



CIRCUITO ELETRÔNICO PARA SENSORES DE IMPEDÂNCIA DE MÚLTIPLOS ELETRODOS PARA A MEDIÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO

Marcelo S. Rocha

marcelo.rocha@poli.usp.br

José R. Simões-Moreira

jrsimoes@usp.br

Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos (SISEA) - Depto. Eng. Mecânica
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-900, SP, Brasil.

***Resumo.** Neste trabalho são apresentados o método construtivo e a avaliação de um circuito eletrônico gerador de sinais de múltiplas fases defasadas, para aplicação em sensores de medida da fração de vazio em um escoamento bifásico, tipo gás-líquido. Uma análise detalhada do modelo empregado, das funções modulares do circuito, bem como os circuitos eletrônicos e seus componentes são apresentados nesse trabalho.*

***Palavras-chave.** sensores de impedância, fração de vazio, escoamento bifásico.*

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento de parâmetros como a fração de vazio, vazões mássicas de fases e o coeficiente de perda de carga de um escoamento bifásico são essenciais para que se possa caracterizar e também estabelecer o controle em processos em que ocorram. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de se conhecer tais parâmetros (Delhaye et al., 1987). Além disso, muitos trabalhos foram desenvolvidos com o propósito de avaliar o uso de sensores de impedância para a medição da fração de vazio (Merillo et al, 1977; Simões-Moreira, 1989; Xie et al, 1989).

Dentre os diversos tipos de sensores desenvolvidos, os de impedância têm revelado resultados bastante confiáveis para escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido, além de serem técnicas não intrusivas, também possuem tempo de resposta rápido e são de fácil aplicação e de baixo custo (Saiz-Jabardo et al., 1989). Muitas técnicas não intrusivas de medição da fração de vazio em escoamentos bifásicos, que bem servem para o monitoramento da evolução da topologia e a reconstituição do escoamento utilizando técnicas de tomografia, têm sido intensivamente investigadas, motivadas pela aplicação industrial. Os sensores de impedância podem ser do tipo capacitivo ou resistivo. Eles têm como princípio de funcionamento, a relação entre a impedância elétrica do meio bifásico e a fração de vazio do escoamento, sendo que a impedância elétrica é medida através da aplicação de um campo elétrico girante que é aplicado a um ou mais pares de eletrodos que formam o sensor. Neste trabalho, um sensor do tipo resistivo ou de condutância elétrica com quatro pares de eletrodos será analisado. Este tipo de configuração permite que se obtenha uma cobertura maior da área da seção transversal de teste, conseguindo-se, assim, uma melhora na qualidade da sensibilidade do sensor com relação à distribuição e assimetria das fases na seção. A assimetria na distribuição da fração de vazio influencia fortemente a precisão das medidas obtidas.

Transdutores de dois eletrodos produzem um campo elétrico predominantemente unidirecional e transversal a direção do tubo, cuja resposta é dependente da simetria da distribuição da fração de vazio (Simões-Moreira e Saiz-Jabardo, 1988). Sugere-se neste trabalho, a construção de um transdutor de múltiplos eletrodos acoplados a um sistema eletrônico de processamento do sinal, o qual permite impor um campo elétrico girante na seção transversal, diminuindo, assim, a sensibilidade do sensor aos efeitos de simetria já mencionados. A seguir discute-se o princípio de funcionamento do sensor, o circuito eletrônico desenvolvido e resultados preliminares.

2. TRANSDUTOR DE IMPEDÂNCIA DE CAMPO ELÉTRICO GIRANTE

Do ponto de vista construtivo, há pelo menos duas configurações de sensores de impedância. Na primeira configuração, analisada neste trabalho, os eletrodos são instalados rentes à parede do duto e acompanham a curvatura. Essa geometria minimiza ou não induz nenhuma perturbação no escoamento bifásico. Porém, o campo elétrico aplicado não é uniforme. Na segunda configuração, incluem-se os sensores de placas paralelas, placas cilíndricas, concêntricas e outros tipos de geometrias intrusivas. Evidentemente, o que se pode ganhar em uniformidade de campo perde-se em distúrbios provocados no escoamento como, por exemplo, aceleração e eventual mudança de regime, entre outros. Neste trabalho discutem-se o primeiro tipo em que se têm os eletrodos montados junto à parede.

