

## DESCRIÇÃO DE ALGUMAS TÉCNICAS UTILIZADAS NA MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO

O texto a seguir foi extraído da dissertação de mestrado de Matheus Fontanelle Pereira (Pereira, 2006).

A medição da fração de vazio é um procedimento importante para a caracterização do escoamento, seja no meio industrial ou em laboratório. Várias técnicas foram desenvolvidas para a realização dessa tarefa. É difícil dizer qual técnica é a melhor, pois dependendo da sua aplicação uma pode levar mais vantagens do que a outra. De forma geral, as técnicas são classificadas em intrusivas e não-intrusivas.

### 1. Técnicas intrusivas

As técnicas intrusivas caracterizam-se pelo fato de os eletrodos ou sensores estarem em contato direto com o fluido causando, conseqüentemente, perturbações no escoamento. O instrumento detector de fases age como uma sonda (“*probe*”) no interior do escoamento, fornecendo informações precisas sobre a variação do vazio local, Chanson (2002). A sonda intrusiva pode ser projetada para operar segundo o princípio óptico, sensível à refração dos fluidos, ou segundo o princípio condutivo/resistivo, sendo sensível à condutividade elétrica dos fluidos. Em geral, o diâmetro da sonda é menor que 1 mm, Auracher e Marroquin (1989), Dias et al. (1998) e Chanson (2002). A Fig. 1 mostra o esquema de uma sonda elétrica, sendo o fio de cobre e o tubo de aço-inox, os eletrodos.

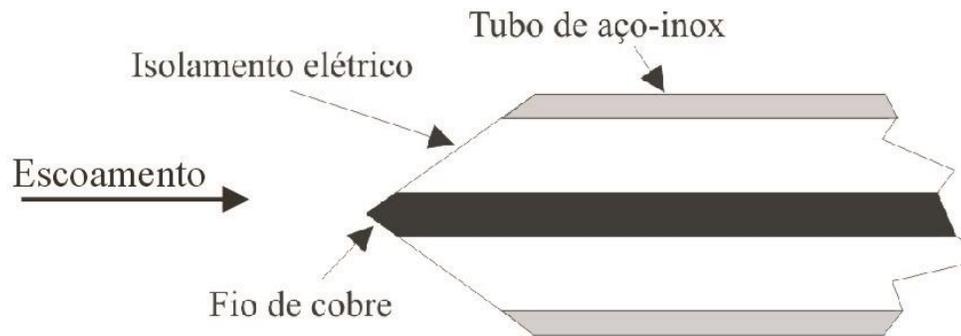


Figura 1 – Esquema de uma sonda intrusiva elétrica.

## 2. Técnicas não-intrusivas

Ao contrário das técnicas intrusivas, as técnicas não-intrusivas possuem a vantagem de não perturbar o escoamento e também podem ser caracterizadas como não-invasivas pelo fato dos sensores não atravessarem a parede da tubulação.

### *Atenuação radioativa*

Esta técnica consiste na emissão de um feixe de raios eletromagnéticos de alta intensidade sobre um objeto e medição da atenuação da intensidade do feixe após atravessar o objeto. A intensidade de um feixe de raios que atravessa um meio homogêneo,  $I$ , é regido pela *Lei de Beer-Lambert*

$$I = I_0 e^{-\rho \mu z} \quad (1)$$

onde  $I_0$  é intensidade do feixe incidente,  $\rho$  é a massa específica do meio,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação de massa e  $z$  é a distância percorrida pelos raios dentro do meio. No caso da aplicação do feixe de raios sobre uma tubulação com escoamento bifásico, a atenuação dos raios é proporcional à fração de vazio que os raios encontram quando atravessam o tubo. Em uma tubulação, é medida a intensidade do feixe com o tubo contendo somente líquido,

$I_l$ , e contendo somente gás,  $I_g$ . Considerando-se uma tubulação horizontal de seção quadrada contendo um escoamento com regime estratificado e onde o feixe de raios está disposto na posição vertical, a intensidade  $I$  medida pode ser relacionada com a fração de vazio da seguinte forma, Whalley (1987)

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_l}\right)}{\ln\left(\frac{I_g}{I_l}\right)} \quad (2)$$

e se o feixe de raios estiver na posição horizontal, a relação fica

$$\alpha = \frac{I - I_l}{I_g - I_l} \quad (3)$$

Isso indica que a interpretação da intensidade medida depende da distribuição das fases. Por isso, é comum a utilização de detectores em diferentes posições, como mostra a Fig 2, de forma que se possam obter valores médios da fração de vazio em qualquer regime, além da identificação do padrão de escoamento.

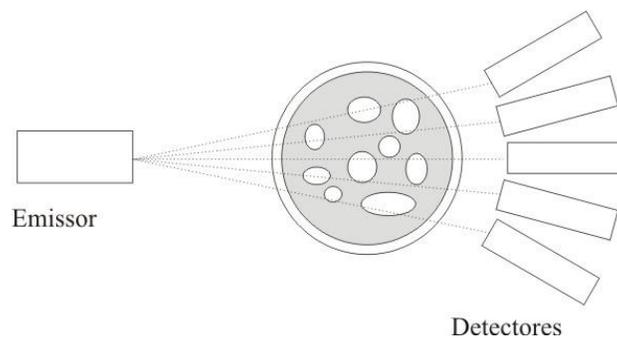


Figura 2 – Esquema do sistema de medição.

Os tipos de feixe de raios eletromagnéticos mais utilizados são os raios X e raios gama. Os raios X e gama são idênticos do ponto de vista físico, porém diferem na forma que são produzidos e no nível energético, sendo os raios gama de maior intensidade. A utilização dos raios gama implica em um aumento dos cuidados com segurança, apesar de empregar equipamentos mais compactos e versáteis dos que utilizam raios X, Duarte (1999).

### ***Ultra-som***

A técnica de ultra-som é empregada comumente em escoamentos horizontais estratificados atuando como um medidor de nível. O sistema com ultra-som funciona basicamente como medidor de nível. Ondas ultra-sônicas são emitidas e refletidas pela interface líquida-gás, a posição da interface é determinada pelo cômputo da velocidade de propagação e tempo entre emissão e retorno das ondas, Duarte (1999). Uma vez determinada a posição da interface, a fração de vazio é calculada por relações geométricas. Este não é indicado para escoamentos borbulhados, Chang e Morala (1990), apud Duarte (1999).

