

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

MELISSA GRAHL FIGUEREDO

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA POR MEIO DE
SENSORES ÓPTICOS**

SÃO LEOPOLDO

2018

Melissa Grahl Figueredo

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA POR MEIO DE
SENSORES ÓPTICOS

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS como pré-requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani (UNISINOS)
Prof. Dr. Willyan Hasenkamp Carreira (UNISINOS)
Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales (UTFPR)

SÃO LEOPOLDO
2018

F475c FIGUEREDO, Melissa Grahl.
Caracterização do escoamento bifásico ar-água por meio de sensores ópticos / Melissa Grahl Figueredo. – 2018.
36 f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, 2018.

“Orientadora: Dra. Jacqueline Biancon Copetti.”

1. Engenharia Elétrica. 2. Sensor óptico. 3. Minicanal. 4. Escoamento bifásico. 5. Fração de vazão. I. Copetti, Jacqueline Biancon. II. Título.

CDU 621.3

Trabalho desenvolvido para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale dos Sinos – UNISINOS, com bolsa concedida pelo do programa Talentos Tecnosinos (SENAI).

São Leopoldo, julho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a UNISINOS e ao SENAI/RS pela bolsa concedida através do programa Talentos Tecnosinos (SENAI), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de estudos e pela atenção proporcionada através da orientação da professora Dra. Jacqueline Biancon Copetti e do atendimento, sempre atencioso em todos os setores.

Gostaria ainda de agradecer ao diretor da Faculdade SENAI de Tecnologia Me. Márcio Rogério Basotti, não só pelo apoio concedido através do plano de desenvolvimento pessoal, mas pelo entendimento da importância da formação contínua dos professores.

Em especial, um agradecimento ao meu esposo Diogo Koenig, pela paciência e apoio durante os estudos e desenvolvimento do projeto.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo para a caracterização do escoamento bifásico ar-água em um minicanal de 2,6 mm de diâmetro interno para os regimes de escoamento pistonado e bolha isolada, por meio do emprego de quatro pares de sensores ópticos: dois deles formados por emissores IR e fotodiodos como receptores, diferenciados pelo comprimento de onda dos emissores e pela área ativa dos receptores, o outro é o sensor de tubo para líquidos, formado por um emissor IR e um fototransistor como receptor e, por fim, o sensor composto por um LED branco como emissor e um LDR como receptor. Os testes foram realizados para vazões de água de 50, 75 e 100 ml/min e volumes de ar de 0,1, 0,06 e 0,02 ml, captando-se simultaneamente os sinais dos sensores e suas respectivas imagens com uma câmera de alta velocidade. Os resultados obtidos foram a fração de vazio, as curvas de calibração para os sensores, a comparação das respostas dos quatro sensores empregados e a medida da velocidade das bolhas. A calibração dos sensores é dada por meio de uma curva que relaciona a fração de vazio e a tensão do sensor. Relacionando-se as imagens e os sinais dos sensores, foi possível identificar os padrões de escoamento pistonado para os volumes de ar de 0,10 e 0,06 ml e o de bolhas isoladas para o volume de 0,02 ml. A partir da análise dos sinais dos sensores observou-se que para volume de ar de 0,02 ml o sensor de tubo para líquidos, diferentemente dos outros sensores, identificou o padrão levemente alongado da bolha. A verificação dos sinais dos sensores foi feita por meio das áreas medidas pelos sensores e aquelas obtidas através das imagens, ficando com EMR entre -9,36% e 4,49%, sendo os piores resultados os encontrados para o volume de ar de 0,02 ml. O resultado para os valores normalizados das áreas medidas pelos sensores mostrou que o sensor LDR possui resposta mais lenta durante as mudanças entre as fases líquida e gasosa, visto que a área medida por ele ficou maior em relação aos outros sensores. Nota-se ainda que o sensor de tubo para líquido foi aquele que obteve os menores tempos durante as mudanças de fases. As curvas de calibração obtidas foram melhor aproximadas por exponenciais de segunda ordem com R^2 entre 0,928 e 0,897 (LDR). Por fim, a aplicação dos sensores em pares possibilitou a medida da velocidade das bolhas para as diferentes vazões de água, resultando em EMR entre -4,92 e 2,17%.

Palavras-chave: Escoamento bifásico. Minicanais. Padrões de escoamento. Sensores ópticos.

ABSTRACT

This paper presents an air-water two-phase flow characterization in a small diameter tube of 2.6 mm internal diameter for plug and isolated flow, using four pairs of optical sensors: two of them consist in IR emitter with different wavelength and photodiodes receivers, with distinct reception active areas, the other one is a tube liquid sensor based in an IR emitter and a phototransistor receiver and the last one is a LDR as receiver and a white LED emitter. The tests were performed for 50, 75 and 100 ml/min for water flow and 0.1, 0.06 and 0.02 ml for air volume, capturing sensors signals and its respective images in a high-speed camera. The results obtained were void fraction, sensors calibrations curves, a comparison between the four sensors response and bubbly velocity. The sensor calibration process relates void fraction and sensor signal. Images and sensor signal showed that is possible to recognize plug pattern for air volumes of 0.10 and 0.06 ml and isolated bubbly pattern for 0.02 ml. Signal sensors comparison allowed to identify that the tube liquid sensor is better in recognizing a bubbly-plug pattern. The sensors verification has compared the areas measured by the sensor and the image, the EMR results are between -9.6% and 4.49%. The worst results are for air volume of 0.02 ml. LDR sensor response is slower than the others sensors are during phase changing, since the area measured by it has been higher than the other sensors. On the other hand, tube liquid sensor showed to be faster sensor in phase changing. Despite sensors differences, four calibrations curves were obtaining and defined by second order exponentials with R^2 between 0.928 and 0.897 (LDR). Finally, the sensors in pairs allowed to measure mean velocity of bubbles for different water flow, resulting in EMR between -4.92 and 2.17%.

Keywords: Two-phase flow. Flow patterns. Minichannels. Optical sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Definições geométricas da fração de vazio (a) local, (b) cordal, (c) seção transversal e (d) volumétrica.	19
Figura 2.2: Ilustração e imagem para padrões de escoamento: (a) bolhas, (b) estratificado, (c) estratificado ondulado (d) pistonado, (e) golfadas, e (f) anular.	23
Figura 2.3: Padrões de escoamento (a) e (b) de bolhas, (c) e (d) pistonado, (e) e (f) agitado, (g) pistonado anular e (h) anular em um canal circular de 1,097 mm de diâmetro.	24
Figura 2.4: Padrões de escoamento para (a) minicanais e (b) microcanais.	26
Figura 2.5: Características do LDR - (a) Resistência como função da luminosidade (b) e Resposta espectral.	28
Figura 2.6: Características do fotodiodo em relação à (a) sensibilidade espectral relativa vs. comprimento de onda e (b) capacitância vs. tensão reversa.	29
Figura 2.7: Exemplos de emissores e receptores infravermelho.	30
Figura 2.8: Esquema do sensor de líquido desenvolvido por David et al.	31
Figura 2.9: Configurações de capacitores (a) placas planas (b) placas cilíndricas (c) anel (d) côncavo (e) helicoidal.	32
Figura 2.10: Desenho esquemático do (a) sensor de placas planas e do (b) sensor em anel.	33
Figura 2.11: (a) Desenho esquemático do sensor de placas côncavas e (b) foto do sensor numa tubulação de acrílico.	34
Figura 2.12: (a) Desenho esquemático do sensor helicoidal e (b) imagem real.	34
Figura 2.13: (a) Imagens e (b) medidas da distribuição da fração de vazio para bolhas grandes.	35
Figura 2.14: Seção de teste com a identificação dos eletrodos. Imagem Editada. ...	36
Figura 2.15: (a) Padrão de escoamento <i>cap-bubbly</i> e (b) medida da impedância normalizada.	37
Figura 2.16: Diagrama esquemático dos sensores.	40
Figura 2.17: Diagrama esquemático dos sensores no tubo.	41
Figura 2.18: Padrões de escoamento (a) bolha, (b) bolhas e pistonado, (c) pistonado, (d) pistonado e semianular. (e) semianular e (f) anular obtidos com um emissor laser.	42
Figura 3.1: Diagrama de blocos da bancada de testes.	45

Figura 3.2: Ilustração do misturador água-ar empregado na bancada.....	46
Figura 3.3: Imagens ilustrativas do emissor MTPS8065WC e receptor ODD-42WB.	50
Figura 3.4: Imagens ilustrativas do emissor MTPS8065WC e receptor ODD-42WB.	50
Figura 3.5: Imagem ilustrativa do sensor de líquido para tubos - OPB350.	51
Figura 3.6: Desenho do suporte para os sensores grande e pequeno.....	52
Figura 3.7: Principais etapas da metodologia empregada para verificação e calibração dos sensores ópticos.....	53
Figura 3.8: Etapas do processamento de imagem da bolha.	54
Figura 3.9: Exemplo de coordenadas para o contorno de uma bolha.	56
Figura 3.10: Ilustração do contorno da bolha.	56
Figura 3.11: Etapas do processamento dos sinais dos sensores.....	57
Figura 3.12: Ilustração da posição do par de sensores e dos sinais resultantes.	59
Figura 3.13: Relação entre a curva do sinal do sensor óptico com a imagem do escoamento, para o cálculo local do diâmetro da parte frontal da bolha.....	61
Figura 4.1: Valores médios das 30 amostras para as áreas das imagens processadas para as bolhas de 0,02, 0,06 e 0,10 ml.	63
Figura 4.2: Sinais dos sensores para a transição entre água-ar (a) e ar-água (b) na vazão de água de 100 ml/min e volume de água de 0,10 ml.	66
Figura 4.3: Comparativo entre as áreas normalizadas das imagens bolhas e dos sinais dos sensores grande (SG), pequeno (SP), de tubo (ST) e LDR para vazão de água de 100 ml/min e volume de ar de 0,1 ml.	67
Figura 4.4: Amplitude do erro médio relativo para cada sensor.	67
Figura 4.5: Frações de vazio calculadas a partir das imagens para as condições propostas na Tab. 3.2.	69
Figura 4.6: Variação da fração de vazio ao longo do comprimento das bolhas de ar.	69
Figura 4.7: Dados da fração de vazio e dos sinais equalizados para os sensores SG (a), SP (b), ST (c) e LDR (d).	70
Figura 4.8: Curva de calibração para o sensor SG.	71
Figura 4.9: Curva de calibração para o sensor pequeno.....	72
Figura 4.10: Curva de calibração para o sensor de tubo.....	73
Figura 4.11: Curva de calibração para o sensor LDR.	73
Figura 4.12: Imagens e sinais para volumes de ar de 0,10, 0,06 e 0,02 ml e vazão de água de 75 ml/min.....	75

Figura 4.13: Ilustração das dimensões dos receptores em relação à passagem de uma bolha de 0,02 ml.....	76
Figura 4.14: Velocidades médias para cada sensor e velocidade média entre todos os sensores.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Definições e terminologias do escoamento bifásico.....	18
Tabela 2.2: Classificação dos canais de acordo com Mehendale et al.	25
Tabela 2.3: Classificação dos canais de acordo com Kandlikar e Grande.....	25
Tabela 3.1: Equipamentos da bancada de teste e suas especificações.	46
Tabela 3.3: Parâmetros experimentais para os testes de escoamento bifásico ar-água com sensores ópticos.....	48
Tabela 3.4: Especificações dos sensores utilizados para os testes.....	49
Tabela 4.1:Valores médios das áreas das imagens para as três vazões de água e diferentes volumes de ar.....	63
Tabela 4.2: Áreas sob a curva dos sensores para os parâmetros de testes propostos.	64
Tabela 4.3: Valores normalizados para as áreas sob a curva para todos os sensores.	65
Tabela 4.4: Erro médio relativo para as áreas medidas pelos sensores.	68
Tabela 4.5: Erro médio relativo da velocidade de cada sensor em relação ao valor médio entre todas as velocidades.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

	\dot{Q} vazão volumétrica total	[m ³ /s]
	\dot{m} vazão mássica total	[kg/s]
	A área da seção transversal	[m ²]
	A_p área das placas	[m ²]
	C capacitância	[F]
	D diâmetro	[m]
	d distância entre placas	[m]
	EMR erro médio relativo	[%]
	FAE fator de ajuste de escala	[-]
	G velocidade mássica	[kg/m ² s]
	L comprimento	[m]
	r coeficiente de correlação linear	[-]
	RI relação entre Di e Dpix	[mm/pixel]
	SS sinal dos sensores	[-]
	U velocidade superficial	[m/s]
	u velocidade média	[m/s]
	V tensão elétrica	[V]
	v volume	[m ³]
Símbolos Gregos		
	α fração de vazio	[-]
	ϵ_i permissividade do vácuo	[F/m]
	ρ massa específica	[kg/m ³]
	λ comprimento de onda	[m]
Subíndices		
	bolha da bolha	
	cordal cordal	
	eq equivalente em mm	
	eqpix equivalente em pixel	
	g gás	
	h hidráulico	
	i interno	
	inv invertido	
	l líquido	
	local local	
	m médio	
	N normalizado	
	pix em pixel	
	sensor referente aos sensores	
	vol volumétrica	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	ESCOAMENTO BIFÁSICO	18
2.1.1	Fração de Vazio em escoamento Bifásico	19
2.1.2	Padrões de escoamento em tubo horizontal	21
2.1.3	Critérios de Transição entre Macro e Micro Escala para escoamentos Bifásicos	25
2.2	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA MEDIDAS DE FRAÇÃO DE VAZIO	26
2.2.1	Sensores Ópticos	27
2.2.2	Sensores Capacitivos	31
2.2.3	Sensores por Condutância	35
2.2.4	Sensores por Impedância	36
2.2.5	Outros Sensores	37
2.3	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	38
2.4	APLICAÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS NA CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	MATERIAIS	44
3.1.1	Bancada experimental e condições de testes	44
3.1.2	Sensores Ópticos	48
3.2	MÉTODOS	52
3.2.1	Processamento das Imagens	53
3.2.2	Processamento dos Sinais dos Sensores	57
3.2.3	Verificação do Sinal do Sensor Óptico	59
3.2.4	Calibração dos Sensores	60

3.2.5	Erro Padrão.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	ÁREA DAS IMAGENS.....	63
4.2	ÁREA DOS SENSORES	64
4.3	VERIFICAÇÃO DO SINAL DOS SENSORES.....	66
4.4	FRAÇÃO DE VAZIO E SINAL DOS SENSORES.....	68
4.5	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	71
4.6	PADRÕES DE ESCOAMENTO E SINAIS DOS SENSORES.....	74
4.7	VELOCIDADES MÉDIAS	77
5	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS.....	82
	APÊNDICE A – IMAGENS DA BANCADA DE TESTES E O DO MISTURADOR.....	86
	APÊNDICE B – SUPORTES PARA OS SENSORES	87
	APÊNDICE C – ESQUEMAS ELETRÔNICOS DOS CIRCUITOS CONDICIONADORES DE SINAIS.....	89
	APÊNDICE D – METODOLOGIA E EXEMPLO DAS MATRIZES PARA A EQUALIZAÇÃO DOS DADOS DOS SENSORES.....	91
	APÊNDICE E – COMPARATIVO ENTRE AS ÁREAS NORMALIZADAS DAS IMAGENS DAS BOLHAS E DOS SINAIS DOS SENSORES PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 100, 75 E 50 ML/MIN E VOLUMES DE AR DE 0,10, 0,06 E 0,02 ML.....	94
	APÊNDICE F – CORRELAÇÃO ENTRE AS ÁREAS MEDIDAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento bifásico em mini ou microcanais tem se mostrado um tema de interesse atual em função de sua aplicabilidade em sistemas microeletromecânicos, dissipadores de calor para componentes eletrônicos, engenharia de processos químicos, engenharia médica e genética, bioengenharia, etc. (SERIZAWA, FENG, e KAWARA, 2002).

