



GEOMETRIA DE SENSORES CAPACITIVOS APLICADOS EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Luiz G. C. Duarte

Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, Departamento de Tecnologia Mecânica e Materiais, Rua Emídio dos Santos s/n, 40300-010, Salvador, BA, duarte@nrva.ufsc.br

Álvaro T. Prata

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, NRVA, 88040-910, Florianópolis, SC, prata@nrva.ufsc.br

***Resumo.** Entre as principais características dos sensores capacitivos está a geometria escolhida para implementação dos mesmos. Devido a não uniformidade da distribuição de sensibilidade relacionada com os diversos tipos de projetos de sensores capacitivos, pode-se obter para cada um deles diferentes respostas para regimes de escoamento distintos. Esta situação é mais crítica quando os sensores são utilizados em situações em que a variação dos regimes de escoamento está presente, o que poderia causar erros expressivos na medição capacitiva. Neste trabalho são discutidas de forma abrangente as nuances que envolvem a correta escolha da geometria dos sensores aliada a cada tipo de aplicação. São discutidos fatores como sensibilidade, uniformidade de campo elétrico e linearidade da curva de calibração, lançando mão de relatos da literatura, simulações numéricas e resultados experimentais. Após uma explanação dos diversos aspectos envolvidos nesta discussão a utilização dos sensores em escoamentos bifásicos é abordada com destaque para as tubulações de diâmetro reduzido.*

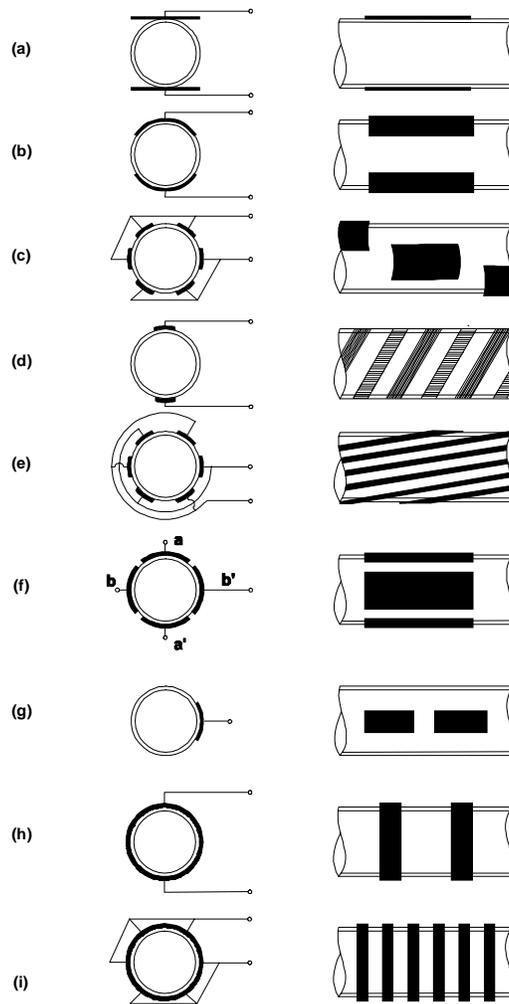
Palavras-chave: Sensores capacitivos, Escoamento multifásico, Fração de vazio, Sensibilidade, Geometria de eletrodos.

1. INTRODUÇÃO

Inúmeras são as aplicações encontradas para a técnica capacitiva e cada uma destas aplicações está relacionada com algum tipo de particularidade que faz com que o projeto dos sensores a ser elaborado demande algum cuidado. Seja pelas características dos tubos estudados, pela disponibilidade de espaço, praticidade e até mesmo pelo comprimento da seção de testes, o tipo de eletrodo a ser fabricado deverá ser o mais adequado aos objetivos do experimento visando a obtenção de resultados expressivos e representativos do fenômeno estudado. Com isto pode-se encontrar na literatura uma grande quantidade de geometrias utilizadas na confecção de sensores capacitivos e cada uma delas tem a sua razão de ser. De uma geometria para outra, aplicadas em uma mesma situação física, pode-se obter diferentes respostas de sensibilidade, pode-se conseguir uma menor dependência com a variação dos regimes de escoamento e as qualidades em particular destas geometrias é que fazem da sua escolha uma etapa de extremo cuidado no projeto dos sensores.