### ***Impedância elétrica***

Outra técnica bastante empregada para a determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos é a de impedância elétrica que consiste na medição da impedância do meio bifásico por meio de um sistema de eletrodos e processamento de sinal. Como, de forma geral, os líquidos possuem propriedades elétricas distintas dos gases, as impedâncias das fases líquida e gasosa são determinadas separadamente, e então a impedância intermediária de uma mistura líquida-gás pode ser correlacionada com a fração volumétrica, eq. (4). No caso da frequência de alimentação do sistema ser bem superior a frequência de passagem das bolhas entre os eletrodos, pode-se assumir que a medição é instantânea e, portanto, considerar que a mistura entre os eletrodos representa uma fração de vazio média integrada ao longo de um trecho de tubulação, que compreende o comprimento dos eletrodos, eq. (5).

$$\beta = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (5)$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha dz \quad (6)$$

onde L é o comprimento dos eletrodos. Para o caso onde os eletrodos estão em contato direto com o fluido, se este for condutor, a característica da impedância pode ser essencialmente resistiva ou capacitiva, dependendo da frequência de operação. Para frequências de 1 – 100 kHz, a impedância é tipicamente resistiva, enquanto que para frequências acima de 100 kHz é capacitiva, Elkow e Rezkallah (1996).

### *Válvulas de fechamento rápido (VFR)*

A técnica de válvulas de fechamento rápido (VFR) pode ser considerada a mais simples e direta para a determinação da fração de vazão. Após o fechamento simultâneo das válvulas, a razão entre os volumes de líquido e de gás aprisionados no trecho de tubulação entre as válvulas pode ser usada para determinar a fração de vazão, Whalley (1987). Se o tempo de fechamento das válvulas for menor que o inverso da frequência de passagem das bolhas pela válvula, as eqs. (5) e (6) também são válidas para este método.



Figura 3 – Esquema do sistema de válvulas de fechamento rápido.

## ***Tomografia***

A tomografia é uma técnica radiográfica que permite a determinação da distribuição dos componentes internos do objeto inspecionado. Na tomografia o elemento emissor de radiação gira  $360^\circ$  em torno da região do corpo a ser estudada e a imagem obtida é tomográfica ou seja “fatias” da região do corpo estudada são obtidas. Em oposição ao feixe de radiação emitida tem-se um detector de radiação que gira concomitantemente ao elemento emissor. As características das imagens vão depender da atenuação do feixe radiativo que passa através do objeto em estudo. Para a formação da imagem de tomografia a emissão do feixe radiativo é feita em diversas posições, posteriormente, as informações obtidas são processadas utilizando uma técnica matemática chamada de projeção retrógrada, ou outras, como a transformada de Fourier. Um tomógrafo é formado por um tubo sobre o qual há um anel que estão localizados em posições opostas o emissor do feixe radiativo e os detectores, sendo que este conjunto gira  $360^\circ$  para a obtenção da imagem. A aplicação do método tomográfico pode ser realizado com o emprego de fontes de radiação de natureza diferentes como raios X, raios gama, radiação acústica e formação de campos elétricos. É importante destacar que as técnicas apresentadas como atenuação radioativa, fornecem apenas um valor médio da fração de vazio, enquanto que estas técnicas, quando aplicadas à tomografia, possibilitam a reconstrução da distribuição das fases no interior do tubo.

## **ANEXO: DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL**

Neste capítulo será feita a descrição da bancada experimental, de seus principais subsistemas e da instrumentação. Especial atenção será dada ao projeto do medidor de fração de vazio e aos resultados da sua calibração.

### **A.1. Descrição geral**

A bancada experimental tem a função de propiciar o escoamento bifásico a ser estudado. Esta bancada proporciona uma mistura de ar e de água nas proporções desejadas, possibilitando a operação em diferentes regimes de escoamento. A água opera em um circuito fechado, enquanto que o ar é fornecido por uma linha de ar comprimido e rejeitado para a atmosfera na separação das fases, no tanque de armazenamento de água. Um esquema e a fotografia são mostrados nas Fig. A.1 e A.2, respectivamente. A água é succionada do tanque (1) pela bomba centrífuga (2), passando por um dos rotômetros (3), onde é medida a vazão de água antes de passar pelo misturador (7). O ar, fornecido pela linha de ar-comprimido (4), é tratado por um sistema (5) composto por filtro, válvula redutora de pressão e válvula reguladora de pressão, e posteriormente sua vazão é medida por rotômetros (6) antes de ser injetado no misturador (7). Após a mistura do ar e da água, em (7), o escoamento bifásico vai para a seção de teste (8) onde são realizadas as medições de pressão, pelos transdutores (10), localizados a montante e a jusante e na garganta do venturi, e da fração de vazio, pelo sensor de impedância (9).

A água é movimentada por uma bomba centrífuga de 2,0 CV, capacidade de 15 m<sup>3</sup>/h a 30 mca. A bomba é da marca SCHNEIDER série BD 92S-GB. A vazão de água é regulada pela variação da rotação do rotor da bomba, cujo motor de acionamento elétrico é controlado por um inversor de frequência. O inversor de frequência é da marca WEG, modelo ML-4.0/1AC.200-240.

