



## ANÁLISE DE TÉCNICA DE SENSORES DUPLOS DE CONDUTIVIDADE PARA A OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE BOLHAS USANDO FILMAGEM

**Bianca Araújo Siqueira** – bianca.0511@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET  
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão  
68440-000 – Abaetetuba - Pará

**Jessica Lorrany Ferreira Barbosa** – lorrany-barbosa@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET  
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão  
68440-000 – Abaetetuba - Pará

**Dayse Dias da Silva** –

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET  
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão  
68440-000 – Abaetetuba - Pará

**Rosimeire Gomes Almeida** – almeidampr@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET  
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão  
68440-000 – Abaetetuba – Pará

**Marcelo de Oliveira e Silva** – mos@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET  
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão  
68440-000 – Abaetetuba - Pará

**Resumo:** *O presente trabalho aborda o desenvolvimento de sensores duplos de condutividade e sua avaliação de desempenho na obtenção do parâmetro relevante nos processos de borbulhamento, a velocidade de ascensão das bolhas. Nesta primeira avaliação, foram executadas medidas para bolhas isoladas ascendendo em uma coluna de vidro vertical de pequeno diâmetro. A fase líquida foi uma solução aquosa bem diluída de acetato de sódio. Os sinais elétricos gerados pelo sensor são processados por um circuito eletrônico desenvolvido para soluções de baixa condutibilidade elétrica e adquiridos de forma analógica e, então, digitalizados. A avaliação das medidas de velocidade de cada bolha obtidas pelos sensores duplos de condutividade foi feita por meio da sua comparação com medidas obtidas a partir da análise de imagens obtidas por filmagem (30 Hz) da passagem da bolha pelo sensor. Neste caso, as medidas foram realizadas antes das bolhas sofrerem a presença do sensor, podendo ser consideradas como medidas não perturbadas de referência. O princípio de operação e o hardware das técnicas de medida são apresentados nesse trabalho. Ambas as técnicas se mostraram adequadas para medir os parâmetros em questão. Entretanto, foi observada a existência de erros sistemáticos (bias) nas medidas dos sensores de condutividade devido ao seu caráter intrusivo.*

**Palavras-chave:** *Sensores eletroresistivos, Escoamento bifásico, Análise de incertezas, erros de medição.*

Realização:



Organização:





## 1. INTRODUÇÃO

Colunas de borbulhamento são amplamente empregadas nas indústrias química, petroquímica e farmacêutica, entre outras. O transporte de massa, energia e quantidade de movimento em um fluido bifásico dependem fortemente da distribuição de área interfacial, que, em um escoamento de bolhas, é determinada pelos valores locais de tamanho das bolhas e de retenção gasosa, a qual, por sua vez, depende da velocidade relativa média entre as fases. Dentre as diversas técnicas experimentais, a eletroresistiva de sensor duplo é uma das mais conhecidas e utilizadas para obter os parâmetros acima citados (Castillejos, 1987 e Zaho, 2005, Ishi e Wu, 1999 e Gupta et al., 2000).

O princípio de funcionamento deste sensor é baseado na diferença de condutibilidade elétrica entre as fases líquida e gasosa. A fase líquida apresenta caráter condutor e a fase gasosa tem caráter isolante. O sensor, dessa forma, consegue identificar dois estados diferentes, condução e não-condução, gerando um sinal similar ao de uma onda quadrada quando da passagem de uma bolha pelo mesmo. Quando processados e tratados, os sinais fornecem os valores de retenção gasosa, tamanho e velocidades das bolhas. A precisão das medidas é limitada pela taxa de aquisição da placa de aquisição de dados.

Entretanto, a intrusividade dos sensores de condutividade no escoamento é um importante fator que deve ser analisado. Por exemplo, Hoffer e Resnick (1975) comentam que o molhamento das pontas dos sensores, o qual retarda a detecção da fase gasosa e depende da tensão superficial, precisa ser considerado.

Evidências experimentais mostram que os sinais obtidos com a técnica de sensores eletroresistivos têm erros devido ao seu comportamento intrusivo. A análise dos sinais, baseados nos padrões de reconhecimento lógico e informações estatísticas, tenta eliminar a incerteza associada à natureza estocástica inerente ao processo de interceptação das bolhas pelo sensor (Jones e Zuber, 1975).