Na Fig. (1) são vistas algumas configurações já discutidas na literatura e que foram objeto dos estudos iniciais deste trabalho.

Chang *et al.* (1984) utilizaram dois eletrodos em forma de anel, Fig. (1h), e confirmaram uma relação linear entre a capacitância medida e a fração de vazio para os regimes estratificado e anular, enquanto que para o escoamento com bolhas (bubbly flow) a curva de calibração é bastante diferente dos outros regimes.



(a) Placas planas (b) 2 Placas côncavas (c) 6 Placas côncavas escalonadas (d) Helicoidal de 2 eletrodos (e) Helicoidal de 6 eletrodos (f) 4 Placas côncavas (g) Unidirecional (h) 2 Anéis (i) 6 anéis

Figura 1. Geometria de eletrodos - Abouelwafa e Kendall (1980), Kendoush e Sarkis(1995)

O campo elétrico formado quando se utilizam eletrodos tipo anel localiza-se entre eles, região A da Fig. (2), e, portanto, a largura dos eletrodos não é um fator que influencia diretamente a sensibilidade deste tipo de sensor. A proximidade entre os eletrodos, no entanto, tem significativa influência na sensibilidade e na uniformidade do campo elétrico obtido. Se os eletrodos forem posicionados muito próximos um do outro o campo elétrico é formado predominantemente na região externa ao tubo produzindo valores da capacitância menores do que se o campo fosse uniformemente distribuído ao longo da região A.

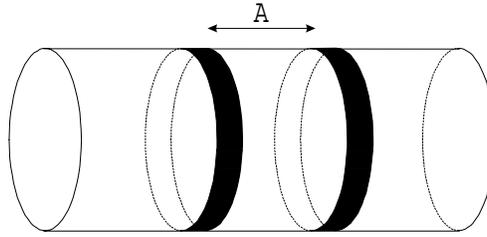


Figura 2. Configuração com eletrodos em forma de anel

Abdul-Razzak *et al.* (1995), baseados no trabalho de Chang *et al.* (1984), usaram seis eletrodos em forma de anel, Fig. (1i), para aumentar a sensibilidade das medições e eliminar os efeitos do regime de escoamento, exceto para escoamento com bolhas.

Elkow e Reskallah (1996) utilizaram eletrodos helicoidais, Fig. (1d), e eletrodos tipo placas côncavas, Fig. (1f), na determinação da fração de vazio. Eles mostraram que a construção de eletrodos helicoidais deve seguir os critérios dimensionais:

$$0,1 < W/p < 0,136 \quad (1)$$

$$1,83 < p/D_e < 3,66 \quad (2)$$

onde W é a largura dos eletrodos, D_e é o diâmetro externo do tubo e p é o passo. Este tipo de sensor operou com uma mudança na capacitância medida de 0,5 pF quando um escoamento de ar foi substituído por um de água. Uma resposta não linear, baixa sensibilidade e problemas de proteção eletromagnética também estiveram presentes com este tipo de sensor.

Devido às inconveniências relacionadas aos sensores helicoidais, Elkow e Reskallah construíram também sensores com eletrodos tipo placas côncavas que propiciaram um aumento significativo da sensibilidade, com uma variação de 5 pF na situação já descrita para sensores helicoidais. O fator de maior destaque destes sensores é a linearidade obtida durante as calibrações para todos os regimes e fluxos de massa estudados.

Kendoush e Sarkis (1995) em um experimento em que os regimes de escoamento foram simulados em condições estáticas, analisaram o desempenho de cinco configurações de sensores capacitivos: de placas planas, de placas côncavas, tipo anel, unidirecional e de dupla hélice ou helicoidal, figuras (1a), (1b), (1h), (1g) e (1d) respectivamente. Definindo sensibilidade como a diferença entre as capacitâncias medidas para $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$, verificaram uma baixa sensibilidade para os sensores helicoidais e unidirecionais, ($< 5\text{pF}$), atestando não serem apropriados para precisas medições da fração de vazio, α . Os demais sensores tiveram alta sensibilidade de resposta, ($> 5\text{pF}$).