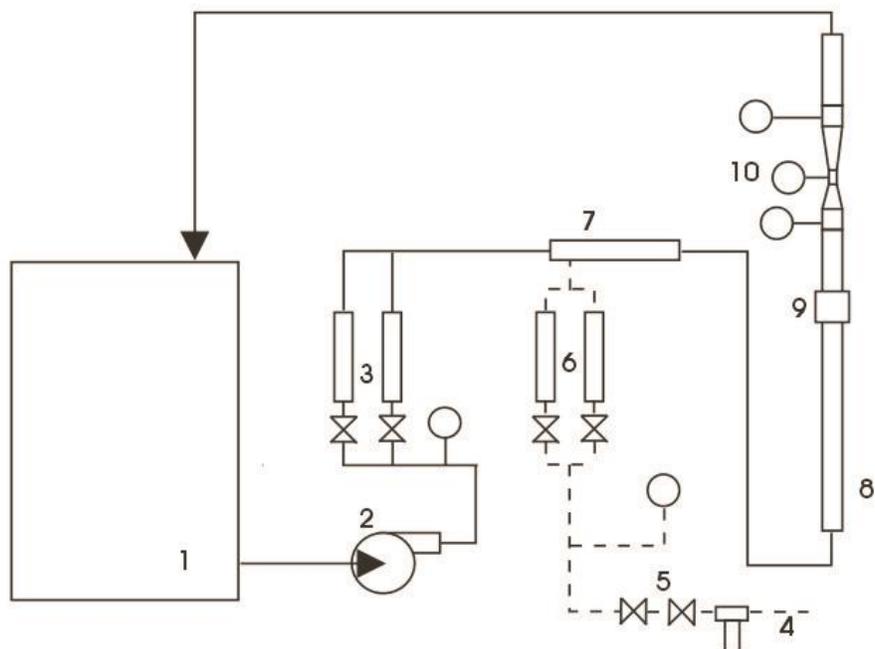


Figura A.1 – Esquema de funcionamento da bancada experimental: 1-tanque de água, 2-bomba centrífuga, 3-rotômetros de água, 4-linha de ar comprimido, 5-válvulas e filtro, 6-rotômetros de ar, 7-misturador, 8-seção de teste, 9-MFV, 10-transdutores de pressão.



Figura A.2 – Fotografia da bancada experimental.

A vazão de ar é suprida por uma linha de ar comprimido cuja pressão nominal é de 8 bar. Antes de o ar ser injetado no sistema, ele passa por um sistema de filtro de ar, válvula redutora de pressão e válvula reguladora de pressão, o qual mantém a pressão de ar a montante dos rotômetros em 2 bar, uma vez que os rotômetros foram calibrados nesta pressão. O filtro de ar, a válvula redutora de pressão e a válvula reguladora de pressão são da marca FESTO.

Após a medição das vazões individuais, o ar e a água são direcionados ao misturador, onde ocorre a formação do escoamento bifásico. Este misturador consiste de uma lança injetora de ar através da parede perfurada, introduzida axialmente na tubulação de água, como é mostrado no detalhe da figura abaixo.

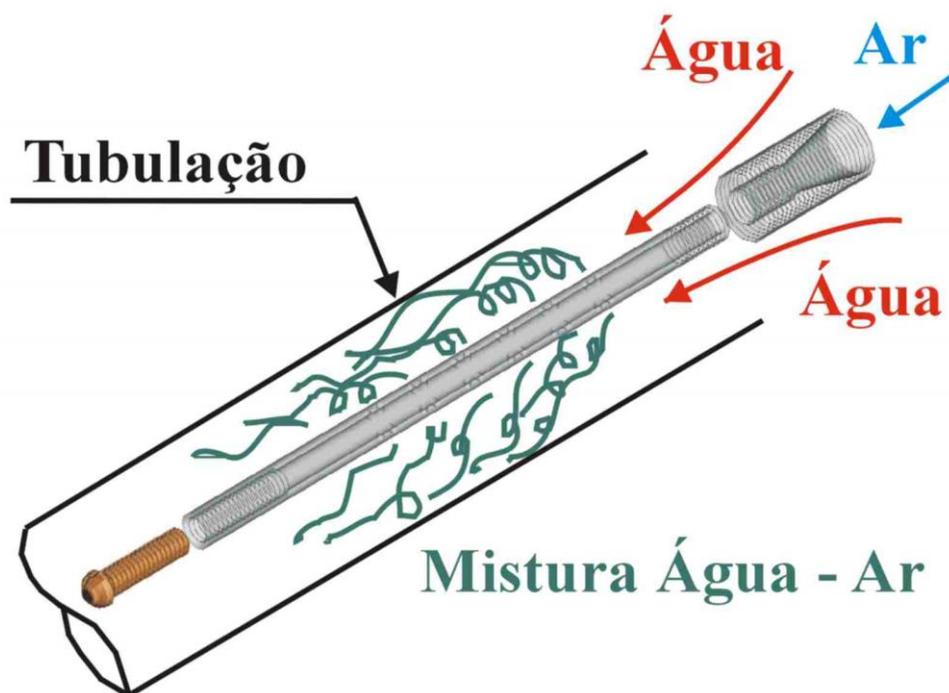


Figura A.3 – Esquema do misturador.

