



ESTUDO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS (ÁGUA-AR) POR AQUISIÇÃO DE SINAIS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Sonia Magalhães dos Santos

e-mail: vnsantos@mikrus.com.br

Jorge Alberto Almeida

e-mail: dfsjaa@furg.br

Manolo Pires

man@iconet.com.br

Jeferson Godinho Dutra

e-mail:jeferson@bol.com.br

Marcelo Peres de Pinho

e-mail:pinho@ecomp.furg.br

Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

CP 474 – Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

Resumo. *O trabalho apresenta o estudo experimental de escoamentos bifásicos (água-ar) em regime de bolhas dispersas por aquisição de sinais e processamento digital de imagens. Para o experimento foi montada uma bancada, que consiste de um reservatório de água, uma bomba que movimenta a água em circuito fechado, tubulações e um registro que regula a vazão do escoamento. Uma tubulação de ar comprimido é conectada à tubulação, resultando num escoamento bifásico (água-ar). O sistema de captura de dados é formado por um tubo cilíndrico de acrílico transparente, sensores resistivos, uma placa de aquisição de dados, um programa para coordenar a aquisição de dados e uma câmera de vídeo que registra as imagens através do tubo transparente, sendo estas imagens capturadas para um microcomputador. Os dados adquiridos e processados nos dão informações a respeito do escoamento bifásico (velocidade de cada fase, geometria e tipos de bolhas formadas e números adimensionais característicos do escoamento). As imagens capturadas permitem determinar também as características das bolhas por processamento digital de imagens.*

Palavras-chave: *escoamentos bifásicos, bolhas dispersas, processamento digital de imagens, aquisição de sinais*

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é feito o estudo experimental de escoamentos bifásicos (água-ar) com aquisição de sinais e processamento digital de imagens. O estudo do escoamento bifásico consiste na obtenção da geometria e velocidade das bolhas e na caracterização do escoamento em regime de bolhas dispersas através do cálculo dos números adimensionais de Reynolds, Morton, Eotvos e Arquimedes.

Os impulsos elétricos produzidos pelos sensores, bem como os sinais recebidos pela câmera durante a exposição das imagens, são adquiridos sem sincronia. Esses dados adquiridos com auxílio

de um programa para aquisição de dados, são processados obtendo-se informações relativas ao escoamento bifásico.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos estudando escoamentos bifásicos. Murdock, 1962, desenvolveu uma equação para o escoamento bifásico, modificando a equação do escoamento unifásico aplicada a uma placa de orifício, introduzindo uma constante determinada experimentalmente. A constante experimental foi obtida analisando testes de escoamentos bifásicos: água-vapor, água-ar, água-gás natural, água salgada-gás e combinações de destilados com gás natural.

Sullivan, 1981, mediu a turbulência em escoamentos bifásicos em tubulações num regime de bolhas dispersas, usando técnicas de velocimetria Laser Doppler e mostraram que as medidas da intensidade de turbulência possuem uma forte dependência com o título do escoamento. Propuseram uma base teórica para prever os níveis de turbulência e mostraram ser ela útil na interpretação de dados experimentais em diversos sistemas de bolhas de gás-líquido e partículas sólido-gás. Constataram que o método aplicado para líquido-gás (disperso) em forma de bolhas e sólido-gás (partículas) estavam de acordo com os resultados experimentais.

Ferreira, 1996, apresentou trabalho determinando as variações do comportamento dinâmico do escoamento unifásico através de uma placa de orifício, quando pequenas quantidades de gás (bolhas) são introduzidas na fase líquida, água. Observou que a alteração do comportamento dinâmico com a introdução de bolhas era devido a variações: da faixa de frequência das flutuações de pressão e do valor médio (aritmético) do sinal diferencial de pressão.

Ponoth, 2000a, apresenta uma revisão dos diversos experimentos realizados de 1953 a 1995, sobre o movimento de bolhas em água e em outros líquidos, desenvolvidos por Haberman & Morton (1953), Saffman (1956), Hartunian & Sears (1957), Subramanian & Tien (1970), Tsuge and Hibino (1977) e Duineveld (1995). Essas observações do movimento das bolhas foram feitas em água, água destilada e até mesmo com tinta.

Ponoth, 2000b, apresenta uma revisão teórica do estudo de escoamentos com bolhas realizados de 1963 a 1996, desenvolvidos por Moore (1963), El Sawi (1974), Benjamin (1987), Ryskin & Leal (1983-1984), Sadhal & Johnson (1983), Dandy & Leal (1989), Stone & Leal (1990), He et al. (1991), Duineveld (1994), Bel Fdhila & Duineveld (1996), Leppinen et al. (1996) e McLaughlin (1996).

