

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FASE UTILIZANDO SENSORES ELETRO-RESISTIVOS

Sandro S. Rezende, ssrezende@inmetro.gov.br

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO
Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos – DINAM
Av. Nossa Sra. das Graças, 50
22250-040 Xerém-Duque de Caxias-RJ – Brasil

Marcelo Oliveira Silva, mos@ufrj.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Programa de Engenharia Mecânica – PEM/COPPE/UFRJ
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco G, Sala 204
21945-970 Cidade Universitária-Rio de Janeiro-RJ – Brasil

Jhonny R. Emerenciano, jregis@dee.ufrj.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE/COPPE/UFRJ
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco H, Sala 227
21945-970 Cidade Universitária-Rio de Janeiro-RJ – Brasil

José L. S. Neto, luizneto@lif.coppe.ufrj.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE/COPPE/UFRJ
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco H, Sala 227
21945-970 Cidade Universitária-Rio de Janeiro-RJ – Brasil

Resumo. *O objetivo deste artigo é apresentar um sistema de medição de fração de vazio de um fluido através da diferença de fases entre o fluido principal e um escoamento presente no fluido, utilizando um sensor eletro-resistivo e software. O fluido principal e o escoamento presente possuem composições diferentes, sendo assim eles possuem resistências diferentes à passagem de corrente elétrica. Assim, com a utilização de sensores eletro-resistivos, pode-se determinar a fase na qual o sensor está inserido em função da variação da resistência do meio. Neste trabalho, o fluido principal é a água comum e o escoamento presente é composto de bolhas de ar. O sistema de medição fornece o intervalo de tempo relativo à passagem de uma bolha de ar pela ponta do sensor. Com a análise por software pode-se simplificar o circuito, melhorar a qualidade do sinal obtido e aumentar a flexibilidade do sistema.*

Palavras-chave: *Fração de vazio, Bolha de ar, Eletro-resistivo, Métodos Experimentais, Multi-fásico*

1. INTRODUÇÃO

Muitos sistemas de transportes de fluidos, tubos, encanamentos, canais abertos, etc, estão sujeitos a captação e transporte de substâncias prejudiciais, gerando um sistema de transporte multi-fásico. Também em algumas aplicações o transporte multi-fásico pode ser interessante, como por exemplo, na indústria química onde muitas vezes é usado um fluido como meio de transporte de outro material. Assim, é importante que se tenha uma forma de medir a fração desses fluidos no sistema. Esses sistemas de transportes podem conter fluidos com características que impedem ou dificultam um sistema óptico de detecção da segunda fase, impossibilitando o uso destes. Essa segunda fase pode apresentar comportamento dinâmico variado ao longo do duto.

Conhecendo as características das fases presentes no escoamento pode-se determinar algumas características deste, como por exemplo, o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão ao longo do escoamento.

Com os sensores eletro-resistivos, pode-se medir a proporção das fases em um duto independente das características ópticas dele. São sensores de fácil construção, capazes de fornecerem medidas muito precisas e com o auxílio computacional a análise dos dados obtidos é bastante rápida e simplificada, permitindo análises mais complexas.

Os trabalhos realizados por Devian e Fossa (2003) apresentam melhorias na construção dos sensores para aplicações em medição de fração de vazio. Um exemplo de aplicação de medição de fração de vazio é o trabalho realizado por Chanson e Carosi (2007), onde os autores fazem estudos de sistemas multifásicos em regimes turbulentos de canais abertos, este tipo de regime é normalmente encontrado em hidrelétricas.

O trabalho de Andreussi *et al.* (1988) apresenta a utilização de uma sonda circular que também usa o princípio da diferença entre as resistividades dos meios para determinação da fração de vazio no escoamento. E Yang *et al.* (2003) desenvolveram um trabalho baseado nessas sondas circulares para medir o volume médio da fração de vazio de um escoamento.

2. SISTEMA DE MEDIÇÃO

A operação dos sensores eletro-resistivos é baseada na diferença da resistividade elétrica entre os fluidos. Neste trabalho o fluido principal é a água com escoamento de uma fase gasosa (ar). A água, por ser um bom solvente freqüentemente é encontrada com substâncias químicas dissolvidas, essas impurezas dão o caráter condutivo da água, mesmo em pequenas concentrações. A água apresenta uma resistividade elétrica na ordem de mil vezes a resistividade elétrica do ar. O sinal obtido do sistema de medição eletro-resistivo apresenta uma forma de onda próxima a uma onda quadrada, a curva de ascensão dessa onda ocorre devido ao tempo que a ponta do sensor demora para secar dentro da bolha de ar.