### 3.2. Seções de teste

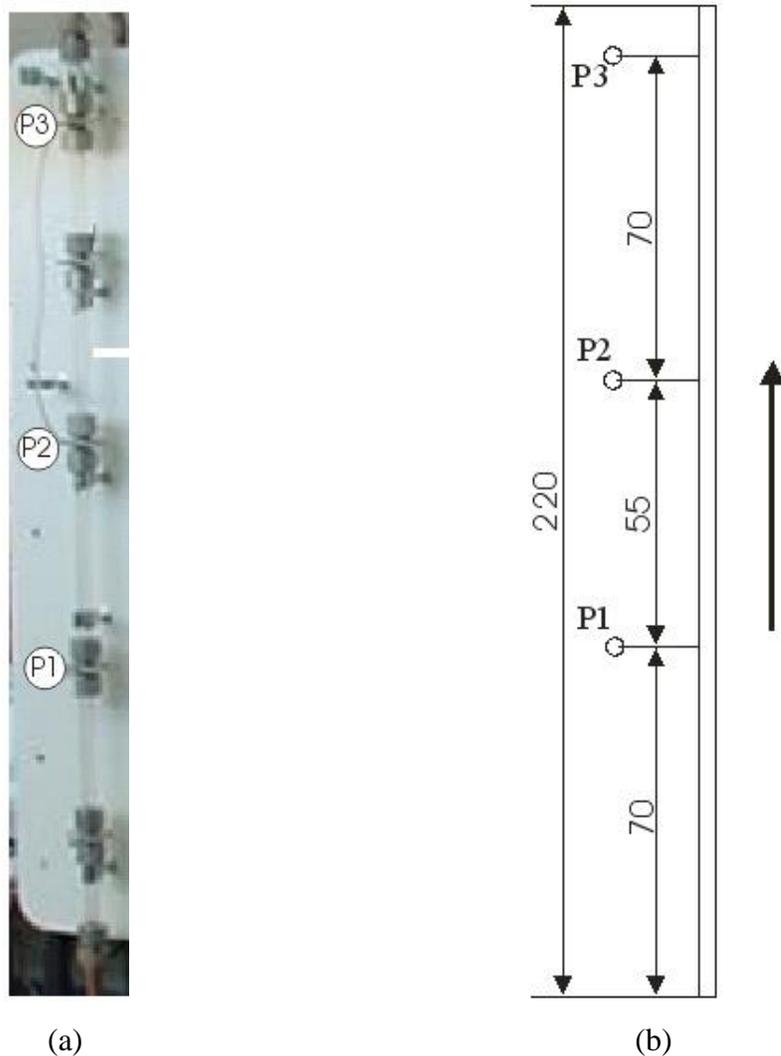


Figura A.4 – Seção de teste tubo liso de seção reta, (a) fotografia e (b) esquema, medidas em cm.

Depois da mistura das fases, o escoamento é direcionado para a seção de teste. Uma das vantagens desta bancada experimental é a multiplicidade das seções de teste. Há a possibilidade de trabalhar-se com seções de teste nas posições horizontal e vertical. As seções de teste podem ser equipadas ainda, em qualquer posição, com tubo venturi ou com placa de orifício, além do tubo liso de seção reta. No entanto, neste trabalho optou-se por trabalhar apenas com seção de teste na posição vertical e equipada com tubo venturi e com o tubo liso de seção reta. A seção de teste de tubo liso é constituída de um tubo de acrílico e

com diâmetro interno de 21 mm. O posicionamento das tomadas de pressão estão mostrados na Fig. A.4, indicados por P1, P2 e P3. A seção de teste com tubo venturi é comportada por um tubo de acrílico com 21 mm de diâmetro interno. Nesta seção de teste também foi implementado um medidor de fração de vazio (MFV), o qual será discutido com detalhes na seção posterior. O posicionamento do medidor de fração de vazio, do tubo venturi e das tomadas de pressão podem ser vistas na Fig. A.5.

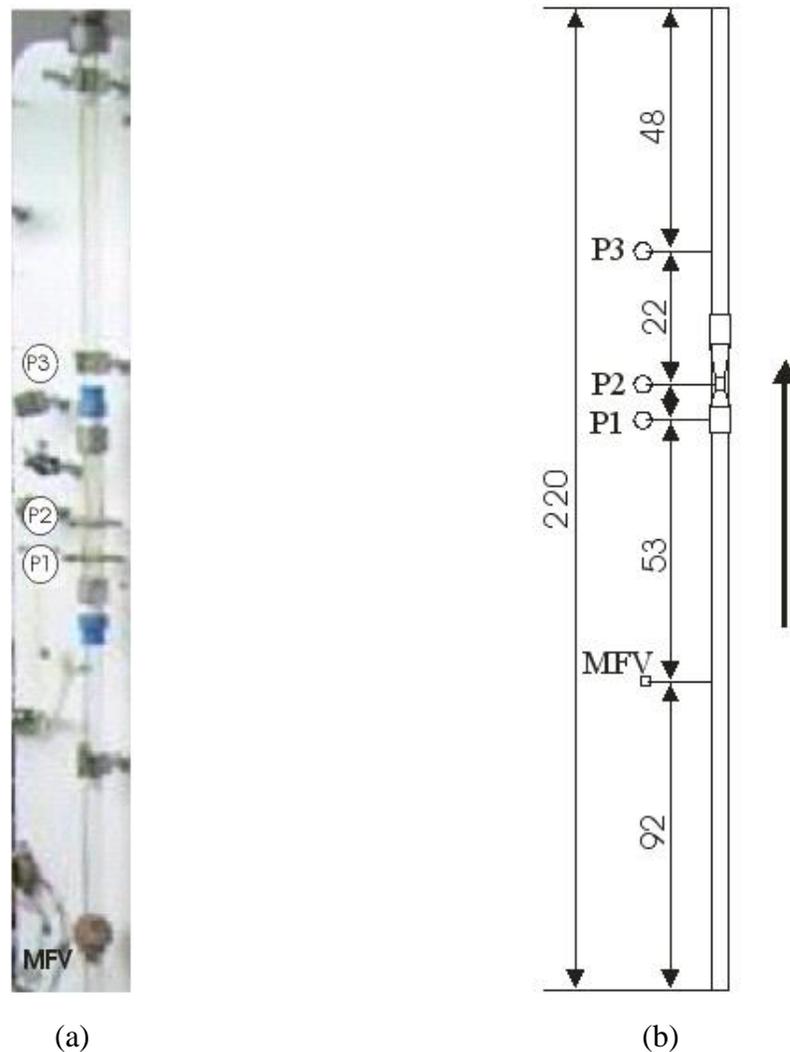


Figura A.5 – Seção de teste tubo Venturi, (a) fotografia e (b) esquema. Medidas em cm.

O tubo venturi utilizado foi fabricado em acrílico, para possibilitar a visualização do escoamento e de acordo com a NBR ISO 5167-1. As dimensões do tubo venturi e também os detalhes das tomadas de pressão estão mostradas nas Fig. A.6 a A.8.