2.1. Esquema de Medição

Em uma tubulação de seção transversal circular, a técnica de campo elétrico girante produz resultados de valores médios da fração de vazio que são menos influenciados pela distribuição de vazio que aqueles obtidos com um campo elétrico não girante, como indicado no trabalho pioneiro de Merilo (1977). O número de eletrodos do sensor de impedância de campo elétrico girante pode ser incrementado para ter medições cada vez menos influenciadas pela distribuição de vazio. Contudo, a partir dos pontos de vista mecânico (eletrodos menores) e eletrônico (grande número de fases) seria mais difícil para construir um sensor com grande número de eletrodos (Tournaire, 1986). Assim, presentemente, um sensor de impedância com quatro pares de eletrodos, alimentado de maneira a gerar um campo elétrico girante, parece ser um sensor de impedância que, numa tubulação de seção transversal circular, reúne boas condições mecânicas e elétricas.

Quatro pares de eletrodos são instalados diametralmente opostos e uniformemente e espaçados ao redor da circunferência do tubo de acordo com a Fig. (1). Quando em operação, os quatro pares de eletrodos são alimentados através de um sinal quadrifásico (Fig. 2a), tal que o sinal para cada eletrodo é defasado de $\pi/4$ (rad.) dos eletrodos adjacentes. Como resultado final, um campo elétrico girante é obtido como se pode observar na Fig. (2b).

Quatro circuitos de medição de impedância idênticos são também conectados aos pares de eletrodos, e os valores absolutos dos sinais desses circuitos serão somados. O sinal resultante é proporcional a impedância ou a média da impedância da mistura, entre os eletrodos dos sensores.

Um segundo sensor, semelhante ao primeiro, também com oito eletrodos, é instalado na tubulação acima do primeiro, tendo como primeira função, a de sensores de referência.

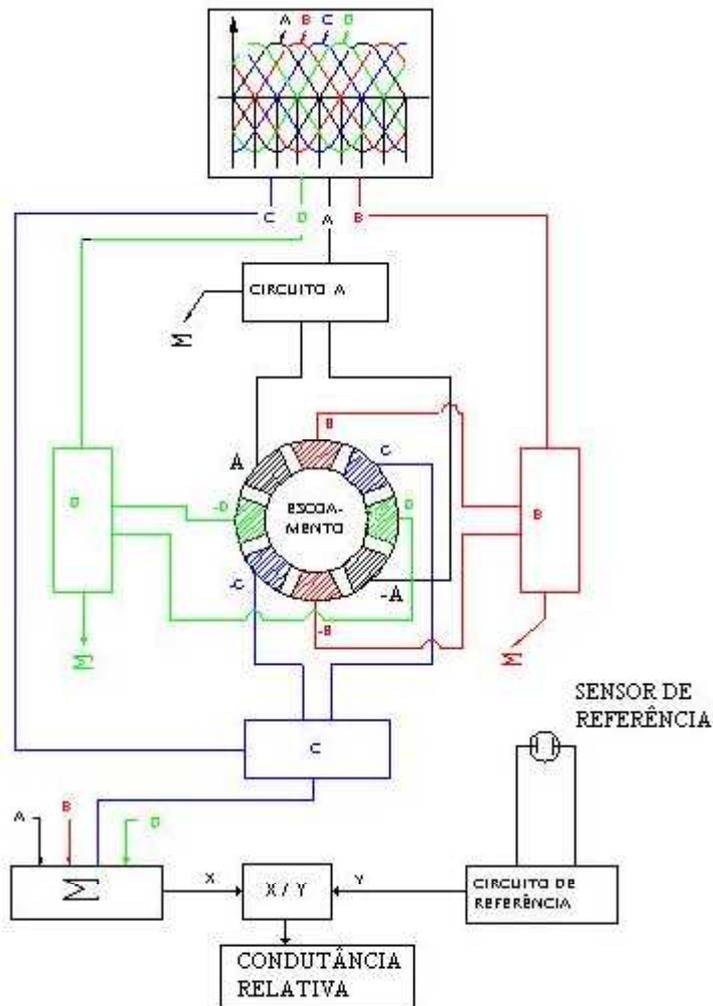
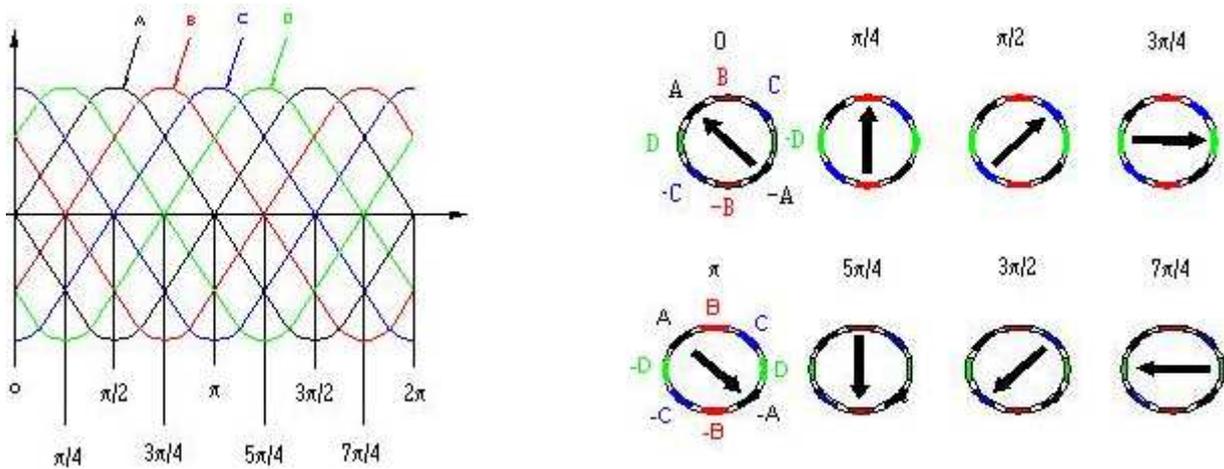