O sistema de medição é composto de três partes: o circuito analógico - parte que contém o sensor; a placa de aquisição de dados; e o modelo construído em MATLAB/Simulink. Ele foi desenvolvido para se adaptar a variações da resistividade do fluido principal (fluido em maior concentração), isto é, caso a resistividade do fluido se altere ao longo da medição, seja por impurezas ou mesmo pela presença de bolhas, o sistema irá usar esse novo valor da resistência como referência padrão e irá determinar a passagem da bolha comparando com esse novo valor. Com isso também é possível usar o mesmo sistema em fluidos diferentes minimizando a necessidade de ajustes dos parâmetros internos do modelo.

A vantagem desta abordagem é a simplificação do circuito físico que nesse caso é responsável apenas pela aquisição do sinal. Desta forma diminui-se possíveis ruídos presentes no sinal proveniente do sensor, fornecendo uma saída de melhor qualidade. Realizando parte das operações em *software* obtém-se um sistema mais versátil possibilitando análises mais elaboradas.

O circuito analógico possui o sensor eletro-resistivo conectado através de uma ponte de *Wheatstone*, e um amplificador de instrumentação, responsável em amplificar e condicionar o sinal para uma placa de aquisição de dados. Optou-se pela configuração em ponte por sua capacidade em rejeitar modo comum, reduzindo ruídos acoplados ao sinal (60Hz da rede, por exemplo).

A placa de aquisição de dados possui canais de entrada analógica com resolução de 12bits e freqüência máxima de amostragem de 100kHz.

O *software* recebe os dados adquiridos e convertidos pela placa de aquisição e através do algoritmo implementado faz a análise desses dados para determinar o estado atual do sensor: se ele está imerso na água ou no ar.

Quando uma bolha de ar passa através do sensor, esta causa uma variação significativa da resistência em relação àquela definida pela água. Isto implica em uma variação na corrente elétrica do circuito. Após a passagem da bolha pela ponta do sensor, a corrente elétrica retorna ao seu valor anterior, pois a resistência do meio retornou ao seu valor inicial. Esta variação da resistência provoca uma variação proporcional da tensão que chega ao amplificador.

O circuito analógico utilizado é apresentado na Fig. 1, onde "Sensor" é a resistência observada pelo sensor eletro-resistivo.

Nota-se que o circuito é de simples construção não requisitando muitos componentes.

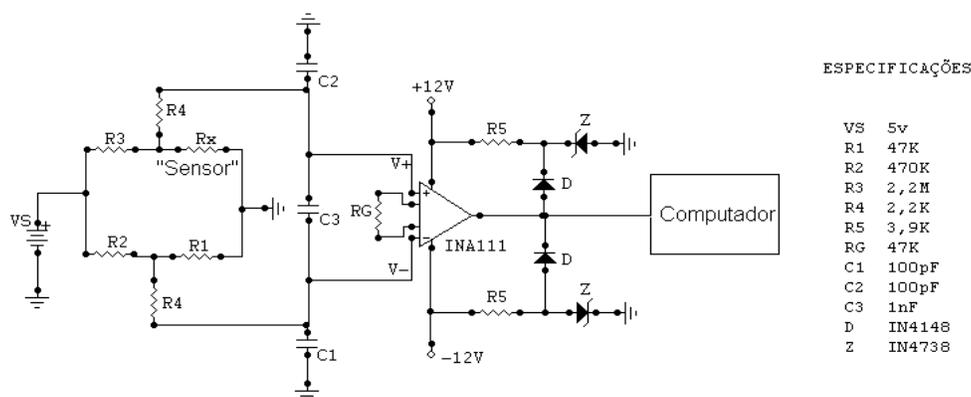


Figura 1. Circuito analógico do sistema de medição

A configuração em ponte é o circuito mais comum utilizado para determinar o valor de uma resistência desconhecida de forma precisa. Como o amplificador apresenta uma alta impedância de entrada, pode-se desprezar suas correntes de entrada, e conseqüentemente a queda de tensão no resistor de ligação, R_4 , assim temos:

$$V_- = \frac{V_S}{R_1 + R_2} R_2 \quad (1)$$

onde V_- é a tensão na entrada negativa do amplificador, R_1 corresponde ao resistor de $47k\Omega$ e R_2 corresponde ao resistor de $470k\Omega$. Como a corrente que passa por esta parte do circuito não passa pela resistência do meio "Sensor", V_- é independente da resistividade do fluido e suas variações.