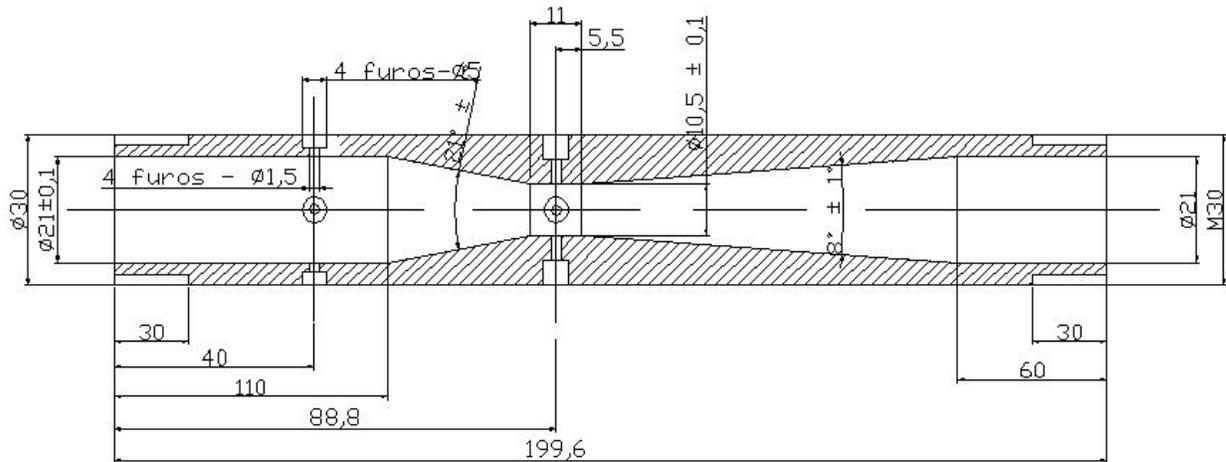


Figura A.6 – Desenho do tubo Venturi, segundo a norma ABNT 5167-1, medidas em mm.

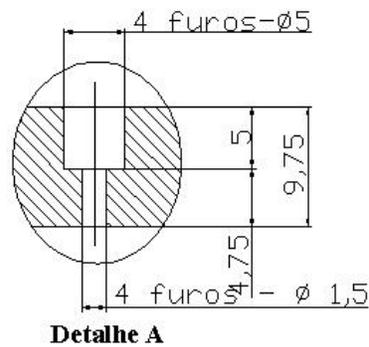


Figura A.7 – Detalhe da tomada de pressão, medidas em mm.

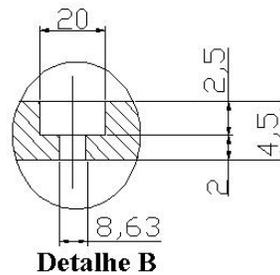


Figura A.8 – Detalhe da tomada de pressão, medidas em mm.

### A.3. Instrumentação

Os instrumentos da bancada experimental são compostos de transdutores de pressão, manômetros, rotâmetros e medidor de fração de vazio. Dois manômetros encontram-se instalados a montante dos rotâmetros de ar e de água para o monitoramento das pressões. São manômetros padrão, e operam na faixa de 0 a 7 bar e apresentam erro máximo de 2%.

As medições das pressões nas seções de teste são realizadas por três transdutores de pressão absoluta. No caso da seção de tubo de seção reta, os transdutores são instalados ao longo da tubulação, conforme Fig. A.4, enquanto que na seção com tubo venturi, eles são instalados na entrada, na garganta e na saída do tubo venturi, conforme Fig. A.5. Os transdutores de pressão são da marca OMEGA, modelo PX302, com faixa de operação de 0 a 345 kPa (0 a 50 psi) e sinal de saída proporcional de 0 a 100 mV. De acordo com o fabricante, os transdutores apresentam erro de até 1,5% do valor medido.



Figura A.9 – Transdutor de pressão.

As medições das vazões individuais de ar e de água foram realizadas por rotâmetros das marcas CONAUT, GEMÜ E APPLITECH. Para cobrir uma faixa maior de vazões de operação, os rotâmetros foram instalados em paralelo, como mostra a figura a seguir. Todos os rotâmetros, de acordo com a especificação dos fabricantes, possuem erro máximo de 2% sobre o fundo de escala (FE).



Figura A.10 – Rotômetros para água (à esquerda) e para ar (à direita).

Conforme o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, as incertezas de medição dos instrumentos foram avaliadas. Como as informações sobre o erro dos instrumentos são conhecidas *a priori*, aplica-se o método de avaliação da incerteza do Tipo B, Anexo II (não apresentado neste resumo). A Tabela A.1 apresenta os resultados da avaliação das incertezas dos instrumentos.

Tabela A.1 - Faixa de operação e incertezas correspondentes dos instrumentos de medição.

<b>Instrumento</b>	<b>Faixa de operação</b>	<b>Incerteza de medição</b>
rotâmetro água	0,15 – 1,6 [m <sup>3</sup> /h]	1,15% (FE)
rotâmetro água	1,0 – 10,0 [m <sup>3</sup> /h]	1,15% (FE)
rotâmetro ar	0,3 – 3,0 [m <sup>3</sup> /h]	1,15% (FE)
rotâmetro ar	2,0 – 10,0 [m <sup>3</sup> /h]	1,15% (FE)
rotâmetro ar	9,0 – 84,0 [m <sup>3</sup> /h]	1,15% (FE)
transdutores de pressão (abs.)	0 – 3,4 [bar]	0,87% (FE)
manômetros	0 – 7,0 [bar]	1,15% (FE)

A abreviatura FE significa *fundo de escala*.

## **A.4. Medidor de fração de vazio**

### **A.4.1. Projeto e instalação**

O princípio de funcionamento do sensor de fração de vazio está baseado na variação da impedância elétrica entre os eletrodos. Como as propriedades elétricas do ar e da água são bastante distintas, suas respectivas impedâncias também o serão, caso haja somente uma das fases entre os eletrodos. Portanto, com uma mistura de fases entre os eletrodos, a impedância terá um valor intermediário aos limites monofásicos que será função da composição da mistura.

As propriedades elétricas mais importantes que influenciam o valor da impedância em um determinado sistema são a constante dielétrica ( $\epsilon$ ) e a condutividade ( $\sigma$ ). Resultados de medições da condutividade elétrica da água da rede e de água destilada são encontrados no Anexo IV (NÃO APRESENTADO NESTE RESUMO). Através da aplicação do grupo adimensional  $\omega\epsilon/\sigma$ , onde  $\omega$  é a velocidade angular do sistema de alimentação, podemos identificar qual efeito elétrico é o dominante para a sensibilidade do sensor. Considerando que a frequência de operação escolhida é  $\omega/2\pi = 500$  kHz e para a água  $\epsilon = 80.8,854.10^{-12}$  F/m e  $\sigma = 0,00106$  S (Siemens), obtém-se  $\omega\epsilon/\sigma = 2,1$ . Como este valor está próximo da unidade, isso quer dizer que tanto o efeito resistivo, como o capacitivo influenciam na impedância do sistema.