Moreau, 2000, apresenta um estudo sobre a forma das bolhas e sua dinâmica, mostrando as grandezas físicas envolvidas, como coeficiente de arraste e, também os números adimensionais característicos no estudo de bolhas, Morton, Archimedes e Eotvos, que independem da velocidade da bolha e Reynolds, Weber e Froude, que são dependentes da velocidade relativa da bolha, mostrando que a forma da bolha é o resultado dos efeitos combinados de forças inerciais, gravidade, tensão superficial e viscosidade.

2. ESCOAMENTO BIFÁSICO EM REGIME DE BOLHAS DISPERSAS

O regime ou padrão de escoamento com bolhas é caracterizado por uma suspensão de bolhas discretas no meio contínuo. Existem inúmeros regimes de bolhas. As frações de vazios variam de uma simples bolha isolada em um grande tanque, até o escoamento quase contínuo de espuma, contendo menos de 1% de líquido no volume total. Forças devido à tensão superficial, viscosidade, inércia e empuxo produzem uma variedade de efeitos, os quais são evidenciados por diferentes formas e trajetórias das bolhas.

A Equação (1) descreve o número de Arquimedes, A_r , que é a razão entre as forças gravitacionais e viscosas.

$$A_r = \frac{d^3 \rho_l^2 g}{\mu_l^2} \quad (1)$$

O número de Eotvos, E_o , é definido de acordo com a Eq. (2), como a razão entre a força da gravidade e a força devido a tensão superficial. Quando a tensão superficial é dominante sobre a

pressão hidrostática, a superfície superior e inferior da bolha mantêm-se esférica, caso contrário, ela tende a diminuir de altura, tornando-se um elipsóide.

$$E_0 = \frac{\rho_l g d^2}{\sigma} \quad (2)$$

O número de Morton, M , é definido pela Eq. (3), sendo a razão entre as forças viscosas com forças devido à tensão superficial. No escoamento em tubulações verticais, o número de Morton representa a tendência relativa das forças viscosas arrastarem lateralmente a bolha na forma de uma capa esférica.

$$M = \frac{g \mu_l^4}{\rho_l \sigma^3} \quad (3)$$

O Número de Reynolds, Re , é definido pela Eq. (4), sendo a razão entre forças de inércia e forças viscosas.

$$Re = \frac{\rho_l w d}{\mu_l} \quad (4)$$

onde:

d = diâmetro da bolha, m; g = aceleração da gravidade, m/s^2 ; ρ_l = massa específica do líquido, kg/m^3 ; μ_l = viscosidade do líquido, kg/ms ; σ = tensão superficial do líquido, N/m ; w = velocidade relativa da bolha (velocidade da líquido v_l - velocidade da bolha v), m/s .

Segundo Butterworth e Hewitt, 1977, os escoamentos horizontais de bolhas podem ser do tipo bolhas dispersas, projétil, ondas, anular e estratificado.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1- Bancada de Testes

A Figura (1) apresenta o desenho esquemático da vista geral da bancada.