Abouelwafa e Kendall (1980) também buscaram determinar a melhor configuração de sensores capacitivos que proporcionassem respostas mais eficazes. Coletando dados de medições realizadas por sensores com eletrodos de placas planas, Fig. (1a), de 2 e 4 placas côncavas, figuras (1b) e (1f), helicoidais de 2 e 6 eletrodos, figuras (1d) e (1e), e de placas côncavas de 6 eletrodos escalonados, Fig. (1c), observaram que as configurações que produziram melhores resultados, no que diz respeito à sensibilidade e linearidade, foram os sensores das figuras (1f) e (1d), o primeiro sendo o melhor deles. Foram analisados apenas dois tipos de regime, pistonado e estratificado, e os sensores, exceto o de placas planas, foram posicionados internamente ao tubo sendo isolados do fluido por uma fina película acrílica.

Comentando sobre as vantagens de utilizar-se eletrodos helicoidais Tollefsen e Hammer (1998) mencionam que sensores não helicoidais, principalmente os de placas planas, são altamente dependentes do regime de escoamento e que resultados acurados só são conseguidos quando os

componentes estão bem misturados. Uma mistura aproximadamente homogênea ocorre quando as bolhas são pequenas comparadas com a dimensão do volume medido pelo sensor.

2. ESCOLHA DA GEOMETRIA

Talvez o principal fator que influencie a escolha da geometria de um sensor capacitivo seja a sua dependência com os regimes de escoamento. A situação mais crítica que se poderia imaginar seria a de um escoamento que, em uma mesma seção da tubulação, apresente de forma freqüente uma variação dos regimes de escoamentos. Em situações como esta é imprescindível que se obtenha um sensor indiferente a estas variações para que uma única curva de calibração seja suficiente para correlacionar capacitância e fração de vazio. Uma outra saída quando não se consegue um sensor independente dos regimes foi dada por Schiavon e Selegim (2000) que utilizaram a tomografia capacitiva para medição da fração de vazio. No seu trabalho eles não enfatizaram a busca por um sensor independente dos regimes, ao invés disto, buscaram solucionar o problema criando um sistema capaz de identificar o regime de escoamento de forma instantânea e para cada regime identificado aplicar uma curva de calibração adequada.

A uniformidade do campo elétrico é um dos fatores que influencia diretamente a dependência com o regime de escoamento e, portanto, é uma qualidade buscada no projeto de um sensor. Ainda influenciam na dependência fatores como a proximidade entre os eletrodos, o comprimento dos eletrodos, o isolamento aplicado sobre os eletrodos, o uso de eletrodos de guarda e o tipo de circuito elétrico utilizado. Pequenos detalhes na escolha de cada um destes fatores podem significar o quão próximo a montagem estará do projeto do transdutor ótimo.

3. OUTROS FATORES RELACIONADOS AO TRANSDUTOR CAPACITIVO

Não podem ser esquecidos alguns fatores que também interferem no sinal de resposta de um sensor. Se escolhermos a sensibilidade, a uniformidade do campo elétrico e a independência com o regime de escoamento como sendo as principais características de um sensor, e imaginarmos que o projeto do sensor deve privilegiar estas características, então fatores como isolamento, eletrodos de guarda, freqüência utilizada, tamanho dos eletrodos e outros passam a ter um papel secundário no projeto, mas diretamente relacionados às otimizações que se busca para as principais características do sensor.

A sensibilidade, por exemplo, é de grande importância quando o estudo é realizado em tubulações de diâmetro reduzido e, neste caso, o comprimento dos eletrodos utilizados passa a ter também grande importância. É essencial nestes casos que se faça um estudo das geometrias para que se encontre a que forneça um valor satisfatório da capacitância medida, o que pode estar relacionado com o equipamento utilizado para realizar as medições, principalmente se a presença de capacitâncias parasitas for um inconveniente. Quando não se está trabalhando com dimensões muito pequenas a sensibilidade deixa de ser um ponto preocupante do projeto, pois para dutos mais robustos, certamente será obtida uma grande variação da capacitância entre a fração de vazio máxima e mínima capaz de proporcionar uma curva de calibração bastante representativa.