O sensor é formado por dois eletrodos finos de cobre dispostos opostamente e colocados na superfície interna do tubo, estando desta forma, em contato direto com a mistura bifásica. Os eletrodos são fitas adesivas de cobre com espessura de 0,1 mm e dimensões de 18 x 35 mm.

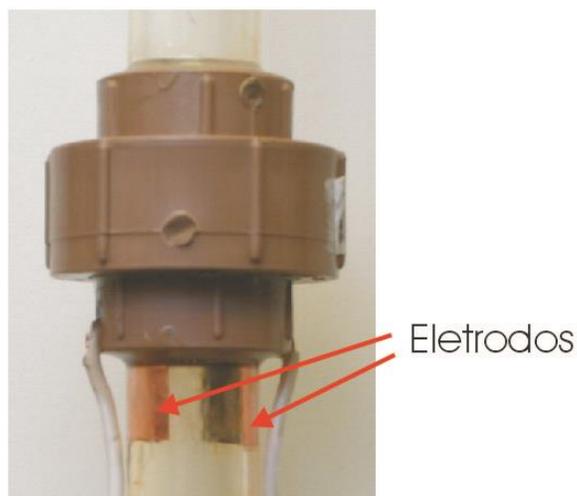
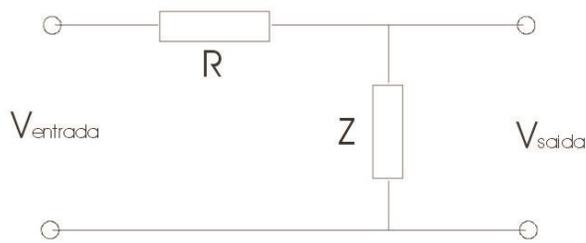


Figura A.11 – Eletrodos de cobre instalados.

Para a impedância entre os eletrodos ser detectada, um circuito eletrônico foi desenvolvido. A concepção básica é a de um circuito RC (resistor-capacitor), Fig. A.12(a), onde o sensor está posicionado no lugar do capacitor e é representado por  $Z$ , que indica a sua impedância elétrica. O sinal de entrada do circuito RC é fornecido por um gerador de função, o qual estabelece uma onda senoidal com tensão de 5,0 Vpp (pico-a-pico) e uma frequência de 500 kHz. O gerador de função é da marca MINIPA modelo MFG-4202 e opera entre 3 e 3000 kHz, com formatos de onda senoidal, triangular ou quadrado. O sinal de saída do circuito RC é capturado por um circuito de processamento do sinal. O objetivo do circuito de processamento é fornecer um sinal de saída de corrente contínua proporcional a impedância do sensor. O circuito de processamento, Fig. 3.12(b), executa as tarefas de amplificação, retificação e integração do sinal capturado no circuito RC. O projeto eletrônico deste circuito encontra-se no Anexo VI (não apresentado neste resumo). Todo o trabalho de desenvolvimento, projeto e confecção dos circuitos eletrônicos foi realizado com o apoio do LABSOLDA-EMC-UFSC.



(a)



(b)

Figura A.12 – (a) Circuito básico RC, (b) Circuitos RC e de processamento integrados.

O sinal de saída do circuito de processamento é medido pelo aparelho de aquisição de dados HP 34970A e armazenado no computador. A impedância elétrica entre os eletrodos e conseqüentemente o sinal de saída é proporcional à razão volumétrica entre o ar e a água. Como a frequência de aquisição do sinal (500kHz) do sensor é muito maior do que a frequência de passagem das bolhas entre os eletrodos (~100Hz), pode-se assumir que a medição está sendo realizada em um sistema estático e daí vale a igualdade

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_l} = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (\text{A.1})$$

ou seja, do que está sendo medido no volume entre os eletrodos, pode-se assumir que tem correlação com a fração de vazão.

Para que a informação obtida pelo medidor de fração de vazão se torne imune à variação das propriedades da água com a temperatura, impurezas e salinidade deve-se normalizar o sinal de medição. A normalização,  $N$ , é realizada pela seguinte equação

$$N = \frac{S_1 - S}{S_1 - S_0} \quad (\text{A.2})$$

onde  $S$  é o sinal medido quando da passagem do escoamento bifásico entre os eletrodos,  $S_0$  é o sinal quando somente água se encontra entre os eletrodos e  $S_1$  é o sinal quando somente ar se encontra entre os eletrodos.

#### **A.4.2. Calibração**

O sinal normalizado deve ser correlacionado com a fração de vazão. Para tanto, foram utilizados dois métodos distintos para a determinação da fração de vazão. O primeiro é o método gravimétrico pelo qual se determina a fração de vazão pela medição da queda de pressão em uma tubulação vertical e o segundo é pela utilização de válvulas de fechamento rápido. Apesar de se saber que a utilização das válvulas de fechamento rápido é o método mais confiável para a determinação da fração de vazão em um sistema dinâmico, a comparação com o método gravimétrico foi feita a título de avaliação dos métodos e também devido à ordem cronológica, na busca de um sistema confiável. A descrição detalhada dos procedimentos experimentais na aplicação dos métodos de calibração se encontra no Anexo III (não apresentado nesta NT) e também em van de Watering (2005).