Analisando pela outra entrada do amplificador temos:

$$V_+ = \frac{V_s}{R_3 + R_x} R_x \quad (2)$$

onde V_+ é a entrada positiva do amplificador, R_3 corresponde ao resistor de $2,2M\Omega$ e R_x corresponde a resistência observada pelo sensor eletro-resistivo.

Em ambos os casos, V_s é a tensão da fonte de alimentação do circuito, com valor de $5V$.

Podemos observar através da Eq. 2 que a tensão diferencial aplicada ao amplificador é dependente da resistência R_x .

Após esse estágio o sinal passa por um filtro passa-baixa (C_1 , C_2 e C_3), essa configuração é recomendada pelo próprio fabricante do amplificador e fornece a seguinte função de transferência:

$$f_{-3db} = \frac{1}{4\pi R_4 \left(C_3 + \frac{C_1}{2} \right)} \quad (3)$$

Essa configuração é importante para garantir a filtragem caso exista um pequeno desbalanço entre as capacitâncias dos capacitores C_1 e C_2 que devem ser de mesmo valor.

A equação do ganho de tensão do amplificador é:

$$G = 1 + \frac{50k}{R_G} \quad (4)$$

onde R_G corresponde ao resistor de $47k\Omega$, neste caso o fator de multiplicação é de aproximadamente 2,1.

O circuito após o amplificador tem o objetivo de garantir que a tensão adquirida pelo computador não ultrapasse os limites da placa de aquisição ($\pm 10V$), definindo o limite máximo de tensão do sinal para $8,9V$ ($8,2V$ do Zener mais $0,7V$ do diodo). A Eq. 5 apresenta o cálculo para a determinação do resistor R_5 .

$$R_5 = \frac{V - V_z}{I_z} \quad (5)$$

onde, V_z é a tensão do diodo Zener ($8,2V$), I_z é a corrente mínima do diodo Zener ($1mA$) e V é a tensão de alimentação aplicada ao resistor ($12V$).

A análise digital foi desenvolvida no ambiente MATLAB/Simulink. O sistema implementado em tempo-real é composto de um filtro passa-baixa e um comparador. A taxa de amostragem definida foi de $1ms$.

A saída do filtro é a referência para a detecção da mudança de fase, ela se ajusta para novos valores de resistividade do meio que possam ocorrer devido a impurezas no meio, uso de outro fluido que não seja a água, etc. O filtro é sintonizado em uma frequência de corte que garanta uma dinâmica lenta, rejeitando componentes harmônicos presentes no pulso originado na mudança de fase. Parte-se da hipótese de que a resistividade do meio varia lentamente com outros fatores que não sejam o escoamento da fase a ser detectada. A posição desse sinal em relação ao sinal analógico é influenciada pela resistividade do fluido e pela quantidade e tempo das mudanças de fase.

O comparador fornece o erro entre o sinal analógico e o sinal de saída do filtro. Se este erro for superior a $0,4$, o sistema identifica o sinal como uma mudança de fase. Este valor, $0,4$, pode ser determinado comparando o sinal do filtro em regime permanente com o valor de pico do ruído observado em um sistema com ou sem mudanças de fase. Mesmo que ocorram mudanças na resistividade do meio, a amplitude do sinal de ruído deve permanecer a mesma.

A medição é comparada com um sistema óptico para auxiliar na identificação do fenômeno durante sua execução. O sistema óptico é composto de uma câmera fotográfica que envia os dados para o computador. Através destes dados temos uma imagem quadro a quadro do que está ocorrendo na região ao redor do sensor podendo assim determinar com qual geometria a bolha atravessou o sensor e sua velocidade.

3. APARATO EXPERIMENTAL

O material utilizado no desenvolvimento deste projeto é de propriedade do Laboratório de Mecânica da Turbulência da Coppe/UFRJ.

O sistema de medição foi desenvolvido usando um tubo de vidro ($76cm$ comprimento e $2,2cm$ de diâmetro interno), conforme apresentado na Fig. 2. A geometria e a velocidade da bolha são ajustadas através do controle da vazão de ar

injetado por uma bomba de ar de baixa vazão. Nesse trabalho, os ajustes de controle de vazão forneceram bolhas com diâmetro próximo ao diâmetro interno do tubo e velocidade próxima a 25m/s.