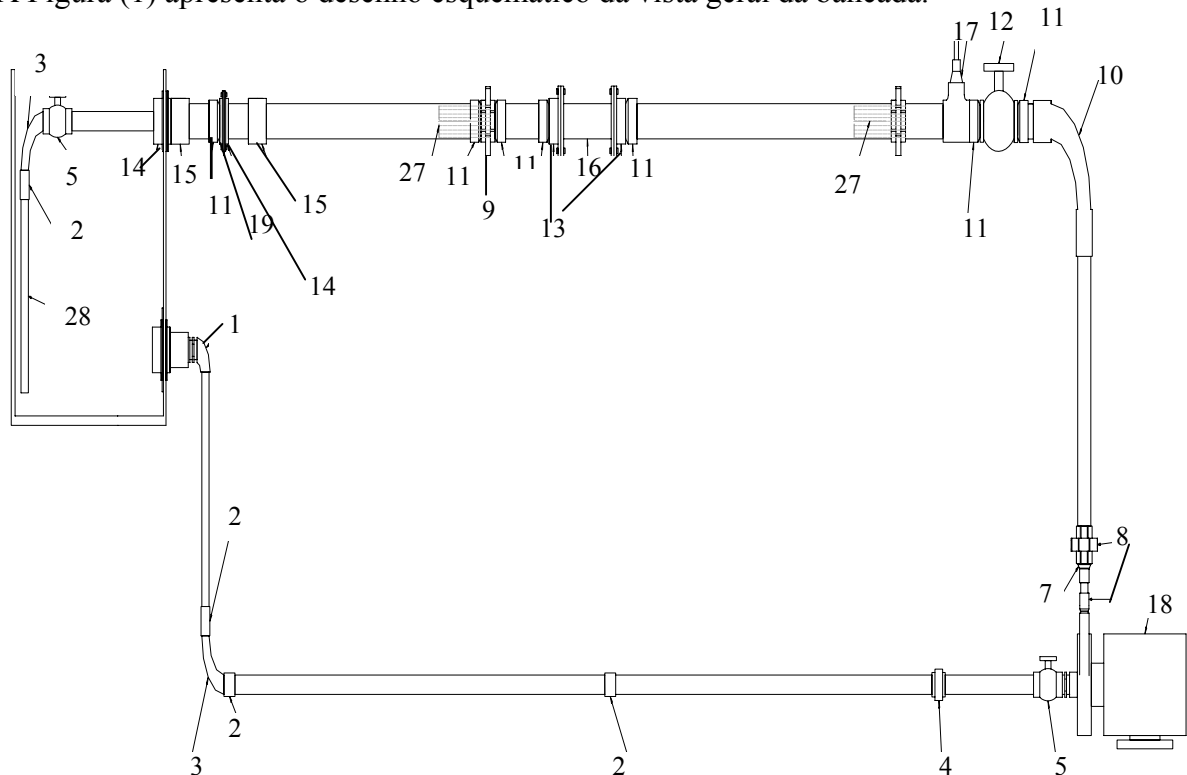


Figura 1. Desenho esquemático da vista geral da bancada.

A seguir são descritos e localizados os principais itens da bancada utilizada nos experimentos:

◆ Placa de orifício (19):

A placa de orifício utilizada tem orifício concêntrico e está situada entre flanges, sendo confeccionada em acrílico, respeitando-se os limites dimensionais propostos por Delmée (1989);

◆ Tubo de acrílico transparente (16):

Tubo utilizado para a conexão dos sensores resistivos, sendo este flangeado nas duas extremidades para a fixação à tubulação. Suas dimensões são de 60 mm de diâmetro nominal e 240 mm de comprimento. Houve necessidade de que este tubo fosse transparente para possibilitar a visualização das bolhas, bem como seu comportamento, e capturar as imagens das bolhas através da câmera digital.

◆ Entrada de ar (17):

A entrada de ar ocorre através de um tubo perpendicular à tubulação de líquido, que é ligado através de uma conexão T. Este tubo possui um diâmetro de $\frac{3}{4}$ " e por isso foi utilizado um capilar de modo a diminuir a área de entrada de ar. Este capilar fica imerso no fluxo e aponta na direção do fluxo.

◆ Bomba (18):

É utilizada para a realização dos testes uma bomba centrífuga de $\frac{3}{4}$ CV, pressão máxima fornecida de $1,7 \text{ kgf/cm}^2$ e vazão máxima de $0,00155 \text{ m}^3/\text{s}$;

◆ Tranqüilizador vertical (do reservatório) (28):

O tranqüilizador vertical consiste num tubo de PVC, obstruído na extremidade inferior e ligado à tubulação através da extremidade superior. O tubo é coberto de furos, que servem para evitar uma grande turbulência dentro do reservatório, induzindo o fluxo para as paredes do reservatório e evitando que a bomba succione ar.

◆ Tranqüilizadores de fluxo (na tubulação) (27):

Estes tranqüilizadores consistem de vários canudos plásticos paralelos entre si e à tubulação, ocupando todo seu diâmetro interno. Um deles está localizado antes do tubo de acrílico transparente enquanto que o outro localiza-se antes da placa de orifício. Sua função é ajudar para que o escoamento seja plenamente desenvolvido.

◆ Fonte de tensão :

A fonte utilizada possui dois canais independentes, podendo variar a tensão fornecida de 0 até 30 volts sendo utilizada para alimentação dos sensores.

◆ Placa de aquisição de dados:

Utilizou-se a placa CIO-DAS08 (Measurement Computing, 2000). Possui 8 canais, resolução de 12 bits, voltagem máxima de entrada de 35 Volts. Tem incerteza de $\pm 0,01\% \pm 1 \text{ LSB}$ da leitura, faixa de trabalho de $\pm 10 \text{ Volts}$, frequência de aquisição de 20 KHz dependente do computador e taxa de conversão de analógico para digital de $40 \mu\text{s}$.

◆ Computador:

Microcomputador Pentium 133 MHz, com placa de aquisição de imagens de 640×480 pixels.

◆ Câmera digital

A câmera de vídeo utilizada é monocromática, CCD, 30 imagens por segundo, equipada com lente de abertura $F=4 \text{ mm}$ e resolução de 768×494 pixels (Watec,2000).

◆ Sensor diferencial de pressão (digital):

O sensor de membrana (Smar, 1996) é usado para transformar uma diferença de pressão, entre as secções a montante e a jusante da placa de orifício, em voltagem, de modo que este sinal possa ser lido por um programa apropriado (Laboratory Technologies Corporation, 1998). Do tipo capacitivo, este sensor possui duas câmaras sujeitas respectivamente às pressões a montante e a jusante da placa.