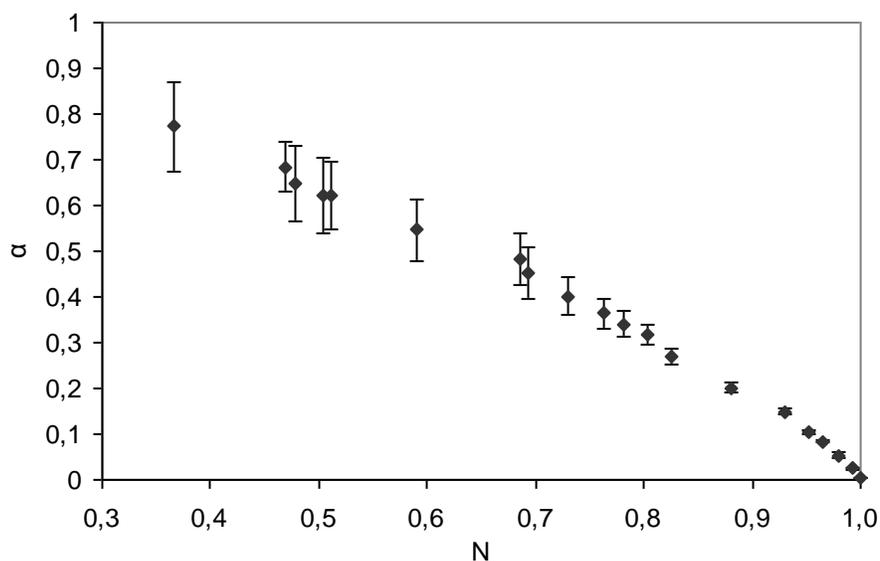


Figura A.13 – Resultado da calibração pelo método gravimétrico, van de Watering (2005).

Na Fig. A.13 é mostrada a distribuição dos valores da fração de vazios obtidos pelo método gravimétrico em função do sinal normalizado correspondente. De acordo com o observado nos experimentos, o regime borbulhado manteve-se uniforme até a fração de vazios de 30%. Acima deste valor observa-se a presença de bolsões de ar em meio ao regime borbulhado. O aumento da incerteza a partir de 30% pode ser atribuído à ocorrência dos regimes pistonado e golfado durante as medições.

A Fig. A.14 mostra os resultados da calibração utilizando válvulas de fechamento rápido (VFR). O procedimento foi aplicado para vazões de água de 0,2 a 2,8 m<sup>3</sup>/h, como mostra a figura. Comparando-se estes resultados com os obtidos pelo método gravimétrico, Fig. A.15, pode-se observar uma concordância dos dados até uma fração de vazios de 40%. Analisando-se a Fig. A.16, nota-se uma dispersão no valor das frações de vazios para diferentes vazões de água. Esta tendência nos resultados também foi observada por Elkow e Rezkallah (2001).

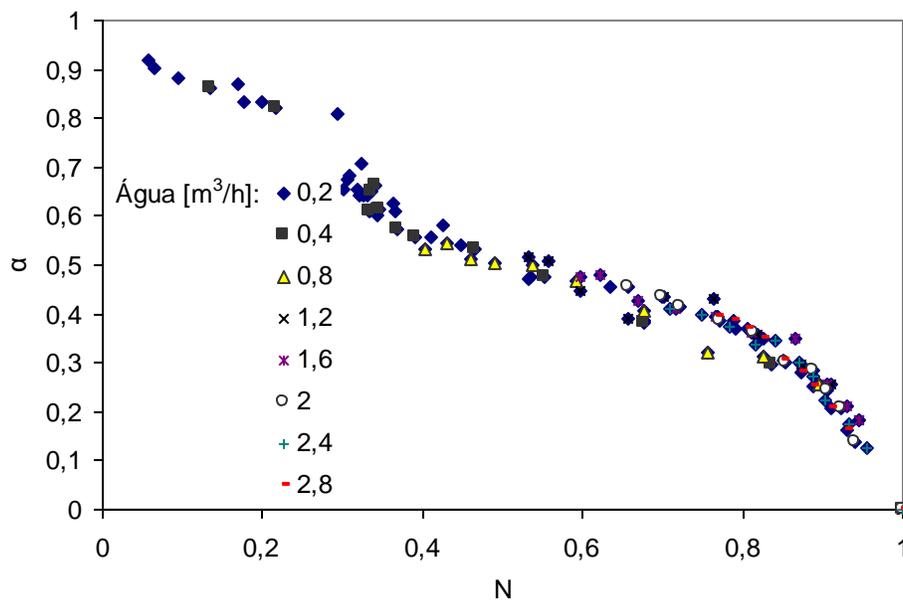


Figura A.14 – Resultado da calibração utilizando as VFR, van de Watering (2005).

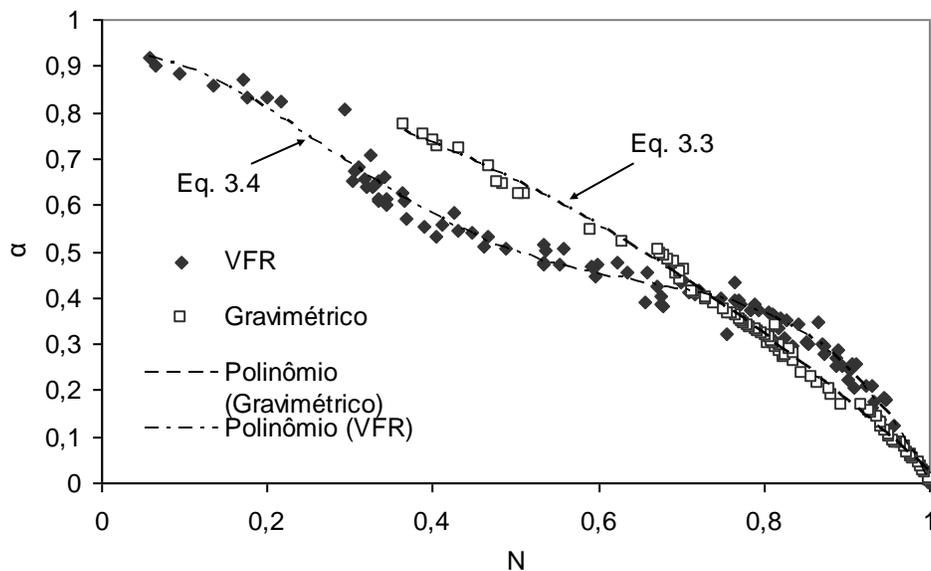


Figura A.15 – Comparação entre os resultados do método gravimétrico e VFR, van de Watering (2005). Obs. (Eq. 3.3=Eq. A3; Eq. 3.4=Eq.A4 desta NT)