Figura 1. Diagrama esquemático do transdutor de impedância.



(a)

(b)

Figura 2. (a) Sinal quadrifásico, (b) Análise vetorial do campo elétrico girante para 4 pares de eletrodos

2.3. Modelo Elétrico Elementar

A impedância equivalente, Z , do transdutor pode ser considerada como o resultado de dois efeitos elétricos paralelos principais, quais sejam: a resistência e a capacitância do meio bifásico, os quais atuam em paralelo como indicado pelo circuito RC paralelo da Fig. (3). Os efeitos capacitivos são capturados pela capacitância C do meio bifásico enquanto a resistência é indicada por R .

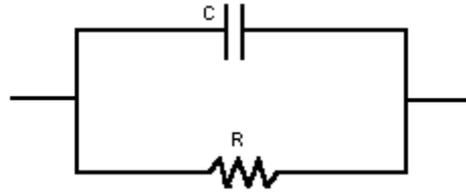


Figura 3. Circuito elétrico equivalente do transdutor de impedância - circuito RC .

De forma geral, os efeitos de eletrodos são desprezíveis para baixas frequências. Esses efeitos ocorrem em função do fenômeno de eletrólise do eletrodo com o meio e, daí, a necessidade de se alimentar o circuito com corrente alternada. Mais especificamente deve-se considerar o material e a substância que formam a interface líquido-eletrodo. Conclusões a esse respeito mostram que tais efeitos são pouco significativos para frequências acima de 50 Hz (Simões-Moreira, 1989), quando se trabalha com um sistema bifásico ar-água e eletrodos de aço inoxidável.

Em vista do exposto, frequências da ordem de 1 kHz devem tornar mínimos os efeitos de eletrodo para este tipo de interface. Assim o modelo elétrico elementar de um circuito RC paralelo pode ser adotado. Com relação ao circuito de medição da Fig. (3), a impedância do mesmo é dada por:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \omega Cj}, \quad (1)$$

sendo ω é a frequência angular, R é a resistência ôhmica do meio bifásico e C é a capacitância do meio bifásico.