Observa-se um crescente interesse em aplicações com canais de dimensão reduzida, os quais estão possibilitando o desenvolvimento de novas tecnologias focadas na dissipação de altas densidades de fluxo de calor em volumes reduzidos, controle térmico e atuação mecânica de sistemas microeletromecânicos, reações químicas sob condições estritamente controladas e aplicações envolvendo altas pressões operacionais (até 600 bar e temperaturas de 1000 °C). Conseqüentemente, o uso de mini ou microcanais não só tem tornado possível a implementação destas novas tecnologias, como também minimiza o uso de materiais e fluidos, diminui os impactos ambientais e reduz custos operacionais e de manufatura. (TIBIRIÇÁ et al., 2010).

No escoamento bifásico, a distribuição das fases líquida e gasosa define padrões de escoamento e estes influem significativamente na determinação de variáveis de projeto de equipamentos e dispositivos. Também a fração de vazio é um parâmetro importante de caracterização do escoamento bifásico, que permite a obtenção de propriedades da mistura bifásica, como massa específica e viscosidade, e velocidade média relativa das duas fases, sendo fundamental para modelos de predição das transições entre os padrões de escoamento, de transferência de calor e queda de pressão (THOME, 2010).

Diversas técnicas podem ser usadas para a medição da fração de vazio no escoamento bifásico, mas para tubos ou canais de pequeno diâmetro estas devem ser não invasivas e não intrusivas, ou seja, não podem atravessar a parede do tubo e perturbar o escoamento. Exemplos destas técnicas incluem o uso de sensores capacitivos, de impedância, ópticos, raio-x e o processamento de imagens.

Dentre os sensores empregados para a medida de fração de vazio, os sensores ópticos apresentam-se como uma alternativa conveniente se considerados os pares emissor e receptor, visto estarem disponíveis comercialmente em diferentes especificações técnicas, dispensando circuitos eletrônicos complexos e aspectos construtivos dispendiosos.

A técnica que emprega sensores ópticos vem sendo utilizada para caracterização do escoamento em tubos de diâmetro convencional. Jana et al. (2007) empregaram um laser como emissor e LDR como receptor para identificação de padrões de escoamento bifásico líquido-líquido em um tubo de 25,4 mm e, embora os resultados tenham sido em geral satisfatórios, identificaram que para velocidades de fase mais altas, a resposta do LDR se mostrou randômica. Outro exemplo para tubos convencionais com sensor óptico foi o trabalho apresentado por Wang et al. (2016), cujos resultados do estudo de caracterização do escoamento de ar umidificado com água através do uso de um sensor de Infravermelho (NIR – *Near Infrared*), indicaram 970 nm como o melhor comprimento de onda para a fonte emissora, visto que tal característica aumentou a sensibilidade de detecção da água em um tubo de 50 mm. Foram realizados testes e os dados obtidos permitiram propor um modelo simplificado para a fração de vazio.

No caso de estudos de caracterização do escoamento bifásico em tubos e canais de menor dimensão e obtenção da fração de vazio, estes sensores são particularmente interessantes, já que não é necessário que o fluido escoe através do sensor instalado no canal, como é o caso dos sensores por impedância e capacitivos. Revellin et al. (2006) caracterizaram os padrões de escoamento na mudança de fase do fluido refrigerante R134a em um micro tubo de 0,5 mm utilizando um fotodiodo como receptor, laser como emissor e ajustaram o foco do emissor através do uso de lentes. Foi possível distinguir as fases em diferentes condições de escoamento, além de obter parâmetros tais como frequência e comprimento das bolhas. Hoff (2013) utilizou um sensor óptico com LED-LDR associado à técnica de processamento de imagens para analisar os padrões de escoamento e medir a fração de vazio em um mini tubo de 2,6 mm.

Considerando-se especificamente a caracterização do escoamento bifásico ar-água em minicanais através de técnicas que empregam LEDs no espectro do infravermelho próximo (NIR) como emissores e fotodiodos e fototransistores como receptores e o processamento das imagens, verifica-se que poucos estudos abrangem tais particularidades, o que reforça a relevância deste estudo experimental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar o escoamento bifásico ar-água em um minicanal, para os regimes de escoamento pistonado e bolha isolada, por meio do emprego de sensores ópticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Considerando os parâmetros estabelecidos para os testes, os objetivos específicos são:

- a) Obter a fração de vazio;
- b) Obter curvas de calibração para os sensores que relacionem a fração de vazio em função do sinal do sensor;
- c) Comparar as respostas dos quatro sensores empregados;
- d) Medir a velocidade das bolhas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para a medida da fração de vazio e identificação dos padrões de escoamento líquido-gás é essencial a utilização de sensores capazes não só de detectar as bolhas, mas de oferecer dados que caracterizem as transições entre líquido e gás. Desta forma, a verificação do sinal dos sensores em relação às respectivas imagens de padrões de bolhas é pré-requisito para que possam ser empregados.

O cálculo da fração de vazio por meio das imagens é indispensável uma vez que será relacionado aos sinais dos sensores para a obtenção das curvas de calibração. Tais curvas tem a finalidade de representar matematicamente o comportamento da fração de vazio para cada sensor e podem ser empregadas para a previsão dos padrões de escoamento bifásicos em aplicações diversas.

Os mapas de padrões de escoamento costumam ser desenvolvidos considerando-se a velocidade superficial do gás, que poderá ser obtida a partir da velocidade média das bolhas e da fração de vazio.

A comparação entre as respostas dos sensores é relevante e, se tratando das especificidades de cada sensor óptico utilizado, verifica-se por meio de pesquisas

publicadas que os mesmos pouco têm sido aplicados, desta forma o trabalho apresenta-se como fonte de informação importante para estudos futuros na área de aplicação.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Em termos do que é apresentado neste trabalho, o capítulo 2 apresenta os conceitos referentes ao escoamento bifásico, abordando os padrões de escoamento e os critérios de definição de minicanais. Ainda, são apresentados aspectos sobre as técnicas experimentais para medição da fração de vazio através da aplicação de sensores ópticos, capacitivos, por condutância, impedância, entre outros sensores.

Já o capítulo 3 trata dos materiais e métodos, podendo-se verificar as características da bancada de testes e seus componentes, a definição dos parâmetros de testes, os aspectos relacionados aos sensores, as etapas implementadas para o processamento das imagens e dos sinais dos sensores, bem como a metodologia empregada para a verificação do sinal dos sensores em relação às respectivas imagens de padrões de bolhas e a calibração dos sensores.

Os resultados são apresentados no capítulo 4, sendo eles os padrões de escoamentos e os respectivos sinais dos sensores, os dados que validam os sensores e as curvas de calibração para os sensores propostos.

Por fim, a conclusão apresenta as considerações finais sobre os resultados encontrados na pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros no tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO

O escoamento multifásico caracteriza-se por ser composto por várias fases, sendo seu estudo importante em diversas aplicações tais como na indústria de energia, na indústria de processamento de alimentos e na agroindústria, em aplicações automotivas, entre outras. Já para tubos e canais de menores dimensões as aplicações estão em sistemas microeletromecânicos, dissipadores de calor para componentes eletrônicos, engenharia médica e genética, bioengenharia, etc.

O escoamento bifásico é o caso mais simples de escoamento multifásico, sendo composto por apenas duas fases sendo elas: sólido-líquido, líquido-líquido e líquido-gás. Considerando-se o escoamento bifásico líquido-gás, algumas definições e terminologias se fazem necessárias como as apresentadas na Tab. (2.1).

Tabela 2.1: Definições e terminologias do escoamento bifásico.

Grandeza	Terminologia	Definição
Vazão mássica total \dot{m}	$\dot{m} = \dot{m}_l + \dot{m}_g$	Soma das vazões mássicas do líquido \dot{m}_l e do gás \dot{m}_g
Vazão volumétrica total \dot{Q}	$\dot{Q} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_g$	Soma das vazões volumétricas do líquido \dot{Q}_l e do gás \dot{Q}_g
Vazão volumétrica do líquido \dot{Q}_l	$\dot{Q}_l = \frac{\dot{m}_l}{\rho_l}$	Relação da vazão mássica do líquido \dot{m}_l e a massa específica do líquido ρ_l
Vazão volumétrica do gás \dot{Q}_g	$\dot{Q}_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g}$	Relação da vazão mássica do gás \dot{m}_g e a massa específica do gás ρ_g
Velocidade mássica G	$G = \frac{\dot{m}}{A}$	Relação da vazão mássica total \dot{m} e a área da seção transversal A do canal
Velocidade superficial do líquido U_l	$U_l = \frac{\dot{Q}_l}{A}$	Relação entre a vazão volumétrica do líquido \dot{Q}_l que flui através da área da seção transversal A do tubo.
Velocidade superficial do gás U_g	$U_g = \frac{\dot{Q}_g}{A}$	Relação entre a vazão volumétrica do gás \dot{Q}_g que flui através da área da seção transversal A do tubo.
Velocidade média do líquido u_l	$u_l = \frac{\dot{Q}_l}{A_l} = \frac{\dot{Q}_l}{(1-\alpha)A} = \frac{U_l}{(1-\alpha)}$	Relação entre a vazão volumétrica do líquido \dot{Q}_l e a área da seção transversal ocupada pelo líquido A_l .
Velocidade média do gás u_g	$u_g = \frac{\dot{Q}_g}{A_g} = \frac{\dot{Q}_g}{\alpha A} = \frac{U_g}{\alpha}$	Relação entre a vazão volumétrica do gás \dot{Q}_g e a área da seção transversal ocupada pelo gás A_g .

2.1.1 Fração de Vazio em escoamento Bifásico

Em relação à fração de vazio várias definições são usadas para especificá-la, sendo elas a local, a cordal, a transversal e a volumétrica, cujas definições geométricas podem ser vistas na Fig. (2.1) a, b, c e d, respectivamente.

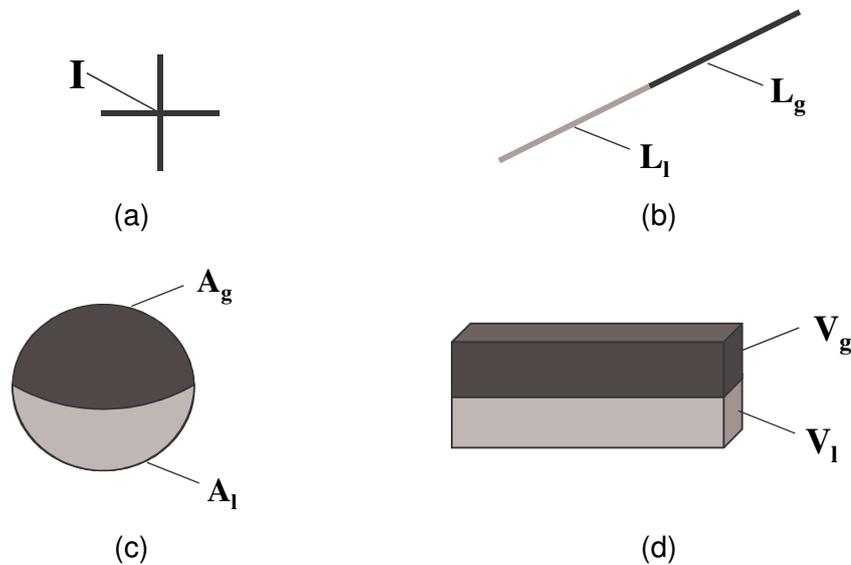


Figura 2.1: Definições geométricas da fração de vazio (a) local, (b) cordal, (c) seção transversal e (d) volumétrica.

Fonte: Adaptado de THOME (2010).

A fração de vazio local, α_{local} , refere-se àquela em um ponto, ou em um volume muito pequeno quando medido experimentalmente. A fração de vazio local é zero, $\alpha_{local} = 0$, quando há somente líquido presente, do contrário, quando se tem somente gás é um, $\alpha_{local} = 1$.

Tipicamente a média da fração de vazio local é apresentada ou medida utilizando-se uma sonda miniatura, que representa a fração de vazio do gás presente naquela localização em um escoamento bifásico. Se $P_k(r,t)$ representa a presença instantânea de gás ou não para um determinado raio r a partir do centro do canal no tempo t , então $P_k(r,t) = 1$ quando há somente presença de gás e $P_k(r,t) = 0$ quando há somente líquido. Desta forma pode-se definir a média da fração de vazio local pela Eq. (2.1).

$$\alpha_{local}(r,t) = \frac{1}{t} \int_t P_k(r,t) dt \quad (2.1)$$

A fração de vazio cordal, α_{cordal} , é medida pelo brilho de um feixe radioativo através do interior de um canal com escoamento bifásico. Calibrando suas diferentes absorções pelas fases de gás (ou vapor) e líquido, e depois medindo a intensidade do feixe no lado oposto, do qual o comprimento fracionado do percurso através do canal ocupado pela fase de vapor pode ser determinado. A fração do vazio cordal é definida pela Eq. (2.2), onde L_g é o comprimento da linha através da fase de vapor e L_l é o comprimento através da fase líquida.

$$\alpha_{cordal} = \frac{L_g}{L_g + L_l} \quad (2.2)$$

A fração de vazio transversal α_{transv} , é tipicamente medida usando meios ópticos ou por uma abordagem indireta, como a medida de capacitância de uma fase líquida condutora. A Eq. (2.3) define a fração de vazio transversal, onde A_g é a área da seção transversal ocupada pelo gás e A_l pelo líquido.

$$\alpha_{transv} = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (2.3)$$

Ainda, para a fração volumétrica, α_{vol} , é usual que as medidas sejam feitas por um par de válvulas de fechamento rápido instaladas ao longo do canal para bloquear o fluido bifásico e desta forma determinar o volume de líquido e gás. A Eq. (2.4) define a fração volumétrica, onde v_g é volume ocupado pela fase gasosa e v_l é o volume ocupado pela fase líquida.

$$\alpha_{vol} = \frac{v_g}{v_g + v_l} \quad (2.4)$$

A definição de fração de vazio mais empregada é a da seção transversal média, que se baseia na área relativa ocupada pelas fases gasosa e líquida, podendo ser prevista por meio do modelo homogêneo, de fases separadas, de modelos que incorporam a distribuição radial da fração de vazio e da velocidade do escoamento, de modelos baseados na física do regime de escoamento e também em métodos empíricos e semiempíricos (THOME, 2010).

2.1.2 Padrões de Escoamento em Tubo Horizontal

Em escoamentos bifásicos, a distribuição das fases de líquido e vapor é um aspecto importante na descrição do escoamento através do tubo ou canal e pode apresentar diferentes configurações definidas como padrões de escoamento. Estas configurações dependem das características do sistema de transporte de fluido, de variáveis operacionais e de propriedades físicas das substâncias que compõem a mistura bifásica.

A taxa de transferência de calor e a queda de pressão estão intimamente relacionados com a estrutura local do fluido em um escoamento bifásico, desta forma a predição dos padrões de escoamento é um aspecto importante para a modelagem do processo.