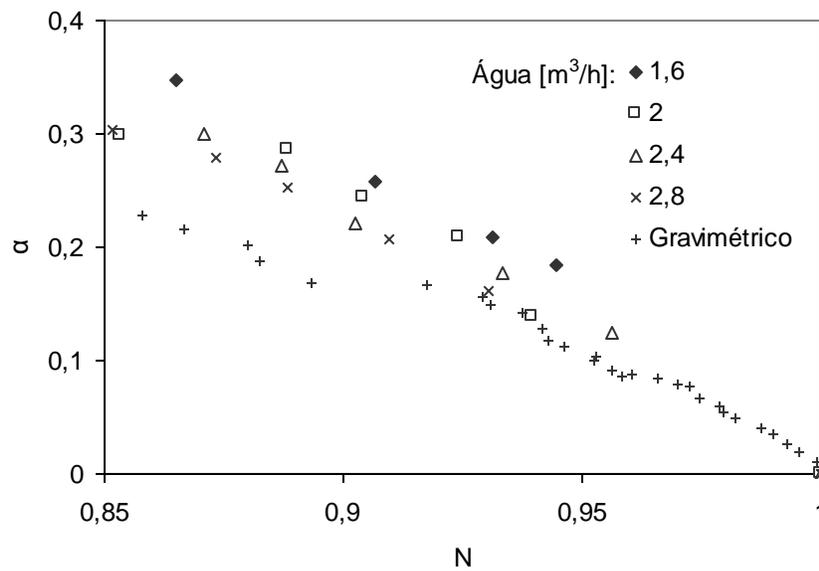


Figura A.16 – Fração de vazio em função do sinal normalizado, van de Watering (2005).

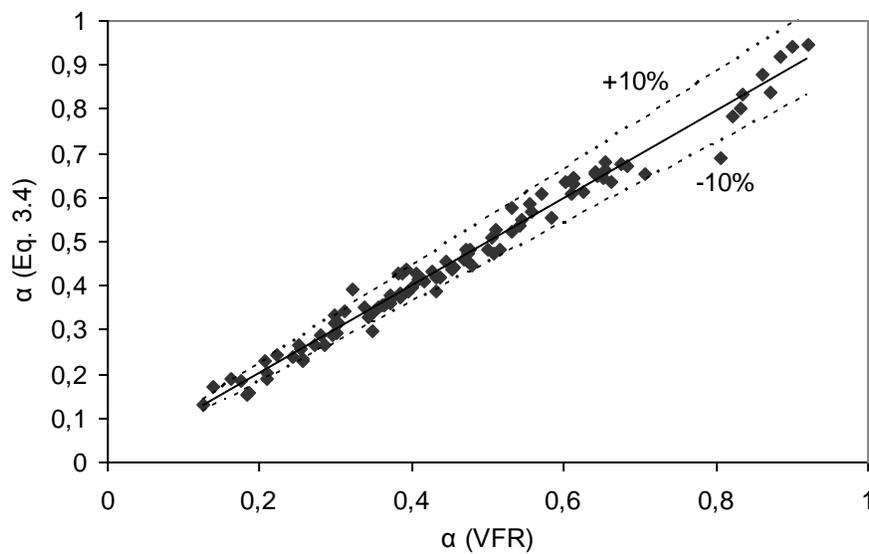


Figura A.17 – Dispersão entre os pontos experimentais e a curva de ajuste do método de VFR, van de Watering (2005). Obs. (Eq. 3.4=Eq.A4 desta NT)

Do que foi exposto acima, pode-se concluir que os dois métodos de calibração equiparam-se até uma fração de vazio de 30%. No entanto, para frações de vazio acima

deste valor, a calibração pelo método das VFR parece ser mais adequada. Esta conclusão se baseia tanto na incerteza dos valores medidos nesta região, quanto no próprio método, o qual, sem dúvida, fornece valores mais confiáveis da fração de vazio, já que a VFR consegue captar a dinâmica do escoamento bifásico. Os polinômios das curvas de ajuste indicados na Fig. A.15 são os seguintes, van de Watering (2005),

*Método gravimétrico:*

$$\alpha = -0,729N^2 - 0,162N + 0,914 \quad (\text{A3})$$

*Método VFR:*

$$\alpha = -7,171N^4 + 13,238N^3 - 7,484N^2 + 0,506N + 0,91 \quad (\text{A4})$$

Já que o polinômio obtido pelo método VFR será usado para o cálculo da fração de vazio, a Fig. A.17 apresenta a dispersão dos valores calculados por este polinômio com relação aos pontos experimentais, cujo desvio médio é de 10%.

## REFERÊNCIAS

- Auracher, H. and Marroquin, A., “*A miniaturized optical sensor for local measurements in two-phase flow*”, 10<sup>th</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Dec 1989.
- Chanson, H., "Air-Water Flow Measurements with Intrusive Phase-Detection Probes. Can we Improve their Interpretation ?." *J. of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 252-255 (ISSN 0733-9429), 2002.
- Dias, S.G., França, F.A. e Rosa, E.S., “*The progress of the void fraction, bubble size and bubble velocity in a short vertical nozzle under the occurrence of bubbly flows*”, Third Inter. Conference on Multiphase Flows, France, June 8-12, 1998.
- Duarte, L. G. da C., “*Medição da fração de vazio em tubos de pequeno diâmetro utilizando sensores capacitivos*”. Florianópolis, 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

- Elkow, K.J. e Rezkallah, K.S., “*Void fraction measurements in gas - liquid flows using capacitance sensors*”, Meas. Sci. Technol., **7** 1153-1163, 1996.
- Pereira, M.F, 2006, Determinação das vazões em escoamentos bifásicos ar-água por meio de tubo de Venturi e medidor de fração de vazio, Dissertação de mestrado defendida no POSMEC-UFSC, orientador: prof. Júlio C. Passos.
- Watering, E. van de, “Calibration of a void fraction measuring device”, Intership Report, UFSC, 2005.
- Whalley, P. B., “*Boiling, condensation, and gas-liquid flow*”, Oxford: Clarendon Press, 1987.