuir um fator de escala. Além disso, esse procedimento tem como objetivo corrigir as distorções (*non-linear barrel* e/ou *cushioning distortion*) das imagens e erros de perspectiva, caso a vista seja oblíqua, antes da etapa de correlação PIV. De acordo Adrian e Westerweel (2011), o principal procedimento que pode ser empregado para remover essas distorções consiste em transformar as imagens a partir de funções lineares ou polinomiais de tal modo que os pontos de controle de uma única imagem de calibração estejam alinhados com as posições relativas e conhecidas destes pontos no mundo físico, isto é, de um padrão geométrico conhecido (Figura 2.19b e 2.19c). Essas funções são conhecidas como funções de mapeamento e são utilizadas antes da correlação PIV para compensar a deformação de imagem (*dewarping*). Outro ponto consiste no formato cilíndrico da coluna de bolhas, a curvatura da coluna pode ocasionar distorções que podem ser corrigidas com o uso de uma caixa externa à coluna (Figura 2.19a) preenchida com a mesma fase líquida analisada. Isso diminui o efeito dos diferentes índices de refração.

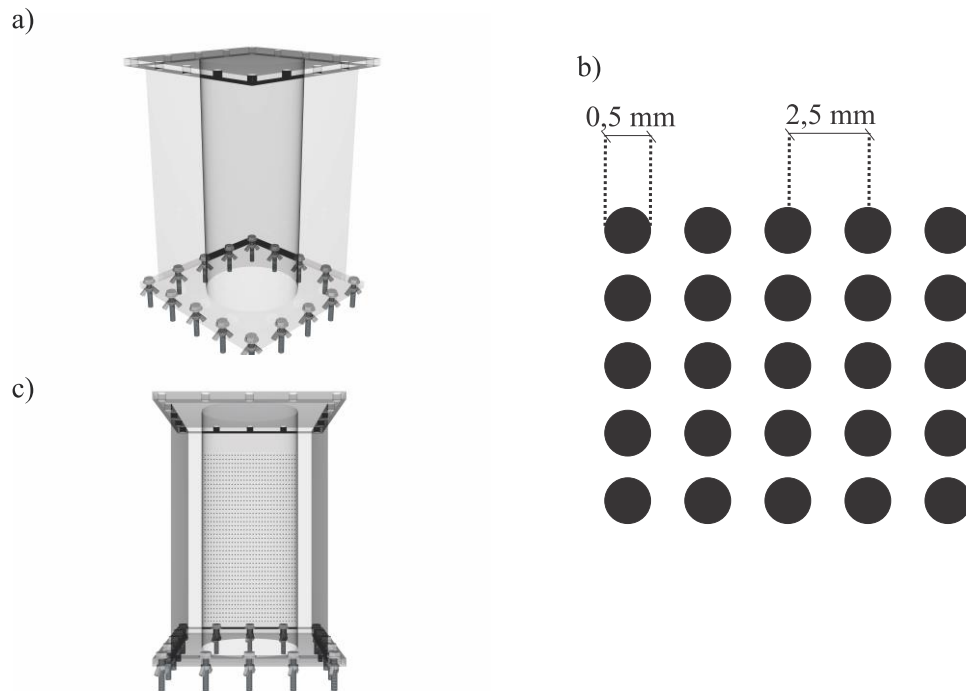


Figura 2. 19 - (a) Caixa de acrílico externa à coluna de bolhas, (b) pontos da placa de calibração e (c) placa de calibração inserida na caixa de acrílico.

2.3.4 Pré-processamento

Na etapa do pré-processamento PIV (Figura 2.18), o objetivo é aumentar significativamente o sinal de correlação (detectabilidade do pico de deslocamento) e produzir campos vetoriais de maior qualidade a partir da melhoria de contraste, correção de brilho e remoção de ruído, seja por algoritmos ou por uso de hardware. As imagens precisam ter um padrão com um contraste suficiente entre as imagens de partículas e a iluminação de fundo, de tal modo que cada janela de interrogação possua uma distribuição homogênea de intensidades. Para esse objetivo, o uso de filtros temporais e espaciais pode ser aplicado, pois permite um ajuste da distribuição de intensidades (normalização das intensidades) e/ou subtração da iluminação de fundo. Em escoamentos multifásicos, a fase com índice de refração diferente, por exemplo, as bolhas, contribui diretamente no espalhamento de luz e, conseqüentemente, na iluminação de fundo. Nesse caso, as bolhas são interpretadas como janelas ópticas móveis, comprometendo o desempenho dos filtros espaciais. Além do espalhamento de luz causado pelas bolhas, a parede da coluna (janela óptica fixa) também contribui na iluminação de fundo, porém a sua remoção é mais fácil (Raffel et al., 2007). Uma forma de separar opticamente as fases gás-líquido nas imagens em coluna de bolhas é o emprego de partículas traçadoras fluorescentes e um filtro óptico passa-alta (filtro de cor). Em adição a isso, filtros digitais como

Gaussiano, RMS (*Root Mean Square*) e SSM (*Substract Sliding Minimum*), por exemplo, podem ser aplicados para aumentar o contraste e/ou subtrair a iluminação de fundo. A distribuição de intensidade de uma única imagem de partícula original e pré-processada pelo filtro (3×3 pixels) Gaussiano, RMS e SSM é apresentada na Figura 2.20. Na Figura 2.21, é apresentada uma comparação da distribuição de intensidade da imagem da partícula original e pré-processada pelos filtros da Figura 2.20.

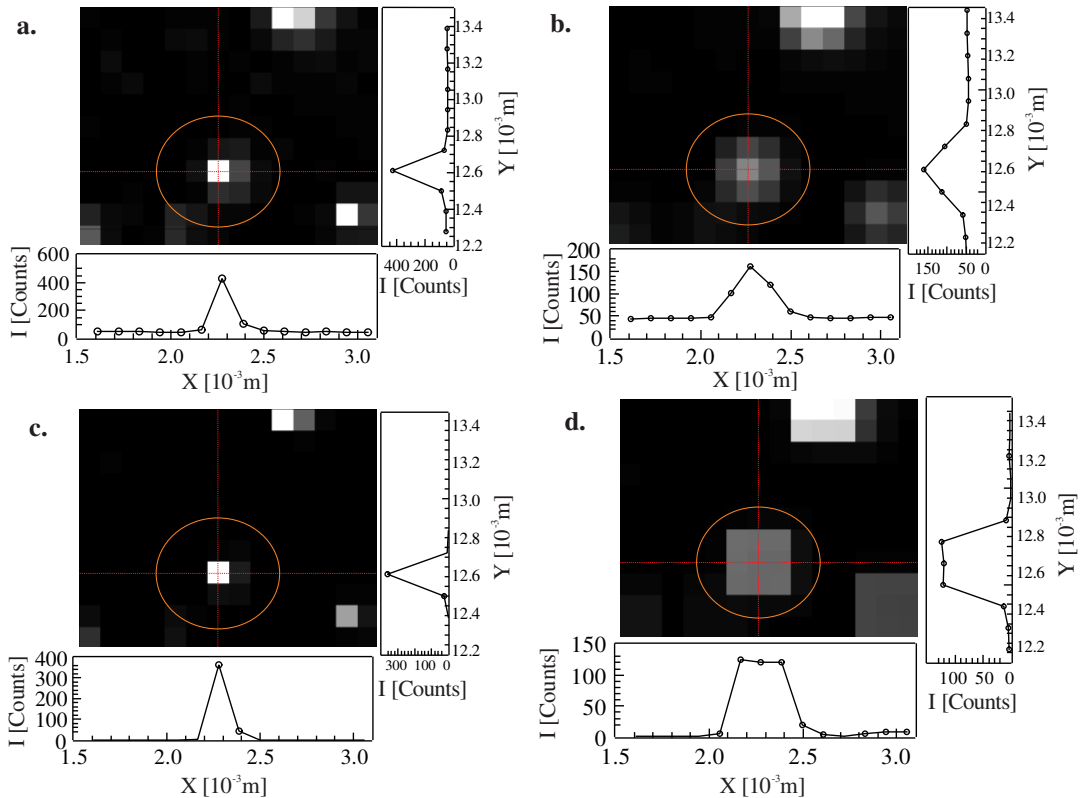


Figura 2. 20 - Distribuição de intensidade de uma única imagem de partícula (a) original e pré-processada por um filtro (b) Gaussiano 3×3 pixels, (c) SSM 3×3 pixels e (d) RMS 3×3 pixels.

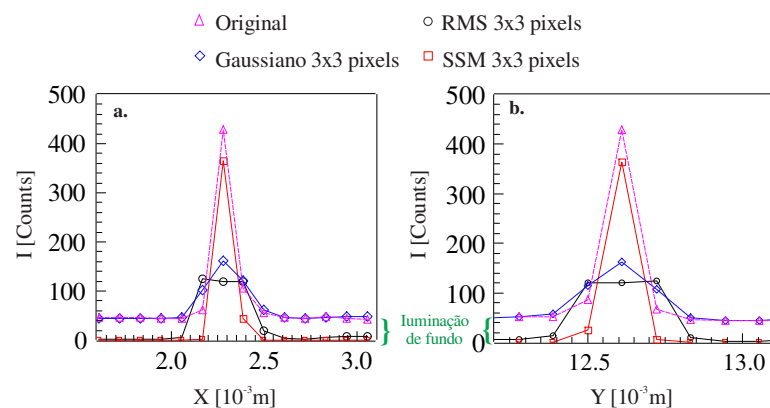


Figura 2. 21 - Comparação da distribuição de intensidade de uma única imagem de partícula original e pré-processada pelos filtros da Figura 2.20 (a) eixo X e (b) eixo Y.

Frequentemente, o filtro Gaussiano (ou filtro passa-baixa) é utilizado para a suavização do formato da imagem de partícula, porém o uso desse filtro não permite a remoção com eficiência da iluminação de fundo (Figuras 2.20b e 2.21). Por outro lado, o emprego do filtro SSM, apesar de remover a iluminação de fundo, pode resultar em uma elevada diferença de intensidade entre a população de imagem de partículas (Figuras 2.20c e 2.21). Esse fato pode comprometer a homogeneidade da distribuição de intensidade e ocasionar erros de correlação, que pode ser previamente corrigido estabelecendo um limite de intensidade (Shavit et al., 2007). Para o filtro RMS, esse tem como principal característica, além também da remoção da iluminação de fundo, alterar a forma do pico de intensidade resultando em um pico mais “achatado” (Figuras 2.20d e 2.21). Contudo, se as imagens de partícula (no tempo t e $t + \Delta t$) correspondentes forem igualmente deformadas, a correlação apresentará baixos erros (Raffel et al., 2007).

Outra característica importante no pré-processamento de imagem é o tamanho do filtro ou *Kernel*. Para separação das fases gás-líquido, especificamente, é recomendado a aplicação de filtros com o tamanho maior que o da imagem de partícula. Caso contrário, a utilização de um filtro do mesmo tamanho da imagem de partícula terá seu efeito apenas no realce do contraste (Kiger e Pan, 2000; Khalitov e Longmire, 2002; Honkanen e Nobach, 2005). Definido o tamanho adequado do filtro, uma combinação entre eles também é indicada para solucionar problemas de variação temporal e espacial na distribuição de intensidade. Com o intuito de garantir uma maior qualidade na etapa de correlação, autores como Theunissen et al. (2008) e Deen et al. (2010), propuseram uma alternativa para a separação das fases que reside na combinação da normalização do contraste das imagens (para superar problemas com iluminação irregular) seguido pela subtração da iluminação de fundo utilizando, por exemplo, o filtro SSM (para remover objetos fixos) e mascaramento de imagem (para remover as bolhas em escoamentos bifásicos).

Evidente que a investigação do escoamento em colunas de bolhas com separação das fases pode ser obtida com o uso da técnica *shadowgraphy* (Figura 2.16) para sistemas com baixo *hold up* (baixo U_G), que requer uma câmera adicional e um alinhamento preciso das imagens das duas câmeras. Contudo, esta abordagem pode ser substituída apenas com a realização de um esquema de pré-processamento adequado.

Recentemente técnicas mais avançadas de processamento de imagens como a técnica DIA (*Digital Image Analysis*), por exemplo, pode ser aplicada para a separação de fases bem como permitir uma estimativa mais robusta para determinar o tamanho das bolhas em condições de

baixo U_G . Nesse caso, a técnica DIA pode fazer a distinção das bolhas mesmo com a presença, por exemplo, de fenômenos como a coalescência (a técnica *shadowgraphy* para estimativa do tamanho bolhas falha nesse cenário). Baseado no trabalho de Meyer (1994), Liu et al. (2013a, 2013b) propuseram o uso da transformada de *Watershed* (método das Linhas Divisoras de Água devido à analogia com o preenchimento/inundação de uma bacia hidrográfica) para segmentar/separar bolhas sobrepostas em objetos de bolhas individuais. Nesse algoritmo, as propriedades da bolha que podem ser obtidas a partir de uma imagem são a área projetada e a forma. Em seguida, a partir destas propriedades, podem ser calculados o centroide e o diâmetro equivalente para cada bolha (Liu et al., 2013a). O algoritmo de análise de imagem consiste em quatro operações subsequentes principais (Figura 2.22): (a) filtragem de imagem, (b) separação das imagens das bolhas individuais das bolhas sobrepostas, (c) aplicação da técnica do *Watershed* para segmentar imagens das bolhas sobrepostas e combinação das imagens das bolhas individuais e sobrepostas.

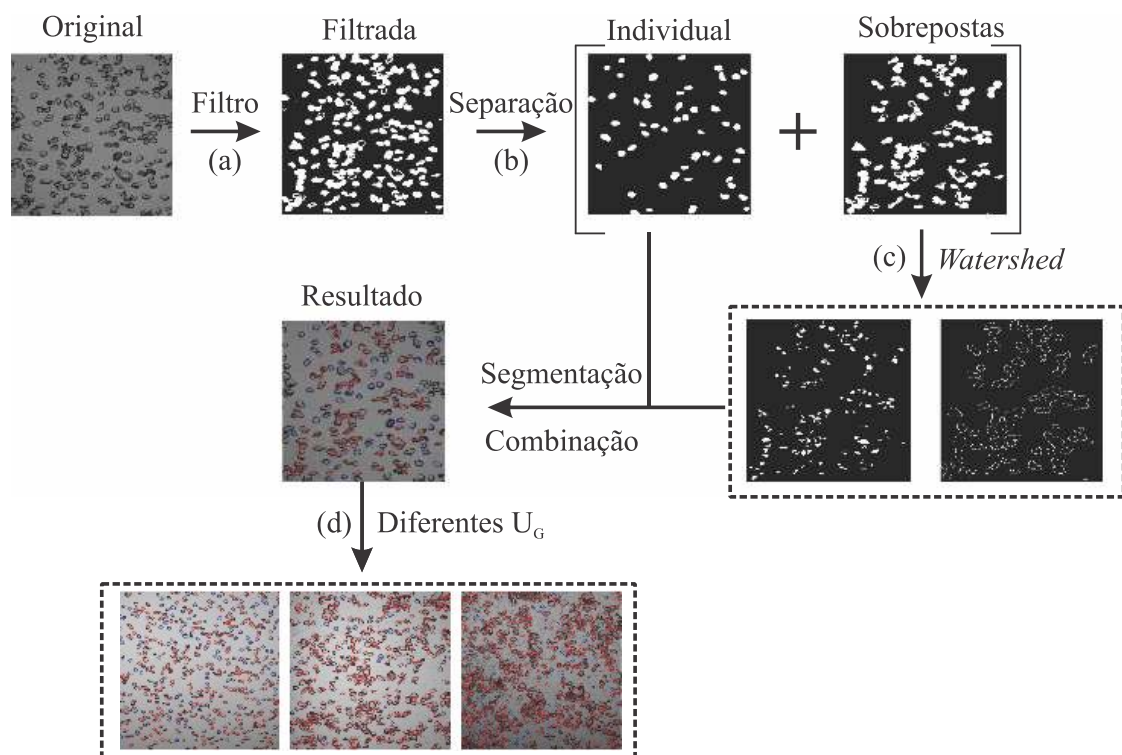


Figura 2. 22 - Sequências de processamento de imagem para determinar a distribuição do tamanho da bolha (a - c) e (d) exemplo de imagens de bolhas detectadas para várias velocidades superficiais de gás (0,5 – 2,5 cm/s) (adaptado de Liu et al., 2013a).

A Figura 2.23 apresenta em detalhes o algoritmo de segmentação de *Watershed*. Segundo Liu et al. (2013a), o objetivo de segmentar a imagem das bolhas sobrepostas é encontrar suas linhas divisórias. No primeiro passo, a escala de cinza (intensidade) da imagem original (Figura

2.23a) é invertida. O fundo e bolhas individuais são mascaradas por um processo de binarização para determinar as características das imagens (suas bordas) e para extração de possíveis ruídos (Figura 2.23b). Em seguida, a partir da diferença dos níveis de cinza que compõe os diferentes objetos da imagem – limiarização, algoritmo proposto por Otsu (1979) – mantêm-se apenas as áreas internas das bolhas (Figura 2.23c). O valor de limiar é escolhido entre a intensidade da interface externa da bolha e a área interna da bolha. Essas áreas funcionam como os mínimos locais no processo de segmentação. As bordas da área da bolha (Figura 2.23d) são os limites externos. Esses limites são gerados pela magnitude do gradiente da imagem binária sobreposta (Figura 2.22b). Por fim, a segmentação segue conforme ilustrado na Figura 2.23e (Liu et al., 2013a). Em Kim et al., (2016), o método descrito nas Figuras 2.22 e 2.23 foi aplicado para determinar o formato e a posição de cada bolha na análise dos campos de velocidade (Figuras 2.6 e 2.7).

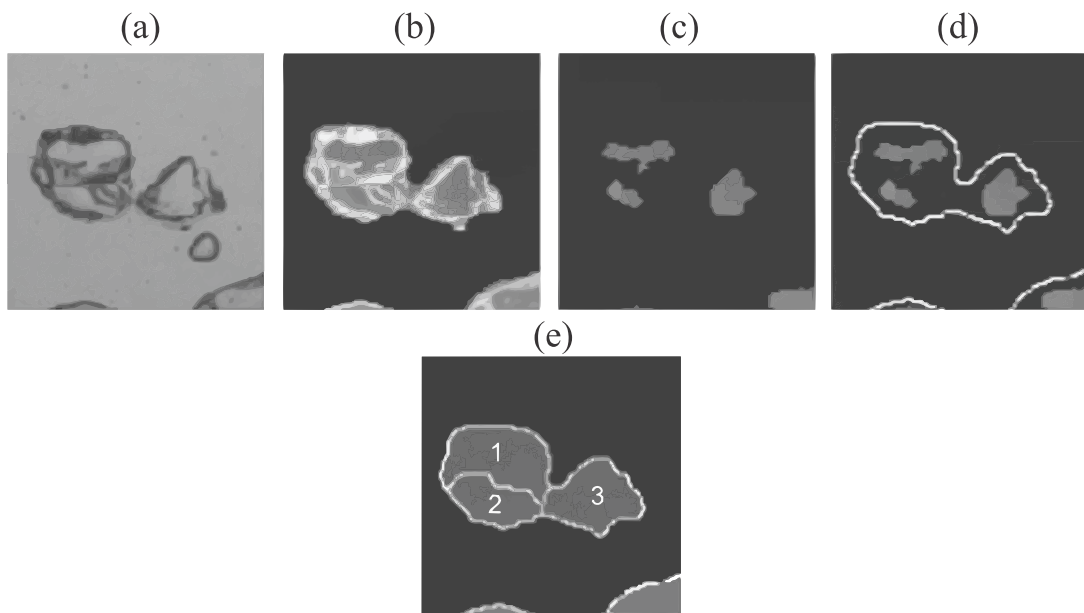


Figura 2. 23 - Algoritmo de segmentação de Watershed: (a) uma imagem parcial com um grupo de três bolhas, (b) escala de cinza (intensidade) da imagem invertida com imagem individual da bolha individuais mascarada, (c) imagem após o processo de limiarização para adquirir os limites do grupo das bolhas com os mínimos locais, (d) imagem com mínimos locais e a borda do grupo de bolhas, (e) a imagem preenchida com três bolhas distintas (adaptado de Liu et al., 2013a).

No entanto, segundo Liu et al. (2013a), o método possui algumas limitações, como por exemplo, susceptível a erros devido à iluminação não homogênea (diferenças de intensidades entre as imagens), erros de filtragem ocasionados pela escolha inadequada dos parâmetros para

atenuar a iluminação de fundo, erros de separação resultantes das bolhas não esféricas (uma bolha não esférica pode ser interpretada como um aglomerado de bolhas ou um conjunto de bolhas não esféricas pode ser interpretado como uma bolha individual), erros de segmentação devido à sobreposição ou agrupamento das bolhas (pode ser avaliado pelo algoritmo como uma bolha grande) e erros computacionais no cálculo da área da bolha resultante da amostragem de imagens inadequada.

2.3.5 Correlações PIV

Após as etapas de pré-processamento, o vetor de deslocamento, obtido a partir de um algoritmo de correlação PIV (Figura 2.18), é resultante do movimento médio de pequenos grupos de partículas contidas dentro das janelas de interrogação. Frequentemente, o algoritmo *Standard Cross Correlation* (SCC) é o método mais empregado para estimar o vetor deslocamento em PIV a partir da correlação cruzada entre as imagens no domínio da frequência. Um diagrama de fluxo que descreve o método de cálculo por SCC é apresentado na Figura 2.24.

Em seguida a aquisição dos pares de imagens, as distribuições locais de intensidade de luz, contidas nas janelas de interrogação, são então convertidas para o domínio espectral para processar o algoritmo da correlação cruzada por convolução (pares de imagens) a partir da transformada rápida de Fourier (FFT). Multiplicando as partes real e imaginária da primeira imagem I_1 com as partes real e imaginária da segunda imagem I_2 são produzidas as partes real e imaginária do mapa de correlação no domínio de frequência. A FFT inversa completa a operação e produz o mapa de correlação C (Eq. 2.1), no domínio espacial, em que o valor de cada *pixel* (N) é a medida de quão bem as duas imagens correspondem quando deslocadas (Smith, 1999).

A correlação de uma imagem com ela própria origina assim um pico na origem, enquanto a correlação de duas imagens idênticas, porém deslocadas, produz um pico localizado no vetor de deslocamento:

$$C(x, y) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F}[I_1(x, y)] \cdot \mathfrak{F}[I_2(x, y)]^* \right\} \quad (2.1)$$

em que \mathfrak{F} é o operador FFT de I_1 e I_2 com $*$ denotando o seu complexo conjugado. Para reforçar o cálculo do vetor de deslocamento, apenas os picos com uma relação sinal-ruído superior a um valor crítico são mantidos. Segundo Xue et al. (2014), valores numéricos para o coeficiente de correlação de 0,5 e um SNR de 2,0 são ideais para evitar erros nos campos vetoriais.

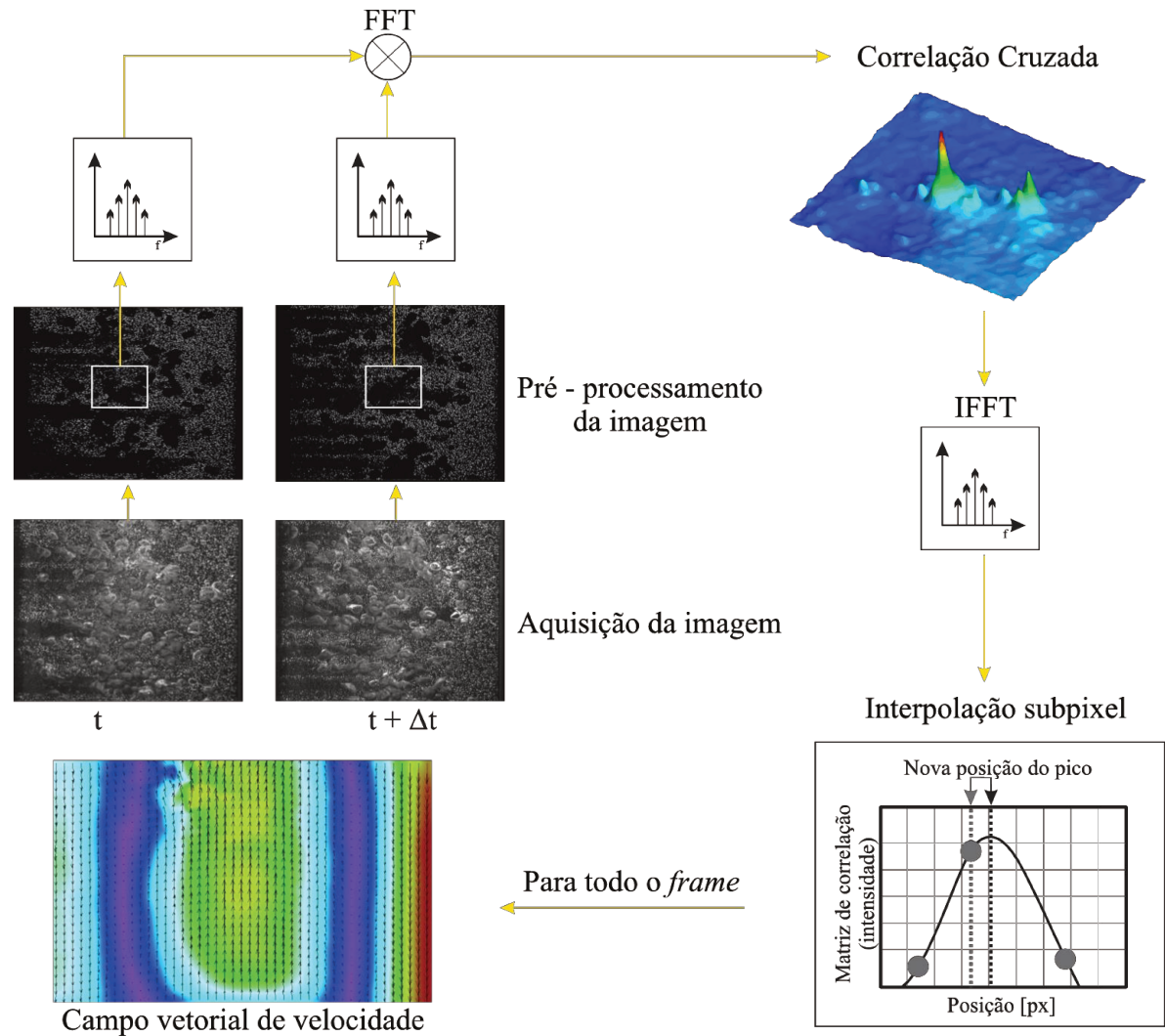


Figura 2. 24 - Diagrama de fluxo do algoritmo SCC (Adaptado de Eckstein et al., 2008 e Thielicke e Stamhuis, 2014).

A relação sinal-ruído é definido como:

$$\text{SNR} = \frac{\max(C) - \bar{C}}{\sigma(C)} \quad (2.2)$$

com

$$\sigma(C) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2} \quad (2.3)$$

Para aumentar a precisão deste método, o pico da função ajustada é utilizado para determinar o deslocamento de partículas com precisão *sub-pixel*. O procedimento padrão é ajustar uma função Gaussiana à distribuição de intensidade inteira. É suficiente usar apenas os

pixels verticais e horizontais diretamente adjacentes e avaliar os eixos x e y separadamente. Se o deslocamento de imagens de partículas dentro de uma janela de interrogação é exposto ao cisalhamento, rotação e/ou se as imagens sofrem de desfocagem excessiva de movimento, o pico de deslocamento pode ter uma forma elíptica (Raffel et al., 2007). Neste caso, uma função gaussiana bidimensional (ajuste de 9 pontos) tem um desempenho melhor (Nobach e Honkanen, 2005).

Outro algoritmo frequentemente utilizado em sistemas gás-líquido é o *Ensemble Correlation* (EC). Delnoij et al. (2000), propuseram uma alternativa para a separação das fases por processamento de imagem ou por separação óptica sob forma de algoritmo. O método baseia-se no fato de que as bolhas sobem mais rápido do que o líquido circundante por um determinado valor, que corresponde à velocidade de deslizamento entre as duas fases. Assim, quando as funções de correlação cruzada de várias imagens são montadas em conjunto, dois picos de correlação são observados (Figura 2.25). Desde que as características do escoamento não se alterem em curtas escalas de tempo, os picos de deslocamento estarão na mesma posição e, portanto, irão somar-se. Os picos ruidosos (aleatórios) geralmente não coincidem e, por conseguinte, o efeito da adição dos planos de correlação aumentará a visibilidade do deslocamento do pico de correlação, permitindo sua detecção de maneira mais eficiente. No caso de escoamentos monofásicos, apenas um pico de correlação seria observado. A eficácia deste método foi demonstrada por Meinhart et al. (2000), que examinou a precisão de três métodos diferentes (método da velocidade média, método da imagem média e método da correlação média ou EC). Os autores concluíram que os campos médios de velocidade obtidos utilizando o método de cálculo do algoritmo EC foram superiores aos campos médios de velocidade em relação aos outros dois métodos.

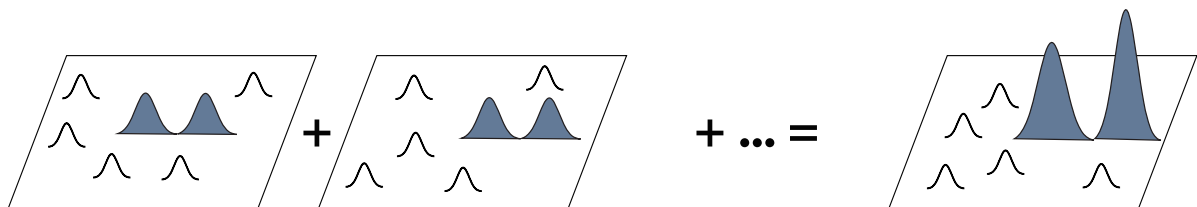


Figura 2. 25 - Princípio do Ensemble Correlation para um escoamento de duas fases.

(Adaptado de Deen et al., 2002).

2.3.6. Pós-processamento PIV

Definido o algoritmo de correlação mais adequado, a última etapa da análise PIV, apresentada na Figura 2.18, consiste no emprego de técnicas de pós-processamento. Medições

PIV são quase sempre sujeitas, por exemplo, a ruído de fundo Gaussiano, *outliers* (erros maiores que 1 *pixel*) e possíveis dados (ou vetores) faltantes. Para ilustrar, a Figura 2.26 apresenta um campo de velocidade contendo *outliers*. Em geral, um *outlier* em dados PIV pode ser considerado como um falso vetor (ou vetor espúrio) dentro de um campo de velocidade por não apresentar uma coerência temporal e/ou espacial com a sua vizinhança. A combinação desses fatores ocasiona inconsistências que podem não só alterar a visualização da distribuição de velocidade e linhas de corrente, mas também afetam diretamente as quantidades derivativas do escoamento baseado na diferenciação, tais como tensão, vorticidade e identificação de vórtice. Sob essas circunstâncias, algoritmos de pós-processamento são necessários antes de qualquer análise das informações oferecidas pela técnica PIV (Westerweel, 1994; Raffel et al., 2007; Garcia 2011).

O pós-processamento de dados PIV geralmente consiste em três passos consecutivos: i) a validação dos dados, isto é, detecção dos valores anômalos, ii) substituição dos valores incorretos e/ou em falta e iii) suavização dos dados.

A etapa de identificação dos falsos vetores, é o processo mais crítico e tem sido objeto de vários trabalhos (Hart 2000; Liang et al., 2003; Shinneeb et al., 2004; Westerweel e Scarano, 2005; Pun et al., 2007; Liu et al., 2008; Garcia, 2011; Masullo e Theunissen, 2016). Segundo Westerweel (1994), um campo PIV 2D pode ser expresso por:

$$\vec{V}'_{i,j} = \gamma_{i,j} \cdot (\vec{V}^0_{i,j} + \vec{\varepsilon}_{i,j}) + (1 - \gamma_{i,j}) \cdot \vec{U}_{i,j} \quad (2.4)$$

em que i e j são posições no campo de velocidade PIV, γ é uma variável binária aleatória discreta (assumindo o valor 0 ou 1), $\vec{V}^0_{i,j}$ é o campo de velocidade real ou a ser procurado, $\vec{\varepsilon}$ são os erros de medição (para regiões de interrogação sem sobreposição) e $\vec{U}_{i,j}$ são os falsos vetores. Definindo o deslocamento residual $r_{i,j}$ (Eq. 2.5) como sendo o desvio do deslocamento observado, a identificação dos falsos vetores baseia-se em um teste estatístico dos resíduos relativo à média e à variância. Para o sinal PIV, isso implica que para cada posição (i, j) é testada uma hipótese nula $H_0 : \gamma_{i,j} = 1$ e uma hipótese alternativa $H_1 : \gamma_{i,j} = 0$.

$$r_{i,j}^2 = \|\vec{V}'_{i,j} - \vec{V}^0_{i,j}\|^2 \quad (2.5)$$

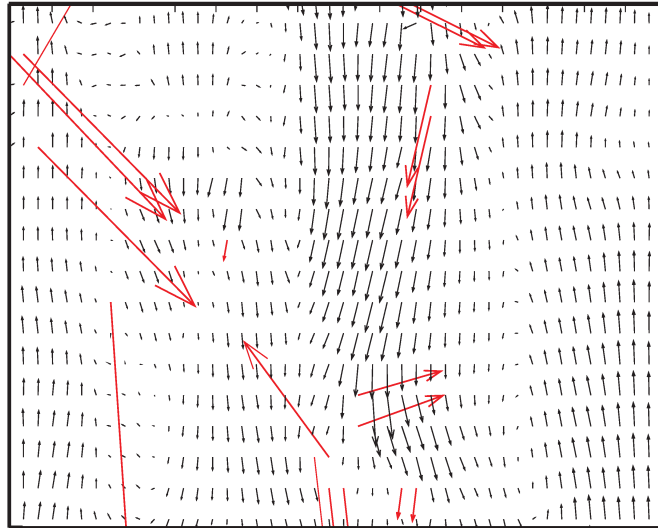


Figura 2. 26 - Exemplo arbitrário de um resultado de medição PIV contendo falsos vetores de deslocamento.

Para $H_0 : \gamma_{i,j} = 1$, o vetor $\vec{r}_{i,j} = \vec{\varepsilon}_{i,j}$, isto é, são campos aleatórios (ruído Gaussiano) e, portanto, é considerado como um campo válido ou sem falsos vetores – considera-se que $\vec{\varepsilon}_{i,j}$ nas janelas de interrogação são independentes e são estatisticamente ortogonais entre si (i, j) e que um falso vetor decorre de um evento puramente aleatório que não está correlacionado com o campo $\vec{V}_{i,j}^0$. Caso contrário, para $H_1 : \gamma_{i,j} = 0$, $\vec{r}_{i,j} = \vec{U}_{i,j} - \vec{V}_{i,j}^0$ e significa que a condição do falso vetor é estabelecida – se o campo $\vec{U}_{i,j}$ possuir elevada variância em relação ao campo $\vec{V}_{i,j}^0$, o escalar $r_{i,j}^2$ pode ser aproximado por uma distribuição de probabilidade uniforme com o comprimento igual à da janela investigada e centrada em $\vec{V}_{i,j}^0$. Na prática o campo $\vec{V}_{i,j}^0$ não é conhecido *a priori* e, portanto, deve ser estimado a partir do próprio sinal, isto é, sua validação. Westerweel (1994) valida o campo $\vec{V}_{i,j}^0$ a partir de três testes: com base na média global, na média local e na mediana local. Segundo o autor, um estimador adequado deve ser imparcial e ter uma variância substancialmente menor que a variância do campo $\vec{V}_{i,j}^0$. Técnicas mais recentes de validação PIV como a *normalized median test* proposto por Westerweel e Scarano (2005) e o método ponderado (em relação à velocidade da vizinhança) de detecção de *outliers* para dados não estruturados proposto por Duncan et al. (2010) são as mais utilizadas e indicadas. No entanto, segundo Masullo e Theunissen (2016), essas técnicas dependem de uma comparação espacial de cada vetor com aqueles próximos em uma vizinhança de tamanho fixo e seu desempenho subsequentemente sofre uma depreciação na presença de *clusters* de *outliers*.

Os autores propõem um método mais robusto (validação vetorial adaptativa denominada pela sigla AWAMT) para contornar essa problemática e reduzir, desse modo, a probabilidade de invalidar inadequadamente vetores corretos. Processos alternativos com base em rede neural (Liang et al., 2003) ou de *bootstrapping* – método estatístico de reamostragem – (Pun et al., 2007) também foram empregados para validação. Apesar de satisfatórias, essas técnicas possuem um alto custo computacional e raramente são utilizadas (Garcia, 2011). Outros métodos de validação de dados PIV podem ser encontrados em detalhes em Raffel et al. (2007).

Uma vez que a maioria dos *outliers* foram identificados e removidos, os vetores ausentes devem ser substituídos por dados interpolados – em regiões com maiores faltas de vetores a interpolação tenderá para a média das velocidades das vizinhanças (Nogueira et al., 1997). Técnicas de interpolação (vizinhança 3×3), interpolação bidimensional linear ou *spline* são comumente empregadas (Raffel et al., 2007).

Após a etapa de interpolação, os ruídos remanescentes podem ser efetivamente reduzidos a partir da aplicação de algoritmos de suavização de dados. Raffel et al. (2007) propõem realizar uma convolução dos dados com um *kernel* 2×2 ou 3×3 com pesos iguais. Algoritmos de suavização mais avançados são encontrado utilizando o método de mínimos quadrados proposto por Garcia (2010) ou utilizando métodos de suavização com base em interpolação Kriging (*Kriging interpolation methods*) proposto por Gunes e Rist (2007).

2.3.7. Quantificação da incerteza PIV

Apesar das numerosas aplicações, teoria e contribuições das diferentes técnicas PIV, atualmente não existe nenhum quadro amplamente aceito para quantificação confiável da incerteza de medição PIV (Xue et al., 2014; Farias et al., 2016). A situação é agravada pelo fato de que as medições PIV envolvem cadeias de instrumentos e algoritmos com fontes de incerteza acopladas tornando a quantificação da incerteza muito mais complexa do que a maioria das técnicas de medição. Conseqüentemente, os resultados quantitativos obtidos pela técnica PIV são frequentemente recebidos com ceticismo. Portanto, desenvolver uma metodologia confiável é fundamental para quantificar a incerteza PIV, sendo um desafio notável e ainda em aberto (Xue et al., 2014).

Recentemente, vários estudos investigaram a quantificação da incerteza em medidas PIV, tais como Timmins et al. (2012), Sciacchitano et al. (2013), Charonko e Vlachos (2013), Xue et al. (2014, 2015) e Wieneke (2015). Cada um dos quais desenvolveram algoritmos para prever a incerteza de medições PIV 2D. Um comparativo dos algoritmos sob várias condições de

escoamento foi abordado por Sciacchitano et al. (2015) e Boomsma et al. (2015). A propagação da incerteza PIV foi avaliada por Sciacchitano e Wieneke (2016) para vorticidade, divergência de velocidade e tensões de Reynolds. Segundo Boomsma et al. (2015), de uma forma geral, é possível classificar três abordagens para quantificação da incerteza em medidas PIV (especificamente em 2D), aparentemente cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. Estas abordagens podem ser categorizadas da seguinte forma: i) métodos de superfície de incerteza; ii) métodos de correspondência de imagens; e iii) métodos de plano de correlação.

Os métodos de superfície de incerteza (US) – ver Timmins et al., (2010, 2012) – utilizam o conhecimento *a priori* da fonte de erro e seu correspondente erro de medição, isto é, a resposta a alguma fonte de erro, para prever a incerteza. Utilizando esta abordagem, algumas fontes de erros são selecionadas tendo seus efeitos analisados individualmente a partir de simulações Monte Carlo baseadas em imagens sintéticas (*Synthetic PIV*) do campo de velocidade. Após o processamento das imagens, o erro pode ser definido para cada vetor de velocidade. Desta forma, pode-se isolar o erro e a fonte do erro e, por sua vez, criar uma superfície de incerteza de respostas para as fontes de erro selecionadas. Timmins et al. (2012) investigaram o tamanho da imagem de partícula, concentração de traçador, a taxa de cisalhamento e o deslocamento de partículas como possíveis fontes de erro. O método de superfície de incerteza é executado como um método de pós-processamento e requer uma calibração específica.

Os métodos de correspondência de imagens ou método da disparidade de partícula (PD) – Sciacchitano et al. (2013) e Wieneke (2015), calculam as incertezas de medição PIV relacionadas as imagens de partículas individuais de uma dada janela de interrogação no instante t e no instante $t + \Delta t$. Esse método considera a velocidade medida como um preditor para coincidir com as imagens de partículas entre um par de imagens combinadas. Para partículas que são combinadas, qualquer diferença espacial entre elas é registrada como um vetor de disparidade. Um conjunto de vetores de disparidade é coletado e, após a análise estatística, um valor de incerteza pode ser calculado. O método proposto por Wieneke (2015), denominado estatística de correlação (CS), se apresenta de forma semelhante ao método de disparidade de partículas. Contudo, o método CS utiliza todas as imagens de partículas dentro de uma janela de interrogação, não apenas aquelas que foram correspondidas (análise estatística dos padrões de intensidade dos pares de imagens). O método CS calcula a incerteza PIV adicionando deslocamentos a um mapa de correlação até que o pico de correlação seja simétrico. Os métodos de correspondência de imagem ocorrem após o processamento vetorial

e requerem um campo de vetor de velocidade convergente (Boomsma et al., 2015; Neal et al., 2015).