Para Thome (2010) os padrões em escoamento bifásico em tubos horizontais e verticais diferenciam-se apenas pela distribuição do líquido, que influenciado pela gravidade gera um padrão estratificado no qual o líquido fica na parte inferior do tubo e o gás na superior. Desta forma os padrões de escoamento podem ser visualizados na Fig. (2.2) e definidos como segue:

- Escoamento de bolhas (Fig. (2.2a)) - *bubbly flow*: as bolhas de gás estão dispersas no líquido, com uma alta concentração de bolhas na metade superior do tubo devido a sua flutuabilidade. Quando as forças de cisalhamento são dominantes, as bolhas tendem a dispersar uniformemente no tubo. Em escoamentos horizontais este tipo de escoamento acontece com altas vazões mássicas.
- Escoamento estratificado (Fig. (2.2b)) – *stratified flow*: a baixas velocidades do líquido e do gás, ocorre a completa separação das duas fases, com o gás indo para topo do tubo e o líquido na parte de baixo, sendo separados por uma interface sem distúrbios. Assim, o líquido e o gás estão totalmente estratificados neste regime.
- Escoamento estratificado ondulado (Fig. (2.2c)) – *stratified-wavy flow*: aumentando a velocidade no escoamento estratificado, ondas são formadas na interface e se movem na direção do escoamento. A amplitude das ondas é

evidente e depende da velocidade relativa das duas fases, entretanto as cristas não alcançam o topo do tubo. As ondas sobem pelos lados do tubo, deixando um fino filme de líquido nas paredes depois da passagem da onda.

O escoamento Intermitente é caracterizado por ondas de grande amplitude que intermitentemente lavam o topo do tubo e que contém ondas de menor amplitude entre elas, possuindo ainda as subcategorias pistonado e em golfadas.

- Escoamento intermitente pistonado (Fig. (2.2d)) – *plug flow*: neste regime de escoamento observam-se bolhas alongadas separadas por líquido, nota-se ainda que as bolhas possuem diâmetro menor que o do tubo, o que faz com que se tenha líquido na parte inferior e ao longo do tubo. Este escoamento também pode ser chamado de escoamento de bolhas alongadas - *elongated bubble flow*.
- Escoamento intermitente em golfadas (Fig. (2.2e)) – *slug flow*: em velocidades maiores, o diâmetro das bolhas alongadas torna-se similar ao diâmetro do tubo. O líquido que separa as bolhas também pode ser descrito como ondas de grande amplitude.
- Escoamento anular (Fig. (2.2f)) – *annular flow*: para velocidades do gás ainda maiores, o líquido forma um filme anular contínuo em torno do perímetro interno do tubo, sendo a camada de superior mais fina que a inferior. A interface entre o anel de líquido e o núcleo de vapor é perturbado por ondas de pequenas amplitudes e gotículas dispersas no núcleo do gás. Em altas frações de gás o topo do tubo, que possui uma camada mais fina de líquido, seca primeiro de forma que o filme anular cobre somente parte do perímetro do tubo, sendo então classificado como escoamento estratificado.

Nota-se que os padrões apresentados na Fig. (2.2) são característicos para tubos de diâmetro maior e que os padrões podem ser significativamente diferentes para diâmetros menores, de forma que os conceitos associados são diferentes. Por exemplo, a tensão superficial é predominante em tubos de menor diâmetro e reduz significativamente a velocidade de deslizamento, ou a diferença entre as velocidades do líquido e do gás, o que torna as características do escoamento independente da orientação do canal em relação à gravidade (TRIPLETT et al., 1999).

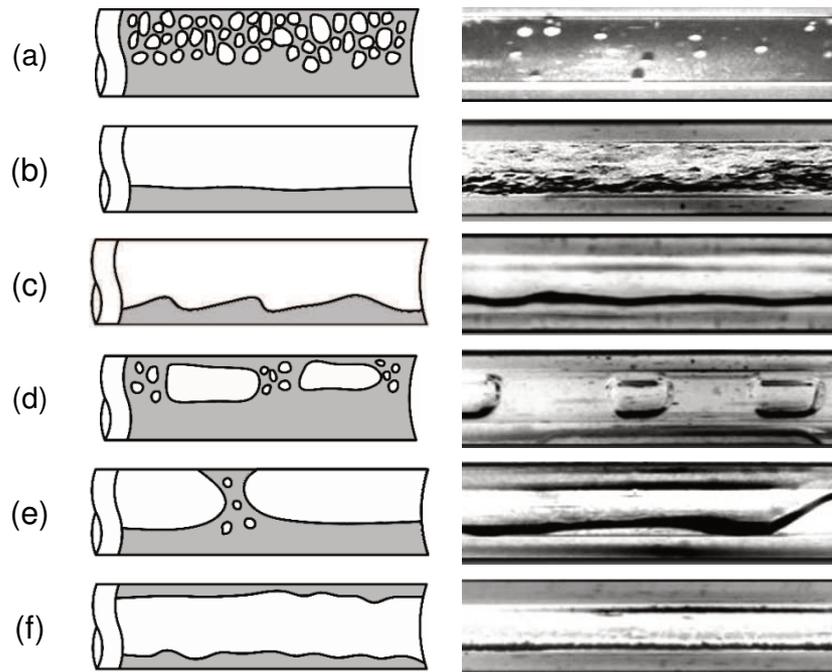


Figura 2.2: Ilustração e imagem para padrões de escoamento: (a) bolhas, (b) estratificado, (c) estratificado ondulado (d) pistonado, (e) golfadas, e (f) anular. Fonte: ilustrações - <https://www.thermalfuidscentral.org/> e imagens adaptadas de Yang e Shied (2001).

Triplett et al. (1999) em experimentos em tubos de diâmetros internos de 1,1 e 1,45 mm e em microcanais semi-triangulares com diâmetro hidráulico de 1,09 e 1,49 mm com ar-água, obtiveram os regimes de escoamento de bolhas isoladas, agitado (*churn*), pistonado, pistonado anular e anular, como apresentam as imagens na Fig. (2.3). Nota-se que para canais de tais dimensões o escoamento estratificado não é observado.

O padrão de escoamento bolha (Fig. (2.3a) e (2.3b)) é caracterizado por bolhas distintas e distorcidas ou não esféricas com diâmetro consideravelmente menor que o diâmetro do canal.

Com o aumento da velocidade superficial do gás, o que leva ao aumento da fração de vazio, as bolhas se juntam próximo à parte superior do canal desenvolvendo o padrão de escoamento pistonado (Fig. (2.3c) e (2.3d)), caracterizado por bolhas cilíndricas e alongadas. O aumento da velocidade superficial do gás e diminuição da velocidade superficial do líquido, ocasionam um aumento da fração de vazio o que ocasiona o alongamento das bolhas e diminuição do líquido entre elas (Fig. (2.3d)).

As bolhas parecem ocupar a maior parte da seção transversal do canal, com uma camada de líquido significativamente menor na parte superior do que na inferior.

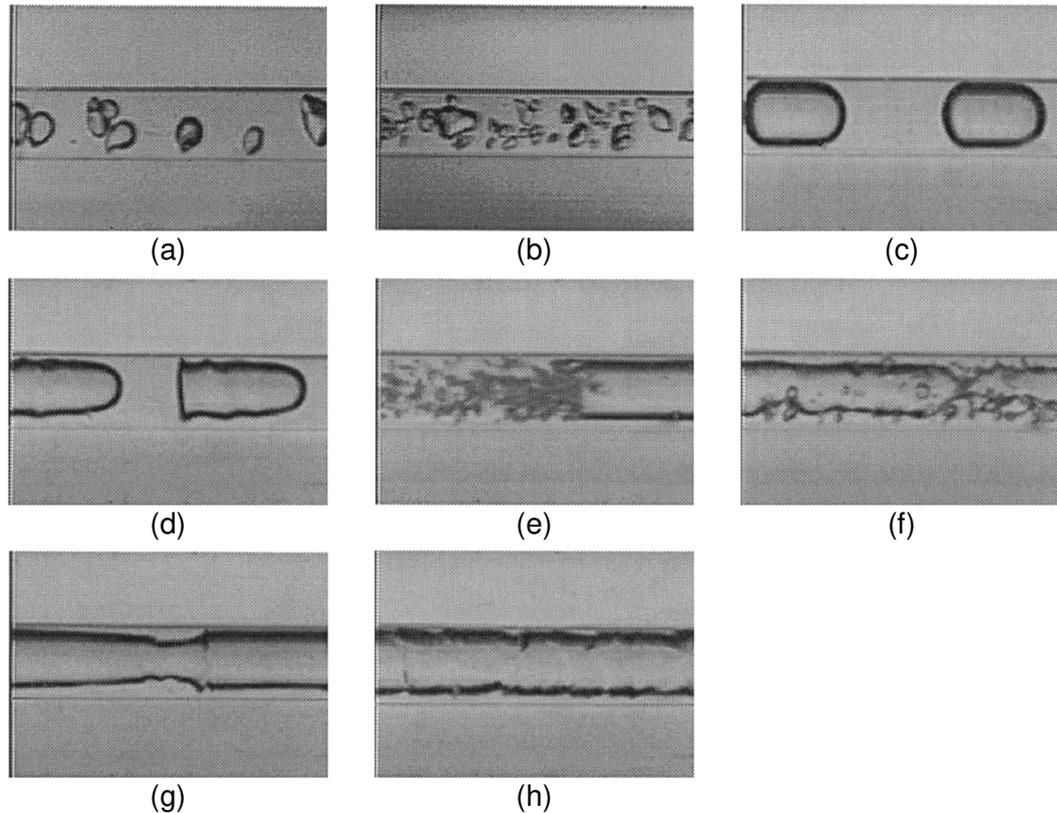


Figura 2.3: Padrões de escoamento (a) e (b) de bolhas, (c) e (d) pistonado, (e) e (f) agitado, (g) pistonado anular e (h) anular em um canal circular de 1,097 mm de diâmetro.

Fonte: Adaptado de Triplett et al. (1999).

O escoamento agitado (*churn*) é estabelecido sob velocidades superficiais altas do líquido. Dois processos podem ser considerados para caracterizar o escoamento agitado, num primeiro (Fig. (2.3e)) o padrão pistonado alongado torna-se instável perto da extremidade final ocasionando sua ruptura, no segundo ondas agitadas submersas (Fig. (2.3f)) periodicamente sofrem ruptura parecendo-se ao escoamento anular-ondulado.

Sob velocidades superficiais relativamente baixas do líquido, o aumento da mistura volumétrica de água e ar leva a bolhas longas e pouco ar, o que resulta em pistões alongados e o desenvolvimento de escoamento pistonado-anular (Fig. (2.3g)). Neste padrão de escoamento ocorrem longos segmentos de padrão anular-ondulado que são interrompidos por ondas solitárias de grande amplitude que não se desenvolveram o suficiente para bloquear o caminho. Aumentando-se ainda mais a

velocidade superficial do gás, as ondas solitárias desaparecem e o fluxo anular é atingido (Fig. (2.3h)).

2.1.3 Critérios de Transição entre Macro e Micro Escala para escoamentos Bifásicos

Algumas classificações foram propostas para definir os critérios de transição entre macro e microescala para escoamentos bifásicos. A Tab. (2.2) apresenta a classificação dos canais definida por Mehendale et al. (2000), cujos critérios estão baseados em técnicas de fabricação, aplicações e condições de confinamento das bolhas.

Tabela 2.2: Classificação dos canais de acordo com Mehendale et al.

Tipo de canal	Valor do diâmetro hidráulico
Convencionais	$> 6 \text{ mm}$
Macrocanais	$6 \text{ mm} \geq D > 1 \text{ mm}$
Mesocanais	$100 \mu\text{m} \geq D > 1 \text{ mm}$
Microcanais	$1 \text{ mm} \geq D > 100 \mu\text{m}$

Fonte: Mehendale et al. (2000, apud KANDLIKAR et al., 2006).

Diferentemente, Kandlikar e Grande (2003) apresentam outros critérios, conforme mostra a Tab. (2.3), que foram desenvolvidos principalmente a partir do escoamento monofásico de gás onde os efeitos da rarefação são considerados, entretanto são também recomendados para o escoamento de líquidos, assim como para escoamentos bifásicos.

Tabela 2.3: Classificação dos canais de acordo com Kandlikar e Grande.

Tipo de canal	Valor do diâmetro hidráulico
Convencionais	$D_h > 3 \text{ mm}$
Minicanais	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$
Microcanais	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$
Microcanais de transições	$10 \mu\text{m} \geq D_h > 1 \mu\text{m}$
Nanocanais de transições	$1 \mu\text{m} \geq D_h > 0,1 \mu\text{m}$
Nanocanais	$0,1 \mu\text{m} \geq D_h$

Fonte: Kandlikar e Grande (2003).

Relacionando-se os critérios dos canais e os padrões de escoamento, Kawaji e Chung (2004) apresentam ilustrações, que podem ser vistas na Fig. (2.4), através das quais observam-se os padrões de escoamento para mini e microcanais.

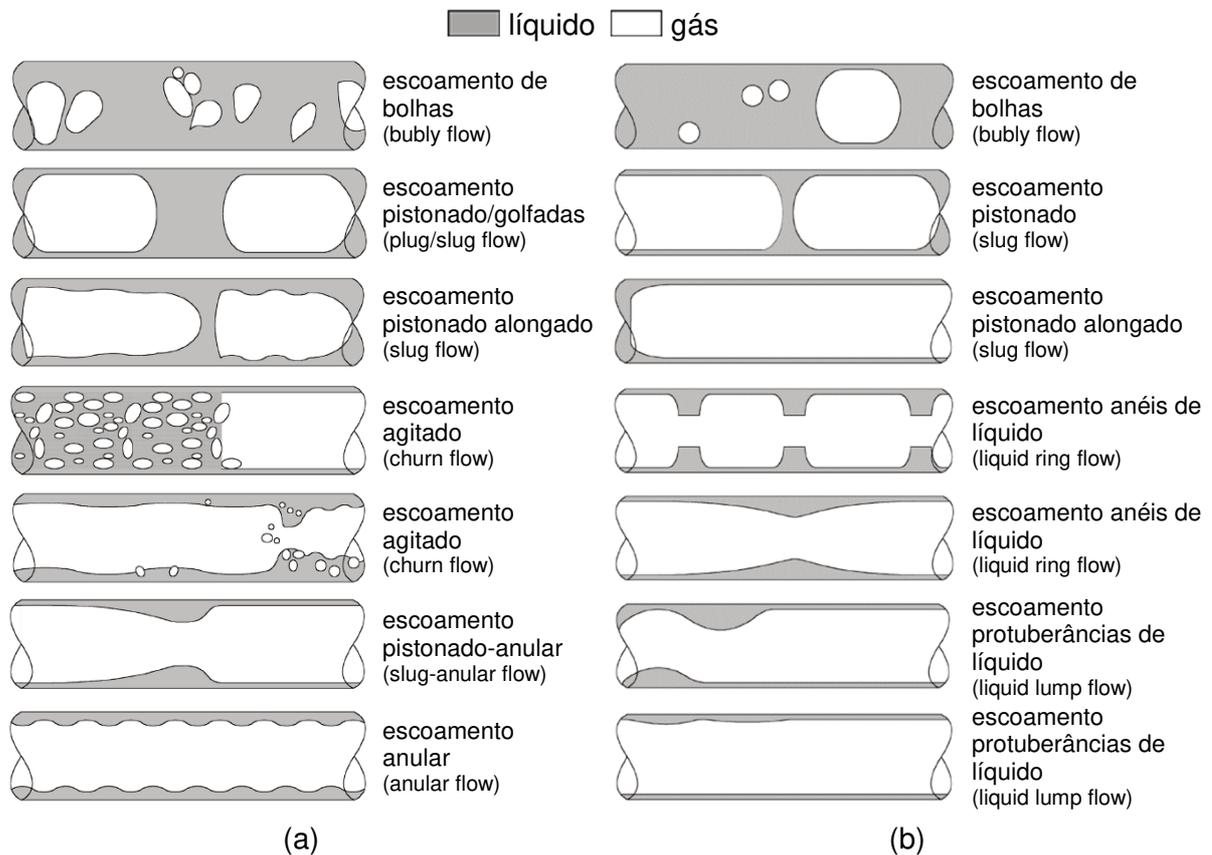


Figura 2.4: Padrões de escoamento para (a) minicanais e (b) microcanais.
Fonte: Adaptado de Kawaji e Chung (2004).

