

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALEXANDRE GOMES HOFF

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS  
DE FRAÇÃO DE VAZIO EM UM MINICANAL

SÃO LEOPOLDO  
2013

ALEXANDRE GOMES HOFF

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS  
DE FRAÇÃO DE VAZIO EM UM MINICANAL

Dissertação apresentada como pré-requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –  
UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Jacqueline B. Copetti  
Co-orientadora: Profa. Dra. Maria L. S. Indrusiak

SÃO LEOPOLDO  
2013

H698d

Hoff, Alexandre Gomes

Desenvolvimento de um sensor óptico para medidas de fração de vazio em um minicanal / Alexandre Gomes Hoff. -- 2013.

74 f. : il. ; 30cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, RS, 2013.

Orientadora: Profa. Dra. Jacqueline B. Copetti; Coorientadora: Profa. Dra. Maria L. S. Indrusiak.

1. Engenharia mecânica. 2. Sensor óptico. 3. escoamento bifásico. 4. Fração de vazio. 5. Minicanal. I. Título. II. Copetti, Jacqueline B. III. Indrusiak, Maria L. S.

CDU 621

Catálogo na Publicação:  
Bibliotecário Eliete Mari Doncato Brasil - CRB 10/1184

ALEXANDRE GOMES HOFF

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS  
DE FRAÇÃO DE VAZIO EM UM MINICANAL

Dissertação apresentada como pré-requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –  
UNISINOS

Aprovado em 18 de Janeiro de 2013.

Banca Examinadora: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan  
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Profa. Dra. Flavia Zinani  
Professora e Pesquisadora da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira  
Coordenador do Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos -  
SISEA da Escola Politécnica da USP.

Trabalho desenvolvido no programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. A bolsa de estudo foi integralmente financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por meio da modalidade do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares Cursos Novos (PROSUP/Cursos Novos).

SÃO LEOPOLDO  
2013

## **AGRADECIMENTOS**

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES/PROSUP Cursos Novos pelo apoio financeiro.

Ao programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS pela estrutura física disponível.

A Profa. Dra. Jacqueline B. Copetti e a Profa. Dra. Maria L. S. Indrusiak pelas orientações e por acreditarem no potencial deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Julio Cesar Passos Coordenador de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pelas orientações e apoio com o intercâmbio no Laboratório LEPTEN/BOILING.

Ao amigo Físico Jeferson Diehl de Oliveira pelo apoio nas pesquisas.

E a minha esposa Fernanda pela paciência e dedicação dada aos meus filhos Augusto e Bruner para que eu pudesse realizar os trabalhos.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia experimental para medição de fração de vazio em um escoamento bifásico ar-água, utilizando sensor óptico em um minicanal horizontal de 2,6 mm de diâmetro interno. O sistema de medição consiste de um diodo emissor de luz (*LED*) de alto brilho, uma resistência dependente de luz (*LDR*), um circuito amplificador e um circuito para aquisição de dados. Os experimentos são realizados com um tubo de vidro que fica entre o *LED* e o *LDR*, no qual passa a mistura ar-água e conforme o padrão de escoamento a luz é atenuada no *LDR*, que altera sua resistência variando a tensão. Os testes são realizados com vazões volumétricas do líquido de 160, 123 e 63 ml/min e volume de gás de 0,05 e 0,1 ml e os padrões de escoamento testados e observados foram do tipo bolhas, pistonados e golfadas. Nos ensaios são registradas imagens do escoamento, ou dos padrões de bolhas, com uma câmera de alta velocidade e o processamento destas imagens é utilizado para validar a técnica do sensor óptico. As áreas das bolhas, em pixels, são comparadas com as áreas das curvas do sinal do sensor óptico e uma boa correlação foi encontrada. Uma curva de calibração do sensor é apresentada para padrão de escoamento tipo bolhas, permitindo encontrar uma relação entre a fração de vazio e a tensão medida pelo sensor. Os resultados obtidos mostraram que a técnica do sensor óptico pode ser usada com bons resultados para a medição de fração de vazio média para um escoamento bifásico ar-água e para a identificação de padrões de escoamento em tubos de diâmetro reduzido.

Palavras-chave: Sensor óptico. Escoamento bifásico. Fração de vazio. Minicanal.

## ABSTRACT

This work presents the development of an experimental methodology for measuring void fraction in an air-water two-phase flow, using optical sensor in a horizontal mini channel of 2.6 mm internal diameter. The measurement system consists of a light emitting diode (*LED*) of high brightness, light dependent resistor (*LDR*), amplifier circuit and data acquisition circuit. The experiments are performed with the air-water flow passing through a glass tube section positioned between the *LED* and *LDR*. According to the flow pattern, light is attenuated and impinges on *LDR*, changing its resistance and thus varying the voltage measured by data acquisition circuit. The tests are conducted with liquid volumetric flow of 160, 123 and 63 ml/min and gas volume of 0.05 and 0.1 ml and flow patterns tested and observed were bubbly and plug. During the tests images of the flow are registered, or the bubbles flow patterns, with a high-speed camera and the processing of these images is used to validate the optical sensor technique. The bubble areas, in pixels, are compared to area under the curve produced from optical sensor signal and a good correlation was found. A calibration curve of the sensor is obtained for bubbly flow pattern, and a correlation between void fraction and the tension is proposed. The results show that the optical sensor technique is adequate for average void fraction measurements in air-water two-phase flow and for flow patterns identification in mini channels.

Keywords: Optical sensor. Two-phase flow. Void fraction. Mini-channel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de blocos do sensor óptico. ....	16
Figura 2.1 Escoamento Tipo Bolhas .....	22
Figura 2.2 Escoamento Estratificado.....	22
Figura 2.3 Escoamento Ondulado .....	22
Figura 2.4 Escoamento Pistonado .....	22
Figura 2.5 Escoamento Intermitente.....	23
Figura 2.6 Escoamento Anular .....	23
Figura 2.7 Padrões de escoamento: imagens e resposta pelo método capacitivo para água comum e desmineralizada. ....	25
Figura 2.8 Percentual de erro na determinação de fração de vazio da mistura óleo-água pela técnica do auto-transformador e capacitiva. ....	26
Figura 2.9 Comparação entre os métodos ultra-sônico e capacitivo de medição de fração de vazio em escoamento ar-água.....	27
Figura 2.10 Técnica de processamento de imagens para determinação de fração de vazio em escoamento ar-óleo.....	28
Figura 2.11 Incertezas na medição da fração de vazio em misturas ar-água com a técnica de raios X para diferentes potências de emissão de energia.....	29
Figura 2.12 Padrões de escoamento: imagens e resposta do sensor de impedância para a fração de vazio.....	30
Figura 2.13 Comparação entre as técnicas com válvula de fechamento rápido, sensor capacitivo e densímetro para a medição de fração de vazio.....	31
Figura 2.14 Comparação entre as medições do sensor óptico na vertical com o sensor de condutividade. ....	32
Figura 2.15 Sensor óptico com laser para identificação de padrões de escoamento em um micro canal e escoamento com mudança de fase. ....	33
Figura 2.16 Análise dos padrões de escoamento através dos sinais do sensor óptico na ebulição em um micro canal.....	34
Figura 3.1 Esquema da bancada experimental .....	35
Figura 3.2 Sistema adotado para realizar a mistura de ar e água (seringa) e o regulador de vazão da água.....	36
Figura 3.3 Sensor óptico desenvolvido e fixado na seção de testes. ....	36
Figura 3.4 Seção de visualização do escoamento.....	37

Figura 3.5 Reservatório e a bomba de água.....	37
Figura 3.6 Bancada experimental. ....	38
Figura 3.7 Montagem do sensor óptico. ....	39
Figura 3.8 Placa de aquisição do sinal do sensor óptico. ....	40
Figura 3.9 Sensor óptico com diâmetro de 15 mm.....	41
Figura 3.10 Imagem obtida pela câmera digital nos testes preliminares.....	41
Figura 3.11 Medições da imagem de escoamento usando régua gráfica.....	41
Figura 3.12 Arquivo máscara de uma bolha.....	42
Figura 3.13 Área da bolha em pixels.....	42
Figura 3.14 Sinal do sensor óptico. ....	42
Figura 3.15 Comparação entre as medições de área do sensor óptico e da imagem da bolha obtida pela câmera digital.....	43
Figura 3.16 Comparação entre as medições de área do sensor óptico e da imagem da bolha obtida pela câmera digital corrigida. ....	44
Figura 3.17 Ruído no sinal do sensor óptico. ....	45
Figura 3.18 Interferência da luz da câmera digital no sensor óptico.....	45
Figura 3.19 Alterações na seção de testes e no tamanho do sensor óptico. ....	46
Figura 3.20 Sinal do sensor óptico e padrão de escoamento para a nova configuração da bancada e teste a $Q_l = 160$ ml/min e $vol_{ar} = 0,05$ ml. ....	47
Figura 3.21 Sinal do sensor óptico associado ao padrão de escoamento. ....	48
Figura 4.1 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 160$ ml/min e $vol_{ar} = 0,1$ ml. ....	50
Figura 4.2 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 160$ ml/min e $vol_{ar} = 0,05$ ml. ....	50
Figura 4.3 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 123$ ml/min e $vol_{ar} = 0,1$ ml. ....	50
Figura 4.4 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 123$ ml/min e $vol_{ar} = 0,05$ ml. ....	51
Figura 4.5 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 63$ ml/min e $vol_{ar} = 0,1$ ml. ....	51
Figura 4.6 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 63$ ml/min e $vol_{ar} = 0,05$ ml. ....	52
Figura 4.7 Correlação entre a resposta do sensor óptico e do processamento de imagens. ....	52

Figura 4.8 Erro médio relativo entre a resposta do sensor óptico e do processamento de imagens.....	53
Figura 4.9 Alteração na posição do sensor óptico na seção de testes.....	53
Figura 4.10 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para $Q_l = 63$ ml/min e $vol_{ar} = 0,05$ ml para sensor mais próximo à câmera.....	54
Figura 4.11 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para diferentes vazões de água e volume de ar.....	55
Figura 4.12 Padrões de escoamento tipo bolhas e bolha alongada e o sinal do sensor óptico.	56
Figura 4.13 Sinal do sensor óptico para uma única bolha.....	56
Figura 4.14 Sinal do sensor óptico para várias bolhas alongadas. ....	57
Figura 4.15 Sinal do sensor óptico para bolhas alongadas.....	58
Figura 4.16 Sinal do sensor óptico para o padrão pistonado.....	58
Figura 4.17 Sinal do sensor óptico para bolhas intermitentes em golfadas.....	59
Figura 4.18 Relação entre a curva do sinal sensor óptico com a imagem do escoamento para o cálculo local do diâmetro da parte frontal da bolha.....	60
Figura 4.19 Relação entre a curva do sinal sensor óptico com a imagem do escoamento para o cálculo local do diâmetro da parte posterior da bolha. ....	61
Figura 4.20 Relação entre a curva do sinal sensor óptico com a imagem do escoamento para o cálculo local do diâmetro de uma bolha completa. ....	62
Figura 4.21 Relação entre o diâmetro das bolhas e a tensão do sensor óptico.....	62
Figura 4.22 Curva de calibração do sensor óptico.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação do tamanho do canal quanto ao diâmetro hidráulico segundo Mehendale <i>et al.</i> (2000).....	20
Tabela 2.2 Classificação do tamanho do canal quanto ao diâmetro hidráulico segundo Kandlikar e Grande (2003).....	20
Tabela 3.1 Condições de testes do escoamento bifásico para análise da técnica do sensor óptico e do processamento de imagens. ....	46
Tabela 4. 1 Diâmetro da bolha e tensão do sensor óptico correspondente.....	61

## LISTA DE SIMBOLOS

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$A_g$	Área de gás [m <sup>2</sup> ]
$A_l$	Área do líquido [m <sup>2</sup> ]
$correl$	Correlação entre as medições da câmera digital e o sensor óptico [-]
$CN_{val_{opt}}$	Coefficiente de correção na equação da curva normalizado do sensor óptico [-]
$D$	Diâmetro [m]
$d_e$	Diâmetro externo [m]
$D_h$	Diâmetro hidráulico [m]
$d_i$	Diâmetro interno [m]
$EMR$	Erro médio relativo [%]
$G$	Fluxo mássico [kg/(m <sup>2</sup> s)]
$G_g$	Fluxo mássico do gás [kg/(m <sup>2</sup> s)]
$G_l$	Fluxo mássico do líquido [kg/(m <sup>2</sup> s)]
$LED$	Diodo emissor de luz
$LDR$	Resistência dependente de luz
$\dot{m}$	Vazão mássica total [kg/s]
$\dot{m}_g$	Vazão mássica do gás [kg/s]
$\dot{m}_l$	Vazão mássica do líquido [kg/s]
$N_{conf}$	Número de confinamento [-]
$N_{val_{opt}}$	Valor do sensor óptico normalizado ou área adimensional [-]
$N_{val_{pix}}$	Valor de pixel normalizado ou área adimensional [-]
$P$	Perímetro interno [m]
$pu$	Medição adimensional pela régua gráfica [-]
$Q$	Vazão volumétrica [m <sup>3</sup> /s]
$Q_g$	Vazão volumétrica do gás [m <sup>3</sup> /s]
$Q_l$	Vazão volumétrica do líquido [m <sup>3</sup> /s]
$U$	Velocidade superficial [m/s]
$U_g$	Velocidade superficial do gás [m/s]
$U_l$	Velocidade superficial do Líquido [m/s]

<i>USB</i>	Universal serial bus (porta serial)
<i>V</i>	Tensão [V]
<i>V*</i>	Tensão adimensional [-]
<i>V<sub>g</sub></i>	Tensão no escoamento gasoso [V]
<i>v</i>	Velocidade média [m/s]
<i>v<sub>l</sub></i>	Velocidade média do líquido [m/s]
<i>v<sub>g</sub></i>	Velocidade média do gás [m/s]
<i>val<sub>pix</sub></i>	Quantidade de pixels na área da bolha [pixels]
<i>val<sub>pix,max</sub></i>	Quantidade máxima de pixels na área da bolha [pixels]
<i>val<sub>opt</sub></i>	Valor da área sob a curva do sinal do sensor óptico [V/s]
<i>val<sub>opt,max</sub></i>	Valor da maior área sob a curva do sinal do sensor óptico [V/s]
<i>vol<sub>ar</sub></i>	Volume de ar [l]

### Símbolos Gregos

$\beta$	Ângulo de contato [°]
$\sigma$	Tensão superficial [N/m]
$\alpha$	Fração de vazio [-]
$\rho$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_l$	Massa específica do líquido [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	Massa específica do gás [kg/m <sup>3</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS .....	18
2.2 CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE MINICANAL .....	19
2.3 PADRÕES DE ESCOAMENTO EM TUBO HORIZONTAL.....	21
2.4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA MEDIDAS DE FRAÇÃO DE VAZIO.....	23
2.4.1 Sensores Capacitivos .....	24
2.4.2 Auto-transformador .....	25
2.4.3 Ultra-som .....	26
2.4.4 Processamento de Imagens.....	27
2.4.5 Raios x e Gama.....	28
2.4.6 Sensores por Impedância.....	29
2.4.8 Válvula de Fechamento Rápido.....	31
2.4.9 Sensores Ópticos .....	32
<b>3.1 BANCADA DE TESTES PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO.....</b>	<b>35</b>
3.2 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SENSOR ÓPTICO .....	38
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	40
3.3.1 Testes Preliminares de Definição da Metodologia de Validação do Sinal do Sensor Óptico. ....	40
3.3.2 Ajustes da Bancada Experimental e Definição dos Testes a Serem Realizados ....	45
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DO SENSOR ÓPTICO.....	49
4.2 PADRÕES DE ESCOAMENTO E O SINAL DO SENSOR ÓPTICO.....	55
4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO .....	59
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>64</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	64
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE A</b> - Circuito eletrônico do sensor óptico desenvolvido neste trabalho. ....	69
<b>APÊNDICE B</b> - Algoritmo para contar pixels no programa MatLab. ....	70
<b>APÊNDICE C</b> - Algoritmo para gerar a curva do sinal do sensor óptico no programa MatLab. ....	71
<b>APÊNDICE D</b> - Algoritmo para interpolação no programa Excel .....	72

<b>APÊNDICE E</b> - Tabela com as dimensões na saída da bolha.....	73
<b>APÊNDICE F</b> - Tabela com as dimensões da bolha com formato circular. ....	74

## 1 INTRODUÇÃO

Tubos com escoamento de misturas com gases, líquidos ou sólidos, são encontrados em diversas aplicações na engenharia como no transporte de misturas óleo-gás, plantas de produção química, sistemas de resfriamento de reatores e equipamentos de transferência de calor. Aplicações envolvendo a utilização de mini-canais encontram-se em trocadores de calor compactos, que são atraentes em aplicações industriais onde a conservação de energia, espaço, peso e custo são considerados importantes, em processadores de computadores, onde há necessidade de dissipar elevados fluxos de calor, instrumentos de medicina ou na refrigeração de ambientes.

Quando estão presentes duas substâncias diferentes o escoamento é chamado de bifásico, podendo ser como a mistura de ar-água e óleo-água ou fases diferentes de uma mesma substância como vapor e água. No estudo de escoamentos bifásicos líquido-gás em mini-canais, os efeitos da tensão superficial se destacam e características como regime de escoamento, fração de vazio, velocidade das bolhas e queda de pressão serão diferentes das características do escoamento bifásico em tubos com diâmetros internos maiores.

A fração de vazio no escoamento bifásico é dada pela razão entre a área de gás e a área total da mistura em uma dada seção da tubulação. O conhecimento da fração de vazio em misturas bifásicas é importante para um completo entendimento da hidrodinâmica dos fluidos associada a este escoamento. No entanto, a instrumentação para a medição de fração de vazio em mini-canais tem como dificuldade a inserção de um sensor na tubulação, o que também provocaria uma alteração no comportamento do escoamento. A solução para este monitoramento sem interferir na medição é utilizar sensores que não atravessem as paredes do tubo ou que não ultrapassem a espessura da parede do tubo no sentido de preservar as características inerentes ao escoamento.

As técnicas utilizadas na medição de fração de vazio em um escoamento bifásico podem usar um auto-transformador, ultra-som, processamento de imagens, absorção radioativa (raios X e Gama), válvulas de fechamento rápido, sensores de impedância, sensores capacitivos e sensores ópticos. Assim, tem-se bastante flexibilidade na escolha, mas cada técnica e configuração escolhida deve adaptar-se a situação particular em estudo para que possa produzir resultados satisfatórios.

A escolha de qualquer método depende da aplicação e do interesse de obterem-se medidas locais de fração de vazio, valores médios de volume ou de identificação de padrões

de escoamento. A técnica com sensor óptico foi utilizada por Revellin *et al.* (2006) com um sistema constituído de dois lasers e aplicado para analisar a ebulição do refrigerante R134a em um micro canal horizontal de 0,5 mm de diâmetro, permitindo a identificação dos padrões de escoamento e a medição da velocidade média. Jana *et al.* (2007) realizaram testes com um laser como emissor de luz em uma tubulação de 25,4 mm de diâmetro na horizontal e na vertical, com a mistura de ar-água e querosene-água, conseguindo identificar diferentes padrões de escoamento e suas transições.

Nesse contexto, é proposto um sistema de medição de fração de vazio em um escoamento bifásico ar-água, utilizando a técnica com sensor óptico constituído de um diodo emissor de luz (*LED*) de alto brilho e uma resistência dependente de luz (*LDR*) como receptor de luz para um mini-canal horizontal com diâmetro interno 2,6 mm, conforme a Fig. 1.1. Também é apresentada a metodologia desenvolvida para comparar a quantidade de pixels da imagem capturada por uma câmera de alta velocidade da seção longitudinal de uma bolha com a área produzida abaixo da curva traçada pelo sinal do sensor óptico e compreender os sinais gerados relacionados com o padrão de escoamento.

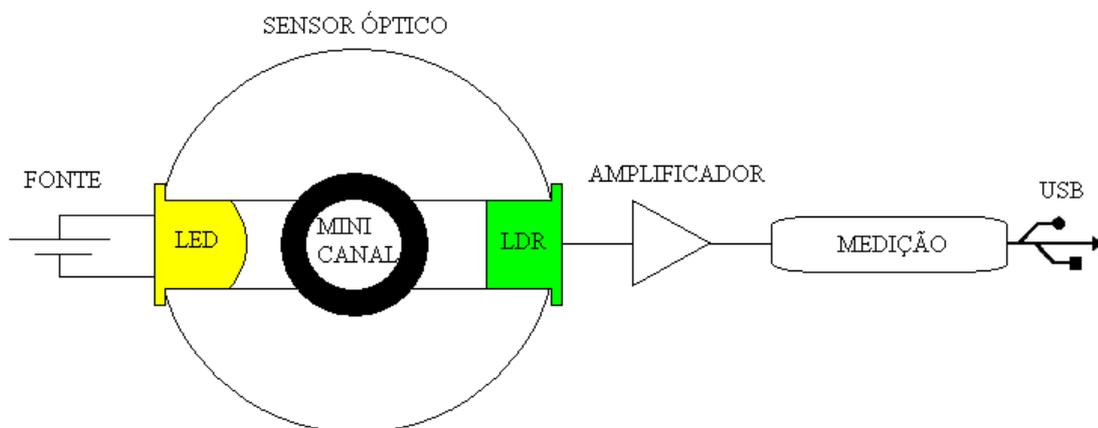


Figura 1.1 Diagrama de blocos do sensor óptico.

A estrutura deste trabalho está dividida em cinco capítulos e seis apêndices. No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre conceitos básicos de escoamentos bifásicos, a classificação do tamanho dos tubos e canais e a definição de um minicanal e a descrição de padrões de escoamento em tubos horizontais. No Capítulo 3 é descrito a metodologia aplicada na montagem da bancada experimental, o desenvolvimento do projeto do sensor óptico e o procedimento experimental. No Capítulo 4 são descritos os resultados encontrados, validação da técnica, a identificação de padrões de escoamento e calibração. No

Capítulo 5 encontram-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. O Apêndice A mostra o circuito eletrônico desenvolvido para a instrumentação do sensor óptico. No Apêndice B é apresentado o algoritmo aplicado para a contagem de pixels da visualização da imagem da seção longitudinal da bolha no programa MatLab. No Apêndice C é apresentado o algoritmo para gerar a curva do sinal do sensor óptico no programa MatLab. O Apêndice D apresenta o algoritmo para interpolação no programa Excel. No Apêndice E encontra-se a tabela com as dimensões na saída da bolha e no Apêndice F a tabela com as dimensões da bolha com formato circular.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS

O escoamento bifásico pode ser com uma mistura de ar-água, óleo-água ou fases diferentes de uma mesma substância, como vapor e água, ou seja, um processo de mudança de fase como ebulição ou condensação. Collier e Thome (1994) apresentam as definições básicas necessárias à caracterização de escoamentos bifásicos, considerando as duas fases, líquido e gás, escoando simultaneamente em um canal. O escoamento é em regime permanente e unidimensional, ou seja, não existem variações nas propriedades nas direções normais ao escoamento. Em qualquer instante de tempo, um ponto qualquer no interior do canal pode ser ocupado pela fase líquida, enquanto em um instante mais tarde será ocupado pela fase do gás.