Neste trabalho o duto estudado tinha um diâmetro interno de 3mm e a sensibilidade era a principal característica do sensor, pois caso a sensibilidade fosse muito pequena o erro cometido ao se estimar a fração de vazio seria muito grande, o que nos levou a adotar eletrodos de comprimentos relativamente grandes. Outra parte crítica deste trabalho foi o fato de estarmos trabalhando com uma mistura de óleo e refrigerante que possuía características dielétricas muito desfavoráveis. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura estuda escoamentos com ar e água que minimizam os problemas de sensibilidade, mas quando tratamos de aplicações práticas os fluidos estudados podem não ser tão favoráveis.

Como foi descrito na seção anterior, configurações idênticas apresentaram resultados conflitantes em trabalhos distintos. A explicação imediata para estas divergências poderia repousar na variedade de regimes de escoamento estudados, mas não pode ser deixado de lado a apreciação de outros parâmetros que a técnica envolve. É bem verdade que existem casos em que a independência com o regime de escoamento facilita a análise do problema, mas quando isto não é conseguido é imprescindível que se avalie a maior quantidade possível de parâmetros envolvidos no projeto para facilitar a interpretação dos resultados. Isto é o que propõe Xie et al (1990) no brilhante trabalho em que através de simulações mostraram claramente a interdependência destes fatores e a dificuldade em se alcançar um equilíbrio entre as suas potencialidades durante o projeto.

Para se obter linearidade do campo elétrico, e com isto caminhar em direção da obtenção de um sensor independente do regime, é necessário que o sensor capacitivo conte com uma proteção eletromagnética que fique não muito próxima dos eletrodos, que se analise a possibilidade e os benefícios em se utilizar eletrodos de guarda, quando aplicáveis, e que a montagem não proporcione a proximidade entre os eletrodos capaz de produzir uma concentração do campo elétrico fora da região de interesse para estudo.

4. UNIFORMIDADE DO CAMPO ELÉTRICO

Nesta seção serão apresentados alguns resultados de simulações numéricas realizadas por Duarte et al (2001), com algumas das configurações já vistas, no intuito de demonstrar como pode-se interferir na linearidade do campo elétrico formado entre os eletrodos. Na Fig. (3) é vista uma configuração com seis eletrodos em forma de anel em que pode-se claramente verificar o posicionamento do campo em relação aos eletrodos e a não uniformidade na região em que o escoamento se desenvolve.

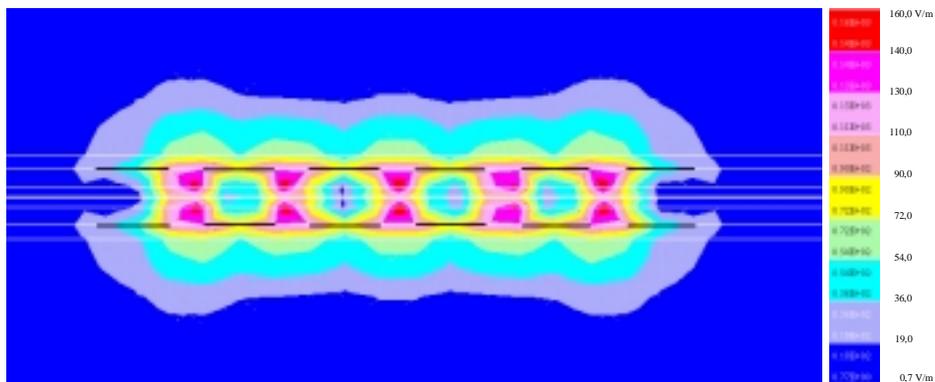


Figura 3. Intensidade do campo elétrico para seis eletrodos tipo anel

Nesta figura a tubulação está posicionada horizontalmente no centro da figura e os eletrodos são vistos segundo um corte longitudinal.