2.2 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA MEDIDAS DE FRAÇÃO DE VAZIO

Diferentes técnicas têm sido estudadas e empregadas na análise de escoamentos bifásicos e medidas de fração de vazio, sendo inicialmente classificadas como intrusivas ou não intrusivas, indicando sua influência ou não no regime de escoamento do fluido. Ainda, outra classificação diz respeito à invasão do meio, ou seja, se o sensor adentra os limites do objeto estudado então a técnica é definida como invasiva ou não invasiva.

O uso de uma ou outra técnica depende das aplicações e estão condicionadas ao tipo de fluido, às dimensões do tubo, ao regime de escoamento e à especificidade da medida a ser realizada. Em termos de medidas de escoamentos, é desejável que

a técnica seja não intrusiva e não invasiva, de forma a não alterar a grandeza a ser medida.

Muitas técnicas para medidas de fração de vazio vêm sendo implementadas através do emprego de sensores diversos, tais como os sensores ópticos, capacitivos, de ultrassom, por condutância, impedância, sendo ainda possível realizar medidas utilizando-se a tomografia ou o raio x. Neste tópico serão apresentados não só o princípio de funcionamento de alguns sensores, mas também a aplicação desenvolvida por alguns autores para a medida de fração de vazio.

2.2.1 Sensores Ópticos

Simplificadamente pode-se considerar que os sensores ópticos são compostos por um emissor e um receptor de intensidade luminosa, sendo uma de suas aplicações a identificação de objetos por meio de reflexão, barreira e interrupção do caminho entre emissor e receptor.

Para medida da fração de vazio pode-se aplicar os sensores ópticos por interrupção, de forma que entre o emissor e o receptor encontra-se o tubo e o fluido como meio de propagação da incidência de luz. O receptor por sua vez deverá ser capaz de medir as variações causadas no meio em consequência da passagem de bolhas, gerando assim um sinal elétrico que posteriormente será associado às características da bolha e também ao padrão de escoamento.

Como emissores costuma-se encontrar LEDs, diodos laser ou até mesmo lâmpadas comuns. Já os receptores são diferenciados por suas características construtivas, sendo os LDRs, fotodiodos e fototransistores os mais usuais.

O **LDR** – *Ligth Dependent Resistor* é um fotorresistor, cuja resistência elétrica varia de acordo com a luminosidade. Na ausência total de luminosidade (escuro) o LDR caracteriza-se por apresentar resistência na ordem de $M\Omega$, do contrário, quando submetido a uma intensidade luminosa alta sua resistência diminui, podendo atingir valores de aproximadamente 100Ω . Os LDRs podem ser construídos de sulfeto de cádmio, que possuem resposta espectral semelhante à da visão humana, com comprimento de onda que varia de 400 nm a 800 nm, e LDRs que utilizam sulfeto de chumbo, que possuem boa resposta à radiação infravermelha. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Como pode ser observado na Fig. (2.5a) o LDR possui uma resposta linear em relação à luminosidade incidente, observando-se a diminuição da resistência à medida que a iluminação aumenta. Já a Fig. (2.5b) apresenta a resposta espectral do LDR, característica importante para a escolha da fonte luminosa adequada, bem como em relação a fontes de interferências, como a luz ambiente, por exemplo.

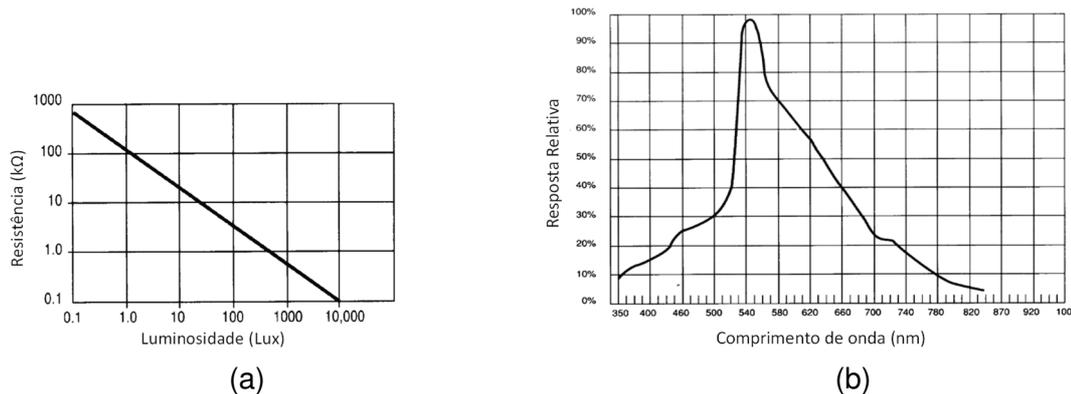


Figura 2.5: Características do LDR - (a) Resistência como função da luminosidade (b) e Resposta espectral.
Fonte: SUNROM Technologies.

Outro tipo de receptor bastante utilizado é o **fotodiodo** de junção pn, que utiliza materiais do tipo InGaAs ou InGaAsP em sua fabricação, sendo então considerados semicondutores, cuja incidência de luz em sua junção irá gerar corrente ou tensão elétrica, de acordo com a configuração utilizada. Os fotodiodos podem ser utilizados como dispositivos fotocondutores, quando há a alteração de sua resistência, ou como dispositivos fotovoltaicos, quando é gerada uma tensão elétrica em função da incidência luminosa. A escolha do fotodiodo como fotocondutor será em função da faixa de frequência a qual o sensor será submetido, que nesta configuração será para frequências abaixo de 100 kHz. Para sinais pulsados de alta velocidade ou feixes de alta frequência, utiliza-se o sensor na configuração fotovoltaico. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Por exemplo, observa-se na Fig. (2.6a) que diferentemente do LDR, o fotodiodo modelo BPV10NF opera em uma faixa de comprimentos de onda acima do espectro visível. Entretanto, quando o fotodiodo opera na configuração fotovoltaica, submetendo-se a frequências mais altas, sua capacitância poderá limitar o tempo de resposta do sensor. A Fig. (2.6b) apresenta a capacitância do fotodiodo em função da tensão reversa em uma frequência de 1 MHz.

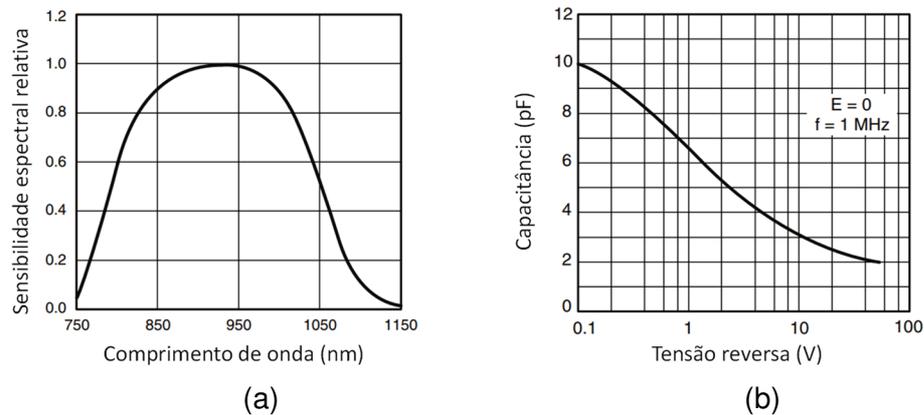


Figura 2.6: Características do fotodiodo em relação à (a) sensibilidade espectral relativa vs. comprimento de onda e (b) capacitância vs. tensão reversa.
Fonte: VISHAY *Semiconductors* (2015).

Também são utilizados como receptores ópticos os **fototransistores**, cujo funcionamento é semelhante ao dos fotodiodos, diferenciando-se principalmente por possuir sensibilidade maior, a qual é consequência de características semelhantes às dos transistores de junção bipolar convencionais, onde a corrente no coletor é proporcional à corrente na base, na relação de seu ganho. Nos transistores costuma-se controlar a corrente elétrica de base, controlando-se assim a corrente no coletor e, embora o fototransistor seja também um transistor, sua corrente de base é induzida por um emissor. Para o aumento da sensibilidade pode-se fazer uso dos fototransistores Darlington, que empregam a configuração que o nomeia, aumentando o ganho de corrente no coletor através de uma configuração interna onde os transistores são conectados em cascata.

Em se tratando dos **emissores**, torna-se importante a definição de fonte luminosa coerente, como a apresentada por GALLAS (2005, p. 1):

Colocando de maneira simples, coerência é a medida da correlação entre as fases medidas em diferentes pontos de uma onda. Entretanto mesmo sendo esta uma propriedade de uma onda que se propaga, a coerência está diretamente relacionada às características da fonte da onda.

São consideradas fontes não coerentes a luz do sol e a luz proveniente de lâmpadas incandescentes e de descarga de gás, entre outras. Já a principal fonte de luz coerente é o **laser**, que emite luz como um perfeito feixe colimado e monocromático. Comercialmente encontram-se laser a gás (ex.: He-Ne), laser de estado sólido e laser semicondutor, sendo o laser de He-Ne o mais utilizado. Diodos

laser podem emitir comprimentos de onda no espectro visível (vermelho, verde ou azul) ou infravermelho. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Os **LEDs** – *Ligth Emitting Diode* são encontrados em diversas cores, encapsulamentos e intensidade luminosa (padrão ou difusa e alto brilho). Embora os LEDs de uso comum possam eventualmente ser usados como emissor junto ao LDR, para fotodiodos e fototransistores empregam-se os LEDs infravermelho. Inclusive, encontram-se comercialmente o conjunto emissor e receptor infravermelho em diversas configurações, como mostra a Fig. (2.7).



Figura 2.7: Exemplos de emissores e receptores infravermelho.
Fonte: <https://pt.aliexpress.com>

Observa-se que a Fig. (2.7a) apresenta o emissor e receptor de forma separada, permitindo assim que o arranjo físico defina se irão trabalhar no padrão reflexivo - Fig. (2.7b) ou por bloqueio - Fig. (2.7c). Sendo que o arranjo por bloqueio o mais usual para medida de fração de vazio, que poderá ser implementado através do uso de emissor e receptor separados (Fig. (2.7a)). Neste caso é necessário a construção de um invólucro para adaptar os sensores em torno do tubo. Embora o sensor apresentado na Fig. (2.7c) possua encapsulamento para o uso em bloqueio, é necessário considerar se a posição dos sensores será adequada em largura e altura, quando instalado junto ao tubo.

As **fibras ópticas** também podem ser usadas como sensores ópticos (Fig. (2.8)), como apresentam David, Djilali e Wild (2012) ao construírem um sensor usando o princípio FBG (*Fiber Bragg Grating*), que consiste em submeter o núcleo de uma fibra óptica monomodo¹ à um padrão periódico de luz ultravioleta intensa, de forma a aumentar permanentemente o índice de refração, criando uma modulação de índice fixo, chamada grade. Através destas características, duas FBGs geram um

¹ Fibra óptica monomodo é aquela que em função de suas características construtivas permite apenas um modo ou caminho para a propagação de luz.

sinal do tipo ligado-desligado como resposta à passagem das gotas em um canal de 0,60 mm, correlacionando precisamente o escoamento de água sobre os pontos com as FBGs, medindo assim a velocidade média e o tamanho da gota a partir da variação do comprimento de onda. Comercialmente encontram-se sensores feitos a partir de fibra óptica que medem deformação, temperatura e aceleração, baseado todos no FBG.

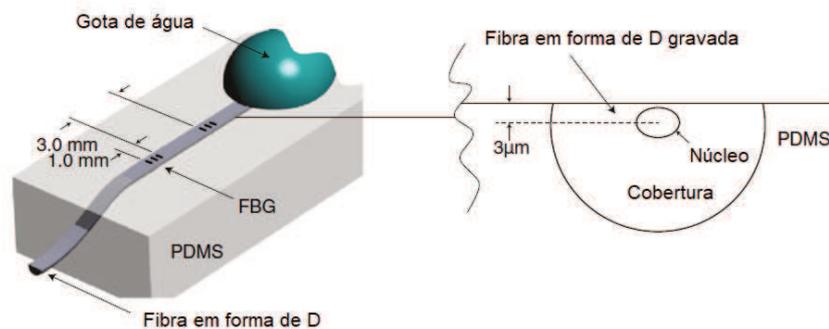


Figura 2.8: Esquema do sensor de líquido desenvolvido por David et al.
Fonte: Adaptado de David, Djilali e Wild (2012).

2.2.2 Sensores Capacitivos

Sensores capacitivos possuem ampla aplicação, na indústria costumam ser utilizados como sensores de presença na detecção de objetos, como sensores de fim de curso ou detectores de nível para líquidos. Sensores capacitivos também são empregados como telas sensíveis ao toque em equipamentos eletrônicos diversos, bem como na área biomédica para medição de pressão, força e aceleração.

A capacitância é uma propriedade elétrica que depende das características construtivas do capacitor, sendo dependente do material condutor o qual foram construídas as placas, de suas respectivas áreas e do material dielétrico (isolante) que fica entre estas placas. Desta forma, é possível calcular a capacitância a partir da Eq. (2.5).

$$C = \frac{\epsilon_i A_p}{d} \quad (2.5)$$

onde C é a capacitância, A é área das placas, d a distância entre as placas e ϵ_i é a permissividade do dielétrico ou isolante, cujo valor ($\epsilon_i = 8,8554 \cdot 10^{-12}$ F/m) é dado pelo

produto da permissividade do vácuo e a constante dielétrica do material (K). Em Balbinot e Brusamarello (2011), são apresentados alguns valores para constantes dielétricas, tais como a do ar que é igual a 1,00054 e a da água pura que é 80.

A Fig. (2.9) ilustra os tipos de configurações para sensores capacitivos, as mais tradicionais são as de placas planas paralelas e a cilíndrica, entretanto observa-se que para a medida de vazão em tubos circulares as configurações em anel, côncavo e helicoidal vêm sendo utilizadas.

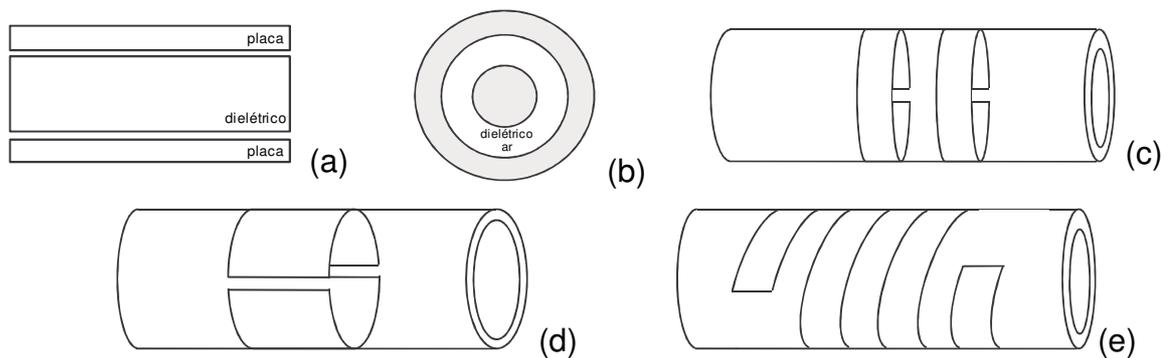


Figura 2.9: Configurações de capacitores (a) placas planas (b) placas cilíndricas (c) anel (d) côncavo (e) helicoidal.