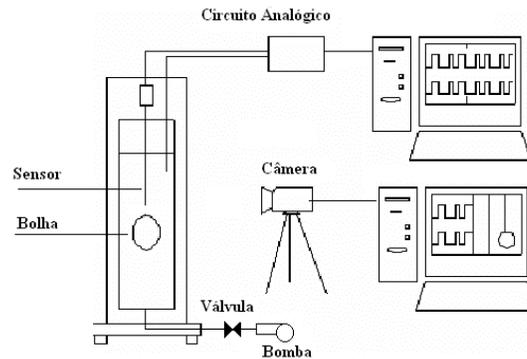


Figura 2: Aparato experimental do sistema de medição

O sensor é composto de agulha de aço inox revestida com material isolante e impermeável (teflon e resina epóxi) deixando apenas a ponta exposta, conforme é mostrado no esquema da Fig. 3. A altura do sensor é definida manualmente para garantir uma geometria uniforme de bolhas. É importante mencionar que tanto a agulha, o tubo e o suporte devem possuir dimensões reduzidas para minimizar a sua influencia no escoamento.

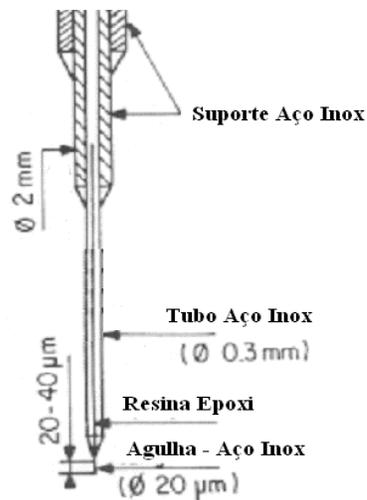


Figura 3: Esquema de construção de sensor

O retorno do circuito do sensor é feito por um fio imerso no tubo de vidro. Para melhorar a condutividade esse fio é fixado em um anel condutor para manter uma constante superfície de contato com o fluido, evitando medidas falsas do sensor.

O tubo com o sensor é apresentado na Fig. 4. Também se observa uma câmera utilizada para comparar as imagens com os resultados obtidos com o sistema de medição. O LED serve para sincronizar a câmera com o circuito. A lâmpada com um difrator melhora a qualidade da imagem adquirida pela câmera.

A Fig. 6 apresenta o gráfico resultante da análise digital, podemos observar o tempo de ajuste do filtro, em torno de 1,5 segundos, a partir desse momento o sistema começa a detectar corretamente a mudança de fase do sistema. Também está destacado o gráfico referente a duas mudanças de fase detectadas pelo sensor, Fig 7, nota-se que existe uma curva de subida, isso se deve ao tempo em que o sensor está secando dentro da bolha de ar. Após a passagem da bolha o sinal decresce quase instantaneamente, pois o sensor está novamente imerso na água.