Já na Fig. (4) são explorados os resultados para a configuração que utiliza eletrodos de placas côncavas, que são mais comumente utilizadas em estudos de dutos circulares. Nela é mostrada a concentração do campo que ocorre nas extremidades dos eletrodos quando elas estão muito próximas. O problema foi crítico para o caso em que o comprimento angular dos eletrodos simulados foi de 150° .

Em situações em que não existe a uniformidade do campo e que há uma concentração do campo sobre uma porção do volume estudado, haverá sub ou superestimação da fração de vazão a depender do regime medido e certamente não haverá linearidade na curva de calibração.

Nota-se que para comprimentos angulares menores o campo tende a concentrar-se no interior do tubo tornando-o mais uniforme naquela região.

Quando são empregados eletrodos em forma de placas o uso de eletrodos de guarda pode trazer bons resultados quando busca-se a uniformidade do campo. O maior inconveniente na sua aplicação reside no aumento significativo do transdutor capacitivo e este é um fator limitante.

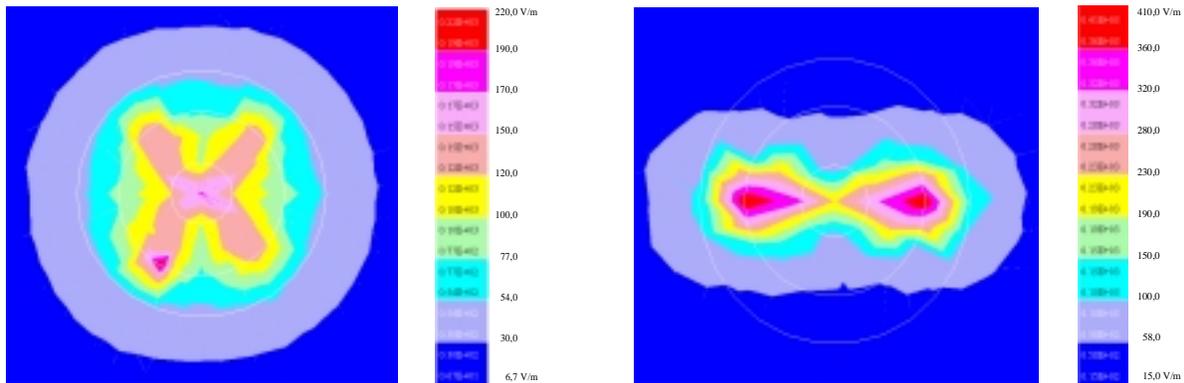


Figura 4. Campo elétrico para ângulo do eletrodo igual a 60° e 150°

5. APLICAÇÃO PRÁTICA

O sensor projetado para o nosso trabalho foi um sensor de placas côncavas que realizou a medição da fração de vazio do escoamento. Devido ao diminuto diâmetro do tubo e às características dos fluidos utilizados, óleo lubrificante SUNISO 1 GS e refrigerante R-12, tivemos que tomar diversos cuidados durante o projeto. A escolha pela técnica deveu-se ao fato de que não queríamos interferir no escoamento com a inserção de sondas e principalmente por tratar-se de uma técnica de baixo custo. Foram testadas diversas geometrias de eletrodos e a de placas côncavas foi a que respondeu com os maiores valores de sensibilidade que era um parâmetro preocupante no problema. Resolvemos utilizar eletrodos com 100mm de comprimento para que o valor da capacitância lida não fosse muito pequeno a ponto de ser fortemente influenciado por eventuais capacitâncias parasitas. Os valores ficaram em torno de 10pF. Uma descrição deste sensor é encontrada no trabalho de Duarte e Prata (2000). Na Fig. (5) é vista uma imagem de um escoamento bastante comum durante os ensaios.