◆ Sensores resistivos:

Os sensores resistivos localizam-se no tubo acrílico transparente e consistem em dois fios de cobre com diâmetro de 1,3 mm, sendo um deles curvado, ficando alinhado com o outro e tendo entre eles uma distância de 1,7 mm, e uma resistência R de $1,2 \text{ k}\Omega$ ligada a um dos fios. Um dos

fios é alimentado com uma tensão positiva e o outro com tensão negativa, conforme Fig. (2). No espaço entre os fios estará passando água ou ar, que possuem diferentes resistividades, funcionando como uma resistência em série com a resistência R . É medida a diferença de potencial na resistência R . Como a resistividade do ar é muito maior que a da água, o circuito ficará aberto dando uma diferença de potencial próxima a zero, quando a bolha passa. No caso do escoamento de água, será maior o valor da diferença de potencial adquirido pela placa de aquisição de dados numa frequência estipulada, diferenciando naquele momento se está passando água ou ar no sensor.

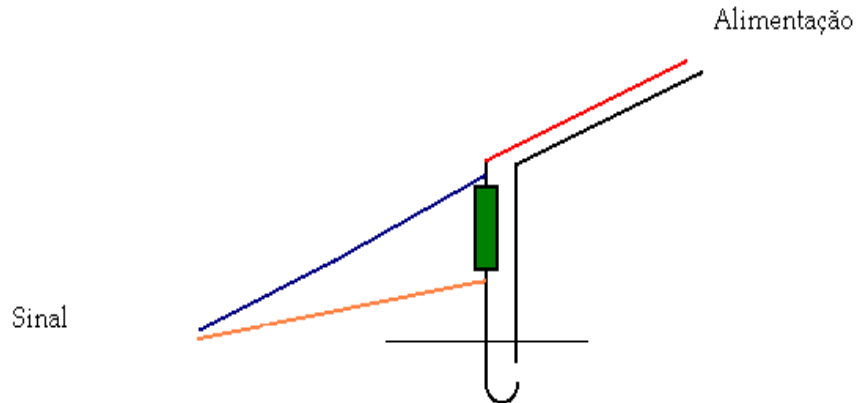


Figura 2. Aquisição do sinal no sensor resistivo

♦ Programa utilizado pela placa de aquisição de dados – Labtech (Laboratoty Technologies Corporation, 1998):

Depois de configurar o programa para a placa de aquisição de dados, foi montado um programa para a aquisição em 3 canais, simultaneamente. Este programa é composto de um relógio, um arquivo onde serão gravados os dados capturados, um módulo de configuração e uma caixa com um osciloscópio e um mostrador digital, para cada um dos 3 canais. As configuração possíveis são: taxa de aquisição dos sinais; tempo de aquisição dos sinais para cada canal; tempo de atraso entre aquisição dos sinais em canais diferentes e tipo de placa de aquisição dos sinais.

3.2- Metodologia para aquisição dos sinais dos sensores

O princípio de medida do sensor resistivo é baseado nas diferentes resistividades do líquido (água) e do gás (ar). A Figura (3 a,b,c) mostra a disposição dos 3 sensores, onde:

$$L_1 = 46,5 \text{ mm}; \quad L_2 = 93 \text{ mm}; \quad h_1 = 2,85 \text{ mm}; \quad h_2 = 1,85 \text{ mm}$$