E o módulo de Z :

$$|Z| = \left[\left(\frac{1}{R} \right)^2 + (\omega C)^2 \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

Neste ponto cabe a análise cuidadosa da relação acima com a finalidade de delimitar as faixas nas quais o efeito resistivo ou capacitivo predomina, de acordo com a frequência da fonte de excitação:

Na faixa de operação resistiva o efeito elétrico principal é a resistência elétrica do meio. Da Eq. (2), a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\left(\frac{1}{R} \right)^2 \gg (\omega C)^2 \rightarrow \left(\frac{1}{\omega CR} \right)^2 \gg 1, \quad (3)$$

Na faixa de operação capacitiva, da mesma forma, a Eq. (3) é a condição para a qual o efeito da capacitância do meio é preponderante, ou seja:

$$(\omega CR)^2 \gg 1, \quad (4)$$

O produto RC está relacionado com propriedades elétricas do meio por:

$$RC = \frac{\varepsilon}{K}, \quad (5)$$

onde ε é a condutividade elétrica do meio e K é a constante dielétrica do meio. A equação acima é útil, pois estabelece uma relação direta entre as grandezas elétricas médias, quais sejam, as impedâncias resistiva e capacitiva, com as propriedades elétricas correspondentes do meio bifásico, ou seja, a condutividade e constante dielétrica.

Para um escoamento ar-água têm-se os seguintes valores das propriedades elétricas da água (valores obtidos para água potável de distribuição pública): $\varepsilon_0 = 7.10^{-12}$ (A.s/V.cm) e $K_0 = 5.10^{-5}$ (Ω .cm)⁻¹. Na faixa de operação resistivo, a frequência de operação da fonte, f , dever ser tal que obedeça a relação (Eq. 3),

$$f^2 \gg \left(\frac{K_0}{2\pi\varepsilon_0} \right)^2, \quad (6)$$

ou, para a água como a substância que preenche o espaço entre os eletrodos, vem:

$$f^2 \ll \left(\frac{5.10^{-5}}{2\pi.7.10^{-12}} \right)^2 \approx 1,3.10^{12} \text{ ou } f < 110 \text{ kHz.}$$

Analogamente, para a faixa capacitiva, a condição que deve ser obedecida, é $f > 11$ MHz.

3.CIRCUITO ELETRÔNICO

O circuito eletrônico construído na primeira fase do projeto é composto de sete partes essenciais, demonstradas sob a forma de diagrama de blocos e descritas adiante de acordo com sua função.

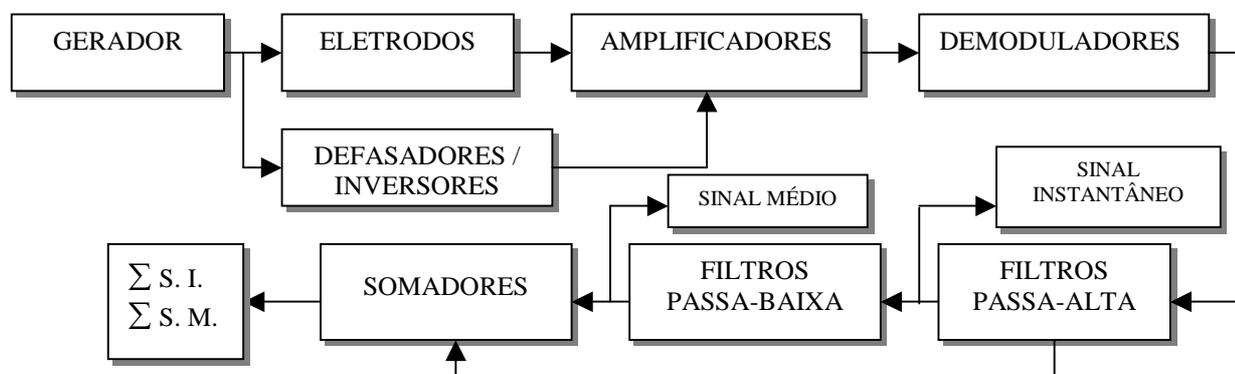


Figura 4. Esquema de blocos para o circuito eletrônico.

3.1. Gerador de Sinais

O conjunto gerador de sinais é composto por um gerador de sinais externo ao módulo construído, da marca HP, modelo 34401A cujo sinal senoidal estável gerado possui amplitude de 3Vpp e frequência de 20 kHz.