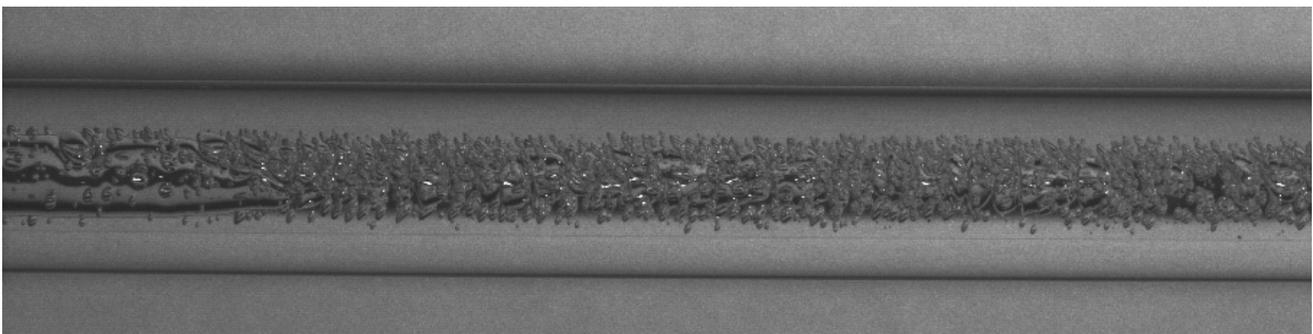


Figura 5. Imagem do escoamento

O maior problema encontrado durante o trabalho esteve relacionado com a etapa de calibração. Buscava-se realizar uma calibração dinâmica utilizando a técnica de válvulas de fechamento rápido, mas este procedimento mostrou-se inadequado pelas características do escoamento. Trabalhava-se com uma mistura em que a fração mássica de refrigerante variava entre 0,1 e 0,4, e quando as válvulas

foram implementadas na bancada elas tornaram-se pontos de nucleação e crescimento de bolhas desconfigurando totalmente os regimes que vinham sendo observados até então.

A solução encontrada foi a de medir a capacitância para as situações em que a fração de vazio era máxima e mínima e estimar outros pontos intermediários da curva de calibração. Isto foi conseguido graças à flexibilidade proporcionada pela bancada. Conseguia-se facilmente preencher a tubulação, que tinha 10m de comprimento, com a mistura líquida permitindo uma leitura para $\alpha = 0$, e posteriormente fazia-se passar um slug de mais de 20cm de comprimento pelos sensores com velocidade bem baixa.

Enquanto a aquisição de dados era feita, este slug passava pelos sensores e com isto pôde-se observar o comportamento dos mesmos para este tipo de regime de escoamento através da variação da fração de vazio. O motivo que nos levou a adotar tal procedimento foi a certeza de que o projeto do sensor havia sido feito conservativamente no sentido de evitar a dependência com o regime.

Como foi constatado durante os ensaios que o sensor não dependia da vazão, começou-se a pensar que uma calibração estática seria suficiente para a caracterização do sensor. Contudo ainda não havia a certeza de que o sensor era independente do regime. Aliás, ainda não há a certeza absoluta de que o sensor é independente, mas há indícios muito fortes de que o mesmo não apresenta dependência.

Na Fig. (6) encontra-se uma destas calibrações, em que fica muito claro que a resposta do sensor é quase que perfeitamente linear. Acredita-se que esta linearidade da curva de calibração está relacionada com o comprimento do transdutor que impede que seja realizada uma medição local da fração de vazio, mas sim uma média do volume de controle entre os eletrodos. Na figura apresentada inicialmente o tubo encontrava-se preenchido com a mistura na fase líquida, $\alpha = 0$, e um slug era forçado a passar pelo sensor até que a fração de vazio se aproximasse do seu valor máximo, $\alpha = 1$, que não era completamente atingido devido ao filme de óleo que permanecia na parede do tubo, o que no entanto não desmereceu a calibração dando-nos inclusive uma idéia de como estimar a espessura de película de líquido a partir destes dados. Como já se conheciam os valores extremos da capacitância medida, bastava apenas determinar uma curva de calibração que se ajustasse entre estes pontos. No caso observado na Fig. (6) fica claro que a resposta é linear e com isto a curva de calibração está imediatamente determinada.