A vazão mássica total,  $\dot{m}$ , é igual à soma das vazões mássicas de vapor,  $\dot{m}_g$ , e de líquido,  $\dot{m}_l$ .

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_l \quad (2.1)$$

As vazões mássicas do gás e do líquido podem ser relacionadas com vazões volumétricas,  $Q_g$  e  $Q_l$ , do gás e do líquido, da seguinte forma:

$$\dot{m}_g = \rho_g Q_g = \rho_g v_g A_g \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_l = \rho_l Q_l = \rho_l v_l A_l \quad (2.3)$$

onde  $\rho$ ,  $v$  e  $A$ , representam a massa específica, a velocidade média e a área ocupada pelas fases, respectivamente, e os subscritos  $l$  e  $g$  são atribuídos ao líquido e gás.

A área de seção transversal total do canal é expressa sendo:

$$A = A_g + A_l \quad (2.4)$$

Analogamente, a vazão volumétrica total é:

$$Q = Q_g + Q_l \quad (2.5)$$

Quando a vazão volumétrica é dividida pela área de escoamento tem-se a velocidade superficial,  $U$ . As velocidades superficiais do gás e do líquido,  $U_g$  e  $U_l$ , são utilizadas para caracterizar os fenômenos de escoamentos bifásicos nos modelos e correlações e, respectivamente, são expressas por:

$$U = \frac{Q}{A}, \quad U_g = \frac{Q_g}{A}, \quad U_l = \frac{Q_l}{A}, \quad (2.6)$$

Nos cálculos para escoamentos bifásicos, frequentemente é usado o fluxo mássico total,  $G$ , definido como a vazão mássica por unidade de área da seção transversal. Este é a soma dos fluxos mássicos das fases gasosa,  $G_g$ , e líquida,  $G_l$ , de acordo com a Eq. (2.7).

$$G = G_g + G_l = \frac{\dot{m}_g}{A} + \frac{\dot{m}_l}{A} \quad (2.7)$$

A fração de vazio média, referida simplesmente como fração de vazio,  $\alpha$  pode ser definida como a área (ou volume) do canal ocupada pela fase gasosa,  $A_g$ , dividida pela área da seção transversal (ou o volume total) do canal,  $A$ .

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (2.8)$$

## 2.2 CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE MINICANAL

Devido às diferenças significativas nos fenômenos de transporte em canais com diâmetro convencional, em comparação com os canais de diâmetro mini ou micro, não existe unanimidade quanto aos critérios do limite de transição entre os tamanhos de canais. Na literatura têm sido propostos diferentes critérios para distinguir os diâmetros, mas todos baseados no diâmetro hidráulico ( $D_h$ ) da área da seção transversal do canal. A definição geral de  $D_h$  é dada pela Eq. 2.9:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.9)$$

onde  $A$  é a área da seção transversal do canal e  $P$  é o perímetro interno do tubo.

Mehendale *et al.* (2000), ao estudar projetos de trocadores de calor compactos e das tecnologias necessárias para a fabricação, propuseram uma classificação baseada no diâmetro hidráulico do canal como apresentado na Tab 2.1.

Tabela 2.1 Classificação do tamanho do canal quanto ao diâmetro hidráulico segundo Mehendale *et al.* (2000).

Classificação	Tamanho do canal baseado no $D_h$
Macrocanais ou canais convencionais	$D_h > 6 \text{ mm}$
Compactos	1 mm a 6 mm
Minicanais	100 $\mu\text{m}$ a 1 mm
Microcanais	1 $\mu\text{m}$ a 100 $\mu\text{m}$

Kandlikar e Grande (2003) consideram os métodos de fabricação de microcanais aplicados à microeletrônica e aplicações de refrigeração com trocadores de calor compactos. A Tab. 2.2 mostra a classificação proposta pelos autores pela faixa de tamanho do diâmetro hidráulico, a qual é baseada no caminho livre médio de moléculas em escoamento monofásico e dos efeitos da tensão superficial no escoamento em mudança de fase.

Tabela 2.2 Classificação do tamanho do canal quanto ao diâmetro hidráulico segundo Kandlikar e Grande (2003).

Classificação	Tamanho do canal baseado no $D_h$
Canais convencionais	$D_h > 3 \text{ mm}$
Minicanais	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$
Microcanais	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$
Nanocanais	$D_h < 10 \mu\text{m}$

O critério para transição de macro para micro canal estabelecido por Kew e Cornwell (1997) é baseado no número de confinamento ( $N_{conf}$ ), ou:

$$N_{conf} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)(d_e - d_i)^2}} \quad (2.10)$$

onde  $\sigma$  é a tensão superficial,  $g$  a aceleração de gravidade,  $d_e$  diâmetro externo e  $d_i$  diâmetro interno. Os autores sugerem que os efeitos do confinamento tornam-se significativos para canais com  $N_{conf} < 0,5$  (microcanal).

No presente trabalho, no qual é usada uma seção transversal circular com diâmetro hidráulico de 2,6 mm, foi considerada a classificação proposta por Kandlikar e Grande (2003), porque apresenta uma melhor uniformidade entre as escalas no escoamento líquido e gás, na qual o canal é identificado como sendo um minicanal.

### 2.3 PADRÕES DE ESCOAMENTO EM TUBO HORIZONTAL

Em escoamentos gás-líquido, as fases podem adotar várias configurações geométricas conhecidas como padrões ou regimes de escoamento. O regime de escoamento observado em um experimento para uma dada combinação de velocidades de gás e líquido é dependente de vários fatores, como as propriedades dos fluidos utilizados, inclinação dos tubos com relação à horizontal, sua geometria e diâmetro. Na análise de escoamentos monofásicos no interior de tubos, onde há o escoamento de apenas uma fase, a principal característica é o regime de escoamento, que pode ser laminar ou turbulento. Os padrões de escoamento bifásicos observados em uma tubulação horizontal sofrem influência da gravidade que atua para a estratificação do líquido para o fundo do tubo e do gás para parte superior, dependendo basicamente das condições de pressão, vazão, fluxo de calor e geometria do tubo (COLLIER e THOME, 1994). Conforme o diâmetro do tubo diminui, os mecanismos são diferentes, devido à relativa diferença na magnitude das forças e a tensão superficial passa a ser bastante significativa.

Os padrões de escoamento podem ser classificados como:

**Escoamento tipo bolhas (*bubbly flow*):** Este padrão de escoamento tem pequenas bolhas de gás que estão dispersas no líquido, conforme Fig. 2.1. Para o escoamento na horizontal as

bolhas tendem a se acumular na parte superior da tubulação e às vezes esse padrão é referenciado como fluxo em espuma.



Figura 2.1 Escoamento Tipo Bolhas

Fonte: adaptado de COLLIER e THOME (1994)

**Escoamento tipo estratificado (*stratified flow*):** Esse padrão ocorre só em escoamentos na horizontal e em baixas velocidades das fases líquida e do gás. A fase líquida se situa na parte inferior da tubulação e a fase gasosa na superior, conforme Fig. 2.2. Ambas as fases são contínuas. Não é comum ser observado o padrão de escoamento estratificado em mini-canais devido ao maior efeito da tensão superficial (Coleman e Garimella, 1999).



Figura 2.2 Escoamento Estratificado

Fonte: adaptado de COLLIER e THOME (1994)

**Escoamento tipo ondulado (*wavy flow*):** Este padrão de escoamento é similar ao escoamento estratificado, porém a interface é perturbada por ondas devido a maior velocidade da fase de gás, o que acarreta distúrbios na fase líquida, conforme mostrado na Fig. 2.3.



Figura 2.3 Escoamento Ondulado

Fonte: adaptado de COLLIER e THOME (1994)

**Escoamento tipo pistonado (*plug flow*):** Bolhas alongadas percorrem a parte superior da tubulação podendo ocupar aproximadamente todo diâmetro dela. Podem ou não conter pequenas bolhas entranhadas arrastadas pela bolha maior. Esse padrão de escoamento é intermitente com bolhas alongadas e com a fase líquida se movendo lentamente com pequenas bolhas dispersas Fig. 2.4.



Figura 2.4 Escoamento Pistonado

Fonte: adaptado de COLLIER e THOME (1994)

**Escoamento tipo intermitente em golfadas (*slug flow*):** Após um aumento maior da velocidade do gás, a superfície é “rompida” em alguns pontos e gotículas de líquido são entranhadas no gás, chegando a atingir a superfície superior do tubo, como se vê na Fig. 2.5. Este padrão não deve ser confundido com o escoamento pistonado. Enquanto no caso pistonado as grandes bolhas são formadas a partir do agrupamento das pequenas, devido ao aumento da vazão de gás num padrão de bolhas, neste caso as bolhas (ou bolsões) de gás são formadas a partir da instabilidade do filme de líquido.



Figura 2.5 Escoamento Intermitente  
Fonte: adaptado de COLLIER e THOME (1994)

**Escoamento tipo anular (*annular flow*):** A alta velocidade da fase de gás resulta na formação de um núcleo gasoso, enquanto o líquido escoava em uma fina camada em contato com a parede da tubulação. Uma quantidade maior de líquido concentra-se na parte inferior do duto e também na interface do líquido com o gás ocorre o desprendimento de gotículas do líquido para o núcleo de gás Fig. 2.6.



Figura 2.6 Escoamento Anular  
Fonte: adaptado de COLLIER e THOME (1994)

## 2.4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA MEDIDAS DE FRAÇÃO DE VAZIO

Com o objetivo de pesquisar metodologias para a medição de fração de vazio e identificação de padrões de escoamento, foram analisadas algumas técnicas experimentais que pudessem ser aplicadas ao minicanal utilizado neste trabalho.

Quanto à classificação das técnicas de medição, pode-se enquadrá-las através da combinação de técnicas intrusivas ou não intrusivas com técnicas invasivas ou não invasivas. O termo intrusivo se refere à perturbação do processo examinado e o termo invasivo, à invasão dos sensores ao atravessar as paredes do objeto estudado. Para a medição de fração de vazio de um escoamento bifásico, existem diversas técnicas aplicadas, conforme a

necessidade do ensaio. Para que não ocorra uma perturbação no escoamento, as técnicas apresentadas a seguir são todas do tipo não invasivas.

### **2.4.1 Sensores Capacitivos**

A técnica que utiliza um sensor capacitivo é baseada na diferença existente entre as constantes dielétricas das duas fases, o que significa que quanto maior a diferença, melhor será o resultado obtido. A constante dielétrica da fase líquida é diferente comparada a da fase gasosa. A medição da capacitância é feita com eletrodos fixados à parede do mini-canal e como as áreas dos eletrodos e a distância entre eles são constantes, a única contribuição para a mudança na capacitância é a mudança do dielétrico.

Carnière *et al.* (2008), desenvolveu um sensor capacitivo, para observar o escoamento bifásico em um tubo horizontal de 9 mm de diâmetro interno contendo ar-água. Ele também observou as influências das propriedades elétricas da água desmineralizada e da água comum sobre as medições capacitivas. Os resultados do teste com água desmineralizada mostraram distinções claras entre os sinais dos sensores para todos os padrões de escoamento, desde bolhas alongadas ao anular, conforme os gráficos apresentados na Fig. 2.7. O autor concluiu que a técnica de medição capacitiva permitiu a identificação de padrões para a água desmineralizada, mas sofre efeitos de condutividade quando utilizada com água comum.

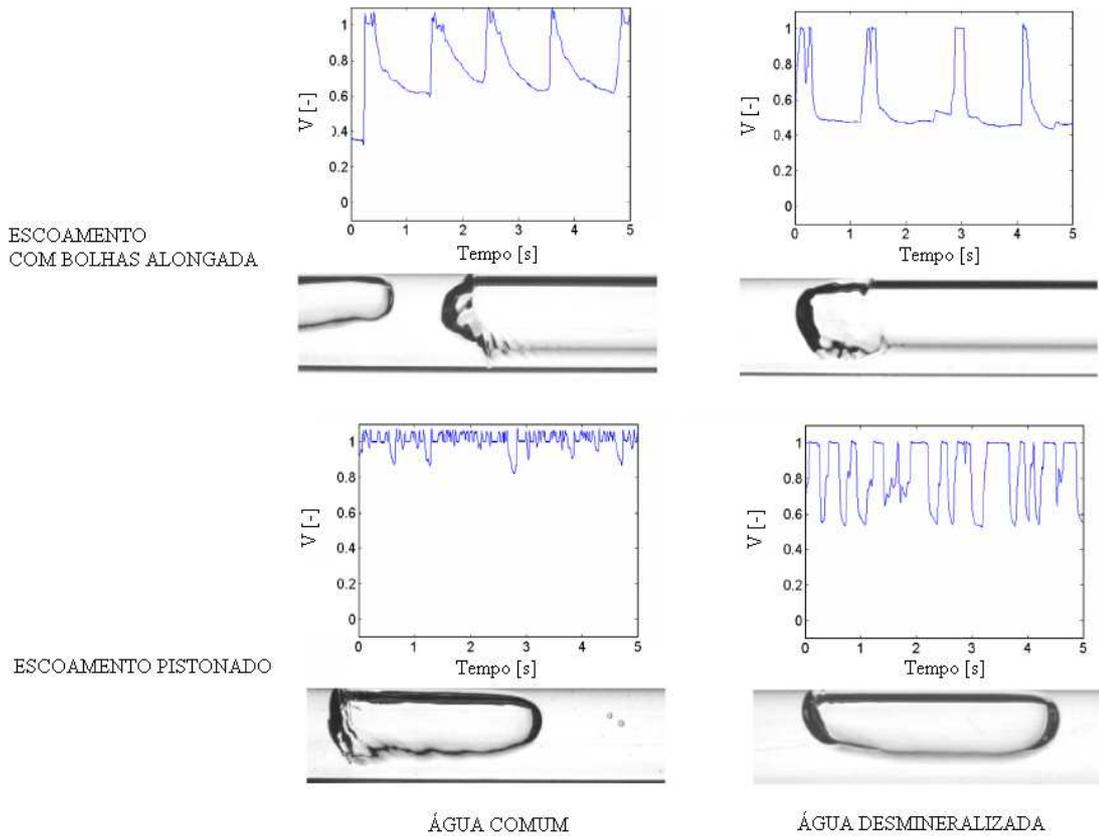


Figura 2.7 Padrões de escoamento: imagens e resposta pelo método capacitivo para água comum e desmineralizada.

Fonte: adaptado de CARNIÈRE *et al.* (2008)

#### 2.4.2 Auto-transformador

Esta técnica é aplicada em um tubo que não é metálico, no qual é enrolado um fio formando uma bobina. O princípio básico é a medição da força eletromotriz de auto-indução na bobina secundária que se forma quando uma corrente alternada é imposta à bobina primária. À medida que a fração de vazio sofre uma variação, ocorre uma modificação na permeabilidade do auto-transformador e portanto no fluxo magnético através do meio, o que implica em uma mudança da força eletromotriz medida (KENDOUSH e SARKIS 2002). Kendoush *et al.* (2006) desenvolveram um auto-transformador para medições de fração de vazio para a mistura de óleo e água em uma tubulação de diâmetro interno de 31 mm. A Fig. 2.8 apresenta o erro percentual na determinação da fração de vazio utilizando esta técnica e comparando com a técnica capacitiva. Os autores relataram que a técnica do auto transformador foi mais adequada e precisa do que a técnica capacitiva para padrão de escoamento estratificado e quando a fração de óleo do volume medido for maior que 50% .

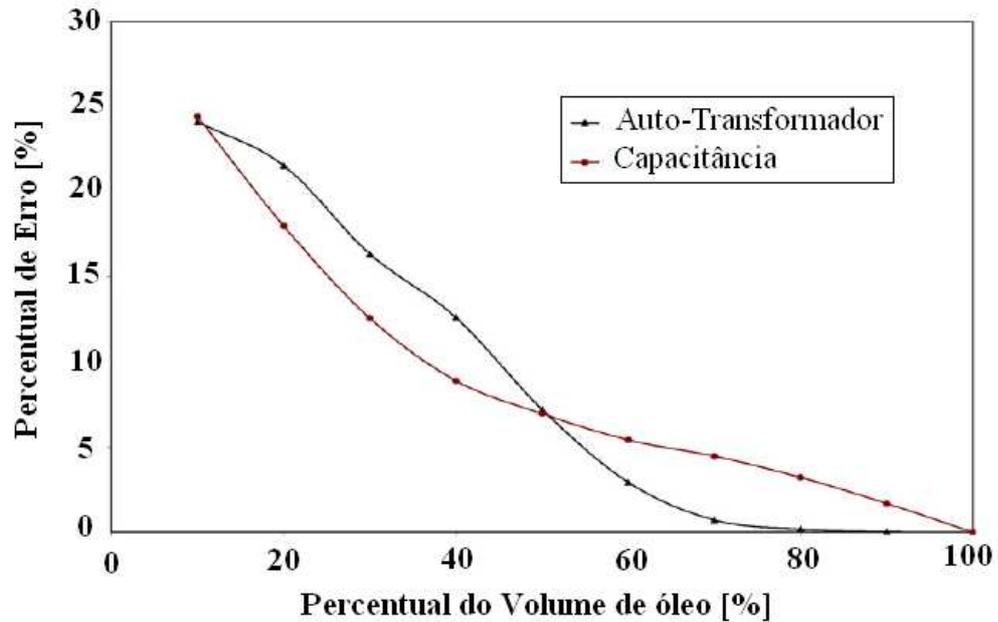


Figura 2.8 Percentual de erro na determinação de fração de vazio da mistura óleo-água pela técnica do auto-transformador e capacitiva.

Fonte: adaptado de KENDOUSH *et al.* (2006)

### 2.4.3 Ultra-som

Na técnica do ultra-som os sensores são dispostos radialmente sobre a superfície da tubulação em uma mesma seção transversal. Estes sensores podem operar como emissores e ou receptores de acordo com a montagem escolhida, de modo que quando um transmissor está sendo excitado, todos os demais funcionam como receptores. Um feixe de ondas que parte do emissor chega até o receptor, caso não seja refletido no caminho. As projeções recebidas são manipuladas por um algoritmo, permitindo que uma estimativa da distribuição espacial de fases seja construída (YUICHI *et al.*, 2009). Chang e Morala (1990) utilizaram o ultra-som para medição do nível de líquido e a fração de vazio média para um escoamento bifásico de ar-água em um tubo na horizontal com diâmetro interno de 20 mm, obtendo resultados para a caracterização dos padrões de escoamento, mas as medições de fração de vazio apresentaram diferenças comparadas com sensores capacitivos, conforme se observa na Fig. 2.9. Além disso, o método não se aplicou ao escoamento do tipo bolhas.

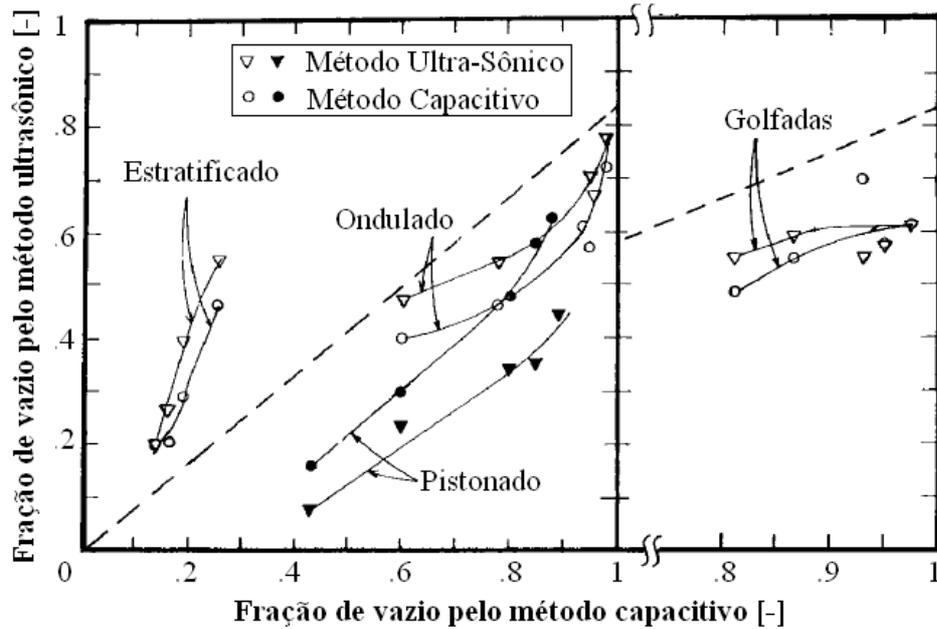


Figura 2.9 Comparação entre os métodos ultra-sônico e capacitivo de medição de fração de vazio em escoamento ar-água.

Fonte: adaptado de CHANG e MORALA (1990)

#### 2.4.4 Processamento de Imagens

Na técnica de processamento de imagens utilizam-se câmeras de filmagem ou fotográficas de alta velocidade. Pode-se obter uma sequência de imagens do escoamento em intervalos muito pequenos ou simplesmente registrar uma imagem instantânea do escoamento. Um algoritmo interpreta cada informação contida em um quadro, a partir da tonalidade de cada pixel, calculando o tamanho da fração de vazio. Ahmed (2011) usou sinais de capacitância em um escoamento ar-óleo em um tubo de 15,8 mm de diâmetro interno, juntamente com os dados obtidos por processamento de imagem do escoamento. A imagem capturada foi digitalizada no programa MatLab para obter o contorno da bolha e os níveis de cinza de cada pixel de uma única bolha para determinar a velocidade, o comprimento alongado e o tamanho da área da bolha, conforme mostra a Fig 2.10. A área média da fração de vazio também foi obtida por meio do cálculo da área sob a curva traçada, dividida pela área total da imagem capturada.