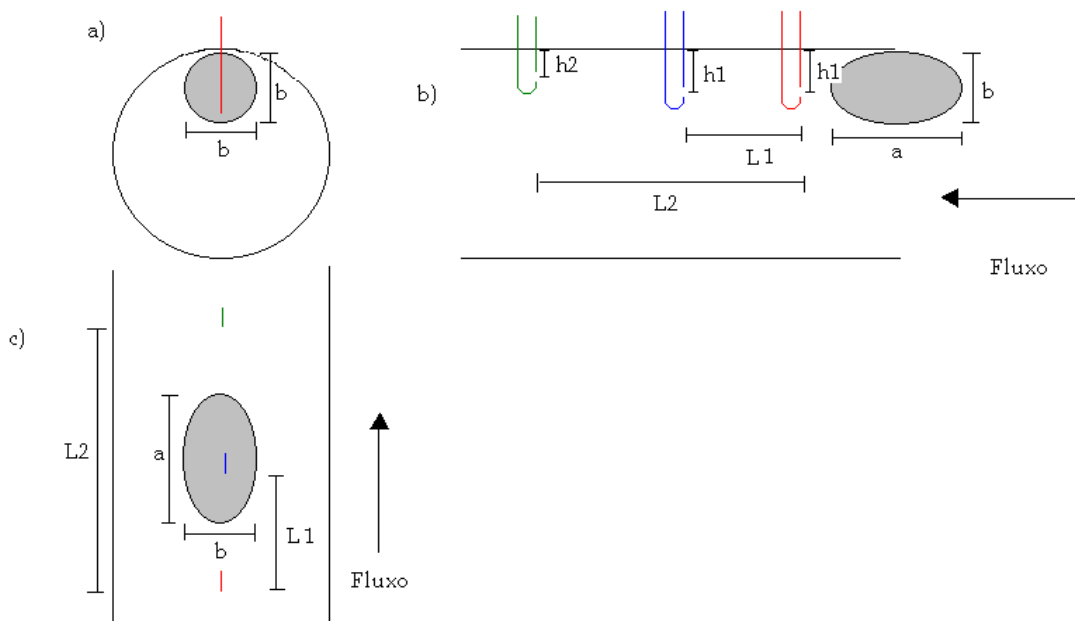


Figura 3. Disposição dos sensores

As Equações (5) e (6) são utilizadas para cálculo das velocidades e geometria das bolhas, através dos sinais adquiridos pelos sensores resistivos.

$$v = \frac{L_1}{t_{12} - t_{11}} \quad (5)$$

$$v = \frac{a'}{t_{21} - t_{11}} \quad (6)$$

onde:

t_{11} = tempo inicial de passagem da bolha no sensor 1;

t_{12} = tempo inicial de passagem da bolha no sensor 2;

t_{21} = tempo final de passagem da bolha no sensor 1;

a' = corda do eixo maior da bolha.

3.3- Calibração dos sensores

◆ Sensor de membrana:

Para calibração deste sensor é usada uma alimentação de 38 Volts e um resistor de 270 Ohms ligado a um dos fios de alimentação da fonte. A variação de tensão no resistor é enviada como sinal à placa de aquisição de dados. Esta variação de tensão é proporcional à diferença de pressão no sensor, e também proporcional à vazão na tubulação. Para medir a vazão, foi usado um recipiente calibrado de 8,5 litros, e escolhidas 4 posições da válvula de esfera. Em cada posição foram feitas 4 medidas do tempo necessário para encher o recipiente e simultaneamente, a placa de aquisição de dados adquiria os sinais de tensão, à frequência de 1 Hz. O sensor de membrana é utilizado no experimento para determinação da velocidade do líquido v_l a partir da vazão total do escoamento.

◆ Sensores resistivos:

Estes sensores não necessitam calibração, pois não são necessários valores numéricos, somente necessita-se saber se o sinal é relativo à passagem de ar ou água no sensor.

3.4- Tratamento e análise de imagens

As imagens capturadas foram tratadas e analisadas pelo programa Image Tools (Wilcox et al, 1997).

Para caracterizar a geometria das bolhas, foi feito o cálculo das seguintes grandezas, descritas por Wilcox et al.,1997:

◆ Área do objeto medida como o número de pixels internos ao polígono que o envolve e tem como unidade pixels;

◆ Perímetro do objeto medido como o perímetro, em pixels, do polígono que o envolve;

◆ X_{max} e X_{min} , maior e o menor comprimento de eixo do objeto;

◆ Elongação E , definida pela Eq. (7) como:

$$E = \frac{X_{max}}{X_{min}} \quad (7)$$

Se E vale 1, o objeto é redondo ou quadrado.

Para calcular estas variáveis, a imagem da bolha é lida em padrão RGB, convertida para padrão em tons de cinza e aplicado um limiar que destaca cada uma das bolhas na imagem.

4. RESULTADOS

4.1- Sinais adquiridos pelos sensores resistivos no escoamento bifásico

Pode-se mostrar na Fig. (4) uma parcela dos sinais adquiridos pelos sensores, dispostos de acordo com a Fig. (3), sendo a cor vermelha o sinal do sensor 1 e a cor azul o sinal do sensor 2.

A Tabela (1) mostra os resultados dos tempos de passagem das bolhas nos sensores 1 e 2 e os valores da velocidade da bolha (v) e da corda do eixo maior da bolha (a'), de acordo com as Eqs. (5) e (6) e Fig. (3).