Métodos de plano de correlação englobam os trabalhos desenvolvidos por Charonko e Vlachos (2013) e Xue et al. (2014, 2015). Esse tipo de método para o cálculo da incerteza PIV utiliza exclusivamente o plano de correlação. Charonko e Vlachos (2013) relatam que a magnitude do erro de deslocamento é inversamente proporcional ao Pico Primário (PPR), ou à relação entre os picos de correlação primário e secundário. Os autores argumentaram que o PPR é a escolha natural para a análise de incerteza porque a relação sinal-ruído (SNR) abrange todas as possíveis fontes de erro. Como tal, os autores formularam uma relação entre o PPR e o erro, com coeficientes de adaptação específicos calculados a partir de dados sintéticos. Xue et al. (2014) relacionaram não apenas PPR e o erro, mas também outras medidas da SNR, tais como: relação quadrática média de pico - raiz, energia de pico-correlação e entropia de correlação cruzada. Xue et al. (2014) também formularam uma nova relação entre a SNR e o erro de deslocamento, quando este último não assume uma distribuição normal. No trabalho de Xue et al. (2015), os autores propuseram a quantificação da incerteza utilizando uma nova métrica, denominada Informação Mútua (MI). A MI é a razão entre o pico de correlação cruzada e o pico de auto-correlação de uma partícula Gaussiana ideal e denota a quantidade eficaz de informação correlacionada. Uma MI mais elevada sugere um maior número de partículas que se correlacionam dentro das janelas de interrogação e assim o verdadeiro deslocamento pode ser medido com uma menor incerteza. Além disso, a MI também foi usada para desenvolver um modelo robusto para estimar a incerteza PIV.

Para avaliar o desempenho de cada método (a Tabela 2.2 apresenta um resumo dos métodos descritos), sendo fundamental que o erro de medição seja bem conhecido.

Tabela 2. 2 - Parâmetros analisados e fornecidos para os quatros métodos de incerteza (Adaptado de Wieneke, 2015).

Método / ano de desenvolvimento	Pontos Considerados	Parâmetros de Saída
Superfície de Incerteza (US) / 2012	<ul style="list-style-type: none"> • Gravações PIV • Campo vetorial medido • Algoritmo processado 	<ul style="list-style-type: none"> • U_x^+ e U_y^+: Limite superior de incerteza para o componente x e y de velocidade • U_x^- e U_y^-: Limite inferior de incerteza para o componente x e y de velocidade
Razão de pico (PPR) / 2013	<ul style="list-style-type: none"> • Razão de Pico da correlação-cruzada 	<ul style="list-style-type: none"> • U: Incerteza da velocidade
Disparidade de partícula (PD) / 2013	<ul style="list-style-type: none"> • Gravações PIV • Campo vetorial medido • Algoritmo processado 	<ul style="list-style-type: none"> • U_x e U_y: Incerteza do componente x e y de velocidade
Estatística de correlação (CS) / 2015	<ul style="list-style-type: none"> • Campo vetorial medido • Contribuições de imagem na função de correlação-cruzada 	<ul style="list-style-type: none"> • U_x e U_y: Incerteza do componente x e y de velocidade
Informação Mútua (MI) / 2015	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade da correlação cruzada • Produto da densidade de imagem • Fração de partículas no plano e fora do plano. 	<ul style="list-style-type: none"> • U: Incerteza da velocidade • Modelo para estimativa de incerteza

Para um escoamento sintético, o erro é conhecido devido ao deslocamento prescrito (isto é, a verdadeira solução) das imagens de partículas, mas em um escoamento experimental, a verdadeira solução é desconhecida. Em diferentes condições de medição e regimes de escoamento, Sciacchitano et al. (2015) analisaram experimentalmente os quatros métodos de quantificação de incerteza (US, PPR, PD e CS). Para isso os autores utilizaram dois conjuntos sincronizados de sistemas PIV: um sistema PIV de baixa resolução (medição) e outro de alta resolução (referência). Os autores observaram que a abordagem da estatística de correlação (CS) fornece as estimativas de incerteza mais precisas. Em adição, a abordagem CS apresenta

uma sensibilidade apurada às variações do erro de medição e possui uma reprodução do erro RMS com uma precisão maior em relação aos outros métodos. Boomsma et al. (2015) comparam os métodos PPR, MI e PD. Dados sintéticos foram obtidos a partir de uma camada limite turbulenta completamente desenvolvida e o procedimento experimental foi semelhante ao realizado por Sciacchitano et al. (2015) - jato tridimensional (orifício circular) em escoamento quiescente. Além disso, os resultados obtidos foram comparados com medidas LDV para validar o sistema PIV de alta resolução. Em ambos os casos, os autores concluíram que o método PPR produziu resultados mais consistentes seguidos pelos métodos MI e PD.

Neal et al. (2015) disponibilizaram um conjunto de dados experimentais (para diversos tipos de escoamentos) com o intuito de avaliar os métodos de quantificação de incerteza PIV. As condições experimentais foram cuidadosamente controladas visando proporcionar condições adequadas para minimizar todas as interferências das fontes de erros. Segundo os autores, o esforço principal consiste na realização de um experimento em que a velocidade é medida juntamente com o seu verdadeiro valor. O último não sendo possível, o problema traduz-se numa medida da velocidade com precisão significativamente maior para estabelecer uma velocidade de referência viável. Para tal, duas técnicas de medições diferentes foram utilizadas: PIV e anemometria de fio quente (HWA). Os dados experimentais foram adquiridos operando um jato retangular, o mesmo utilizado por Timmins et al. (2012), em várias taxas de amostragem na faixa de 4-10 kHz com todos os sistemas de medições sincronizados para produzir medições simultâneas (Neal et al., 2015).

Em relação à aplicação PIV em colunas de bolhas e de acordo com Amaral et al. (2015), a maioria dos trabalhos estimam a incerteza das medidas PIV utilizando as fontes de erros isoladas sem fornecer uma incerteza global e, conseqüentemente, esse fato possibilita lacunas na confiabilidade dos resultados. Nesse contexto, destacam-se alguns trabalhos como os realizados por Lain et al. (1999) e Bröder e Sommerfeld (2002). Os autores ignoram o efeito da curvatura da coluna (distorção de imagem) e do movimento para fora do plano de luz das partículas traçadoras. Além disso, foi utilizado o SNR como parâmetro de qualidade dos campos vetoriais determinados, mas nenhum método de incerteza global de medida foi apresentado. A distribuição do SNR também não foi apresentada pelos autores. Bröder e Sommerfeld (2007) analisaram a distribuição da velocidade da fase gasosa e líquida por PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) e PIV em uma coluna quadrada (2D). Os autores também não apresentaram a incerteza global de medida, mesmo avaliando o erro associado ao método de correlação PIV utilizado. Uma análise mais detalhada dos métodos de incerteza recentes

(aplicados em coluna de bolhas) e um estudo de caso foi realizado por Amaral et al. (2015). Além disso os autores analisaram as incertezas das velocidades PIV (2D-2C e 2D-3C) da fase líquida do escoamento em uma coluna de bolhas utilizando o método CS.

2.4 ANÁLISE DE CAOS

Um sistema caótico é um sistema não-linear e determinista que exhibe uma grande sensibilidade a pequenas modificações e/ou condições iniciais (Van den Bleek e Schouten, 1993). Nesse tipo de sistema, ainda que os estados iniciais sejam muito próximos, as diferenças das trajetórias crescem exponencialmente (com o tempo) apresentando um comportamento aperiódico e imprevisível. Nesse contexto, três principais classes de sistemas podem ser distinguidas dependendo da taxa de crescimento: completamente ordenado, quando a taxa de crescimento do sistema é zero; o sistema é estocástico, quando a taxa de crescimento tende ao infinito; o sistema é caótico, quando a taxa de crescimento é estritamente positiva.

O comportamento de um sistema caótico pode ser representado em um espaço de fase com m dimensões correspondentes às variáveis independentes que descrevem a dinâmica desse sistema. O atrator é a representação da dinâmica de um sistema no espaço de fase (convergência das trajetórias). Takens (1981) demonstrou ser possível a reconstrução do atrator a partir de uma única série temporal $x_i = x(t_i)$, $i = 1, \dots, N$ $\{x_i \in R^{n \geq 2m+1}\}$ representada nos vetores de atraso:

$$\mathbf{x}_i = [x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + (m - 1)\tau)] \quad (2.6)$$

na Eq. (2.6) m é denominado de dimensão de imersão (ou incorporação) e τ é o passo de reconstrução ou tempo de atraso (“*time-delay*”). De acordo com Takens (1981) a reconstrução do atrator no espaço de imersão deve possuir as mesmas propriedades do atrator original desde que $n \geq 2m + 1$. O valor de m pode ser obtido pelo método dos falsos vizinhos (FNN) proposto por Kugiumtzis et al. (1994) e τ a partir do método da informação mútua apresentado por Fraser e Swinney (1986).

Em casos específicos em que a representação da dinâmica seja comprometida pela presença de ruídos, o método de decomposições em valores singulares (SVD) proposto por Broomhead e King (1986) aplicado na matriz das trajetórias do método de Takens é recomendável. Esse método realiza uma separação dos componentes principais que indicam os estados de maior variância dos de menor variância, representando, respectivamente, a dinâmica e o ruído da série temporal. Além disso, os parâmetros de reconstrução (m e τ) e o critério $n \geq$

$2m + 1$ são dispensáveis. Detalhes sobre a influência do ruído na representação da dinâmica no espaço de fase, redução de ruído e uma discussão da análise de caos em sistemas da engenharia de processos podem ser encontrados em Moura et al. (2012), Moura (2013) e Moura et al. (2015), respectivamente.

Em coluna de bolhas e utilizando o teorema de Takens (1981), detalhes da dinâmica subjacente podem ser obtidas extraindo as séries de flutuações de velocidade com posterior análise no espaço de fase. A Figura 2.27 apresenta uma ilustração de como o teorema de Takens (1981) pode ser aplicado em medições PIV. Geralmente, em sistemas PIV não resolvido no tempo o modo de gravação *double/frame* é possível extrair informações da distribuição de velocidade no espaço e no tempo utilizando a abordagem SCC (menos robusta à ruídos). Entretanto, a abordagem EC (mais robusta à ruídos) só determina a distribuição espacial da velocidade média de um grupo de pares de frames, isto é, não é possível obter uma série temporal. Em sistemas PIV mais avançados (como os de alta frequência) resolvidos no tempo, é possível utilizar outras abordagens de correlação como a SAC (*Sliding-Average Correlation*) e *Multi-frame Pyramid Correlation* para obter uma distribuição espacial evoluída no tempo mais robustos à ruídos (Sciacchitano et al., 2012).

Após obter as séries de flutuações de velocidade, o comportamento complexo apresentado em coluna de bolhas pode ser descrito por meio dos invariantes caóticos: dimensão de correlação e a entropia de Kolmogorov. A dimensão de correlação está relacionada com os graus de liberdade do sistema gás-líquido, enquanto que a entropia de Kolmogorov indica a taxa de perda de informação (bits/s) ao longo do atrator ou o grau de previsibilidade de pontos ao longo do atrator com evolução do tempo no sistema (Figura 2.28).

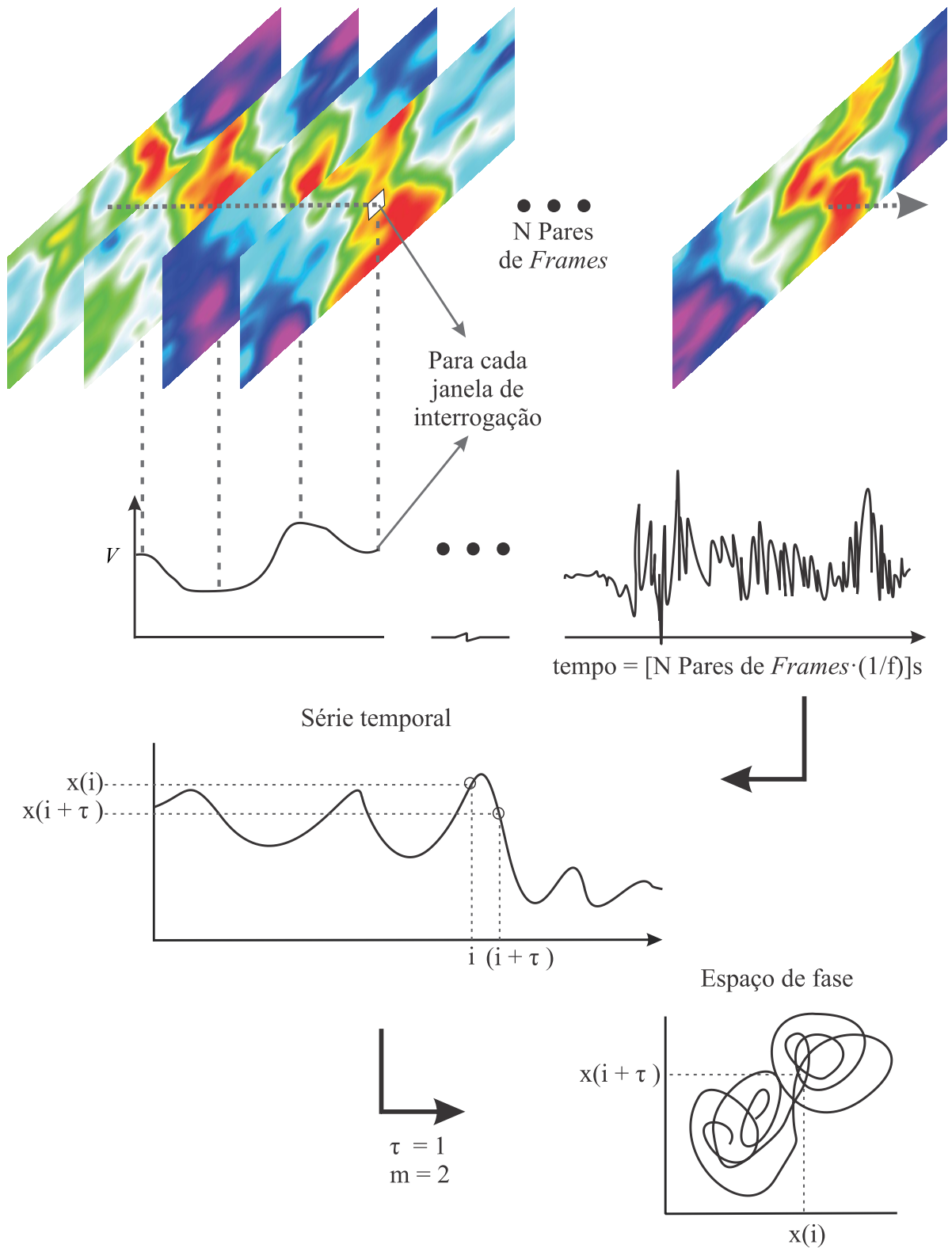


Figura 2. 27 - Processo de obtenção das séries temporais em campos de velocidade PIV e sua representação hipotética no espaço de fase a partir do método de Takens (1981).

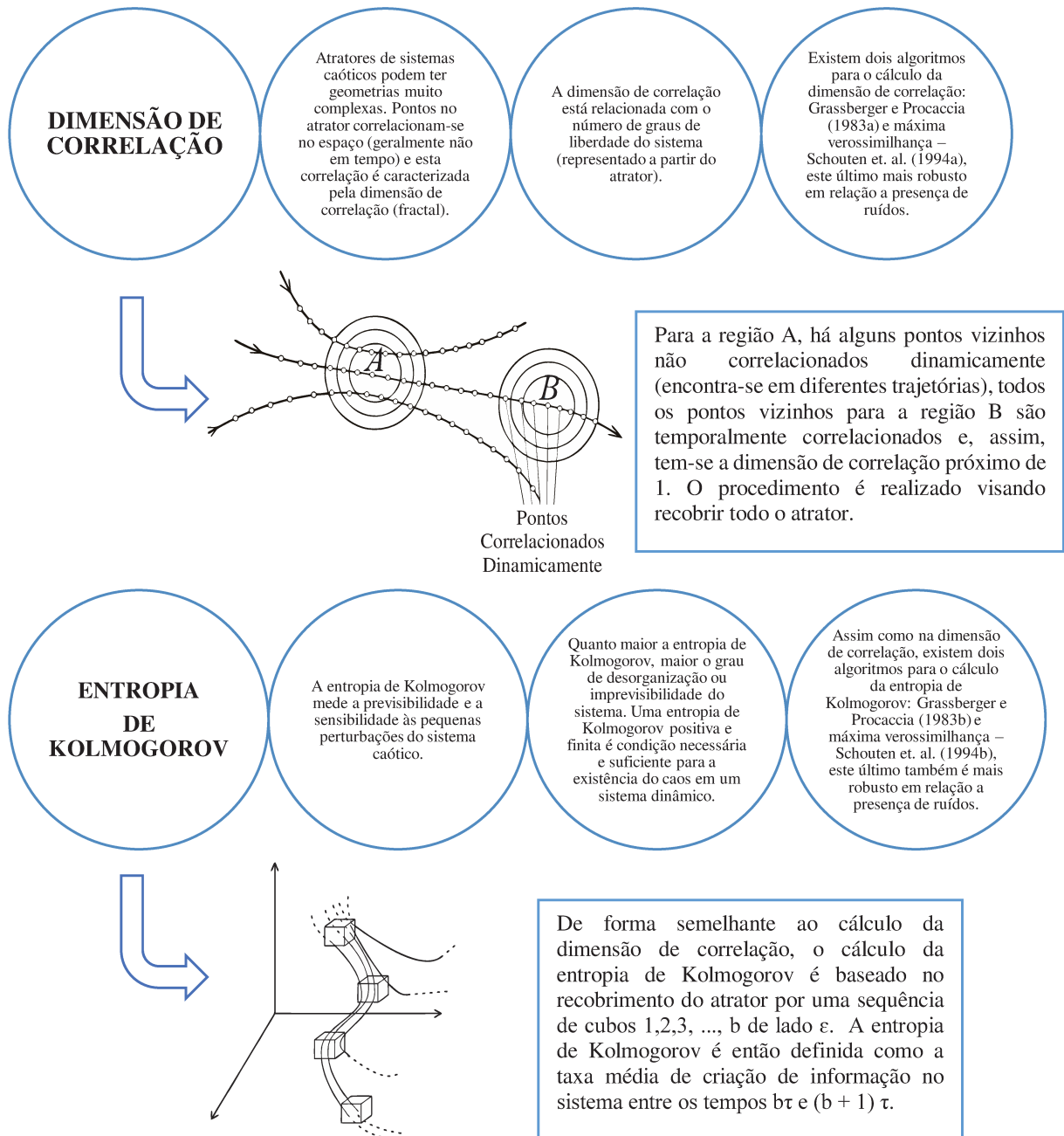


Figura 2. 28 - Principais características dos invariantes caóticos.

Por apresentarem uma maior robustez em relação à presença de ruídos, os algoritmos que empregam o conceito de máxima verossimilhança propostos por Schouten et al. (1994a,b) foram empregados nas análises da quantificação da incerteza PIV e no estudo da dinâmica do escoamento da coluna de bolhas em questão. Os detalhes da fundamentação matemática para o cálculo da dimensão de correlação (incluindo a influência do ruído) e para a entropia de Kolmogorov, encontram-se nos Anexos A e B, respectivamente.

Como consequência das diversas interações não-lineares do sistema gás – líquido em coluna de bolhas, uma pequena alteração em um parâmetro pode levar a alterações súbitas e notáveis tanto no comportamento qualitativo como no comportamento quantitativo do sistema (invariantes caóticos). A grande vantagem da análise de caos, além de prover novas ferramentas conceituais e teóricas, é permitir que a ordem e a universalidade que subjazem a essas interações complexas sejam observadas e descritas em detalhes. (Abarbanel 1996; Nedeltchev et al., 2007). Nesse contexto, os principais trabalhos são destacados, a seguir, referentes as publicações sobre identificação de regime de escoamento em colunas de bolhas com base em diferentes técnicas experimentais com a análise de caos.

Kikuchi et al. (1997), utilizando sonda de transmissão óptica com feixe de *laser* He-Ne, analisaram séries temporais compostas de sinais referentes a passagem das bolhas (intervalos entre dois sucessivos sinais). A dinâmica do sinal foi caracterizada a partir da dimensão de correlação, estatística de Mann-Whitney e expoente de Hurst. Kang et al. (1999) investigaram a distribuição de bolhas e seu efeito sobre a retenção de gás, a transferência de massa gás-líquido e os fenômenos borbulhantes por meio da teoria do caos e da análise espectral das flutuações de pressão. Vial et al. (2000) propuseram diferentes métodos de identificação (análise estatística, domínio da frequência e espaço de fase) de regime com base em análises de flutuação de pressão em uma coluna de bolhas. Em Lin et al. (2001a), diversas análises de séries temporais caóticas foram aplicadas para identificar as transições de regimes. Os critérios propostos foram aplicados para localizar os limites superiores e inferiores da velocidade de transição. Nedeltchev et al. (2003), utilizando a técnica CARPT (*Computer-Automated Radioactive Particle Tracking*), determinaram U_{trans} a partir da entropia de Kolmogorov. Em Nedeltchev et al. (2006), a técnica de Tomografia Computadorizada (CT), foi aplicada na identificação de transições de regimes com a entropia de Kolmogorov. Foram identificados cinco regimes: regime de bolha dispersos, os regimes de primeira e segunda transição, regime de início da coalescência das bolhas que consiste em quatro regiões (4-regiões) e regime de bolha coalescida que consiste em três regiões (3-regiões). Nedeltchev et al. (2007) identificaram cinco velocidades de transição (a partir de transdutores de pressão diferencial) em uma coluna de bolhas baseado na entropia de Kolmogorov. Utilizou-se Nitrogênio como gás, enquanto o 1-butanol e a gasolina foram utilizados como líquidos. Nedeltchev et al. (2011) propuseram modelos semi-teóricos com dados obtidos da técnica *Nuclear Gauge Densitometry* (NDG) para a identificação de U_{trans} baseado na entropia de Kolmogorov. Nedeltchev e Shaikh (2013) e Nedeltchev (2015) desenvolveram novos métodos de identificação de regimes aplicados a

séries de tempo de contagem de fótons (Tomografia Computadorizada) medidos em uma coluna de bolhas. A abordagem baseia-se na teoria da entropia de informação (IE) e na divisão do sinal em diferentes regiões (muito semelhante à entropia de Kolmogorov). Letzel et al. (1997) aplicaram a análise do caos em sinais de pressão. Os autores verificaram que um aumento na pressão eleva a retenção de gás no ponto de transição, contudo a velocidade de transição é praticamente independente da pressão. Constatou-se que inicialmente com o aumento da velocidade do gás os invariantes diminuem abruptamente (Figura 2.29).

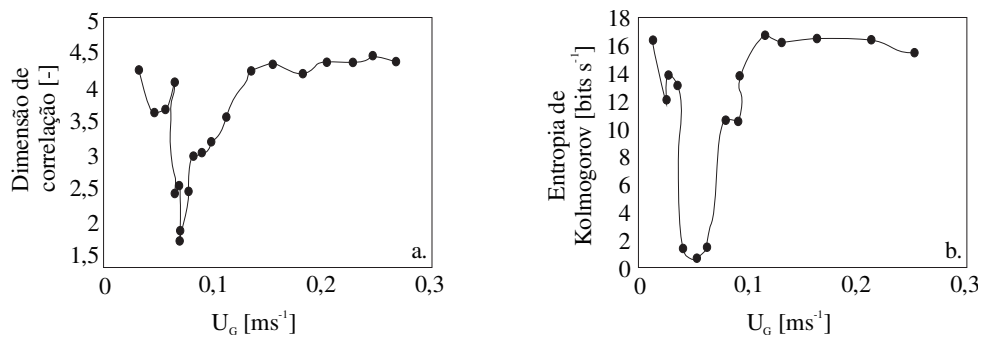


Figura 2. 29 - Dimensão de correlação (a) e entropia de Kolmogorov (b) em função da velocidade superficial do gás em uma coluna de bolha (Adaptado de Letzel et al., 1997).

Isso se deve à formação de um padrão de circulação de líquido assim como o surgimento das estruturas de escoamentos e, como consequência, ocasiona na diminuição dos graus de liberdade e complexidade do sistema. A medida que a velocidade do gás sofre um aumento, formam-se grandes bolhas e essas comprometem a estrutura de escoamento formada, isto é, devido à transição do regime. Quando o regime heterogêneo está totalmente estabelecido, os invariantes caóticos têm aproximadamente o mesmo valor que no regime homogêneo. Isto significa que o escoamento é caracterizado por mais graus de liberdade e que são induzidos pela circulação de líquidos. A partir dessas características, a análise de caos pode fornecer uma visão profunda da complexa fluidodinâmica do sistema gás – líquido em que as transições são claramente percebidas e quantificadas (Letzel et al., 1997).

CAPÍTULO 3 — Resultados e Discussão

*Nesta seção os resultados e as discussões são apresentados no formato de artigo. São apresentados três artigos que compõe o escopo da Tese. O primeiro artigo foi aceito para publicação na revista *Chemical Engineering Science*. O segundo artigo foi apresentado no XXXVII ENEMP 2015 (Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados). O terceiro e último artigo foi apresentado no XXI COBEQ 2016 (Congresso Brasileiro de Engenharia Química).*

3.1 USING CHAOS ANALYSIS FOR EVALUATING THE QUALITY OF F-PIV MEASUREMENTS IN A BUBBLE COLUMN

Helder Lima de Moura*, Rodrigo de Lima Amaral, Diana Isabel Sánchez Forero,

Guilherme José de Castilho, Sávio Souza Venâncio Vianna and Milton Mori

University of Campinas, School of Chemical Engineering, Albert Einstein Ave., 500 –

Zip Code: 13083-852, Campinas-SP, Brazil.

Accepted Manuscript

PII: S0009-2509(16)30613-3

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.023>

Reference: CES13246

To appear in: *Chemical Engineering Science*

Received date: 18 June 2016

Revised date: 2 November 2016

Accepted date: 9 November 2016

Final version published online: 13 November 2016



ABSTRACT

A new approach is proposed for evaluating the quality of fluorescent particle image velocimetry (F-PIV) measurements for different superficial gas velocities (U_G) in a bubble column (1.0 m long \times 0.145m i.d.) using chaos analysis. The 2D velocity fields of a F-PIV system were obtained in a 0.145×0.10 m area located 0.552 m above the gas distributor. Four thousand pairs of images were obtained at a frequency of 4.2 Hz at nine radial positions for superficial gas velocities (U_G) of 0.158, 0.528, 2.106 and 4.212×10^{-2} m/s. Using the standard cross-correlation (SCC) approach, PIV quality was analyzed for the velocity module and its components by investigating the cross-correlation coefficient (CCC), the signal-to-noise ratio (SNR) and the uncertainty (CS method) estimated by correlation statistics. Moreover, it was possible to extract the velocity fluctuation series for chaos analysis (correlation dimension, D_{ML} , and standard deviation of the correlation integral, Dev_{ML}). The effect of the quality of F-PIV measurements evaluated by chaos analysis is based on the noise limitation in amplitude and normalization of the integral correlation distances. The results presented similarities in the behavior of the PIV uncertainty and chaotic parameters along the radius for all U_G investigated. For this reason, chaos analysis can be used in other PIV processing settings where quality indicators, such as uncertainty, SNR and CCC, do not exist. Thus, it was possible to use this analysis to gain a better understanding of the nonlinear interactions in a bubble column as well as the performance of a PIV post-processing filter in order to reduce the effect of noise.

Keywords: *Bubble column; PIV quality; Nonlinear dynamics; Chaotic invariant*

1. INTRODUCTION

Bubble columns are used in several processes in the oil, chemical and biochemical industries. The study of fluid dynamics behavior in bubble column reactors is important for controlling parameters related to the rate of chemical reaction, heat and mass transfer (Deckwer, 1992; Lain et al., 1999; Yang, 2003). Experimental studies can improve our understanding of the hydrodynamics and flow regime transitions, which are of great importance for the design, operation and scale-up of bubble columns (Fan, 1989). However, a theoretical modeling or experimental approach in these reactors is difficult, since many of the underlying mechanisms and operating parameters may be complex due to the unstable movement of the bubbles and nonlinear interactions with the column wall and bubbles themselves (Fan, 1989; Nedeltchev et al., 2007; Abbasi et al., 2013; Li et al., 2013; Nedeltchev and Shaikh, 2013; Nedeltchev, 2015).

A large number of measurement techniques, including intrusive and nonintrusive, were used to investigate the dynamics in multiphase reactors (Boyer et al., 2002; Yang et al., 2007). For bubble columns, a comprehensive review of the measurement techniques can be found in Shaikh and Al-Dahhan (2007) and Nedeltchev and Shaikh (2013). Shaikh and Al-Dahhan (2007) classified the experimental methods for identification of the flow regime transitions in bubble columns into four groups: visual observation, evolution of global hydrodynamics parameters, temporal signature of quantity related to the hydrodynamics and advanced measurement techniques. In the nonintrusive techniques based on the temporal evolution of the hydrodynamics parameters, pressure fluctuations are widely used to characterize the regime transitions in bubble columns (Briens and Ellis, 2005; Shou and Leu, 2005; Nedeltchev et al., 2007; Zaid et al., 2011; Abbasi et al., 2013). However, the relationship between pressure fluctuations and flow behavior in bubble columns is not trivial (Shaikh and Al-Dahhan, 2007). According to van Ommen et al. (2011), the main limitation in understanding the nature of the pressure signals is based on the global characteristic of the measurements. In that manner, the interpretation of the pressure measurements is far more complicated than of a more local measurement (mainly obtained by optical probe techniques). On the other hand, image and velocimetry techniques, which are classified as advanced measurement techniques (Shaikh and Al-Dahhan, 2007), allow local measurements. Examples of these techniques are particle image velocimetry (PIV) (Chen et al., 1994; Lin et al., 1996), laser Doppler velocimetry (LDV) (Olmos et al., 2003), γ -ray computed tomography (Shaikh and Al-Dahhan, 2005; Nedeltchev et al., 2006), computed tomography (CT) and nuclear gauge densitometry (Nedeltchev, 2015). According to Nedeltchev and Shaikh (2013), there is no technique or method – including models

of computational fluid dynamics (CFD) – that has carefully established a complete description of the dynamics and nonlinear interactions in bubble columns, despite the large number of studies on the determination and quantification of regime transitions.

Analysis of flow dynamics by measurement techniques is more complex and difficult when working with high superficial gas velocities due to the contribution of noise. In PIV systems, for example, an increase in superficial gas velocity may cause degradation of the vector field in bubble columns, especially for the gas phase velocity. Therefore, the majority of PIV applications in bubble columns are limited to the analysis of the liquid phase velocity. Basically, PIV systems use a laser light source and a CCD camera (charge-coupled device) to record images of tracer particles immersed in flow at different instants. The presence of bubbles contributes to the large amount of laser light scattered inside the column, compromising the recording of the tracer images by the camera. In addition, this scattered light can damage the CCD sensor in this camera. This problem can be solved by using fluorescent tracers and a high-pass filter, which only allows light emitted by the tracers to pass. This technique is known as fluorescent PIV (F-PIV) (Northrup et al., 1991; Chen and Fan, 1992; Philip et al., 1994; Sridhar and Katz 1995; Deen et al., 2000, 2002; Lindken and Merzkirch, 2002; Bröder and Sommerfeld, 2007; Raffel et al., 2007; Adrian and Westerweel, 2011). As with PIV, F-PIV systems can be classified according to the domain space (2D or 3D) and component (2C or 3C) of the vector field. Bröder and Sommerfeld (2002) used a 2D-2C F-PIV and a 2D-2C PIV system to analyze the liquid and gas phases, respectively, of a bubble column in dilute regimes (low concentration of bubbles). The performance of the techniques was analyzed by increasing the superficial gas velocity, but no experimental uncertainty measurements were reported. The authors also analyzed the best camera angle for recording.

Quantifying uncertainty is especially relevant when the PIV measurements are used to validate numerical simulations of CFD (Wernet, 1997; Stanislas et al., 2000; Hariharan et al., 2011). The majority of the work published was done using synthetic data simulating the sources of errors, which usually underestimates the errors in real experiments (Wieneke, 2015). PIV measurement error has been thoroughly investigated during the last two decades, either by theoretical modeling (Westerweel, 1997) or by the most frequent approach known as Monte Carlo simulation (Keane and Adrian, 1992; Fincham and Spedding, 1997; Fincham and Delerce, 2000; Scarano and Riethmuller, 2000; Lecordier et al., 2001, among others). Currently, four methods of quantifying PIV uncertainty are being studied: the uncertainty surface – US method (Timmins et al., 2012), the primary peak ratio – PPR method (Charonko and Vlachos,

2013), the particle disparity – PD method (Sciacchitano et al., 2013) and the correlation statistics – CS method (Wieneke, 2015). Sciacchitano et al. (2013, 2015) experimentally analyzed the four uncertainty quantification methods and observed that the CS approach provides the most accurate uncertainty estimates. The estimated error was reproduced with an accuracy higher than 85% when the most important sources of PIV error were present. However, this method has some limitations, such as its inability to represent the errors related to image noise and out-of-plane motion of the tracer particles. Furthermore, the CS method is only valid using the standard cross correlation (SCC) in 2D-2C and 2D-3C PIV measurements. A major difficulty with the SCC approach is that it is sensitive to noise. A post-processing procedure can be performed to minimize the effect of noise. However, quality indicators for a post-processed field are practically inexistent.

An alternative for evaluating the quality of PIV measurements is a nonlinear analysis of velocity fluctuations. Chaos analysis can be used to qualitatively and quantitatively characterize the hydrodynamic behavior and regime transitions in a bubble column (Letzel, et al., 1997; Vial et al., 2000; Lin et al., 2001; Gourich et al., 2006; Nedeltchev et al., 2006; Nedeltchev et al., 2007; Ajbar et al., 2009; Nedeltchev et al., 2011; Mosdorf and Wyszowski, 2011; Nedeltchev and Shaikh, 2013; Nedeltchev, 2015). This approach has been shown to be very useful for extracting time series information from systems whose behavior has nonlinear characteristics. According to Abarbanel (1996), behavior is described as deterministic chaotic when it is aperiodic and sensitive to small changes in the initial conditions. Chaos analysis uses phase space reconstruction to map the evolution of a process over time by trajectories in a multidimensional phase space (Takens, 1981). The complexity of data immersed in this phase space can be measured by the correlation dimension.

Calculating the correlation dimension is one of the most widely used methods to analyze the nature of time series data (Daw et al., 1990; van den Bleek and Schouten, 1993; Hay et al., 1995; Johnsson et al., 2000; Briongos et al., 2006, 2007; Xu et al., 2009; Castilho et al., 2011; Castilho and Cremasco, 2013). The correlation dimension allows estimating the number of independent variables or degrees of freedom that describe the system. The main problem in estimating the correlation dimension in experimental time series is that these are contaminated by noise (van den Bleek and Schouten, 1993). However, Schouten et al. (1994) proposed a calculation method that is based on the assumption that the data are obtained from a system constrained by amplitude noise, and therefore, we can estimate the influence of noise on velocity fluctuation series.

The SCC approach used in the correction of F-PIV images allows the extraction of velocity fluctuation series. The possible identification of flow structures having velocity as the only feature variable of the system enables the use of chaos analysis for a more detailed dynamic study. Considering the need to avoid basing evaluation of the quality of PIV results solely on use of the SCC approach, this study proposes chaos analysis as an alternative method. A bubble column operating with various superficial gas velocities (U_G) is presented as the case study. Specifically, the effect on the chaotic parameters is associated with the CS method (PIV indicator) estimated from SCC, incorporating the possible noisy trajectories when calculating the correlation dimension and its convergence. Moreover, the method proposed by Schouten et al. (1994) for estimating the dimension of an attractor enables integration of a small noise scale and its subsequent application as a quality indicator associated with PIV measurement of velocity fluctuations. In an attempt to minimize the noise, the PIV post-processing was evaluated using chaos analysis.

2. MEASUREMENT TECHNIQUE

2.1. Principle

The operating principle of 2D-2C F-PIV is shown in Fig. 1. Similar to the 2D-2C PIV, 2D-2C F-PIV is a nonintrusive technique that uses a laser light source to illuminate fluorescent tracer particles in the flow in order to make the flow pattern visible through a CCD or CMOS sensor. Basically, the technique calculates the instantaneous velocity field of the flow by displacing small groups of particles in small areas of investigation (interrogation windows) using PIV correlation in double-frame/single-exposure recording mode (Prasad, 2000). The laser system uses a set of lenses to form a light sheet usually located at 90 degrees from the camera. The PIV performance depends on the quality of the recorded images. To ensure measurement quality and prevent damage to the sensor, fluorescent tracer particles that absorb the green light of the laser (530 nm) and emit orange light (640 nm) are combined with the high-pass filter on the camera, which allows only the light scattered by the tracer particles to pass (Lindken and Merzkirch, 2002). However, even with the use of fluorescent particles and the high-pass filter, the intensity scattered by optical windows or bubbles can still be recorded on the sensor and an image treatment is required. This image treatment is performed in the PIV preprocessing, usually using spatial and temporal filters. The image distortion caused by the curvature of the optical windows or by the presence of different refractive indices of the medium results in another interference, which can be reduced by PIV calibration. Calibration

aims to relate the physical space to the image plane using a mapping function. This mapping function is used for the reconstruction of the pre-processed image in PIV processing prior to correlation. In the double-frame single pulse recording mode, the standard cross correlation (SCC) is generally used. The PIV correlation plane is the probability distribution of the shift pattern of pre-processed particle images between consecutive frames. The signal-to-noise ratio (SNR) or peak ratio is defined as the ratio of the tallest correlation peak to the second tallest peak and it is a practical measure of the quality of a cross correlation. Numerical investigations indicate that a correlation peak height of about 0.5 and a SNR of about 2.0 reliably avoid false vectors (Hain and Kähler, 2007). In PIV correlation, a common error source referred to as peak locking is caused when the particle image diameter is on the order of less than 1 pixel. In this case, the peak-fitting algorithm cannot accurately measure the average displacement of particles (Raffel et al., 2007; Adrian and Westerweel, 2011).

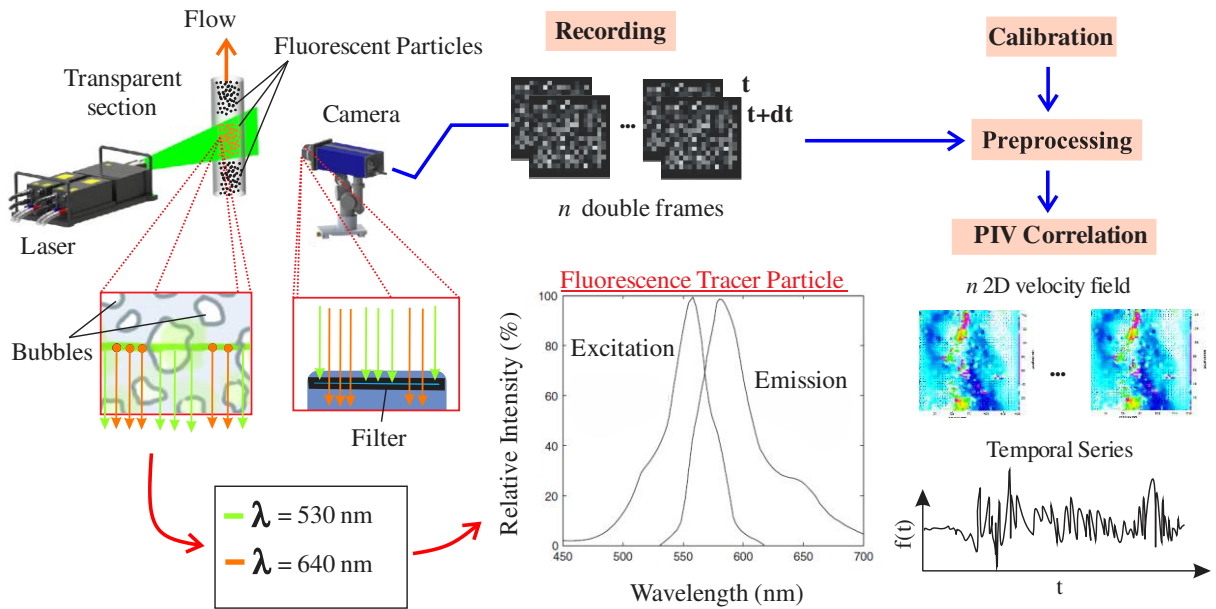


Figure 1 - Representation of a 2D-2C F-PIV system.