A literatura que trata do assunto apresenta algumas ponderações nos métodos de análise que merecem atenção, principalmente nos cálculos das velocidades das bolhas. Nesses procedimentos, são utilizados os sinais obtidos pelo sensor quando da passagem das partes dianteira e traseira das bolhas. Todos os resultados devem ser tratados estatisticamente a fim de minimizar os erros ocorridos (Bendat, 1966, Muñoz-Cobo, 2007, Barbosa, 1997).

Neste trabalho, medidas experimentais foram realizadas em bolhas isoladas usando sensores duplos de condutividade e análise de imagens obtidas por filmagem. Neste último caso, as medidas foram realizadas antes da bolha sofrer o efeito intrusivo do sensor de condutividade. Os erros experimentais foram avaliados e quantificados nas duas técnicas utilizadas. Os resultados experimentais obtidos pelas duas técnicas foram comparados.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O esquema do aparato experimental é apresentado na Figura 1. O ar foi injetado através de uma seringa na base de uma coluna de vidro vertical com 15 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura. Na mesma altura do sensor foi posicionada uma câmera de vídeo da marca Sony SyberShot, que tem um modo de gravação de alta velocidade com a capacidade de gerar



vídeos a uma taxa de aquisição em torno de 30 quadros por segundo por cerca de 10 segundos.

Para o tratamento dos vídeos obtidos pela câmera filmadora no modo de alta velocidade, foi utilizado o software *VirtualDubMod*, disponível gratuitamente na Internet. Os vídeos foram convertidos em arquivos de imagens (JPEG) usando recursos presentes no *software*, denominados filtros. Para o processamento e para melhorar a qualidade das imagens, foram utilizados os seguintes filtros: *Deinterlace* (desentrelaçador de imagens, que separa todas as imagens), *Grayscale* (que transforma a imagem para a escala de cinza, o que melhora o contraste), *Levels* (que ajusta brilho e contraste) e *Resize* (para redimensionamento das imagens).

Um relógio digital foi utilizado para avaliar a frequência desta câmera comercial, através da filmagem de seu mostrador com o gerador de frequência operando a diferentes frequências. Pela análise das imagens assim obtidas, a taxa de aquisição da câmera foi determinada como sendo  $(30 \pm 1)$  Hz.

Os sensores duplos de condutividade foram construídos a partir de agulhas de aço inox revestidas com tinta isolante, com exceção das pontas, as quais constituem as regiões ativas para a condução elétrica.

Para analisar o efeito das suas dimensões na sua intrusividade, foram construídos um sensor duplo de condutividade com dimensões específicas, conforme mostra a Figura 2. Suas características estão apresentadas na Tabela 1.

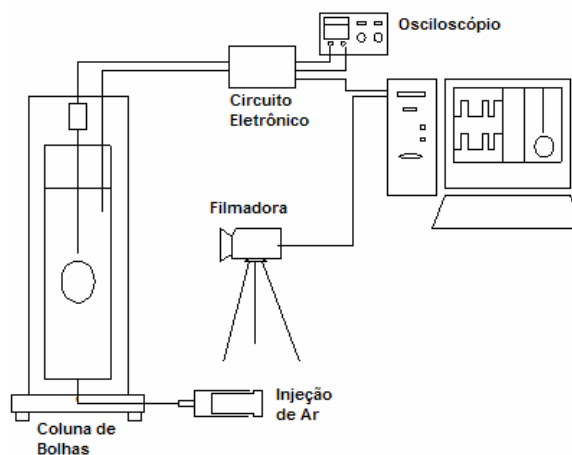


Figura 1: Aparato experimental

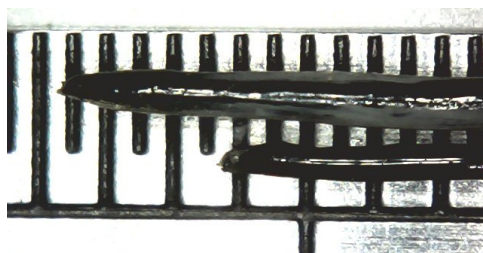


Figura 2: Sensores de diferentes dimensões.