Acoplado em série a este conjunto está um circuito seguidor de tensão de ganho unitário (A.O.1), com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, sendo imune a problemas de compensação, cuja função é manter o sinal de saída sempre constante relativo a qualquer variação no sinal de entrada. A tensão de saída E_{01} , é igual à de entrada E_i , tanto em amplitude quanto em fase, representado na Fig. (5).

3.2. Defasador e Inversor

Este circuito é composto por um defasador com ângulo de defasagem θ , para cada par de eletrodos. Como pode ser observado na Fig. (5), o sinal de referência E_{01} é aplicado ao amplificador operacional A.O.2, cuja configuração é a de um circuito defasador, sendo o ângulo de defasagem θ determinado pela relação entre os resistores R_d e C_d , segundo a Eq. (7). Os valores dos resistores R_d para um valor fixo de capacitância ($C_d = 1$ nF, neste caso) podem ser vistos na Tab. (1).

$$R_d = \frac{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2\pi f C_d} \quad (7)$$

Tabela 1. Valores dos resistores R_d para cada ângulo de defasagem e $C = 1$ nF.

Ângulo de Defasagem θ (rad.)	Valor de R_d (K Ω)
0	-----
$\pi/4$	3,278
$\pi/2$	7,810
$3\pi/4$	19,416

O sinal, já defasado do ângulo θ (portadora) é aplicado ao eletrodo emissor, recuperado no eletrodo coletor e aplicado à porta inversora, que funciona como um dos elos de realimentação do amplificador operacional A.O.4. Paralelamente a este sinal existe um circuito inversor com ganho unitário composto pelo amplificador operacional A.O.3, cuja função é gerar um sinal inverso ao sinal de referência E_{01} que, por sua vez será aplicado à entrada não inversora do amplificador operacional A.O.4. Este tipo de configuração determina o efeito de campo elétrico girante, sendo o sinal aplicado a cada par de eletrodos defasado de $\pi/4$ (rad.). A expressão geral de saída do circuito será:

$$E_{02} = -E_{01} \angle -\theta \quad (8)$$

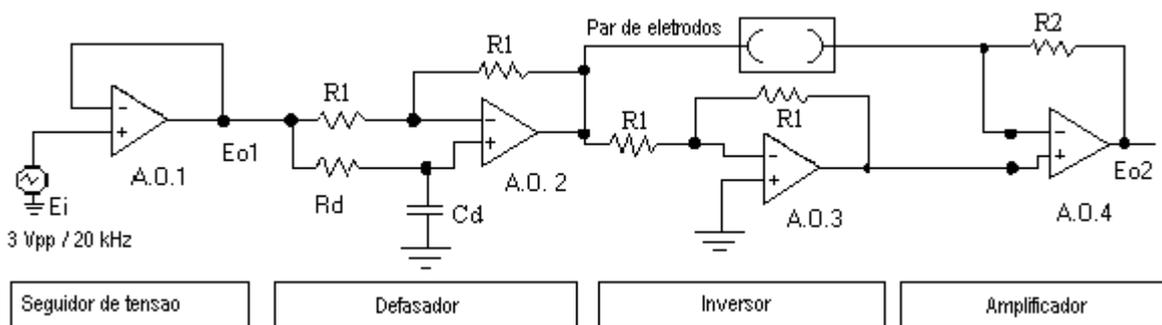


Figura 5. Representação dos conjuntos gerador, defasador, inversor e amplificador.

3.3. Demodulador

O circuito demodulador é composto por um circuito retificador de fase completa de um estágio (A.O.5), onde o componente que se deseja obter do sinal, ΔV_0 , é separado da onda portadora. O amplificador (A.O.6) tem a função de manter o sinal obtido do circuito demodulador (ΔV_0)

constante em um nível de tensão desejável, como se pode ver na Fig. (6). A expressão do sinal de saída do circuito demodulador é dada por:

$$E_{03} = \Delta V_0 \quad (9)$$

3.4. Filtros

O conjunto de circuitos que fazem a filtragem do sinal é formado, basicamente por dois amplificadores operacionais em cascata. O primeiro circuito é composto por uma rede de avanço associada a um amplificador operacional formando um filtro “passa alta” (A.O.7) cuja frequência de corte é $f_1 = 589 \text{ Hz}$ (20 dB/década) definida anteriormente segundo critérios operacionais. O sinal de saída deste estágio é sinal instantâneo (S.I.), sendo um dos sinais coletados e analisados neste trabalho. O segundo circuito é composto por uma rede de atraso associada a um amplificador operacional formando um filtro “passa baixa” (A.O.8) cuja frequência de corte é $f_2 = 58,9 \text{ mHz}$ (20 dB/década), definido anteriormente segundo critérios operacionais. O sinal de saída deste estágio é o sinal médio (S.M.), coletado e analisado no trabalho. O esquema desta etapa do circuito pode ser vista na Fig. (6). A expressão do circuito de filtros é dada por:

$$S.I. = S.M. = \frac{1}{1 - j\left(\frac{1}{\omega_c RC}\right)} \times E_{03} \quad (10)$$

sendo, $\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c$ para um ganho de 0,707.

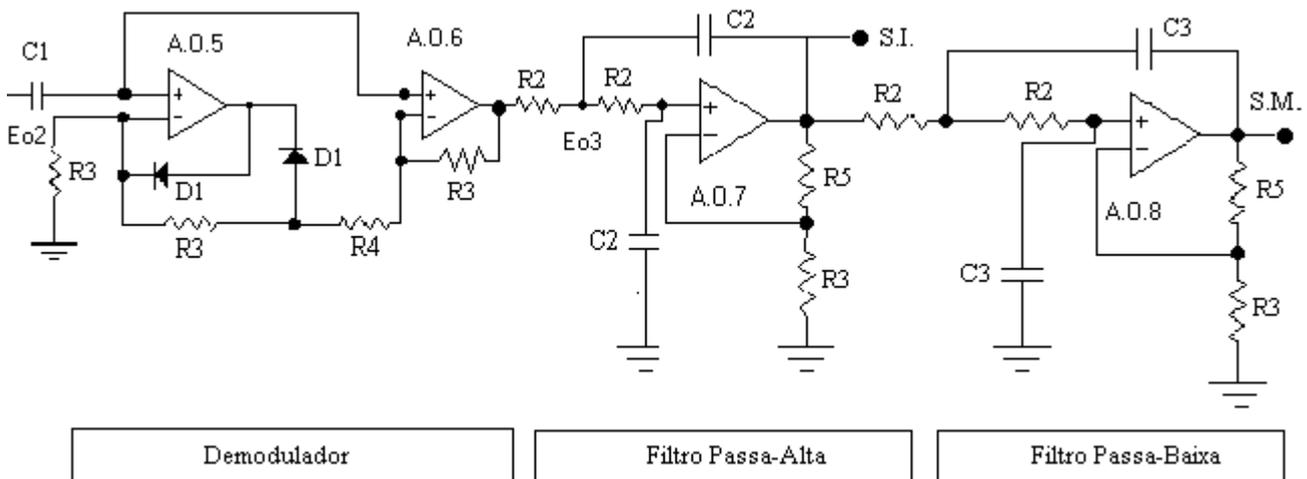


Figura 6. Representação do conjunto de demodulador, amplificador e filtros.

3.5. Somadores

A etapa seguinte é o circuito somador dos sinais provenientes de cada par de sensores. Cada par de sensores gerou dois sinais de saída que são de interesse na composição final do sinal total. Torna-se necessário, agora, promover a soma dos sinais instantâneos e sinais médios gerados por cada par de sensores, compondo assim o sinal total que representa a impedância total associada à fração de vazio global em toda a seção de teste. Os circuitos somadores são compostos por amplificadores operacionais de ganho unitário (A.O.9 e A.O.10) tendo como entrada não inversora, os sinais provenientes dos filtros, quais sejam, sinais instantâneos e sinais médios. Os sinais de saída dos dois circuitos somadores são coletados para análise de relacionamento dos mesmos com a fração de vazio total.