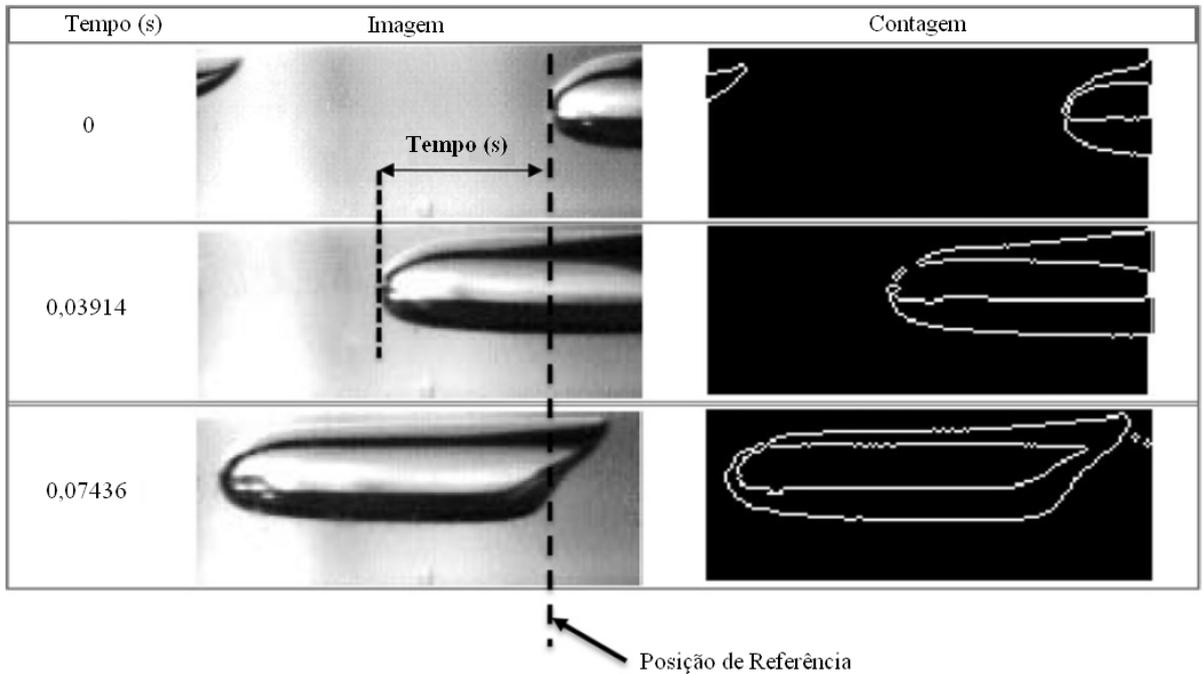


Figura 2.10 Técnica de processamento de imagens para determinação de fração de vazio em escoamento ar-óleo.

Fonte: adaptado de AHMED (2011)

#### 2.4.5 Raios x e Gama

É uma técnica que consiste na emissão de energia eletromagnética de alta intensidade, em geral, raios X ou gama, e na medição da atenuação de sua intensidade após atravessar o meio de interesse, identificando as frações de vazio no escoamento (OLIVEIRA 2007). Os raios X e gama são iguais do ponto de vista físico, e diferem na forma pela qual são produzidos. Ambos são fótons emitidos de uma fonte radioativa, mas com níveis de energia diferentes. Os raios gama são os de maior intensidade, o que sugere uma tendência maior de uso, mas implicando em um aumento dos cuidados com segurança. Devido à menor intensidade de energia dos raios X, a quantidade de fótons identificados pelos sensores é menor, gerando redução na exatidão das medições. Kendoush e Sarkis (2002) a partir do uso de sensores para captar as emissões de raios X calibraram um sensor de fração de vazio em testes estáticos com misturas ar-água em tubulações com diâmetro de 28 e 36 mm e mostraram, conforme apresentado na Fig. 2.11, que as incertezas nas medições diminuíram com o aumento da fração de vazio e aumentaram com o aumento da energia de raios X.

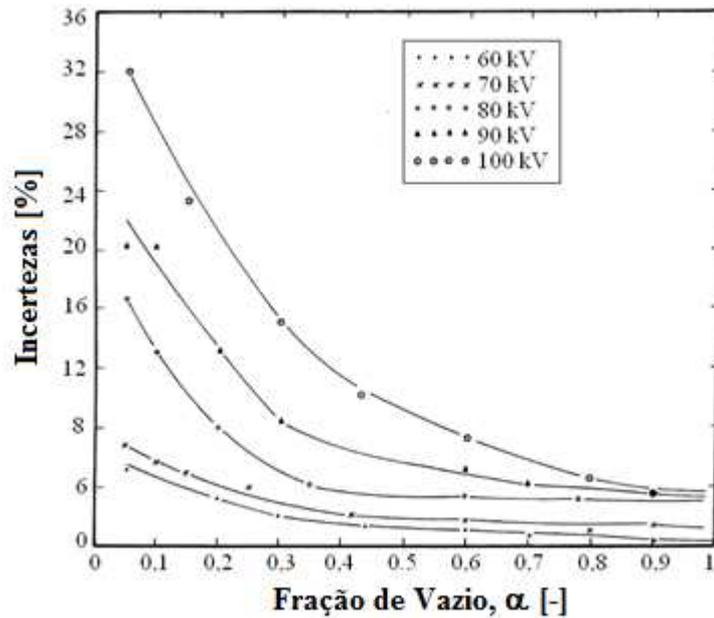


Figura 2.11 Incertezas na medição da fração de vazio em misturas ar-água com a técnica de raios X para diferentes potências de emissão de energia.  
Fonte: adaptado de KENDOUSH e SARKIS (2002)

#### 2.4.6 Sensores por Impedância

A técnica por impedância elétrica é definida como a relação entre tensão e corrente. Conforme o padrão de escoamento o método utilizado pode ser resistivo ou capacitivo. O método resistivo considera o fato de que a condutância de um meio varia de acordo com a composição do escoamento e é usado quando o meio entre os eletrodos é condutivo. A partir de uma corrente elétrica imposta aos eletrodos obtêm-se valores de tensão entre eles, o que permite correlacionar a fração de vazio à condutância. O método capacitivo considera a diferença existente entre as constantes dielétricas das fases líquida e gasosa.

Paranjape *et al.* (2012) realizaram um estudo para a identificação do padrão de escoamento de micro canais com diâmetro de 0,78 mm, baseando-se no método da impedância elétrica. O sensor de impedância foi calibrado a partir da visualização do escoamento, utilizando uma câmera de alta velocidade, conforme mostrado na Fig. 2.12. A imagem capturada foi digitalizada no programa MatLab para obter o contorno da bolha, o volume e a área média das bolhas observadas. A Fig. 2.12 apresenta as imagens dos diferentes padrões associadas à variação da fração de vazio,  $\alpha$ , com o tempo. Segundo os autores, os cálculos pela fração de vazio média se mostram razoáveis e concluíram que o sensor por impedância desenvolvido neste projeto pode ser utilizado para escoamentos bifásicos em micro-canais para a medição de fração de vazio e identificação de padrões de escoamento.

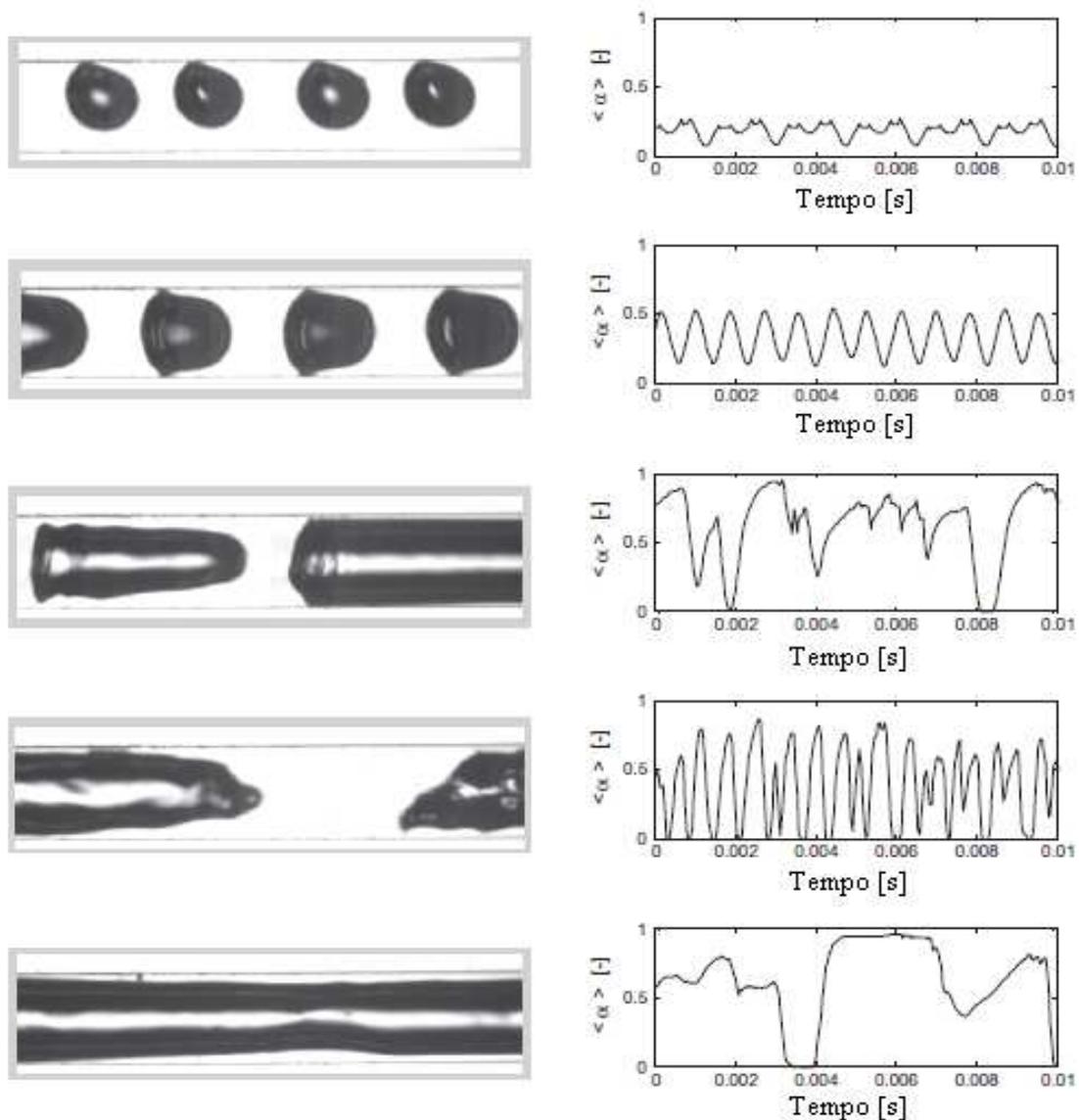


Figura 2.12 Padrões de escoamento: imagens e resposta do sensor de impedância para a fração de vazio.

Fonte: adaptado de PARANJAPE *et al.* (2012)

Rocha e Simões-Moreira (2008) desenvolveram múltiplos sensores de impedância para a análise de padrões de escoamento do tipo bolhas, golfadas, turbulento (*churn*) e medição de fração de vazio em um canal com diâmetro de 52,3 mm na vertical com uma mistura de ar-água. Um circuito eletrônico foi desenvolvido para a geração do sinal e de pós-tratamento de cada um dos sinais dos sensores. Os resultados foram comparados com os de válvulas de fechamento rápido e ferramentas estatísticas, como a função de probabilidade de densidade e correlação cruzada foram aplicados aos sinais dos sensores para obter aglomerados de bolhas, a frequência de bolhas, velocidades e padrões de escoamento. Os

autores informam que estas técnicas foram muito úteis para a análise dos resultados e para as curvas de calibração dos sensores nos ensaios experimentais.

#### 2.4.8 Válvula de Fechamento Rápido

Quando for possível fazer um desvio em um trecho da tubulação da seção de testes, a fração de vazio média pode ser determinada por meio da retenção do escoamento. A utilização de válvulas de fechamento rápido, com atuadores controlados por solenóides, possibilita o aprisionamento de uma parte do fluido que passa em um trecho da tubulação limitado por duas válvulas. Uma escala acoplada ao tubo que aprisiona o fluido identifica o nível de líquido no trecho para a identificação da fração de vazio. A técnica apresenta limitações caso o aprisionamento do fluido ocorra em diâmetros reduzidos e se as fases não se separarem rapidamente, permanecendo a presença de bolhas e a formação de espuma. Elkow e Rezkallah (1996) utilizaram sensores capacitivos do tipo côncavo e do tipo helicoidal para realizar comparações com as válvulas de fechamento rápido e com um densitômetro para a calibração das medições de fração de vazio em uma tubulação vertical com diâmetro interno de 9,53 mm e com uma mistura de ar-água. Os resultados comparativos são apresentados na Fig. 2.13 e os autores observaram uma boa concordância entre as técnicas. Os dados obtidos com os sensores capacitivos apresentaram diferenças de até 5% com as válvulas de fechamento rápido e até 6% com o densitômetro.

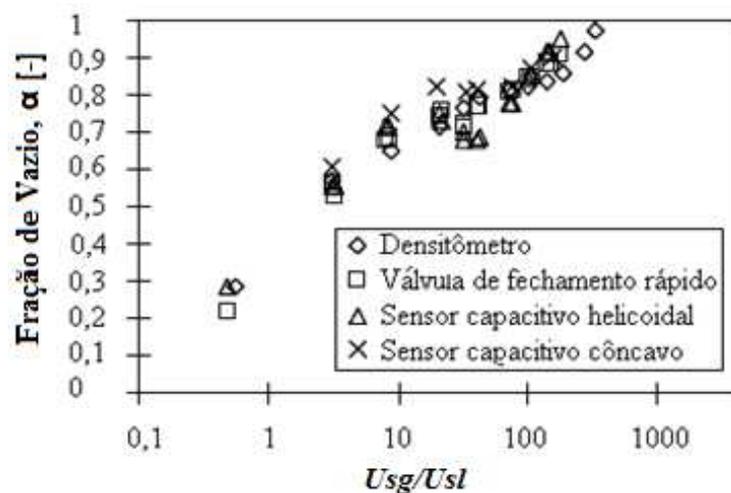


Figura 2.13 Comparação entre as técnicas com válvula de fechamento rápido, sensor capacitivo e densímetro para a medição de fração de vazio.

Fonte: adaptado de ELKOW e RESKALLAH (1996)

### 2.4.9 Sensores Ópticos

A técnica com sensor óptico baseia-se no fenômeno da refração que ocorre com a luz quando ela passa de um meio homogêneo e transparente para outro também homogêneo e transparente, porém de composições diferentes, como por exemplo, o ar e a água. Nessa mudança de meio acontecem alterações na velocidade e na direção de propagação da luz. Jana *et al.* (2007) realizaram testes com um sensor óptico utilizando um laser como emissor de luz e, como receptor, uma resistência dependente de luz (LDR) em uma tubulação de 25,4 mm, nas posições horizontal e vertical com misturas de ar-água e querosene-água, conseguindo identificar diferentes padrões de escoamento e suas transições, comparando os resultados com uma sonda de condutividade, que validava a técnica. Na Fig. 2.14 se apresentam os resultados encontrados pelos autores e as comparações entre as medições do sensor óptico na vertical com o sensor de condutividade, confirmando a viabilidade do uso da técnica para a identificação de padrões de escoamento.

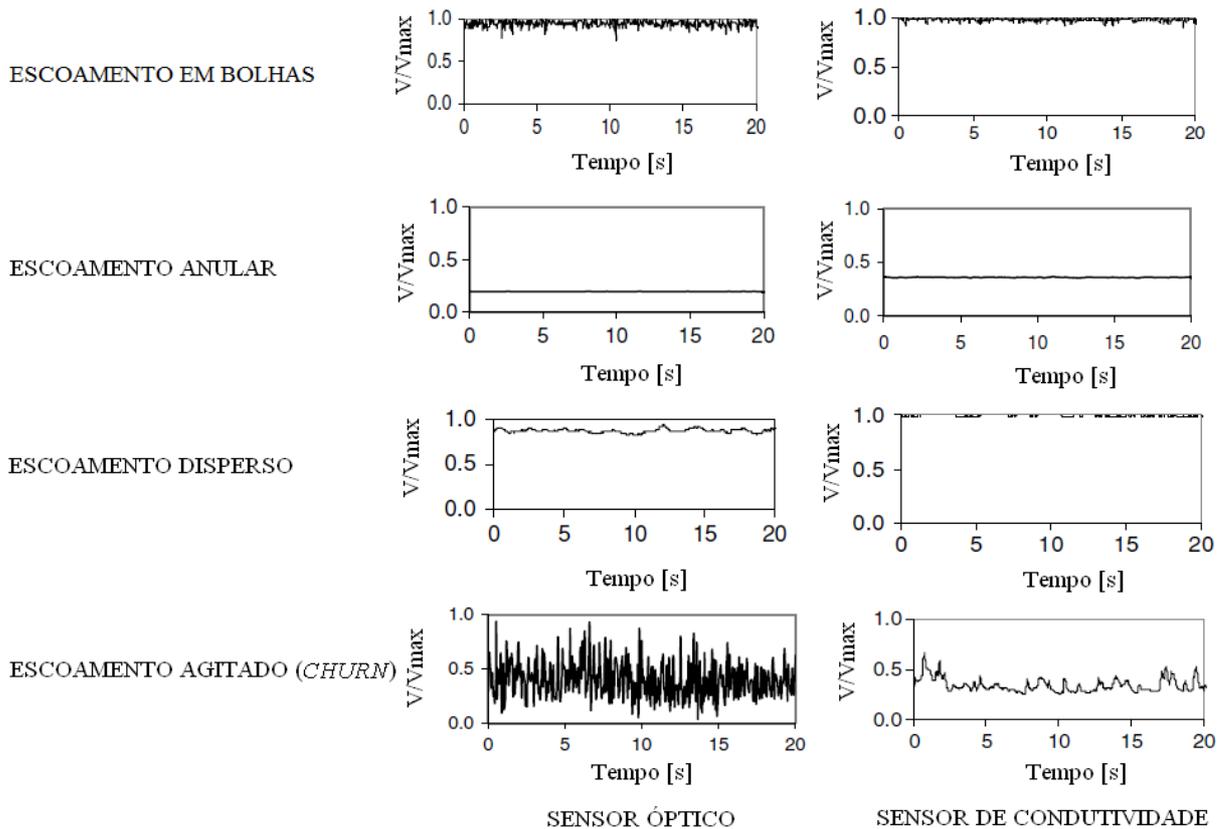


Figura 2.14 Comparação entre as medições do sensor óptico na vertical com o sensor de condutividade.

Fonte: adaptado de JANA *et al.* (2007)

Revellin *et al.* (2006) aplicaram o método óptico para escoamentos em mudança de fase do refrigerante R 134a em um microcanal horizontal de 0,5 mm de diâmetro interno para a identificação de padrões de escoamento e determinação da frequência das bolhas geradas num micro evaporador, das taxas de coalescência destas bolhas e sua distribuição de comprimento, bem como a sua velocidade média. O sensor óptico era constituído de dois lasers e dois fotodiodos na horizontal para a identificação do escoamento, em conjunto com uma câmera de alta velocidade para registros de imagens, como esquematizado na Fig. 2.15. Os autores concluíram que a técnica permite identificar a frequência e a quantidade de bolhas, assim como o tamanho das bolhas. As transições de padrão de escoamento e as medições de fração de vazio só puderam ser no padrão de escoamento pistonado, conforme assinalado nos gráficos da Fig. 2.16.

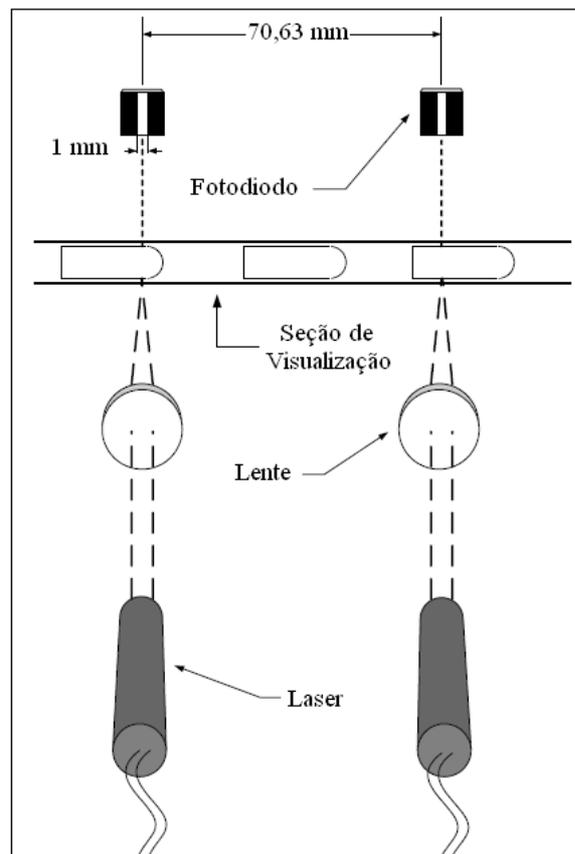


Figura 2.15 Sensor óptico com laser para identificação de padrões de escoamento em um micro canal e escoamento com mudança de fase.

Fonte: adaptado de REVELLIN *et al.* (2006)

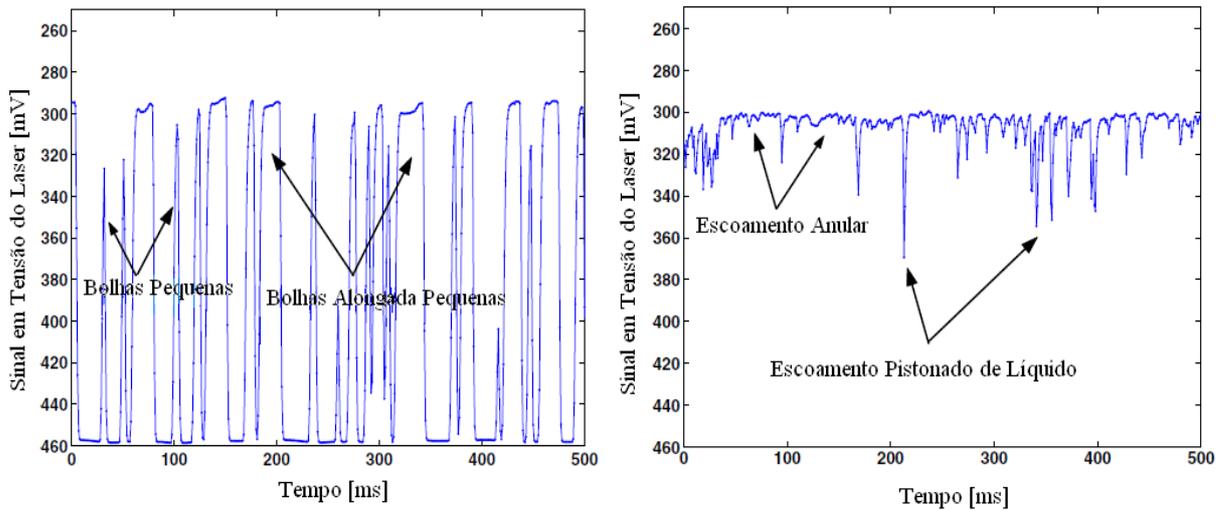


Figura 2.16 Análise dos padrões de escoamento através dos sinais do sensor óptico na ebulição em um micro canal.