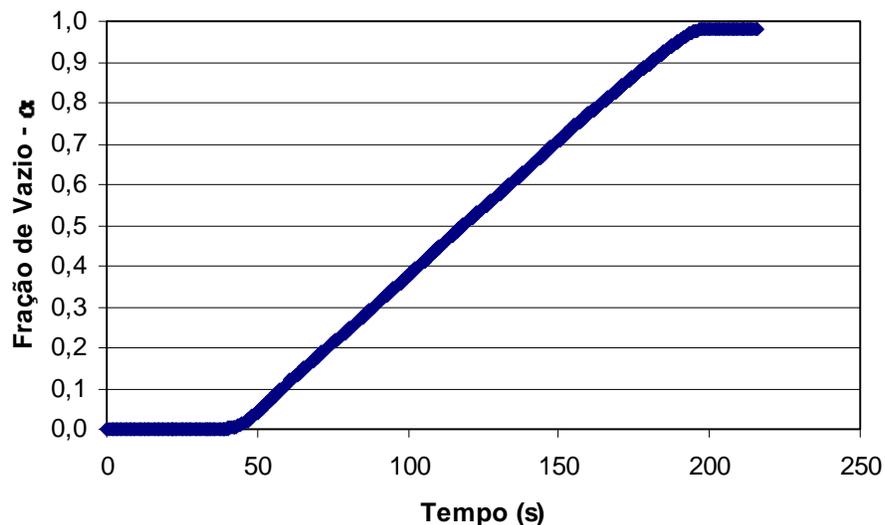


Figura 6. Calibração de um sensor capacitivo

Um outro experimento realizado para determinar a linearidade dos sensores baseou-se na observação da variação da fração de vazio quando uma pequena e única bolha passava pelos sensores.

O ensaio foi útil também na verificação da montagem do sensor, pois pôde-se constatar que qualquer que seja a posição da bolha no seu interior a resposta é a mesma, Fig. (7). Apesar de simples este ensaio é muito interessante e trás informações que validam as afirmações feitas sobre a capacidade dos sensores projetados em medir capacitâncias de valores muito pequenos.

Observa-se nesta figura que o sensor foi sensível à passagem de uma bolha que tinha aproximadamente 2mm de diâmetro, o que representou uma variação de 6 fF ou aproximadamente 0,6% da faixa estudada. Fazendo uma analogia com o volume de gás que a bolha representa em relação ao volume total supostamente medido pelo sensor capacitivo temos que o volume da bolha representa 0,59% do volume total estimado, o que é um resultado encorajador.

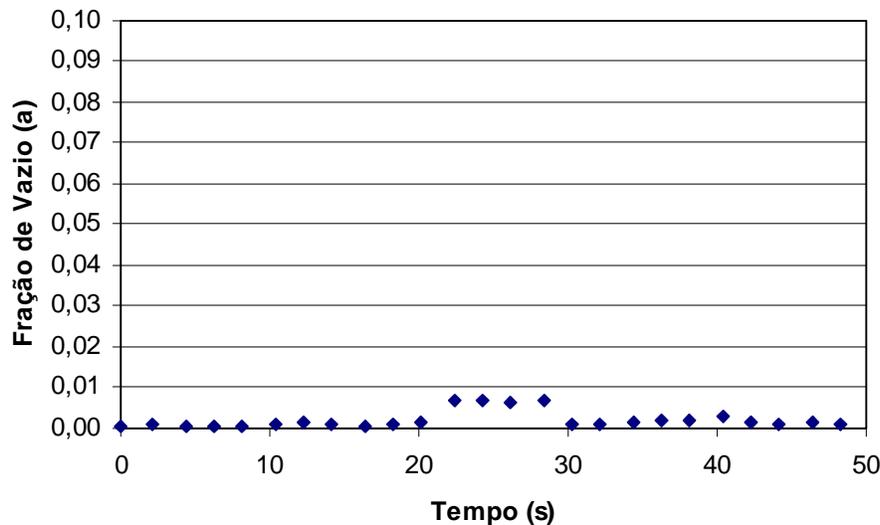


Figura 7. Ensaio capacitivo

6. CONCLUSÕES

Como pode-se notar pela grande quantidade de estudos de outros autores apresentada neste trabalho, existe, sem dúvida alguma, a idéia de que determinada geometria poderia ter um mesmo comportamento qualquer que fosse a sua aplicação. Isto não é verdade. É válida qualquer proposta que apresente resultados relacionados a algum tipo de geometria, mas o principal é saber que para cada caso existe uma geometria que é a ideal para se conseguir os melhores resultados possíveis.