Assim, para cada par de sensores foi construído um circuito composto por todas as etapas apresentadas anteriormente, compondo o circuito geral de geração e condicionamento dos sinais em análise. O esquema do circuito somador pode ser visto na Fig. (7). As expressões finais do circuito somador são dadas por:

$$\Sigma S.I. = S.I.(A) + S.I.(B) + S.I.(C) + S.I.(D) \quad (11)$$

$$\Sigma S.M. = S.M.(A) + S.M.(B) + S.M.(C) + S.M.(D) \quad (12)$$

O mesmo vale para o circuito somador dos sinais médios (S.M.).

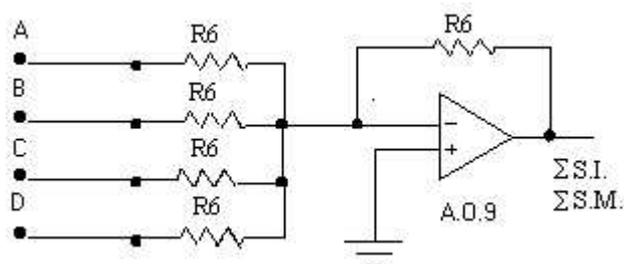


Figura 7. Esquema do circuito somador.

A Tabela (2) apresenta a descrição e respectivos valores dos componentes eletrônicos utilizados neste trabalho.

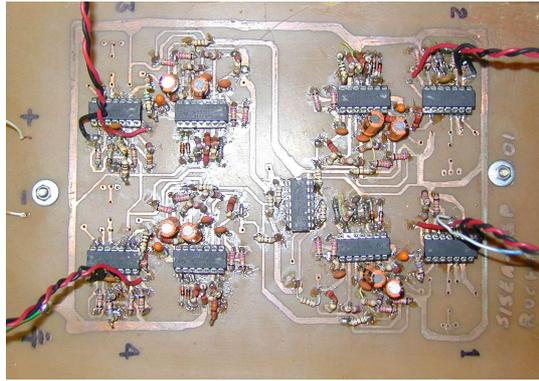
Tabela 2. Lista de componentes utilizados.

Componente	Símbolo	Valor	Observação
Resistor	R1	15 kΩ	Todos 10% 1/8 W
Resistor	R2	27 kΩ	
Resistor	R3	10 kΩ	
Resistor	R4	5 kΩ	
Resistor	R5	5,86 kΩ	
Resistor	R6	1 kΩ	
Capacitor	C1	3,3 μF	Todos de Tântalo
Capacitor	C2	10 nF	
Capacitor	C3	100 μF	
Diodo	D1	1N4148	

A Figura (8) mostra a instalação dos eletrodos na seção de testes e também o circuito eletrônico montado.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Instalação dos eletrodos na seção de testes, (b) Circuito eletrônico montado.

4. RESULTADOS

Os resultados da razão média entre a condutividade adimensional do meio bifásico (K/K_0) e a fração de vazio medida são apresentados na Fig. (9). A condutividade média do meio bifásico (K) e a condutividade média do meio contínuo (K_0) foram obtidos medindo-se tais propriedades através de um osciloscópio (HP 54645A) na saída de sinal médio do circuito.

A fração de vazio foi obtida pela razão entre o volume de gás (ar) na seção de testes e o volume da tubulação encerrado entre duas válvulas de fechamento rápido. Na seção de testes ocorria um escoamento bifásico do tipo ar-água vertical, tendo a água parada e o ar se movimentando.

Os resultados obtidos das curvas de calibração do sensor mostram que o sistema de medição da fração de vazio apresenta duas curvas de calibração aproximadamente lineares bem definidas para cada padrão de escoamento. Os resultados obtidos neste trabalho são bastante satisfatórios com relação à geração e demodulação dos sinais através do sensor de múltiplos eletrodos. Saídas de sinais instantâneos também foram analisados e se mostram compatíveis com a passagem dos pistões de gás no regime pistonado.