O sistema de processamento dos sinais é constituído de um circuito eletrônico (Silva et al., 2007), com a capacidade de distinguir com bastante acurácia a fase gasosa da líquida. Em meios líquidos de baixa condutividade, o circuito é composto por um comparador e um amplificador de sinais, conforme apresentado na Figura 3.

Para a aquisição dos sinais analógicos foi utilizado um osciloscópio, e as imagens foram registrada e tratadas. Os sinais analógicos e digitais são mostrados na Figura 4.

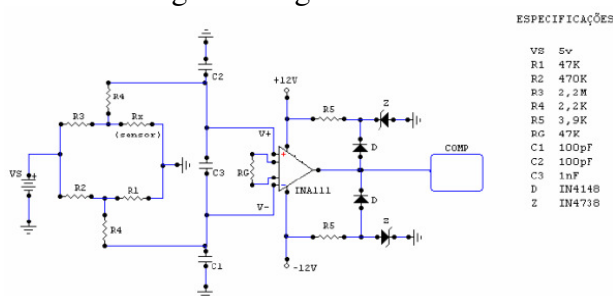


Figura 3: Circuito eletrônico.

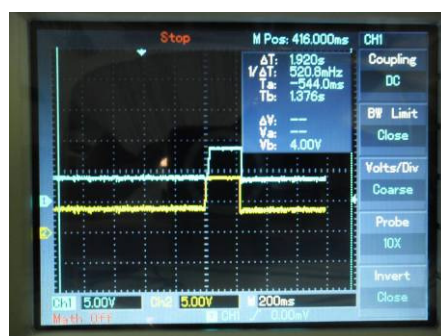


Figura 4: Bolhas Sinais Analógicos registrados devido à passagem da bolha pelo sensor duplo desenvolvido.

Estudos preliminares mostraram que a utilização dos sinais da passagem da parte traseira das bolhas não é recomendável, visto que as informações obtidas dos mesmos apresentaram erros elevados. Em alguns casos, o segundo sensor saía da bolha antes do primeiro sensor, levando ao cálculo de uma velocidade negativa para a bolha. Isto ocorre porque as bolhas empregadas são grandes (1 a 3 cm<sup>3</sup> de volume), apresentando uma interface traseira com alto grau de oscilação. Além disso, o segundo sensor detecta uma bolha já bastante alterada pelo efeito de intrusão do primeiro sensor.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para cada volume de bolha de ar escolhido (0,5, 10, 15 e 20 ml), foram feitas dez réplicas para cada sensor.

Conforme comentado no sinal da seção anterior, a velocidade,  $V_s$ , e a corda,  $l_s$ , de cada bolha foram obtidas através do sensor duplo de condutividade de acordo com as medidas mostradas na Figura 5, onde  $d_s$  é a distância entre as pontas dos sensores. As equações (1) e (2) mostram os cálculos para a determinação de ambos. Como todas as medidas têm erro conhecido, os erros em  $V_s$  e  $l_s$  são facilmente obtidos por propagação.

$$V_s = \frac{d_s}{\Delta t} \quad (1)$$



$$l_s = V_s \Delta t' = \frac{d_s}{\Delta t} \Delta t' \quad (2)$$

Para comparação com os resultados obtidos pelos sensores eletroresistivos, os vídeos feitos para cada uma das bolhas com a câmera no modo de alta velocidade foram analisados e convertidos em imagens. Os filmes mostram o comportamento de cada bolha antes e durante a sua passagem pelo sensor.

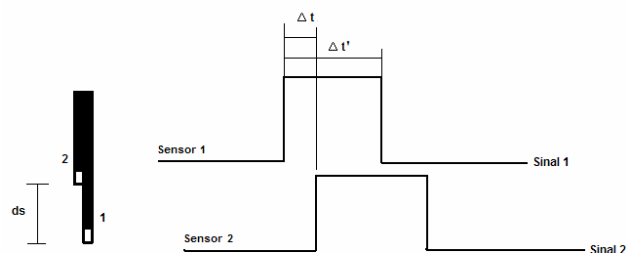


Figura 5: Medidas para o cálculo da velocidade e da corda de uma bolha.

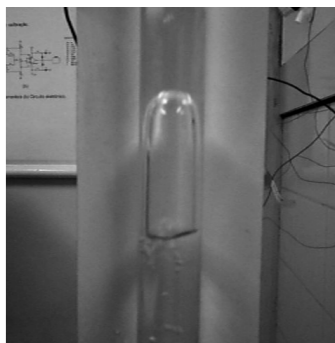


Figura 6: Bolhas de 10 ml.