Fonte: adaptado de REVELLIN *et al.* (2006)

As técnicas experimentais apresentadas mostram diferenças distintas na sua implementação, com vantagens e desvantagens de acordo com o objetivo de cada experimento proposto. Nas técnicas apresentadas não é confirmado qual é a melhor ou qual tem maior precisão. A diversidade das situações de medição experimental faz com que diversas técnicas possam ser desenvolvidas e aplicadas no ensaio experimental.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sensor óptico e de uma metodologia para medidas de fração de vazio em um escoamento ar-água em um minicanal horizontal de 2,6 mm de diâmetro.

Neste capítulo é apresentada a bancada experimental, o projeto do sensor óptico desenvolvido, a descrição e detalhes das medições e também a metodologia usada para validar a técnica usando o processamento de imagens obtidas por câmera digital de alta velocidade.

A utilização da técnica do sensor óptico foi escolhida porque é de fácil adaptação do sensor no tubo e o baixo custo para a montagem do sensor.

#### 3.1 BANCADA DE TESTES PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO

A bancada experimental utilizada para reproduzir um escoamento bifásico ar-água em um minicanal horizontal de 2,6 mm de diâmetro (seção de testes) é representada no esquema da Fig. 3.1. No esquema se pode observar o circuito onde se tem a mistura ar-água (1) a diferentes condições, a qual passa através da seção de testes (2), passando pelo sensor óptico (3) e pela seção de visualização do escoamento (4), com uma câmara de alta velocidade e um sistema de iluminação. O circuito permite a análise dos padrões de escoamento e da fração de vazio com o uso de um sensor óptico projetado e desenvolvido neste trabalho e o processamento de imagens.

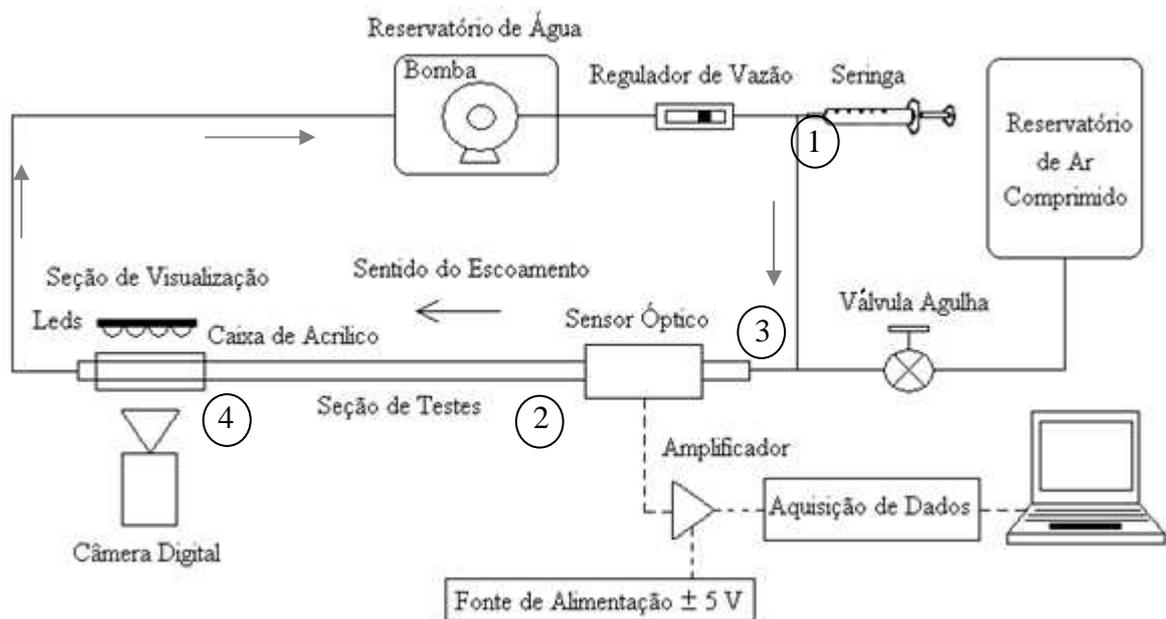


Figura 3.1 Esquema da bancada experimental

A mistura de ar e água pode ser feita ou com o acionamento de uma válvula do tipo agulha, a qual libera a vazão do gás do reservatório de ar comprimido no sistema, ou a mistura pode ser realizada através de uma seringa com capacidade máxima de 0,5 ml, que pode ser vista na Fig. 3.2. Na mesma figura se encontra o regulador de vazão da água.

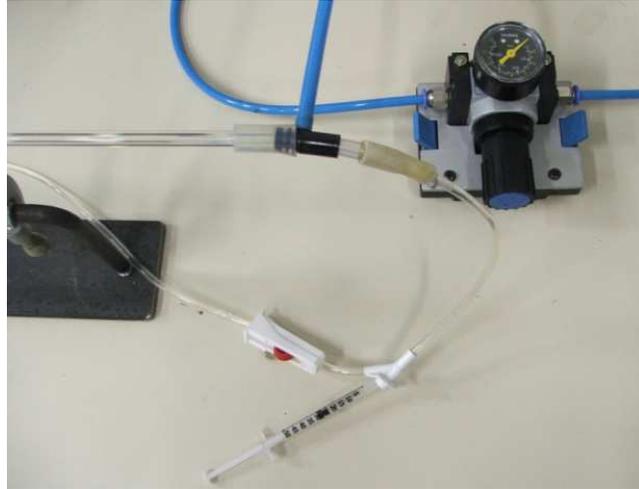


Figura 3.2 Sistema adotado para realizar a mistura de ar e água (seringa) e o regulador de vazão da água.

A seção de testes é um tubo de vidro com diâmetro interno de 2,6 mm e comprimento de 1200 mm. O sensor óptico desenvolvido foi instalado no tubo, conforme mostrado na Fig. 3.3. Junto ao sensor está instalado o circuito de amplificação com o propósito de reduzir ruídos gerados na aquisição de dados.

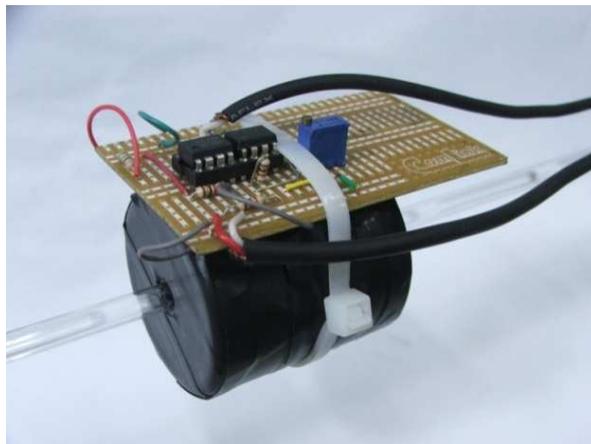


Figura 3.3 Sensor óptico desenvolvido e fixado na seção de testes.

Na parte final da seção de testes, tem-se a visualização do escoamento com uma câmera digital IDT modelo MotionPro Y4. Na Fig. 3.4 é possível ver que o tubo passa através de uma caixa de acrílico com água, para reduzir a distorção das imagens provocada pelo formato cilíndrico do mesmo. Atrás da caixa de acrílico, onde está sendo projetada a luz, foi colada uma folha de papel vegetal na superfície externa da caixa para uma distribuição mais homogênea da iluminação. A iluminação é fornecida por um conjunto de LEDs da cor branca gerando 1500 lux, suficiente para realçar o contorno das bolhas na filmagem.

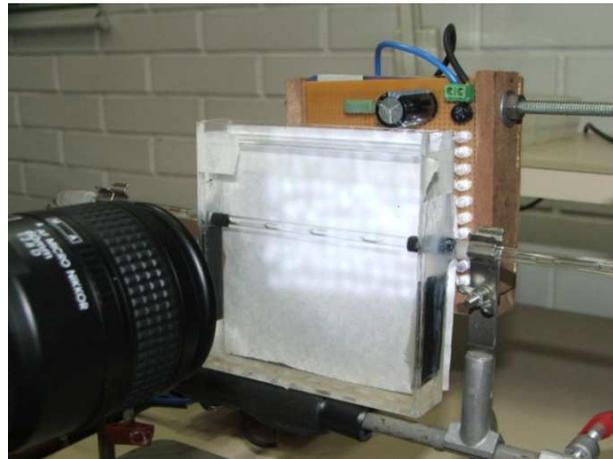


Figura 3.4 Seção de visualização do escoamento.

Após a seção de visualização o tubo é conectado a um reservatório para a separação do ar com a água, conforme se verifica na Fig. 3.5. Dentro do reservatório se encontra uma bomba submersa que faz recircular somente água ao sistema novamente. O ajuste da vazão do líquido é feito por um regulador, que restringe o diâmetro da mangueira antes da conexão com a seção de testes.



Figura 3.5 Reservatório e a bomba de água.

A Fig. 3.6 mostra uma visão geral da bancada experimental e com a posição dos seguintes componentes da bancada: Caixa de acrílico, conjunto de LEDs, seção de testes, sensor óptico e o circuito amplificador, fonte de alimentação simétrica de 5 V, válvula agulha, câmera digital, reservatório de água com a bomba, placa de aquisição de dados, o regulador de tensão, a seringa e computadores com a imagem da câmera digital e o sinal do sensor óptico.

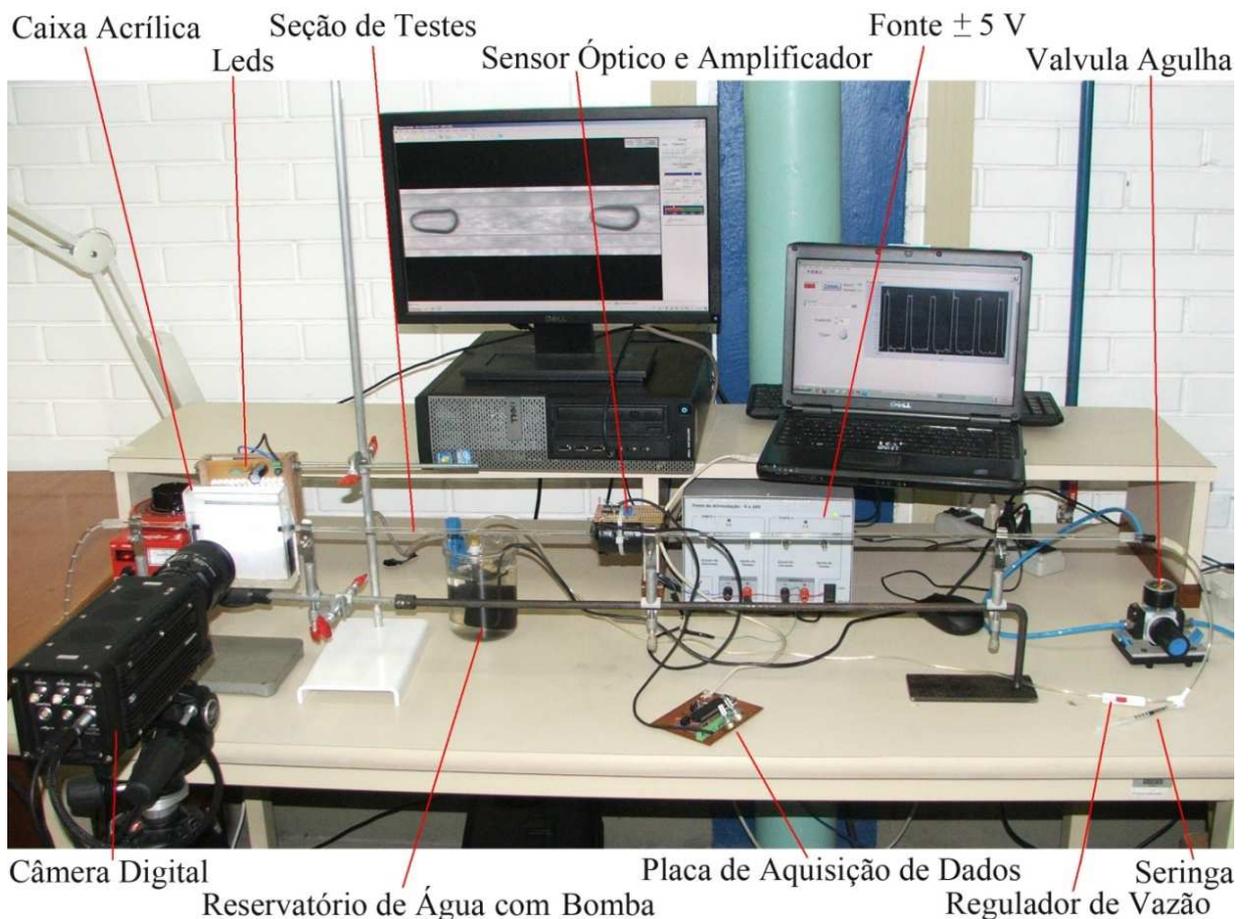


Figura 3.6 Bancada experimental.

### 3.2 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SENSOR ÓPTICO

No projeto do sensor óptico foram consideradas a facilidade de se acoplar o sensor ao tubo de pequeno diâmetro, a maior sensibilidade possível e a diminuição dos efeitos externos para que aconteça a predominância somente da luz do LED no LDR. A solução foi utilizar um bastão de nylon no formato de um cilindro com as dimensões de 50 mm de comprimento e 45 mm de diâmetro, para o LDR não ocupar todo o comprimento do furo e para que a luz externa não o atingisse. No centro deste cilindro foi feito um furo com diâmetro de 6,5 mm ao

longo da peça para a inserção do tubo de vidro. No sentido perpendicular ao furo central foi feito outra perfuração com diâmetro de 3 mm e do mesmo comprimento do diâmetro do cilindro de nylon para a instalação do LED e do LDR nas extremidades, como se vê na Fig. 3.7.

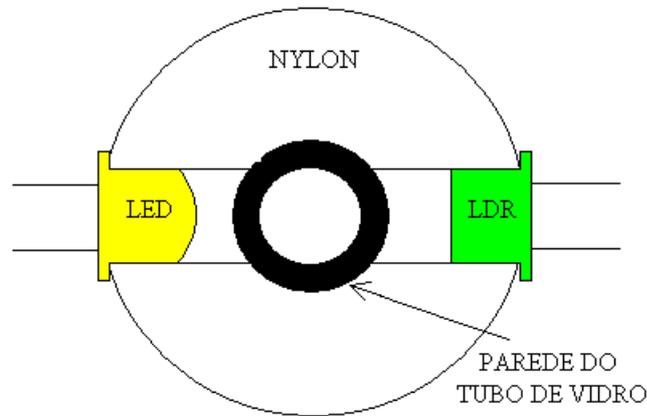


Figura 3.7 Montagem do sensor óptico.

O lado externo do sensor é todo revestido com uma fita isolante preta, como mostrado na Fig. 3.3 para bloquear a incidência de luz externa no LDR. Nesta superfície está fixado o circuito eletrônico desenvolvido, conforme detalhado no Apêndice A, que amplifica o sinal gerado pelo LDR. O circuito foi instalado junto ao sensor para que houvesse uma redução dos ruídos no sinal que é amplificado e enviado à placa de aquisição de dados através de um cabo blindado, como é mostrado na Fig. 3.3. Um segundo cabo blindado faz a conexão entre o circuito do sensor óptico e uma fonte de tensão contínua e simétrica de 5 V.

A resposta do circuito eletrônico do sensor óptico deve oscilar entre 0 e 1 V, conforme a atenuação da luz no LDR, representando a variação de fração de vazão na tubulação. Quando houver 0 V significa que existe uma fase totalmente líquida, para 1 V existe uma fase totalmente gasosa e para misturas intermediárias teremos níveis de tensão intermediários.

A saída do circuito é ligada a uma placa de aquisição de sinal Fig. 3.8, que lê o sinal a uma taxa de amostragem de 11,52 kHz convertendo o sinal analógico para digital e enviando ao computador por uma porta de comunicação USB. Este sinal é interpretado no computador por um algoritmo desenvolvido no programa LabVIEW, gerando gráficos com a variação de tensão no sensor óptico.

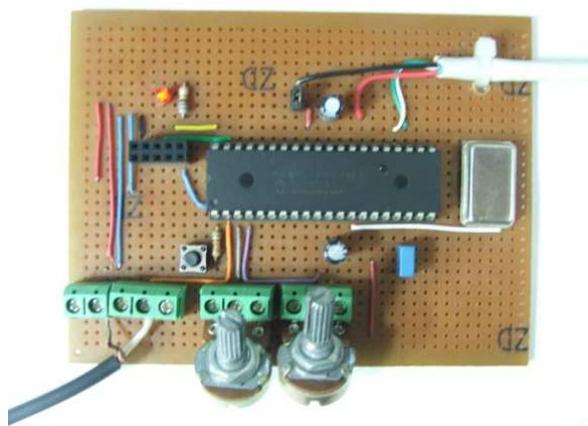


Figura 3.8 Placa de aquisição do sinal do sensor óptico.

### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.3.1 Testes Preliminares de Definição da Metodologia de Validação do Sinal do Sensor Óptico.

Inicialmente, foram realizados testes com uma geometria da seção de testes e do sensor óptico e condições de vazões de água e ar de modo a avaliar a resposta do sensor e a metodologia proposta. As medições da vazão de água foram feitas em copo de béquer com uma graduação de 50 a 400 ml com a escala de 50 ml.

Assim, os primeiros ensaios foram realizados com uma seção de testes com comprimento de 400 mm e o diâmetro do cilindro do sensor óptico de 15 mm (Fig. 3.9). A vazão de água ( $Q_l$ ) foi de 312 ml/min, correspondente a um fluxo mássico ( $G$ ) de 979,4 kg/(m<sup>2</sup>s), e a vazão de ar que entrava no sistema, foi apenas controlada, sem nenhuma medição da quantidade de ar injetado. O sensor óptico nestes primeiros testes mediu 0 V para um escoamento totalmente líquido e 0,45 V para um escoamento totalmente gasoso. O ajuste da vazão de ar foi regulado para que entrasse no sistema somente uma bolha e que não fosse maior que o tamanho de um frame da câmera digital, o qual é a referência para a medição com o sensor óptico. A imagem obtida pela câmera digital apresentou tons de cinza e um contorno bem definido, como se vê na Fig. 3.10

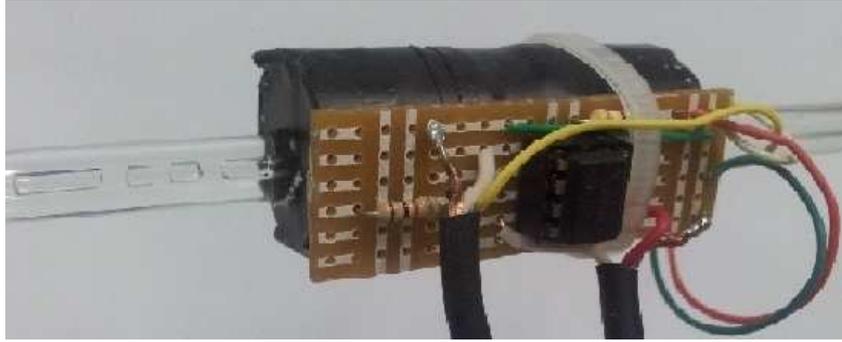


Figura 3.9 Sensor óptico com diâmetro de 15 mm.

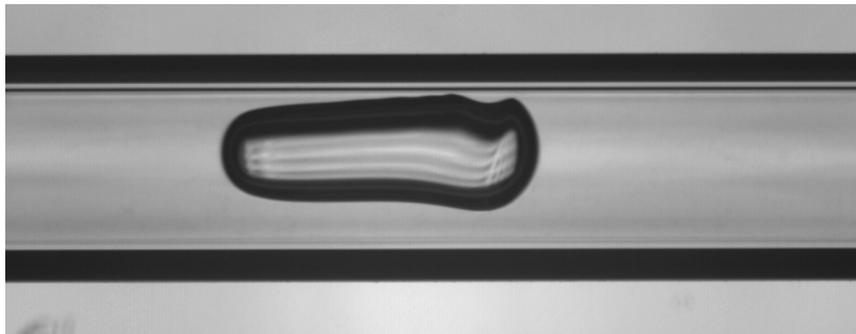


Figura 3.10 Imagem obtida pela câmera digital nos testes preliminares.

Sabendo que o diâmetro interno do tubo é de 2,6 mm, foi realizada uma medição das dimensões do diâmetro interno na tela do computador usando uma régua gráfica do programa Pixel Ruler, Fig. 3.11. O mesmo programa foi utilizado para inserir na imagem um quadrado com lateral de 1 mm, que informa a quantidade de pixels em  $1 \text{ mm}^2$ . Para contar a quantidade de pixels dentro da área da bolha é necessário remover as tonalidades de cinza e deixar a imagem somente em duas cores, branca e preta realizando um ajuste de brilho e contraste no programa PhotoShop, Fig. 3.12. Assim, a nova imagem foi chamada de arquivo máscara.

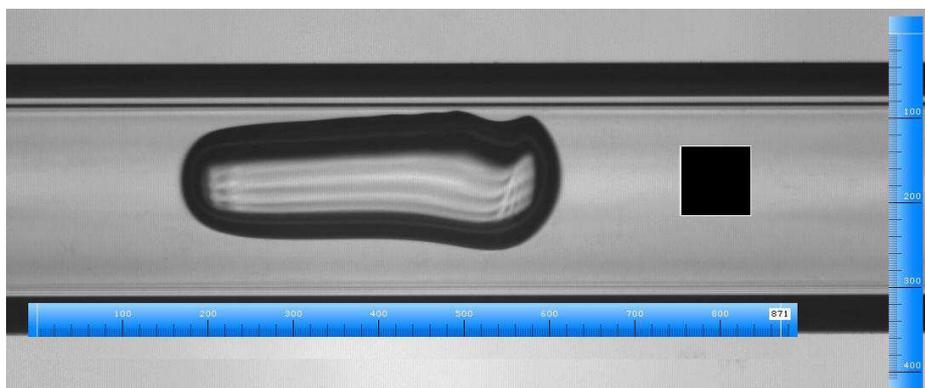


Figura 3.11 Medições da imagem de escoamento usando régua gráfica.