Tabela 1. Resultados dos sinais dos sensores

	$t_{11}(s)$	$t_{12}(s)$	$t_{21}(s)$	$t_{22}(s)$	v (m/s)	a (mm)
curva1	0,0472	0,2666	0,0917	0,2917	0,2019	9,43
curva2	0,2666	0,4500	0,3083	0,5083	0,2535	10,57
curva3	0,3361	0,5444	0,3917	0,6472	0,2232	12,41
curva4	0,4305	0,6583	0,4722	0,6888	0,2041	8,51

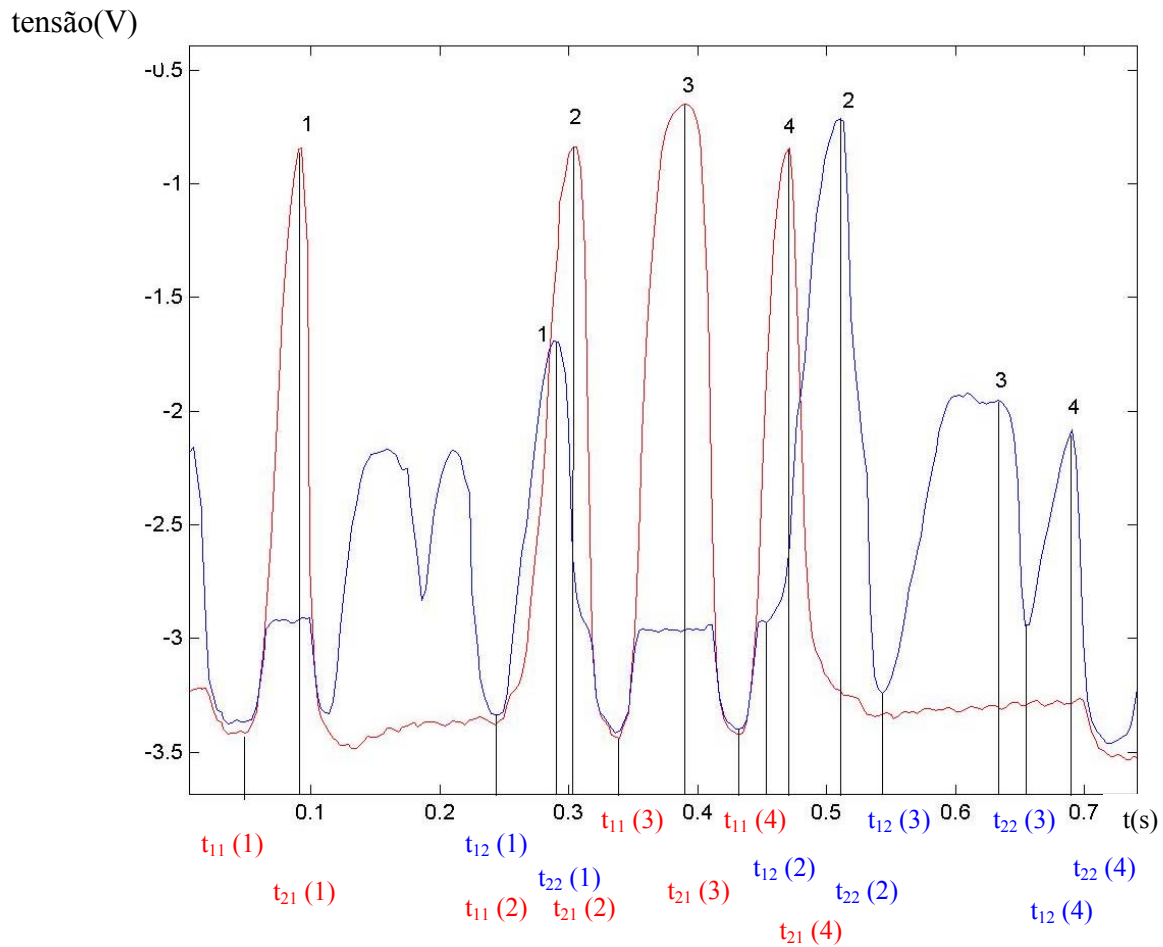


Figura 4. Parcela de dados analisados nos sensores 1 e 2.

4.2- Imagens das bolhas

Seqüências de imagens adquiridas pela câmera digital, conforme Fig. (5), com uma taxa de aquisição de 30 quadros por segundo, foram utilizadas para o cálculo da velocidade média da bolha.

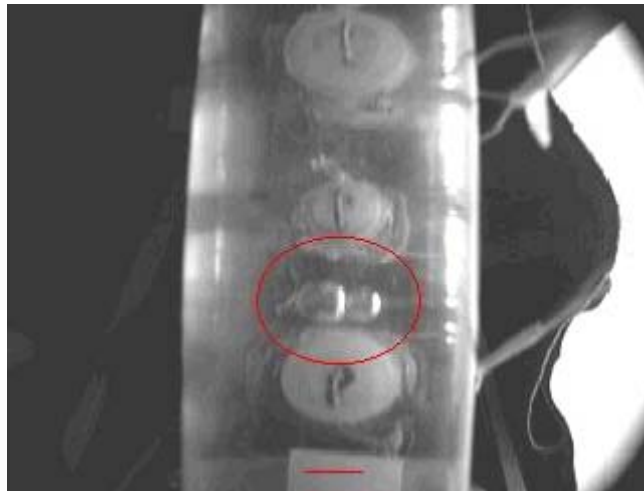


Figura 5. Segunda imagem utilizada para o cálculo da velocidade da bolha

Traçando-se uma linha com medida conhecida numa imagem, sabe-se que 1 pixel da imagem tem 0,356 mm. Medindo-se o deslocamento d da bolha entre duas imagens e o tempo entre uma imagem e outra, calcula-se a velocidade de acordo com a Eq. (8):