As imagens mostram que as bolhas tendem a ter uma ascensão estável, devido ao pequeno diâmetro da coluna, isto está associado ao aumento do efeito de parede, chamadas de bolhas de Taylor. Entretanto, é possível perceber que a frente traseira das bolhas tem sempre a característica oscilatória.

Para determinação dos valores de velocidade das bolhas das imagens foi utilizado um outro *software* denominado *ImageProPlus*. Este permite a medida de distâncias nas imagens. Como uma calibração usando uma distância de referência sobre um escala milimetrada, é possível obter distâncias das imagens com um bom nível grau de acurácia, conforme mostra a Figura 7. Esta figura mostra como foram feitas as medidas necessárias à determinação da velocidade de ascensão da bolha.



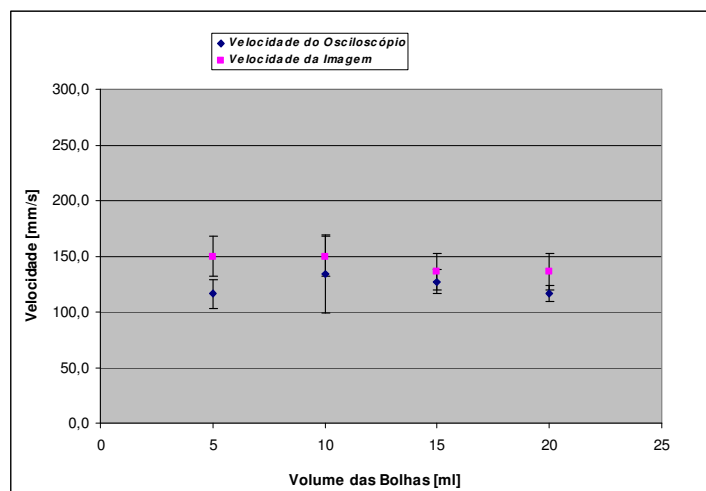
**Figura 7: Análise de imagens.**

Para calcular a velocidade da bolha, foi medida a distância de deslocamento da sua frente entre duas imagens, ambas antes que a bolha fosse interceptada pelo sensor. Para tanto, mediu-se a posição da frente da bolha em cada imagem em relação a uma mesma posição de referência. A distância de deslocamento é a diferença entre estas duas medidas. Como as imagens são geradas quadro a quadro e a frequência da câmera foi avaliada, o intervalo de tempo entre estas imagens é conhecido. A simples divisão da distância de deslocamento da frente da bolha pelo intervalo de tempo fornece a medida da velocidade da bolha através da técnica de análise de imagens,  $V_i$ . Como todas as medidas têm erro conhecido, o erro em  $V_i$  para cada bolha é facilmente obtidos por propagação. Para todos os resultados experimentais da velocidade nesta técnica, o erro estatístico com um grau de 95% de confiança pode ser calculado com base nas 10 réplicas realizadas. Este erro incorpora os erros de reprodutibilidade na formação e ascensão das bolhas.

#### **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados obtidos por ambas as técnicas para a velocidade e corda das bolhas são apresentados de forma resumida na Figuras 10. Nesta figura são representados os valores médios e seus erros a 95% de confiança para a 10 bolhas de cada volume.

Os resultados mostrados na Figura 8 indicam a existência de um erro sistemático nos valores das velocidades medidos pelas duas técnicas. As medidas de  $V_i$  obtidas para as bolhas de mesmo tamanho, mas ensaiadas para diferentes sensores, são coincidentes, como se poderia esperar, pois o efeito de intrusão do sensor não afeta esta medida. Por outro lado, as medidas de  $V_s$  não são iguais para os dois sensores, exceto para as menores bolhas, onde os intervalos de erro se interceptam. Estes resultados mostram claramente a existência do erro sistemático na medida de  $V_s$  e o fato do mesmo ter alguma dependência com as características do sensor.



**Figura 8: Medidas de velocidade das bolhas.**

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de sensores de condutividade para medir velocidade e corda de bolhas foi avaliada por comparação com análise de imagens obtidas por filmagem de alta velocidade. Ambas as técnicas geraram valores com repetibilidade adequada a despeito das variabilidades no processo de formação e ascensão de bolhas.