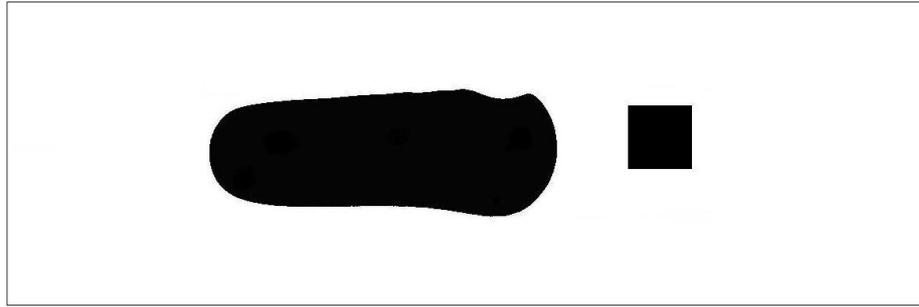


Figura 3.12 Arquivo máscara de uma bolha.

O arquivo máscara da bolha passa por um algoritmo, conforme listado no Apêndice B, que conta os pixels brancos e pretos, usando o programa MatLab. Na Fig. 3.13, temos o resultado da contagem de pixels do quadrado de referência de  $1 \text{ mm}^2$  com 6561 pixels. Para este teste preliminar, nas condições descritas, a bolha gerada somou 59207 pixels.

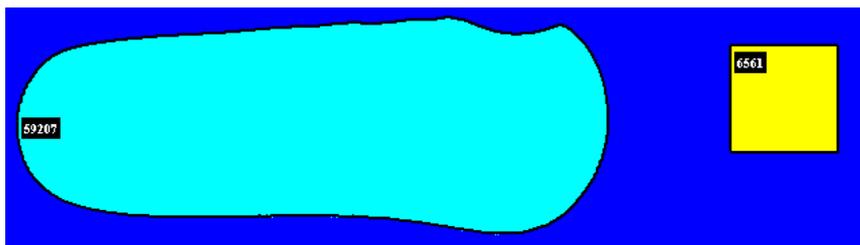


Figura 3.13 Área da bolha em pixels.

Já o sinal gerado pelo sensor óptico para a bolha da imagem da Fig. 3.10 é uma curva da variação da tensão em função de tempo, tal como é mostrado na Fig. 3.14. Com o programa Curve Expert se busca a equação que melhor representa o comportamento desta curva e esta é incluída em um algoritmo, Apêndice C, desenvolvido no programa MatLab para calcular a área sob a curva.

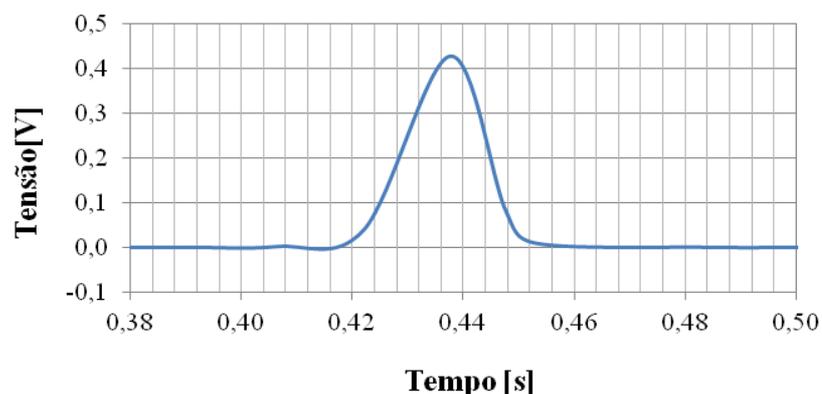


Figura 3.14 Sinal do sensor óptico.

Esta metodologia foi aplicada para trinta testes realizados com aquisição de imagens em cada condição. Cada área da bolha obtida em pixels por quadro, chamado valor de pixel ( $val_{pix}$ ), é comparada com o valor da área obtida sob a curva do sinal do sensor óptico, chamado valor óptico ( $val_{opt}$ ). Como estes valores estão em escalas e unidades diferentes, para poder relacioná-los, os valores são normalizados pelo valor máximo de cada um, tal como apresentado nas Eq. 3.1 e 3.2.

$$Nval_{pix} = \frac{val_{pix}}{val_{pix,max}} \quad (3.1)$$

$$Nval_{opt} = \frac{val_{opt}}{val_{opt,max}} \quad (3.2)$$

Deste modo se tem valores adimensionais entre 0 e 1, que representam as áreas adimensionais obtidos pelas imagens e pelo sensor óptico. A Fig. 3.15 apresenta o gráfico comparativo dos valores normalizados para os diferentes testes realizados.

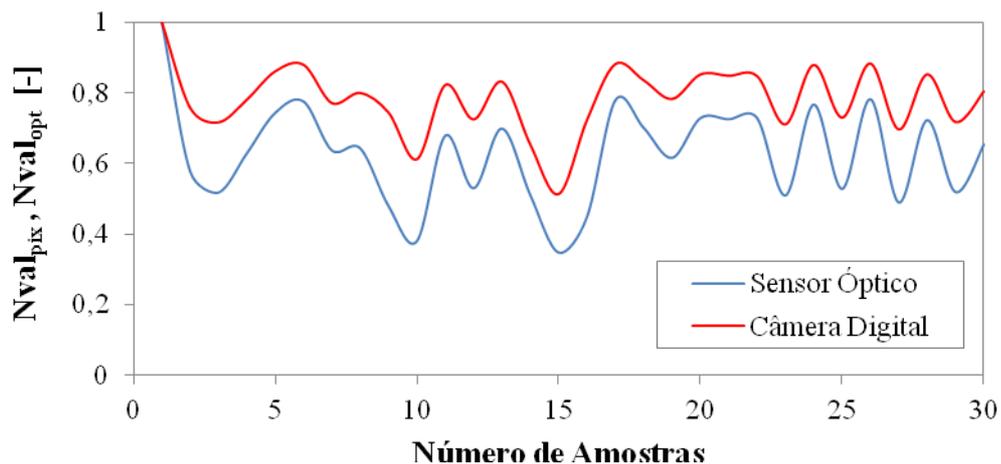


Figura 3.15 Comparação entre as medições de área do sensor óptico e da imagem da bolha obtida pela câmera digital.

O ajuste entre o sinal do sensor óptico e as imagens geradas nos vários ensaios de cada teste foi analisado através do parâmetro estatístico erro médio relativo (*EMR*), conforme Eq. 3.3, o qual informa o quanto uma curva está defasada em relação à outra.

$$EMR = \frac{1}{n} \sum \frac{|Nval_{pix} - Nval_{opt}|}{Nval_{opt}} \quad (3.3)$$

Do exemplo anterior dos ensaios preliminares, foi encontrado um erro médio relativo de 28,15% nas medições do sensor óptico com relação às medições em pixels capturadas pela imagem, Fig. 3.15.

Como as curvas da Fig. 3.15 apresentam comportamento semelhante, porém com defasagem entre elas, foi necessário equalizá-las e para isto foi utilizado o valor do erro médio relativo como coeficiente de correção na equação da curva normalizada do sensor óptico (*CNval<sub>opt</sub>*), Eq. 3.4.

$$CNval_{opt} = Nval_{opt} + (Nval_{opt} EMR) \quad (3.4)$$

Assim as medições fornecidas pela imagem em pixels podem ser comparadas com as medições feitas com o sensor óptico, como se pode observar na Fig. 3.16.

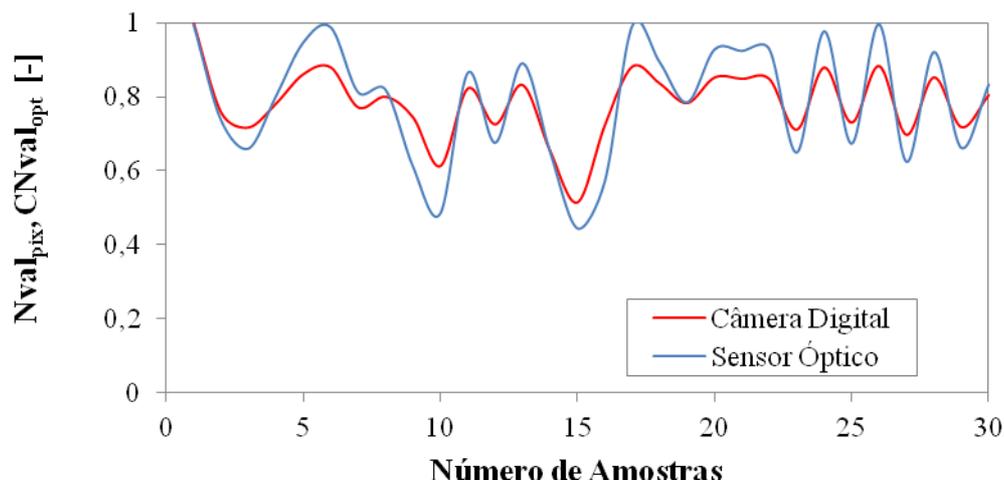


Figura 3.16 Comparação entre as medições de área do sensor óptico e da imagem da bolha obtida pela câmera digital corrigida.

### 3.3.2 Ajustes da Bancada Experimental e Definição dos Testes a Serem Realizados

Dos primeiros testes verificou-se que a fonte de luz, utilizada junto a câmara digital, interferia no sinal do sensor óptico, gerando ruído ao longo do tempo, como mostra a Fig. 3.17, e alterando o sinal durante a passagem da bolha, como é possível ver na Fig. 3.18, com o sinal ampliado do mesmo teste.

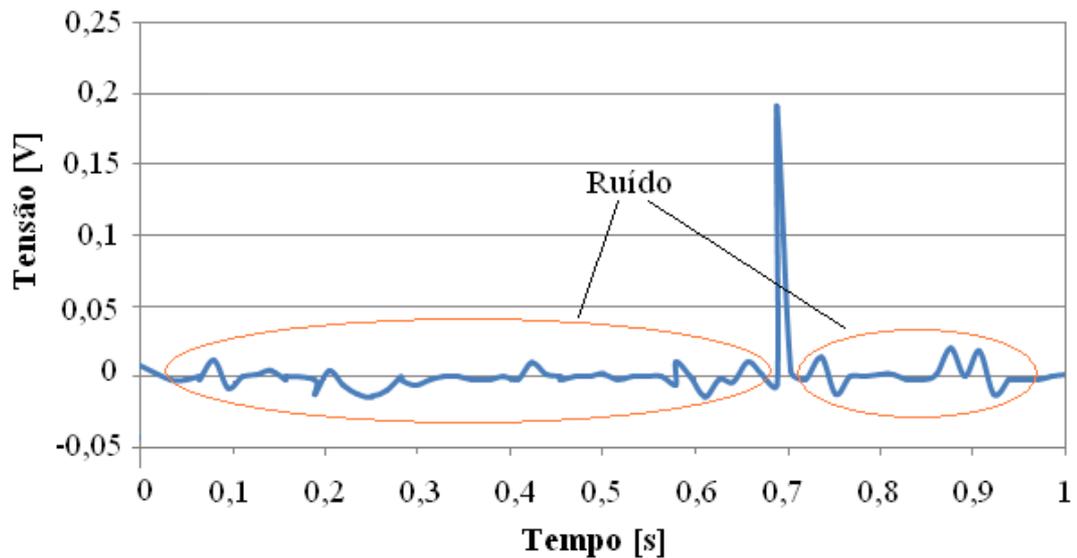


Figura 3.17 Ruído no sinal do sensor óptico.

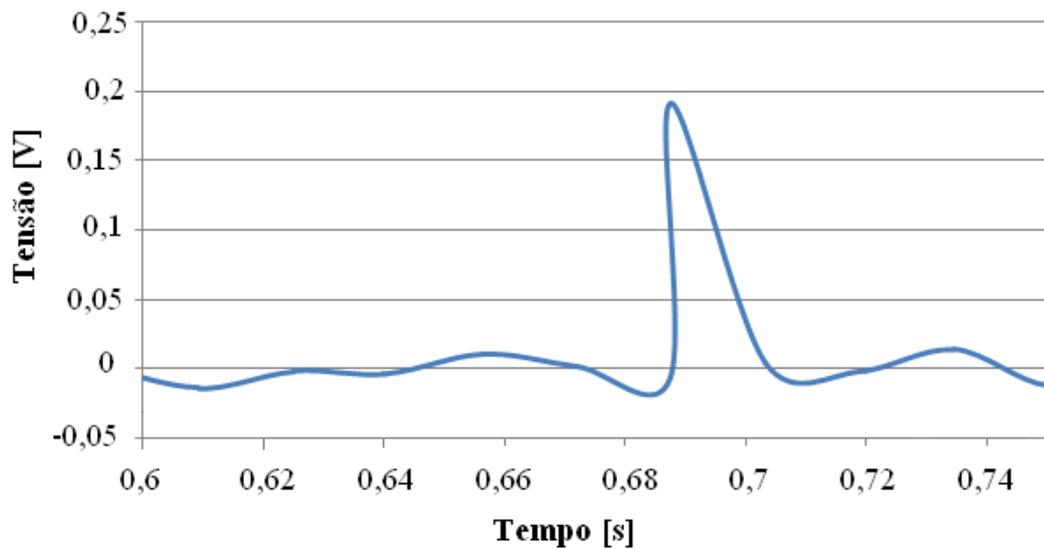


Figura 3.18 Interferência da luz da câmara digital no sensor óptico.

Para contornar este problema foi alterado o comprimento da seção de testes e a distância entre a fonte de luz e o sensor óptico foi aumentada para 1000 mm e o diâmetro do

sensor óptico de 15 mm para 45 mm, conforme Fig. 3.19. A alteração no diâmetro do sensor óptico aumentou a distância entre o LDR e a parede do tubo de vidro para que a incidência de luz predominante no LDR fosse da luz emitida pelo LED. O circuito eletrônico foi ajustado para variar entre 0 e 1 V.

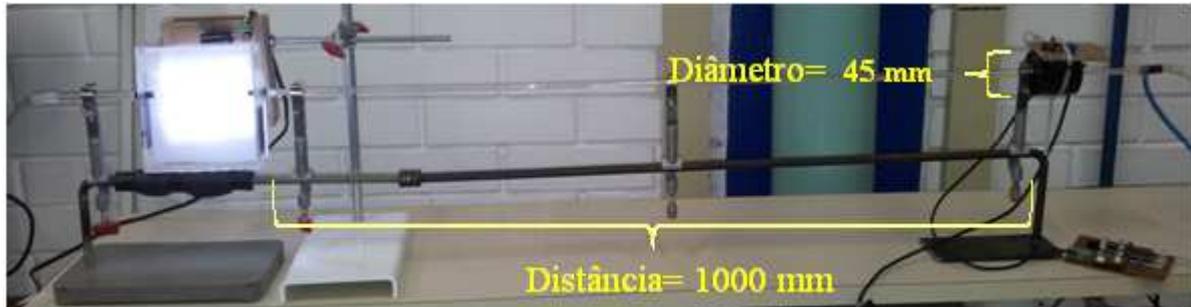


Figura 3.19 Alterações na seção de testes e no tamanho do sensor óptico.

Além disso, a seringa para misturar ar com a água Fig. 3.2, com capacidade volumétrica de 0,5 ml, foi previamente calibrada com água, já que nestas condições o ar é uma substância incompressível, utilizando uma balança de precisão (modelo AL200 - 0,02 a 200 g). O erro médio associado à escala de medição foi de 0,0098 ml.

As vazões de água foram estabelecidas com o auxílio de uma proveta com uma graduação de 10 a 200 ml e escala de 2 ml, associadas a posições no regulador de vazão (Fig. 3.2). Da mesma forma a proveta foi previamente calibrada na balança de precisão (modelo Mark500 – 500g) e resultou em um erro médio da leitura de 1 ml.

Foi estabelecido um conjunto de condições para os testes a serem realizados, conforme Tab. 3.1.

Tabela 3.1 Condições de testes do escoamento bifásico para análise da técnica do sensor óptico e do processamento de imagens.

Testes	Água, $Q_l$ [ml/min]	Ar, $vol_{ar}$ [ml]
1	160	0,05
2		0,1
3	123	0,05
4		0,1
5	63	0,05
6		0,1

Os volumes de ar foram medidos na seringa e injetados na seção de testes manualmente em cada teste, de acordo com a Tab. 3.1. Para cada condição de teste foram realizados 60 repetições, permitindo verificar a repetibilidade do experimento.

Os primeiros testes realizados considerando as alterações na bancada e no sensor apresentaram resultados satisfatórios, com relação à redução dos ruídos. Na Fig. 3.20 é apresentado o sinal do sensor óptico no ensaio com a nova configuração para  $Q_l = 160$  ml/min e o  $vol_{ar} = 0,05$  ml. As marcações em círculos nas cores laranja, verde e vermelho representam uma aproximação em área das bolhas. Na marcação com círculo na cor laranja, foi possível observar que o sensor não foi rápido o suficiente para medir a diferença de diâmetro com duas bolhas encostadas. A causa deste erro na medição deve ser porque o LDR não é rápido para perceber esta atenuação da luz ou o resíduo de ruído no sinal interfere ainda interfere na medição.

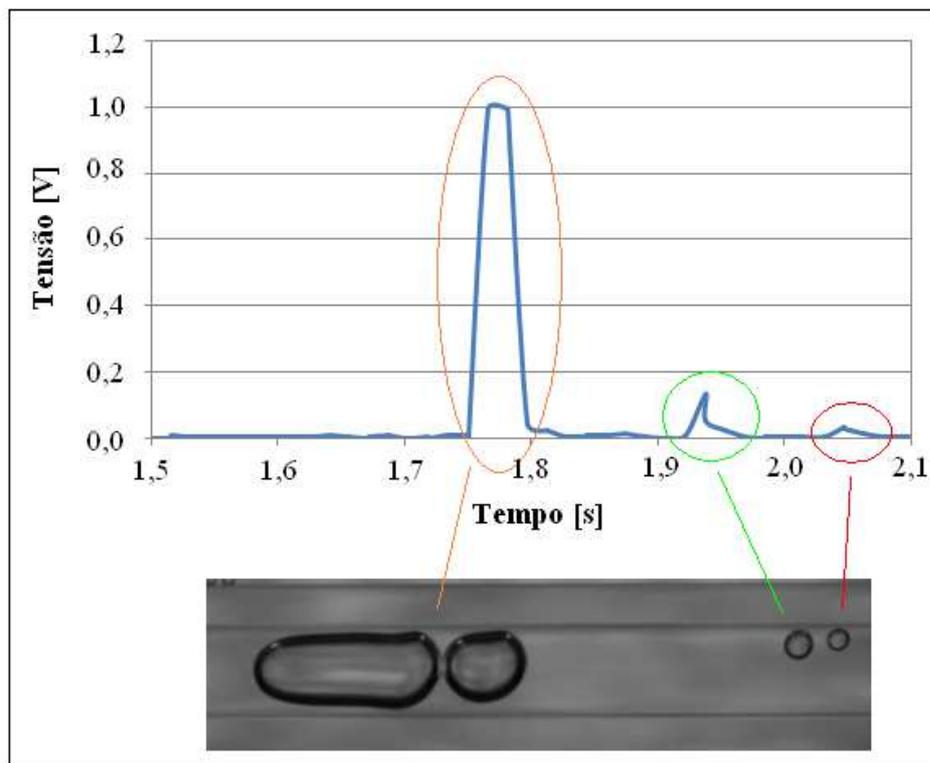


Figura 3.20 Sinal do sensor óptico e padrão de escoamento para a nova configuração da bancada e teste a  $Q_l = 160$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,05$  ml.

A Fig. 3.21 mostra outro teste de ajuste onde se observa novamente o sinal do sensor associado ao padrão das bolhas.

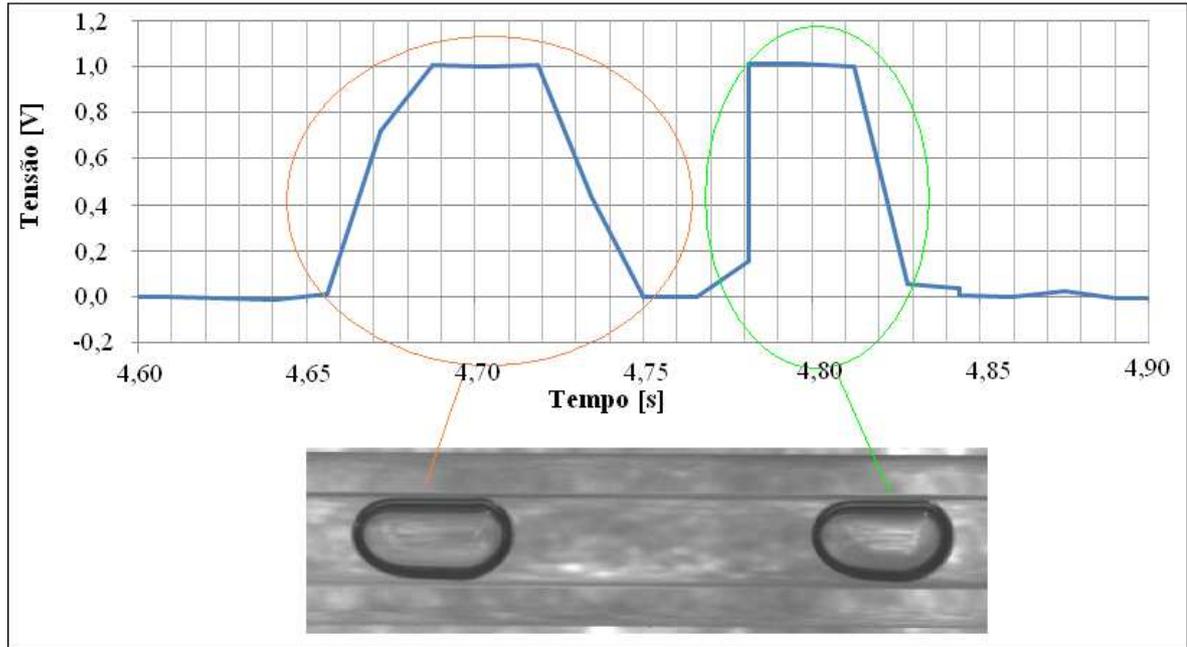


Figura 3.21 Sinal do sensor óptico associado ao padrão de escoamento.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DO SENSOR ÓPTICO

A técnica do sensor óptico para análise do escoamento bifásico foi validada por comparação com a técnica de processamento de imagens obtidas com o uso da câmera de alta velocidade.