A etapa de calibração é muito provavelmente a parte mais delicada no processo de expressar a fração de vazio utilizando-se da técnica capacitiva. Na concepção de um transdutor independente dos regimes de escoamento é importante fabricar um sensor que peque pelos mínimos detalhes, pois são detalhes como estes que impedem a linearidade da curva de calibração.

7. REFERÊNCIAS

- Abdul-Razzak, A., Shoukri, M., Chang, J. S., *Characteristics of Refrigerant R-134A Liquid-Vapor Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe*, ASHRAE Transactions, 1995, vol. 1, pp. 953-964.
- Abouelwafa, M. S. A., Kendall, E. J. M., *The Use of Capacitance Sensors for Phase Percentage Determination in Multiphase Pipelines*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1980, vol. 29, N^o 1, pp. 24-27.

- Chang, J. S., Girard, R., Raman, R., Tran, F. B. P., *Measurement of Void Fraction in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Flow by Ring Type Capacitance Transducers*. In *Mass Flow Measurements*, 1984, New York: ASME Press, pp. 93-99.
- Duarte, L. G. C., Prata, A. T., *Void Fraction Measurement in Small Diameter Tubes*, 8^o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT, Porto Alegre, 2000.
- Duarte, L. G. C., Prata, A. T., Luz, M. V. F., *Electric Field Simulation In Capacitive Sensors*, 16^o Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, Uberlândia, 2001.
- Elkow, K. J., Reskallah, K. S., 1996, "Void Fractions Measurements in Gas-Liquid Flows using Capacitance Sensors", *Measurement Science Technology*, vol. 7, pp. 1153-1163.
- Kendoush, A. A., Sarkis, Z. A., *Improving the Accuracy of the Capacitance Method for Void Fraction Measurement*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, vol. 11, pp. 321-326.
- Schiavon, F., Selegim Jr., P., *On-site Calibration of a Phase Fraction Meter by an Inverse Technique*, 8^o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT, Porto Alegre, 2000.
- Tollefsen, J., Hammer, E. A., *Capacitance Sensor Design for Reducing Errors in Phase Concentration Measurements*, *Flow Measurement and Instrumentation*, 1998, vol. 9, pp. 25-32.
- Xie, C. G., Stott, A. L., Plaskowski, A., Beck, M. S., *Design of Capacitance Electrodes for Concentration Measurement of Two-Phase Flow*, *Measurement Science and Technology*, 1990, vol. 1, pp. 65-78.

GEOMETRY OF CAPACITIVE SENSORS USED IN MULTIPHASE FLOWS

Luiz G. C. Duarte

Federal Center of Technological Education of Bahia, Department of Mechanical and Materials Technology, Emídio dos Santos Street s/n, 40300-010, Salvador, BA
duarte@nrva.ufsc.br

Álvaro T. Prata

Federal University of Santa Catarina, Department of Mechanical Engineering, NRVA, 88040-910, Florianópolis, SC
prata@nrva.ufsc.br

Resumo. *The electrodes geometry is one of most important capacitive sensors characteristics. Because there is not uniformity in sensitivity distribution related with several capacitive sensors project, we can get for each one different signal to different low patterns. This is a critical situation when sensors are used in presence of flow patterns changes, and could be mistakes about capacitive measurements. This work tries to show the details that appear in a choice of sensors geometry. Talking about sensitivity, electric field uniformity and linearity of calibration curve, we found answers to questions with help of other works, numeric simulations and experimental data. After this we discuss the use of capacitive sensors in multiphase flows, especially small diameter tubes.*

Palavras-chave: *Capacitive sensors, Multiphase flow, Void fraction, Sensitivity, Electrodes geometry.*