

ESTUDO EXPERIMENTAL DA HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO PELA ANÁLISE ELETRÔNICA

Francisco Antônio Belo

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Tecnologia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil. E-Mail: belo@les.ufpb.br

Luiz Felipe Mendes de Moura

Azamor Cirne de Azevedo

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos. E-Mails: felipe@fem.unicamp.br; azamor@fem.unicamp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a hidrodinâmica do escoamento bifásico (ar-água) vertical ascendente co-corrente através de análise eletrônica. Analisou-se o comportamento do escoamento usando-se um sensor capacitivo com dois eletrodos colocados na superfície externa (não invasiva e não intrusivamente) de um tubo de acrílico de 16 mm de diâmetro interno, por onde escoava a mistura. O transdutor eletrônico usado para a medida emprega uma técnica de medição imune à capacitância parasita. Através da análise eletrônica, obteve-se uma equação característica do transdutor, relacionando a capacitância do sensor aos sinais de entrada e saída do transdutor. A capacitância foi também relacionada à fração de vazio do fluxo, obtida através de um sistema de fechamento simultâneo de válvulas. O padrão do escoamento estudado foi identificado, através dos mapas convencionais, como sendo bolhas dispersas. Os valores experimentais da capacitância foram comparados com os valores teóricos, baseados em uma permissividade elétrica relativa da mistura obtida através das equações de Maxwell e Bruggeman.

Palavras-chave: Escoamento bifásico, escoamento multifásico, análise dinâmica, análise eletrônica.

Palavras-chaves: Escoamento bifásico, escoamento multifásico, análise dinâmica, análise eletrônica

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos escoamentos multifásicos têm aplicações importantes nas usinas geradoras de potências elétrica, na mineralogia, em processos químicos, e na produção, transporte e processamento de petróleo. Essa área de pesquisa está ainda em fase de desenvolvimento, seja na procura de conhecimento dos fenômenos básicos, na construção de instrumentos precisos de medição, nas representações matemáticas ou nos métodos de solução. Na maioria dos sistemas práticos, os escoamentos multifásicos ocorrem com transferência de calor e massa, além de serem turbulentos ou transientes. As transferências de quantidade de movimento,

calor e massa, entre os componentes, ocorrem em interfaces móveis e deformáveis, o que dificulta muito a análise desses escoamentos.

Um dos parâmetros mais importantes de um escoamento bifásico gás-líquido é a fração de vazio, definida como sendo a razão entre o volume do gás e o volume total da mistura em um dado comprimento do duto (Kendoush and Sarkis, 1995). A fração de vazio é importante na determinação da densidade da mistura, da variação da pressão, do padrão de escoamento, da taxa de transferência de calor, da velocidade média e dos fluxos volumétricos.

Várias técnicas experimentais tem sido utilizadas para medir a fração de vazio, como por exemplo o método de atenuação de radiação nuclear (Kendoush, 1992). Outro exemplo são os sensores elétricos que apresentam uma resposta mais rápida (Huang et alli., 1992). A resposta desses sensores é baseada na medida da impedância (capacitância ou condutância) elétrica, sendo que os sensores podem estar em contato direto com o fluido (invasivo) ou podem estar isolados (não invasivos). Como geralmente a variação da permissividade elétrica com a temperatura pode ser considerada desprezível, quando comparada à condutividade elétrica, os sensores de capacitância oferecem uma maior estabilidade ao sistema de medidas. Além disso, a permissividade não é afetada por mudanças na concentração iônica (Geraets and Borst, 1988), o que torna o sensor capacitivo mais adequado que o sensor condutivo para a análise de escoamentos multifásicos.

O primeiro equacionamento das propriedades efetivas de um sistema bifásico foi apresentado por Maxwell (1873). Esse modelo foi baseado na hipótese do efeito do campo de reação da fase dispersa não modificar o campo elétrico da fase contínua. As demais equações são derivadas da equação de Maxwell, ponderando o efeito do aumento participação da fase dispersa em relação à fase contínua, conforme Bruggeman (1935), Meredith and Tobias (1960) e Looyenga (1965).