Para a avaliação dos resultados foi usada uma função estatística denominada coeficiente de correlação, ou *correl*. O coeficiente de correlação permite examinar a relação linear entre os dois conjuntos de dados e a resposta é um valor adimensional que varia de -1 a 1, indicando o quanto os resultados são positivamente (ou diretamente) correlacionados e negativamente (ou inversamente) correlacionados. Quanto mais próximo de -1 ou 1 for o resultado da correlação, mais semelhantes são os resultados e quanto mais próximo de 0, tende a uma condição em que não se tem uma correlação entre os dados.

O erro médio relativo informa o quanto uma curva está defasada da outra.

Os resultados dos testes com a vazão da água ( $Q_l$ ) é de 160 ml/min e volume de ar ( $vol_{ar}$ ) de 0,1 e 0,05 ml, são apresentados nas Fig. 4.1 e 4.2 respectivamente.

Para a condição de maior volume de ar, 0,1 ml, (Fig. 4.1) foi encontrado um  $EMR= 2,5\%$  e a correlação entre o sinal do sensor óptico (área da curva tensão versus tempo) e as imagens (área em pixels) foi igual a 0,63. Quando o volume de ar foi menor, 0,05 ml, para mesma vazão de água, o  $EMR = 5,1\%$  e  $correl = 0,65$ , o que indica uma boa concordância entre os resultados do sensor óptico e das imagens.

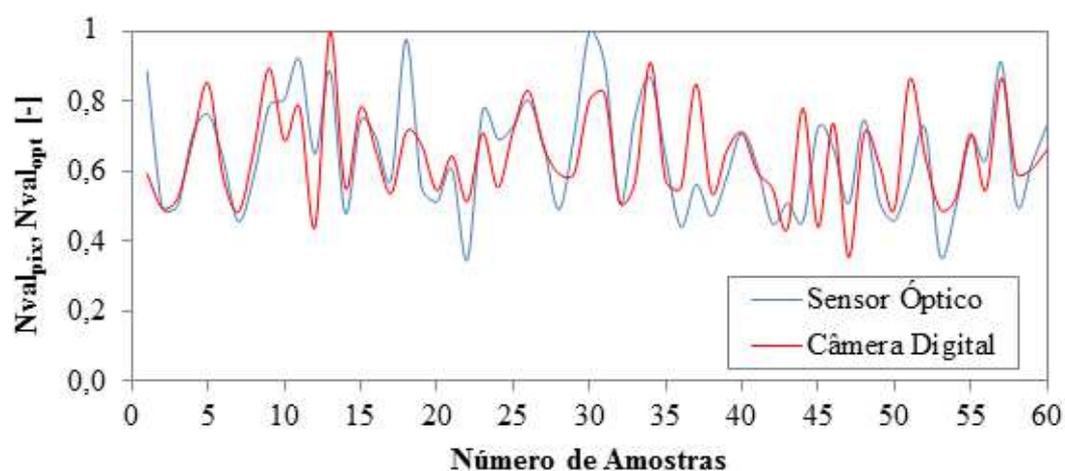


Figura 4.1 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 160$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,1$  ml.

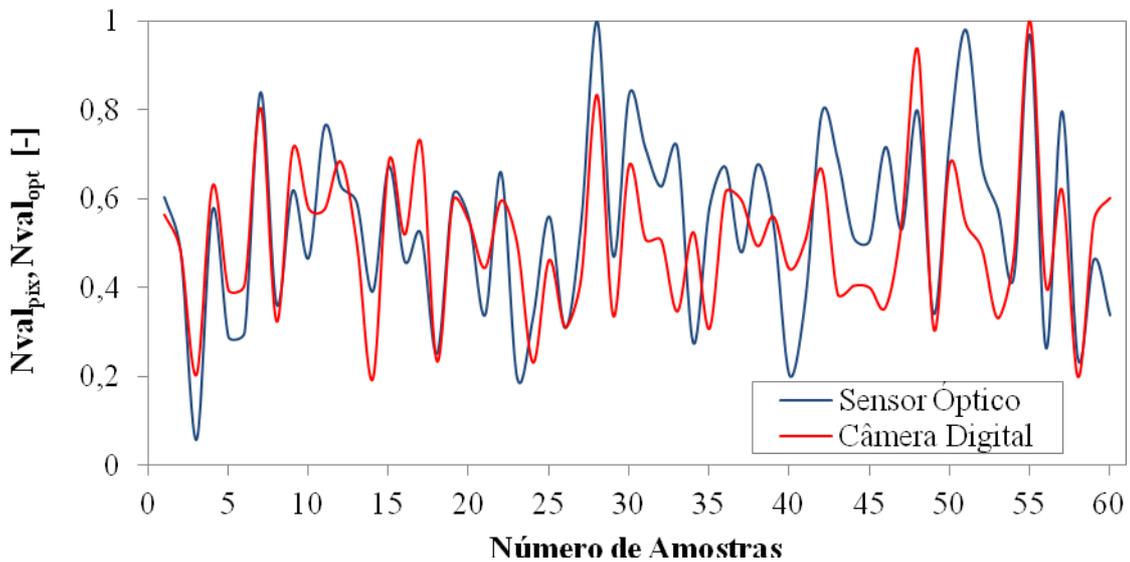


Figura 4.2 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 160$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,05$  ml.

Os resultados dos testes com a vazão da água ( $Q_l$ ) de 123 ml/min e volume de ar ( $vol_{ar}$ ) de 0,1 e 0,05 ml, são apresentados nas Fig. 4.3 e 4.4 respectivamente. Valores de  $EMR = 6,1\%$  e  $correl = 0,41$  foram obtidos para a primeira condição de volume de ar e  $EMR = 13,8\%$  e  $correl = 0,04$  para a segunda.

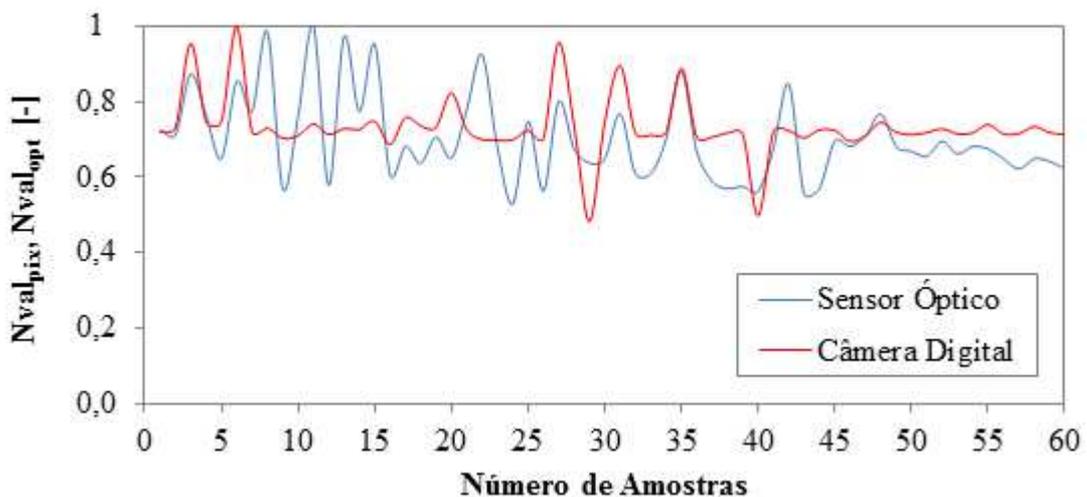


Figura 4.3 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 123$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,1$  ml.

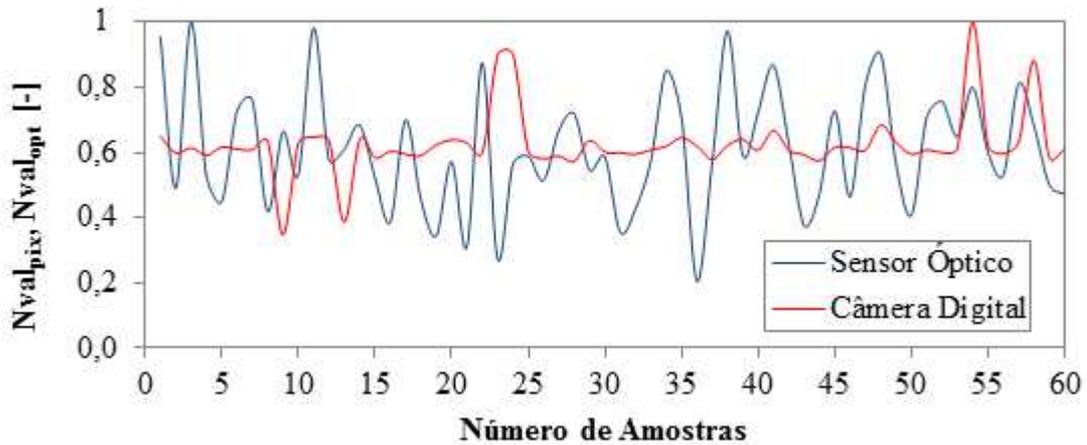


Figura 4.4 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 123$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,05$  ml.

Para o último conjunto de condições testadas, a vazão da água ( $Q_l$ ) de 63 ml/min e volume de ar ( $vol_{ar}$ ) de 0,1 e 0,05 ml, as comparações são apresentadas nas Fig. 4.5 e 4.6 respectivamente. Nestes casos foram encontrados  $EMR = 7,3\%$  e  $correl = 0,17$  para o maior volume de ar e  $EMR = 16,2\%$  e  $correl = -0,05$  para a condição de menor volume de ar.

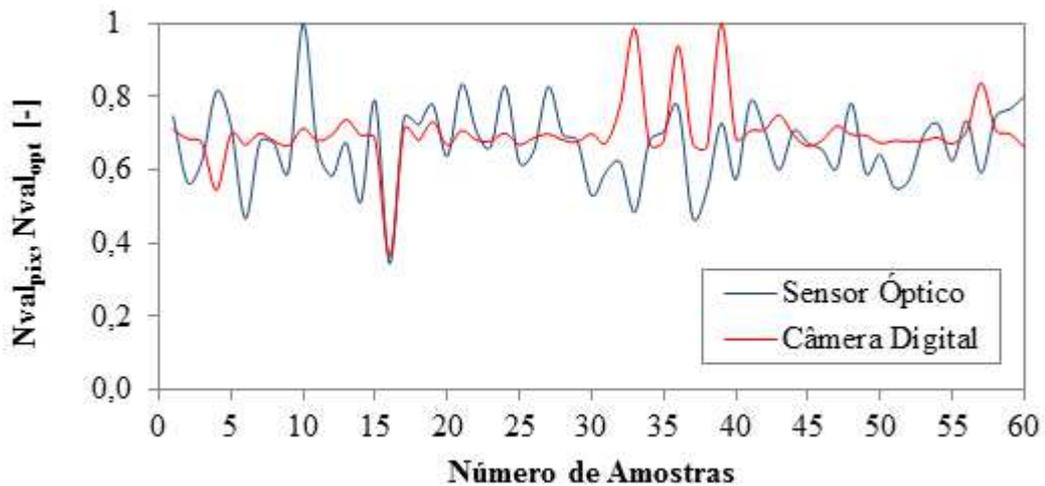


Figura 4.5 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 63$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,1$  ml.

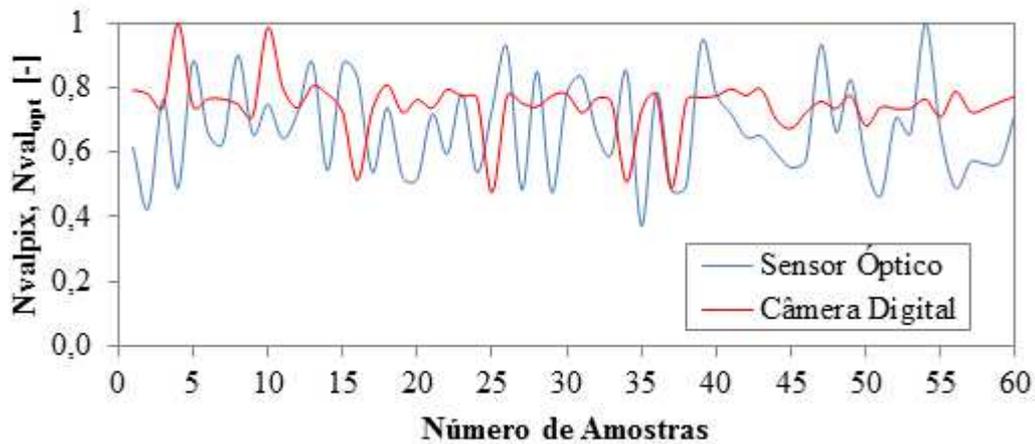


Figura 4.6 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 63$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,05$  ml.

Um resumo dos resultados da correlação e do erro médio relativo de todos testes realizados é apresentado na Fig. 4.7 e 4.8, respectivamente. Os resultados do erro médio e do coeficiente de correlação mostram que para a menor vazão da água,  $Q_l = 63$  ml/min e os dois volumes de ar testados, obtiveram-se os piores resultados e a correlação entre os dados é praticamente nula. O motivo deste resultado foi observado durante o ensaio. A baixa vazão do líquido e também a pressão interna no tubo, fazem com que o mesmo volume de ar, ao entrar no tubo, alterasse seu padrão de escoamento ao longo da seção de testes e ao chegar na seção da visualização o padrão era diferente de quando havia passado pelo sensor óptico.

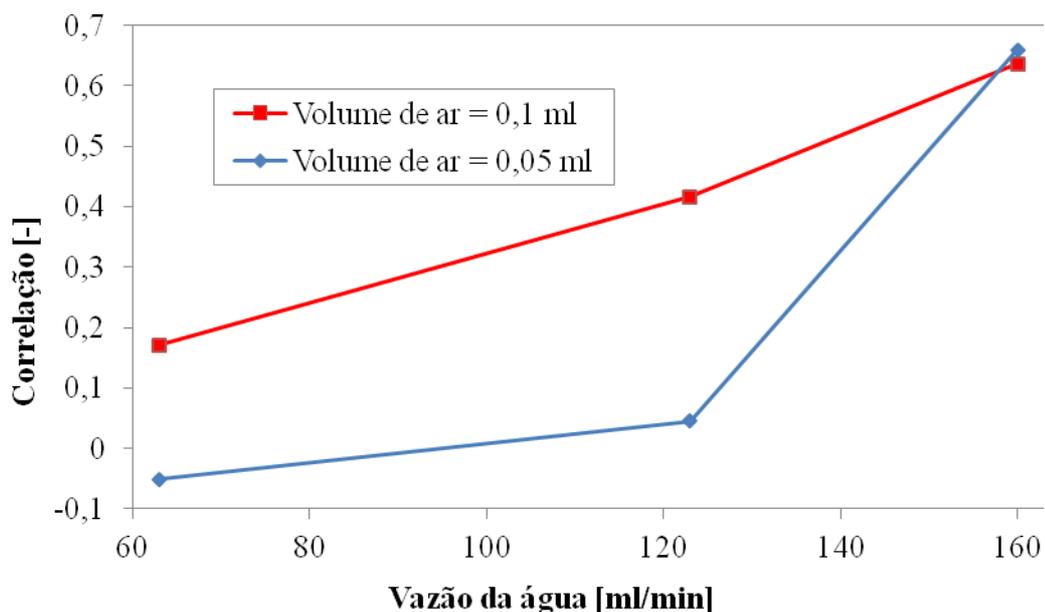


Figura 4.7 Correlação entre a resposta do sensor óptico e do processamento de imagens.

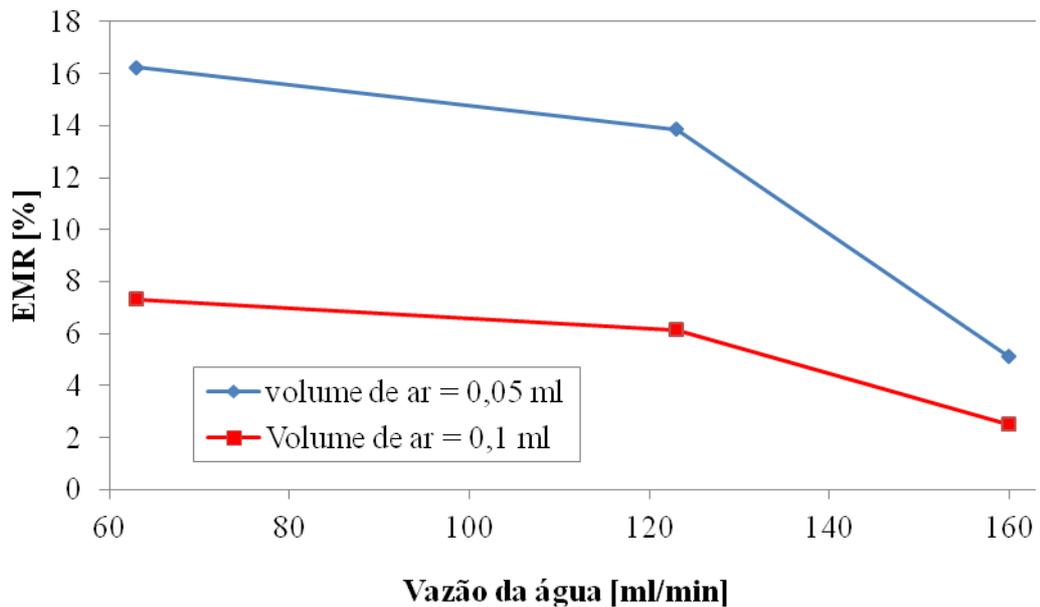


Figura 4.8 Erro médio relativo entre a resposta do sensor óptico e do processamento de imagens.

Para melhorar a correlação e diminuir o erro médio relativo, alterou-se a posição do sensor óptico para uma distância de 100 mm da fonte de luz da câmera, conforme se vê na foto da bancada da Fig. 4.9. Estando o sensor óptico mais próximo da câmera digital, pode-se considerar que não há alteração no padrão de escoamento. O diâmetro do sensor óptico de 50 mm, também auxilia na diminuição da incidência de luz externa no LDR.



Figura 4.9 Alteração na posição do sensor óptico na seção de testes.

Com a nova posição do sensor óptico, repetiu-se o teste que obteve o pior resultado nos ensaios anteriores, ou seja,  $Q_l = 63$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,05$  ml. Na Fig. 4.10 se apresentam os novos resultados:

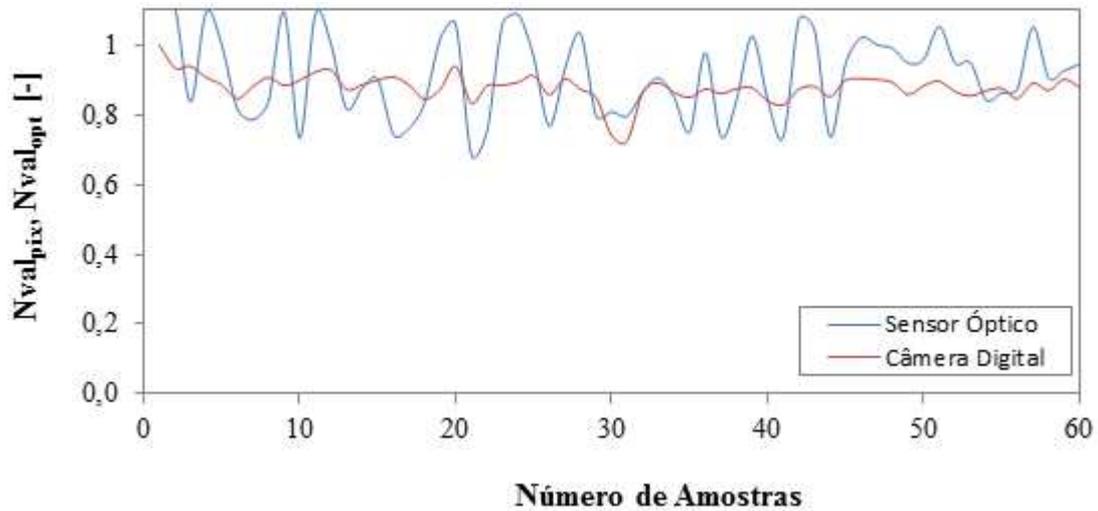


Figura 4.10 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para  $Q_l = 63$  ml/min e  $vol_{ar} = 0,05$  ml para sensor mais próximo à câmera.

A aproximação do sensor óptico com a câmera digital apresentou uma melhoria nos resultados, pois a redução da distância do sensor óptico com a seção de visualização com a câmera, reduziu o tempo de escoamento da bolha entre as duas posições, para não alterar o formato da bolha. O erro médio relativo diminuiu para 10,18 % e a correlação entre as medidas de área em pixels com as medidas de área do sensor óptico aumentaram para 0,5. Também se observou que a alteração da posição do sensor óptico apresentou um aumento na amplitude do sinal em função da aproximação com a luz da câmera digital, não comprometendo a medição do sinal.

Foram realizados 60 ensaios para cada condição de teste da Tab. 3.1 com o objetivo de minimizar os dados espúrios que podem estar presentes devido a erros de medição. Na Fig. 4.11 se apresenta a comparação entre o sinal do sensor e as imagens através dos valores normalizados  $Nval_{opt}$  e  $Nval_{pix}$ , com os resultados para as condições de maior e menor vazão de água com o  $vol_{ar} = 0,05$  ml para uma faixa de erro de 25%. Sendo que o de menor vazão são os ensaios com o sensor na posição próxima a câmera digital, a 100 mm, e o de maior vazão na configuração inicial com o sensor posicionado a 1000 mm. Assim, é possível verificar que para maior vazão ( $Q_l=160$  ml/min) se tem uma maior dispersão dos resultados dos diversos ensaios e que possivelmente seria reduzida ao aproximar o sensor óptico da seção de visualização. Também é possível observar que o sensor óptico subestima os dados da câmera digital.