A configuração de placas planas foi implementada por Gijsenbergh e Puers (2013) em um microssistema de resfriamento de alto desempenho para componentes eletrônicos, através da construção de sensores capacitivos (Fig. (2.10a)) com eletrodos de 1 mm de comprimento instalados na saída de 60 microcanais com 100 μm de largura, 500 μm de profundidade e 1 cm de comprimento. A partir da construção do dispositivo foi possível medir a fração de vazão de uma mistura ar-água por meio da capacitância, cujos valores encontrados ficaram na ordem de femto-Farad (fF), apresentaram uma resposta aproximadamente linear e sensibilidade de 12,5 mV por percentual de fração de vazão. Apesar da configuração ser a mais usual de todas, a tecnologia para a fabricação utiliza um processo de erosão iônica reativa profunda (DRIE).

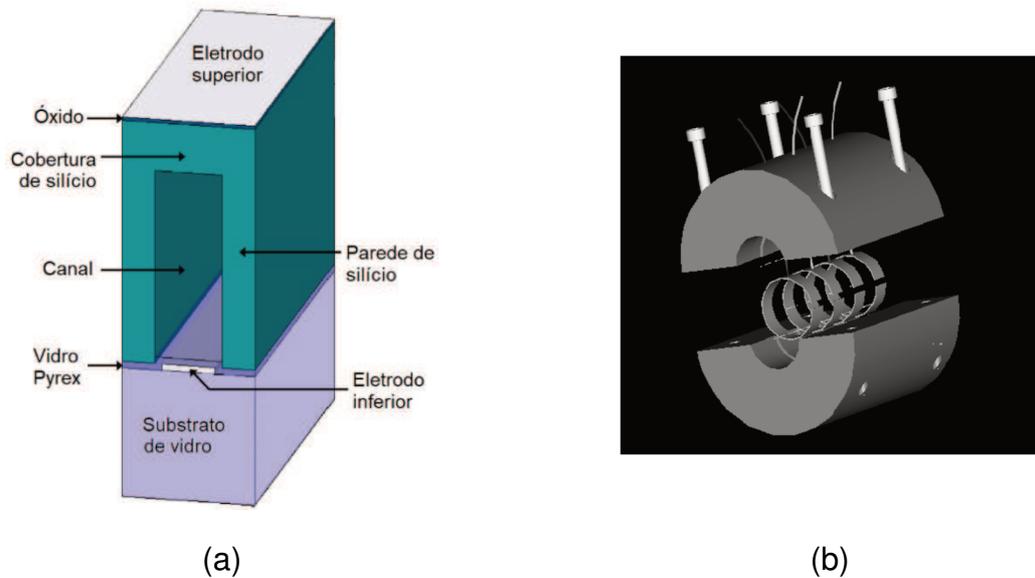


Figura 2.10: Desenho esquemático do (a) sensor de placas planas e do (b) sensor em anel.

Fonte: Adaptado de Gijsenbergh e Puers (2013) e Ahmed e Ismail (2008).

Em se tratando de capacitores tipo anel e côncavo (Fig. (2.10b)), Ahmed e Ismail (2008), apresentaram os aspectos construtivos, calibração, testes e um comparativo entre as configurações em anel e côncavo para tubos com diâmetro interno de 12,7 mm e externo de 15,8 mm, usando como fluido a mistura óleo-ar. Os autores salientam a importância dos cuidados em relação aos aspectos construtivos e de testes para que o sensor possa apresentar resultados coerentes. Concluindo através de análises teóricas e práticas que o sensor capacitivo em anel possui maior sensibilidade em relação ao côncavo. Desta forma o sensor em anel é utilizado para a identificação dos regimes de escoamento dos tipos golfada, (*slug*), bolhas alongadas e anular, através da fração de vazio medida, utilizando-se o método PDF, PSD e a análise de imagens do escoamento. Ainda, é apresentado o equacionamento da capacitância para os sensores tipo anel e côncavo nos regimes de escoamento anular e estratificado.

Em relação aos sensores capacitivos do tipo côncavo, Morales et al. (2011) apresentaram o desenvolvimento de uma sonda capacitiva para medição de fração de vazio em um tubo de 26 mm de diâmetro, onde propõem a inserção de eletrodos de guarda, cuja finalidade é confinar o campo elétrico na tubulação e melhorar o sinal a ser medido. Ainda, com o propósito de prevenir interferências externas, foi proposta uma carcaça externa do sensor. Um aspecto interessante em relação à construção do

sensor é que ele foi desenvolvido utilizando-se uma fita adesiva de cobre. O diagrama esquemático e a foto do sensor podem ser vistos na Fig. (2.11).

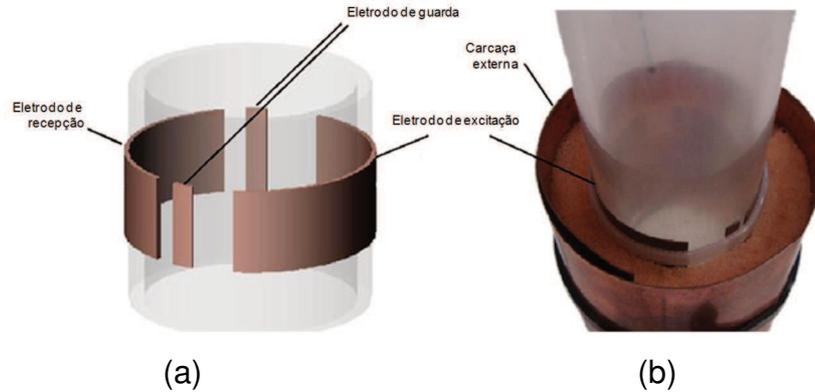


Figura 2.11: (a) Desenho esquemático do sensor de placas côncavas e (b) foto do sensor numa tubulação de acrílico.
Fonte: Morales et al. (2011)

Ye et al. (2011) também utilizaram os eletrodos de guarda a fim de melhorar a resposta de um sensor capacitivo do tipo helicoidal (Fig. (2.12)) em um tubo de 5 mm de diâmetro para o fluido ar-água. Um comparativo dos dados obtidos a partir do sensor melhorado, com os sensores capacitivos helicoidal tradicional e com o de placas côncavas, mostraram que a sensibilidade se encontra distribuída de forma mais homogênea para o sensor proposto, sendo o de placas côncavas o que apresentou a pior resposta. O valor da capacitância é convertido em tensão elétrica através de um circuito eletrônico simples com alta relação sinal-ruído (SNR).

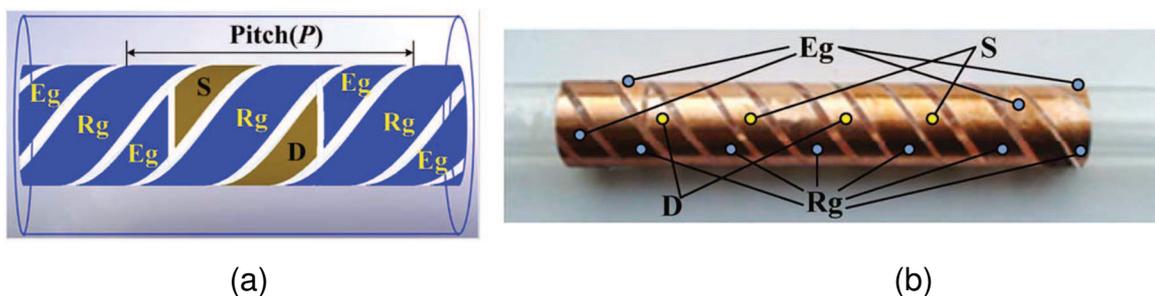


Figura 2.12: (a) Desenho esquemático do sensor helicoidal e (b) imagem real.
Fonte: Ye et al. (2011).

Usualmente aplica-se um sinal de excitação no sensor para medir a capacitância, tal recurso é empregado pelos capacitímetros utilizados por diversos autores pesquisados, sendo o capacitímetro Boonton 72B em uma frequência de 1 MHz

o mais usual. Por outro lado, os autores que desenvolveram sistemas eletrônicos em seus projetos, tais como Gijssenbergh e Puers (2013) e Morales et al. (2011), usaram respectivamente frequências de excitação de 250 kHz e uma faixa de 50 kHz a 5 MHz. Já Canière et al. (2008) utilizou frequências excitação de 1 MHz e 100 kHz, obtendo respectivamente capacitâncias de 0 a 2 pF e de 0 a 20 pF.

2.2.3 Sensores por Condutância

A condutância ou condutividade elétrica é caracterizada por ser o inverso da resistência elétrica, oferecendo uma percepção da facilidade que a corrente elétrica apresenta ao percorrer um condutor. A aplicação deste conceito pode ser vista em Coney (1973), onde o estudo sobre sondas condutivas constituídas por dois eletrodos paralelos realiza a medida de película de líquido condutivo em escoamento bifásico e apresenta os equacionamentos necessários para a utilização das sondas. Apresenta ainda as considerações para a aplicação dos sensores em líquidos não condutivos.

O sensor *wire-mesh* é constituído por dois planos de fios (eletrodos) esticados ao longo do tubo por onde escoo o fluido. Os planos dos eletrodos (transmissor e receptor) se cruzam com um ângulo de 90° e estão separados por uma pequena distância, ou seja, eles não se tocam. Em um mesmo plano os eletrodos são igualmente espaçados ao longo da seção transversal. (SILVA et al., 2010).

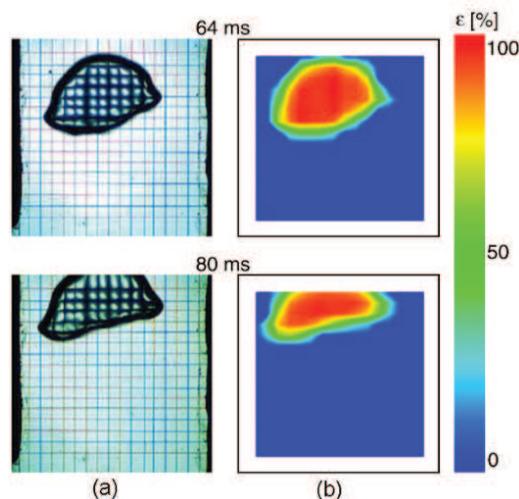


Figura 2.13: (a) Imagens e (b) medidas da distribuição da fração de vazio para bolhas grandes.

Fonte: Ito, Kikura e Aritomi (2011).

Baseado na medida da condutividade elétrica e somando-se o princípio da tomografia *wire-mesh*, Ito, Kikura e Aritomi (2011) construíram um microsensor (μ WMS), através do qual mediram a distribuição da fração de vazio, o volume e velocidade da bolha, comparando seus resultados com imagens sincronizadas. Observa-se na Fig. (2.13a) que o movimento e a deformação da bolha estão bem representados pela distribuição da fração de vazio na Fig. (2.13b).

Diferentemente do sensor *wire-mesh* desenvolvido por Silva et al. (2010) que é intrusivo, Ito, Kikura e Aritomi (2011) propuseram uma nova configuração, onde os sensores são instalados nas paredes do canal a fim de minimizar distorções nas bolhas. Os valores adquiridos foram comparados com as informações do processamento de imagens, estando os dados em concordância.

2.2.4 Sensores por Impedância

A impedância é uma característica de circuitos elétricos quando submetidos a sinais alternados, sendo composta por uma parte real denominada de resistência elétrica e uma parte imaginária chamada de reatância, que dependendo das características do circuito poderá apresentar características indutivas ou capacitivas. Ainda, relacionado ao conceito da impedância, tem-se que seu inverso é denominado de admitância.

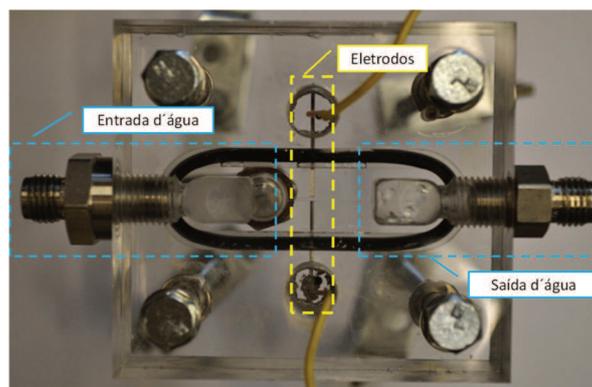


Figura 2.14: Seção de teste com a identificação dos eletrodos. Imagem Editada.
Fonte: Adaptado de Paranjape et al. (2012).

Paranjape et al. (2012) desenvolveram um medidor de fração de vazio (Fig. (2.14)) para um microcanal (0,780 mm x 0,780 mm), baseado na medida de admitância em um escoamento bifásico ar-água em condições adiabáticas, utilizando

água deionizada com adição de 1 mg/l de morfina e hidróxido de amônia para aumentar a condutividade elétrica.

O programa Matlab foi empregado, primeiro para processar os dados do sensor e identificar a parte real e imaginária da impedância medida e segundo para fazer o processamento das imagens adquiridas. Desta forma foi identificado que a impedância medida é proporcional à mistura das fases entre os eletrodos, sendo possível ainda a identificação do regime de escoamento (Fig. (2.15)).

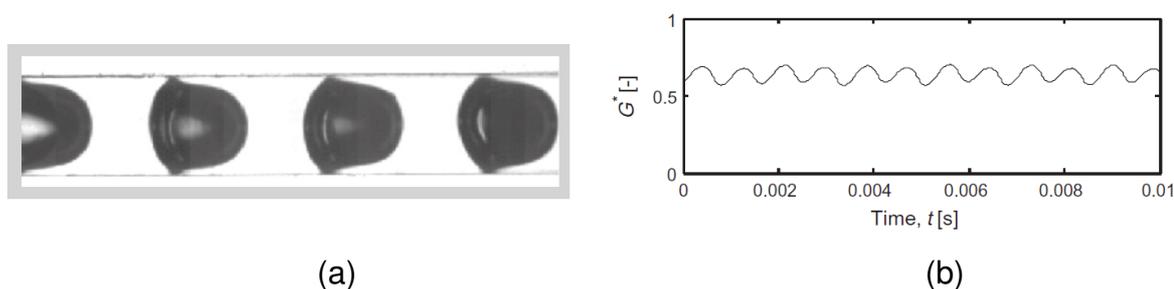


Figura 2.15: (a) Padrão de escoamento *cap-bubbly* e (b) medida da impedância normalizada.

Fonte: Paranjape et al. (2012).

2.2.5 Outros Sensores

O uso da **tomografia** em processos industriais (IPT - *Industrial Process Tomography*) apresenta-se como uma técnica não invasiva e não destrutiva que usa imagens na análise de processos. A tomografia por processos elétricos, inclui as tomografias por impedância (EIT), capacitância (ECT) e eletromagnetismo (EMT). O sensor é feito a partir de múltiplos eletrodos dispostos internamente em torno das paredes do tubo e, de acordo com a estratégia definida, escolhe-se os eletrodos nos quais é aplicada corrente alternada e mede-se a tensão nos eletrodos remanescentes. Desta forma, as medidas de tensão adquiridas são utilizadas para reconstruir a distribuição da impedância no interior do recipiente através de um algoritmo inverso específico (UNIVERSITY OF LEEDS, 2017). Além dos três tipos de tomografias apresentados anteriormente, tem-se ainda a tomografia por resistência (ERT) utilizada por Wang (2005), através da qual foi mapeada a concentração e a distribuição da velocidade da segunda fase em escoamento bifásico particulado, onde diferenças elétricas entre fluidos existe.