Um equacionamento completo do campo eletrostático aparece no estudo da espessura de filme de líquido em escoamento bifásico com sensores condutivos invasivos (o sensor se caracteriza pelo contato direto do eletrodo com o escoamento), mas não intrusivos, realizado por Coney (1973). A partir da equivalência das relações da condutância e capacitância elétrica entre eletrodos em um campo eletrostático, para uma mesma geometria, Andreussi et al. (1988) obtém uma extensão do modelo de Coney (1973) para sensores de capacitância, e compara os resultados obtidos com os modelos estruturais de Maxwell e Bruggeman. Albouelwafa and Kendal (1979) utilizam as fórmulas de guias de onda em microondas para estimar o valor da capacitância devido ao escoamento bifásico. Geraets et al. (1988) utilizam um sensor helicoidal montado sobre a superfície de um duto para obter medidas da fração de vazio em um escoamento bifásico.

Uma característica de qualquer das técnicas apresentadas é a não homogeneidade do campo elétrico em um duto cilíndrico, o que dificulta o seu equacionamento em virtude da diferença da forma e da disposição das fases. Uma proposta de um sensor com uma geometria de eletrodos imersos no duto que compensa este efeito foi apresentada por Auracher and Daubert (1985). Entretanto, o sensor proposto é intrusivo, o que pode alterar ou perturbar o escoamento.

Na maior parte das aplicações para escoamentos multifásicos, a parte real da impedância elétrica (complexa) de um sensor corresponde à valores de capacitância muito baixos (entre 0,01 pF e 20 pF), de maneira que a capacitância de acoplamento pode ser o principal problema desses transdutores. Dependendo da disposição do sensor e do transdutor eletrônico, em muitas aplicações, o valor da capacitância de acoplamento pode flutuar e pode ser maior que a capacitância desconhecida. Transdutores imunes à capacitância de acoplamento podem ser construídos utilizando-se uma configuração intrinsecamente imune à capacitância de acoplamento, com ambos os eletrodos flutuando, ou utilizando-se uma guarda ativa, quando um

dos eletrodos está aterrado. Os parâmetros térmicos e a frequência eletrônica são importantes para a rapidez, a sensibilidade e a qualidade da resposta, (Belo and Leite, 1992).

Desenvolve-se neste trabalho uma análise hidrodinâmica de escoamentos bifásicos do tipo bolhas dispersas, através de uma bancada experimental, onde o transdutor eletrônico é inserido na seção de testes.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

A bancada de teste construída para a análise hidrodinâmica de escoamentos bifásicos ar-água consistia na mistura de um fluxo de ar fornecido por um compressor e de um fluxo de água fornecido por uma bomba (reservatório de armazenamento subterrâneo), através de um injetor, formando o circuito da figura 1 (Azevedo Filho, 1997).

Nas extremidades da seção de acrílico (tubo de 1 m de comprimento e diâmetro interno de 16 mm) foram instaladas duas válvulas de fechamento rápido. Após o fechamento simultâneo dessas válvulas obtinha-se a fração de vazio, a partir da altura da coluna de água retida. A montante da seção de acrílico tinha-se uma tubulação vertical (um metro de comprimento e 16 mm de diâmetro interno) cuja finalidade era proporcionar o perfeito desenvolvimento do perfil de velocidade. À jusante da seção de acrílico, contendo as válvulas de fechamento simultâneo, encontrava-se o sensor capacitivo, formando junto com o transdutor eletrônico um analisador eletrônico da fração de vazio do escoamento bifásico.