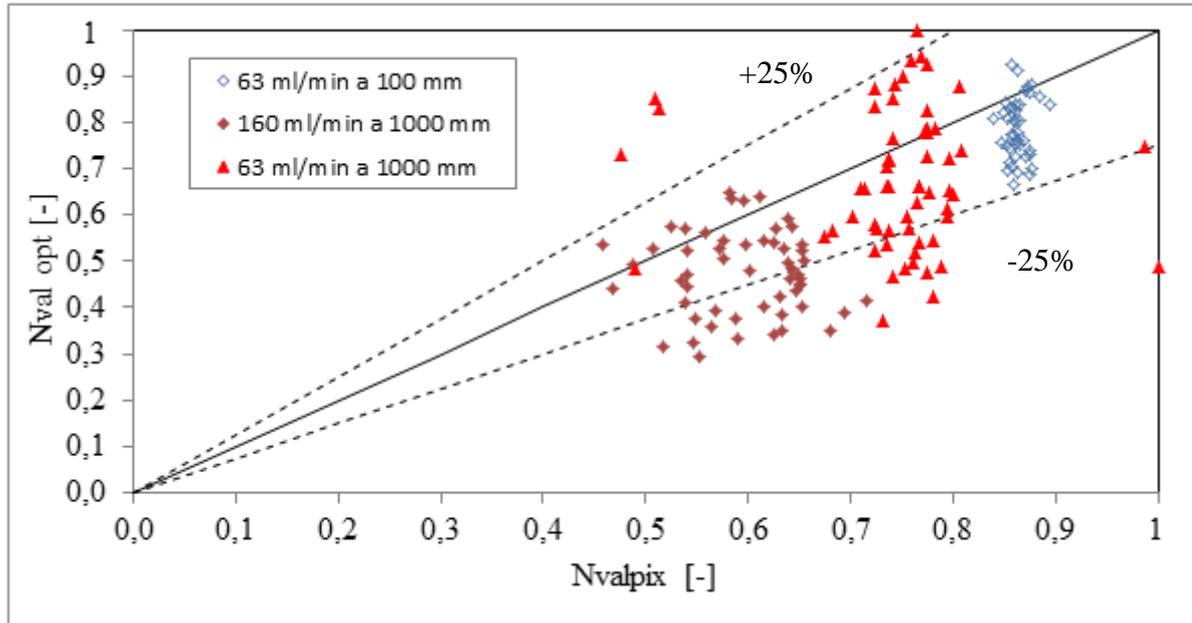


Figura 4.11 Comparação entre as técnicas do sensor óptico e do processamento de imagens para diferentes vazões de água e volume de ar.

## 4.2 PADRÕES DE ESCOAMENTO E O SINAL DO SENSOR ÓPTICO

Durante o escoamento bifásico ocorrem variações na perda de pressão, cujas características estão relacionadas ao padrão de escoamento. Neste capítulo é mostrado como interpretar o sinal do sensor óptico para a identificação de padrões de escoamento.

Nos ensaios para a interpretação dos sinais, foi possível reproduzir somente padrões tipo bolhas, pistonados e em golfadas. A vazão da água ( $Q_l$ ) foi ajustada em 160 ml/min e o controle da vazão de ar na tubulação foi feito por uma válvula tipo agulha sem medição do volume de ar. O ajuste da câmera digital para a visualização do padrão de escoamento foi de 1000 frames/s. O sinal gerado pelo sensor óptico é a variação de tensão ao longo do tempo, pois, com a passagem da bolha na frente do LED, a incidência da luz no LDR é mais intensa, aumentando o valor de tensão no sinal do sensor óptico. Quando há somente líquido a luz é atenuada reduzindo o nível de tensão. Na Fig. 4.12 temos três tipos de bolhas bem distintas no seu diâmetro e comprimento, bolhas dispersas e bolha alongada. Com as imagens da câmera foi possível observar a relação do diâmetro da bolha com a amplitude no sinal do sensor óptico e o comprimento da bolha com o período. Com a redução do volume de ar, há modificação do tamanho ou padrão da bolha e no sinal de tensão verificam-se alterações de amplitude e período.

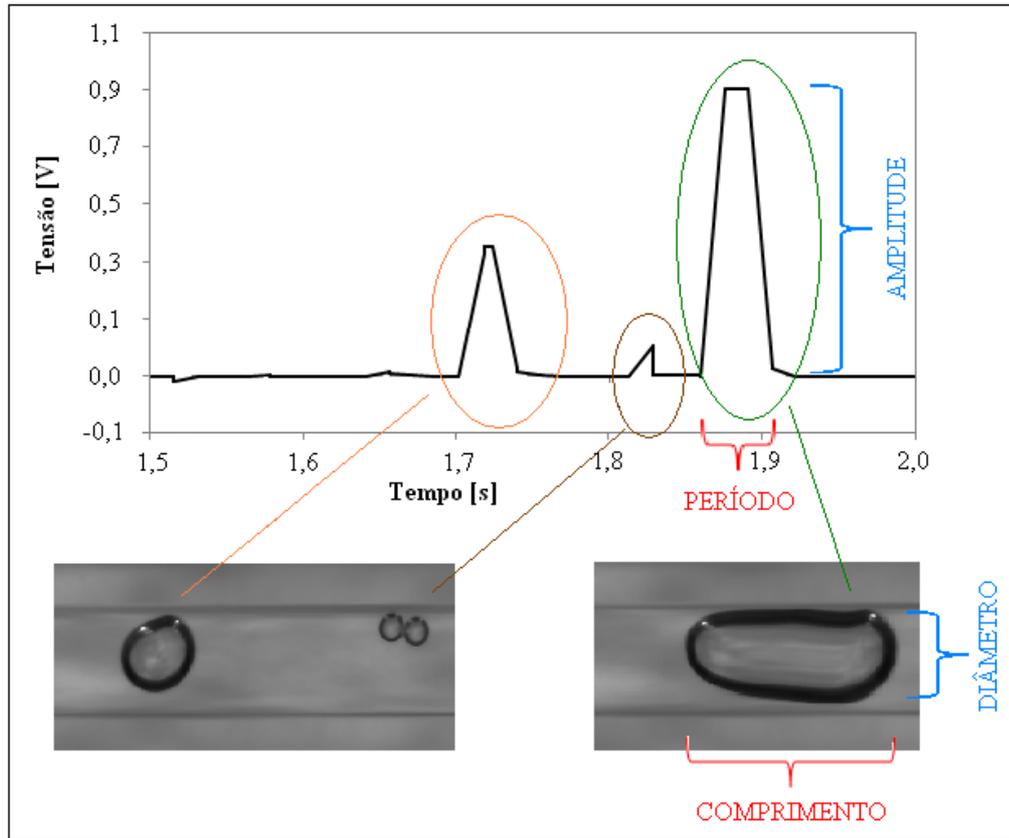


Figura 4.12 Padrões de escoamento tipo bolhas e bolha alongada e o sinal do sensor óptico.

Na Fig. 4.13 se tem o sinal do sensor para uma bolha isolada. A amplitude do sinal informa que a bolha não ocupa todo o diâmetro do tubo, pois a tensão é menor que 1 V.

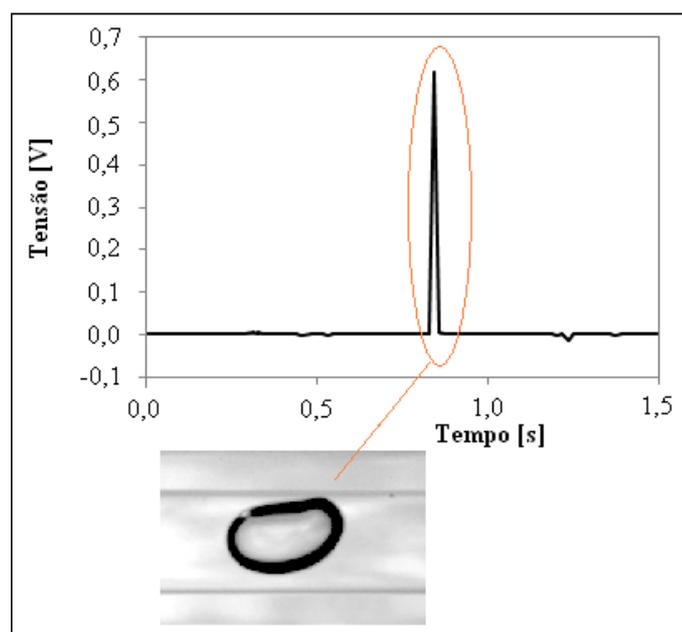


Figura 4.13 Sinal do sensor óptico para uma única bolha.

Na Fig. 4.14 o volume de ar no tubo é maior e o padrão das bolhas se tornou mais alongado. A marcação com um círculo vermelho, que se pode observar na figura, mostra que o líquido ainda é predominante no tubo. As marcações alongadas nas cores laranja e verde representam duas bolhas consecutivas.

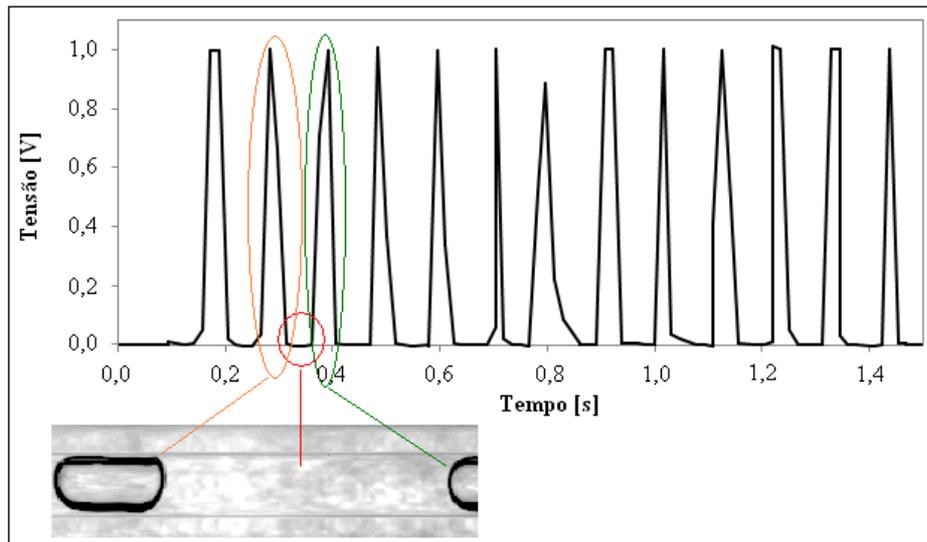


Figura 4.14 Sinal do sensor óptico para várias bolhas alongadas.

Com o aumento da quantidade de ar para o padrão de escoamento se tornar pistonado, como se pode observar nas Figs. 4.15 e 4.16. A marcação com um círculo vermelho mostra que a quantidade de líquido começa a se reduzir e as marcações na cor laranja e verde mostram que o padrão de escoamento das bolhas está mudando para o tipo pistonado.

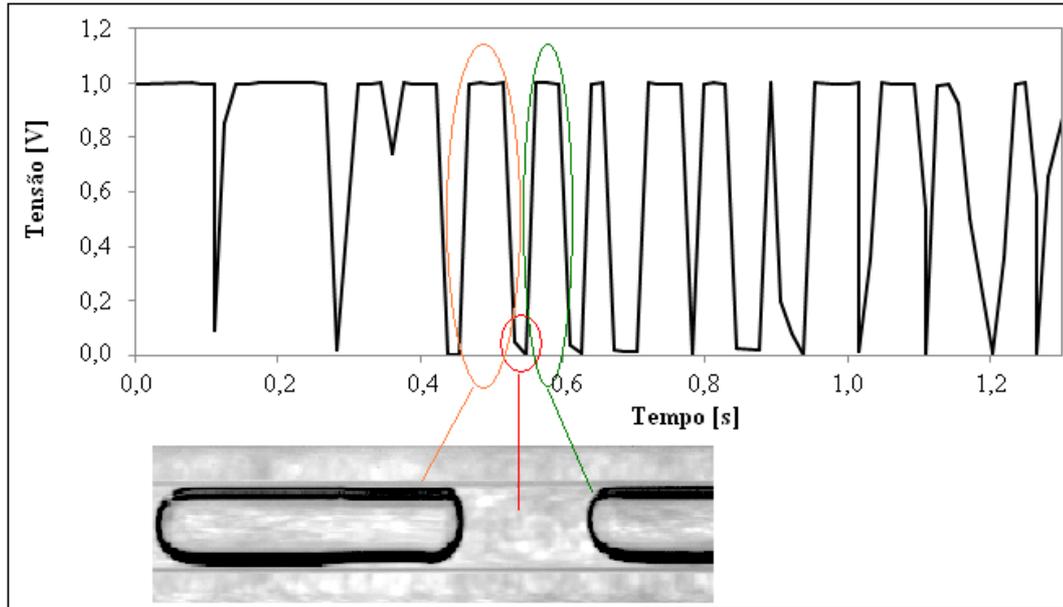


Figura 4.15 Sinal do sensor óptico para bolhas alongadas.

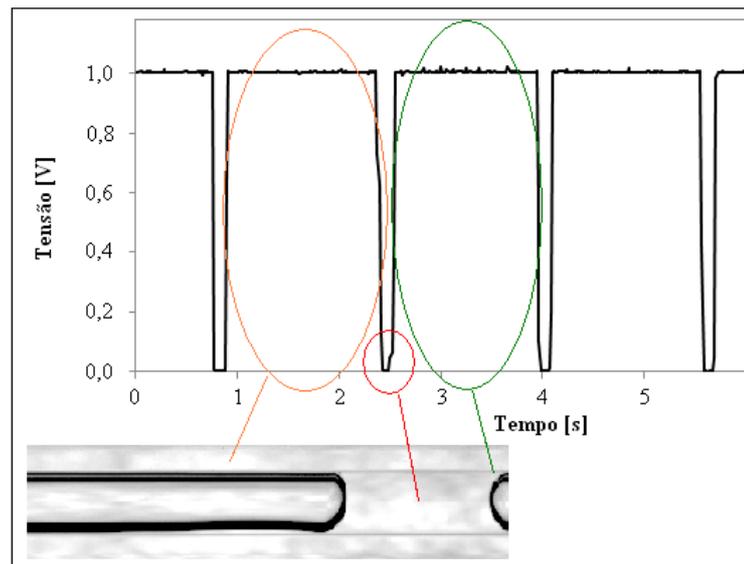


Figura 4.16 Sinal do sensor óptico para o padrão pistonado.

Para a visualização do escoamento intermitente em golfadas foi necessário alterar a velocidade da câmera digital para 2000 quadros/s. As imagens na Fig. 4.17 mostram o padrão de escoamento, representando o início e final de cada golfada. No gráfico da Fig. 4.17, com o sinal do sensor óptico as marcações com os círculos na cor vermelha mostram o momento de cada golfada e apontam para as imagens de cada instante. Pelo sinal do sensor óptico é possível observar que o gás é predominante no tubo porque o nível de tensão está em 1V.

Diferentes volumes de líquido em golfadas são sinalizados pelo sensor óptico e registrados pela câmera.

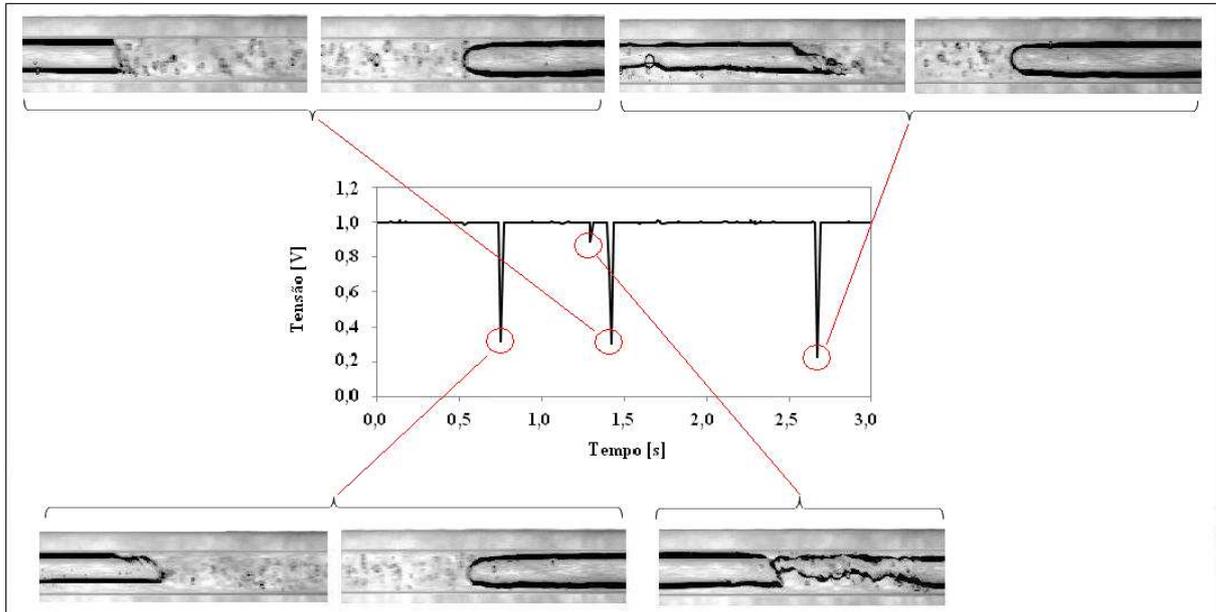


Figura 4.17 Sinal do sensor óptico para bolhas intermitentes em golfadas.

### 4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO

A curva de calibração consiste em uma curva de ajuste da variação no nível de tensão obtida pela atenuação da luz no *LDR* do sensor óptico em relação às medições de fração de vazio.

Para a construção desta curva foram usados os dados do teste com a vazão da água ( $Q_l$ ) de 63 ml/min e volume de ar ( $vol_{ar}$ ) de 0,05 ml. Para o cálculo da fração de vazio através do volume ou da área da seção transversal média da bolha, assume-se que as bolhas têm um formato simétrico e uma geometria esférica ou cilíndrica.

O sinal gerado pelo sensor óptico e a imagem capturada pela câmera digital para a mesma bolha registram períodos diferentes, porque são equipamentos distintos nos quais cada um tem a sua velocidade de aquisição dos dados. Na Fig. 4.18 onde se tem os resultados do sensor e da visualização, é possível observar que o início e o final de uma bolha geram no gráfico de variação tensão do sensor um aumento e diminuição linear de tensão. Assumindo que o período registrado em cada instrumento representa o mesmo comprimento da bolha é possível correlacionar o diâmetro de cada seção transversal da bolha com o nível de tensão gerado pelo sinal do sensor óptico.

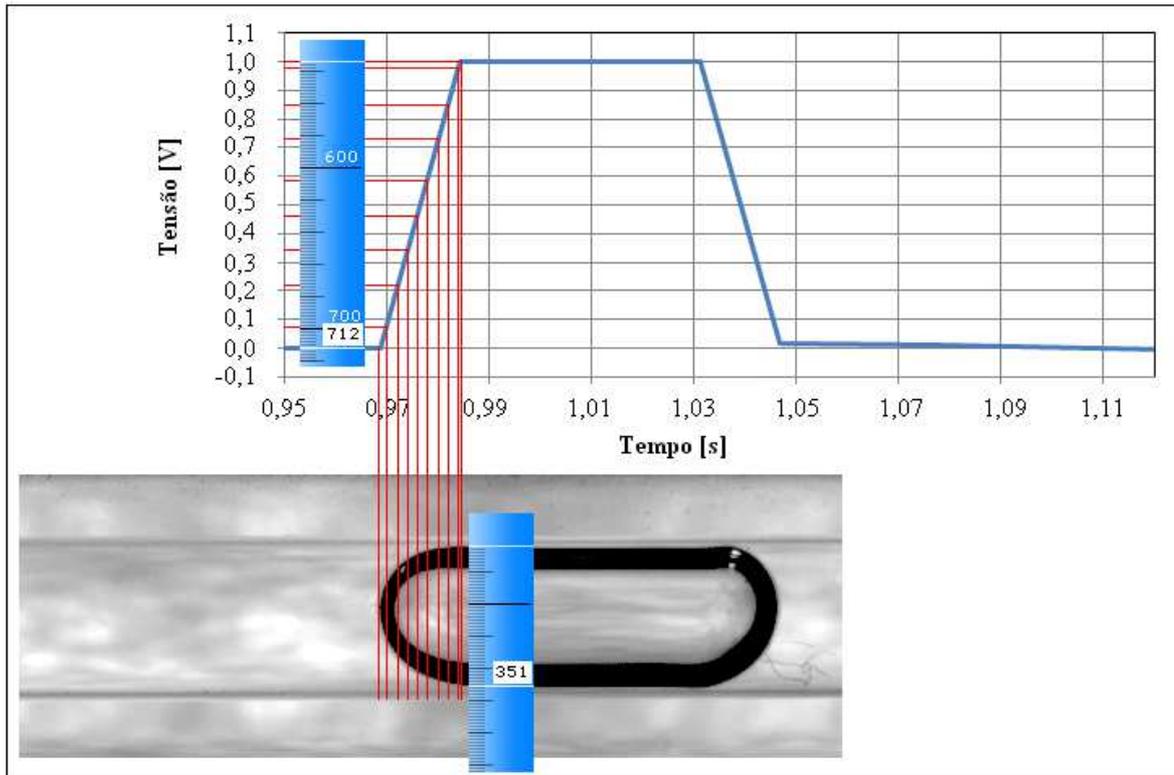


Figura 4.18 Relação entre a curva do sinal sensor óptico com a imagem do escoamento para o cálculo local do diâmetro da parte frontal da bolha.

Para auxiliar nos cálculos foi usado o programa Pixel Ruler que gera uma régua gráfica na tela do computador, conforme mostrada na Fig. 4.18. As medições feitas com o Pixel Ruler são adimensionais e no texto são referenciadas como medições por unidade, ou *pu*.

A parte frontal da bolha é seccionada até o seu diâmetro máximo e cada diâmetro medido é correlacionado com o nível de tensão. Sabendo que o diâmetro interno do tubo de 2,6 mm corresponde a 360 pu e a tensão máxima de 1 V corresponde a 712 pu é montada uma tabela com as dimensões de diâmetro, em mm, e a tensão, em V, de cada seção transversal, conforme apresentado na Tab. 4.1. Nesta tabela também encontram-se os cálculos da área da seção ocupada pelo gás ( $A_g$ ) e o cálculo da fração de vazio,  $\alpha$ , de acordo com a Eq. 2.8.

Tabela 4. 1 Diâmetro da bolha e tensão do sensor óptico correspondente.

Medições de diâmetro da bolha e cálculo da fração de vazio				Medições de tensão com o sensor óptico	
pu [-]	Diâmetro [mm]	$A_g$ [mm <sup>2</sup> ]	Fração de vazio, $\alpha$	pu [-]	Tensão [V]
0	0	0	0	0	0
140	1,011	0,803	0,151	53	0,074
216	1,560	1,911	0,360	156	0,219
261	1,885	2,791	0,563	235	0,330
294	2,212	3,529	0,665	327	0,459
315	2,275	4,065	0,766	415	0,583
330	2,383	4,460	0,840	521	0,732
339	2,448	4,707	0,886	605	0,850
341	2,463	4,764	0,897	698	0,980
360	2,600	5,309	1	712	1,000

A mesma metodologia foi aplicada para a parte posterior da bolha e a curva de tensão correspondente, como mostrado na Fig. 4.19. Novamente, utilizando a Tab. 4.1, com os valores dos diâmetros em pu, é possível por interpolação encontrar os valores de diâmetro em milímetros, usando o algoritmo apresentado no Apêndice D. Os resultados para as medições do final da bolha da Fig. 4.19 são apresentados no Apêndice E.