2.2. Error, noise and uncertainty in F-PIV

The accuracy of PIV measurement is based on a variety of aspects related to the recording and method of image evaluation. The absolute measurement error (Eq. 1) in the estimation of a single displacement vector, ε_{tot} , can be decomposed into a group of systematic errors, ε_{sis} , and a group of residual errors, ε_{resid} . In PIV systems, the systematic errors include all errors that arise due to inadequacy of the correlation method, such as its applications in areas of high

displacement gradients or inappropriate use of a sub-pixel peak estimator. Systematic errors follow a trend that makes them predictable so they can be reduced or removed. The residual errors remain in the form of a measurement uncertainty, even when all systematic errors have been removed (Raffel et al., 2007; Adrian and Westerweel, 2011).

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{sis} + \varepsilon_{resid} \quad (1)$$

In practice, however, it is not always possible to completely separate the systematic and residual errors. Each displacement vector is associated with a higher or lower estimate, known as the bias error. The vector also has some degree of random error or measurement uncertainty known as noise. Therefore, the total error (Eq. 2) can be expressed as the sum of bias errors, ε_{bias} , and random error (RMS), ε_{rms} (Raffel et al., 2007; Adrian and Westerweel, 2011).

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{bias} + \varepsilon_{rms} \quad (2)$$

Because determination of the PIV measurement error is extremely difficult, the range within which the error may occur, the so-called measurement uncertainty, is defined. The *a posteriori* uncertainty quantification by the uncertainty surface (US) method developed by Timmins et al. (2012) analyzes the recorded images to investigate the parameters that influence the PIV error. Monte Carlo simulations based on synthetic images were used to investigate the influence of particle image diameter, tracer particle concentration, image displacement and shear. In this method, an uncertainty surface is generated as a response to variation in each error source systematically tested in the correlation algorithm (Timmins et al., 2012; Wieneke, 2015; Sciacchitano et al., 2015).

The primary peak ratio (PPR) method developed by Charonko and Vlachos (2013) assumes that the peak ratio represents the effect of all the errors on the velocity field and an empirical relationship between the peak ratio and measurement uncertainty can be obtained (Eq. 3). This method also depends on the PIV correlation algorithm (Charonko and Vlachos, 2013; Wieneke, 2015; Sciacchitano et al., 2015).

$$\begin{cases} UQ = 0.28 \cdot PPR^{-0.17} & \text{for } PPR \leq 1.85 \\ UQ = 0.70 \cdot PPR^{-1.62} & \text{for } PPR > 1.85 \end{cases} \quad (3)$$

The particle disparity (PD) method (Sciacchitano et al., 2013) uses the measured velocity field as an indicator to correlate the recorded particle images by processing algorithms such as deformation and window offset. First, the particle image pairs in each interrogation window are found and then the particle image in one of the frames is shifted using the velocity field

obtained. In the ideal case (exact measurement), the particle images of the two recordings must match perfectly. In practice, the images of paired particles are not exactly matched (actual measurement) and a positional disparity map must be obtained. The measurement uncertainty is finally obtained from the average value and statistical dispersion of the vector disparity within the interrogation windows (Sciacchitano et al., 2013, 2015; Wieneke, 2015).

Similarly to the particle disparity method, the correlation statistics (CS) method is based on the difference between the intensity patterns of two interrogation windows. This method was proposed by Wieneke (2015). The difference between the two is that instead of identifying the contribution of individual particles, this method examines the overall contribution of the pixels to the correlation peak shape for SCC. The approach is based on the assumption that the PIV interrogation algorithm should always produce a symmetrical correlation peak after convergence. However, the symmetrical correlation peak arises from the contributions not only of correctly matched particle images but also of noise on the recordings. The contribution of the unmatched particle images produces the asymmetric shape of the correlation peak. The standard deviation of these contributions provides an estimate of the expected asymmetry due to image noise, which is related to the uncertainty of the displacement vector. In principle, this method takes into account all the factors that affect the correlation function, such as particle disparities, background noise and out-of-plane motion of the particles (Wieneke, 2015; Sciacchitano et al., 2015). Of the four methods (US, PPR, PD and CS), the correlation statistics (CS) approach provides the most accurate uncertainty estimates according to tests performed by Sciacchitano et al. (2013, 2015). Besides being used in the SCC approach of 2D-2C and 2D-3C PIV measurement, the main limitation of this method is that it is not sensitive to errors related to the image noise and out-of-plane motion of the tracer particles.

2.3. The measurement system

The F-PIV system used was developed by LaVision and has a CCD sensor (1376×1040 pixels and pixel pitch of $6.45 \mu\text{m}$) with a maximum frequency of 30 Hz and a Nd: YAG (200 mJ/pulse and $\lambda = 532 \text{ nm}$) laser system with a maximum frequency of 5 Hz. The cameras and the laser were controlled with a programmable time unit (PTU) and Davis 8.2.2 software. Figure 2a shows the layout of the acrylic bubble column with a 0.14 m diameter and a 1 m height. The column was filled with water at 298.15 K and the gas phase used was air with superficial velocities of 0.158, 0.528, 2.106 and $4.212 \times 10^{-2} \text{ m/s}$. The investigation area was located 0.552 m from the distributor and was $0.14 \times 0.10 \text{ m}$ (Fig. 2a and 2b). A plane plate with 21 holes (1

$\times 10^{-3}$ m in diameter) distributed equally in a square array (Fig. 2c) was used as an air distributor. The region immediately below the plate was filled with glass beads with an average diameter of 2×10^{-3} m in order to better distribute the air at the entrance.

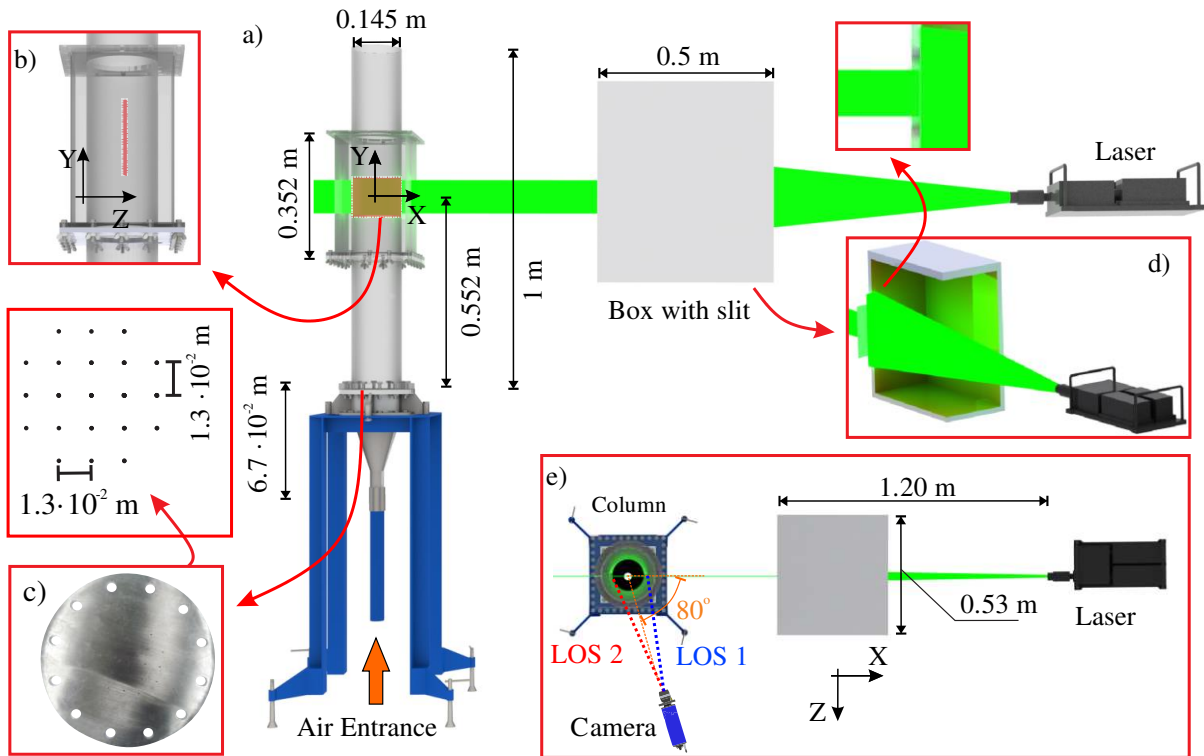


Figure 2 - (a) Column, laser system and box with slit. (b) Investigation area. (c) Air distributor with 21 holes. (d) Details of the box with slit. (e) Arrangement of the F-PIV system in the column.

The recording frequency used was 4.2 Hz. A Nikon objective lens with a focal length of 60mm ($f/2.8D$) was used in the camera. A lens with a focal length of 20 was used in the laser source to expand the light beam in order to obtain a laser sheet of a given thickness (1×10^{-3} m). A box with a 1×10^{-3} m thick slit located 1.20 m from the laser (Fig. 2d and 2e) was used to provide a homogeneous intensity profile (top-hat).

Rhodamine B (diameter of 20-50 μm) was used as tracer particle. A high-pass filter was employed on the camera to allow only the passage of light emitted by the tracer ($\lambda = 620$ nm). A calibration procedure was performed to correct the image distortions caused by the column curvature. The calibration average error was 0.981 pixel. Furthermore, the use of the box with the slit facilitated alignment of the laser light sheet with the calibrated plan. The CCD camera was positioned at 80° from the laser light sheet. The resolution of the imaging system was 12.5 pixels/mm and the particle image diameter was 2-3 pixels. The interframe time was 5×10^{-4} s

for a superficial gas velocity of 1.58×10^{-3} m/s and 1×10^{-3} s for those larger than 1.58×10^{-3} m/s, producing a maximum particle image displacement of 15-20 pixels. For each experiment, 4000 pairs of image frames were recorded for 952.38 seconds.

3. DATA PROCESSING

3.1. PIV processing

After recording the images, pre-processing was conducted with the sequential application of the RMS and SSM filters. A pixel intensity lower than 10 counts was defined as 0. A pixel intensity of 50 was used as the upper limit. For the PIV processing, the standard cross correlation (SCC) was done using a two steps interrogation strategy: first, using an interrogation window size of 256 pixels (50% overlap of adjacent windows) and second, one of 128 pixels (75% overlap of adjacent windows). The median test (Westerweel and Scarano, 2005) was used in the PIV post-processing to remove false vectors from the velocity field. According to the authors, a removal threshold of 2 is suitable for detecting false vectors in a neighborhood of 3×3 pixels. The quality of F-PIV measurements was analyzed using the cross correlation coefficient (CCC), signal-to-noise ratio (SNR) and uncertainty distribution estimated by the CS method.

3.2. Embedding noise and chaos analysis

The noisy signal present in PIV measurements cannot be ignored, especially in time series of velocity fluctuations in which the false vectors degrade the representation of the flow dynamics. In situations where the noise level is moderate, it is possible that the signal has a strong deterministic component, so separation of the noisy signal can be attempted without encountering major losses of information. In PIV data, the separation of noisy components can be done by means of spatial or temporal filters. However, the use of these filters in a bubble column, especially at high superficial gas velocities, can distort the original flow field, resulting in erroneous interpretations of the underlying dynamics.

It is important to estimate the level and nature of the noise in order to understand their possible effects on the techniques in general. However, estimating the noise level is not a simple task, especially in chaotic time series. Sivakumar et al. (1999) proposed an approach to systematically reduce the noise in chaotic series by coupling a method for determining the noise level with another for reducing noise. First, the noise level in data is estimated using the method

developed by Schouten et al. (1994) and then the noise is reduced according to the method of Schreiber (1993). In this approach, accuracy of prediction is considered the primary diagnostic tool to assess the success in reducing the noisy components. Other authors such as Broomhead and King (1986), Hammel (1990), Kostelich and Yorke (1990), Grassberger et al. (1991), Schreiber and Grassberger (1991), Sauer (1992), Davies (1994), Orzeszko (2008), Serletis (2008) and Sun et al. (2008) also worked on this subject to identify the influence of noise, reduction or both. According to van den Bleek and Schouten (1993), these methods should be used with caution because they can degrade the deterministic data components.

The time series of velocity fluctuations resulting from PIV measurement can be contaminated by noise to a greater or lesser degree. Noise can arise from either the measurement or the flow complex dynamics. In the first case, noise can be linked to the technical limitation by the temporal, spatial or intensity (bits) resolution. The dynamic noise induces major problems in processing and analysis, especially in the state space. According to Schouten et al. (1994), this type of noise arises from small random fluctuations in a feedback process that may be caused by the influence of intrinsic events on the dynamics occurring randomly (amount of bubbles and/or light scattering in the investigation area, for example). The consequences are directly reflected in the temporal evolution of the system, for example in the time series of velocity fluctuations. According to Kantz and Schreiber (1997), the noise effects are associated with the breakdown of self-similarity of the attractor in the state space and presented them as a high-dimensional system on a small scale. The correlation dimension is directly related to the shape of the attractor, which is the representation of a dynamic system in the state space. Knowing the problems and recognizing the effects on analytical techniques caused by noise provide an overview of quantitative and qualitative behavior of the real system dynamics (Sivakumar et al., 1999).

The noise also induces errors in calculating the correlation dimension, which is a major disadvantage in the quantification of chaos, especially when using the algorithm proposed by Grassberger and Procaccia (1983) in experimental time series. On the other hand, Schouten et al. (1994) proposed a method assuming that noise is strictly delimited in amplitude. Under the assumption that the experimental time series are to a greater or lesser degree contaminated by noise, the correlation integral represented by the power law $C(l) \approx l^D$ for the distance l free of noise is resized based on the maximum standard. Assuming the resizing of the distances and conservation of power law, one can write:

$$C(r') = \left[\frac{r' - r'_n}{1 - r'_n} \right]^D, r'_n \leq r' \leq 1 \quad (4)$$

In Eq. 4, $r' = l_z / l_0$ and $r'_n = l_n / l_0$ are normalized distances relative to the cutting length l_0 . In this case, l_z is the maximum distance from the vectors in the presence of noise, l_n is the maximum distance or amplitude noise and l_0 can be obtained from the mean absolute deviation of the time series. Normalizing the distances as described by Schouten et al. (1994) and using the maximum likelihood method of Takens (1985) for M observations, it is possible to obtain an estimate of the correlation dimension D_{ML} (Eq. 5) with minimum variance for a noisy attractor.

$$D_{ML} = \left[-\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln \left(\frac{r'_i - r'_n}{1 - r'_n} \right) \right]^{-1}, r'_n \leq r'_i \leq 1 \quad (5)$$

According to Schouten et al. (1994), the restructuring of the attractor distances tends to underestimate the noise level (r'_n). The authors suggested that the correlation dimension and noise level obtained from the normalizing distances (Eq. 4) were carried out in conjunction with the dimension obtained by maximum – likelihood proposed by Takens (1985). However, another simple way to analyze the noise level is to interpret the difference between the power law solutions $C(l) \approx l^D$ using Eq. 5. The values for this parameter can be obtained using the RRChaos software developed by Schouten and van den Bleek (1992), defined as DevML (standard deviation of the correlation integral). The DevML is used in this study to quantify the difference in the convergence of both D and D_{ML} solutions. The smallest positive value of DevML indicates how close the time series approaches a series that is uncorrupted by noise.

Thus, the DevML can be used as a quality indicator of the PIV measurements and can contribute directly to optimization of the experimental setup. The large-scale noise in the PIV measurements caused by the bubbles, inhomogeneous illumination and calibration error, for example, can be controlled and its effects attenuated more easily. In this case, temporal and spatial filters can be used, provided this does not change the characteristics of the original signal. On the other hand, the limits on the temporal and spatial resolution of the PIV system can result in small-scale noise with highly complex removal. Intrinsic events on this scale have a direct influence on noise, and thus compromise the evolution of the underlying phenomena and their representation. At this point, the importance of a joint analysis using the method developed by Schouten et al. (1994) and PIV statistics should be emphasized. By incorporating

the noisy trajectories in calculating the correlation dimension and identification of the noise level, it is believed that it is possible to obtain greater reliability in the analysis of the quality of velocity fields from PIV to represent the different dynamics occurring in a bubble column for different superficial gas velocities. Furthermore, it is believed that the chaos approach can be applied to processing conditions under which the majority of PIV quality indicators do not operate, such as, using PIV post-processing filters or another correlation (sliding cross-correlation or multi-frame pyramid correlation).

Chaos analysis was applied in the velocity module time series with 4000 points for superficial gas velocities of 0.158, 0.528, 2.106 and 4.212×10^{-2} m/s. in the radial positions $r/R = -1, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75$ and 1 (Figure 3). Figure 4 shows the time series of the velocity module for $r/R = 0$ for different superficial gas velocities.

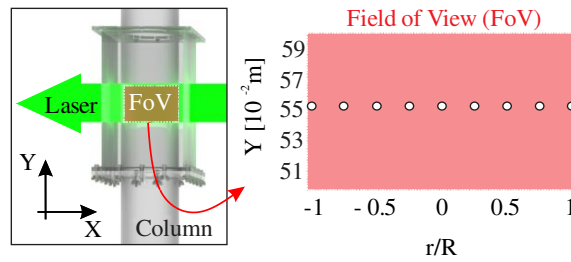


Figure 3 - Field of view and positions of extracted velocity time series.

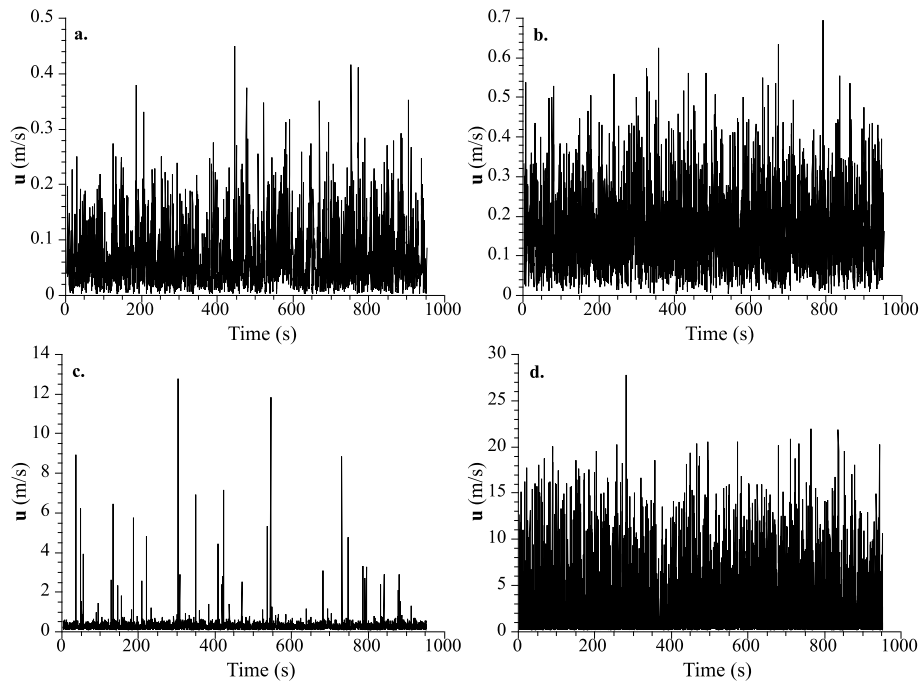


Figure 4 - Velocity module time series at $r/R = 0$ for superficial gas velocities of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s.

The correlation dimension (D_{ML}) was obtained using RRChaos software developed by Schouten and van den Bleek (1992). The sampling time was defined as the inverse of the image acquisition frequency and the cut-off length was set equal to the standard deviation of the time series of the velocity module. The maximum standard deviation in the calculation of D_{ML} was 1.0%. The embedding dimension (m) was set at 50, the same as that used by Letzel et al. (1997), Nedeltchev et al. (2006) and Nedeltchev et al. (2007). The correlation coefficient, SNR and uncertainty estimated by the CS method were compared with the results of the chaos analysis proposed in this work.

3.3. Number of data points and acquisition frequency

An important question is how many pairs of frames (images), N_F , are required to obtain a given accuracy of the time average or other statistical property of the flow. The sampling error ε_a is proportional to $N_F^{-1/2}$, assuming that the measurements are independent (uncorrelated). However, an effective number of pairs of frame $N_{F_{eff}}$ (Eq. 6) must be used when the measurements are dependent (correlated). In this case, the autocorrelation coefficient between two samples $\rho(n\Delta t)$ is considered for an interval Δt and time step n . $\sum_{-\infty}^{+\infty} \rho(n\Delta t) > 1$ and consequently $N_{F_{eff}} < N_F$ when the measurements are correlated (Raffel et al., 2007; Adrian and Westerweel, 2011; Sciacchitano and Wieneke, 2016).

$$N_{F_{eff}} = \frac{N_F}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \rho(n\Delta t)} \quad (6)$$

Ideally, $N_F \rightarrow \infty$ in order that $\varepsilon_a \rightarrow 0$. Experimentally, the choice of N_F is limited by the operating and safety conditions of the equipment investigated. Furthermore, PIV experiments with long-term data acquisition can cause instability in the camera, laser or synchronizer. This instability was observed in our PIV system for $N_F > 4000$, causing oscillations in the laser. The energy of the laser light pulses varies considerably, causing regions with inhomogeneous illumination and thus interfering with the particle image concentration and consequently the quality of the PIV measurements. In addition, this instability can cause oscillation in the data acquisition frequency, i.e., the images collected by the system might have

more noise when using $N_F > 4000$. In this case, convergence of the statistical parameters is hardly obtained, since the sampling error ε_a is affected by measurement fluctuation and error (noise).

The relative deviation of the time-averaged velocity modulus \mathbf{u}_a (Eq. 7), calculated using the EC approach, was used to investigate the convergence for different U_G . In Eq. 7, \mathbf{u}_{4000} and \mathbf{u}_{N_F} are the time-averaged velocity modulus for 4000 and N_F frames, respectively. Table 1 shows that the values of \mathbf{u}_a were lower than 3% for $N_F > 3000$. The highest value of \mathbf{u}_a for $U_G = 0.152 \times 10^{-2}$ m/s is directly related to the heterogeneous movement of the liquid phase due to the passage of a few bubbles in the column. This behavior is detailed in section 4. Table 2 shows some authors who investigated the liquid phase velocity in a bubble column using PIV and $N_F < 4000$ and different sampling frequencies f_a .

$$\mathbf{u}_a = Abs \left(\frac{\mathbf{u}_{4000} - \mathbf{u}_{N_F}}{\mathbf{u}_{4000}} \right) \quad (7)$$

Table 1 - Relative deviation of the time-averaged velocity modulus \mathbf{u}_a , calculated using the EC approach for different N_F and U_G .

U_G [10^{-2} m/s]	N_F [10^3]				
	0.5	1.0	2.0	3.0	3.5
0.152	14.7%	10.0%	6.3%	2.7%	1.2%
0.528	5.0%	4.0%	2.1%	0.4%	0.7%
2.106	2.1%	1.5%	0.9%	0.4%	0.3%
4.212	4.2%	3.0%	1.5%	0.8%	0.5%

Table 2 - Previous studies on the liquid phase velocity in a bubble column by PIV using $N_F < 4000$ and different sampling frequencies f_a .

Authors	N_F	f_a (Hz)
Deen et al. (2000)	300	0.33
Sommerfeld and Broder (2009)	500	0.2
Liu et al. (2005)	500	15
Seo and Socolofsky (2008)	600	4.0
Broder and Sommerfeld (2002)	2000	1.7

In chaos analysis, accuracy in calculating the correlation dimension is directly proportional to the number of observation pairs M (in this case $M = N_F$). According to Schouten et al. (1994), there is no clear rule for estimating the value of M . The authors recommended that the relative standard error based on the maximum likelihood estimator proposed by Takens (1985) should be taken into account in estimating the total number of observation pairs. According to Takens (1985), the estimated error in the calculation of the correlation dimension is obtained directly by $M^{-1/2}$ using only a finite data number and a noise-free attractor. This error is independent of the calculation of D_{ML} (Eq. 5) and noise level. In this case, the relative standard error is approximately 1.58% for the conditions used in this work ($M = N_F = 4000$). According to Schouten et al. (1994), the use of 10000 observation pairs (frames) are recommended in order to obtain a relative standard error of 1%. In this work, the recommended value of M cannot be used due to the limitations of the PIV system as mentioned previously.

An alternative for the prediction of M is the criterion proposed by Ruelle (1990). This criterion considers the algorithm developed by Grassberger and Procaccia (1983) for calculating the correlation dimension for noise-free attractors. In this case, the highest precision in calculating the correlation dimension is obtained when $M = 10^{D/2}$. This criterion results in $M \geq 3000$ observation pairs for low-dimensional attractors (e.g., $D \leq 7$). Bai et al. (1997) considered $M = 4000$ observation pairs sufficient for characterization of the chaotic behavior of the flow in a fluidized bed using the same criterion. Hay et al. (1995) also used a low value of M , in which 5000 observation pairs were sufficient to characterize a fluidized bed by chaos analysis. Furthermore, the authors also observed that the value of the correlation dimension remained almost constant with increasing M and different operating conditions. Drahoš et al. (1992) consider that $M \geq 2500$ observation pairs were sufficient for a fractal analysis in a bubble column. Nedelchev et al. (2007) used $M = 5000$ observation pairs and $f_a = 1$ Hz to identify the regime transition velocities in a bubble column by chaos analysis. In this work, the D_{ML} results for the PIV velocity modulus provide $M \geq 3000$ as an appropriate estimate.

Another point to be considered is the complex dynamics of a bubble column, which consists in the formation of different flow structures such as vortices of different scales, bubbles coalescence and recirculation zones of the liquid phase. Identification of the characteristic

frequency of these structures is important for establishing a range of dominant frequencies of the flow, contributing to the adequate choice of f_a . Tzeng et al. (1993) qualitatively studied the macroscopic structures of the flow in a bubble column with a rectangular cross-section (known as a 2D column) using image recordings under different experimental conditions. The authors observed four characteristic regions: descending flow, vortical flow, fast bubble flow and central plume. Chen et al. (1994) and Lin et al. (1996) confirmed these structures using PIV in a 2D and a 3D bubble column, respectively. According to the authors, one of the main differences observed was the spiral motion of the liquid in the central plume region in the 3D column, while undulatory movements occurred in the 2D column. According to Lin et al. (1996), all four regions can be explained based on the velocity of these undulations. Therefore, the frequency of undulatory movement can be achieved by counting the number of vortices passing through a particular location on the column wall. Lin et al. (1996) observed that the frequency of these movements was less than 0.5 Hz for different column widths using $U_G = 0.001 - 0.06$ m/s. Olmos et al. (2003) also observed the same order of frequency. The authors analyzed a 2D bubble column ($0.2 \times 1.2 \times 0.04$ m) using laser doppler velocimetry (LDV) for $U_G = 0.005 - 0.085$ m/s. In the heterogeneous regime, the oscillations of the central plume region had a frequency of 0.5 Hz. Furthermore, frequencies close to 3 Hz were identified in the homogeneous regime. Except for the formation of bubbles, Drahoš et al. (1991) also evidenced low frequencies for different flow structures in a 3D column (Table 3).

Table 3 - Phenomena observed in a bubble column and their characteristic frequencies (Drahoš et al., 1991).

Source	Order of characteristic frequencies (Hz)
Formation of bubbles	$> 10^1$
Passage of bubbles	$10^0 - 10^1$
Coalescence of bubbles	10^0
Large-scale eddies	10^{-1}
Medium-size eddies	10^0
Liquid-level fluctuations	$10^{-2} - 10^{-1}$

However, Bouche et al. (2014) and Alméras et al. (2016) observed that the effect of the formation of the bubbles (in a 2D bubble column 0.4 wide \times 0.8 m high) is minimal for a region far from the gas distributor. These authors used PIV and laser-induced fluorescence (LIF), respectively, and they found a more homogeneous gas volumetric fraction at a distance of 0.36

m above the gas distributor. Therefore, in this work, the effect of the formation of bubbles has no significant influence on the area under investigation, which is located 0.552 m from the distributor (Fig. 2). In Table 4 details are presented for some studies in which low frequencies were observed in the identification of different flow structures or regimes.

Table 4 - Experimental studies identifying characteristic frequencies in flow structures of a bubble column.

Authors	Measurement Technique	i.d. (m)	U_G (m/s)	Source	Characteristic frequencies (Hz)
Drahoš and Čermák (1989)	Pressure transducers	0.3	0.04	- Formation of bubbles - Small-scale eddies - Large-scale liquid circulation	5.7 1.3 - 2.8 0.6
Drahoš et al. (1991)	Pressure transducers	0.292	0.07 - 0.1	- Homogeneous regime - Transition regime - Turbulent regime	10^{-2} 10^{-2} 3
Letzel et al. (1997)	Pressure sensors	0.19	0.117	- Formation of bubbles - Large-scale liquid circulation	1 - 10 10^{-1}
Mudde et al. (1997)	LDA	0.23	0.044	- Vortical structures of large size	0.1 - 0.2
Mudde and Van Den Akker (1999)	LDA	0.152	0.0009 - 0.04	- Bubble clusters and vortical structures	< 0.1

Considering the studies shown in Table 4, it is possible to ensure that the f_a used in this work includes the frequencies of the dominant structures in the flow of the liquid phase. To conclude this discussion, the investigation of the flow performed by Letzel et al. (1997) using high-frequency pressure sensors ($f_a = 200 - 800$ Hz) agreed with the analyses of Chen et al. (1994) and Lin et al. (1996), who used a PIV system and $f_a = 0.017$ Hz. Moreover, low-dimensional chaotic behavior was evidenced by Letzel et al. (1997), who also found low-frequency regimes dominated by large bubbles in the power spectrum analysis.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 shows the distributions of time-averaged velocity, \mathbf{u} , uncertainty, UQ_u , cross-correlation coefficient, CCC, and signal-to-noise ratio, SNR, for superficial gas velocities of 0.158, 0.528, 2.106 and 4.212×10^{-2} m/s along the radius.

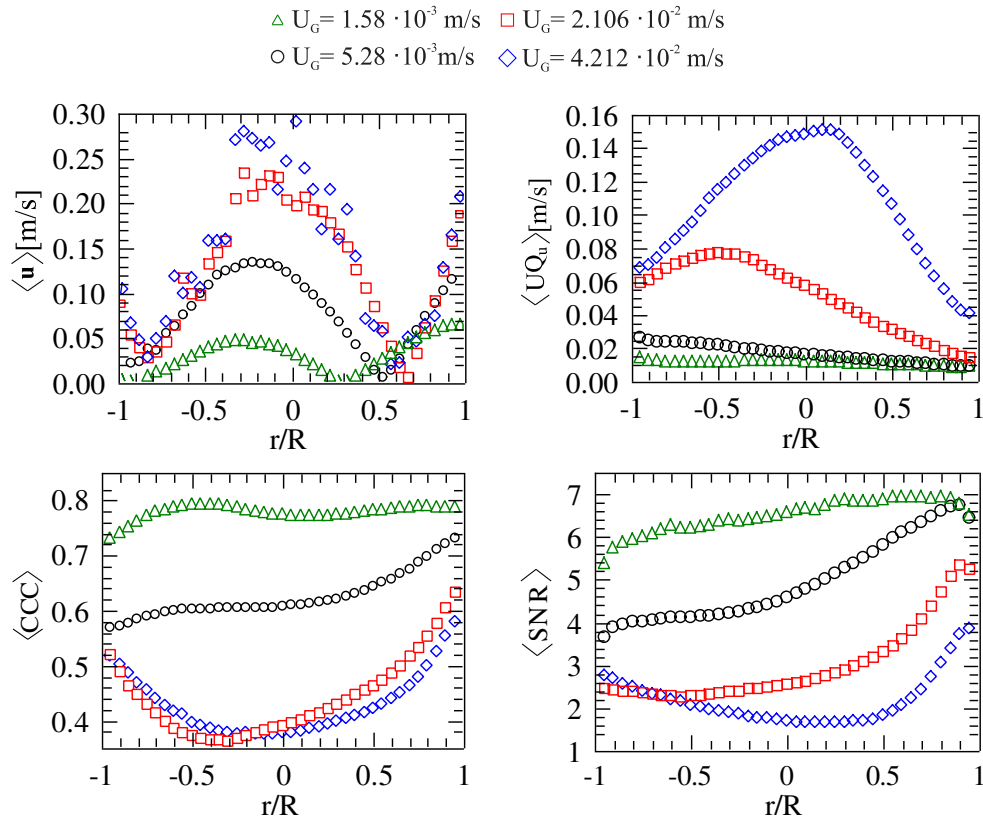


Figure 5 - Distributions of (a) time-averaged velocity, $\langle \mathbf{u} \rangle$, and (b) its uncertainty, $\langle U_{Q_u} \rangle$, estimated by the CS method. Distribution of (c) time-averaged cross-correlation coefficient, $\langle CCC \rangle$, and (d) signal-to-noise ratio, $\langle SNR \rangle$.

Figure 5a shows that the profile of time-averaged velocity, $\langle \mathbf{u} \rangle$, is not symmetrical and the velocity at each interrogation window (each point on the graph) is not coherent with its neighborhood along the radius in the case of the two higher superficial gas velocities. This can be analyzed by the high uncertainty of the velocity in Fig. 5b. The CS method considers the shape of the PIV correlation peak, disregarding the PIV correlation coefficient (Fig. 5c) and SNR (Fig. 5d). The uncertainty of time-averaged velocity, $\langle U_{Q_u} \rangle$, increases from $r/R = 1$ to -1 and with increasing U_G , except for 2.106 and $4.212 \times 10^{-2} \text{ m/s}$. The bubble concentration in the column increases with increasing U_G , causing a non-uniform illumination of the laser light in the investigation area due to the light scattering. The light emitted by the Rhodamine is scattered by the bubbles located in front of the investigation area, compromising the recording of particle images on the CCD sensor. The trajectory taken by the light emitted by the tracer is also important in the analysis of the PIV measurement quality. The light emitted by the tracer particles traveling along the LOS1 (line-of-sight 1, Fig. 2e) trajectory moves on a shorter path than along the LOS2 trajectory, interacting with a smaller amount of bubbles that are located in

front of the light sheet. This effect can be seen in the vector field of $\langle \mathbf{u} \rangle$ for the different U_G in Fig. 6. The velocity vector in an interrogation window which is not coherent with its neighborhood, i.e., has a quite different value, is considered as a false vector. One way to correct false vectors is by comparing an interrogation window with its neighborhood in a PIV post-processing. The PIV sum of correlation or ensemble correlation (EC) method is used to estimate the time-averaged velocity field and can provide reliable measurements under low SNR conditions, where the SCC method fails (Meinhart et al., 2000).

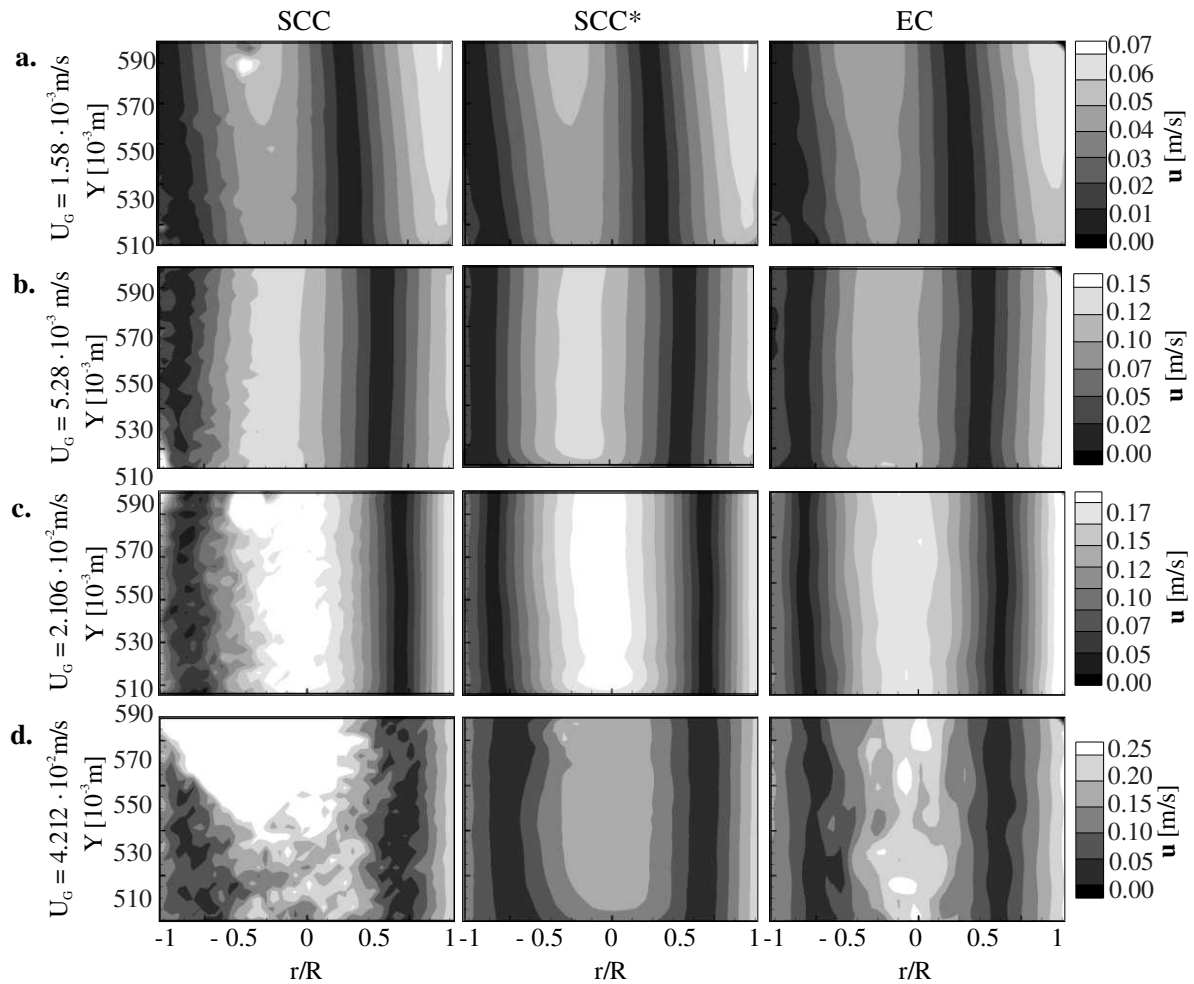


Figure 6 - Comparison between the average velocity fields calculated by the SCC, SCC* and EC methods for U_G of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s using 4000 images.

In Fig. 6 it can be observed that the average fields, both with and without PIV post-processing using the SCC method (SCC and SCC*), are similar for the cases of $U_G = 1.58$ and 5.28×10^{-3} m/s. However, the PIV post-processing interferes strongly for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s. In other words, the number of false vectors increases with increasing U_G , and consequently

the performance of the PIV post-processing is compromised. Simulations done by Keane and Adrian (1990, 1992) show that the amount of tracer illuminated in the flow affects the quality of the vector field. Additionally, the authors show that to obtain a good-quality PIV measurement, it is necessary to have at least five particle image pairs correlated in the interrogation window.

Figure 7a shows the distribution of the correlation dimension (D_{ML}) in the radial positions for different U_G . The D_{ML} behavior for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s without and with PIV post-processing (SCC and SCC*) follows the same trend with only a small difference at the radial position $r/R = -1$. This analysis is consistent with the results shown in Fig. 5, in which the neighborhood coherence of the velocity profile is maintained (Fig. 5a) with a high value of the correlation coefficient along the radius (Fig. 5c). However, for $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s, a difference in the complexity level of the system in the radial section located from $r/R = 0$ up to -1 can be observed. This is aggravated when the velocity is increased to 4.212×10^{-2} m/s, where differences are evident through the cross-section of the radial profiles, except for $r/R = 1$. The D_{ML} calculated from the fields with PIV post-processing (SCC*) varied less along the radius than those calculated from the fields without PIV post-processing (SCC). A possible explanation arises from the spatial interpolation of the interrogation windows that do not have any vectors. In addition, the PIV post-processing filter developed by Westerweel and Scarano (2005) uses the principle of neighborhood connectivity to correct the areas that have false vectors, which may result in erroneous interpretations of the flow. This behavior can be observed for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s (Fig. 6d).

For low U_G , the D_{ML} analysis shows greater sensitivity in SCC* than with the SCC. The difference between the D_{ML} values from SCC and SCC* is directly related to the noise level in the time series. Fig. 7b shows that the behavior of the DevML profiles is similar to that of the D_{ML} despite the effects of PIV post-processing. This is a sign that noisy components exist. When the curves for the velocity fields from SCC and SCC* are close, this means that there is a convergence in both dimensions (D , power law and D_{ML} , Eq. 5), which suggests that the noise level is low. Examples of the correlation integral convergence are shown in Fig. 8 at the radial positions $r/R = 0.75$ and 1 for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s using SCC (Fig. 7). In this case, the states of nonconvergence and of convergence are distinct, i.e., there is a greater uncertainty at the position $r/R = 0.75$ than at the position $r/R = 1$.