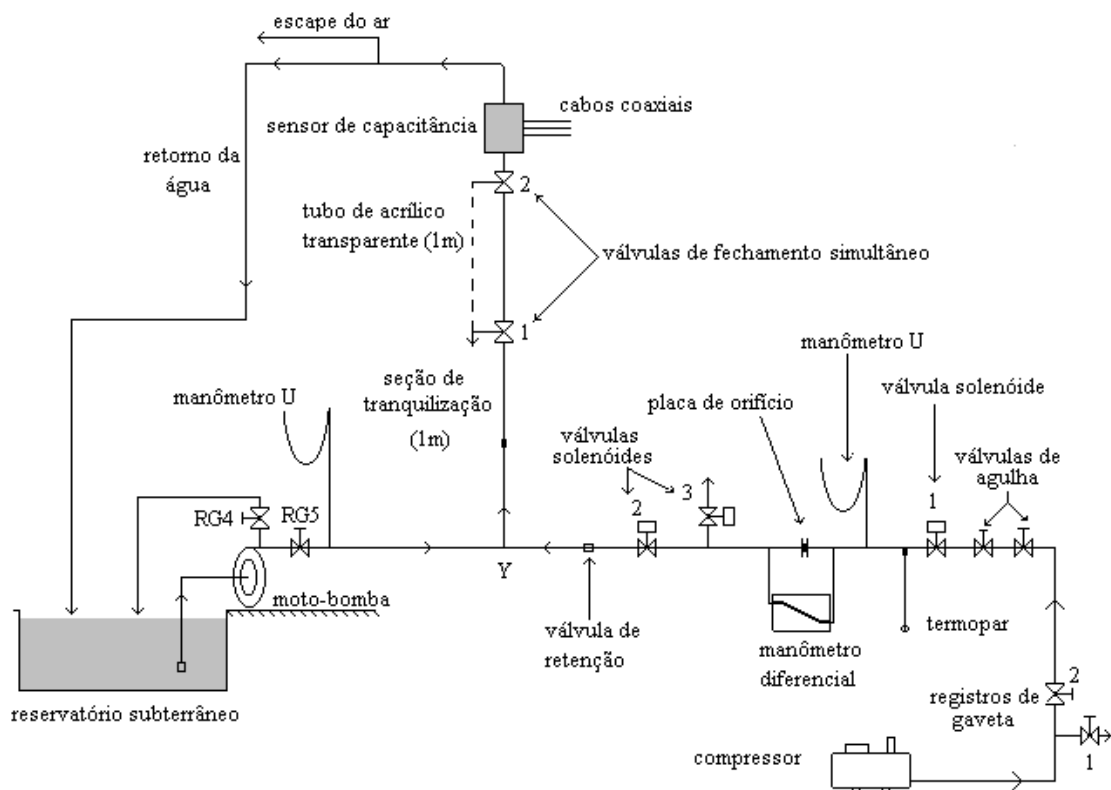


Figura 1 - Bancada experimental para análise de escoamentos bifásicos.

O analisador eletrônico da fração de vazio consistia de um sensor capacitivo, com os eletrodos formados por placas metálicas coladas externamente ao tubo de acrílico. Um sinal senoidal era aplicado no eletrodo emissor e o transdutor eletrônico estava ligado ao eletrodo

receptor de sinal. Os conversores de corrente alternada para corrente contínua CA/CC eram colocados junto ao eletrodo emissor e logo após o transdutor eletrônico. Com esta arquitetura e com um circuito eletrônico de alta banda passante, obteve-se uma resposta do sensor com boa fidelidade até frequências relativamente altas, limitadas praticamente pela resposta em frequência do circuito eletrônico (Belo, 1995). Um técnica de guarda longitudinal foi usada de maneira a direcionar o campo elétrico atuante e minimizar os efeitos de borda dos eletrodos (Belo, 1995).

As medidas foram realizadas através de uma placa de aquisição de sinais analógicos, baseado no conversor AD 674 da *Analog Device*, acoplada a um microcomputador. Através dessa placa e de um programa de aquisição de dados, os sinais de entrada e saída do transdutor, transmitidos através de cabos coaxiais, eram lidos e armazenados em disco.

3. MODELO TEÓRICO

O valor teórico da capacitância entre dois eletrodos pode ser determinado para diferentes situações envolvendo escoamentos bifásicos. Vamos considerar uma disposição genérica dos eletrodos em torno de um duto isolante e uma disposição dos fluidos dentro do duto correspondendo à um escoamento anular, conforme apresentado na figura 2.

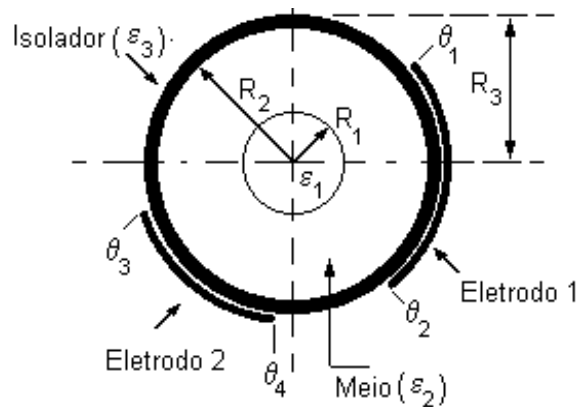


Figura 2. Escoamento anular no sensor

Para um sensor com dois eletrodos iguais formando ângulos quaisquer, como na figura 2, o valor da capacitância, conforme Belo (1995) é dado por:

$$\text{Cap} = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_3}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{senn}\theta_1}{nL} [ABF_3^n + CDF_2^n - ACF_1^n - BD] \text{senn}\theta_2 +$$

$$- \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_3}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{senn}\theta_1}{nL} [ABF_3^n + CDF_2^n - ACF_1^n - BD] \text{senn}\theta_3 \quad (1)$$

$$A = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad B = \varepsilon_3 + \varepsilon_2, \quad C = \varepsilon_3 - \varepsilon_2, \quad D = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

$$F_1 = (R_2 / R_1)^2, \quad F_2 = (R_3 / R_2)^2, \quad F_3 = (R_3 / R_1)^2$$

onde: ε_0 = permissividade elétrica absoluta do Vácuo

ε_1 = permissividade elétrica relativa do fluido 1

ε_2 = permissividade elétrica relativa do fluido 2

ε_3 = permissividade elétrica do isolador

Para um escoamento tipo bolhas dispersas pode-se utilizar a equação (1) considerando-se apenas uma fase, sendo a permissividade elétrica da mistura dada pela equação Maxwell:

$$\frac{\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{ag}}{\epsilon_{\alpha} + 2 \cdot \epsilon_{ag}} = \alpha \cdot \frac{\epsilon_{ar} - \epsilon_{ag}}{\epsilon_{ar} + 2 \cdot \epsilon_{ag}} \quad (2)$$

ou pela equação de Bruggeman:

$$\left(\frac{\epsilon_{ar} - \epsilon_{\alpha}}{\epsilon_{ar} - \epsilon_{ag}} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon_{ag}}{\epsilon_{\alpha}} \right)^{1/3} = 1 - \alpha, \quad (3)$$

onde: ϵ_{α} = permissividade da mistura

ϵ_{ag} = permissividade da água

ϵ_{ar} = permissividade do ar

α = fração de vazio

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O transdutor eletrônico foi calibrado de forma a determinar a relação (constante de calibração) entre a capacitância do sensor e os sinais de potencial elétrico medidos no eletrodo emissor e na saída do transdutor:

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta V_e} = K \cdot C_x \quad (4)$$

onde: V_e = potencial elétrico no eletrodo emissor (sinal de entrada)

V_s = potencial elétrico na saída do transdutor (sinal de saída)

C_x = capacitância do sensor

K = constante de calibração

A capacitância C_x pode ser estimada através da equação (1), que relaciona a capacitância com os parâmetros geométricos, propriedades do sensor e do escoamento bifásico, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos e propriedades do sensor.

Comprimento dos eletrodos de guarda	Comprimento dos eletrodos de medida	Diâmetro interno	Diâmetro externo
100 mm	100 mm	16 mm	21 mm
Ângulo entre os eletrodos (grau)	Permissividade relativa do acrílico	Permissividade de relativa do ar	Permissividade de da relativa da água
2,2	3,1	1	80

As calibrações foram realizadas com o sensor instalado na seção deacrílico. Foram utilizados sinais de entrada com frequências entre 1 e 8 MHz, obtidos através de um gerador de sinais de frequência e amplitude variáveis. A figura 3 mostra a resposta do sensor (sinal de saída em função do sinal de entrada), para uma frequência de 2 MHz, quando estava escoando somente ar ou água pela tubulação.

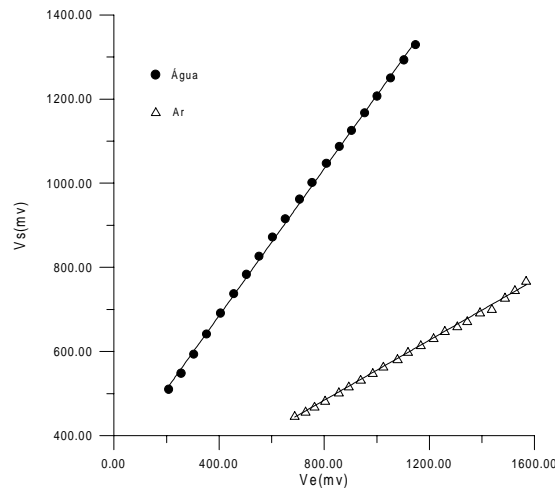


Figura 3 - Resposta do sensor para ar e água separadamente (2 MHz).