Pode-se concluir que o erro associado à intrusividade do sensor de condutividade existe e é grande, subestimando a velocidade em 6- 22%. Estes erros se mostraram decrescentes com o tamanho da bolha para o sensor de menor dimensão mas apresentaram-se constantes na margem de erro.

Como os erros sistemáticos na velocidade e na corda da bolha não são iguais, o período de tempo que o sensor sente a presença da fase gasosa é subestimado. Assim, não se deve utilizar medidas obtidas pelos sensores de condutividade sem calibração.

### *Agradecimento*

Os autores agradecem o financiamento da PROPES/UFGA para o desenvolvimento deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

COSTA, E. C. F.; SASSIM, N. A.; FRANÇA, F. A. *Caracterização do escoamento intermitente vertical com sonda condutiva intrusiva*. 4º PDPETRO, Campinas, SP, out. 2007. Disponível em: <[http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO\\_2\\_3\\_0290-1.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_2_3_0290-1.pdf)>. Acesso em: 10 de set. de 2011.

RIBEIRO, Marco Antônio. *Metrologia industrial: fundamentos da confirmação metrológica*. 6ª Ed. Salvador, 2004.

SILVA, M. O. et al. *Análise de técnica de sensores duplos de condutividade para a obtenção da velocidade e do tamanho de bolhas usando filmagem de alta velocidade*. XXXIII Congresso brasileiro de sistemas particulados—ENEMP. Aracaju: 2007.



BARBOSA, J. R. (1997), “O método dos senores eletro-resistivos aplicado à pluma de bolhas”. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 112p.

BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G. (1966), “Measurements and Analysis of Random Data”, John Wiley & Sons Inc., New York.

CASTILLEJOS, A. H. e BRIMACOMBE, J. K. (1987), “Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid Plumes: Part I. An Improved Electroresistivity Probe Technique”. Metallurgical Transactions B, Vol. 18bB, pp 649.

HOFFER, M. S. e RESNICK, W. (1975), “A Modified Electroresistivity Probe Technique for Steady and Unsteady-State Measurements in Fine Dispersions - I”. Chemical Engineering Science, Vol. 30, pp 473-480.

GUPTA, P., MUTHANNA, H. A., MILORAD, P. D., PATRICK, L.M. (2000), “A novel signal filtering methodology for obtaining liquid phase tracer responses from conductivity probes”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol 11, p.123-131.

ISHII, M. e WU, Q. (1999), “Sensitivity study on double-sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow”. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 25, pp 155-173.

JONES, O. C. e ZUBER, N. (1975), “The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow”. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp 273-306.

MUÑOZ-COBO, J. L. et Al. (2007), “Monte-Carlo calculation of the calibration factors for the interfacial area concentration and the velocity of the bubbles for double sensor conductivity probe”. Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, pp 484-496.

ZAHO, D. et Al. (2005), “An experimental study on local interfacial area concentration using a double-sensor probe”. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp 1926-1935.





## **ANALYSIS OF DOUBLE CONDUCTIVITY SENSORS TECHNICAL FOR OBTAINING THE BUBBLES VELOCITY USING SPEED SHOOTING**

**Abstract:** *This paper discusses the development of dual sensors of conductivity and its performance evaluation in obtaining the relevant parameter in the process of bubble, the rise velocity of bubbles. In this first evaluation, measurements were performed for isolated bubbles rising in a glass column of small diameter vertical. The liquid phase was a very diluted aqueous solution of sodium acetate. The electrical signals generated by the sensor are processed by an electronic circuit developed for solutions of low electrical conductivity and acquired in analog and then digitized. The assessment of the speed of each bubble obtained by dual sensors conductivity was made by comparison with measurements obtained from the analysis of images obtained by recording (30 Hz) of the passage by the bubble sensor. In this case, measurements were made before the bubbles suffer the presence of the sensor, measures may be considered as undisturbed reference. The principle of operation of hardware and measurement techniques are presented in this work. Both techniques are suitable for measuring the parameters in question. However, we observed the existence of systematic error (bias) in the measurements of conductivity sensors because of its intrusive character.*

**Key-words:** *Sensors eletroresistivos, Two phase flow, uncertainty analysis, measurement errors.*