$$v = \frac{d}{t} \quad (8)$$

Sendo $d = 8,55\text{mm}$ e $t = \left(\frac{1}{30}\right)\text{s}$, obtém-se $v = 0,256\text{m/s}$.

4.3- Medidas das bolhas por processamento digital de imagens

A tabela 2 mostra os valores de $X_{\text{máx}}$, $X_{\text{mín}}$, *área*, *perímetro* e *elongação* de 13 bolhas analisadas num filme de 3s de duração, verificando-se a dispersão dos valores, devido à diversidade do tamanho e da forma das bolhas.

Tabela 2. Valores das bolhas analisadas por processamento digital de imagens

Imagens	Xmáx(mm)	Xmin(mm)	Elongação	perímetro(mm)	area(mm ²)
Bolha 1	12.19	10.35	1.18	39.98	112,14
Bolha 2	13.61	13.90	0.98	43.57	381.85
Bolha 3	15.68	15.32	1.02	49.83	557.10
Bolha 4	8.91	6.41	1.39	24.58	135.00
Bolha 5	14.64	13.54	1.08	45.93	431.36
Bolha 6	13.54	16.17	0.84	41.23	512.22
Bolha 7	11.42	8.91	1.28	31.24	205.17
Bolha 8	7.84	9.26	0.85	28.78	175.25
Bolha 9	14.60	13.18	1.11	45.86	428.86
Bolha 10	9.26	9.29	1.00	32.26	188.43
Bolha 11	8.20	7.48	1.10	25.63	148.54
Bolha 12	24.93	17.81	1.40	71.17	971.00
Bolha 13	14.96	12.47	1.20	42.55	430.65
médias	13.06	11.85	1.11	40.20	380.45
desvio padrão	4.50	3.52	0.18	12.46	239.03

Conforme Tabela (1), que mostra os resultados dos sinais dos sensores, e Tab. (2), que mostra o tamanho das bolhas por imagens, e o resultado da aplicação da Eq. (8), que calcula a velocidade das bolhas pelas imagens, verifica-se uma proximidade de valores da geometria das bolhas e da sua velocidade.

4.4 Números adimensionais característicos do escoamento

Aplicando-se as Eqs. (1) a (4), obtém-se:

$$Ar = \text{número de Archimedes} = 9,812 \times 10^6$$

$$Eo = \text{número de Eotvos} = 13,10 \quad (\log_{10} = 1,117)$$

$$M = \text{número de Morton} = 2,336 \times 10^{-11} \quad (\log_{10} = -10,6)$$

$$Re = \text{número de Reynolds} = 436$$

sendo:

$$d = \text{diâmetro de uma bolha esférica (bolha 10) de acordo com Tab. (2)} = 0,00926\text{m}$$

$$g = 9,81\text{m/s}^2$$

$$\rho_l = 1000\text{ kg/m}^3$$

$$\mu_l = 0,000891\text{ kg/ms}$$

$$\sigma = 0,00642\text{ N/m}$$

$$w = \text{velocidade relativa da bolha} = v_l - v = 0,042\text{ m/s}$$

$$v_l = 0,298\text{ m/s}$$

$$v = 0,256\text{ m/s}$$

De acordo com a Fig. (6), introduzindo-se os valores de Eo , M e Re , observa-se que a bolha é do tipo oscilante.

Pelo valor do adimensional Ar , verifica-se a predominância das forças gravitacionais em relação às forças viscosas.