O circuito experimental permitiu o estudo de escoamentos do tipo bolhas dispersas, com uma fração de vazio variando de 21,1 a 53,4 %. O padrão de escoamento foi determinado a partir de um mapa de padrões de escoamento vertical, conforme Taitel and Dukler (1980). As figuras 4 (a) e (b) mostram a resposta do sensor para dois ensaios, correspondendo aos dois valores extremos de fração de vazio do escoamento.

A partir dos resultados da resposta do sensor (razão $\Delta V_s / \Delta V_e$), os valores de capacitância do sensor foram relacionados com a fração de vazio medida através da técnica de fechamento simultâneo das válvulas.

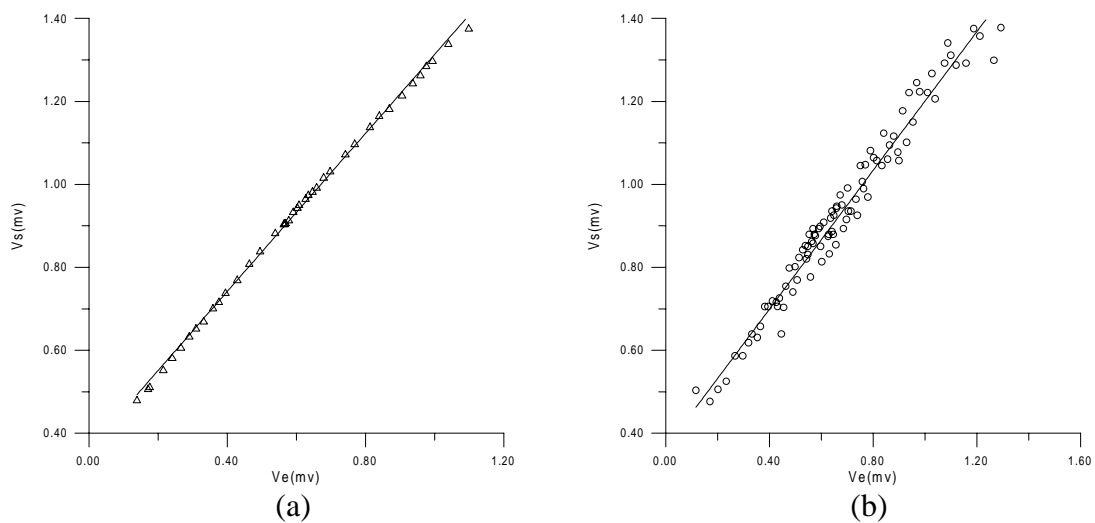


Figura 4 – Resposta do sensor. Fração de vazio (a) 21.1 %. (b) 53.4 %.

A figura 5 mostra os valores das capacitâncias em função da fração de vazio, obtidos de um total de 120 testes experimentais. Esse resultados são comparados com os modelos de Maxwell e Bruggeman, equações (2) e (3), respectivamente.

A diferença entre as capacitâncias medidas e os valores obtidos com os modelos de Maxwell e Bruggeman foi sempre menor que 5.0%. Observou-se um aumento sistemático dessa diferença com a diminuição da fração de vazio.