Imagens obtidas por **raio X** também podem ser empregadas para se medir fração de vazio em escoamentos bifásicos em microtubos, tamanho de microbolhas,

forma e velocidade, como apresentam Jung et al. (2014). Seu princípio de funcionamento baseia-se na atenuação dos raios emitidos a partir de uma fonte e distância constantes, sendo afetada então pela massa específica do meio (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

O princípio de funcionamento dos **sensores ultrassônicos** é medir o tempo de eco de um sinal enviado por um transdutor piezelétrico. Ofuchi et al. (2010) utilizaram tal sensor para caracterização de escoamento bifásico horizontal circular, no padrão intermitente em golfadas, a partir das medidas do comprimento de lâmina de água entra a parede e a bolha, sua velocidade, comprimento e frequência de passagem.

O **autotransformador** é um sensor que parte da premissa de que uma bobina gera um fluxo magnético proporcional a corrente que a percorre e que essa mesma bobina é capaz de induzir uma força eletromotriz sobre uma segunda bobina próxima a ela e ainda, que essa indução depende da permeabilidade do núcleo da bobina. Desta forma é possível então mensurar variações no fluxo magnético em função do tipo de escoamento e assim determinado fração de vazio, como apresentado por Kendoush e Sarkis (1996).

2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento de imagens é uma necessidade quando deseja-se identificar objetos em uma imagem, calcular sua área ou então obter informações sobre textura.

Para se identificar uma imagem é preciso que se identifique sua borda ou contorno, definido por Solomon e Breckon (2013) como uma descontinuidade ou gradiente na imagem, para este processamento de imagens considera-se filtros diferenciais como parte central da detecção de bordas.

A detecção de bordas faz uso de operadores diferenciais para detectar alterações nos gradientes de cinza ou de cores de uma imagem e está dividida em duas categorias principais: a detecção de bordas de primeira e de segunda ordem, as quais referem-se à ordem da derivada aplicada.

As detecções de borda de primeira ordem são implementadas através de núcleos de filtros, entre eles os propostos por Robert, Prewitt e Sobel, que são implementados com a combinação de dois núcleos ou máscaras: um para a derivada em relação a x e outro para a derivada em relação a y. Os filtros mais empregados

são o Prewitt e Sobel, sendo a principal diferença entre eles é que o núcleo de Sobel implementa diferenciação em uma direção e aplica média gaussiana na outra.

Em se tratando de detecção de bordas de segunda ordem, o operador laplaciano é aplicado e produz uma resposta de borda mais aguçada em relação aos filtros de primeira ordem, visto estar associado às variações no gradiente.

Para Solomon e Breckon (2013) o método Canny é reconhecido como o mais completo método desenvolvido até agora, visto que seu desenvolvimento satisfaz três critérios básicos: baixa taxa de erro, ou seja, não deve haver resposta onde não exista borda; os pontos de borda devem ser bem localizados, o que significa que a distância entre a borda real e a borda encontrada deve ser mínima; e deve haver somente uma resposta a uma borda.

2.4 APLICAÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS NA CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO

O emprego de sensores ópticos (emissor e receptor), para a caracterização do escoamento bifásico e obtenção da fração de vazio tem sido objeto de estudos.

Wang et al. (2016) apresentaram o resultado do estudo sobre o melhor comprimento de onda para medição de fração de vazio em um escoamento anular de água-ar em um tubo de diâmetro interno de 50 mm. Considerando que o espectro do infravermelho próximo (NIR - *Near Infrared*) possui uma banda de absorção característica para água, a sensibilidade na detecção da água durante a medida da fração de vazio no escoamento anular aumenta. Os autores aplicaram a lei de Lambert Beer e avaliaram a transmitância da luz para quatro comprimentos de ondas típicos (970, 1220, 1450 e 1940 nm), concluindo que um comprimento de onda de 970 nm para a fonte emissora aumenta a sensibilidade das medidas.

A partir da identificação do melhor comprimento de onda para a fonte emissora realizaram seus experimentos e obtiveram uma equação simplificada para a fração de vazio, cujos resultados foram comparados com os modelos de Armand-Massina (baseado no modelo homogêneo), com o modelo de Lockhart-Martinelli (baseado no modelo de escoamento deslizante) e com modelo modificado de Dix (baseado no modelo de fluxo de deriva - *drift flux model*). Considerando as comparações realizadas identificaram que para os três modelos, 93,75% dos desvios relativos estão dentro de

uma faixa de $\pm 5\%$ comprovando que a equação proposta tem capacidade para prever a fração de vazio em um escoamento anular de água-ar.

Revellin et al. (2006), com o objetivo de caracterizar quantitativamente as transições dos padrões de escoamento na ebulição do R-134a em um microtubo de diâmetro interno de 0,5 mm, também empregaram sensores ópticos. A Fig. (2.16) apresenta o diagrama esquemático através do qual tem-se uma ideia da estrutura utilizada.

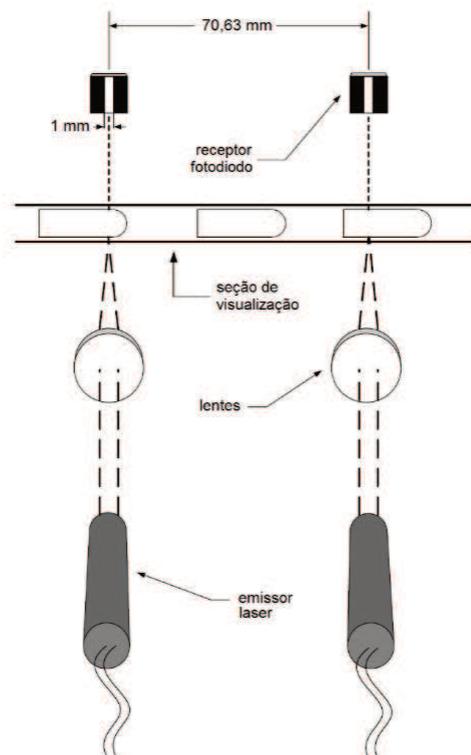


Figura 2.16: Diagrama esquemático dos sensores.
Fonte: Adaptado de Revellin et al. (2006).

Em relação aos sensores, foram utilizados como emissores diodos laser com potência inferior a 1 mW e lentes para focar o feixe no centro do microtubo. Já como receptores foram utilizados fotodiodos, os quais tiveram suas faces pintadas de forma a deixar apenas uma abertura vertical de 1 mm no meio para isolar o sinal recebido. Foi necessária ainda a utilização de um microssistema de posicionamento para alinhar os diodos laser com as lentes e com os fotodiodos.

Nota-se que sendo um canal de 0,5 mm alguns detalhes foram essenciais para a aplicação dos sensores, tais como o uso das lentes para criar um foco no centro do tubo, a restrição em relação à janela de recepção e o alinhamento do conjunto, de forma a restringir a influência de fatores externos no sistema.

O princípio de funcionamento baseia-se nos feixes de laser que interagem localmente com a estrutura do escoamento e por processamento de sinais é possível determinar a frequência de bolhas geradas, a taxa de coalescência destas bolhas, a distribuição comprimento das bolhas de vapor, a velocidade média e a fração de vazio.

Os sinais obtidos por Revellin et al. (2006) permitiram distinguir entre líquido, vapor ou líquido e vapor presentes na seção de testes. A frequência das bolhas, percentual de pequenas bolhas remanescentes, o comprimento das bolhas e os padrões de transição são parâmetros os quais podem ser determinados através da técnica aplicada. Na Fig. (2.18) são apresentados alguns resultados da tensão do fotodiodo em função do tempo para $G = 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $T_{\text{sat}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ sendo possível identificar os padrões de escoamento.

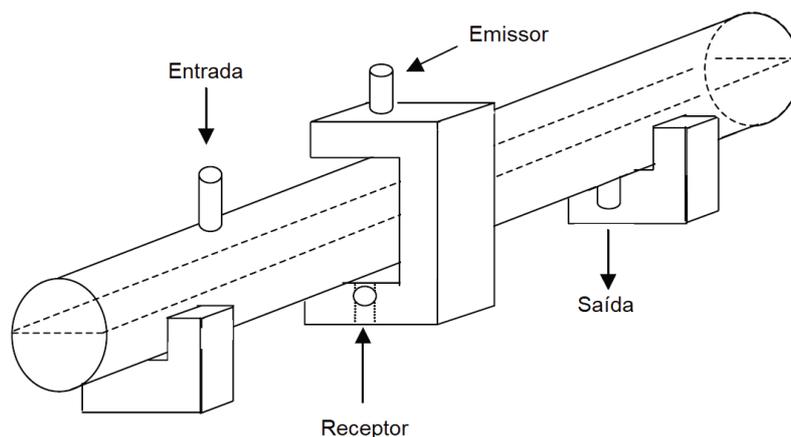


Figura 2.17: Diagrama esquemático dos sensores no tubo.
Fonte: Adaptado de Jana et al. (2007).

A utilização do laser como emissor também foi adotada por Jana et al. (2007), entretanto o receptor utilizado foi um LDR, cujo objetivo foi identificar os padrões de escoamento numa mistura líquido-líquido de água filtrada e querosene em tubos horizontais e verticais de 25,4 mm de diâmetro e compará-los com dados obtidos com um sensor por condutividade, previamente desenvolvido pelos autores. A Fig. 2.17 ilustra o setup utilizado. A querosene utilizada foi propositalmente colorida através do uso de um corante azul com a finalidade de tornar os padrões de escoamento líquido-líquido visualmente identificáveis, aumentando também a diferença na absorvidade entre as duas fases e facilitando a detecção óptica.

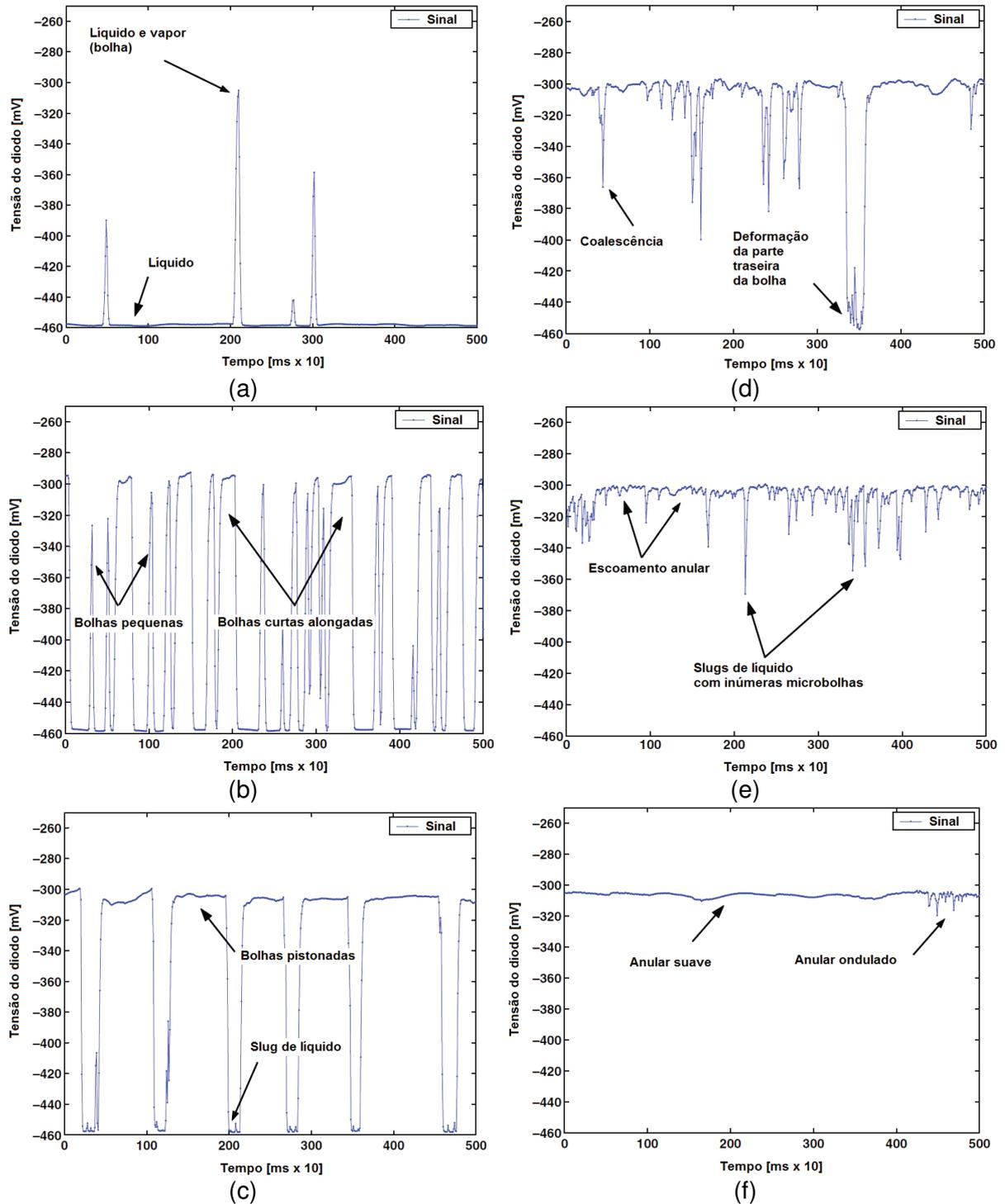


Figura 2.18: Padrões de escoamento (a) bolha, (b) bolhas e pistonado, (c) pistonado, (d) pistonado e semianular. (e) semianular e (f) anular obtidos com um emissor laser.

Fonte: Adaptado de Revellin et al. (2006).

Embora os resultados obtidos tenham sido semelhantes entre os dois tipos de sensores para baixas taxas de escoamento, os autores identificaram que para o escoamento agitado existe uma resposta randômica, mais evidenciada na resposta do sensor LDR. Já para maiores velocidades de fase o sensor por condutância é falho e oferece resultados quase idênticos ao escoamento disperso e anular.

Analisando-se os estudos desenvolvidos para caracterização do escoamento bifásico por meio de sensores ópticos e de seus respectivos resultados, nota-se que os sensores ópticos compostos por um emissor e um receptor, são aplicáveis para a caracterização do escoamento bifásico e para a obtenção da fração de vazio e velocidade média da bolha, entre outros parâmetros.

Nota-se ainda um número reduzido de publicações considerando-se canais de pequeno diâmetro e o uso de sensores ópticos, e menos ainda quando se trata de comparativos entre mais de dois sensores em um mesmo estudo. Desta forma, acredita-se que o estudo desenvolvido seja relevante, uma vez que emprega um tubo de pequena dimensão, compara as respostas de 4 sensores ópticos diferentes entre si, e ainda utiliza o processamento de imagens nas comparações e verificações dos sinais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as informações sobre a bancada de testes e suas especificidades, sobre a etapa de condicionamento de sinais onde apresentam-se os sensores empregados, suas características técnicas e esquemas eletrônicos. Ainda, é apresentada a metodologia utilizada para o processamento das imagens, verificação do sinal dos sensores em relação às respectivas imagens de padrões de bolhas e obtenção das curvas de calibração dos sensores.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Bancada experimental e condições de testes

A bancada de testes é composta pelos blocos (a-m) apresentados na Fig. (3.1) e seu objetivo é proporcionar um escoamento bifásico ar-água em um minitubo de vidro com diâmetro interno de 2,6 mm e externo de 6 mm e comprimento de 1200 mm. A circulação de água no sistema é feita por uma bomba (e), cuja velocidade é controlada por um inversor de frequência (d). O ar (a) é injetado no sistema por uma seringa, unindo-se à água em um misturador (b). Ar e água escoam ao longo do comprimento do tubo e ao chegar ao seu final são separadas no banho termostático (f), que permite a circulação de água e o controle de temperatura. Observa-se ainda o medidor para a vazão de água (c).