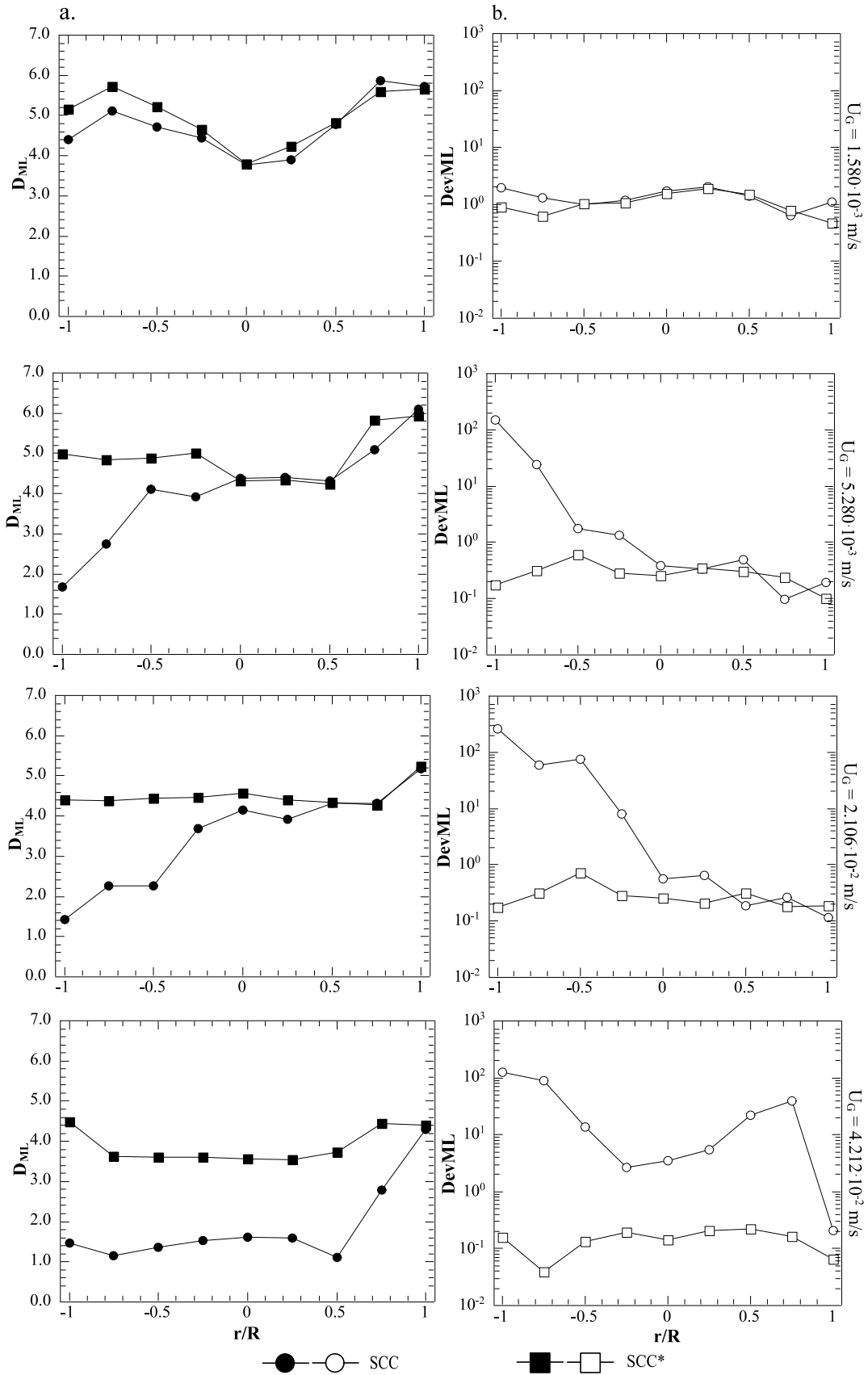


Figure 7 - (a) Correlation dimension and (b) standard deviation of the correlation integral in the analysis of the velocity module of the liquid.

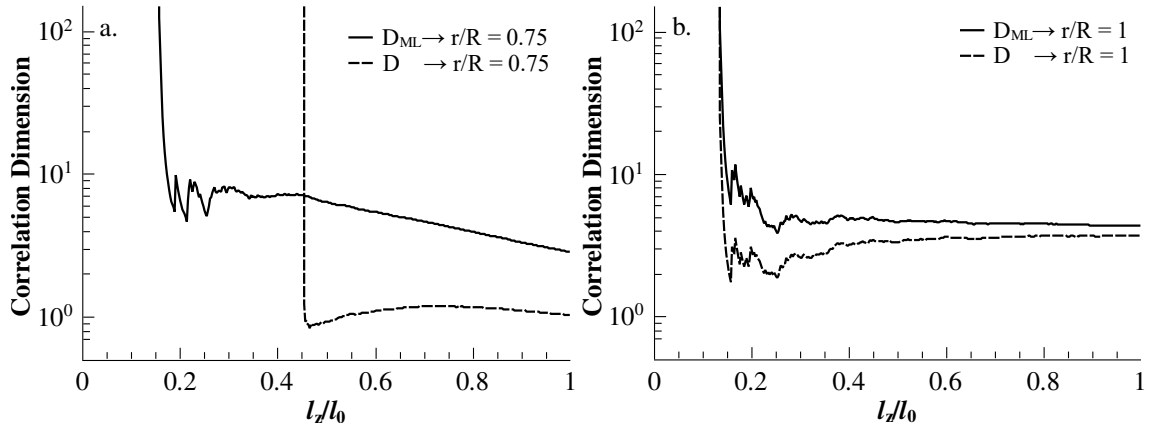


Figure 8 - Comparison of the positions $r/R = 0.75$ and 1 for the convergence of the correlation integral for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s using SCC.

In analyzing the DevML profiles, it can be observed that for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s both curves (SCC and SCC*) show similar behaviors near the column center and small differences in behavior near the walls (Fig. 7b). The low values of DevML (close to zero) in this case imply that there is a homogeneous distribution of noise for both solutions throughout the cross-section of the column. For $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s, the biggest differences in DevML are located in the left region of the column. In the case of $U_G = 5.28 \times 10^{-2}$ m/s, noise has a significant effect from $r/R = -1$ to 0 . This effect is extended up to $r/R = 0.5$ for $U_G = 2.106 \times 10^{-2}$ m/s. The situation becomes more critical for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s, where the noise effect occurs in almost the entire cross-section of the column, with the exception of $r/R = 1$. One possible explanation for this occurrence is that there is a large amount of bubbles in the investigation area, making laser light penetration more difficult and thereby compromising the acquisition of data. At this point it is worth observing that caution is required in the use of filters to minimize the effects of noise in velocity fields.

In order to evaluate the presence of noise in the horizontal and vertical velocity components (u and v , respectively), Figs. 9 and 10 show the time-averaged velocity profiles determined using different methods for the U_G analyzed. It can be seen that the uncertainty (bar) and lack of coherence of $\langle u \rangle$ and $\langle v \rangle$ with their neighborhood (false vectors) increase from $r/R = 1$ to -1 for $U_G = 0.158$, 0.528 and 2.106×10^{-2} m/s. For $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s, the highest uncertainty and largest number of false vectors can be found at the center of the column. The difference between $\langle u \rangle$ and $\langle v \rangle$, calculated by the SCC and EC methods, also increases in the direction from $r/R = 1$ to -1 . This difference becomes much smaller when using PIV post-processing (SCC*) for $U_G = 0.158$, 0.528 and 2.106×10^{-2} m/s. It is important to observe that

the wall condition is not satisfied, mainly in the case of the vertical velocity component. With increasing U_G , the distributor effect becomes irrelevant and therefore the vertical velocity distribution of the liquid becomes more symmetrical. For all U_G , it is possible to observe that the area close to $r/R = 1$ has a higher negative value for $\langle v \rangle$ than that close to $r/R = -1$. It is also possible to identify an area of high liquid recirculation, represented by the highlighted region between the maximum and minimum velocities in Fig. 10.

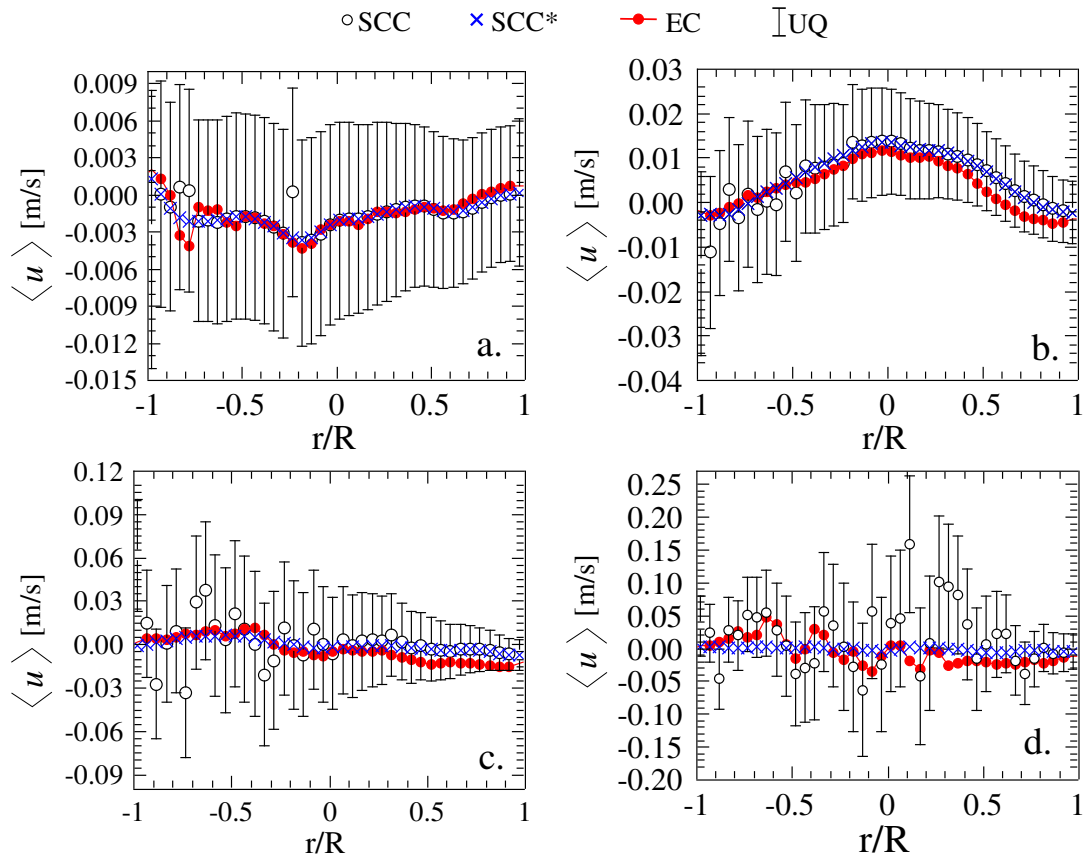


Figure 9 - Time-averaged horizontal velocity component $\langle u \rangle$, determined by the SCC, SCC* and EC methods for U_G of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s.

The ideal (noise-free) situation for a PIV measurement is where the absolute value of the normalized uncertainty for the respective velocity ($UQ_x^* = \text{Abs}(UQ_x/u)$ and $UQ_y^* = \text{Abs}(UQ_y/v)$) is zero. To evaluate this, Fig. 11 shows the time-averaged profiles of UQ_x^* and UQ_y^* ($\langle UQ_x^* \rangle$ and $\langle UQ_y^* \rangle$) for the four U_G investigated. The highlighted dark region indicates an estimated velocity uncertainty of less than 10%. It can be observed that $\langle UQ_y^* \rangle$ is smaller than $\langle UQ_x^* \rangle$ in most radial positions, showing larger differences for $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s. This effect may be related to the detectability of the PIV correlation peak in the X and Y direction of the rising bubbles.

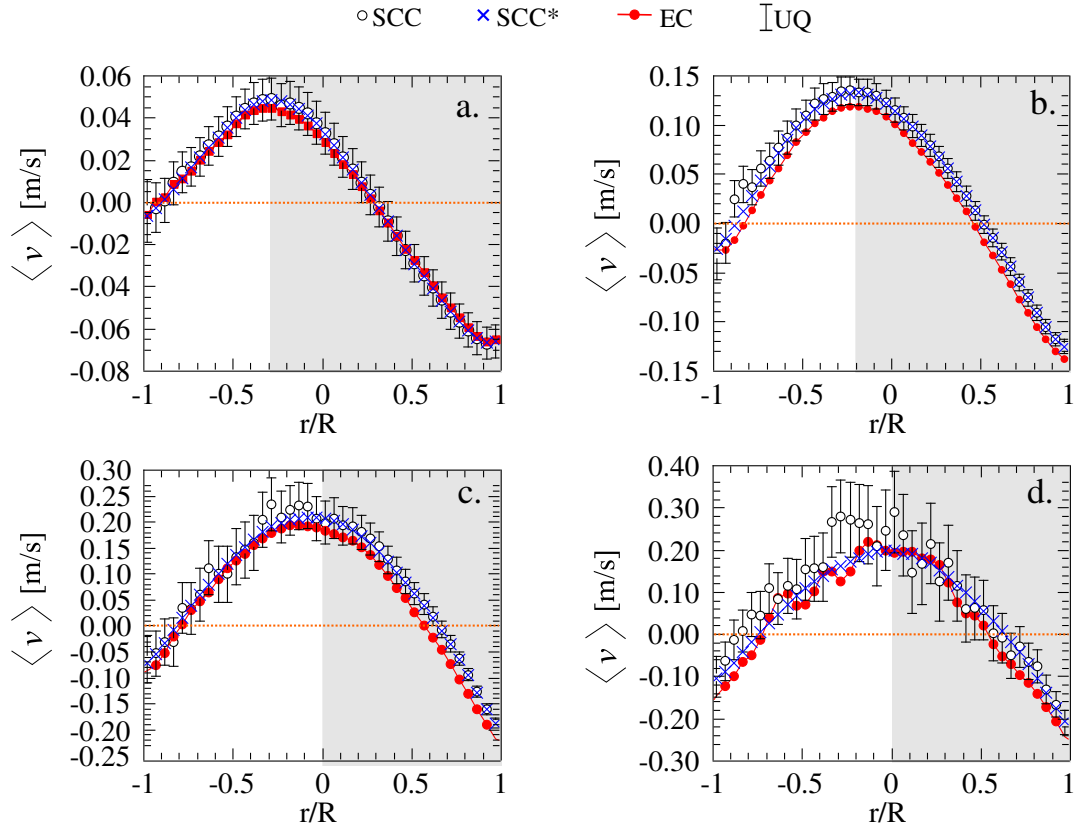


Figure 10 - Time-averaged vertical velocity component $\langle v \rangle$, determined by the SCC, SCC* and EC methods for U_G of (a) 0.158, (b) 0.528, (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s. The highlighted region represents the area with high liquid recirculation.

The bubble wakes diffusing in the liquid phase can be clearly identified by the pair of vortices in the vorticity field (Fig. 12b). In regions closer to the bubble wakes (Points 1 and 2), the velocity gradient increases, inhibiting determination of the two component displacements. The existence of two extreme regions, with a wide range of minimum and maximum velocities, makes it difficult to select the interframe time (dt) for a double-frame PIV system. However, P3 and P4 are points that are not located very close to the bubbles, and it may be easier to determine the particle image displacement in the Y direction (axial) than in the X direction (radial) by the PIV technique. A wide velocity range in the flow requires a higher dynamic velocity range (DVR) in the PIV system. According to Adrian (1997), DVR is the ratio between the maximum and the minimum velocity resolved by the technique. The double-frame PIV used in this work is considered to be a system with a low DVR. The low DVR can explain the behavior observed in Fig. 11a. The unequal distribution of the bubbles increases the velocity range of the flow. This is observed for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s relative to other superficial gas velocities. For $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s, the bubbles are equally distributed, thus

decreasing the difference between the maximum and minimum velocity regions, except in areas near the wake regions. This is reflected in the better quality of the measurement for $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s than that for 1.58×10^{-3} m/s. However, the measurement quality for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s was as poor as that for 1.58×10^{-3} m/s. This is due to the effect caused by the presence of a large amount of bubbles.

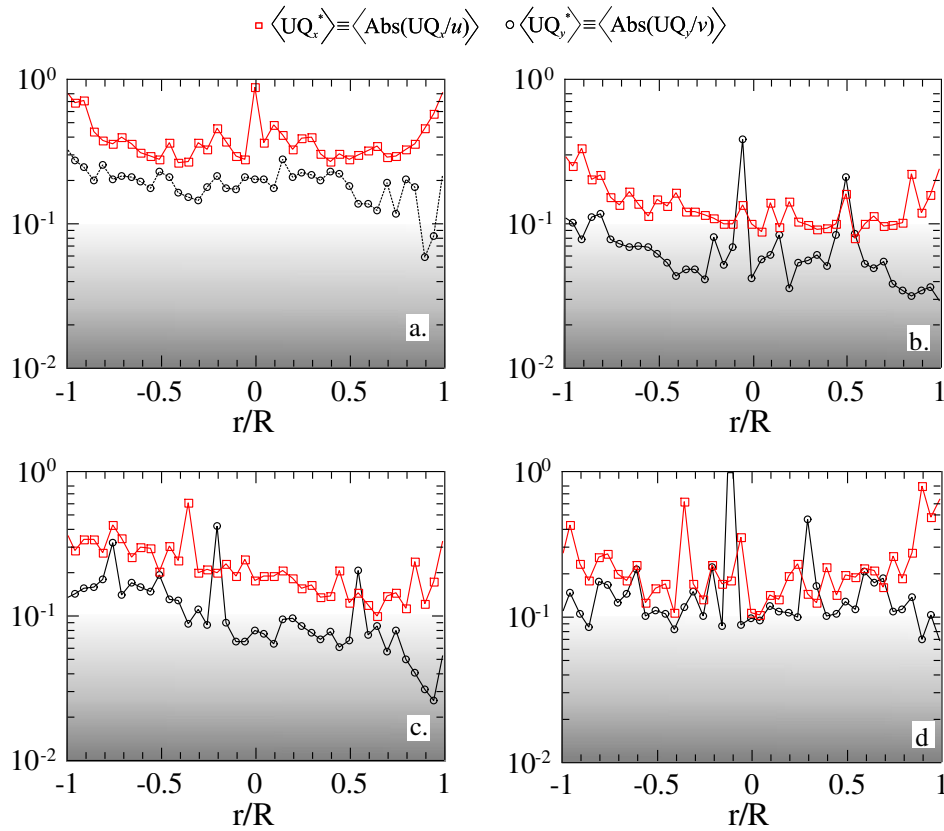


Figure 11 - Distribution of $\langle UQ_x^* \rangle$ and $\langle UQ_y^* \rangle$ along the column radius for (a) $U_G = 0.158$, (b) 0.528 , (c) 2.106 and (d) 4.212×10^{-2} m/s.

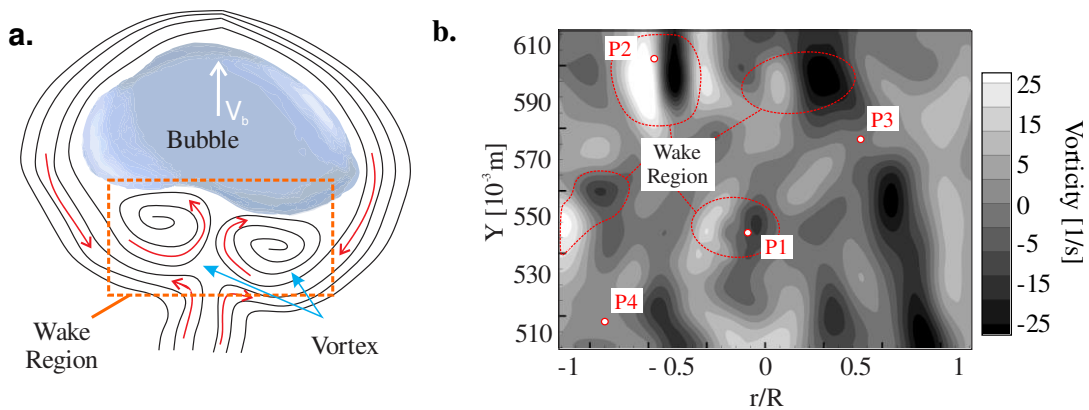


Figure 12 - (a) Wake region of the bubbles detailing the pair of vortices (b) Instantaneous vorticity field for $U_G = 5.28 \times 10^{-3}$ m/s.

The effect of the wake regions on the instantaneous horizontal and vertical velocity, u and v , for $U_G = 2.106 \times 10^{-2}$ m/s can be seen in Fig. 13. The highlighted regions show some absolute values of velocity between 4 and 11 m/s which are not coherent with the neighborhood. This effect can be observed by identifying the maximum values of $\text{abs}(u)$ and $\text{abs}(v)$ obtained from 4000 instantaneous fields, as shown in Fig. 14. A lack of coherence is observed when the horizontal and vertical velocities are greater than 2, 3, 4 and 4 m/s for $U_G = 0.158, 0.528, 2.106$ and 4.212×10^{-2} m/s, respectively. For $U_G = 1.58$ and 5.28×10^{-3} m/s, the values greater than 2 and 3 m/s were found between $r/R = -1$ and 0. For $U_G = 2.106 \times 10^{-2}$ m/s, the values greater than 4 m/s were found between $r/R = -1$ and 0.75. The values above 4 m/s were observed at practically all radial positions for $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s. In addition to the wake region, this effect may be directly related to the illumination and distortion caused by the presence of bubbles.

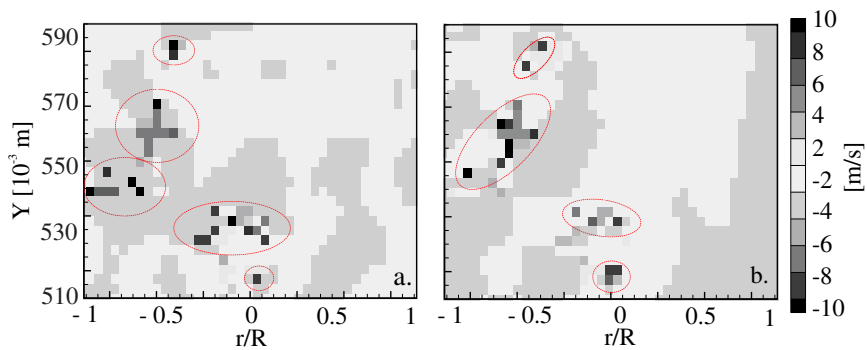


Figure 13 - Instantaneous (a) horizontal and (b) vertical velocity field, u and v , without interpolation for $U_G = 2.106 \times 10^{-2}$ m/s.

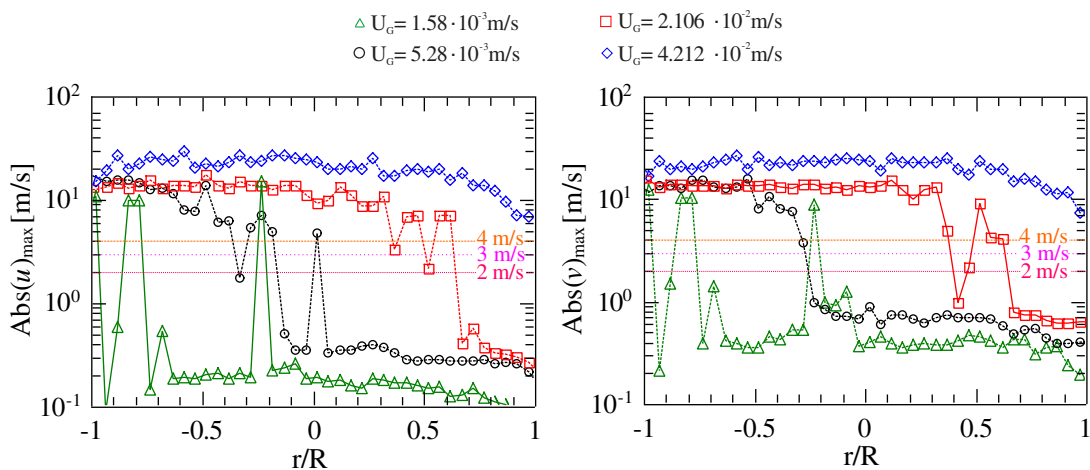


Figure 14 - Distribution of the maximum absolute value of horizontal and of vertical velocity, $\text{Abs}(u)_{\text{max}}$ and $\text{Abs}(v)_{\text{max}}$, from the time series along the column radius.

Figure 15 shows the values of D_{ML} and Dev_{ML} for horizontal and vertical velocity (u and v). For $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s, it was possible to observe that for both u and v the D_{ML} distributions behave similarly, i.e., the degree of freedom increases from $r/R = -1$ up to 1, except for v at $r/R = 1$ and $U_G = 2.106 \times 10^{-2}$ m/s. This suggests a greater complexity at the position near the wall ($r/R = 1$). According to Lin et al. (1996), this region near the column wall is characterized by instabilities caused by liquid recirculation and the formation of vortices with various eddies that drag small bubbles. Moreover, it is possible to observe higher values of D_{ML} for v than for u at $r/R = \pm 1$ with the predominance of axial movements. In Fig. 15b, the distributions of Dev_{ML} show that the data from $r/R = 0$ to -1 are noisier. This fact is also observed in Figs. 9b, 9c, 10b and 10c, where UQ for $\langle u \rangle$ and $\langle v \rangle$ decreased from $r/R = -1$ to 1.

For $U_G = 4.212 \times 10^{-2}$ m/s, the D_{ML} distributions behave differently from those for $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s, since the velocity profile is more symmetrical. The values of D_{ML} decrease from $r/R = -1$ to -0.5 and increase from $r/R = 0.5$ to 1. Between $r/R = -0.5$ and 0.5 , the values of D_{ML} remained practically constant. It can also be observed that the values for u are lower than those for v . At the position $r/R = 1$ the values of D_{ML} are higher than at $r/R = -1$, which is directly related to the recirculation region of the liquid, as observed in Fig. 10d. In a high-dimensional system, such as complex flows, the presence of noise can result in misinterpretation of the underlying dynamics, thereby masking the real value of the correlation dimension. It is worth mentioning that low D_{ML} values may indicate the presence of noise, since high values of UQ were observed in Figs. 9d and 10d. Furthermore, the Dev_{ML} values in Fig. 15b remain constant and with high noise levels from $r/R = -1$ to 0.5 and then decrease at $r/R = 1$.

The distributions of D_{ML} for vertical and horizontal velocities in the case of $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s are considerably different. There are two possible reasons for this: (1) there are some errors in the PIV measurements or (2) the flow dynamics are more complex in this case. The first possibility is directly related to distortion of the bubbles, uneven illumination of the investigated area and low DVR, as discussed previously. The second possibility can be analyzed directly by D_{ML} behavior. Gu et al. (1999) observed more complex flow dynamics when using low U_G in a bubble column, which according to them, is caused mainly by the greater unpredictability of movement of the bubbles. Letzel et al. (1997) and Vial et al. (2000) observed this same behavior. The opposite was also observed by the authors when U_G was increased. Although the appearance of vortices is not a regular behavior, they seem to add more structure to the flow dynamics, implying lower D_{ML} values and a possible regime transition.

Therefore, in Fig. 15a it can be observed that for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s the values of D_{ML} are not significantly different from those for other U_G . This suggests that D_{ML} behavior is directly related to the quality of PIV measurement, i.e., the possibility of failure to represent the underlying dynamic of the flow is high. As discussed above, the preferential paths caused by the passage of small amounts of bubbles increase the velocity range in the flow, and this makes it more difficult to determine the horizontal and vertical velocities by PIV (peak detectability and DVR) at some radial positions. This can be seen in the distribution of Dev_{ML} for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s, where the value of Dev_{ML} is equal to or greater than that for $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s at $-0.5 < r/R \leq 1$. Note that if the distortion of the bubbles and uneven illumination in the investigation area were the factors determining the quality of PIV measurement, then the Dev_{ML} values for $U_G = 0.528$ and 2.106×10^{-2} m/s would be higher than those for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s at all points. Therefore, it is evident that it is difficult to choose an ideal interframe time, dt , at which a double-frame PIV system (with a low DVR) can obtain high quality results on all the movement in the investigated area for $U_G = 1.58 \times 10^{-3}$ m/s. In this case, the error caused by the distortion was smaller and the illumination was more homogeneous than with other U_G .

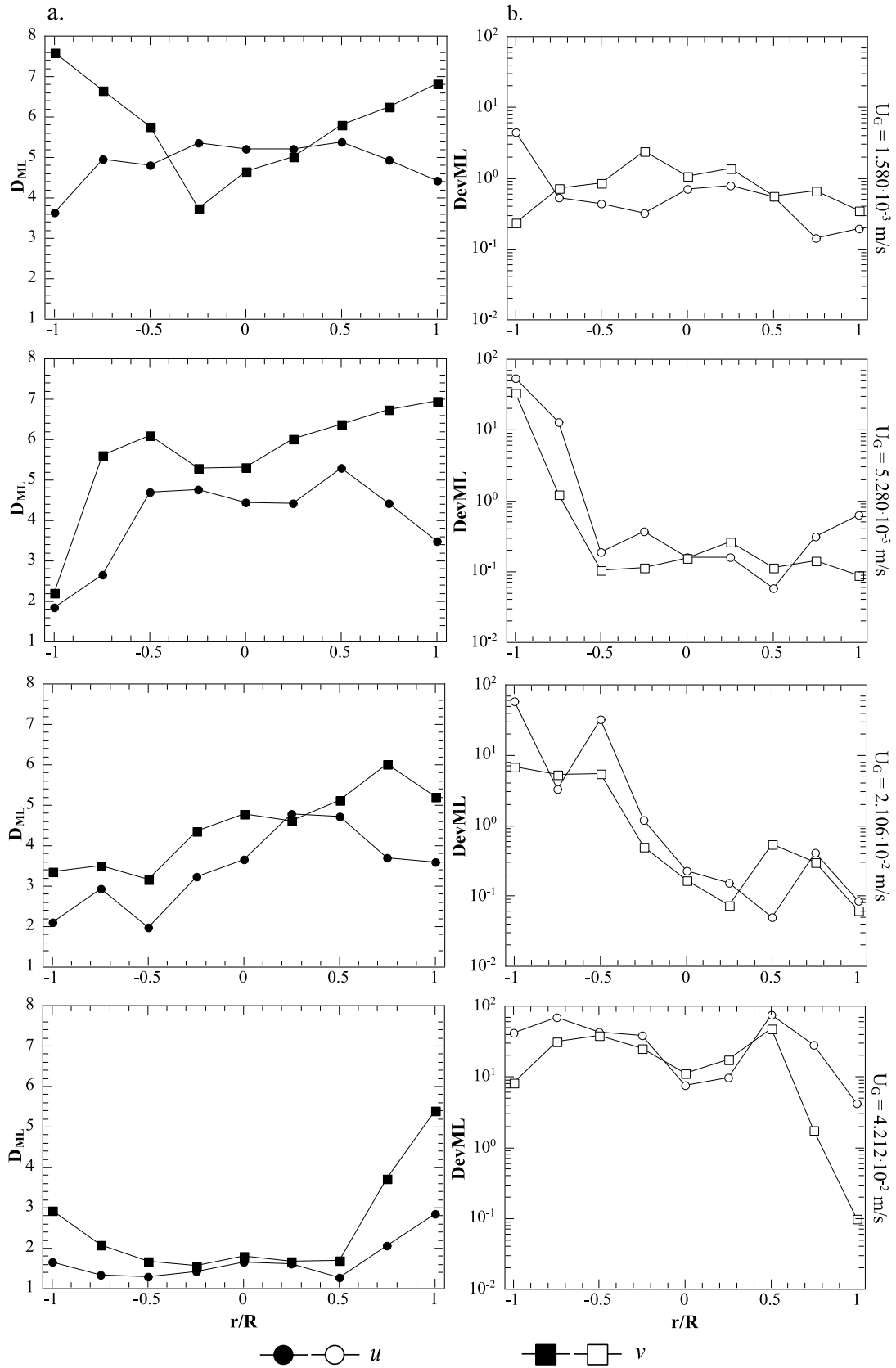


Figure 15 - (a) Correlation dimension and (b) standard deviation of the integral correlation from horizontal and vertical velocity (u and v).

It is noteworthy that a more coherent analysis of the D_{ML} profile for the underlying dynamics of the system would only be possible with the regime classification of the column system, a matter that goes beyond the goals of this work. However, both D_{ML} and $DevML$ are important for the reliability of velocity fluctuation series obtained by PIV in a particular operating range of U_G . This reduces the chance of an interpretation error related to the transition range in flow regimes. Showing the same behavior as the PIV uncertainty in the SCC approach, chaos analysis can be used in other correlations, especially where PIV analysis of the measurement quality does not apply. Furthermore, it is possible to use this nonlinear analysis for evaluating the PIV post-processing filter performance or design. This analysis can also be applied for the investigation of the quality measurement of different techniques based on digital image correlation (DIC), such as stereo-PIV, tomo-PIV, particle tracking velocimetry (PTV), laser speckle velocimetry (LSV) and background-oriented Schlieren (BOS).

5. CONCLUSIONS

Chaos analysis of velocity fluctuation data obtained from 2D-2C F-PIV measurement allowed a more detailed study of the behavior directly related to the signal dynamics. In this work, correlation dimension analysis and its convergence were proposed in order to evaluate the quality of F-PIV measurement for different superficial gas velocities (U_G) in a bubble column section. Furthermore, the effects of a PIV post-processing filter on fluctuations of the velocity module and its components were also investigated.

In the absence of a PIV quality indicator of the fields obtained by Standard Cross-Correlation with post-processing (SCC*), the chaotic parameters obtained presented a smaller variation compared to those from Standard Cross-Correlation without post-processing (SCC). This difference is directly related to the spatial interpolation and error related to the neighborhood connectivity of the interrogation window. Additionally, on the left side of the column (the region opposite to the incidence of the laser light), the values found for D_{ML} and $DevML$ were significantly different for SCC and SCC*, mainly due to the large number of false vectors.

A detailed analysis of each velocity component obtained by SCC was conducted and it was observed that the quality of axial velocity was generally better. Besides the difficulty in determining velocity in the wake region of the bubbles, the existence of two regions in the flow with a wide range of minimum and maximum velocities makes it difficult to choose an interframe time for the double-frame PIV system. For a low U_G , an irregular distribution of the

bubbles increased the velocity range of the flow, requiring a higher dynamic velocity range (DVR). As a result, the low amplitude of the bubble fluctuations made the measurement more difficult, possibly failing to represent the underlying dynamics of the flow. With increasing U_G , a large amount of bubbles increased the quantity of noise in the measurements, thereby resulting in unreliable velocity fields.

The agreement of the behavior of the D_{ML} and Dev_{ML} parameters with the PIV analysis allowed relating the complexity of the flow with the quality of information on velocity fields. Moreover, unlike the PIV uncertainty method, the proposed analysis provided the incorporation of noisy fields in evaluating the performance of PIV post-processing filters. Since it is possible to characterize the temporal evolution of a system as chaotic and deterministic, chaos analysis can be applied as a quality indicator of PIV data obtained by different correlations.

Acknowledgements

The authors are grateful to Petroleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) (0050.0070828.11.9), CAPES (2296/2013), and CNPq (140325/2013-1) for the financial support that makes this work possible.