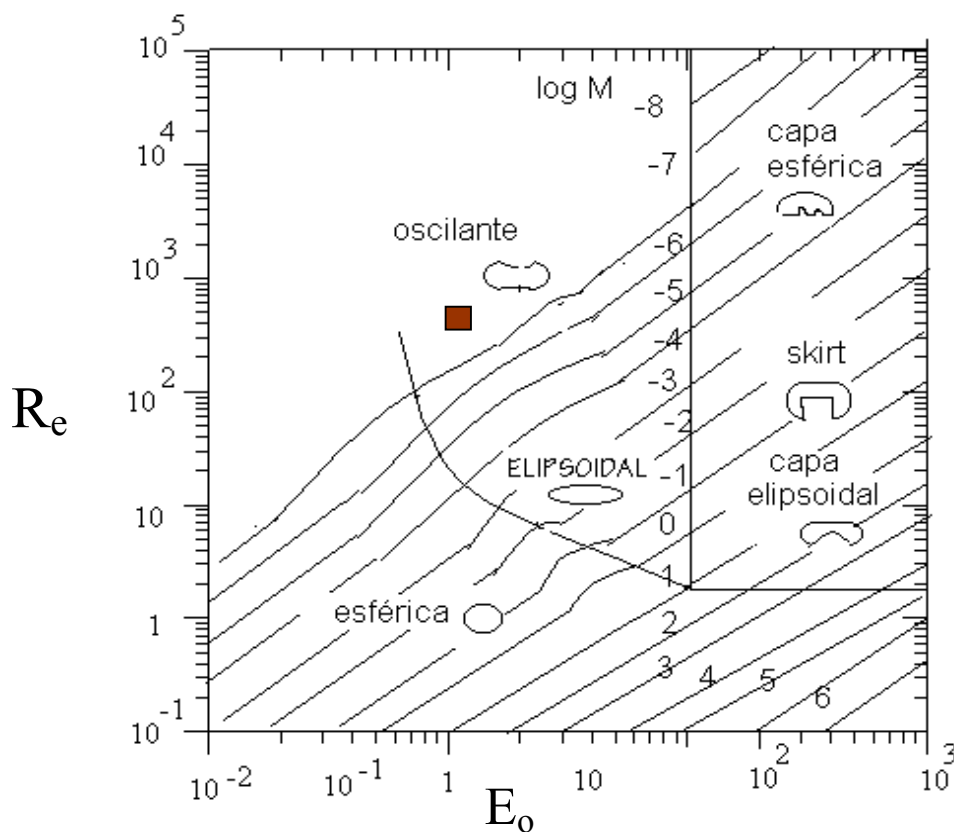


Figura 6. Geometria de Bolhas e Gotas em Movimento através de líquidos (Clift, 1978).

5. REFERÊNCIAS

- Butterworth, D., Hewitt, G.F.,1977, "Two-Phase Flow and Heat Transfer", Oxford University Press, 514 pp.
- Clift,R.,1978, "Bubbles,Drops and Particles", Academic Press.
- Delmée, Gerard J.,1989, "Manual de Medição de Vazão", 2ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda.
- Ferreira, V. C. S., 1996, "Differential Pressure Spectral Propagation in Bubbly Liquids", International Journal Pressure Vessel & Piping, 73,pp.19-23.
- Laboratory Technologies Corporation ©, 1998, "Labtech Notebook version 10.1 universal".
- Mesurement Computing, , 2000, " Manual do usuário CIO-DAS08, Analog Input and Digital I/O".
- Moreau, V., 2000, "Bubbles shape and dynamics", <http://www.crs.4.it/~moreau/Twophaseflow/node8.html>.
- Ponoth,S. S., 2000a, "Experimental Studies of Bubble Motion", Clarkson University, <http://www.clarkson.edu/~jmclau/nersc/node3.html>.
- Ponoth,S. S., 2000b, "Theoretical Studies of Bubble Motion", Clarkson University, <http://www.clarkson.edu/~jmclau/nersc/node4.html>.
- Smar, 1996, "Transmissor inteligente de pressão LD301", Manual de instruções, operação e manutenção.
- Sullivan,T., 1981,"Turbulence in Two-phase Dispersed Flows", Journal of Fluid Mechanics, Vol.116, pp.343-362.
- Watec, 2000," Manual da Câmera Wat – 902H.
- Wilcox, D., Dove, B., McDavid, D., Greer, D., 1997, "Image Tools version 2.0", The University of Texas Health Science Center in Santo Antonio, UTHSCSA, USA.

STUDY OF TWO-PHASE FLOWS (WATER-AIR) BY SIGNALS ACQUISITION AND DIGITAL IMAGES PROCESSING

Abstract. *This work presents an experimental study of two-phase flow (water-air) in scattered bubbles regime by signals acquisition and digital images processing. In order to perform the experiment, a rig which consists of a water reservoir, a pump which moves the fluid in closed circuit, tubes and a register which regulates the flow was set up. A compressed air tube was connected to the water tube resulting in a two-phase (water-air) flow. The system of data acquisition is formed by a acrylic transparent cylindrical tube, resistive sensors, a data acquisition plate, a computer program to coordinate the data acquisition and a video camera which registers the images through the transparent tube, these images being captured by a microcomputer. The obtained and processed data will give us information about two-phase flow (velocity of each phase, geometry and type of formed bubbles, and non-dimensional numbers related of the flow. The captured images also allow determine the features of the bubbles by digitally processing the images.*

Keywords: *two-phase flows, scattered bubbles, digital image processing, signals acquisition.*