A seção de testes (j) é uma parte do tubo onde estão fixados quatro diferentes sensores ópticos na superfície externa. Cada tipo de sensor tem dois pares de receptores e emissores, cujos objetivos são identificar a passagem das bolhas de ar e ainda medir a velocidade das mesmas ao longo do tubo. Os sinais captados pelos receptores serão ajustados através de um circuito condicionador de sinais (k) para que a placa de aquisição de dados (i) possa ler os dados, que serão então processados e visualizados através de um programa implementado no LabVIEW (m).

A seção de visualização (h) consiste de uma seção do tubo inserida em uma caixa de acrílico preenchida com água para auxiliar na aquisição das imagens evitando distorções. Uma câmera de alta velocidade (i) é instalada em frente à seção e logo após os sensores. Um sistema refletor de LEDs (g) com intensidade ajustável permite melhorar a iluminação e conseqüentemente as imagens capturadas pela

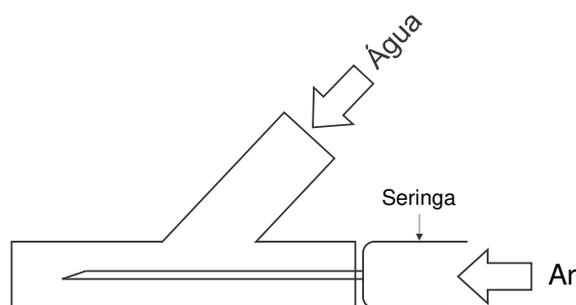


Figura 3.2: Ilustração do misturador água-ar empregado na bancada.

Tabela 3.1: Equipamentos da bancada de teste e suas especificações.

(continua)

Bloco	Especificações
Entrada de Ar na bancada (a)	Inserido através de uma seringa comum de 3 ml com divisões de 0,02 ml.
Misturador (b)	Dispositivo para misturar a água e o ar, feito em acrílico com formato de Y. Sua imagem e dimensões podem ser vistas no APÊNDICE A.
Medidor de vazão de água (c)	Equipamento: Transmissor de baixo fluxo Fabricante: YOKOGAWA Modelo: EJX115A Especificações: Pressão diferencial: 2 – 100 kPa Fluxo de água equivalente: 0,022 – 23 l/min Precisão: $\pm 5\%$
Inversor de frequência para controle da bomba (d)	Fabricante: WEG Modelo: CFW500 Especificações: Tensão de alimentação monofásica ou trifásica: 200-240 V 380-480 V ou 500-600 V Corrente de saída: 1,0 a 56,0 A (0,25 a 30,0 cv / 0,18 a 22,0 kW) Interface: de operação e programação (IHM) incorporada.

(continuação)

Bloco	Especificações
-------	----------------

<p>Conjunto motor e bomba (e)</p>	<p>Equipamento: motor elétrico trifásico Fabricante: WEG Modelo: W22 Especificações: tensão de alimentação trifásica de 220/380V, 60 Hz, potência de 0,55 kW e 3400 RPM.</p> <p>Equipamento: bomba Fabricante: Tuthill Modelo: GDS.19PPPV2NL0000 (0,19 ml/rev) Especificações: fluxo a 3500 RPM Taxa de fluxo: 10 GPH @ 0 PSI Pressão diferencial: 0,7 GPH @ 250 PSI</p>
<p>Banho termostático (f)</p>	<p>Equipamento: Banho Ultratermostático com circulação e controle de temperatura. Fabricante: Quimis Modelo: Q214M Especificações: Capacidade: 11 l Faixa de temperatura: -20 °C a +120 °C Sensor de temperatura: Pt100 com sensibilidade de $\pm 0,1$ °C Vazão: 6 l/min (bomba de circulação externa)</p>
<p>Iluminação (g)</p>	<p>Equipamento: Iluminador de LEDs para câmeras fotográficas e de vídeo. Fabricante: NanGuang Modelo: CN-160 Especificações: ajuste de luminosidade de 5 a 100% através de dimmer, temperatura da cor de 2500 K a 5400 K ficando 7500 K com filtro azul, difusor para luz suave.</p>
<p>Seção de visualização (h)</p>	<p>Especificações: Material: acrílico 3 mm de espessura Dimensões: 120 mm x 125 mm x 25 mm Saída para drenagem da água</p>
<p>Câmera digital (i)</p>	<p>Equipamento: câmera de alta velocidade Fabricante: IDT Modelo: MotionPro Y4 Especificações: Resolução máxima: 1024x1024 com 5100 frames/segundo Máxima taxa de aquisição: 122000 frames/segundo numa resolução de 1024x16 Sensibilidade a luz: 6000 ISSO monocromático e 2000 em cores.</p>
<p>Seção de testes (j)</p>	<p>Formada por sensores ópticos fixados na superfície externa do tubo de vidro.</p>
<p>Condicionamento de sinal (k)</p>	<p>Projeto desenvolvido conforme sensor óptico utilizado. Ver descrição no item 3.2.</p>
(conclusão)	
<p>Bloco</p>	<p>Especificações</p>

Placa de aquisição (l)	Fabricante: National Instruments Modelo: NI USB-6009 Especificações: Entradas analógicas: 4 diferenciais e 8 de modo comum (<i>single-ended</i>) selecionáveis por software. Resolução de entrada: 14 bits para as entradas diferenciais e 13 bits para as de modo comum. Máxima taxa de amostragem: 48 kS/s, dependente do sistema. Faixa de entrada: diferenciais → ± 20 V, ± 10 V, ± 5 V, ± 4 V, $\pm 2,5$ V, ± 2 V, $\pm 1,25$ V, ± 1 V; <i>single-ended</i> → ± 10 V.
LabVIEW (m)	Software para o desenvolvimento de sistemas que requerem teste, medidas e controle. Fabricante: <i>National Instruments</i>

Foram realizados testes utilizando-se os parâmetros definidos na Tab. (3.3) e, para analisar a repetibilidade do experimento e minimizar erros relacionados à medição, aos ruídos do sensor, etc., cada teste foi repetido 30 vezes.

Tabela 3.2: Parâmetros experimentais para os testes de escoamento bifásico ar-água com sensores ópticos.

Teste	Vazão de água [ml/min]	Volume de ar [ml]
1	50	0,02
2		0,06
3		0,10
4	75	0,02
5		0,06
6		0,10
7	100	0,02
8		0,06
9		0,10

3.1.2 Sensores Ópticos

Considerando que o diâmetro interno do tubo é de 2,6 mm e caracteriza um minicanal, torna-se inviável a utilização de sensores intrusivos ou invasivos, desta forma a utilização de sensores ópticos formados pelos pares LED emissor e fotodiodo ou fototransistor como receptor apresenta-se como uma solução apropriada, principalmente se considerados os resultados positivos apresentados por Revellin et al. (2006), Wang et al. (2016) e Jana et al. (2007), que conseguiram identificar e caracterizar padrões de escoamentos através da utilização de tais sensores.

Para a realização dos testes foram utilizados 4 pares diferentes de sensores, sendo eles denominados como sensor grande (SG), sensor pequeno (SP), sensor de tubo para líquidos (ST) e sensor LDR (LDR). Suas especificações são apresentadas na Tab. (3.4).

Nota-se que os sensores grande e pequeno possuem emissores com comprimentos de onda semelhantes, entretanto optou-se pela utilização de ambos na realização testes, visto que seus receptores possuem áreas ativa de recepção bem distintas entre si, como apresenta a Tab. (3.4).

Tabela 3.3: Especificações dos sensores utilizados para os testes.

Denominação do par de sensores	Emissor	Receptor
Sensor Grande (SG)	Emissor infravermelho visível na cor vermelha - MTPS8065WC Pico de emissão em $\lambda = 650$ nm	Fotodiodo ODD-42WB Área ativa de recepção de 42 mm ² Responsividade de 0,05 a 0,58 A/W
Sensor Pequeno (SP)	Emissor infravermelho - MTPS8085P Pico de emissão em $\lambda = 850$ nm	Fotodiodo ODD-5W Área ativa de recepção de 5mm ² Responsividade de 0,03 a 0,63 A/W
Sensor de Tubo para Líquido OPB350 (ST)	LED emissor infravermelho Pico de emissão em $\lambda = 890$ nm	Fototransistor Resposta relativa de 0 a 100% para $\lambda = 800$ a 1100 nm.
Sensor LDR (LDR)	LED branco / diâmetro de 5 mm Pico de emissão em $\lambda = 460$ nm	LDR / diâmetro de 3 mm Resistência a 10 LUX: 9 k Ω Resistência 1000 LUX: 400 Ω

O par de sensores denominado Sensor Grande (SG) é formado por um emissor (Fig. (3.3a)) infravermelho visível na cor vermelha MTPS8065WC com pico de emissão em 650 nm, que de acordo com o fabricante MARKTECH (2011) foi desenvolvido para aplicações que requeiram exatidão e precisão em função de sua janela de emissão, cujo diâmetro é de 80 μ m, o que permite maior concentração no feixe de sinal emitido. Entre suas aplicações estão a detecção óptica, o uso em *encoders* lineares e rotativos e em instrumentos ópticos. Por sua vez, o receptor (Fig. (3.3b)) é um fotodiodo da empresa OPTO DIODE (2013) cuja área ativa de recepção é de 9,91 mm por 4,28 mm e responsividade de aproximadamente 0,45 A/W, que indica a razão entre a corrente e a potência radiante incidente para o comprimento de onda de 650 nm referente ao emissor em questão.



(a) emissor - MTPS8065WC (b) fotodiodo - ODD-42WB

Figura 3.3: Imagens ilustrativas do emissor MTPS8065WC e receptor ODD-42WB.
 Fonte: <https://www.digikey.com/>

O par de sensores pequeno (SP) também utiliza um emissor infravermelho, o MTPS8085P, porém seu pico de emissão é de 850 nm. De acordo com o fabricante MARKTECH (2011) as aplicações são em escaneamento óptico, sensoriamento óptico, detecção de bordas e o uso em *encoders* lineares e rotativos. A janela de emissão deste emissor é maior, sendo seu diâmetro de 150 μm , entretanto seu padrão de emissão é extremamente estreito em função das lentes acopladas, como pode ser visto na Fig. (3.4a). Por sua vez, o receptor (Fig. (3.4b)) caracteriza-se, de acordo como fabricante OPTO DIODE (2013), por ter uma área ativa circular de 5 mm^2 , e responsividade aproximada de 0,58 A/W para o comprimento de onda de 850 nm para o emissor adotado neste par.



(a) emissor - MTPS8085P (b) fotodiodo - ODD-42WB

Figura 3.4: Imagens ilustrativas do emissor MTPS8065WC e receptor ODD-42WB.
 Fonte: <https://www.digikey.com/>

O sensor de líquido para tubos da série OPB350 apresentado na Fig. (3.5) é composto por um LED emissor infravermelho com o pico do comprimento de onda em 890 nm e um fototransistor como receptor, com resposta relativa de aproximadamente 80% para o emissor associado e área circular de 1,81 mm^2 . Segundo o fabricante TT ELECTRONICS (2006), esta série de sensores foi desenvolvida para ser utilizada como sensor de fluido sem contato, na detecção de óleo e outros derivados de petróleo, com fluidos coloridos (aplicações farmacêuticas e biomédicas) e água. Convenientemente, o sensor OPB350W250Z possui um encapsulamento próprio para

tubos transparentes com diâmetro externo de 6,3 mm, sendo apropriado para o tubo utilizado no projeto em questão. Quando o líquido criar uma barreira entre o emissor e receptor fará com que a corrente elétrica no fototransistor (receptor) diminua, já na presença da bolha/ar o receptor irá drenar mais corrente do que na presença de líquido, estas variações são o sinal a ser medido.



Figura 3.5: Imagem ilustrativa do sensor de líquido para tubos - OPB350.
Fonte: TT ELECTRONICS (2016)

Para o sensor de tubo para líquidos não foi necessário desenvolver um suporte, visto que seu encapsulamento é adequado para o tubo utilizado, ficando sua placa de condicionamento de sinais em separado.

Para os sensores grande e pequeno, Fig. (3.3) e (3.4), respectivamente, foram desenvolvidos suportes utilizando-se MDF pintados na cor preta para evitar reflexões. A Fig. (3.6a) apresenta a vista frontal e lateral, onde o diâmetro D_c corresponde ao diâmetro dos emissores e receptores, cujas medidas variam para cada componente. Já a Fig. (3.6b) ilustra a vista lateral do suporte, onde 1 é a placa de condicionamento de sinais, 2 são os conectores de saída do sinal e 3 são os potenciômetros para ajustes de ganho dos amplificadores. Ainda na Fig. (3.6b), 4 é a placa dos emissores, onde 6 é o conector para alimentação e 5 os potenciômetros para ajuste da fonte de corrente dos emissores. As imagens e medidas para os suportes desenvolvidos para os sensores grande e pequeno, assim como o suporte para o sensor LDR podem ser visualizados no APÊNDICE B.

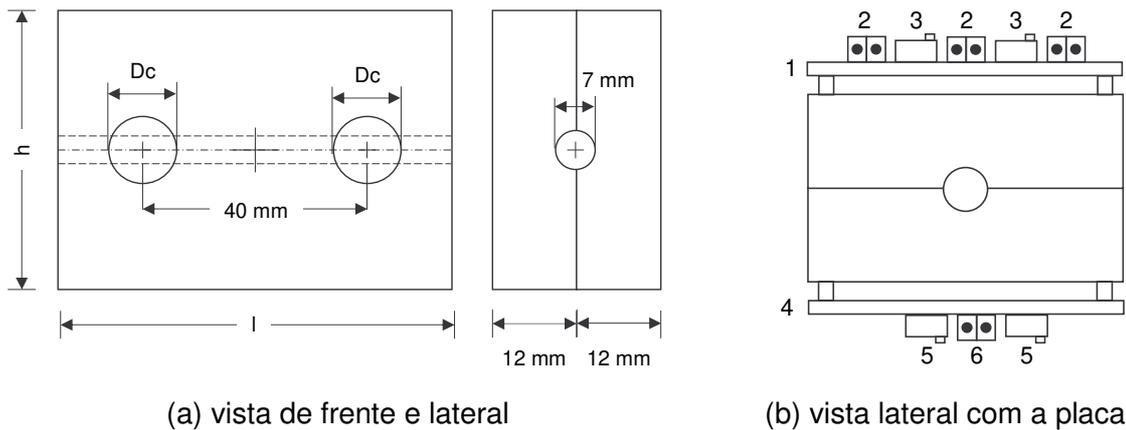


Figura 3.6: Desenho do suporte para os sensores grande e pequeno.

O condicionamento de sinais para os receptores é composto por um amplificador não inversor com ajuste de ganho. Considerando-se a necessidade de manter as fontes emissoras estáveis, foi necessário o emprego de fontes de corrente ajustáveis. Nota-se que os ajustes de ganho e corrente são realizados através de potenciômetros multivoltas (*trim pots*) disponíveis nas placas. Para ambos os circuitos não houve a necessidade de alimentação simétrica, sendo utilizadas fontes comerciais de 12 V e 500 mA. Apesar do sensor LDR disponível no laboratório possuir um circuito condicionador de sinais, um novo circuito foi implementado para que todos os sensores trabalhassem no mesmo padrão de sinais, o que facilitaria o processamento posterior dos dados. Os esquemas eletrônicos podem ser vistos no APÊNDICE C.