Nomenclature

$C(l)$	Correlation integral represented by the power law (-)
$C'(r')$	Correlation integral for resizing the distances (-)
dt	Interframe time (s)
D	Noise-free correlation dimension (-)
D'	Correlation dimension for resizing the distances (-)
Dev_{ML}	Standard deviation of the integral correlation (-)
D_{ML}	Correlation dimension calculated by the maximum likelihood estimation (-)
f_a	Sampling frequency (Hz)
l	Noise-free scaling distance (unit)
l_0	Maximum scaling distance (unit)
l_n	Maximum noise distance (unit)
l_z	Maximum norm distance (unit)
m	Embedding dimension (-)

M	Sample size of interpoint distances (-)
n	Time step (-)
N_F	Pairs of frames (-)
$N_{F_{eff}}$	Effective number of pair of frame (-)
r'_i	Interpoint distances (-)
r'_n	Normalized maximum noise distance (-)
r'	Normalized scaling distance (-)
r	Radial position (m)
R	Radius of the bubble column (m)
u	x component of velocity (m/s)
\mathbf{u}	Velocity modulus (m/s)
\mathbf{u}_{4000}	Time-averaged velocity modulus for 4000 pairs of frames (m/s)
\mathbf{u}_a	Relative deviation of the time-averaged velocity modulus (-)
\mathbf{u}_{N_F}	Time-averaged velocity modulus for N_F pairs of frames (m/s)
U_G	Superficial gas velocity (m/s)
UQ	Quantification of PIV uncertainty (m/s)
UQ_x	UQ for the radial component in-plane of velocity (m/s)
UQ_y	UQ for the axial component in-plane of velocity (m/s)
UQ_u	UQ for the velocity modulus (m/s)
UQ_x^*	UQ_x normalized by the radial component in-plane of velocity (-)
UQ_y^*	UQ_y normalized by the axial component in-plane of velocity (-)
v	y component of velocity (m/s)
V_b	Bubble velocity (m/s)

Greek Symbols

Δt	Time interval (s)
\mathcal{E}_a	Sampling error (m/s)
\mathcal{E}_{bias}	Bias errors (pixel)
\mathcal{E}_{resid}	Residual errors (pixel)
\mathcal{E}_{rms}	Random errors (pixel)

ε_{sis}	Systematic errors (pixel)
ε_{tot}	Total errors (pixel)
λ	Wavelength (nm)
ρ	Autocorrelation coefficient (-)

Abbreviations

BOS	Background Oriented Schlieren
CCC	Cross-Correlation Coefficient
CCD	Charge-Coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CS	Correlation Statistics
DIC	Digital Image Correlation
DVR	Dynamic Velocity Range
EC	Ensemble Correlation
F-PIV	Fluorescent Particle Image Velocimetry
LDA	Laser Doppler Anemometry
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LIF	Laser Induced Fluorescence
LOS	Line of Sight
LSV	Laser Speckle Velocimetry
PD	Particle Disparity
PIV	Particle Image Velocimetry
PPR	Primary Peak Ratio
PTU	Programmable Time Unit
PTV	Particle Tracking Velocimetry
RMS	Root Mean Square
SCC	Standard Cross Correlation
SCC*	SCC with post-processing
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSM	Substrate Sliding Minimum
US	Uncertainty Surface

6. REFERENCES

- Abarbanel, H.D.I., 1996. *Analysis of Observed Chaotic Data*, Institute for Nonlinear Science. Springer New York, New York, NY. doi:10.1007/978-1-4612-0763-4
- Abbasi, M., Mostoufi, N., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., 2013. A novel approach for simultaneous hydrodynamic characterization of gas-liquid and gas-solid systems. *Chem. Eng. Sci.* 100, 74–82. doi:10.1016/j.ces.2012.12.031
- Adrian, R.J., 1997. Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 8, 1393–1398. doi:10.1088/0957-0233/8/12/003
- Adrian, R.J., Westerweel, J., 2011. *Particle Image Velocimetry*. Cambridge University Press, New York, NY.
- Ajbar, A., Al-Masry, W., Ali, E., 2009. Prediction of flow regimes transitions in bubble columns using passive acoustic measurements. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 48, 101–110. doi:10.1016/j.cep.2008.02.004
- Alméras, E., Cazin, S., Roig, V., Risso, F., Augier, F., Plais, C., 2016. Time-resolved measurement of concentration fluctuations in a confined bubbly flow by LIF. *Int. J. Multiph. Flow* 83, 153–161. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.011
- Bai, D., Bi, H.T., Grace, J.R., 1997. Chaotic behavior of fluidized beds based on pressure and voidage fluctuations. *AIChE J.* 43, 1357–1361. doi:10.1002/aic.690430525
- Bouche, E., Roig, V., Risso, F., Billet, A.-M., 2014. Homogeneous swarm of high-Reynolds-number bubbles rising within a thin gap. Part 2. Liquid dynamics. *J. Fluid Mech.* 758, 508–521. doi:10.1017/jfm.2014.544
- Boyer, C., Duquenne, A.-M., Wild, G., 2002. Measuring techniques in gas–liquid and gas–liquid–solid reactors. *Chem. Eng. Sci.* 57, 3185–3215. doi:10.1016/S0009-2509(02)00193-8
- Briens, L.A., Ellis, N., 2005. Hydrodynamics of three-phase fluidized bed systems examined by statistical, fractal, chaos and wavelet analysis methods. *Chem. Eng. Sci.* 60, 6094–6106. doi:10.1016/j.ces.2005.04.005
- Briongos, J.V., Aragón, J.M., Palancar, M.C., 2006. Phase space structure and multi-resolution analysis of gas–solid fluidized bed hydrodynamics: Part I — The EMD approach. *Chem. Eng. Sci.* 61, 6963–6980. doi:10.1016/j.ces.2006.07.023

- Briongos, J.V., Aragón, J.M., Palancar, M.C., 2007. Phase space structure and multi-resolution analysis of gas–solid fluidized bed hydrodynamics: Part II: Dynamic analysis. *Chem. Eng. Sci.* 62, 2865–2879. doi:10.1016/j.ces.2007.02.019
- Bröder, D., Sommerfeld, M., 2002. An advanced LIF-PLV system for analysing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fractions. *Exp. Fluids* 33, 826–837. doi:10.1007/s00348-002-0502-z
- Bröder, D., Sommerfeld, M., 2007. Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubbly flows. *Meas. Sci. Technol.* 18, 2513–2528. doi:10.1088/0957-0233/18/8/028
- Broomhead, D.S., King, G.P., 1986. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Phys. D Nonlinear Phenom.* 20, 217–236. doi:10.1016/0167-2789(86)90031-X
- Castilho, G.J., Cremasco, M.A., 2013. Study of gas-solids flow in a short CFB riser by statistical and chaotic deterministic analysis of optical fibre probe signals. *Can. J. Chem. Eng.* 91, 579–588. doi:10.1002/cjce.21764
- Castilho, G.J., Cremasco, M.A., de Martín, L., Aragón, J.M., 2011. Experimental fluid dynamics study in a fluidized bed by deterministic chaos analysis. *Part. Sci. Technol.* 29, 179–196. doi:10.1080/02726351003792906
- Charonko, J.J., Vlachos, P.P., 2013. Estimation of uncertainty bounds for individual particle image velocimetry measurements from cross-correlation peak ratio. *Meas. Sci. Technol.* 24, 065301. doi:10.1088/0957-0233/24/6/065301
- Chen, R.C., Fan, L.-S., 1992. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure in three-dimensional gas-liquid-solid fluidized beds. *Chem. Eng. Sci.* 47, 3615–3622. doi:10.1016/0009-2509(92)85077-O
- Chen, R.C., Reese, J., Fan, L.-S., 1994. Flow structure in a three-dimensional bubble column and three-phase fluidized bed. *AIChE J.* 40, 1093–1104. doi:10.1002/aic.690400702
- Davies, M., 1994. Noise reduction schemes for chaotic time series. *Phys. D Nonlinear Phenom.* 79, 174–192. doi:10.1016/S0167-2789(05)80005-3
- Daw, C.S., Lawkins, W.F., Downing, D.J., Clapp, N.E., 1990. Chaotic characteristics of a complex gas-solids flow. *Phys. Rev. A* 41, 1179–1181. doi:10.1103/PhysRevA.41.1179

- Deckwer, W.-D., 1992. *Bubble Column Reactors*. Wiley, New York.
- Deen, N.G., Hjertager, B.H., Solberg, T., 2000. Comparison of PIV and LDA Measurement Methods Applied to the Gas-Liquid Flow in a Bubble Column, in: 10th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mech. Lisbon, Portugal.
- Deen, N.G., Westerweel, J., Delnoij, E., 2002. Two-phase PIV in bubbly flows: Status and trends. *Chem. Eng. Technol.* 25, 97. doi:10.1002/1521-4125(200201)25:1<97::AID-CEAT97>3.0.CO;2-7
- Drahoš, J., Čermák, J., 1989. Diagnostics of gas—liquid flow patterns in chemical engineering systems. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 26, 147–164. doi:10.1016/0255-2701(89)90007-X
- Drahoš, J., Zahradník, J., Punčochář, M., Fialová, M., Bradka, F., 1991. Effect of operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in a bubble column. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 29, 107–115. doi:10.1016/0255-2701(91)87019-Y
- Drahoš, J., Bradka, F., Punčochář, M., 1992. Fractal behaviour of pressure fluctuations in a bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 47, 4069–4075. doi:10.1016/0009-2509(92)85158-8
- Fan, L.-S., 1989. *Gas–Liquid–Solid Fluidization Engineering*. Butterworth, Stoneham, MA. doi:10.1016/B978-0-409-95179-0.50007-6
- Fincham, A. M., Spedding, G. R., 1997. Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow. *Exp. Fluids* 23, 449–462. doi:10.1007/s003480050135
- Fincham, A., Delerce, G., 2000. Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms. *Exp. Fluids* 29, S013–S022. doi:10.1007/s003480070003
- Gourich, B., Vial, C., Essadki, A.H., Allam, F., Belhaj Soulami, M., Ziyad, M., 2006. Identification of flow regimes and transition points in a bubble column through analysis of differential pressure signal—Influence of the coalescence behavior of the liquid phase. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 45, 214–223. doi:10.1016/j.cep.2005.09.002
- Grassberger, P., Procaccia, I., 1983. Measuring the strangeness of strange attractors. *Phys. D Nonlinear Phenom.* 9, 189–208. doi:10.1016/0167-2789(83)90298-1
- Grassberger, P., Schreiber, T., Schaffrath, C., 1991. Nonlinear time sequence analysis. *Int. J. Bifurc. Chaos* 01, 521–547. doi:10.1142/S0218127491000403

- Gu, L., Shi, Y., Yu, H., 1999. Chaotic analysis of pressure fluctuation signal in the gas-liquid cocurrent flow. *Chem. React. Eng. Technol.* 15, 428–434.
- Hain, R., Kähler, C.J., 2007. Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV). *Exp. Fluids* 42, 575–587. doi:10.1007/s00348-007-0266-6
- Hammel, S.M., 1990. A noise reduction method for chaotic systems. *Phys. Lett. A* 148, 421–428. doi:10.1016/0375-9601(90)90493-8
- Hariharan, P., Giarra, M., Reddy, V., Day, S. W., Manning, K. B., Deutsch, S., Stewart, S. F. C., Myers, M. R., Berman, M. R., Burgreen, G. W., Paterson, E. G., Malinauskas, R. A., 2011. Multilaboratory particle image velocimetry analysis of the FDA benchmark nozzle model to support validation of computational fluid dynamics simulations. *J. Biomech. Eng.* 133, 041002. doi:10.1115/1.4003440
- Hay, J.M., Nelson, B.H., Briens, C.L., Bergougnou, M.A., 1995. The calculation of the characteristics of a chaotic attractor in a gas-solid fluidized bed. *Chem. Eng. Sci.* 50, 373–380. doi:10.1016/0009-2509(94)00249-Q
- Johnsson, F., Zijerveld, R., Schouten, J., van den Bleek, C., Leckner, B., 2000. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *Int. J. Multiph. Flow* 26, 663–715. doi:10.1016/S0301-9322(99)00028-2
- Kantz, H., Schreiber, T., 1997. *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Keane, R.D., Adrian, R.J., 1990. Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems. *Meas. Sci. Technol.* 1, 1202–1215. doi:10.1088/0957-0233/1/11/013
- Keane, R.D., Adrian, R.J., 1992. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Appl. Sci. Res.* 49, 191–215. doi:10.1007/BF00384623
- Kostelich, E.J., Yorke, J.A., 1990. Noise reduction: Finding the simplest dynamical system consistent with the data. *Phys. D Nonlinear Phenom.* 41, 183–196. doi:10.1016/0167-2789(90)90121-5
- Lain, S., Bröder, D., Sommerfeld, M., 1999. Experimental and numerical studies of the hydrodynamics in a bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 54, 4913–4920. doi:10.1016/S0009-2509(99)00212-2

- Lecordier, B., Demare, D., Vervisch, L.M.J., Réveillon, J., Trinité, M., 2001. Estimation of the accuracy of PIV treatments for turbulent flow studies by direct numerical simulation of multi-phase flow. *Meas. Sci. Technol.* 12, 1382–1391. doi:10.1088/0957-0233/12/9/302
- Letzel, H.M., Schouten, J.C., Krishna, R., van den Bleek, C.M., 1997. Characterization of regimes and regime transitions in bubble columns by chaos analysis of pressure signals. *Chem. Eng. Sci.* 52, 4447–4459. doi:10.1016/S0009-2509(97)00290-X
- Li, W.-L., Zhong, W.-Q., Jin, B.-S., Xiao, R., He, T.-T., 2013. Flow regime identification in a three-phase bubble column based on statistical, Hurst, Hilbert–Huang transform and Shannon entropy analysis. *Chem. Eng. Sci.* 102, 474–485. doi:10.1016/j.ces.2013.08.052
- Lin, T.-J., Reese, J., Hong, T., Fan, L.-S., 1996. Quantitative analysis and computation of two-dimensional bubble columns. *AIChE J.* 42, 301–318. doi:10.1002/aic.690420202
- Lin, T.-J., Juang, R.-C., Chen, Y.-C., Chen, C.-C., 2001. Predictions of flow transitions in a bubble column by chaotic time series analysis of pressure fluctuation signals. *Chem. Eng. Sci.* 56, 1057–1065. doi:10.1016/S0009-2509(00)00322-5
- Lindken, R., Merzkirch, W., 2002. A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Exp. Fluids* 33, 814–825. doi:10.1007/s00348-002-0500-1
- Liu, Z., Zheng, Y., Jia, L., Zhang, Q., 2005. Study of bubble induced flow structure using PIV. *Chem. Eng. Sci.* 60, 3537–3552. doi:10.1016/j.ces.2004.03.049
- Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Santiago, J.G., 2000. A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields. *J. Fluids Eng.* 122, 285. doi:10.1115/1.483256
- Mosdorf, R., Wyzkowski, T., 2011. Experimental investigations of deterministic chaos appearance in bubbling flow. *Int. J. Heat Mass Transf.* 54, 5060–5069. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.023
- Mudde, R.F., Groen, J.S., Van Den Akker, H.E.A., 1997. Liquid velocity field in a bubble column: LDA experiments. *Chem. Eng. Sci.* 52, 4217–4224. doi:10.1016/S0009-2509(97)88935-X
- Mudde, R.F., Van Den Akker, H.E.A., 1999. Dynamic behavior of the flow field of a bubble column at low to moderate gas fractions. *Chem. Eng. Sci.* 54, 4921–4927. doi:10.1016/S0009-2509(99)00213-4

- Nedeltchev, S., Shaikh, A., Al-Dahhan, M., 2006. Flow regime identification in a bubble column based on both statistical and chaotic parameters applied to computed tomography data. *Chem. Eng. Technol.* 29, 1054–1060. doi:10.1002/ceat.200600162
- Nedeltchev, S., Jordan, U., Lorenz, O., Schumpe, A., 2007. Identification of various transition velocities in a bubble column based on Kolmogorov entropy. *Chem. Eng. Technol.* 30, 534–539. doi:10.1002/ceat.200600344
- Nedeltchev, S., Shaikh, A., Al-Dahhan, M., 2011. Flow regime identification in a bubble column via nuclear gauge densitometry and chaos analysis. *Chem. Eng. Technol.* 34, 225–233. doi:10.1002/ceat.201000308
- Nedeltchev, S., Shaikh, A., 2013. A new method for identification of the main transition velocities in multiphase reactors based on information entropy theory. *Chem. Eng. Sci.* 100, 2–14. doi:10.1016/j.ces.2013.03.039
- Nedeltchev, S., 2015. New methods for flow regime identification in bubble columns and fluidized beds. *Chem. Eng. Sci.* 137, 436–446. doi:10.1016/j.ces.2015.06.054
- Northrup, M.A., Kulp, T.J., Angel, S.M., 1991. Fluorescent particle image velocimetry: Application to flow measurement in refractive index-matched porous media. *Appl. Opt.* 30, 3034. doi:10.1364/AO.30.003034
- Olmos, E., Gentric, C., Poncin, S., Midoux, N., 2003. Description of flow regime transitions in bubble columns via laser Doppler anemometry signals processing. *Chem. Eng. Sci.* 58, 1731–1742. doi:10.1016/S0009-2509(03)00002-2
- Orzeszko, W., 2008. The new method of measuring the effects of noise reduction in chaotic data. *Chaos, Solitons & Fractals* 38, 1355–1368. doi:10.1016/j.chaos.2007.06.059
- Philip, O.G., Schmidl, W.D., Hassan, Y.A., 1994. Development of a high speed particle image velocimetry technique using fluorescent tracers to study steam bubble collapse. *Nucl. Eng. Des.* 149, 375–385. doi:10.1016/0029-5493(94)90303-4
- Prasad, A.K., 2000. Particle image velocimetry. *Curr. Sci.* 79, 51–60.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007. Introduction, in: *Particle Image Velocimetry*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–13. doi:10.1007/978-3-540-72308-0_1

- Ruelle, D., 1990. Deterministic Chaos: The Science and the Fiction. *Proc. R. Soc. London A Math. Phys. Eng. Sci.* 427, 241–248. doi:10.1098/rspa.1990.0010
- Sauer, T., 1992. A noise reduction method for signals from nonlinear systems. *Phys. D Nonlinear Phenom.* 58, 193–201. doi:10.1016/0167-2789(92)90108-Y
- Scarano, F., Riethmuller, M.L., 2000. Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Exp. Fluids* 29, S051–S060. doi:10.1007/s003480070007
- Schouten, J.C., Takens, F., van den Bleek, C.M., 1994. Estimation of the dimension of a noisy attractor. *Phys. Rev. E* 50, 1851–1861. doi:10.1103/PhysRevE.50.1851
- Schouten, J.C., van den Bleek, C.M., 1992. RRCHAOS, a Menu-Driven Software Package for Nonlinear Time Series Analysis. Reactor Research Foundation, Delft.
- Schreiber, T., 1993. Extremely simple nonlinear noise-reduction method. *Phys. Rev. E* 47, 2401–2404. doi:10.1103/PhysRevE.47.2401
- Schreiber, T., Grassberger, P., 1991. A simple noise-reduction method for real data. *Phys. Lett. A* 160, 411–418. doi:10.1016/0375-9601(91)90237-3
- Sciacchitano, A., Wieneke, B., Scarano, F., 2013. PIV uncertainty quantification by image matching. *Meas. Sci. Technol.* 24, 045302. doi:10.1088/0957-0233/24/4/045302
- Sciacchitano, A., Neal, D.R., Smith, B.L., Warner, S.O., Vlachos, P.P., Wieneke, B., Scarano, F., 2015. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: Comparative assessment of methods. *Meas. Sci. Technol.* 26, 074004. doi:10.1088/0957-0233/26/7/074004
- Sciacchitano, A., Wieneke, B., 2016. PIV uncertainty propagation. *Meas. Sci. Technol.* 27, 84006. doi:10.1088/0957-0233/27/8/084006
- Seol, D.-G., Socolofsky, S.A., 2008. Vector post-processing algorithm for phase discrimination of two-phase PIV. *Exp. Fluids* 45, 223–239. doi:10.1007/s00348-008-0473-9
- Serletis, D., 2008. Effect of noise on fractal structure. *Chaos, Solitons & Fractals* 38, 921–924. doi:10.1016/j.chaos.2007.01.031
- Shaikh, A., Al-Dahhan, M., 2005. Characterization of the hydrodynamic flow regime in bubble columns via computed tomography. *Flow Meas. Instrum.* 16, 91–98. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2005.02.004

- Shaikh, A., Al-Dahhan, M.H., 2007. A review on flow regime transition in bubble columns. *Int. J. Chem. React. Eng.* 5. doi:10.2202/1542-6580.1368
- Shou, M.C., Leu, L.P., 2005. Energy of power spectral density function and wavelet analysis of absolute pressure fluctuation measurements in fluidized beds. *Chem. Eng. Res. Des.* 83, 478–491. doi:10.1205/cherd.04123
- Sivakumar, B., Phoon, K.-K., Liong, S.-Y., Liaw, C.-Y., 1999. A systematic approach to noise reduction in chaotic hydrological time series. *J. Hydrol.* 219, 103–135. doi:10.1016/S0022-1694(99)00051-7
- Sommerfeld, M., Bröder, D., 2009. Analysis of Hydrodynamics and Microstructure in a Bubble Column by Planar Shadow Image Velocimetry. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 330–340. doi:10.1021/ie800838u
- Sridhar, G., Katz, J., 1995. Drag and lift forces on microscopic bubbles entrained by a vortex. *Phys. Fluids* 7, 389. doi:10.1063/1.868637
- Stanislas, M., Kompenhans, J., Westerweel, J., 2000. Particle Image Velocimetry, Fluid Mechanics and Its Applications. Springer Netherlands, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-017-2543-9
- Sun, J., Zheng, C., Zhou, Y., Bai, Y., Luo, J., 2008. Nonlinear noise reduction of chaotic time series based on multidimensional recurrent LS-SVM. *Neurocomputing* 71, 3675–3679. doi:10.1016/j.neucom.2008.02.006
- Takens, F., 1981. Detecting strange attractors in turbulence, in: *Dynamical Systems and Turbulence*, Warwick 1980. Springer Berlin Heidelberg, 366–381. doi:10.1007/BFb0091924
- Takens, F., 1985. On the numerical determination of the dimension of an attractor, in: *Dynamical Systems and Bifurcations*. Springer Berlin Heidelberg, 99–106. doi:10.1007/BFb0075637
- Timmins, B.H., Wilson, B.W., Smith, B.L., Vlachos, P.P., 2012. A method for automatic estimation of instantaneous local uncertainty in particle image velocimetry measurements. *Exp. Fluids* 53, 1133–1147. doi:10.1007/s00348-012-1341-1
- Tzeng, J.-W., Chen, R.C., Fan, L.-S., 1993. Visualization of flow characteristics in a 2-D bubble column and three-phase fluidized bed. *AIChE J.* 39, 733–744. doi:10.1002/aic.690390502

- van den Bleek, C.M., Schouten, J.C., 1993. Deterministic chaos: A new tool in fluidized bed design and operation. *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.* 53, 75–87. doi:10.1016/0923-0467(93)80009-L
- van Ommen, J.R., Sasic, S., van der Schaaf, J., Gheorghiu, S., Johnsson, F., Coppens, M.-O., 2011. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas–solid fluidized beds – A review. *Int. J. Multiph. Flow* 37, 403–428. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.12.007
- Vial, C., Camarasa, E., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., Bouillard, J., 2000. Study of hydrodynamic behaviour in bubble columns and external loop airlift reactors through analysis of pressure fluctuations. *Chem. Eng. Sci.* 55, 2957–2973. doi:10.1016/S0009-2509(99)00551-5
- Wernet, M.P., 1997. PIV for turbomachinery applications, in: Cha, S.S., Trolinger, J.D., Kawahashi, M. (Eds.), *International Society for Optics and Photonics*, San Diego, CA, 2–16. doi:10.1117/12.279732
- Westerweel, J., 1997. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 8, 1379–1392. doi:10.1088/0957-0233/8/12/002
- Westerweel, J., Scarano, F., 2005. Universal outlier detection for PIV data. *Exp. Fluids* 39, 1096–1100. doi:10.1007/s00348-005-0016-6
- Wieneke, B., 2015. PIV uncertainty quantification from correlation statistics. *Meas. Sci. Technol.* 26, 074002. doi:10.1088/0957-0233/26/7/074002
- Xu, J., Bao, X., Wei, W., Bi, H.T., Grace, J.R., Lim, C.J., 2009. Chaotic characteristics of pressure fluctuations in a gas spouted bed. *Can. J. Chem. Eng.* 87, 252–263. doi:10.1002/cjce.20156
- Yang, W., 2003. *Handbook of fluidization and fluid-particle systems*. Marcel Dekker, New York.
- Yang, G.Q., Du, B., Fan, L.S., 2007. Bubble formation and dynamics in gas–liquid–solid fluidization — A review. *Chem. Eng. Sci.* 62, 2–27. doi:10.1016/j.ces.2006.08.021
- Zaid, F.M., Nedeltchev, S., Al-Dahhan, M., 2011. Flow regime identification in fluidized beds based on statistical analysis of both pressure fluctuations and optical probe data, in: *ANS Annual Meeting*. Florida.

3.2 INFLUÊNCIA DA TERCEIRA COMPONENTE DE VELOCIDADE NA QUALIDADE DE MEDIDAS F-PIV COM BASE NA ANÁLISE DA DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO

H. L. MOURA¹, R. L. AMARAL², D. I. S. FORERO¹, G. J. CASTILHO¹, S.S.V. VIANNA² e M. MORI¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Processos

² Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos

(Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), em Fortaleza (CE), Brasil, 25 a 29 de setembro de 2016)

RESUMO – Uma das vantagens de sistemas *Fluorescent Particle Image Velocimetry* (F-PIV) 3C-2D (C - Componente; D – Dimensão) em relação aos sistemas 2C-2D é a correção do erro causado pela ausência da terceira componente de velocidade. Por outro lado, torna-se necessário um maior acesso óptico da área investigada para medir a terceira componente de velocidade. O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da terceira componente na qualidade das medidas F-PIV a partir de séries temporais de flutuação de velocidade, advindas de uma seção de uma coluna de bolhas, analisando a dimensão de correlação. A análise das medidas F-PIV 3C-2D foi comparada com as obtidas pelas medidas F-PIV 2C-2D. Além disso, a integral da dimensão de correlação foi utilizada como indicador de qualidade das medidas F-PIV, apresentando-se como uma alternativa aos parâmetros advindos da estatística de correlação PIV. Os resultados mostraram uma diferença entre os parâmetros caóticos analisados entre as medidas 2C-2D e 3C-2D. Devido ao erro de reconstrução da terceira componente, a técnica F-PIV 3C-2D apresenta resultados mais confiáveis apenas em baixas velocidades superficiais de gás sendo o oposto observado aplicando a técnica F-PIV 2C-2D.

1. INTRODUÇÃO

A *Fluorescent Particle Image Velocimetry* (F-PIV) é uma técnica de medida não intrusiva usada para determinar campos de velocidade 2D ou 3D da fase líquida em alguns escoamentos multifásicos. Similar as outras técnicas PIV, a F-PIV permite determinar os campos de velocidade instantânea do fluido através do deslocamento de pequenos grupos de partículas fluorescentes em determinadas áreas de estudo (janelas de interrogação) utilizando funções de

correlação (Prasad, 2000). A análise PIV divide-se basicamente em cinco etapas: calibração, gravação, pré-processamento de imagem, processamento e pós-processamento. No geral, as técnicas PIV podem ser classificadas em função dos componentes (C) e o domínio espacial (D) do campo vetorial determinado. O princípio de funcionamento da F-PIV 2C-2D (2 Componentes e 2 Dimensões, câmera A) e 3C-2D (3 Componentes e 2 Dimensões, câmeras B e C) é ilustrado esquematicamente na Figura 1.

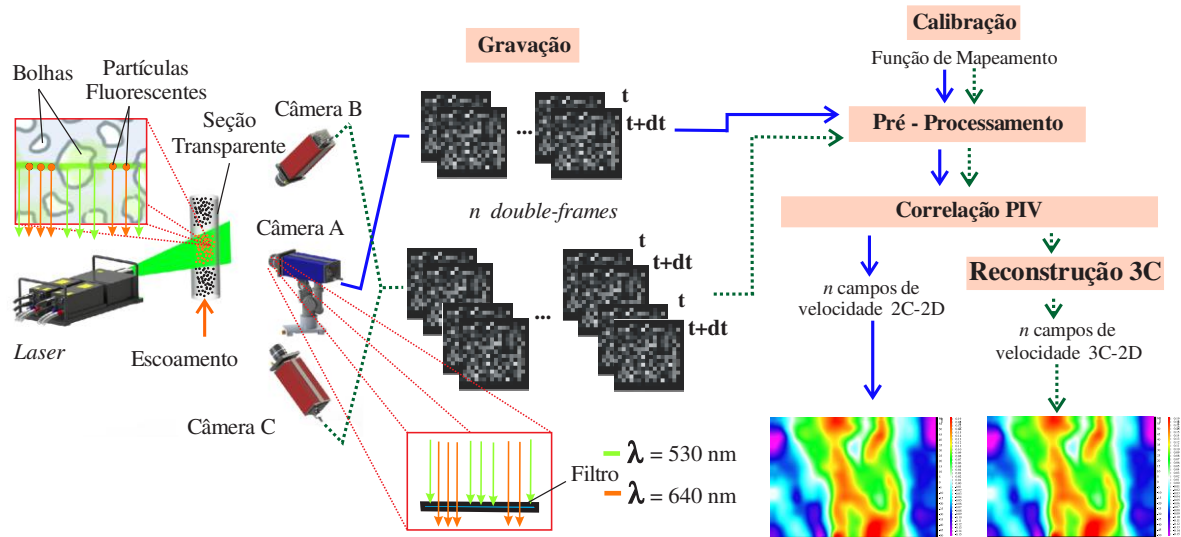


Figura 1 - Princípio de funcionamento do F-PIV 2C-2D e 3C-2D.

Para a F-PIV 2D-2C, as partículas fluorescentes são iluminadas por uma folha de luz *laser* pulsada (verde, $\lambda = 530$ nm) que emitem luz (laranja, $\lambda = 640$ nm) que atravessa um filtro passa-alta em uma lente fotográfica, geralmente localizada a 90° da folha de luz *laser*, de modo que o seu plano do objeto em foco coincida com a seção iluminada do escoamento. A luz que passa pelo filtro passa-alta na lente da câmera é registrada em um sensor CCD ou CMOS. Em relação a F-PIV 3C-2D ou F-*Stereo*-PIV, duas câmeras são aplicadas com diferentes projeções para gravar simultaneamente a mesma região de interesse determinando um campo vetorial 3C-2D. A combinação do deslocamento aparente da imagem de partícula das duas projeções fornece informação necessária para a reconstrução do terceiro componente de velocidade (componente do movimento para fora da folha de luz) (Adrian e Westerweel, 2011).

A diferença entre uma gravação PIV 2C-2D e 3C-2D é apresentada na Figura 2.

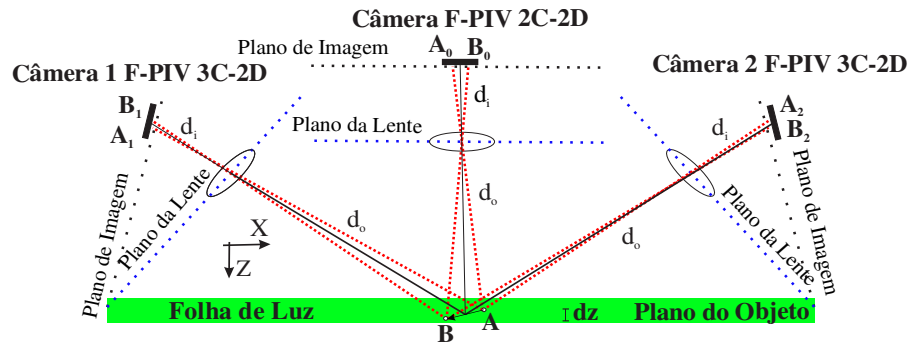


Figura 2 - Esquema de uma gravação F-PIV 2C-2D e 3C-2D (Adaptado de Amaral *et al.*, 2015).

O movimento das partículas para fora da folha de luz causa o chamado erro de percepção para a gravação PIV 2C-2D, em que as componentes de velocidade horizontal e vertical (u e v) são determinadas de maneira errada. Teoricamente, esse erro é solucionado pela configuração angular de duas câmeras de um sistema PIV 3C-2D. A componente Z de velocidade (w) é reconstruída pelo PIV 3C-2D a partir dos campos 2C-2D de cada câmera (o inverso do que é apresentado na Figura 2). Essa reconstrução é conhecida como reconstrução 3C (3 componentes).

O desempenho das técnicas PIV depende da qualidade da imagem gravada e do processamento dessa imagem. Mesmo com o uso do filtro passa-alta e das partículas fluorescentes, as aplicações F-PIV em coluna de bolhas se tornam complexas por conta do grande espalhamento da luz *laser* causado pela presença das bolhas, em relação ao espalhamento das partículas traçadoras, podendo danificar a câmera com o aumento da temperatura no sensor. Amaral *et al.* (2015) estudaram a qualidade das medidas F-PIV 2C-2D e 3C-2D através do raio da coluna para diferentes velocidades superficiais de gás (U_G). Além do coeficiente de correlação, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) e do erro de reconstrução 3C, os autores quantificaram a incerteza de medida PIV utilizando o método de Wineke (2014). A grande limitação desse método é em relação à quantidade de ruído na imagem original e do movimento para fora da folha de luz, tornando essa estimativa falha. Uma alternativa proposta por Moura *et al.* (2015a) é o uso da integral da dimensão de correlação como um parâmetro de qualidade para F-PIV 2C-2D. Os autores observaram coerências entre os parâmetros caóticos e da estatística de correlação PIV ao analisar as séries temporais da flutuação de velocidade ao longo do raio de uma coluna de bolhas. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da terceira componente a partir de séries temporais de flutuação de velocidade, advindas de

uma seção de uma coluna de bolhas, analisando a dimensão de correlação das medidas F-PIV 2C-2D e 3C-2D a fim de medir o grau de liberdade destas séries.

2. DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Uma alternativa para avaliar a qualidade das medições PIV pode ser encontrado na análise de caos das flutuações de velocidade por meio da dimensão de correlação (Moura *et al.*, 2015a). A dimensão de correlação permite estimar o número de variáveis independentes ou graus de liberdade que descrevem o sistema. Com a suposição que as séries temporais experimentais estão em menor ou maior grau contaminados por ruídos e utilizando o método de Schouten *et al.* (1994) – no qual considera que essas séries são obtidas a partir de um sistema limitado pela amplitude do ruído; a integral de correlação $C(l) \approx l^D$ (l é uma distância pré-definida) é redimensionada com base na norma máxima considerando que o ruído induz um desvio nas distâncias das trajetórias do atrator imerso no espaço de estado (Equação 1).

$$C(r) = \left[\frac{r - r_n}{1 - r_n} \right]^D, r_n \leq r \leq 1 \quad (1)$$

Na Equação 1, $r = l_z / l_0$ e $r_n = l_n / l_0$ são as distâncias normalizadas em relação ao comprimento de corte l_0 . Neste caso l_z é a distância máxima em relação aos vetores com a presença de ruído, l_n é a distância máxima ou amplitude do ruído e l_0 pode ser obtido a partir do desvio médio absoluto da série temporal. Aplicando o método da máxima verossimilhança na Equação 1 para M observações, é possível ter uma estimativa da dimensão de correlação (Equação 2).

$$D_{ML,n} = \left[-\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln \left(\frac{r_i - r_n}{1 - r_n} \right) \right]^{-1}, r_n \leq r_i \leq 1 \quad (2)$$

Schouten *et al.* (1994), relatam que o método desenvolvido tende a subestimar o nível de ruído real. Contudo, uma alternativa mais simples, além de quantificar o nível de ruído, reside na interpretação da diferença entre as soluções de $C(l) \approx l^D$ e da Equação (2) ou desvio normalizado da integral de correlação – aqui definido como DevML. A convergência de ambas as soluções – D e D_{ML} (calculados por meio do *software* RRChaos desenvolvido por Schouten e van den Bleek, 1992) pode indicar o quanto a série temporal se aproxima de uma ideal, isto é, de uma série não corrompida. Aliado com as séries das flutuações de velocidade advinda das medições PIV e sem qualquer aplicação de filtros temporal ou espacial, acredita-se que esta

abordagem possa servir como indicativo da qualidade dos campos de velocidade e da escolha apropriada da técnica PIV (2C-2D ou 3C-2D) em função de U_G .

3. EXPERIMENTAL

Os testes experimentais e as gravações PIV foram os mesmos realizados por Amaral *et al.* (2015) usando uma coluna de bolha acrílica de 14,5 cm de diâmetro e 1 m de altura (Figura 3a). A coluna foi preenchida com água a 25 ° C (a altura da coluna preenchida com líquido foi de 80 cm) e a fase gasosa usada foi ar com uma velocidade superficial (U_G) de $0,158 \cdot 10^{-2}$; $0,528 \cdot 10^{-2}$; $2,106 \cdot 10^{-2}$ e $4,212 \cdot 10^{-2}$ m/s. A área de investigação foi localizada 55,2 cm do distribuidor com um tamanho de 14,5 x 10 cm (Figura 3b). Uma placa plana com 21 furos (1 mm de diâmetro), distribuídos igualmente em uma matriz quadrada (Figura 3c) foi usada como distribuidor. O arranjo do sistema F-PIV 2C-2D (câmera A) e 3C-2D (câmera B e C) na coluna é apresentado na Figura 3a, 3b e 3d. Os sistemas F-PIV foram desenvolvidos pela LaVision. As câmeras (duas CCDs com 1376 x 1040 *pixels* e 1376 x 1024 *pixels*) e o sistema de laser (Nd: YAG, 200 mJ/pulso e $\lambda = 532$ nm) foi controlado com uma unidade de tempo programável (PTU) pelo *software* de Davis 8.2. As câmeras CCD foram colocadas a 80 graus da folha de luz *laser*. As câmeras do sistema F-PIV 3C-2D apresentam uma configuração angular com uma diferença entre elas de 60 graus (Figura 3b). Todas as câmeras satisfazem a condição de *Scheimpflug*. Foram utilizados Rodamina-B como partículas traçadoras e um filtro passa-alta em cada câmera que permite apenas a passagem de luz emitida pelo traçador ($\lambda = 620$ nm). Os experimentos para os dois sistemas F-PIV foram feitos separadamente. Foram gravados 4000 pares de imagens com uma frequência de 4,2 Hz e um tempo *inter frame* com o objetivo de produzir um deslocamento máximo de imagem partícula de 15-20 *pixels* para cada velocidade superficial de gás (U_G).

Detalhes sobre os pré-processamentos e processamentos F-PIV são encontrados em Amaral *et al.* (2015). Na interrogação PIV, em vez de utilizar o tamanho de janela de interrogação inicial e final de 512 e 256 *pixels*, foi utilizado nesse trabalho 256 e 128 *pixels*, respectivamente. Isso foi feito com o objetivo de comparar as medidas 3C-2D com as medidas 2C-2D feitas por Moura *et al.* (2015a). O erro de reconstrução 3C máximo permitido foi definido como 5 *pixels*. Foram feitas medidas PIV em nove posições radiais ($r/R = -1:0.25:1$) assim como a obtenção das séries temporais a partir da área de investigação (Figura 3e). A investigação da qualidade das medidas F-PIV 3C-2D pela dimensão de correlação (D_{ML}) e desvio normalizado da integral de correlação (Dev_{ML}) foi feita utilizando a mesma análise que Moura *et al.* (2015a) fizeram para as medidas 2C-2D.

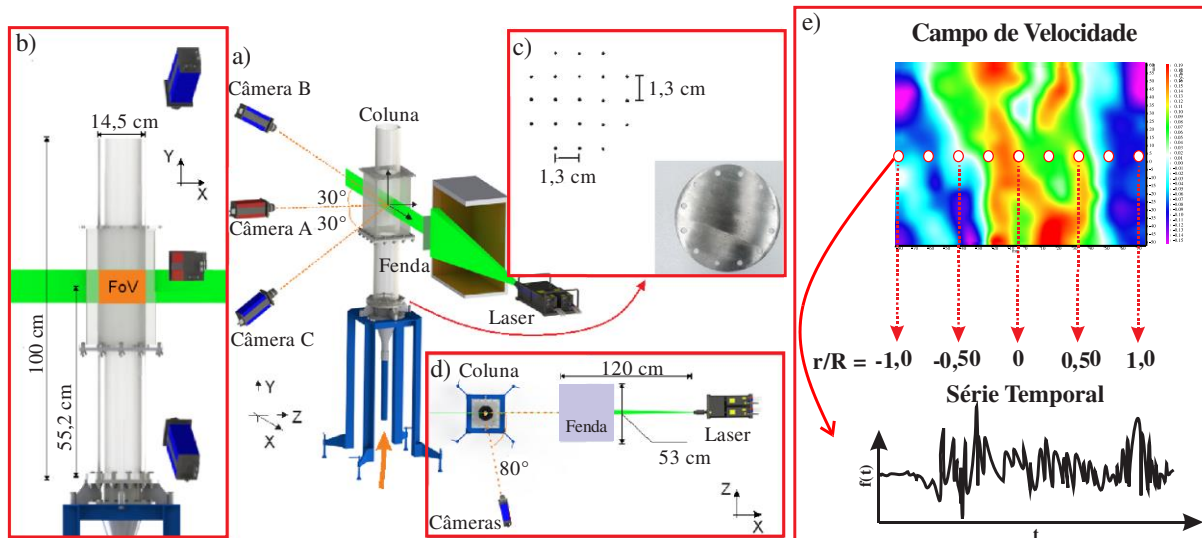


Figura 3 - (a) Coluna de bolhas, F-PIV 2C-2D (câmara A); F-PIV 3C-2D (Câmara B e C) e caixa com fenda; (b) O campo de visão (FoV); (c) distribuidor de ar com 21 furos; (d) arranjo do sistema PIV na coluna; (e) posições radiais de obtenção das séries temporais de flutuação de velocidade (Adaptado de Amaral *et al.*, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta os valores para dimensão de correlação (D_{ML}) para as técnicas F-PIV 2C-2D e 3C-2D em função da posição radial da coluna. Observa-se que para $0,158 \cdot 10^{-2} \leq U_G < 4,212 \cdot 10^{-2}$ m/s, o grau de liberdade apresenta uma tendência de aumento no sentido radial $r/R = -1$ até $r/R = 1$ utilizando ambas as técnicas F-PIV. De acordo com Amaral *et al.* (2015) e Moura *et al.* (2015a, 2015b), a maior complexidade observada na região direita da coluna deve-se ao fato que a distribuição da velocidade medida é assimétrica devido ao distribuidor, consequentemente, as regiões de recirculação bem como as regiões de arraste possuem influência direta no cálculo de D_{ML} . É possível notar que a presença da terceira componente (w) em F-PIV 3C-2D possui alguma relevância nos resultados de D_{ML} em comparação com F-PIV 2C-2D. O aumento de U_G e, consequentemente, o aumento do número de bolhas na área de investigação, pode ocasionar uma perda da intensidade da iluminação do laser, especialmente na região esquerda da coluna a partir da técnica F-PIV 2C-2D (Figura 3, câmara A). Nesta região, os valores baixos para D_{ML} pode indicar a presença de ruído ou que as medidas advindas do F-PIV 2C-2D não representam o escoamento de forma adequada devido à problemática da iluminação do laser. Em um alto sistema dimensional, como se supõe para regimes turbulentos ou com grande quantidade de bolhas, a presença de ruídos pode gerar interpretações errôneas da dinâmica subjacente e com isso mascarando o real valor dimensão de correlação.

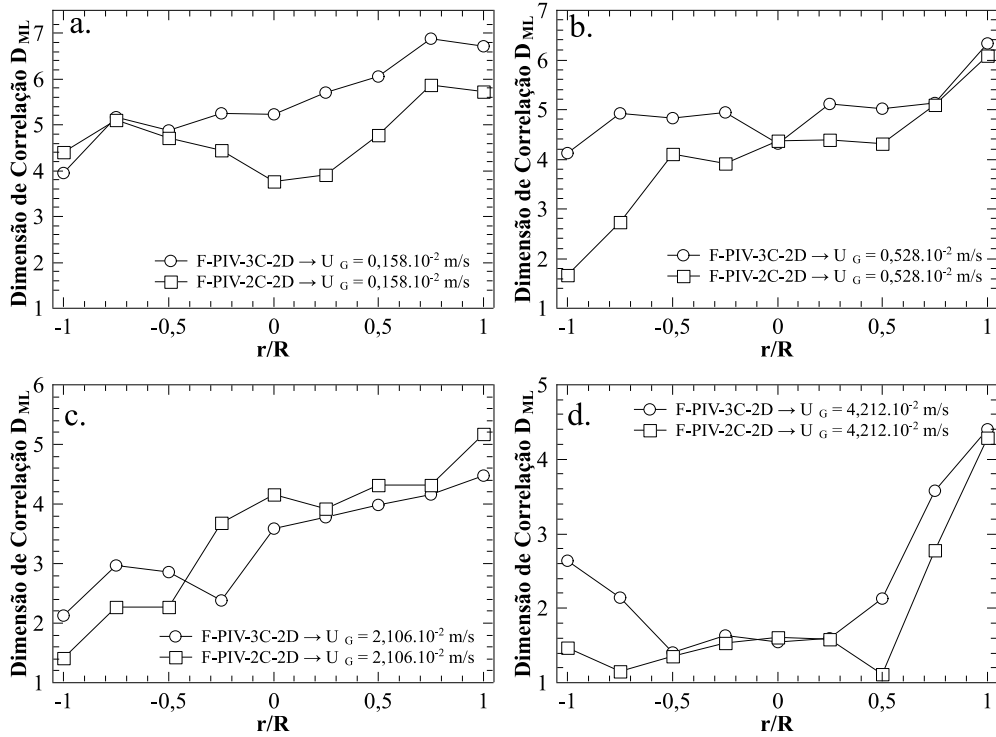


Figura 4 - Dimensão de correlação para F-PIV 2C-2D e 3C-2D na análise do módulo da velocidade do líquido.

Na Figura 4, para $U_G \geq 0,528 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, é possível observar que os valores de D_{ML} para F-PIV 2C-2D são menores em relação aos obtidos pela técnica F-PIV 3C-2D próximo à parede esquerda da coluna. Este fato evidencia que as séries temporais de flutuações de velocidade obtidas na configuração F-PIV 3C-2D apresentam maior robustez, que pode ser justificada pela presença da terceira componente de velocidade, w , assim como pela mudança da configuração das câmeras. Como observado também por Broder e Sommerfeld (2002), a nova configuração das câmeras possibilita registrar diferentes projeções dos diferentes ângulos de espalhamento da luz do traçador e das interferências das bolhas.