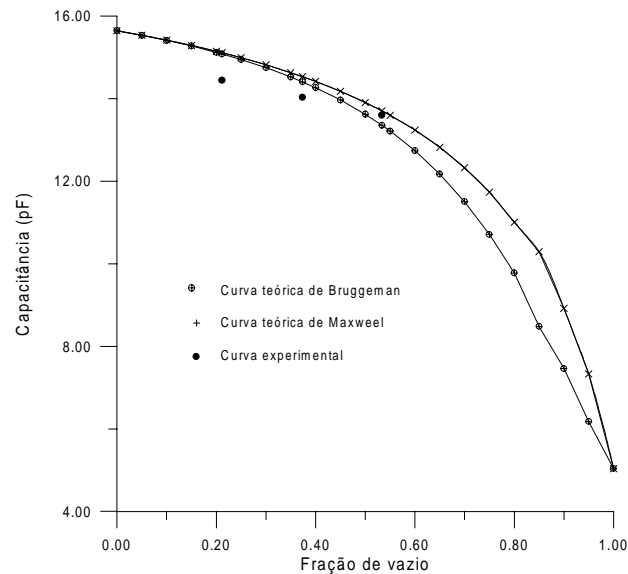


Figura 5 - Capacitância teórica e medida em função da fração de vazio

Foi utilizado na construção do transdutor o amplificador operacional OPA 678, fabricado pela *BURRN-BROWN*. Com uma melhoria na qualidade do circuito eletrônico desenvolvido para este trabalho e utilizando como o amplificador operacional o OPA 621, já foram obtidos melhores resultados na resposta do transdutor.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma aplicação da análise eletrônica ao estudo da hidrodinâmica dos escoamentos bifásicos gás-líquido em tubos verticais. A fração de vazio do escoamento é obtida através de medidas da capacitância elétrica de um sensor formado por dois eletrodos localizados na superfície externa de um tubo isolante.

Os valores experimentais da capacitância do sensor, em função da fração de vazio, foram comparados com os valores teóricos, obtidos através das equações de Maxwell e Bruggman. As diferenças observadas, inferiores a 5%, podem ser consideradas satisfatórias para esse tipo de escoamento. Outro fato importante é que foram apresentados os valores absolutos da capacitância, enquanto que na maioria dos trabalhos faz-se uma normalização, que pode ocultar erros de acoplagens e indutâncias induzidas. Apesar de terem sido realizados muitas medidas de capacitância, o circuito experimental permitiu o estudo de apenas um padrão de escoamento em uma faixa restrita de fração de vazio.

REFERÊNCIAS

- Albouelwafa, M. S. A. and Kendal, E. J. M., Analysis and design of helical capacitance sensors for volume fraction determination, *Rev. Sci. Instrum.* 50(7), Jul. 1979.
- Andreussi, P., Di Donfrancesco, A. and Messia, An Impedance for the Measurement of Liquid Hold-Up in Two-Phase Flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14, No. 6, pp. 777-785, 1988.
- Auracher, H., Daubert, J., A capacitance Method for Void Fraction Measurements in Two-Phase Flow, 2nd International Conference on Multi-phase flow, London, England, June 1985.
- Azevedo Filho, A. C. Estudo experimental da hidrodinâmica de escoamento bifásico através da análise eletrônica, UFPB, 1997, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica.
- Belo, F. A. and Leite, J. T. F., Electronic Analyser of Quality, SAE Brasil, São Paulo, 1992.
- Belo, F. A., Aplicação da análise eletrônica ao estudo do escoamento multifásico, Campinas, UNICAMP, 1995. Tese de doutoramento em Engenharia Mecânica.
- Bruggeman, D. A. G., "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen, *Ann. Phys. Leipzig*, 24, p. 636, 1935.
- Coney, M. W. E., The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness' in two-phase flow, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 6, 1973.
- Geraets, J. J. M. and Borst, J. C., A Capacitance Sensor for Two-Phase Void Fraction Measurement and Flow Pattern Identification, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14, No. 3, pp. 305-320, 1988.
- Huang, S. M., Xie, C. G., Salked, J. A., Plaskowski, A. B., Thorn, R., Williams, R. A., Hunt, A. and Beck, M. S., Process Tomography for identification, Design and Measurement in Industrial Systems, *Powder Technology*, 69 (1992) 85 -92, 1992.
- Kendoush, A. A. and Sarkis, Z., A. Improving the accuracy of the capacitance method for void fraction measurement, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier Science Inc., New York, 1995.
- Kendoush, A. A. A comparative study of the various nuclear radiations used for void fraction measurements, *Nuc. Eng. Des.* 137, 247-257, 1992.
- Looyenga, H., *Physical*, 31, 401, 1965.
- Maxwell, J. C., *Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon, Oxford, 1873.
- Meredith, R. E. and Tobias, C. W., "Resistance to Potential Flow Through a Cubic Array of Spheres", *J. App. Phys.*, 34, 7, 1270, July 1960.
- Taitel, Y., Bornea, D., Dukler, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal*, v.26, n.3, 1980.