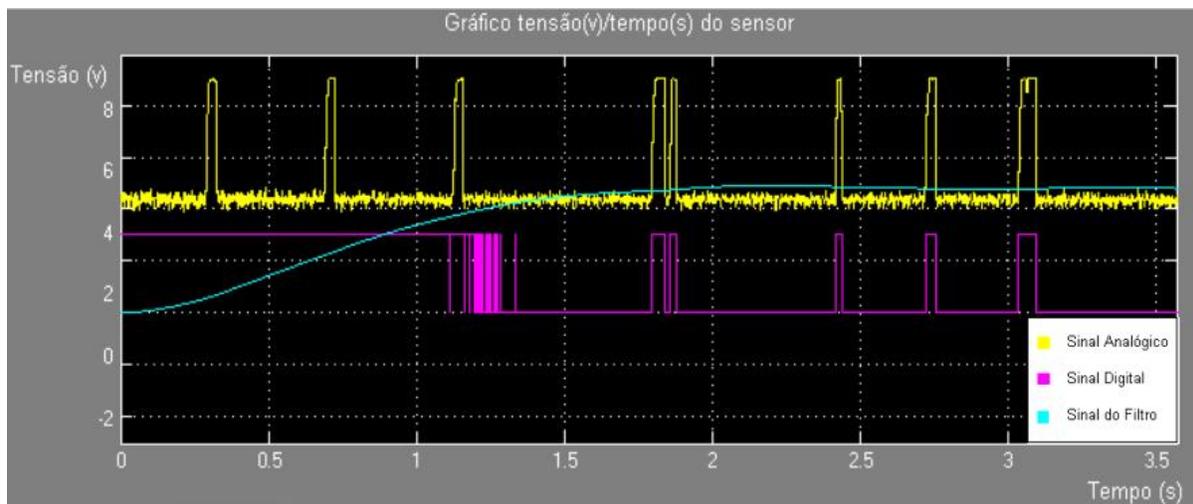


Figura 6. Curvas obtidas a partir do circuito digital

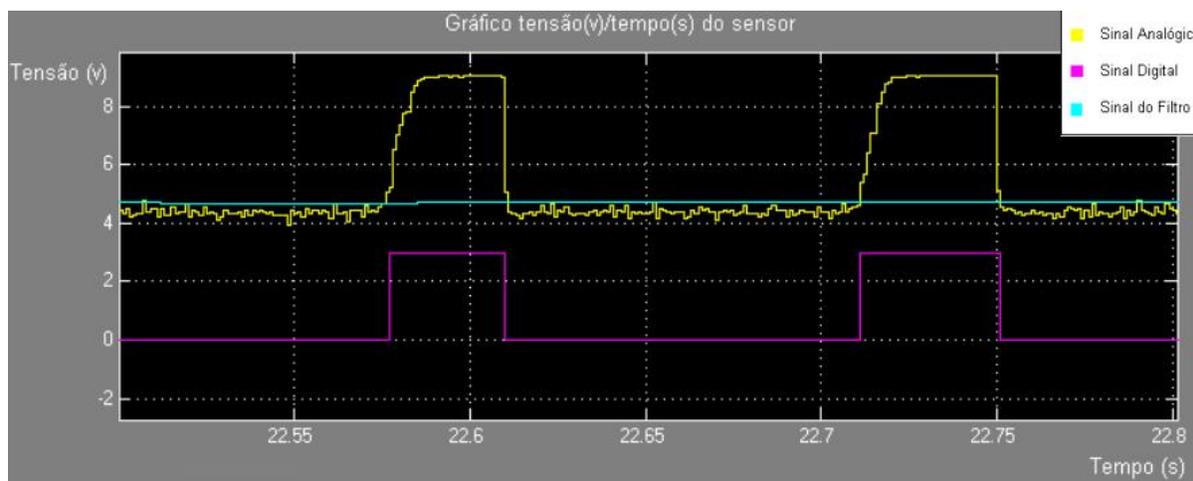


Figura 7. Destaque para a detecção de duas mudanças de fase (bolha)

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um sistema de determinação e medição de fases em fluido multi-fásico utilizando um sistema digital baseado em sensores eletro-resistivos. Neste caso, as fases eram: a água e bolhas de ar. O sistema foi exposto em outros recipientes e com regimes de bolhas diferenciados e verificou-se que o sistema detectou a passagem do ar nesses recipientes. Realizando parte das operações em *software* obtém-se um sistema mais versátil possibilitando análises mais elaboradas.

Este trabalho tem a vantagem de poder ser aplicado em outros fluidos que possuam mais de uma fase se essas fases apresentarem resistências elétricas bem diferentes. O sistema irá se adaptar a nova resistividade natural do meio e detectará a passagem da outra fase.

Em desenvolvimentos futuros será implementada uma análise mais precisa do tempo em que o sensor está imerso no ar através da derivada da diferença entre o sinal analógico e o filtro, pois o sistema atual leva um tempo para determinar a mudança de fase devido à curva inicial do sinal que ocorre em função da secagem do sensor dentro da nova fase. Também será implementado um cálculo em tempo real para a determinação da fração de vazio do meio.

6. AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa experimental foi realizada com o apoio financeiro do CNPq através do Projeto No 472215/2003-5 e pela FAPERJ, Nos. E-26/171.198/2003 e E-26/152.368/2002. SSR e JRE agradecem ao Programa CNPQ/MCT /PROMETRO pela concessão da bolsa MAT-1A e da bolsa MIT-1A, respectivamente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chanson H. and Carosi G.: 2007, Turbulent time and length scale measurements in high-velocity flows open channel flows, Springer-Verlag.
- Devia. F. and Fossa M.: 2003, Design and optimization of impedance probes for void fraction measurements, DITEC.
- Le Corre J. M., Hervieu E., Ishii M. and Delhaye J. M.: 2003, Benchmarking and improvements of measurement techniques for-local-time averaged two-phase flow parameters, DOI.
- Lewis D. A. and Davidson J. F.: 1983, Bubble sizes produced by shear and turbulence in a bubble column, Pergamon Pres Ltd, 38, 161-168.
- P. Andreussi, A.D. Donfrancesco and M. Messina, An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow. *Int. J. of Multiphase Flow* 14 (1988), pp. 777–785.
- Yang H. C., Kim D. K. and Kim M. H.: 2003, Void fraction measurement using impedance method, *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 14, Issues 4-5, August-October 2003, Pages 151-160

8. TERMO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste artigo.