Para F-PIV 2C-2D em coluna de bolhas, três fontes de erros são importantes: causado diretamente pelas bolhas, DVR (*dynamic velocity range*) e o erro de perspectiva devido ao movimento do líquido para fora do plano de luz. Para F-PIV 3C-2D, as fontes de erros importantes são: causado diretamente pelas bolhas, DVR e o erro de reconstrução 3C. A Figura 5 apresenta os valores para os desvios normalizados da integral de correlação (Dev_{ML}) para as técnicas F-PIV 2C-2D e 3C-2D em função da posição radial da coluna.

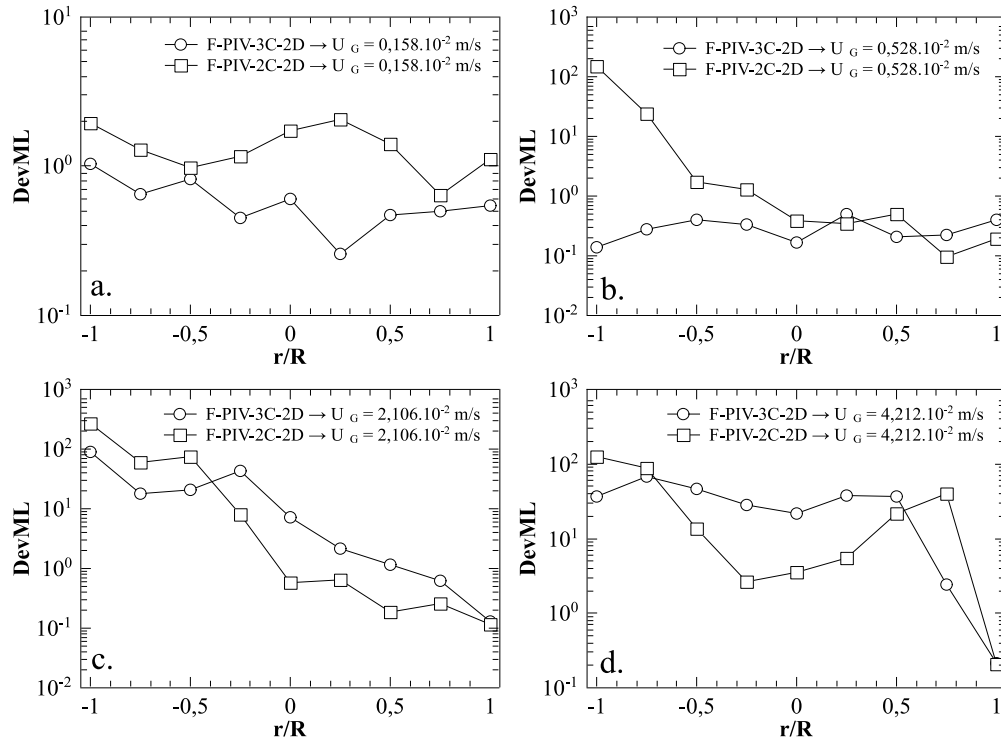


Figura 5 - Desvio normalizado da integral de correlação para F-PIV 2C-2D e 3C-2D na análise do módulo da velocidade do líquido.

Para $U_G = 0,158.10^{-2}$ m/s (Figura 5a) observa-se que, apesar do baixo valor de U_G , o erro no cálculo de D_{ML} é elevado. Esse fato pode ser justificado pela limitação do DVR da técnica. Essa restrição implica que, apesar da baixa velocidade e da distribuição homogênea das bolhas, as diferentes regiões de máximo e de mínima velocidade do líquido se tornam um fator limitante para a obtenção das medidas PIV. Contudo, é possível notar que para F-PIV 3C-2D os valores de DevML são ligeiramente menores, o que representa uma melhor descrição do escoamento. As fontes de erro de perspectiva para PIV 2C-2D e o erro de reconstrução para PIV 3C-2D, para baixos valores de U_G , nesse caso, têm pouca influência na obtenção dos campos de velocidade.

Para $U_G = 0,528.10^{-2}$ m/s (Figura 5b) é possível notar que a técnica F-PIV 3C-2D apresenta menores valores de DevML na região $-1 \leq r/R \leq 0$. É possível notar, a partir da Figura 4b, que próximo a esta região ($-1 \leq r/R < 0$) os valores para D_{ML} são maiores para F-PIV 2C-2D, evidenciando, portanto, a discussão dos baixos valores de D_{ML} para F-PIV 2C-2D, que por vez pode ser indicativo de séries ruidosas e não representativas. Para $U_G = 2,106.10^{-2}$ m/s (Figura 5c), tanto a técnica F-PIV 2C-2D quanto F-PIV 3C-2D apresentam tendências semelhantes para DevML. Contudo, a técnica F-PIV 2C-2D apresenta DevML menores que F-PIV 3C-2D. Para a reconstrução da terceira componente em F-PIV 3C-2D, é importante que a

função de mapeamento do processo de calibração (Figura 1) tenha um erro menor que 1 *pixel*. Qualquer distorção do meio prejudica a reconstrução 3C. Mesmo com uma boa calibração, um grande erro na função de mapeamento pode ser causado pela presença das bolhas na coluna. As bolhas contribuem na distorção da imagem devido aos diferentes índices de refração entre o líquido-bolha. Com o aumento da velocidade superficial do gás, a quantidade de bolhas aumenta e conseqüentemente a distorção na imagem aumenta prejudicando a qualidade dos campos 2C-2D de cada câmera. Como o campo (u, v, w) é derivativo, a reconstrução 3C pode apresentar grandes erros se os campos 2C-2D forem ruidosos. De forma semelhante ao observado em $U_G = 2,106 \cdot 10^{-2}$ m/s (Figura 5c), para $U_G = 4,212 \cdot 10^{-2}$ m/s (Figura 5d) os valores para DevML para a técnica F-PIV 2C-2D também são menores. Em ambos os casos é importante ressaltar que a qualidade das séries temporais melhora próximo à parede direita da coluna (região próxima de $r/R = 1$).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o efeito da terceira componente de velocidade na qualidade das medidas F-PIV tendo como base a análise caótica em termos de dimensão de correlação das séries temporais de flutuação de velocidade advindas de campos 2C-2D e 3C-2D. Os resultados para a dimensão de correlação (D_{ML}) e do desvio normalizado da integral de correlação (DevML), mostram que para baixas velocidades superficiais do gás ($U_G \leq 0,528 \cdot 10^{-2}$ m/s) a técnica F-PIV 3C-2D apresentou melhores resultados devido à inserção da terceira componente e, conseqüentemente, diminuindo erros, como por exemplo, o erro de perspectiva na determinação do campo vetorial. Contudo, para maiores velocidades superficiais do gás ($U_G \geq 2,106 \cdot 10^{-2}$ m/s), apesar de ambas as técnicas F-PIV apresentarem resultados questionáveis, a técnica F-PIV 2C-2D fornece campos mais confiáveis (menos ruidosos). Esse fato é decorrente, principalmente, da propagação de erro na reconstrução da terceira componente em sistemas F-PIV 3C-2D causado pela grande presença das bolhas que aumentam a distorção da imagem.

5. REFERÊNCIAS

ADRIAN, R. J. e WESTERWEEL, J., *Particle Image Velocimetry*. Nova York: Cambridge University Press. 2011.

AMARAL, R. L.; FORERO, D. I. S.; VIANNA, S. S. V.; CASTILHO, G. J.; MORI, M. *Comparison between F-2D-PIV and F-Stereo-PIV measurements of the liquid phase velocity in a bubble column*. COBEM. Rio de Janeiro. 2015.

MOURA, H. L.; AMARAL, R. L.; FORERO, D. I. S.; CASTILHO, G. J. ; VIANNA, S. S. V.; MORI, M. Chaos analysis of the PIV measurement quality on the liquid velocity fluctuation in a bubble column section. *In: International Congress of Mechanical Engineering - COBEM*, Rio de Janeiro, 2015a.

MOURA, H. L.; AMARAL, R. L.; FORERO, D. I. S.; CASTILHO, G. J. ; VIANNA, S. S. V.; MORI, M. Análise da entropia de kolmogorov a partir de medições PIV no escoamento da fase líquida de uma coluna de bolhas. *In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, São Paulo: Editora Edgard Blücher. p. 155 - 165, 2015b.

PRASAD, A. Particle image velocimetry - Review article. *Curr. Sci.*, v. 79, p. 51-60, 2000.

SCHOUTEN, J. C., VAN DEN BLEEK, C. M. RRCHAOS, a Menu-Driven Software Package for Nonlinear Time Series Analysis, Rector Research Foundation, Delft 1992.

SCHOUTEN, J. C.; TAKENS, F.; VAN DEN BLEEK, C. M. Estimation of the dimension of a noisy attractor, *Phys. Rev. E*, v.50, n.3, p. 1851-1961, 1994.

BRODER, D. e SOMMERFELD. M. An advanced LIF-PLV system for analysing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fractions. *Exp. Fluids*. v.33, p. 826–837, 2002.

WIENEKE, B. Generic a-posteriori uncertainty quantification for PIV vector fields by correlation statistics. *17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2014.

3.3 ANÁLISE DA ENTROPIA DE KOLMOGOROV A PARTIR DE MEDIÇÕES PIV NO ESCOAMENTO DA FASE LÍQUIDA DE UMA COLUNA DE BOLHAS

H. L. MOURA¹, R. L. AMARAL², D. I. S. FORERO¹, G. J. CASTILHO¹, S.S.V. VIANNA² e M. MORI¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Processos

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos

(Apresentado no XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulado (ENEMP), em São Carlos (SP), Brasil, 18 a 21 de outubro de 2015)

RESUMO – Devido à sua construção simples e facilidade de operação, colunas de bolhas são frequentemente aplicadas em processos industriais. O conhecimento do comportamento fluidodinâmico desses reatores é importante para o controle da transferência de calor, transferência de massa e taxa de reação química. Muitos trabalhos baseiam-se na análise de flutuações de pressão para descrever o comportamento complexo de uma coluna de bolhas. Porém, sendo uma medida indireta da dinâmica do escoamento, essa torna-se a sua principal desvantagem. Nesse contexto, destaca-se a técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV). A PIV é uma técnica de medida não intrusiva que determina a distribuição de velocidade em uma área de investigação. Este trabalho tem como objetivo avaliar o escoamento da fase líquida usando a análise de caos a partir de medições PIV de flutuações de velocidade em uma seção de coluna de bolhas para diferentes vazões de gás. Para isto, utilizou-se os conceitos da entropia de Kolmogorov. A análise caótica se desponta como um método promissor, tendo como principal vantagem a sensibilidade a pequenas alterações do escoamento, em relação as análises no domínio do tempo e frequência. Os resultados obtidos mostram que é possível extrair informações relevantes a partir das medidas PIV em conjunto com a análise da entropia de Kolmogorov. Contudo, foi observado que para altas vazões a descrição da dinâmica do sistema requer maior atenção.

1. INTRODUÇÃO

Colunas de bolhas tem algumas características que as tornam adequadas para aplicações industriais. São amplamente utilizadas em indústrias químicas e petroquímicas, possibilitam boas propriedades de transferência de massa e calor, índice de mistura elevados, design simples e baixo custo operacional e de manutenção (Deckwer e Field, 1992; Yang, 2003). Compreender a hidrodinâmica das colunas de bolhas e as transições dos regimes são de grande importância para o projeto, operação, controle e *scale-up* (Fan, 1989). Uma vez que os mecanismos subjacentes e muitos dos parâmetros de funcionamento podem tornar o comportamento da coluna de bolhas complexo, uma modelagem teórica ou uma abordagem experimental se torna difícil. Esse fato está diretamente atrelado aos movimentos instáveis das numerosas bolhas e as interações não lineares com a parede da própria coluna (Fan, 1989; Nedeltchev et al., 2007; Abbasi et al., 2013; Li et al., 2013).

Um grande número de técnicas de medição, incluindo métodos intrusivos e não intrusivos, foram desenvolvidos para investigar o comportamento da dinâmica de uma coluna de bolhas (Yang et al., 2007). Uma revisão abrangente das técnicas de medição em reatores gás-líquido e também gás-líquido-sólido pode ser encontrada em Boyer et al. (2002). No que se segue, entre as diferentes técnicas de medição, com ênfase nas técnicas não intrusivas, flutuações de pressão são amplamente utilizadas para caracterizar a hidrodinâmica e transição de regimes em colunas de bolhas (Briens e Ellis, 2005; Shou e Leu, 2005; Nedeltchev et al., 2007; Zaid et al., 2011; Abbasi et al., 2013).

Por outro lado, técnicas ópticas não intrusivas também se despontam como métodos promissores, com destaque para a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV). A técnica PIV é frequentemente empregada na caracterização do campo de velocidade em diversos tipos de escoamentos multifásicos presentes em colunas de bolhas (Bröder e Sommerfeld, 2007, 2002). Contudo, para garantir uma boa representação da dinâmica destes escoamentos, assim como a confiabilidade dos campos de velocidade, alguns trabalhos foram desenvolvidos: da Costa et al. (2014) estudaram o erro da medida causado pela distorção das bolhas; Sanchez-Forero et al. (2014) analisaram a qualidade da medida PIV com o aumento da vazão de gás em uma coluna de bolhas com expansão de diâmetro; Amaral et al. (2014a) investigaram o efeito da função de mapeamento PIV na distribuição da velocidade da fase líquida na seção de uma coluna de bolhas e Amaral et al. (2014b) avaliaram o efeito da função de mapeamento PIV na distribuição da velocidade da fase líquida na seção de uma coluna de bolhas.

Em relação aos métodos de análise, vários foram propostos e aplicados para séries de flutuações de pressão, como análise estatística (Drahos et al., 1990), análise espectral (Abbasi et al., 2013), *wavelet* (PARK e KIM, 2003) e caos (Letzel et al., 1997, Briens e Ellis, 2005, Nedeltchev et al., 2007 e Mosdorf e Wyszowski, 2011). Estes métodos podem ser aplicados para caracterização da hidrodinâmica de colunas de bolhas, por exemplo, transição de regime e comportamento das bolhas (Abbasi et al., 2013).

A descrição da hidrodinâmica em colunas de bolhas, tendo em vista as distintas regiões de contato entre as fases, não é trivial devido à existência de comportamento complexo, não linear, induzido pela interação altamente turbulenta entre as fases gasosa e líquida, principalmente em regimes heterogêneos (Li et al., 2013). Portanto, a análise de caos, a partir de sinais experimentais, oferece uma alternativa para diferenciar um sistema determinístico e ordenado de um sistema estocástico e não ordenado, em relação a métodos tradicionais como, por exemplo, o espectro de potência de Fourier e análise estatística (Abarbanel, 1996).

A análise de caos utiliza a reconstrução do espaço de fase para mapear a evolução de um processo no tempo, por trajetórias em um espaço de fase multidimensional. Os dados imersos neste espaço de fase podem ter sua complexidade medida a partir da entropia de Kolmogorov. A entropia de Kolmogorov indica a taxa de perda de informação ao longo do atrator ou o grau de previsibilidade de pontos ao longo do atrator com evolução do tempo no sistema (Grassberger e Procaccia, 1983). Foi verificado que a entropia de Kolmogorov é um parâmetro extremamente útil para quantificar o grau de caos que as colunas de bolhas aparentemente exibem (Letzel, et al., 1997; Vial et al., 2000; Lin et al., 2001; Gourich et al., 2006; Nedeltchev et al., 2007; Ajbar et al., 2009; Nedeltchev et al., 2011). Grassberger e Procaccia (1983) relataram que a entropia de Kolmogorov maior que zero é uma condição suficiente para o caos, em que o sistema caótico é apenas previsível em um intervalo de tempo limitado.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o escoamento da fase líquida usando a análise caos a partir de medições PIV das séries temporais de flutuações do módulo de velocidade em uma região central de uma coluna de bolhas para diferentes vazões de gás. O comportamento complexo da hidrodinâmica subjacente da coluna de bolha foi avaliado a partir da entropia de Kolmogorov.

1.1 Velocimetria por imagem de partículas (PIV)

O princípio de funcionamento da PIV 2D Clássico é ilustrado na Figura 1.

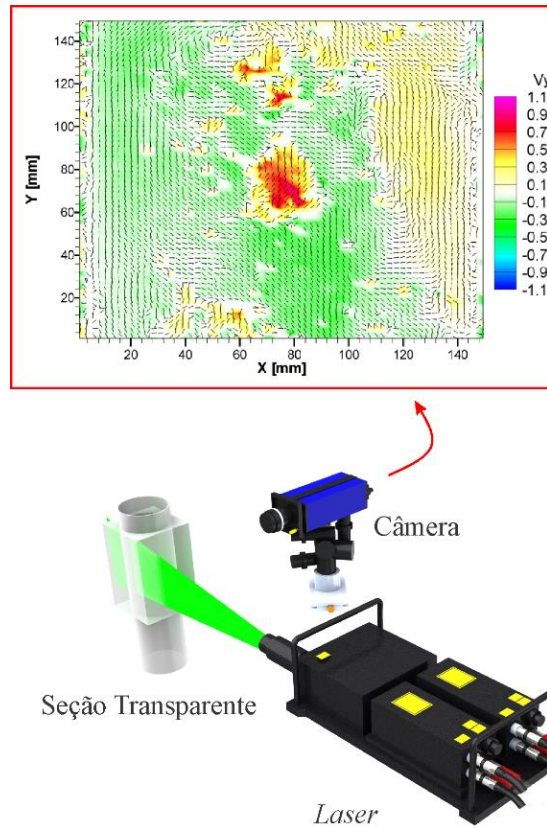


Figura 1 - Princípio de funcionamento da técnica PIV 2D Clássico (Adaptado de AMARAL, 2013).

A técnica PIV emprega partículas traçadoras que devem seguir fielmente o escoamento do fluido, para extrair indiretamente a sua velocidade. As partículas são iluminadas por uma folha de luz pulsada e espalham luz em uma lente fotográfica, geralmente localizada a 90° da folha de luz, de modo que o seu plano do objeto em foco coincida com a fatia iluminada do escoamento. As imagens são formadas em um sensor e são, em seguida, transferidas para um computador para análise (Adrian, 1991). Em vez de determinar o deslocamento individual das imagens partículas, é utilizado um algoritmo para correlacionar as imagens de partícula nos dois tempos (gravação *double-frame*), para determinar o movimento médio de pequenas populações de imagens de partículas contidas em regiões, conhecidas como janelas de interrogação, fornecendo um vetor de deslocamento por janela (PRASAD, 2000). A relação entre a imagem (projeção) e as coordenadas do espaço físico (o objeto) é estabelecida por um procedimento de calibração fornecendo uma função de mapeamento do sistema de imagem.

1.2 Análise de caos: entropia de Kolmogorov

Schouten et al. (1994) estimaram a entropia de Kolmogorov em um tempo médio necessário para duas órbitas do atrator, inicialmente muito próximo uns dos outros, divergir. De acordo com Takens (1981) e Grassberger e Procaccia (1983), a separação de pontos vizinhos em órbitas diferentes é assumida ser exponencial. O intervalo de tempo necessário para que dois pontos inicialmente próximos se separem por uma distância maior do que l_0 será distribuído exponencialmente de acordo com

$$C(t_0) \propto e^{-Kt_0} \quad (1)$$

A distribuição discreta para uma série temporal amostrada com uma frequência de amostragem f_s e passo de tempo $\tau_s = 1/f_s$ é

$$C(b) \propto e^{-Kb\tau_s} \quad (2)$$

A função de distribuição cumulativa (Equação 2) descreve a queda exponencial em função de b . Esta variável b é igual ao número de pares sequenciais de pontos no atrator, dado um par inicial de pontos independentes dentro de uma distância l_0 , em que a distância entre os pontos é pela primeira vez maior que a distância máxima especificada l_0 . Em outras palavras, b é obtido a partir do número de vezes que

$$\|X_{i+b-1} - X_{j+b-1}\| \leq l_0, \text{ com } b = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

desde que $\|X_i - X_j\| \leq l_0$, enquanto $\|X_{i+b} - X_{j+b}\| > l_0$.

Um único valor de b_m é obtido para cada par sequencial i, j investigado. Desse modo, o valor de \bar{b} é calculado pela média dos valores b_m

$$\bar{b} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M b_m \quad (4)$$

em que M é o número de pares investigados. Finalmente, a entropia de máxima verossimilhança (*maximum likelihood Kolmogorov entropy*), K_{ML} , é estimada como

$$K \approx K_{ML} = -\frac{1}{\tau_s} \ln \left[1 - \frac{1}{\bar{b}} \right] \quad (5)$$

O desvio padrão $s(K_{ML})$ é obtido por

$$s(K_{ML}) = \left[\tau_s \sqrt{M} K_{ML} \sqrt{\bar{b}(\bar{b} - 1)} \right]^{-1} \quad (6)$$

em que τ_s é o tempo de amostragem. Para $K_{ML}\tau_s \ll 1$ o desvio padrão pode ser aproximado por:

$$s(K_{ML}) \cong \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (7)$$

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 2 apresenta o esquema da coluna de bolhas e do sistema PIV utilizado. O procedimento experimental detalhado é encontrado no trabalho de Amaral et al (2014a). A área de investigação (14,5 x 10 cm) estava localizada a 55,2 cm do distribuidor de gás. As medidas foram feitas pela câmera B (por registrar a melhor iluminação das partículas traçadoras em relação à câmera A) utilizando a função de mapeamento com um erro de 0,96 *pixel*. Foram feitas medidas PIV para vazões de ar igual a 1,5; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15; 20; 30 e 40 L/min. Depois da gravação das imagens, foi feito o pré-processamento utilizando sequencialmente um filtro RMS (*Root Mean Square*) 3x3 pixels, SSM (*Subtract Sliding Minimum*) 3x3 pixels, definindo os valores de intensidade de pixel resultante menor que 5 e maior que 50 counts como 0 e 50 counts, respectivamente. Foi utilizada a correlação cruzada padrão aplicando a avaliação de múltiplos passos com diminuição da janela de interrogação (inicial de 256 *pixels* e final de 128 *pixels*) utilizando o *Adaptive* PIV. Além disso foi utilizado a sobreposição da janela de interrogação com sua vizinhança (inicial de 50% e final de 75%; com passos 2 e 3). A gravação e o processamento das imagens foram feitos utilizando o software Davis 8.2.2 da LaVision. As séries temporais do módulo de velocidade foram obtidas no ponto central $r/R = 0$ (Figura 2e). Foram gravados 4000 pares de imagens (instantâneos de campo de velocidade) com uma frequência de 4,2 Hz (frequência máxima do sistema PIV).

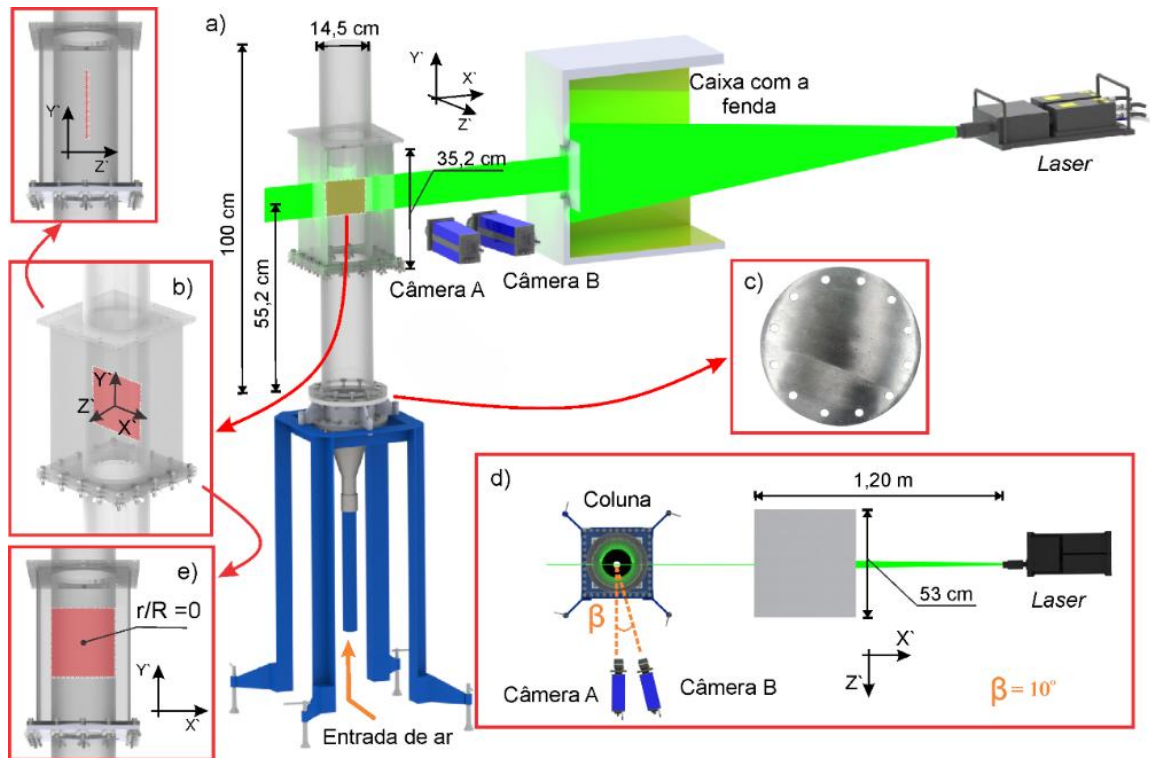


Figura 2 - (a) Coluna, sistema PIV e caixa com a fenda. (b) Área de investigação. (c) Distribuidor da fase gasosa com 21 furos. (d) Arranjo do sistema PIV na coluna. (e) ponto central $r/R = 0$ (Adaptado de AMARAL et al., 2014a).

O critério para a escolha de 4000 imagens foi baseado a partir do instante da não variação da média acumulada do módulo da velocidade (Figura 3). Utilizando a vazão máxima de 40 L/min (condição de maior turbulência), nota-se que após 400s o regime encontra-se estabelecido, não havendo, portanto, a necessidade de mais aquisições de dados.

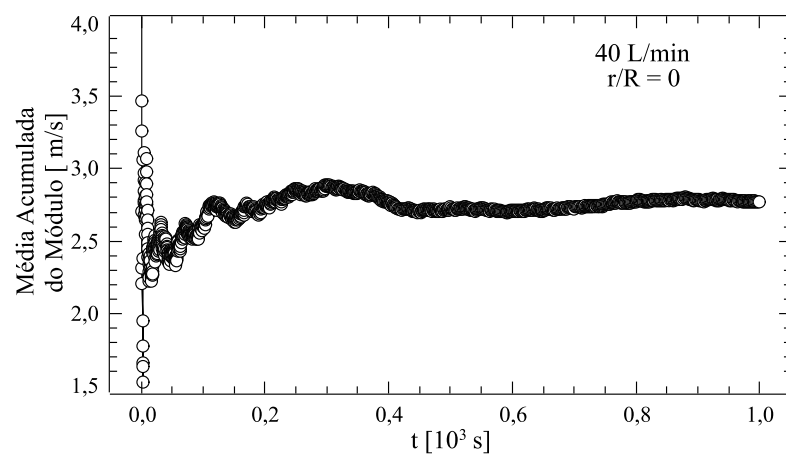


Figura 3 - Média acumulada do módulo de velocidade para uma vazão de 40 L/min.

Para o cálculo da entropia de Kolmogorov foi utilizado o *software* RRChaos. Esse programa utiliza o método de Schouten et al. (1994). O tempo de amostragem foi definido como o inverso da frequência de aquisição das imagens, o comprimento de corte foi definido sendo igual ao desvio padrão da série temporal do módulo de velocidade e o desvio padrão máximo no cálculo da entropia de Kolmogorov foi de 1,0%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta a evolução da entropia de Kolmogorov com o aumento da vazão e velocidade superficial do gás.

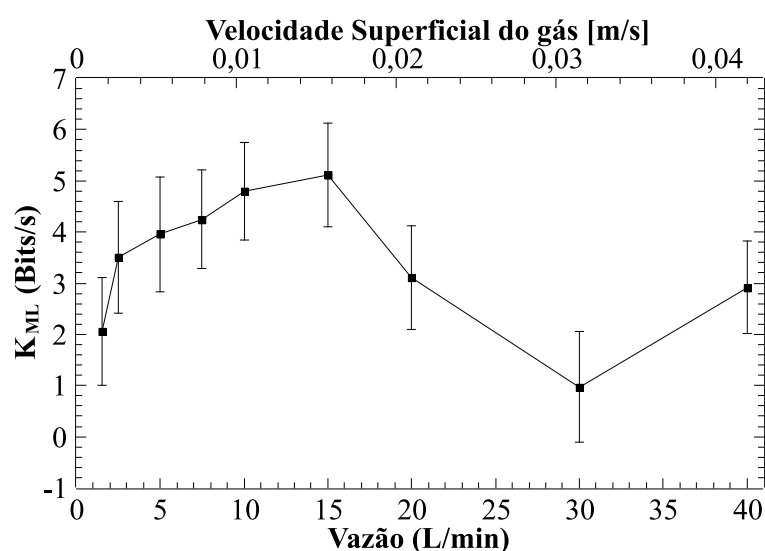


Figura 4 - Entropia de Kolmogorov em função da vazão e velocidade superficial do gás.

Nota-se um crescimento do valor da entropia de Kolmogorov na faixa de 1,5 – 15 L/min, sendo mais acentuado em 1,5 – 2,5 L/min. A partir da vazão 15 L/min um decréscimo da entropia de Kolmogorov é observado até 30 L/min, voltando a aumentar o seu valor em 40 L/min. O primeiro máximo da Figura 4, observado na vazão de 15 L/min, pode ser considerado como o regime mais complexo e de menor previsibilidade. Na vazão de 30 L/min é observado o primeiro mínimo indicando um comportamento com menor complexidade. Essas oscilações nos valores das entropias de Kolmogorov podem ser caracterizadas como transições de regimes. De fato, essa observação corrobora com os resultados obtidos por Nedeltchev et al. (2007, 2011). Em ambos os trabalhos, observaram-se regiões de máximos e mínimos da entropia de Kolmogorov a partir da variação da velocidade superficial do gás. Os picos de máximos da entropia de Kolmogorov foram associados como a desestabilização (instabilidades) dos estados do sistema gás – líquido. Enquanto os pontos de mínimos da entropia de Kolmogorov foram considerados como estados de estabilização do sistema gás – líquido. Cada transição de regime

pode ser identificada pela sequência de máximos e mínimos, isto é, em cada máximo da entropia de Kolmogorov o sistema gás – líquido apresenta uma etapa de auto-organização ao passo que em cada queda do valor deste parâmetro o sistema gás – líquido apresenta um estado de organização.

A Figura 5 apresenta os campos de velocidade do líquido em função do raio da coluna para diversas vazões.

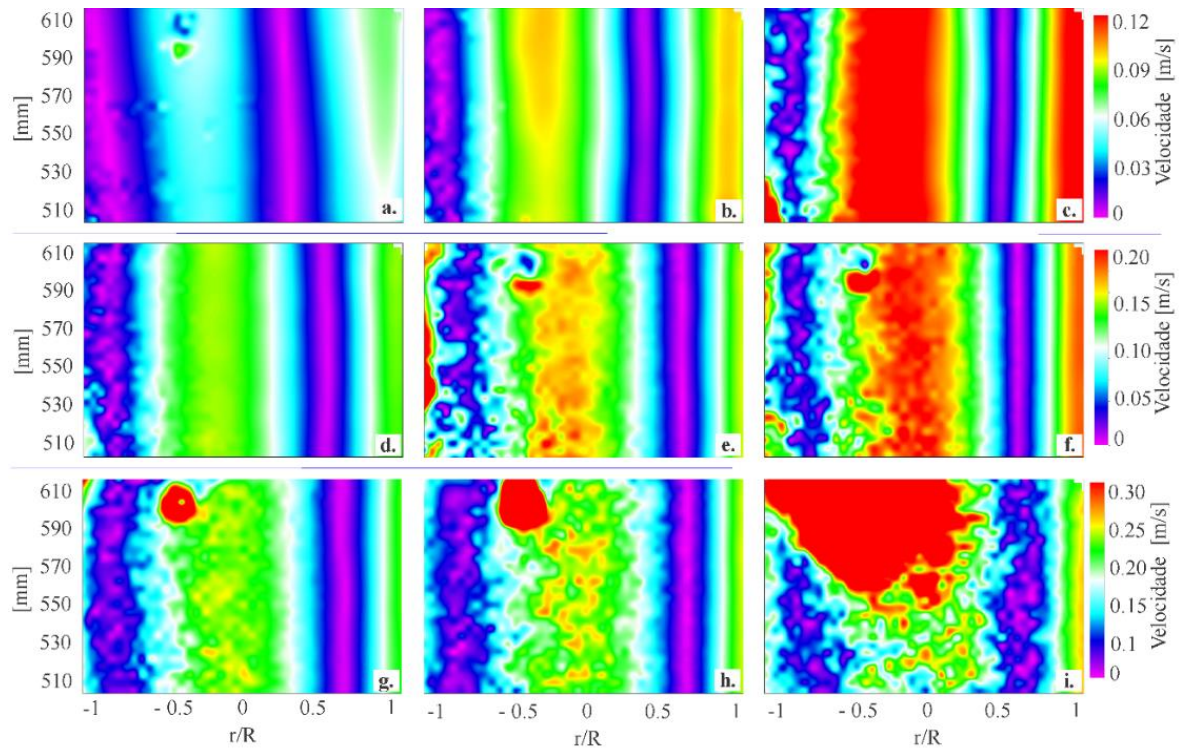


Figura 5 - Campos de velocidade do líquido com (a) 1,5 (b) 2,5 (c) 5,0 (d) 7,5 (e) 10,0 (f) 15,0 (g) 20,0 (h) 30,0 e (i) 40,0 L/min.

Com o aumento da vazão, observa-se um aumento da velocidade da fase líquida que pode ser associado ao aumento da concentração de bolhas e, conseqüentemente, ao aumento de regiões de arraste. Para as vazões de 1,5 até 7,5 L/min (Figuras 5a, 5b, 5c e 5d), observa-se uma distribuição mais suavizada (região alvo coerente com a sua vizinhança) da velocidade média na região $0 < r/R < 1$. Contudo, para as vazões de 10 – 15 L/min (Figuras 5e e 5f) é possível observar, variações mais acentuadas (distorção) dos campos de velocidade do líquido em relação às vazões menores na região $-1 < R < 0$. Após a vazão de 15 L/min, percebe-se que as distorções aumentam em praticamente toda a área investigada, principalmente para a vazão de 40 L/min.

Para todas as vazões, a distribuição da velocidade medida é assimétrica. Isso pode estar relacionado ao *design* do distribuidor de gás, natureza do escoamento (efeito das regiões de recirculação) ou projeto da coluna. Essa distorção no campo de velocidade pode ser associada a presença das bolhas no campo de investigação. Nessa abordagem, para as vazões entre 10 e 15 L/min, as bolhas começam a se organizar homoganeamente no campo de visão. Com isso, supõe-se que o sistema gás – líquido entra em um processo de auto-organização, evidenciando uma possível região de transição. Isso corrobora com a Figura 4, em que o máximo da entropia encontra-se na vazão de 15 L/min. Nas vazões maiores que 15 L/min, a distorção pode ser vista em todo o campo de visão, relacionando assim, a inexistência de um caminho preferencial das bolhas. Relacionando com a Figura 4, o regime pode ser considerado como heterogêneo (Figuras 5g, 5h e 5i) ou regime agitado (*churn – turbulent*). Nesse regime prevalece uma maior coalescência das bolhas e grande interação entre as fases do sistema gás – líquido. É importante ressaltar que a diminuição dos valores para entropia de Kolmogorov (Figura 4) com o aumento da vazão ou velocidade superficial do gás é justificado pela presença de uma maior recirculação do líquido e pela coalescência das bolhas.

O mesmo comportamento para esta diminuição do valor da entropia de Kolmogorov foi observado por Gourich et al. (2006) e Nedeltchev et al. (2007, 2011). A Figura 6 apresenta o perfil de vorticidade para as vazões de 1,5, 15 e 40 L/min calculada utilizando o *Ensemble Correlation* para obter as melhores médias. Observa-se que de fato existe uma maior recirculação do líquido na coluna com um aumento da vazão, em que as médias de vorticidade negativas indicam o movimento oposto ao sentido das bolhas. Essa maior recirculação do líquido pode influenciar na diminuição nos graus de liberdade do sistema, isto é, a complexidade diminui e a previsibilidade aumenta, como consequência, a entropia de Kolmogorov diminui.

Por outro lado, os altos valores da entropia em vazões baixas podem ser relacionados com o fato da menor homogeneidade da distribuição da velocidade do líquido, no campo de visão, causado pela região de arraste das bolhas próximas ao centro da coluna. Essa não homogeneidade da distribuição de velocidade exige uma ampla faixa de velocidade (*Dynamic Velocity Range – DVR*) da técnica PIV utilizada. A DVR em PIV representa a resolução espacial e temporal que a técnica é capaz de fornecer nos campos de velocidade. Com o aumento da coalescência das bolhas nas vazões de gás mais altas, a distribuição da velocidade do líquido se torna mais homogênea no campo de visão, diminuindo, portanto, o valor da entropia de Kolmogorov.

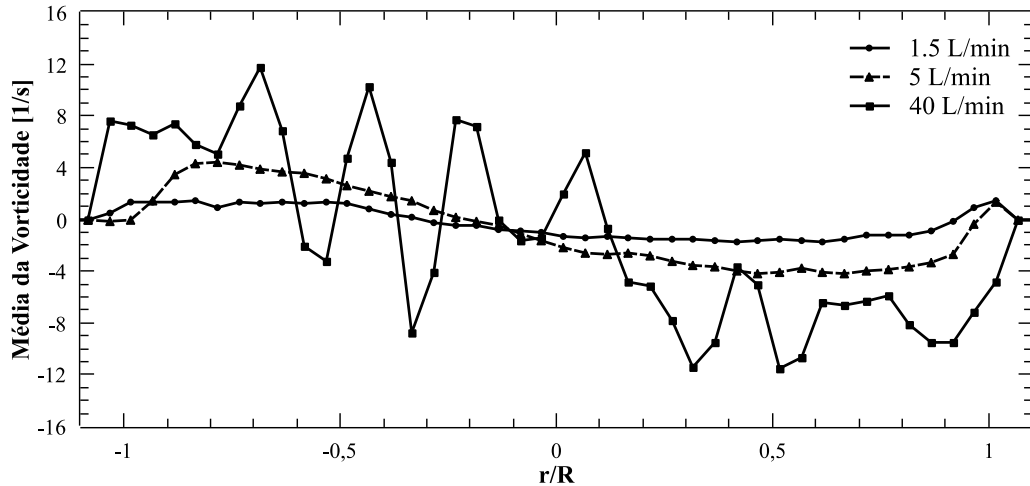


Figura 6 - Perfil de vorticidade para as vazões de 1,5, 15 e 40 L/min.

A Figura 7 apresenta a velocidade do líquido em função da vazão de gás obtida em $r/R = 0$.

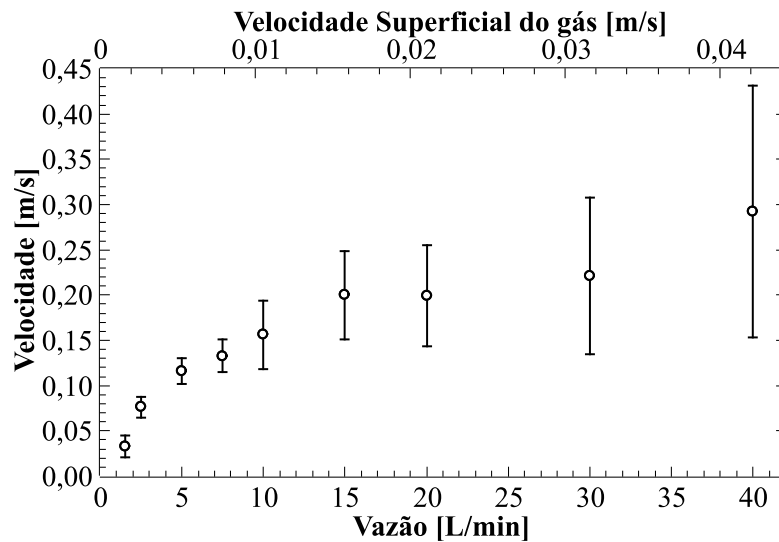


Figura 7 - Velocidade e sua incerteza em função da vazão e velocidade superficial do gás.