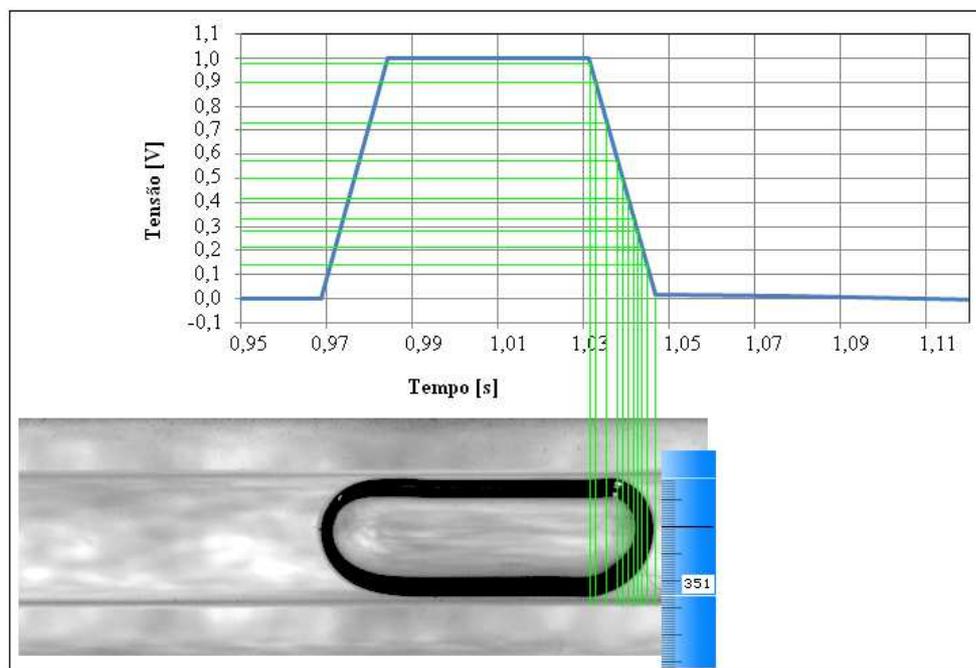


Figura 4.19 Relação entre a curva do sinal sensor óptico com a imagem do escoamento para o cálculo local do diâmetro da parte posterior da bolha.

Na Fig. 4.20 a análise para uma bolha completa, em formato circular, com linhas em vermelho marcando as medições de cada seção transversal da bolha até o seu diâmetro máximo e as linhas em verde as seções transversais até o final da bolha. Os resultados das medições são apresentados no Apêndice F.

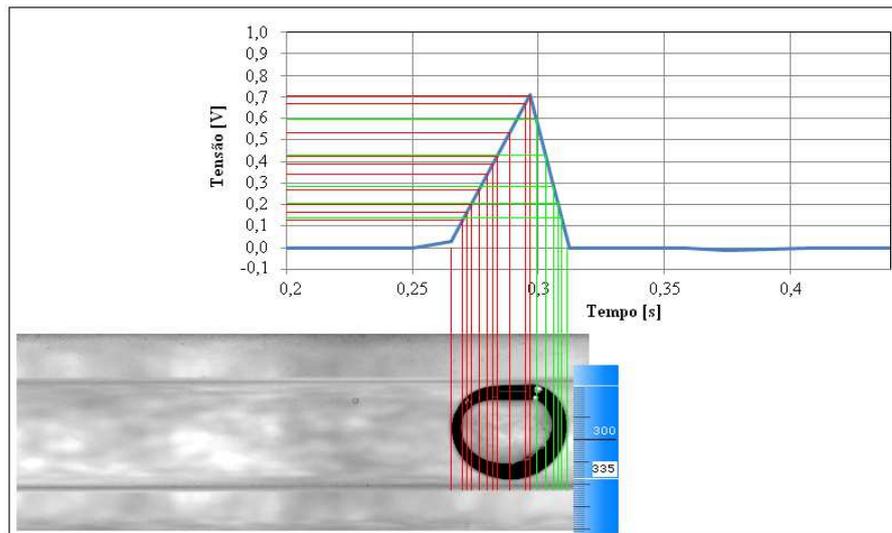


Figura 4.20 Relação entre a curva do sinal sensor óptico com a imagem do escoamento para o cálculo local do diâmetro de uma bolha completa.

A relação entre as posições dos diâmetros calculados para a bolha alongada (parte frontal e posterior) e para a bolha circular e o sinal de tensão do sensor óptico é mostrada na Fig. 4.21, onde observa-se a correlação entre a dimensão e o sinal de tensão, indicando que as dimensões calculadas nas três condições podem ser representadas em uma única curva.

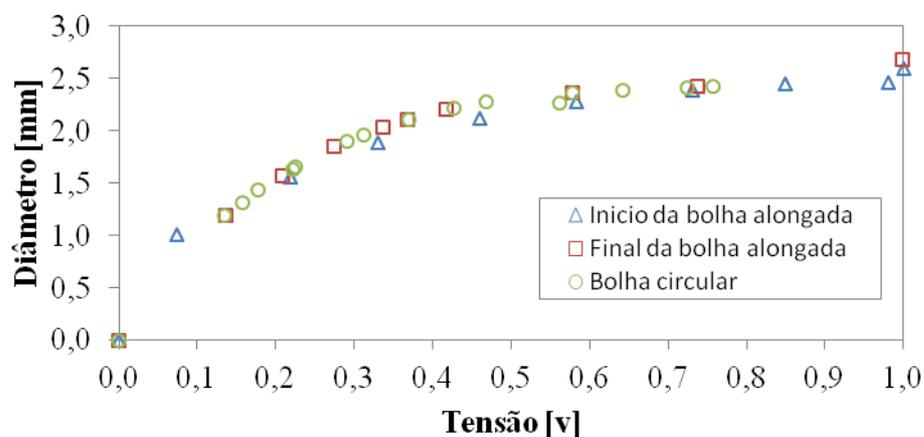


Figura 4.21 Relação entre o diâmetro das bolhas e a tensão do sensor óptico.

Assim, a curva de calibração do sensor para medidas de fração de vazio é mostrada na Fig. 4.22 a partir dos valores calculados na Tab. 4.1. Os valores da tensão adimensional ( $V^*$ ) são obtidos pela equação (4.1), no qual o valor da tensão no instante em que o escoamento é gasoso ( $V_g$ ) é de 1 volt. O ajuste é dado por uma linha de tendência segundo o polinômio da Eq. 4.2, com um  $R^2=0,993$ .

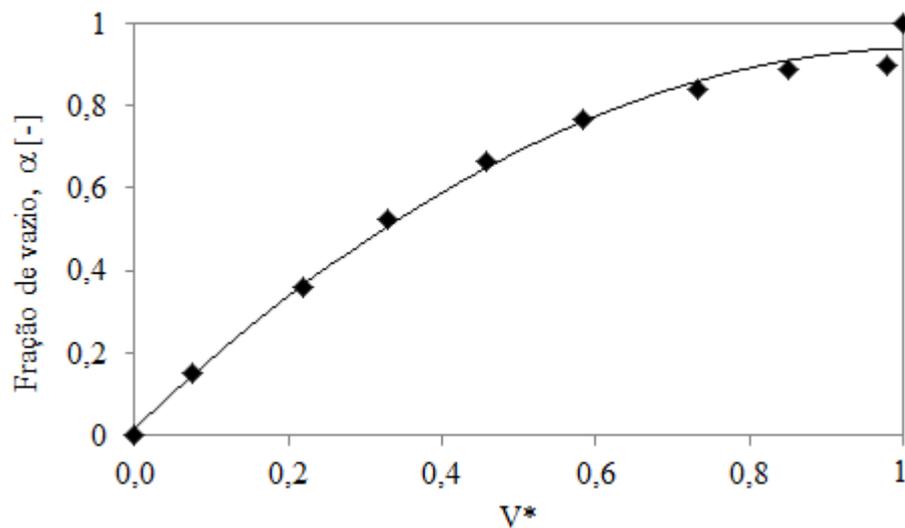


Figura 4.22 Curva de calibração do sensor óptico.

$$V^* = \frac{V}{V_g} \quad (4.1)$$

Para comparar os valores

$$\alpha = -0,856(V^*)^2 + 1,78V^* + 0,0151 \quad (4.2)$$

Para o teste com a bolha circular o valor médio do diâmetro da bolha é de 1,903 mm resultando numa área da seção transversal da bolha de 2,84 mm<sup>2</sup>. Sabendo a área total da seção transversal do canal é 5,31 mm<sup>2</sup>, aplica-se a Eq. 2.8 para o cálculo da fração de vazio média e encontra-se  $\alpha = 0,53$ .

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado um sensor óptico desenvolvido para medir frações de vazio em escoamento adiabático bifásico, ar-água, em um mini tubo horizontal de 2,6 mm de diâmetro interno. Foram realizados testes em bancada experimental para diferentes condições de vazões e a resposta do sensor foi validada com as imagens dos padrões de escoamento registradas com uma câmera digital de alta velocidade. O sensor óptico consiste de um *LED* de alto brilho como emissor de luz e de um *LDR* como receptor de luz e a câmera digital registra os padrões de escoamento com velocidades de 1000 a 2000 frames por segundo

Nos testes verificou-se a correlação entre a área gerada pela curva do sinal do sensor óptico com a área em pixels da imagem da bolha do escoamento bifásico.

Em função do diâmetro reduzido foi convencionada uma aproximação da área com volume de ar medido e injetado por uma seringa no tubo. Os resultados mostraram que o sinal do sensor óptico, ao longo do tempo, junto com as imagens dos escoamentos bifásicos, apresentaram uma boa concordância.

O trabalho também permitiu validar uma metodologia experimental, assim como a bancada de testes. Foram realizados diversos ajustes na bancada e na geometria do sensor óptico, de modo a corrigir efeitos de ruído e interferência da iluminação nas medições com o sensor óptico. O aumento no diâmetro do sensor óptico diminui os ruídos gerados no sinal do sensor e a especificação do tamanho da furação para a fixação do *LED* e do *LDR* permitiu direcionar corretamente a luz entre eles apresentando resultados melhores, tanto de correlação, como de erro médio relativo. Para a menor vazão de água, 63 ml/min, que se mostrou mais sensível às variações, a correlação passou de 0 a 0,5 e o erro médio de 16,25% para 10,18%. Outro fator que contribuiu para a melhoria dos resultados foi o posicionamento do sensor na seção de testes, pois no momento que as bolhas entram da seção geralmente estão fragmentadas e ao se deslocarem ao longo do comprimento do tubo se modificam, muitas vezes aglomerando-se. Assim, o sensor foi posicionado no final da seção, próximo à câmera digital, onde o padrão de escoamento se mantém mais constante.

Uma curva de calibração do sensor foi apresentada para regime de bolhas, baseada no cálculo de áreas do gás utilizando o processamento de imagens associadas as curvas do sinal

do sensor óptico. Verificou-se que um polinômio de segundo grau pode descrever de forma satisfatória a relação entre a fração de vazio e a tensão medida pelo sensor.

É de grande importância a automatização das etapas do processo de análise das imagens da câmera digital e do sensor, além do cálculo das áreas. Neste sentido foram utilizados diversos programas de apoio através dos quais foram desenvolvidas rotinas computacionais, tanto para a aquisição de dados, como para tratamento e análise dos mesmos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para pesquisas futuras para dar continuidade a este trabalho recomendam-se os seguintes alterações e estudos:

- Implementar a bancada de testes introduzindo instrumentação específica para medidas precisas de vazão de ar e água, assim como uma bomba de seringa para a correta e precisa dosagem de ar.
- Alterar a fonte de alimentação do circuito eletrônico para uma fonte chaveada com a intenção de amenizar os efeitos da variação do nível de tensão da rede elétrica do laboratório;
- Substituir os amplificadores do circuito eletrônico do sensor óptico para um modelo específico de instrumentação para diminuir os efeitos de desvio do valor de referência;
- Desenvolver uma rotina que some a área abaixo da curva do sinal do sensor óptico integrado a rotina que gera a curva;
- Realizar medições simultâneas com o um sensor óptico na horizontal e outro na vertical com o objetivo de melhorar as medições de volume;
- Analisar medições de velocidade das bolhas com dois sensores ópticos na horizontal ou na vertical;
- Investigar o comportamento de padrões de escoamento associadas às medidas e a outros fluidos;
- Desenvolver estudos substituindo o *LED* por um laser;
- Adaptar o sensor óptico para o estudo em micro canais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, W.H., Experimental investigation of air–oil slug flow using capacitance probes, hot-film anemometer, and image processing, **International Journal of Multiphase Flow**, v. 37, p. 876-887, 2011.

COLLIER, J.G., THOME, J.R. **Convective Boiling and Condensation** 3. Ed. Oxford Science Publications, New York , USA, 1994.

CARNIÈRE, H., JOEN, T.C., PAEPE, M.D. **In Tube Two-phase Flow Probabilities Based on Capacitance Signal Clustering**. ECI International Conference on Boiling Heat Transfer Florianópolis,SC, Brasil, 2008.

CHANG, J. S., MORALA, E.C., Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique, **Nuclear Engineering and Design**, v. 122, p. 143-156, 1990.

COLEMAN, J. W., GARIMELLA, S., Characterization of two phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 31, p. 1758-1770, 1999.

ELKOW, K. J., REZKALLAH K.S. Void fraction measurements in gas-liquid flows using capacitance sensors. **Measurement Science and Technology**, v. 7, p. 1153-1163, 1996.

JANA, A. K., MANDALL, T. K., CHAKRABARTIL, D. P., DAS, G., DAS, P. K., An Optical Probe For Liquid–Liquid Two-Phase Flows. **Measurement Science & Technology**, v. 18, issue 5, p.1563 -1575, 2007.

KANDLIKAR, S.G, GRANDE, W. J., Evolution of microchannel flow passages - Thermohydraulic performance and fabrication technology. **Heat Transfer Engineering**, v. 24, p. 3 -17, 2003.

KENDOUSH, A.A., SARKIS, Z.A., Void fraction measurement by X-ray absorption. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 25, p. 615-621, 2002.

KENDOUSH, A.A., GHANIM, K.A., BANIPAL, N.Y.A., Nonintrusive auto-transformer technique for measuring phase volume ratio in oil–water two-phase stratified flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v. 54, p. 25-33, 2006.

KEW, P., CORNWELL, K., Correlations for prediction of boiling heat transfer in small diameter channels. **Applied Thermal Engineering**, v. 17, p. 705-715, 1997.

MEHENDALE, S., JACOBI, A., SHAH, R., Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-scales with Application to Heat Exchanger Design. **Applied Mechanics Reviews**, v. 53, p. 175-193, 2000.

OLIVEIRA, J. L. G., **Medição de Vazão de Escoamentos Bifásicos Utilizando Tubo de Venturi ou Placa de Orifício Associados a um Sensor de Fração de Vazio com Campo Elétrico Girante**. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

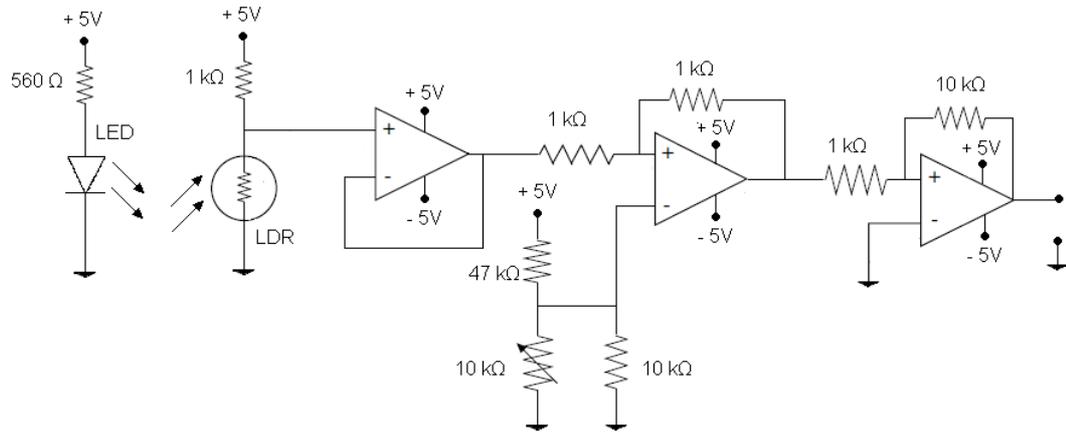
PARANJAPE, S.; RITCHEY, S.N.; GARIMELLA, S. H.V., Electrical impedance-based void fraction measurement and flow regime identification in microchannel flows under adiabatic conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, v.42, p. 175-183, 2012.

REVELLIN, R., DUPONT, V., URSENBACHER, T., THOME, J.R. and ZUN, I. **Characterization of Two- Phase Flows in Microchannels: Optical Measurement Technique and Flow Parameter Results for R-134a in a 0.5 mm Channel**, Int. J. Multiphase Flow. v. 32, p. 755-774, 2006.

ROCHA, M. S., SIMÕES-MOREIRA, J. R.; Void Fraction Measurement and Signal Analysis from Multiple-Electrode Impedance Sensors, **Heat Transfer Engineering**, v. 29, p. 924-935, 2008.

YUICHI, M., OHTA, S., SHIGETOMI, A., TASAHA, Y., TAKEDA, Y., Development of an ultrasonic void fraction profiler. **Measurement Science and Technology**, v.20, p. 233-957, 2009.

## APÊNDICE A - Circuito eletrônico do sensor óptico desenvolvido neste trabalho.



## APÊNDICE B - Algoritmo para contar pixels no programa MatLab.

```

clear all; close all; clc;

bolha = imread('mascara.jpg');
imshow(bolha);
I = rgb2gray(bolha);
threshold = graythresh(I);
bw = im2bw(I,threshold);
[B,L] = bwboundaries(bw);
imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]));
hold on

stats = regionprops(L,'Area');
for k = 1:length(B)
    boundary = B{k}; % obtem (X,Y) do contorno k
    area = stats(k).Area; % A área do contorno k

    area_string = sprintf('%.0f',area);
    text(boundary(1,2)+5,boundary(1,1)+13,area_string,...
        'Color','white',...
        'FontSize',8,...
        'FontWeight','bold',...
        'BackgroundColor','black',...
        'FontName','Times');
end
hold off

```

Fonte: adaptado de VIEIRA, D. R., **Cálculo da área de folhas com MATLAB**. Disponível em: < <http://www.danilorvieira.com/matlab/> > Acesso em: 20 dez. 2012.

## APÊNDICE C - Algoritmo para gerar a curva do sinal do sensor óptico no programa MatLab.

```
clc;
clear;
function y = Eq_Curva(x)

a = -1.01408388911E+003
b = 1.58319567159E+003
c = -6.17832457205E+002

y=a+b*x+c*x.^2;

end

area=quad('Eq_Curva',0.42,0.46)%período de tempo para o calculo da área

function y = Eq_Curva(x)

a = -1.01408388911E+003
b = 1.58319567159E+003
c = -6.17832457205E+002

y=a+b*x+c*x.^2; %Aproximação polinômio

%y=a+(b*cos(c*x+d)); %Aproximação senoidal

%y=a*exp(-(b-x).^2./(2*c.^2)); %Aproximação pela Curva Gaussiana

end
```

## APÊNDICE D - Algoritmo para interpolação no programa Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1			LEGENDA						
2			di= diâmetro pela imagem [mm]						
3			der= diâmetro pela equação da reta [mm]						
4			pu= medição por unidade [-]						
5									
6		Dimensões da bolha							
7		Medições Diâmetro					Medições de Tensão		
8		pu [-]	Diâmetro [mm]			pu [-]	Tensão [v]		
9	1	0	0,0	1	1	0	0,0	1	
10	2	140	1,0	2	2	53	0,1	2	
11	3	216	1,6	3	3	156	0,2	3	
12	4	261	1,9	4	4	235	0,3	4	
13	5	294	2,1	5	5	327	0,5	5	
14	6	315	2,3	6	6	415	0,6	6	
15	7	330	2,4	7	7	521	0,7	7	
16	8	339	2,4	8	8	605	0,8	8	
17	9	341	2,5	9	9	698	1,0	9	
18	10	360	2,6	10	10	712	1,0	10	
19									
20		Interpolação Diâmetro					Interpolação Tensão		
21	Linha	pu [-]	Diâmetro [mm]		Linha	pu [-]	Tensão [v]		
22	2	140	1,01		3	156	0,219		
23		215	1,55			160	0,225		
24	3	216	1,56		4	235	0,330		

Algoritmo para a interpolação na tabela das medições de diâmetro.

<b>célulaA22:=</b> PROCV(B23;B9:D18;3)	<b>célulaB22:=</b> PROCV(B23;B9:D18;1)	<b>célulaC22:=</b> PROCV(B23;B9:D18;2)
	<b>célulaB23:=</b> 215	<b>célulaC23:=</b> ((B23-B22)*(C24-C22) /(B24 -B22))+C22
<b>célulaA24:=</b> A22+1	<b>célulaB24:=</b> PROCV(A24;A9:D18;2)	<b>célulaC24:=</b> PROCV(A24;A9:D18;3)

Algoritmo para a interpolação na tabela das medições de tensão.

<b>célulaF22:=</b> PROCV(G23;G9:I18;3)	<b>célulaG22:=</b> PROCV(G23;G9:I18;1)	<b>célulaH22:=</b> PROCV(G23;G9:I18;2)
	<b>célulaG23:=</b> 160	<b>célulaH23:=</b> ((G23-G22)*(H24-H22) /(G24-G22)) +H22
<b>célulaF24:=</b> F22+1	<b>célulaG24:=</b> PROCV(F24;F9:I18;2)	<b>célulaH24:=</b> PROCV(F24;F9:I18;3)

APÊNDICE E - Tabela com as dimensões na saída da bolha.

Tensão [v]	Diâmetro [pu]		Diâmetro [mm]
0	0		0
0,136	151		1,154
0,208	204		1,520
0,275	237		1,783
0,336	263	⇒ Interpolação Tab. 4.1 ⇒	1,960
0,417	287		2,128
0,368	307		2,036
0,579	322		2,286
0,737	337		2,337
0,999	351		2,575

APÊNDICE F - Tabela com as dimensões da bolha com formato circular.

Tensão [v]	Diâmetro [pu]		Diâmetro [mm]
0	0		0,000
0,135	206		1,146
0,178	235		1,381
0,221	262		1,575
0,291	296		1,833
0,369	315		2,039
0,427	325		2,147
0,562	332	⇒ Interpolação Tab. 4.1 ⇒	2,191
0,579	335		2,286
0,725	328		2,333
0,758	323		2,344
0,642	315		2,310
0,468	280		2,198
0,312	236		1,896
0,225	200		1,592
0,157	156		1,272