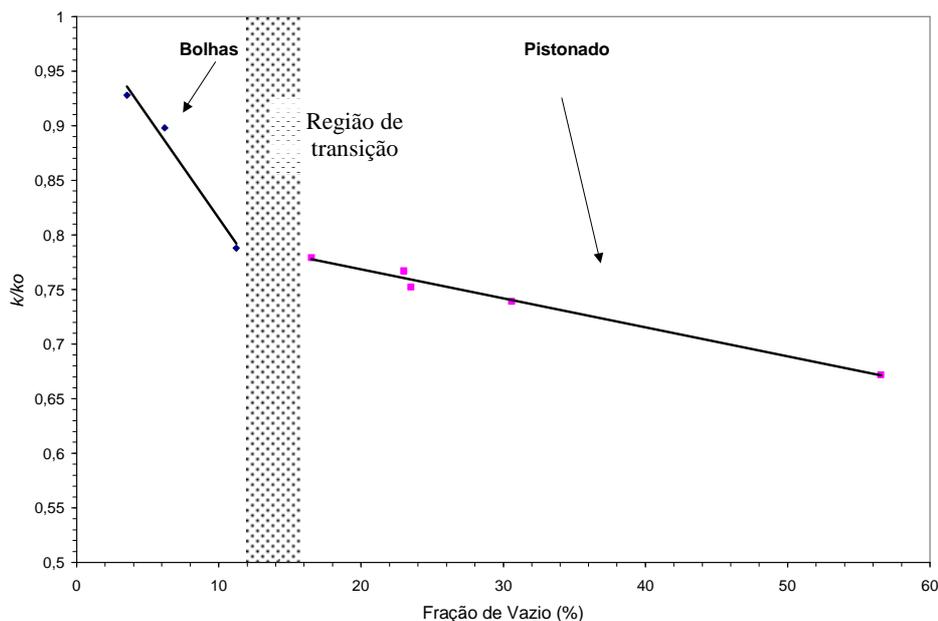


Figura 9. Curva de calibração do sensor para fração de vazio menor que 60%.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho apresentaram-se os detalhes do circuito eletrônico para alimentar um sensor de impedância de múltiplos eletrodos para a medida da fração de vazio. A técnica de múltiplos eletrodos apresentada neste trabalho proporciona uma varredura da seção transversal do escoamento bifásico, aumentando, assim, a qualidade do sinal coletado pelo sensor, permitindo, ainda, que se possa aplicar as técnicas de reconstrução tomográfica da imagem do escoamento bifásico em tempo real.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro (97/12623-8). O primeiro autor agradece ao suporte pessoal da Fundação Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o segundo autor agradece ao CNPq pelo suporte pessoal .

7. REFERÊNCIAS

- Delhaye, J.M., Favreau, C., Saiz Jabardo, J.M. & Tournaire, A., 1987, Experimental Investigation on the Performance of Impedance Sensors of Two and Six Electrodes, 24th ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, USA.
- Merilo, M., Dechene, R.L. & Cichowlas, W.M., 1977, Void Fraction Measurement with Rotating Electric Field Conductance Gauge, Journal of Heat Transfer, Vol. 99 .
- Simões-Moreira, J. R., 1989, Transdutor de Impedância para a Medida da Fração de Vazio, Dissertação de Mestrado, Departamento de Enga. Mecânica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 125p.
- Simões-Moreira, J.R. & Saiz-Jabardo, J.M., 1988, Transdutor de Impedância para a Medida da Fração de Vazio, II Encontro Nacional de Ciências Térmicas, São Paulo, Brasil.
- Tournaire, A., 1986, Dependence of the instantaneous response of impedance probes on the local distribution of the void fraction in a pipe, International Journal of Multiphase Flow, Vol.12, No. 6, pp. 1019-1024.
- Xie, C.G., Plaskowski, A. & Beck, M.S., 1989, 8-Electrode Capacitance System for Two-Component Flow Identification, Part 1 and Part 2, IEE Proceedings, Vol. 136, No. 4, pp.173-190.

ELECTRONIC CIRCUIT FOR MULTIPLE ELECTRODS IMPEDANCE SENSOR FOR VOID FRACTION MEASUREMENTS

Marcelo S. Rocha

marcelo.rocha@poli.usp.br

José R. Simões Moreira

jrsimoes@usp.br

SISEA - Escola Politécnica - University of São Paulo
2231, Prof. Mello Moraes Ave., 05508-900, SP, Brazil.

Abstract. It is presented the constructive method and the evaluation of a electronic circuit for an impedance sensor of multiple electrodes. A detailed analysis of the functions of the modular circuits as well as their components are presented.

Keywords. impedance sensor, void fraction, multiphase flow