Percebe-se que com o aumento da vazão, a incerteza da velocidade calculada por estatística de correlação PIV – utilizando o método de Wieneke (2014) – aumenta. Esse fato dificulta um estudo com vazões – faixa de operação – mais altas (a partir de 40 L/min) e, portanto, garantir a qualidade das medidas PIV. Em decorrência disso, o estado do sistema gás – líquido com uma vazão de 40 L/min foi considerado como regime heterogêneo. Apesar de possuir um maior valor da entropia de Kolmogorov em relação a vazão de 30 L/min (Figura 4) e possivelmente ser confundido como uma segunda transição de regime, não se pode afirmar com precisão se de fato ocorre alguma alteração na complexidade do sistema gás – líquido próximo a vazão de 40 L/min. Isso decorre do grande número de bolhas começarem a interferir

no espalhamento da luz do laser e, conseqüentemente, elevando o nível de ruído no campo da velocidade do líquido (Figura 5i).

4. CONCLUSÃO

Esse trabalho avaliou o escoamento da fase líquida usando a análise caos a partir de medições PIV de flutuações de velocidade em uma região central de coluna de bolhas para diferentes vazões de gás. Os resultados mostram que dentro de uma faixa de operação é possível estabelecer regiões de regimes (1,5 – 7,5 L/min regime homogêneo; 10 – 15 L/min zona de transição e 20 – 40 L/min regime heterogêneo) a partir da entropia de Kolmogorov. Apesar da baixa frequência PIV de aquisição das imagens, foi mostrado que é possível obter valores de entropia representativos. Os resultados para entropia de Komogorov apresentaram uma tendência de máximo e de mínimo, estando, portanto, de acordo com a literatura consultada. Ressalta-se que para altas vazões a técnica PIV pode gerar medidas errôneas, sendo essa a sua principal limitação.

REFERÊNCIAS

- ABARBANEL, H. D. I. Analysis of Observed Chaotic Data, 1996.
- ABBASI, M.; MOSTOUFI, N.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; ZARGHAMI, R. A novel approach for simultaneous hydrodynamic characterization of gas–liquid and gas–solid systems. *Chemical Engineering Science*, v.100, p.74–82, 2013.
- ADRIAN, R. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual review of fluid mechanics*, v. 23, p. 261-304, 1991.
- AJBAR, A.; AL-MASRY, W.; ALI, E. Prediction of flow regimes transitions in bubble columns using passive acoustic measurements. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v.48, p. 101–110, 2009.
- AMARAL, R. L. “Uso da Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) na Indústria do Petróleo”, Palestra UFPE, Recife, 2013.
- AMARAL, R. L.; da COSTA, K. K.; FORERO D. I. S.; VIANNA, S. S. V.; TARANTO, O. P.; MORI, M. Efeito do pré-processamento de imagem PIV na velocidade do líquido em uma coluna de bolhas com expansão de diâmetro. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM). Uberlândia-MG, Brasil, 2014b.

AMARAL, R. L.; FORERO D. I. S.; da COSTA. K. K.; TARANTO, O. P.; VIANNA, S. S. V.; MORI, M. Efeito da função de mapeamento na distribuição da velocidade da fase líquida na seção de uma coluna de bolhas por PIV. Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ). Florianópolis-SC, Brasil, 2014a.

BOYER, C., D.; UQUENNE, A.M.; WILD, G. Measuring techniques in gas–liquid and gas–liquid–solid reactors. *Chemical Engineering Science*, v.57, p.3185–3215, 2002.

BRIENS, L.A.; ELLIS, N. Hydrodynamics of three-phase fluidized bed systems examined by statistical, fractal, chaos and wavelet analysis methods. *Chemical Engineering Science*, v.60, p.6094–6106, 2005.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. An advanced LIF-PLV system for analyzing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fraction. *Experiments in Fluids*. v.33, p 826, 2002.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Planar Shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubble flows. *Measurement Science and Technology*, v.18, p. 2513-2528, 2007.

Da COSTA, K. K.; FORERO, D. I. S.; AMARAL, R. L.; TARANTO, O. P.; VIANNA, S. S. V.; MORI, M. Efeito da autocalibração para *Stereo*-PIV na distribuição da velocidade 2D3C da fase líquida em uma seção de uma coluna de bolhas. Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ). Florianópolis-SC, Brasil, 2014.

DECKWER, W. D., FIELD, R.W. *Bubble Column Reactors*. Wiley: New York, 1992.

DRAHOŠ, J.; ZAHRADNÍK, J.; PUNČOCHÁŘ, M.; FIALOVÁ, M.; BRADKA, F. Effect of operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing*, v.29, p.107–115, 1990.

FAN, L. S. *Gas-liquid-solid fluidization engineering*. Stoneham, MA: Butterworth, 1989.

GOURICH, B.; VIAL, C.; ESSADKI, A.; ALLAM, F.; SOULAMI, M. B.; ZIYAD, M. Identification of flow regimes and transition points in a bubble column through analysis of differential pressure signal—Influence of the coalescence of the liquid phase, *Chemical Engineering and Processing*, v.45, p.214–223, 2006.

GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. Estimation of Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal, *Physical Review A*, v.28 , p.2591-2593, 1983.

LETZEL, H. M.; SCHOUTEN, J. C.; KRISHNA, R.; VAN DEN BLEEK, C. M. Characterization of regimes and regime transitions in bubble columns by chaos analysis of pressure signals. *Chemical Engineering Science*, v.52, p.4447–4459, 1997.

LI, W. L.; ZHONG, W. Q.; JIN, B. S.; XIAO, R.; HE, T. T. Flow regime identification in a three-phase bubble column based on statistical, Hurst, HilbertHuang transform and Shannon entropy analysis. *Chemical Engineering Science*, v.102, p.474–485, 2013.

LIN, T. J.; JUANG, R. C.; CHEN, Y. C.; CHEN, C. C. Predictions of flow transitions in a bubble column by chaotic time series analysis of pressure fluctuations signals, *Chemical Engineering Science*, v.56, p.1057–1065, 2001.

MOSDORF, R.; WYSZKOWSKI, T. Experimental investigations of deterministic chaos appearance in bubbling flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.54, p.5060–5069, 2011.

NEDELTCHEV, S.; JORDAN, U.; LORENZ, O.; SCHUMPE, A. Identification of various transition velocities in a bubble column based on Kolmogorov entropy. *Chemical Engineering Technology*, v. 30, p. 534-539, 2007.

NEDELTCHEV, S.; SHAIKH, A.; AL-DAHMAN, M. Flow regime identification in a bubble column via nuclear gauge densitometry chaos analysis. *Chemical Engineering Technology*, v.34, p. 225-233, 2011.

PARK, S. H.; KIM, S. D. Characterization of pressure signals in a bubble column by wavelet packet transform. *Korean Journal of Chemical Engineering*, v.20, p.128–132, 2003.

PRASAD, A. Particle image velocimetry - Review article. *Current Science*, v. 79, p. 51-60, 2000.

SANCHEZ-FORERO D. I.; da COSTA. K. K.; AMARAL, R. L.; TARANTO, O. P.; VIANNA, S. S. V.; MORI, M. Efeito da vazão de gás na qualidade da medida da velocidade do líquido em uma seção de uma coluna de bolhas com expansão de diâmetro por PIV. *Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ)*. Florianópolis-SC, Brasil, 2014.

SCHOUTEN, J. C.; TAKENS, F.; VAN DEN BLEEK, C. M. Maximum-Likelihood-Estimation of the Entropy of an Attractor. *Physical Review E*, v. 49, p. 126-129, 1994.

SHOU, M.C.; LEU, L.P. Energy of power spectral density function and wavelet analysis of absolute pressure fluctuation measurements in fluidized beds. *Chemical Engineering Research and Design*, v.83, p.478–491, 2005.

TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence, In: *Dynamical systems and turbulence*, Lecture Notes in Mathematics, Eds. D.A. Rand e L-S. Young, Springer Verlag, v. 898, p.366-381, 1981.

VIAL, C.; CAMARASA, E.; PONCIN, S.; WILD, G.; MIDOUX, N.; BOUILLARD, J. Study of hydrodynamic behaviour in bubble columns and external loop airlift reactors through analysis of pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*, v.55, p.2957–2973, 2000.

WIENEKE, B. Generic a-posteriori uncertainty quantification for PIV vector fields by correlation statistics. 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2014.

YANG, G. Q.; DU, B.; FAN, L. S. Bubble formation and dynamics in gas-liquid-solid fluidization - A review. *Chemical Engineering Science*, v.62, p.2–27, 2007.

YANG, W. C. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. CRC Press, 2003.

ZAID, F.M.; NEDELTCHEV, S.; Al DAHHAN, M. Flow Regime Identification In Fluidized Beds Based On Statistical Analysis of Both Pressure Fluctuations and Optical Probe Data. ANS Annual Meeting, Florida, 2011.

CAPÍTULO 4 — Considerações Finais

Este capítulo apresenta as conclusões referentes aos objetivos geral e específicos delineados nesta Tese. Por fim, sugestões para trabalhos futuros são destacados tendo em vista a continuidade do tema da Tese.

4.1 CONCLUSÕES GERAIS

O uso generalizado da velocimetria por imagem de partículas (PIV) para medições da velocidade do fluido tem motivado uma melhor compreensão e estimativa dos erros associados à técnica. As aplicações dos dados PIV são diversas e incluem áreas as quais as estimativas de incerteza são necessárias, como por exemplo, validação de modelos de fluidodinâmica computacional (CFD). Recentemente, vários estudos investigaram a quantificação da incerteza PIV, contudo, cada método de incerteza possui suas limitações em relação a diferentes *setups* experimental ou ao processamento PIV. Em sendo assim, desconhece-se algum método capaz de calcular perfeitamente a incerteza de medição PIV sob várias condições.

Nesse cenário, esta Tese propôs uma nova abordagem para avaliar a qualidade das medidas F-PIV (2C-2D) de escoamentos em uma coluna de bolhas. Resultante do encontro de dois cenários (análise de caos com a estatística de correlação PIV), que a princípio não se relacionavam entre si, a análise de caos possibilitou avaliar a qualidade dos campos de velocidade F-PIV (2C-2D) sob o ponto de vista dos componentes determinísticos e estocásticos. Esses componentes estão presentes nas interações não-lineares de estruturas de escoamento como vórtices (em diferentes escalas) e em regime de bolhas coalescidas. Para esse fim, utilizou-se a integral de correlação e a dimensão de correlação (D_{ML}) para derivar um parâmetro (DevML) que considera os desvios induzidos por dados ruidosos. Baseado no algoritmo da máxima verossimilhança, no qual considera o ruído limitado em amplitude, o parâmetro DevML relaciona o nível de ruído nas séries de flutuações de velocidade com os falsos vetores presentes nos campos sem e com pós-processamento PIV. Desse modo, diferentemente dos indicadores de qualidade PIV como o coeficiente/valor de correlação e o SNR (comuns em todos os métodos de quantificação da incerteza PIV), o DevML pode ser aplicado na etapa de pós-processamento

considerando os efeitos de interpolações e suavizações. Além disso, pode ser estendido para métodos de correlação PIV que forneçam séries de flutuações de velocidades, como o SCC, SAC e PC.

Medições a partir da técnica F-PIV (3C-2D) também foram investigadas e comparadas com F-PIV (2C-2D) a partir do DevML. Nesse caso, as medidas F-PIV (3C-2D) para baixas velocidades superficiais de gás se apresentaram melhores em relação as medidas F-PIV (2C-2D). Esse fato decorre diretamente da reconstrução da terceira componente na diminuição do erro de perspectiva. O oposto foi observado em condições de velocidade superficiais de gás elevadas. Uma maior quantidade de bolhas no escoamento ocasionou uma maior interferência na reconstrução da terceira componente e, conseqüentemente, aumentou a propagação do erro PIV.

Garantido o limite de confiabilidade na operação dos sistemas F-PIV investigados, foi possível analisar as estruturas e regimes de escoamento presentes na coluna de bolhas utilizando a entropia de Kolmogorov (K_{ML}). Constatou-se que o perfil de K_{ML} apresenta tendências de máximos e mínimos, assim como relatado na literatura. Além disso, as regiões de arraste decorrente da concentração de bolhas e a coalescência das mesmas com o aumento da velocidade superficial do gás interferem drasticamente na representatividade das características dos regimes. Neste caso, os pontos de auto-organização e organização para K_{ML} foram evidenciados de forma clara nos campos de velocidade obtidos, possibilitando a distinção da região/velocidade de transição dos demais regimes.

Por fim, a análise de caos demonstra ser uma ferramenta robusta para investigar a qualidade dos campos PIV com e sem pós-processamento. Isso permite que o DevML seja utilizado para desenvolver e avaliar a performance de filtros de pós-processamento PIV. Em paralelo, a utilização de K_{ML} pode ser empregada para analisar as estruturas de escoamento e, portanto, obter uma melhor compreensão da dinâmica subjacente em interações complexas.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do que foi concluído, algumas sugestões para dar seguimento a esta Tese são propostas:

- Estabelecer uma correlação empírica do parâmetro DevML com quantificação de incerteza das medidas PIV, isto é, do espaço fase para o espaço físico.
- Analisar as influências de outras regiões (próximo ao distribuidor e na altura do líquido) e do tamanho das janelas de interrogação nos parâmetros DevML e D_{ML} .

- Testar DevML e D_{ML} com outras correlações PIV, como por exemplo, SAC (*Sliding - Average Correlation*).
- Otimizar o pós-processamento PIV visando a melhor qualidade dos campos e seu reflexo nos parâmetros DevML e D_{ML} .
- Estender a aplicação de DevML e D_{ML} para dados advindos de sistemas PIV 3D-3C.
- Investigar com mais detalhes os dados para do sistema PIV 2D-3C (possíveis falhas na reconstrução da terceira componente).
- Testar com mais detalhe a influência dos filtros espaciais e temporais no pós-processamento com DevML.
- Investigar o efeito da concentração de imagem de partículas no *frame* de imagem com os parâmetros de qualidade proposto nessa Tese.
- Analisar separadamente o efeito de cada componente de velocidade do líquido em coluna de bolhas em sistemas PIV.
- Investigar os parâmetros caóticos dos campos derivados da velocidade (propagação de incerteza).
- A partir dos resultados de DevML e D_{ML} , propor um modelo “híbrido” para os sistemas PIV 2D-2C e PIV 2D-3C para minimizar as incertezas na quantificação dos diferentes regimes em uma coluna de bolhas com K_{ML} .
- Otimizar a obtenção dos cálculos (tempo computacional) dos parâmetros DevML e K_{ML} .

REFERÊNCIAS

- ABARBANEL, H. D. I. *Analysis of Observed Chaotic Data*. New York, NY: Springer New York, 1996.
- ABDULMOUTI, H. Bubbly Two-Phase Flow: Part I- Characteristics, Structures, Behaviors and Flow Patterns. Submitted for publication to *American Journal of Fluid Dynamics*. AJFD-109000073, 2014.
- ADRIAN, R. J. Hairpin vortex organization in wall turbulence. *Physics of Fluids*, v. 19, n. 4, p. 41301, 2007.
- ADRIAN, R. J. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 23, n. 1, p. 261–304, 1991.
- ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. *Particle Image Velocimetry*. New York, NY: Cambridge University Press, 2011.
- AL-MASRY, W. A.; ALI, E. M.; AQEEL, Y. M. Determination of Bubble Characteristics in Bubble Columns Using Statistical Analysis of Acoustic Sound Measurements. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 83, n. 10, p. 1196–1207, 2005.
- AMARAL, R. D. L.; MOURA, H. L. DE; FORERO, D. I. S.; CASTILHO, G. J. DE; VIANNA, S. S. V.; MORI, M. Incerteza de medidas PIP 2D-2C e 2D-3C: análise do cenário atual e estudo de caso em uma coluna de bolhas. *Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. Anais. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.
- BAKSHI, B. R.; ZHONG, H.; JIANG, P.; FAN, L. S. Analysis of flow in gas-liquid bubble columns using multi-resolution methods. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 73, n. A6, p. 608–614, 1995.
- BENDJABALLAH, N.; DHAOUADI, H.; PONCIN, S.; MIDOUX, N.; HORNUT, J.-M.; WILD, G. Hydrodynamics and flow regimes in external loop airlift reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 21, p. 5211–5221, 1999.
- BENNETT, M. A.; WEST, R. M.; LUKE, S. P.; JIA, X.; WILLIAMS, R. A. Measurement and analysis of flows in a gas–liquid column reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 21, p. 5003–5012, 1999.
- BESBES, S.; HAJEM, M. EL; AISSIA, H. BEN; CHAMPAGNE, J. Y.; JAY, J. PIV measurements and Eulerian–Lagrangian simulations of the unsteady gas–liquid flow in a needle sparger rectangular bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 126, p. 560–572, 2015.
- BIGOT, V.; GUYOT, I.; BATAILLE, D.; ROUSTAN, M. Possibilités d'utilisation de deux techniques métrologiques, capteurs de pression et fibres optiques, pour caractériser l'hydrodynamique d'un lit fluidisé triphasique. In A. Storck, & G. Wild (Eds.), *Récents Progrès en Génie des Procédés*. Technique et Documentation. Paris: Lavoisier. v.10, p. 143–149, 1990.
- BLEEK, C. M. VAN DEN; SCHOUTEN, J. C. Deterministic chaos: a new tool in fluidized bed design and operation. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, v. 53, n. 1, p. 75–87, 1993.

- BLET, V.; BERNE, P.; CHAUSSY, C.; PERRIN, S.; SCHWEICH, D. Characterization of a packed column using radioactive tracers. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 1, p. 91–101, 1999.
- BOOMSMA, A.; BHATTACHARYA, S.; TROOLIN, D.; VLACHOS, P.; POTHOS, S. PIV Uncertainty: Computational & Experimental Evaluation of Uncertainty Methods 11th International symposium on particle image velocimetry – PIV15. *Anais. Santa Barbara, California*: 2015.
- BOUILLARD, J.; ALBAN, B.; JACQUES, P.; XUERE, C. Liquid flow velocity measurements in stirred tanks by ultra-sound Doppler velocimetry. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 3, p. 747–754, 2001.
- BOUTELIER, D. TecPIV—A MATLAB-based application for PIV-analysis of experimental tectonics. *Computers & Geosciences*, v. 89, p. 186–199, 2016.
- BOYER, C.; DUQUENNE, A.-M.; WILD, G. Measuring techniques in gas–liquid and gas–liquid–solid reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 57, n. 16, p. 3185–3215, 2002.
- BOYER, C.; FANGET, B.; LEGOUPIL, S. Development of a new Gamma-Ray Tomographic system to investigate two-phase gas/liquid flows in trickle bed reactor of large diameter. CHISA'2000, Proceedings Paper no. 588, Prague, 2000.
- BRIENS, L. A.; BRIENS, C. L.; MARGARITIS, A.; HAY, J. Minimum liquid fluidization velocity in gas-liquid-solid fluidized beds of low-density particles. *Chemical Engineering Science*, v. 52, n. 21, p. 4231–4238, 1997.
- BRÖDER, D.; LAÍN, S.; SOMMERFELD, M. Experimental studies of the hydrodynamics in a bubble column. In R. Köpsel, & P. Kuchling (Eds.), *Fifth German–Japanese symposium bubble columns*. Medienzentrum der Bergakademie Freiberg: VDI, ISBN 3-86012-109-X, 2000, p.125–130, 2000.
- BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. An advanced LIF-PLV system for analysing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fractions. *Experiments in Fluids*, v. 33, n. 6, p. 826–837, 2002.
- BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Combined PIV/PTV-Measurements for the Analysis of Bubble Interactions and Coalescence in a Turbulent Flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 81, n. 3–4, p. 756–763, 2003.
- BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubbly flows. *Measurement Science and Technology*, v. 18, n. 8, p. 2513–2528, 2007.
- BROOMHEAD, D. S.; KING, G. P. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 20, n. 2, p. 217–236, 1986.
- BRÖRING, S.; FISCHER, J.; KORTE, T.; SOLLINGER, S.; LÜBBERT, A. Flow structure of the dispersed gasphase in real multiphase chemical reactors investigated by a new ultrasound–doppler technique. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 69, n. 6, p. 1247–1256, 1991.
- BUCHHAVE, P.; GEORGE, W. K.; LUMLEY, J. L. Measurement of the turbulence with the laser-doppler anemometer. v. 11, p. 443–503, 1979.

BUCHHOLZ, R.; ZAKRZEWSKI, W.; SCHUEGERL, K. Techniques for determining the properties of bubbles in bubble columns. *German Chemical Engineering*, v. 21, n. 2, p. 180–187, 1981.

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: Process Intensification*, v. 38, n. 4–6, p. 329–344, 1999.

CARTELLIER, A.; POUPOT, C.; CHAMBÉROD, E.; BARRAU, E. Sondes optiques: Innovations sur un capteur classique. *Review of Scientific Instruments*, v. 51, n. 1–2, p. 120–128, 1996.

CASSANELLO, M.; LARACHI, F.; KEMOUN, A.; AL-DAHMAN, M.; DUDUKOVIC, M. Inferring liquid chaotic dynamics in bubble columns using CARPT. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 21, p. 6125–6134, 2001.

CHARONKO, J. J.; VLACHOS, P. P. Estimation of uncertainty bounds for individual particle image velocimetry measurements from cross-correlation peak ratio. *Measurement Science and Technology*, v. 24, n. 6, p. 65301, 2013.

CHEN, R. C.; FAN, L.-S. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure in three-dimensional gas-liquid-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 47, n. 13–14, p. 3615–3622, 1992.

CHEN, R. C.; REESE, J.; FAN, L.-S. Flow structure in a three-dimensional bubble column and three-phase fluidized bed. *AIChE Journal*, v. 40, n. 7, p. 1093–1104, 1994.

CUI, Z.; FAN, L. S. Turbulence energy distributions in bubbling gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems. *Chemical Engineering Science*, v. 59, n. 8, p. 1755–1766, 2004.

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 Presented at the 10th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics. *Anais. Lisbon, Portugal*, 2000

DEEN, N. G.; WESTERWEEL, J.; DELNOIJ, E. Two-Phase PIV in Bubbly Flows: Status and Trends. *Chemical Engineering & Technology*, v. 25, n. 1, p. 97, 2002.

DEEN, N. G.; WILLEMS, P.; SINT ANNALAND, M. VAN; KUIPERS, J. A. M.; LAMMERTINK, R. G. H.; KEMPERMAN, A. J. B.; WESSLING, M.; MEER, W. G. J. VAN DER. On image pre-processing for PIV of single- and two-phase flows over reflecting objects. *Experiments in Fluids*, v. 49, n. 2, p. 525–530, 2010.

DELNOIJ, E.; KUIPERS, J. A.; SWAAIJ, W. P. VAN; WESTERWEEL, J. Measurement of gas-liquid two-phase flow in bubble columns using ensemble correlation PIV. *Chemical Engineering Science*, v. 55, n. 17, p. 3385–3395, 2000.

DELNOIJ, E.; WESTERWEEL, J.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J. A. M.; SWAAIJ, W. P. M. VAN. Ensemble correlation PIV applied to bubble plumes rising in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 21, p. 5159–5171, 1999.

DRAHOŠ, J.; BRADKA, F.; PUNČOCHÁŘ, M. Fractal behaviour of pressure fluctuations in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 47, n. 15, p. 4069–4075, 1992.

- DRAHOŠ, J.; ZAHRADNÍK, J.; PUNČOCHÁŘ, M.; FIALOVÁ, M.; BRADKA, F. Effect of operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 29, n. 2, p. 107–115, 1991.
- DUNCAN, J.; DABIRI, D.; HOVE, J.; GHARIB, M. Universal outlier detection for particle image velocimetry (PIV) and particle tracking velocimetry (PTV) data. *Measurement Science and Technology*, v. 21, n. 5, p. 57002, 2010.
- DURST, F.; MELLING, A.; WHITELAW, J. H. *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry*. Academic Press, 1976.
- ECKSTEIN, A. C.; CHARONKO, J.; VLACHOS, P. Phase correlation processing for DPIV measurements. *Experiments in Fluids*, v. 45, n. 3, p. 485–500, 2008.
- FARIAS, M. H.; TEIXEIRA, R. S.; KOILLER, J.; SANTOS, A. M. Brief review of uncertainty quantification for particle image velocimetry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v. 733, p. 12045, 2016.
- FERRARA, N. F.; PRADO, C. P. C. *Caos uma introdução*. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1994.
- FRASER; SWINNEY. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical review. A, General physics*, v. 33, n. 2, p. 1134–1140, 1986.
- FUJIWARA, A.; DANMOTO, Y.; HISHIDA, K.; MAEDA, M. Bubble deformation and flow structure measured by double shadow images and PIV/LIF. *Experiments in Fluids*, v. 36, n. 1, p. 157–165, 2004.
- GARCIA, D. A fast-all-in-one method for automated post-processing of PIV data. *Experiments in Fluids*, v. 50, n. 5, p. 1247–1259, 2011.
- GARCIA, D. Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values. *Computational Statistics & Data Analysis*, v. 54, n. 4, p. 1167–1178, 2010.
- GOURICH, B.; VIAL, C.; ESSADKI, A. H.; ALLAM, F.; BELHAJ SOULAMI, M.; ZIYAD, M. Identification of flow regimes and transition points in a bubble column through analysis of differential pressure signal—Influence of the coalescence behavior of the liquid phase. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 45, n. 3, p. 214–223, 2006.
- GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. Measuring the Strangeness of Strange Attractors. In *Physica D*, v. 9, p. 189–208, 1983a.
- GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. Estimation of Kolmogorov Entropy from a Chaotic Signal, *Physical Review A*, v.28, p.2591–2593, 1983b.
- GUI, L.; LINDKEN, R.; MERZKIRCH, W. Phase-separated PIV measurements of the flow around systems of bubbles rising in water. *Proceedings of the ASME (American Society of Mechanical Engineers) Fluids Engineering Summer Meeting*. Anais. Canadá, 1997.
- GUNES, H.; RIST, U. Spatial resolution enhancement/smoothing of stereo-particle-image-velocimetry data using proper-orthogonal-decomposition-based and Kriging interpolation methods. *Physics of Fluids*, v. 19, n. 6, p. 64101, 2007.
- HART, D. P. PIV error correction. *Experiments in Fluids*, v. 29, n. 1, p. 13–22, 2000.
- HASSAN, Y. A.; SCHMIDL, W.; ORTIZ-VILLAFUERTE, J. Investigation of three-dimensional two-phase flow structure in a bubbly pipe flow. *Measurement Science and Technology*, v. 9, n. 3, p. 309–326, 1998.

- HEINDEL, T. J. Gas flow regime changes in a bubble column filled with a fibre suspension. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 78, n. 5, p. 1017–1022, 2000.
- HOGSETT, S.; ISHII, M. Local two-phase flow measurements using sensor techniques. *Nuclear Engineering and Design*, v. 175, n. 1, p. 15–24, 1997.
- HONKANEN, M.; NOBACH, H. Background extraction from double-frame PIV images. *Experiments in Fluids*, v. 38, n. 3, p. 348–362, 2005.
- HOSOKAWA, S.; TOMIYAMA, A. Bubble-induced pseudo turbulence in laminar pipe flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 40, p. 97–105, 2013.
- HOSOKAWA, S.; TOMIYAMA, A. Turbulence modification in gas–liquid and solid–liquid dispersed two-phase pipe flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 25, n. 3, p. 489–498, 2004.
- ITYOKUMBUL, M. T. Maximum gas velocity in column flotation. *Minerals Engineering*, v. 6, n. 12, p. 1279–1286, 1993.
- JOHNSON, F.; ZIJERVELD, R.; SCHOUTEN, J.; BLEEK, C. VAN DEN; LECKNER, B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 26, n. 4, p. 663–715, 2000.
- JOSHI, J. B. Computational flow modelling and design of bubble column reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 21, p. 5893–5933, 2001.
- JOSHI, J. B.; NANDAKUMAR, K.; EVANS, G. M.; PAREEK, V. K.; GUMULYA, M. M.; SATHE, M. J.; KHANWALE, M. A. Bubble generated turbulence and direct numerical simulations. *Chemical Engineering Science*, v. 157, p. 26–75, 2017.
- JOSHI, J. B.; PATIL, T. A.; RANADE, V. V.; SHAH, Y. T. Measurement of hydrodynamic parameters in multiphase sparged reactors. *Reviews in Chemical Engineering*, v. 6, n. 2–3, p. 73–227, 1990.
- JULIÁ, J. E.; HERNÁNDEZ, L.; CHIVA, S.; VELA, A. Hydrodynamic characterization of a needle sparger rectangular bubble column: Homogeneous flow, static bubble plume and oscillating bubble plume. *Chemical Engineering Science*, v. 62, n. 22, p. 6361–6377, 2007.
- KANG, Y.; CHO, Y. J.; WOO, K. J.; KIM, S. D. Diagnosis of bubble distribution and mass transfer in pressurized bubble columns with viscous liquid medium. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 21, p. 4887–4893, 1999.
- KANTARCI, N.; BORAK, F.; ULGEN, K. O. Bubble column reactors. *Process Biochemistry*, v. 40, n. 7, p. 2263–2283, 2005.
- KANTZ, H.; SCHREIBER, T. *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge, Uk: Cambridge University Press, 1997.
- KAZAKIS, N. A.; PAPADOPOULOS, I. D.; MOUZA, A. A. Bubble columns with fine pore sparger operating in the pseudo-homogeneous regime: Gas hold up prediction and a criterion for the transition to the heterogeneous regime. *Chemical Engineering Science*, v. 62, n. 12, p. 3092–3103, 2007.
- KHALITOV, D. A.; LONGMIRE, E. K. Simultaneous two-phase PIV by two-parameter phase discrimination. *Experiments in Fluids*, v. 32, n. 2, p. 252–268, 2002.

KIGER, K. T.; PAN, C. PIV Technique for the Simultaneous Measurement of Dilute Two-Phase Flows. *Journal of Fluids Engineering*, v. 122, n. 4, p. 811, 2000.

KIKUCHI, R.; YANO, T.; TSUTSUMI, A.; YOSHIDA, K.; PUNCHOCHAR, M.; DRAHOS, J. Diagnosis of chaotic dynamics of bubble motion in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 52, n. 21, p. 3741–3745, 1997.

KIM, H. D.; YI, S. J.; KIM, J. W.; KIM, K. C. Structure analysis of bubble driven flow by time-resolved PIV and POD techniques. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 24, n. 4, p. 977–982, 2010.

KIM, M.; LEE, J. H.; PARK, H. Study of bubble-induced turbulence in upward laminar bubbly pipe flows measured with a two-phase particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 57, n. 4, p. 55, 2016.

KLUYTMANS, J. H. J.; WACHEM, B. G. M. VAN; KUSTER, B. F. M.; SCHOUTEN, J. C. Gas Holdup in a Slurry Bubble Column: Influence of Electrolyte and Carbon Particles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2001.

KRISHNA, R.; ELLENBERGER, J.; MARETTO, C. Flow regime transition in bubble columns. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 26, n. 4, p. 467–475, 1999.

KUGIUMTZIS, D.; LILLEKJENDLIE, B.; CHRISTOPHERSEN, N. Chaotic time series. Part I. Estimation of some invariant properties in state-space. *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, v. 15, n. 4, p. 205–224, 1994.

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, n. 2, p. 142–150, 1999.

LAIN, S.; BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Experimental and numerical studies of the hydrodynamics in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 21, p. 4913–4920, 1999.

LANCE, M.; BATAILLE, J. Turbulence in the Liquid-phase of a uniform bubbly air water-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, v.222, p.95-118, 1991.

LATIFI, M. A.; NADERIFAR, A.; MIDOUX, N.; MÉHAUTÉ, A. LE. Fractal behaviour of local liquid—solid mass transfer fluctuations at the wall of a trickle-bed reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 49, n. 22, p. 3823-3829, 1994.

LATIFI, M. A.; RODE, S.; MIDOUX, N.; STORCK, A. The use of microelectrodes for the determination of flow regimes in a trickle-bed reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 47, n. 8, p. 1955–1961, 1992.

LAU, Y. M.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J. A. M. Development of an image measurement technique for size distribution in dense bubbly flows. *Chemical Engineering Science*, v. 94, p. 20–29, 2013a.

LAU, Y. M.; SUJATHA, K. T.; GAEINI, M.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J. A. M. Experimental study of the bubble size distribution in a pseudo-2D bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 98, p. 203–211, 2013b.

- LETZEL, H. M.; SCHOUTEN, J. C.; KRISHNA, R.; BLEEK, C. M. VAN DEN. Characterization of regimes and regime transitions in bubble columns by chaos analysis of pressure signals. *Chemical Engineering Science*, v. 52, n. 24, p. 4447–4459, 1997.
- LIANG, D.; JIANG, C.; LI, Y. Cellular neural network to detect spurious vectors in PIV data. *Experiments in Fluids*, v. 34, n. 1, p. 52–62, 2003.
- LIN, T.-J.; REESE, J.; HONG, T.; FAN, L.-S. Quantitative analysis and computation of two-dimensional bubble columns. *AIChE Journal*, v. 42, n. 2, p. 301–318, 1996.
- LIN, T.-J.; TSUCHIYA, K.; FAN, L.-S. On the measurements of regime transition in high-pressure bubble columns. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 77, n. 2, p. 370–374, 1999.
- LIN, T.-J.; JUANG, R.-C.; CHEN, Y.-C.; CHEN, C.-C. Predictions of flow transitions in a bubble column by chaotic time series analysis of pressure fluctuation signals. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 3, p. 1057–1065, 2001a.
- LIN, T.-J.; JUANG, R.-C.; CHEN, C.-C. Characterizations of flow regime transitions in a high-pressure bubble column by chaotic time series analysis of pressure fluctuation signals. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 21, p. 6241–6247, 2001b.
- LINDKEN, R.; GUI, L.; MERZKIRCH, W. Velocity Measurements in Multiphase Flow by Means of Particle Image Velocimetry. *Chemical Engineering & Technology*, v. 22, n. 3, p. 202–206, 1999.
- LINDKEN, R.; MERZKIRCH, W. Velocity measurements of liquid and gaseous phase for a system of bubbles rising in water. *Experiments in Fluids*, v. 29, n. 7, p. S194–S201, 2000.
- 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, n. 6, p. 814–825, 2002.
- LIU, T. J.; BANKOFF, S. G. Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe—II. Void fraction, bubble velocity and bubble size distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 36, n. 4, p. 1061–1072, 1993.
- LIU, Z.; ZHENG, Y.; JIA, L.; ZHANG, Q. Study of bubble induced flow structure using PIV. *Chemical Engineering Science*, v. 60, n. 13, p. 3537–3552, 2005.
- LIU, Z.; ZHENG, Y. PIV study of bubble rising behavior. *Powder Technology*, v. 168, n. 1, p. 10–20, 2006.
- LIU, Z.; JIA, L.; ZHENG, Y.; ZHANG, Q. Flow-adaptive data validation scheme in PIV. *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 1, p. 1–11, 2008.
- LUEWISUTHICHAT, W.; TSUTSUMI, A.; YOSHIDA, K. Fractal analysis of particle trajectories in three-phase systems. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers, A: Chemical Engineering Research and Design*, v.73, p. 222–227, 1995.
- LUEWISUTHICHAT, W.; TSUTSUMI, A.; YOSHIDA, K. Deterministic chaos analysis of particle dynamics in three-phase systems. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v. 29, n. 4, p. 675–682, 1996.
- MAGAUD, F.; SOUHAR, M.; WILD, G.; BOISSON, N. Experimental study of bubble column hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 15, p. 4597–4607, 2001.

- MARTÍNEZ-MERCADO, J.; PALACIOS-MORALES, C. A.; ZENIT, R. Measurement of pseudoturbulence intensity in monodispersed bubbly liquids for $10 < Re < 500$. *Physics of Fluids*, v. 19, n. 10, p. 103302, 2007.
- MARZOUK, Y. M.; HART, D. P. Asymmetric autocorrelation function to resolve directional ambiguity in PIV images. *Experiments in Fluids*, v. 25, n. 5–6, p. 401–408, 1998.
- MASULLO, A.; THEUNISSEN, R. Adaptive vector validation in image velocimetry to minimise the influence of outlier clusters. *Experiments in Fluids*, v. 57, n. 3, p. 33, 2016.
- MAUCCI, E.; BRIENS, C. L.; MARTINUZZI, R. J.; WILD, G. Detection and characterization of piston flow regime in three-phase fluidized beds. *Powder Technology*, v. 103, n. 3, p. 243–259, 1999.
- MEINHART, C. D.; WERELEY, S. T.; SANTIAGO, J. G. A PIV Algorithm for Estimating Time-Averaged Velocity Fields. *Journal of Fluids Engineering*, v. 122, n. 2, p. 285, 2000.
- MEYER, F. Topographic distance and watershed lines. *Signal Processing*, v. 38, n. 1, p. 113–125, 1994.
- MICHIYOSHI, I.; SERIZAWA, A. Turbulence in two-phase bubbly flow. *Nuclear Engineering and Design*, v. 95, p. 253–267, 1986.
- MIYAHARA, T.; HAMAGUCHI, M.; SUKEDA, Y.; TAKAHASHI, T. Size of bubbles and liquid circulation in a bubble column with a draught tube and sieve plate. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 64, n. 5, p. 718–725, 1986.
- MONAHAN, S. M.; VITANKAR, V. S.; FOX, R. O. CFD predictions for flow-regime transitions in bubble columns. *AIChE Journal*, v. 51, n. 7, p. 1897–1923, 2005.
- MONTOYA, G.; LUCAS, D.; BAGLIETTO, E.; LIAO, Y. A review on mechanisms and models for the churn-turbulent flow regime. *Chemical Engineering Science*, v. 141, p. 86–103, 2016.
- MOURA, H. L.; CASTILHO, G. J.; CREMASCO, M. A. Avaliação da reconstrução do espaço de fase em um sistema caótico aplicação em uma seção de *riser*. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Búzios – RJ, 2012. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, v. CD ROM, 2012.
- MOURA, H. L. Análise da influência do ruído na obtenção de atratores e parâmetros determinísticos da teoria do caos aplicada em uma seção de *riser* de um leito fluidizado circulante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2013.
- MOURA, H. L. DE; CASTILHO, G. J. DE; CREMASCO, M. A. Utilização da análise de caos no processamento de sinais: discussão sobre propriedades caóticas. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Anais. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.
- MUDDE, R. F.; LEE, D. J.; REESE, J.; FAN, L.-S. Role of coherent structures on Reynolds stresses in a 2-D bubble column. *AIChE Journal*, v. 43, n. 4, p. 913–926, 1997.
- MUDDE, R. F.; Gravity-Driven Bubbly Flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol 37. p 393–423, 2005.

- NEAL, D. R.; SCIACCHITANO, A.; SMITH, B. L.; SCARANO, F. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: the experimental database. *Measurement Science and Technology*, v. 26, n. 7, p. 74003, 2015.
- NEDELTCHEV, S.; KUMAR, S. B.; DUDUKOVIC, M. P. Flow Regime Identification in a Bubble Column Based on both Kolmogorov Entropy and Quality of Mixedness Derived from CAERPT Data. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 81, n. 3–4, p. 367–374, 2003.
- NEDELTCHEV, S.; SHAIKH, A.; AL-DAHMAN, M. Flow Regime Identification in a Bubble Column Based on Both Statistical and Chaotic Parameters Applied to Computed Tomography Data. *Chemical Engineering & Technology*, v. 29, n. 9, p. 1054–1060, 2006.
- NEDELTCHEV, S.; JORDAN, U.; LORENZ, O.; SCHUMPE, A. Identification of Various Transition Velocities in a Bubble Column Based on Kolmogorov Entropy. *Chemical Engineering & Technology*, v. 30, n. 4, p. 534–539, abr. 2007.
- NEDELTCHEV, S.; SHAIKH, A.; AL-DAHMAN, M. Flow Regime Identification in a Bubble Column via Nuclear Gauge Densitometry and Chaos Analysis. *Chemical Engineering & Technology*, v. 34, n. 2, p. 225–233, 2011.
- NEDELTCHEV, S.; SHAIKH, A. A new method for identification of the main transition velocities in multiphase reactors based on information entropy theory. *Chemical Engineering Science*, v. 100, p. 2–14, 2013.
- NEDELTCHEV, S. New methods for flow regime identification in bubble columns and fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 137, p. 436–446, 2015.
- NEDELTCHEV, S.; HAMPEL, U.; SCHUBERT, M. Investigation of the radial effect on the transition velocities in a bubble column based on the modified Shannon entropy. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 115, p. 303–309, 2016.
- NOGUEIRA, J.; LECUONA, A.; RODRÍGUEZ, P. A. Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data. *Measurement Science and Technology*, v. 8, n. 12, p. 1493–1501, 1997.
- OLMOS, E.; GENTRIC, C.; PONCIN, S.; MIDOUX, N. Description of flow regime transitions in bubble columns via laser Doppler anemometry signals processing. *Chemical Engineering Science*, v. 58, n. 9, p. 1731–1742, 2003.
- OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979.
- PANG, M.; WEI, J. Experimental investigation on the turbulence channel flow laden with small bubbles by PIV. *Chemical Engineering Science*, v. 94, p. 302–315, 2013.
- PANT, H. J.; SAROHA, A. K.; NIGAM, K. D. P. Measurement of liquid holdup and axial dispersion in trickle bed reactors using radiotracer technique. *Nukleonika*, v. 45, n. 4, p. 235–241, 2000.
- PARK, S. H.; KIM, S. D. Characterization of pressure signals in a bubble column by wavelet packet transform. v. 20, n. 1, p. 128–132, 2003.
- PUN, C.-S.; SUSANTO, A.; DABIRI, D. Mode-ratio bootstrapping method for PIV outlier correction. *Measurement Science and Technology*, v. 18, n. 11, p. 3511–3522, 2007.

- RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; WERELEY, S. T.; KOMPENHANS, J. Introduction. In: Particle Image Velocimetry. 2nd. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- REILLY, I. G.; SCOTT, D. S.; DEBRUIJN, T. J.; MACINTYRE, D. The role of gas phase momentum in determining gas holdup and hydrodynamic flow regimes in bubble column operations. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 72, n. 1, p. 3–12, 1994.
- RIBEIRO JR., C. P.; MEWES, D. The influence of electrolytes on gas hold-up and regime transition in bubble columns. *Chemical Engineering Science*, v. 62, n. 17, p. 4501–4509, 2007.
- RIBEIRO, C. P. On the estimation of the regime transition point in bubble columns. *Chemical Engineering Journal*, v. 140, n. 1, p. 473–482, 2008.
- RIBOUX, G.; RISSO, F.; LEGENDRE, D. Experimental characterization of the agitation generated by bubbles rising at high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 643, p. 509, 2010.
- RUZICKA, M.; THOMAS, N. Buoyancy-driven instability of bubbly layers: analogy with thermal convection. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 29, n. 2, p. 249–270, 2003.
- SARRAFI, A.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; SMITH, J. M.; JAMIALAHMADI, M. Gas holdup in homogeneous and heterogeneous gas-liquid bubble column reactors. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 77, n. 1, p. 11–21, 1999.
- 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, n. 8, p. 2431–2442, 2010.
- SATHE, M.; JOSHI, J.; EVANS, G. Characterization of turbulence in rectangular bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 100, p. 52–68, 2013.
- SCHARNOWSKI, S.; KÄHLER, C. J. Estimation and optimization of loss-of-pair uncertainties based on PIV correlation functions. *Experiments in Fluids*, v. 57, n. 2, p. 23, 2016.
- SCHOUTEN, J. C.; TAKENS, F.; VAN DEN BLEEK, C. M. Estimation of the dimension of a noisy attractor, *Physical Review E*, v.50, n.3, pp.1851-1961, 1994a.
- SCHOUTEN, J. C.; TAKENS, F.; VAN DEN BLEEK, C. M. Maximum-Likelihood-Estimation of the Entropy of an Attractor. In *Physical Review E*, v. 49, pp. 126-129, 1994b.
- SCHRÖDER, A.; WILLERT, C. E. Particle Image Velocimetry: New Developments and Recent Applications (Topics in Applied Physics), 2008.
- SCIACCHITANO, A.; SCARANO, F.; WIENEKE, B. Multi-frame pyramid correlation for time-resolved PIV. *Experiments in Fluids*, v. 53, n. 4, p. 1087–1105, 2012.
- SCIACCHITANO, A.; WIENEKE, B.; SCARANO, F. PIV uncertainty quantification by image matching. *Measurement Science and Technology*, v. 24, n. 4, p. 45302, 2013.
- SCIACCHITANO, A.; NEAL, D. R.; SMITH, B. L.; WARNER, S. O.; VLACHOS, P. P.; WIENEKE, B.; SCARANO, F. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: comparative assessment of methods. *Measurement Science and Technology*, v. 26, n. 7, p. 74004, 2015.
- SCIACCHITANO, A.; WIENEKE, B. PIV uncertainty propagation. *Measurement Science and Technology*, v. 27, n. 8, p. 84006, 2016.

- SEDERMAN, A. J.; JOHNS, M. L.; BRAMLEY, A. S.; ALEXANDER, P.; GLADDEN, L. F. Magnetic resonance imaging of liquid flow and pore structure within packed beds. *Chemical Engineering Science*, v. 52, n. 14, p. 2239–2250, 1997.
- SEOL, D.-G.; SOCOLOFSKY, S. A. Vector post-processing algorithm for phase discrimination of two-phase PIV. *Experiments in Fluids*, v. 45, n. 2, p. 223–239, 2008.
- SERIZAWA, A.; KATOCOKA, I.; MICHİYOSHI, I. Turbulence Structures of Air-water Bubbly Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 2, p. 221–246, 1975.
- SHAH, Y. T.; KELKAR, B. G.; GODBOLE, S. P.; DECKWER, W.-D. Design parameters estimations for bubble column reactors. *AIChE Journal*, v. 28, n. 3, p. 353–379, 1982.
- SHAIKH, A.; AL-DAHMAN, M. Characterization of the hydrodynamic flow regime in bubble columns via computed tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 16, n. 2, p. 91–98, 2005.
- SHAIKH, A.; AL-DAHMAN, M. H. A Review on Flow Regime Transition in Bubble Columns. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, v. 5, n. 1, 2007.
- SHAVIT, U.; LOWE, R. J.; STEINBUCK, J. V. Intensity Capping: a simple method to improve cross-correlation PIV results. *Experiments in Fluids*, v. 42, n. 2, p. 225–240, 2007.
- SHAWKAT, M. E.; CHING, C. Y.; SHOUKRI, M. Bubble and liquid turbulence characteristics of bubbly flow in a large diameter vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 34, n. 8, p. 767–785, 2008.
- SHEN, G.; FINCH, J. A. Bubble swarm velocity in a column. *Chemical Engineering Science*, v. 51, n. 14, p. 3665–3674, 1996.
- SHINNEEB, A.-M.; BUGG, J. D.; BALACHANDAR, R. Variable threshold outlier identification in PIV data. *Measurement Science and Technology*, v. 15, n. 9, p. 1722–1732, 2004.
- SHNIP, A. I.; KOLHATKAR, R. V.; SWAMY, D.; JOSHI, J. B. Criteria for the transition from the homogeneous to the heterogeneous regime in two-dimensional bubble column reactors. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 18, n. 5, p. 705–726, 1992.
- SIMONNET, M.; GENTRIC, C.; OLMOS, E.; MIDOUX, N. CFD simulation of the flow field in a bubble column reactor: Importance of the drag force formulation to describe regime transitions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 47, n. 9, p. 1726–1737, 2008.
- SINGH, B. K.; QUIYOOM, A.; BUWA, V. V. Dynamics of gas–liquid flow in a cylindrical bubble column: Comparison of electrical resistance tomography and voidage probe measurements. *Chemical Engineering Science*, v. 158, p. 124–139, 2017.
- SIVAKUMAR, B.; PHOON, K.-K.; LIONG, S.-Y.; LIAW, C.-Y. A systematic approach to noise reduction in chaotic hydrological time series. *Journal of Hydrology*, v. 219, n. 3–4, p. 103–135, 1999.
- SMITH, S.W. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*, California Technical Publishing, San Diego CA, 1999.
- SO, S.; MORIKITA, H.; TAKAGI, S.; MATSUMOTO, Y. Laser Doppler velocimetry measurement of turbulent bubbly channel flow. *Experiments in Fluids*, v. 33, n. 1, p. 135–142, 2002.

- TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence, In: Dynamical systems and turbulence, Lecture Notes in Mathematics, Eds. D.A. Rand e L-S. Young, Springer Verlag, v. 898, p.366-381, 1981.
- TAKENS, F. On the numerical determination of the dimension of an attractor. In: Dynamical Systems and Bifurcations. Springer Berlin Heidelberg, p. 99–106, 1985.
- THEOFANOUS, T. G.; SULLIVAN, J. Turbulence in two-phase dispersed flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 116, n. 1, p. 343, 1982.
- THEUNISSEN, R.; SCARANO, F.; RIETHMULLER, M. L. On improvement of PIV image interrogation near stationary interfaces. *Experiments in Fluids*, v. 45, n. 4, p. 557–572, 2008.
- THIELICKE, W.; STAMHUIS, E. J. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, v. 2, n. 1, 2014.
- THIMMAPURAM, P. R.; RAO, N. S.; SAXENA, S. C. Characterization of hydrodynamic regimes in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, v. 47, n. 13–14, p. 3355–3362, 1992.
- THORAT, B. N.; JOSHI, J. B. Regime transition in bubble columns: experimental and predictions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 28, n. 5, p. 423–430, 2004.
- TIMMINS, B. H.; SMITH, B. L.; VLACHOS, P. P. Automatic Particle Image Velocimetry Uncertainty Quantification. ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting: v.1, Symposia – Parts A, B, and C. Anais. ASME, 2010.
- TIMMINS, B. H.; WILSON, B. W.; SMITH, B. L.; VLACHOS, P. P. A method for automatic estimation of instantaneous local uncertainty in particle image velocimetry measurements. *Experiments in Fluids*, v. 53, n. 4, p. 1133–1147, 2012.
- TOKUHIRO, A.; MAEKAWA, M.; IIZUKA, K.; HISHIDA, K.; MAEDA, M. Turbulent flow past a bubble and an ellipsoid using shadow-image and PIV techniques. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 24, n. 8, p. 1383–1406, 1998.
- TRIPATHI, M. K.; SAHU, K. C.; GOVINDARAJAN, R. Dynamics of an initially spherical bubble rising in quiescent liquid. *Nature Communications*, v. 6, p. 6268, 2015.
- 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, n. 5, p. 733–744, 1993.
- URIBE-SALAS, A.; GOMEZ, C. O.; FINCH, J. A. A conductivity technique for gas and solids holdup determination in three-phase reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 49, n. 1, p. 1–10, 1994.
- VIAL, C.; CAMARASA, E.; PONCIN, S.; WILD, G.; MIDOUX, N.; BOUILLARD, J. Study of hydrodynamic behaviour in bubble columns and external loop airlift reactors through analysis of pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*, v. 55, n. 15, p. 2957–2973, 2000.
- VIAL, C.; PONCIN, S.; WILD, G.; MIDOUX, N. A simple method for regime identification and flow characterisation in bubble columns and airlift reactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 40, n. 2, p. 135–151, 2001.

- VIJAYAN, M.; SCHLABERG, H. I.; WANG, M. Effects of sparger geometry on the mechanism of flow pattern transition in a bubble column. *Chemical Engineering Journal*, v. 130, n. 2, p. 171–178, 2007.
- VRIES, A. W. DE; BIESHEUVEL, A.; WIJNGAARDEN, L. VAN. Notes on the path and wake of a gas bubble rising in pure water. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 28, n. 11, p. 1823–1835, 2002.
- WANG, S. K.; LEE, S. J.; JONES, O. C.; LAHEY, R. T. Turbulence Structure and Phase Distribution Measurements in Bubbly Two-phase Flows. *International Journal of Multiphase Flow*, v.13, p. 327-343, 1987.
- WESTERWEEL, Jerry. *Digital particle image velocimetry: theory and application*. TU Delft, Delft University of Technology, 1993.
- WESTERWEEL, J. Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data. *Experiments in Fluids*, v. 16–16, n. 3–4, p. 236–247, 1994.
- WESTERWEEL, J.; SCARANO, F. Universal outlier detection for PIV data. *Experiments in Fluids*, v. 39, n. 6, p. 1096–1100, 2005.
- WICHTERLE, K.; VEČEŘ, M.; RŮŽIČKA, M. Asymmetric deformation of bubble shape: cause or effect of vortex-shedding? *Chemical Papers*, v. 68, n. 1, p. 74–79, 2014.
- WIENEKE, B. PIV uncertainty quantification from correlation statistics. *Measurement Science and Technology*, v. 26, n. 7, p. 74002, 2015.
- WIJNGAARDEN, L. VAN. On Pseudo Turbulence. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, v. 10, n. 1–4, p. 449–458, 1998.
- WILKINSON, P. M.; SPEK, A. P.; DIERENDONCK, L. L. VAN. Design parameters estimation for scale-up of high-pressure bubble columns. *AIChE Journal*, v. 38, n. 4, p. 544–554, 1992.
- WU, J. J.; WANG, D.; LI, L. H.; ZHOU, J. Characterization of Flow Regimes in Bubble Columns through CCF Analysis of Pressure Fluctuations. *Chemical Engineering & Technology*, v. 28, n. 10, p. 1109–1113, 2005.
- XUE, Z.; CHARONKO, J. J.; VLACHOS, P. P. Particle image velocimetry correlation signal-to-noise ratio metrics and measurement uncertainty quantification. *Measurement Science and Technology*, v. 25, n. 11, p. 115301, 2014.
- XUE, Z.; CHARONKO, J. J.; VLACHOS, P. P. Particle image pattern mutual information and uncertainty estimation for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, v. 26, n. 7, p. 74001, 2015.
- ZAHRADNÍK, J.; FIALOVÁ, M.; RŮŽIČKA, M.; DRAHŮS, J.; KAŠTÁNEK, F.; THOMAS, N. H. *Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors*. Elsevier Science Ltd, 1997.
- ZHOU, W.; DUŠEK, J. Marginal stability curve of a deformable bubble. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 89, p. 218–227, 2017.

APÊNDICE A — Desafios da análise PIV na turbulência induzida pela passagem da bolha

Este apêndice tem como objetivo respaldar os resultados apresentados na Figura 12, 13 e 14 do Capítulo 3.1 referente às regiões de arraste ocasionadas pela passagem das bolhas e falha de análise PIV causada pelo baixo DVR para U_G baixas. As Figuras A1 e A2 apresentam instantâneos sucessivos da *raw image* (t e $t + \Delta t$), respectivamente, em que se destacam a forma e o diâmetro da bolha, campo de velocidade, campo vetorial e de vorticidade do líquido.

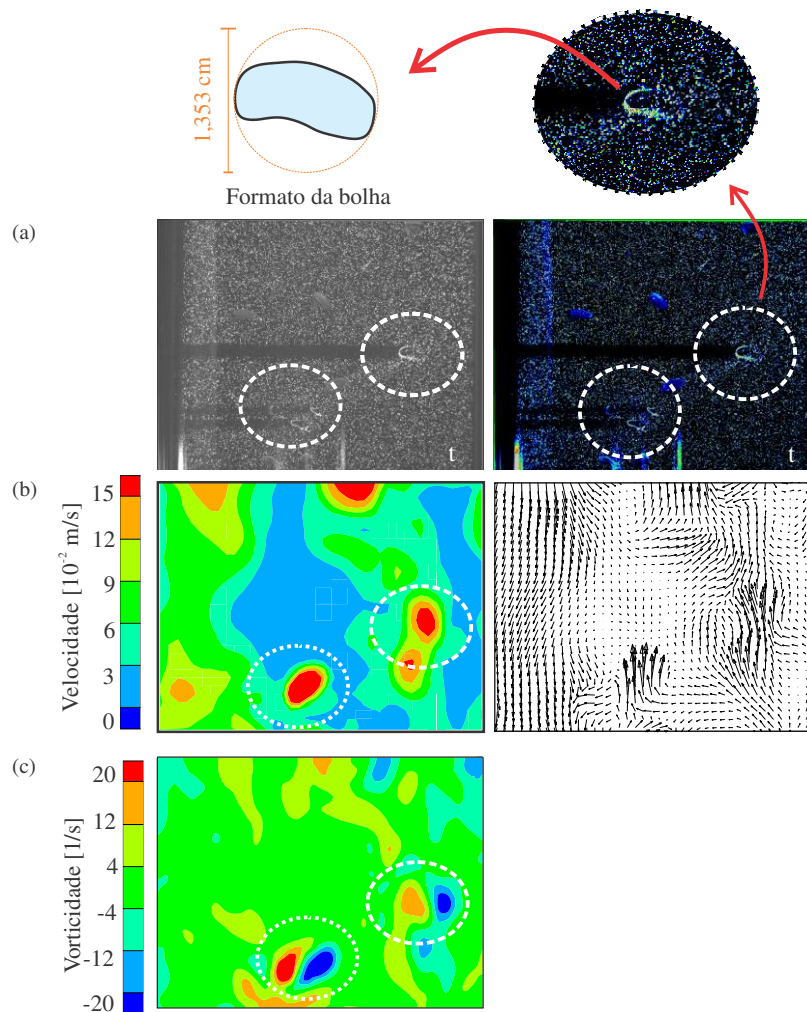


Figura A 1 - Para $U_G = 0,158 \times 10^{-2}$ m/s. (a) *Raw image* para o instantâneo t das bolhas no plano de luz destacando o seu formato e diâmetro. (b) Campo instantâneo de velocidade e vetorial. (c) Campo instantâneo de vorticidade.

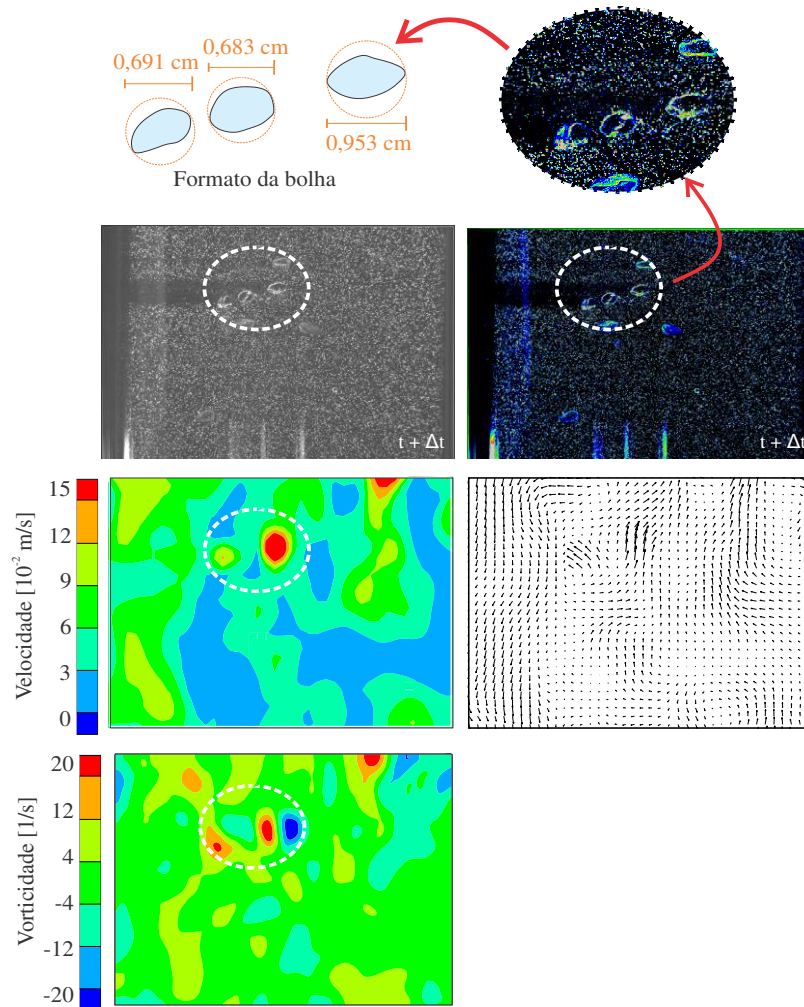


Figura A 2 - Para $U_G = 0,158 \times 10^{-2}$ m/s. (a) *Raw image* para o instantâneo $t + \Delta t$ ($\Delta t = 1/f = 0,238$ s) para um grupo de bolhas no plano de luz destacando o seu formato e diâmetro. (b) Campo instantâneo de velocidade e vetorial. (c) Campo instantâneo de vorticidade.

Para os dois instantâneos (Figuras A1 e A2), observa-se o contorno irregular das bolhas com formato similar ao elipsoidal para $U_G = 0,158 \times 10^{-2}$ m/s. Em relação ao diâmetro das bolhas, o ideal seria realizar uma análise da distribuição do diâmetro das bolhas para os 4000 pares de *frames*. Contudo, essa proposta desvirtuaria do objetivo desta Tese. Pode-se inferir que o diâmetro das bolhas encontrados para os diferentes instantâneos, representados nas Figuras A1 e A2, possuem condições para induzir fenômenos turbulentos na fase líquida. Pang e Wei (2003), por exemplo, observaram fenômenos semelhantes com diâmetro de bolhas de até 0,5 mm. Os valores dos diâmetros expostos nas Figuras A1 e A2 foram calculados de forma semelhante ao *software* DaVis 8.1 da La Vision, isto é, círculos com um diâmetro correspondente à área projetada das bolhas são desenhados e centrados na área circunscrita. Nas Figuras A1 e A2, ainda é possível observar regiões de elevada velocidade próximo às bolhas

(vetores que possuem maiores magnitudes em relação à sua vizinhança) e pares de vórtices de contra-rotação na mesma região (zonas de esteiras) em decorrência da sua passagem. Esses resultados corroboram com os obtidos nos trabalhos, por exemplo, de Joshi et al. (2017), Kim et al., (2016), Tripathi et al. (2015), Wichterle et al. (2014), Liu et al. (2005) e Lindken e Merzkirch (2000) para diferentes U_G , configurações de colunas ou canais, fase líquida (diferentes densidades) e métodos experimentais de aquisição dos campos, como discutido em detalhes na seção 2.12.

Os elevados valores dos vetores de velocidade observados nas Figuras A1 e A2, são decorrentes diretamente dos fenômenos ocasionados por BIT, isto é, interação mútua dos vórtices de contra-rotação e formação das esteiras a partir da ascensão das bolhas pela coluna. Nesse caso, para baixa velocidade média do escoamento ($U_G = 0,158 \times 10^{-2}$ m/s), a passagem da bolha acarreta no surgimento de altos gradientes de deslocamento das imagens de partículas o que torna a análise PIV problemática devido às incertezas não quantificadas. De acordo com Scharnowski e Kähler (2016), quando a resolução espacial não é apropriada, as maiores incertezas são geralmente causadas por gradientes de escoamentos – evidentemente que existem outras fontes de incerteza, como por exemplo, o movimento para fora do plano das partículas, sobreposição da folha de luz e reflexão da luz *laser*.

Segundo Hosokawa e Tomiyama (2013), em outras técnicas de medição como LDV, por exemplo, esses erros devido a gradientes de escoamentos são comuns (Durst et al., 1976; Buchhave et al., 1979). Em escoamentos borbulhantes com baixa velocidade superficial de gás, a velocidade do líquido pode flutuar altamente devido a turbulência induzida pela passagem da bolha no volume de medição (no caso da LDV) resultando em uma alta taxa de aquisição de dados. Por outro lado, quando as bolhas estão muito afastadas do volume de medição, a taxa de aquisição de dados assume um valor mais baixo devido à baixa velocidade do líquido. Como consequência, para um dado intervalo de tempo, a velocidade média do líquido não se torna igual à média aritmética entre as respectivas velocidades instantâneas e a esse fato denomina-se erro de polarização (*bias errors*).

Esse erro de polarização ou sistemático, devido ao problema de amostragem (*bias sampling*) produz, principalmente, uma troca no sentido da velocidade (positivo para negativo e vice-versa). De acordo com Marzouk e Hart (1998), para a técnica PIV, o efeito da troca de sinal de velocidade, denominado de ambiguidade direcional, foi observado exaustivamente em campos processados a partir de algoritmos de autocorrelação (modo *single frame* de gravação). Porém, utilizando a abordagem da correlação cruzada (modo *double frame* de gravação) esse

erro pode ser eliminado. Nesta Tese, entretanto, verificou-se que o modo *double frame* pode falhar na investigação da pluma das bolhas, especialmente em baixos valores de U_G . Além do difícil acesso óptico e da distorção provocado pelas bolhas, os altos gradientes de deslocamento do fluido produziram erros de detectibilidade de pico (ver resultados do Capítulo 3.1). Concluiu-se que esse problema está associado diretamente ao baixo DVR do sistema (de forma semelhante ao problema de aquisição da técnica LDV) em decorrências dos fenômenos associados ao BIT.

Como alternativa para contornar esse problema, uma atualização do equipamento PIV com um maior DVR possibilita utilizar o modo de gravação *multiple-frame* (por exemplo, utilizando 5 imagens para determinar um instantâneo de velocidade) e otimizar a interrogação PIV utilizando outras abordagens de correlação, por exemplo, a *pyramid cross correlation*. Desse modo, uma nova avaliação da incerteza das medidas pode ser obtida (seja por métodos de incertezas PIV ou análise caótica para campos pós processados) com o intuito de garantir a qualidade das medidas tanto para baixos quanto para altos valores de U_G em escoamento em coluna de bolhas.

APÊNDICE B — Lista de trabalhos publicados

MOURA, H. L., AMARAL, R. L., FORERO, D. I. S., CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. USING CHAOS ANALYSIS FOR EVALUATING THE QUALITY OF F-PIV MEASUREMENTS IN A BUBBLE COLUMN. *Chemical Engineering Science*, v.160, p. 54-71, 2017.

MOURA, H. L., AMARAL, R. L., FORERO, D. I. S., CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. INFLUÊNCIA DA TERCEIRA COMPONENTE DE VELOCIDADE NA QUALIDADE DE MEDIDAS F-PIV COM BASE NA ANÁLISE DA DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016, Fortaleza-CE. Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2016.

AMARAL, R. L., **MOURA, H. L.**, EMÍDIO, D., FIGUEIRAS, M., CASTILHO, G. J., MORI, M. UTILIZAÇÃO DO YOUTUBE COMO FERRAMENTA COMPLEMENTAR NA PESQUISA E ENSINO DA ENGENHARIA QUÍMICA: ESTUDO DE CASO DO CANAL RATECH. In: XVI Encontro Brasileiro sobre o Ensino em Engenharia Química, 2016, Fortaleza-CE. Encontro Brasileiro sobre o Ensino em Engenharia Química (ENBEQ), 2016.

AMARAL, R. L., **MOURA, H. L.**, FORERO, D. I. S., CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. ENSEMBLE CORRELATION EM MEDIDAS F-PIV 2C-2D e 3C-2D DE UMA COLUNA DE BOLHAS: EFEITO DO NÚMERO DE PARES DE FRAMES. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016, Fortaleza-CE. Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2016.

FORERO, D. I. S., AMARAL, R. L., **MOURA, H. L.**, CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. EFEITO DA PRESENÇA DE PARTICULADOS NA QUALIDADE DAS MEDIDAS F-PIV 3C-2D DE UM FLUIDO NÃO-NEWTONIANO EM UMA COLUNA DE BOLHAS. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016, Fortaleza-CE. Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2016.

MOURA, H. L., AMARAL, R. L., FORERO, D. I. S., CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. CHAOS ANALYSIS OF THE PIV MEASUREMENT QUALITY ON THE LIQUID VELOCITY FLUCTUATION IN A BUBBLE COLUMN SECTION. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2015, Rio de Janeiro – RJ.

MOURA, H. L., AMARAL, R. L., FORERO, D. I. S., CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. INCERTEZA DE MEDIDAS PIV 2D-2C E 2D-3C: ANÁLISE DA ENTROPIA DE KOLMOGOROV A PARTIR DE MEDIÇÕES PIV NO ESCOAMENTO DA FASE LÍQUIDA DE UMA COLUNA DE BOLHAS. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMA PARTICULADOS, 2015, São Carlos – SP.

AMARAL, R. L., **MOURA, H. L.**, FORERO, D. I. S., CASTILHO, G. J., VIANNA, S.S.V., MORI, M. INCERTEZA DE MEDIDAS PIV 2D-2C E 2D-3C: ANÁLISE DO CENÁRIO ATUAL E ESTUDO DE CASO EM UMA COLUNA DE BOLHAS. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMA PARTICULADOS, 2015, São Carlos – SP.

MOURA, H. L., CASTILHO, G. J., CREMASCO, M. A. UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE DE CAOS NO PROCESSAMENTO DE SINAIS: DISCUSSÃO SOBRE PROPRIEDADES CAÓTICAS. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMA PARTICULADOS, 2015, São Carlos – SP.

ANEXO A — Efeito do ruído nos invariantes caóticos e método da máxima verossimilhança para obtenção da dimensão de correlação (D_{ML})

Apesar da importância das técnicas de caracterização de atratores a partir dos invariantes caóticos, existem problemas quando se analisam séries temporais experimentais. Com efeito, nem todos os sinais experimentais são passíveis de análise. Sinais experimentais estão em maior ou menor grau contaminados por ruído (Ferrara e Prado, 1994). Tal fato compromete, em particular, a utilização da reconstrução a partir do método de Takens (1981), que teoricamente aplica-se a sinais sem ruídos, bem como a obtenção da dimensão de correlação e entropia de Kolmogorov a partir do algoritmo de Grassberger e Procaccia (1983a, 1983b). Para contornar essa problemática, o método da máxima verossimilhança desenvolvido por Schouten et al. (1994a,b) para obtenção dos invariantes caóticos é aplicado em sinais experimentais visando justamente reduzir os efeitos do ruído e solucionar os problemas associados à capacidade de previsão teórica do comportamento do sistema (Moura, 2013).

Considerando que há dois tipos de ruído, o de medição e o dinâmico, a gravidade da influência desse sobre as técnicas de análise de dados depende diretamente do nível e da sua natureza. Ruído de medição refere-se à presença de erros em observações ou em dispositivos de medição, que são independentes da dinâmica. Ruído dinâmico, em contraste com o ruído de medição, é um processo de *feedback* em que o sistema é perturbado aleatoriamente em cada etapa de tempo (Schouten et al., 1994a). Segundo Sivakumar et al. (1999), o ruído dinâmico induz maiores problemas em processamento de dados do que o ruído de medição, desde que, neste último caso, exista uma trajetória limpa nas proximidades do sistema determinístico subjacente. Além disso, o que se interpreta ser ruído dinâmico pode às vezes ser parte da dinâmica determinística de alta dimensionalidade com pequena amplitude. Mesmo que este não venha a ser o caso, ruído dinâmico pode ser essencial para a dinâmica observada porque transições de comportamento qualitativamente diferentes podem ser induzidas ou adiadas por este. Segundo Kantz e Schreiber (1997), alguns dos mais característicos exemplos dos efeitos do ruído são: a auto similaridade do atrator é quebrada; a reconstrução do espaço de fase se apresenta como um sistema de alta dimensionalidade em pequenas escalas; as trajetórias

próximas divergem de forma irregular em vez da forma exponencial; o erro de predição é alto não importando o método de previsão e a precisão de obtenção dos dados.

A estimativa do nível e a natureza do ruído nos dados experimentais são importantes para compreender seus possíveis efeitos sobre as técnicas de análise de dados (Moura, 2013). Para tal, o método de determinação do nível de ruído de Schouten et al. (1994a) é derivado sob a suposição de que os dados são amostras de um atrator de baixa dimensionalidade e contaminados por ruído, que é estritamente limitado em magnitude. Uma simples expressão analítica é derivada a partir da integral de correlação (Equação A1), que tem como objetivo relacionar o nível de ruído e a dimensão de correlação em séries experimentais.

A integral de correlação é definida como:

$$C(l) = \frac{1}{N^2} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta[l - |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|] \quad (\text{A1})$$

em que $\theta(x)$ é a função de Heaviside. Nesse caso, $x = (l - |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|)$, para $x \geq 0$ implica que $\theta(x) = 1$ e $x \leq 0$ implica que $\theta(x) = 0$. A correlação integral conta o número de pares de pontos (\vec{x}_i, \vec{x}_j) separados no atrator cuja distância é menor do que l . Se a série temporal é caracterizada por um atrator, a correlação integral obedece a uma lei de potência com:

$$C(l) \approx l^D \quad \text{com } l \rightarrow 0 \text{ e } N \rightarrow \infty \quad (\text{A2})$$

o expoente D , definido como dimensão de correlação do atrator, pode ser obtido a partir da inclinação do gráfico $\ln[C(l)]$ versus $\ln(l)$. A integral de correlação fornece valores confiáveis quando os dados forem livres de ruído. No entanto, para dados ruidosos, tais como dados experimentais, este método apresenta algumas falhas. Proposto por Schouten et al. (1994a), a integral de correlação é redimensionada com base na norma máxima considerando que o ruído induz um desvio nas distâncias das trajetórias. Representado na Equação (A3), este método propõe uma redefinição das distâncias dos pontos atratores com a possibilidade de limitar a amplitude de dados ruidosos:

$$C(r) = \left[\frac{r - r_n}{1 - r_n} \right]^D, \quad r_n \leq r \leq 1 \quad (\text{A3})$$

em que $r = l_z / l_0$ e $r_n = l_n / l_0$ são as distâncias normalizadas em relação ao comprimento de corte l_0 . Neste caso l_z é a distância máxima em relação aos vetores com a presença de ruído, l_n é a distância máxima ou amplitude do ruído e l_0 pode ser obtido a partir do desvio médio absoluto da série temporal. Segundo Schouten et al. (1994a), quando l_n é conhecido, a priori, todas as distâncias são redimensionadas e a dimensão de correlação pode ser estimada a partir da inclinação de $\ln[C(l)]$ vs $\ln[l - l_n]$ ou $\ln[C(l)]$ vs $\ln[r - r_n]$. Alternativamente, aplicando o método da máxima verossimilhança na Equação (A3), uma estimativa da dimensão de correlação é obtida pela Equação (A4).

$$D_{ML,n} = \left[-\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln \left(\frac{r_i - r_n}{1 - r_n} \right) \right]^{-1}, \quad r_n \leq r_i \leq 1 \quad (\text{A4})$$

No entanto, na maioria das situações práticas, l_n (amplitude do ruído) não é conhecido ou não é conhecido com precisão suficiente. Nesses casos, considerando que a função $C(r)$ é conhecida, os parâmetros D e r_n podem ser determinados utilizando o método dos mínimos quadrados Levenberg-Marquardt. Verificou-se que a solução da Equação (A4) não é tão trivial, além de exigir um alto tempo computacional, esse método exige a solução de duas equações algébricas não lineares bem como o armazenamento de todas as distâncias de r_n (Schouten et al., 1994a).

Como alternativa, pode-se aplicar o método da máxima verossimilhança na integral de correlação, Equação (A1), sem o redimensionamento das distancias dos vetores corrompidos pelos ruídos. A dimensão de correlação D_{ML} de acordo com Takens (1985) é dado por

$$D_{ML} = \left[-\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln(r_i) \right]^{-1} \quad (\text{A5})$$

O vetor $\{r_1, r_2, \dots, r_M\}$ é obtido de uma amostra aleatória de M observações de uma função de distribuição cumulativa. O erro padrão para o cálculo de D_{ML} é dado pela Equação (6) apenas em função do tamanho da amostra M .

$$s \left(\frac{1}{D_{ML}} \right) = \frac{\sigma(1/D_{ML})}{1/D_{ML}} = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (\text{A6})$$

ANEXO B — Método da máxima verossimilhança para obtenção da entropia de Kolmogorov (K_{ML})

O método de estimação de máxima verossimilhança proposto por Schouten et al. (1994b) baseia-se na divergência exponencial das trajetórias próximas ao atrator. Nesse método, a entropia de Kolmogorov é calculada a partir do número médio de passos necessários para um par arbitrário de vetores X_i e X_j , que estão inicialmente dentro de um comprimento máximo específico l_0 , possam se separar (exponencialmente) até que a distância (entre o par) se torne maior que l_0 (Takens, 1981; Grassberger e Procaccia, 1983b). O intervalo de tempo necessário para que dois pontos inicialmente próximos se separem por uma distância maior do que l_0 será distribuído exponencialmente de acordo com:

$$C(t_0) \propto e^{-Kt_0} \quad (\text{B1})$$

A distribuição discreta da Equação (B1) para uma série temporal amostrada com uma frequência f_s e passo de tempo $\tau_s = 1/f_s$ é

$$C(b) \propto e^{-Kb\tau_s} \quad (\text{B2})$$

A função de distribuição cumulativa (Equação B2) descreve a queda exponencial em função de b . Esta variável b é igual ao número de pares sequenciais de pontos no atrator, dado um par inicial de pontos independentes dentro de uma distância l_0 , onde a distância entre os pontos é pela primeira vez maior que a distância máxima especificada l_0 . Em outras palavras, b é obtido a partir do número de vezes que

$$\|X_{i+b-1} - X_{j+b-1}\| \leq l_0 \quad \text{com } b = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{B3})$$

desde que $\|X_i - X_j\| \leq l_0$, enquanto $\|X_{i+b} - X_{j+b}\| > l_0$.

Um valor de b_m é obtido a para cada par sequencial i, j investigados. Então, o valor de \bar{b} é calculado pela média dos valores b_m

$$\bar{b} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M b_m \quad (\text{B4})$$

em que M é o número de pares investigados.

Finalmente, a entropia de máxima verossimilhança (*maximum likelihood Kolmogorov entropy*), K_{ML} é estimada como

$$K \approx K_{ML} = -\frac{1}{\tau_s} \ln \left[1 - \frac{1}{b} \right] \quad (\text{B5})$$

O desvio padrão, semelhante ao obtido da dimensão de correlação, pode ser aproximado por:

$$s(K_{ML}) \cong \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (\text{B6})$$

ANEXO C — Direitos e acesso referente ao artigo publicado na revista *Chemical Engineering Science* e apresentado na seção 3.1 desta Tese de Doutorado

RIGHTS & ACCESS / Elsevier Ltd

Article: USING CHAOS ANALYSIS FOR EVALUATING THE QUALITY OF F-PIV MEASUREMENTS IN A BUBBLE COLUMN

Corresponding author: Helder Lima de Moura

E-mail address: helder_cdc@hotmail.com

Journal: Chemical Engineering Science

Our reference CES13246

PII: S0009-2509(16)30613-3

DOI: 10.1016/j.ces.2016.11.023

Definitions

Accepted Manuscript

The manuscript of an Article that has been accepted for publication and which typically includes author incorporated changes suggested during submission, peer review, and editor author communications. The Accepted Manuscript should not be added to or enhanced in any way to appear more like, or to substitute for, the Published Journal Article. The Accepted Manuscript should include a link to the formal publication through the relevant DOI and should bear a Creative Commons CC BY NC ND license.

Commercial Use

The use or posting of Articles:

for commercial gain - for example by associating advertising with the full-text of the Article, by providing hosting services to other repositories or to other organisations, or charging fees for document delivery or access;

to substitute for the services provided directly by the publisher - for example article aggregation, systematic distribution via e-mail lists or share buttons, posting, indexing or

linking by commercial companies for use by customers of such companies (e.g. pharmaceutical companies and physicianprescribers).

Internal Institutional Use

Use by the author's institution for classroom teaching at the institution and for internal training purposes (including distribution of copies, paper or electronic, and use in coursepacks and courseware programs, but not in MOOCs -Massive Open Online Courses) and inclusion of the Article in applications for grant funding. For authors employed by companies, the use by that company for internal training purposes.

Personal Use

Use by an author in the author's classroom teaching (including distribution of copies, paper or electronic) or presentation by an author at a meeting or conference (including distribution of copies to the delegates attending such meeting), distribution of copies (including through e-mail) to known research colleagues for their personal use, use in a subsequent compilation of the author's works, **inclusion in a thesis or dissertation**, preparation of other derivative works such as extending the Article to book-length form, or otherwise using or re-using portions or excerpts in other works (with full acknowledgment of the original publication of the Article).

Preprint

Author's own write-up of research results and analysis that has not been peer reviewed, nor had any other value added to it by a publisher (such as formatting, copy-editing, technical enhancements, and the like). Preprints should not be added to or enhanced in any way in order to appear more like, or to substitute for, the Published Journal Article.

Published Journal Article

The definitive final record of published research that appears or will appear in the journal and embodies all value-adding publisher activities including peer review co-ordination, copy-editing, formatting, (if relevant) pagination, and online enrichment.

SCHOLARLY SHARING

Preprints:

Sharing of Preprints by an author on any website or repository at any time. When the Article is accepted, the author is encouraged to include a link to the formal publication through the

relevant DOI. The author can also update the Preprint on arXiv or RePEc with the Accepted Manuscript.

Accepted Manuscripts:

1. immediately on acceptance: sharing of the Accepted Manuscript by an author: via the author's non-commercial personal homepage or blog
 - via the author's research institute or institutional repository for Internal Institutional Use or as part of an invitation-only research collaboration work-group
 - directly by providing copies to the author's students or to research collaborators for their personal use
 - for private scholarly sharing as part of an invitation-only work group on commercial sites with which the publisher has a hosting agreement
2. after the embargo period: an author may share the Accepted Manuscript via non-commercial hosting platforms (such as the author's institutional repository) and via commercial sites with which the publisher has a hosting agreement.

To check the embargo period for the journal, go to <http://www.elsevier.com/embargoperiodlist>.

The publisher has agreements with certain funding agencies that may permit shorter embargo periods and/or different sharing guidelines. To learn more about the publisher's policies and agreements with such agencies or institutions go to <http://www.elsevier.com/fundingbodyagreements>.

Published Journal Article:

The author may share a link to the formal publication through the relevant DOI. Additionally theses and dissertations which contain embedded Published Journal Articles as part of the formal submission may be hosted publicly by the awarding institution with a link to the formal publication through the relevant DOI. Any other sharing of Published Journal Articles is by agreement with the publisher only.

Copyright (c) 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.