3.2 MÉTODOS

A Fig. (3.7) apresenta as principais etapas da metodologia empregada para a verificação do sinal dos sensores em relação às respectivas imagens de padrões de bolhas e a calibração dos sensores ópticos. A aquisição dos sinais dos sensores e a aquisição da imagem são sincronizadas e são realizadas no momento da passagem de uma bolha no escoamento. Com as informações adquiridas é realizado o processamento das imagens e dos sinais dos sensores.

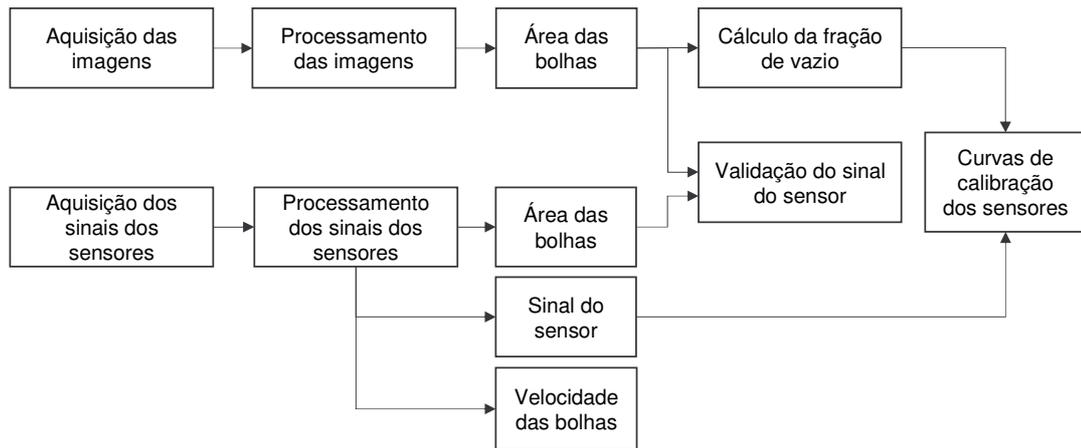


Figura 3.7: Principais etapas da metodologia empregada para verificação e calibração dos sensores ópticos.

A partir do processamento das imagens são encontradas as áreas das bolhas e é calculada a fração de vazio correspondente. Já os dados do processamento dos sinais dos sensores, permitem o cálculo da área da bolha sob a curva $V \times t$ (tensão versus tempo), o cálculo da velocidade e o sinal do sensor em si.

A verificação dos sinais dos sensores é realizada por meio da comparação entre os valores das áreas obtidos no processamento das imagens, tomados como padrão, e as áreas sob as curvas dos sinais dos sensores. Por fim, relaciona-se a fração de vazio e o sinal do sensor para se obter a curva de calibração para cada sensor.

3.2.1 Processamento das Imagens

Uma das etapas para a verificação do sinal do sensor óptico para identificação do padrão de escoamento é a comparação com as imagens registradas, desta forma um programa foi desenvolvido no Matlab para o processamento das imagens. Considerando-se que os dados das imagens serão comparados com os sinais dos sensores, a sincronização entre ambos os sinais é realizada através da observação do escoamento ao longo do tubo, quando então os processos de aquisição são ativados.

As etapas realizadas para o processamento da imagem são baseadas na metodologia proposta por Paranjape et al.-(2012) e podem ser vistas na Fig. (3.8), onde: (a) imagem original, (b) detecta as bordas das bolhas na imagem através do

comando *edge* para o método *Canny*, (c) dilatação e preenchimento dos buracos, (d) erosão, (e) abertura morfológica e (f) uso do comando *convexhull* para exibir a borda encontrada sobre a imagem original.

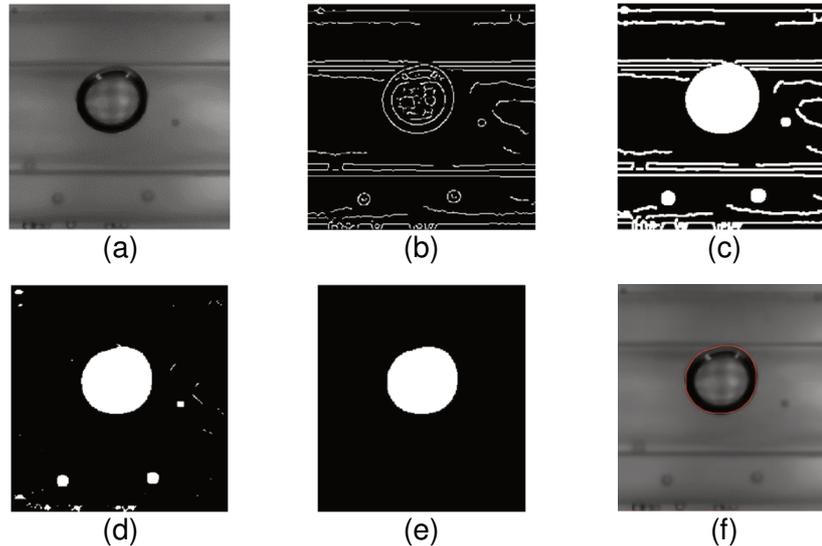


Figura 3.8: Etapas do processamento de imagem da bolha.

Para o cálculo da área da bolha o Matlab utiliza a Fig (3.8e) e o comando *regionprops*, através do qual se obtém informações em pixels sobre a área da bolha, perímetro, entre outras.

3.2.1.1 Diâmetro e área da bolha

Para se obter os valores do diâmetro e da área da bolha em mm^2 inicialmente é medido o diâmetro médio do tubo em pixel, o que foi realizado para cada grupo de amostras a ser processado. O diâmetro do tubo foi medido pelo aplicativo *Image Viewer* do Matlab, sendo o valor médio das 30 amostras inserido no programa para o cálculo da relação *RI*, conforme Eq. (3.1):

$$RI = \frac{D_i}{D_{i_pix}} \quad (3.1)$$

onde D_i é o diâmetro interno do tubo em mm e D_{i_pix} é o diâmetro interno do tubo em pixel.

O valor da relação RI é empregado para a determinação do diâmetro equivalente da bolha, D_{eq_bolha} , em mm, segundo a Eq. (3.2):

$$D_{eq_bolha} = D_{eq_pix} RI \quad (3.2)$$

sendo D_{eq_pix} o diâmetro de um círculo com área equivalente à da imagem da bolha processada (propriedade *EquivDiameter* da função *regionprops*), em pixels.

Por fim é possível calcular através da Eq. (3.3) a área da bolha, A_{bolha} , em mm^2 .

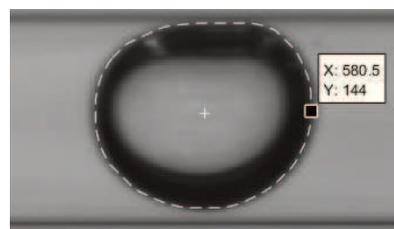
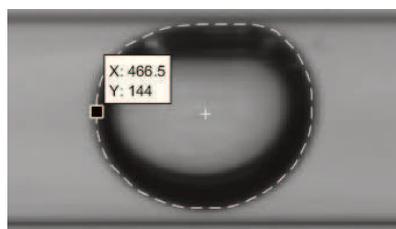
$$A_{bolha} = \pi \frac{D_{eq_bolha}^2}{4} \quad (3.3)$$

As áreas das bolhas calculadas pela Eq. (3.3) serão empregadas na etapa de verificação do sinal dos sensores em relação às respectivas imagens de padrões de bolhas.

3.2.1.2 Diâmetro e fração de vazio ao longo da bolha

O programa também apresenta o resultado para cálculo da fração de vazio (Eq. (2.3)), cujos dados são obtidos a partir dos contornos das bolhas, que são resultado da função *regionprops* e sua propriedade *ConvexHull*, que retorna uma matriz com coordenadas x e y, que especificam as bordas da imagem (Fig. (3.9)).

As matrizes com os contornos da bolha não apresentam os dados em ordem, visto que as coordenadas x e y são dadas em pixel e dependem da posição da bolha na imagem. A Fig. (3.9a) apresenta um exemplo de imagem e de sua coordenada, onde percebe-se que o valor extremo de x à esquerda é de 466,5. Já a Fig. (3.9b) apresenta o valor de x na extrema direita, que é de 580,5.



(a) (b)

Figura 3.9: Exemplo de coordenadas para o contorno de uma bolha.

A fim melhorar a organização dos dados, foram utilizadas as coordenadas do ponto central da imagem para se dividir a imagem em lado direito e esquerdo como apresenta a Fig. (3.10). Desta forma os dados foram separados em duas matrizes que representam os valores de y positivos e negativos para o lado esquerdo da bolha e mais outras duas matrizes que representam os valores de y positivos e negativos para o lado direito da bolha, com seus respectivos valores de x .

A Fig. (3.10) ilustra ainda que para um mesmo valor de x existem dois valores de y , que somados resultarão no diâmetro local em pixel (D_{local_pix}) para a bolha analisada. Desta forma, o programa implementado busca para o lado esquerdo os valores de x iguais e soma os valores de y para este x , calculando em pixel o valor do diâmetro local da bolha (D_{local_pix}) naquela posição. Esse mesmo procedimento se aplica para o cálculo dos diâmetros à direita da bolha. Note que a comparação do x se faz necessária, pois nem todos valores de x possuem um y nas partes superior e inferior da bolha.

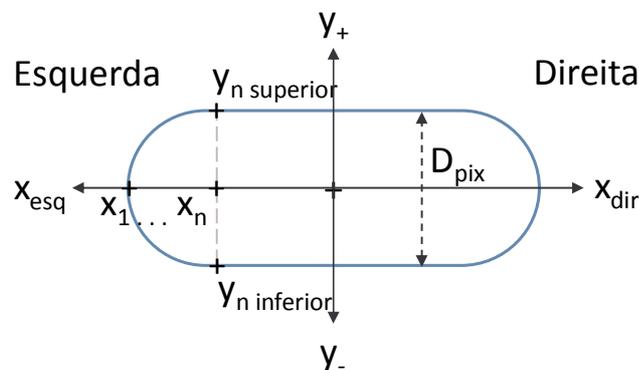


Figura 3.10: Ilustração do contorno da bolha.

Para se encontrar o diâmetro local da bolha em mm é preciso multiplicar D_{local_pix} , que é o diâmetro local calculado em pixel, pelo valor da relação RI (Eq. (3.1)), para logo em seguida se calcular a área local e a fração de vazio local conforme a Eq. (2.3), sendo todas as etapas realizadas pelo programa desenvolvido.

As frações de vazio são calculadas para todas as condições de testes apresentadas na Tab. (3.1), num total de nove, obtendo-se curvas de fração de vazio em função da posição ao longo do comprimento das bolhas.

3.2.2 Processamento dos Sinais dos Sensores

Os sinais adquiridos pelos sensores em cada teste são curvas, conforme apresenta a Fig. (3.11a), e estão relacionadas ao padrão de bolha gerado. Estes sinais passam ainda por processamento para inversão e ajuste do sinal e sua limitação entre 0 e 1, representando assim as condições do sinal de somente líquido (água) e somente gás (ar), respectivamente.

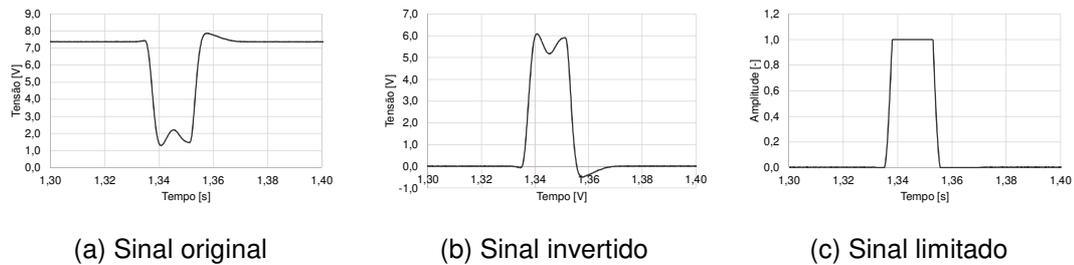


Figura 3.11: Etapas do processamento dos sinais dos sensores.

A Fig. (3.11b) apresenta o sinal invertido (V_{sensor_inv}), que para cada sensor é calculado a partir da diferença entre o valor médio da tensão no escoamento somente líquido ($V_{m_sensor_l}$) e o valor da tensão (V_{sensor}) para cada sensor, de acordo com a Eq. (3.4).

$$V_{sensor_inv} = V_{m_sensor_l} - V_{sensor} \quad (3.4)$$

A etapa seguinte é a normalização ($V_{Nsensor}$) e a retirada dos picos (Fig. (3.10c)). O sinal do sensor já invertido (V_{sensor_inv}) é normalizado em relação à diferença entre a tensão média com líquido ($V_{m_sensor_l}$) e a tensão média com gás ($V_{m_sensor_g}$), descrito pela Eq. (3.5).

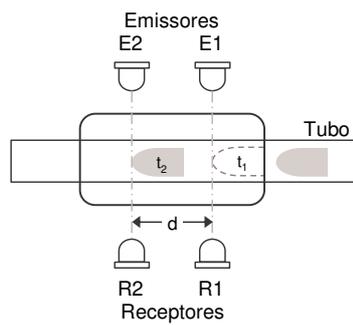
$$V_{Nsensor} = \frac{V_{sensor_inv}}{V_{m_sensor_l} - V_{m_sensor_g}} \quad (3.5)$$

A normalização de V_{sensor_inv} em relação à diferença entre $V_{m_sensor_l}$ e $V_{m_sensor_g}$ faz com que os picos dos sinais fiquem acima de 1, sendo este o ponto de corte para sua retirada (Fig. (3.11c)). Esta metodologia foi aplicada observando-se o comportamento da emissão da luz em um segmento tubo fora da bancada de testes, no qual percebeu-se que os picos das curvas nas Fig. (3.11a) e (3.11b) podem ser associados a efeitos ópticos resultantes da transição entre a água e o ar, da convergência do sinal emissor em função do tubo de vidro e do formato dos contornos da bolha. Desta forma entendeu-se que os picos não deveriam fazer parte do cálculo da área da bolha sob a curva, e por isso são retirados através da limitação do sinal (Eq. (3.5)), resultando em um sinal exemplificado na Fig. (3.11c).

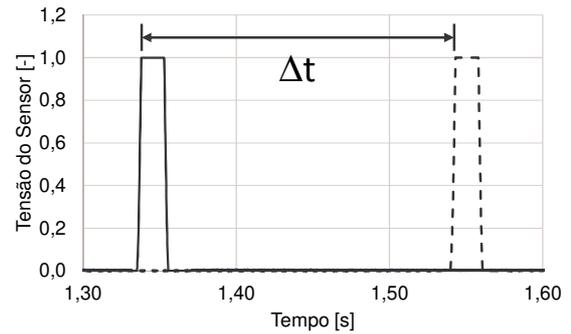
A partir dos dados limitados entre 0 e 1 calcula-se a área sob a curva através do comando *trapz* do Matlab, utilizando-se a matriz de dados resultantes da aplicação da Eq. (3.5). Nota-se que a amplitude do sinal apresentado na Fig. (3.11c) relaciona-se ao diâmetro da bolha, assim como seu período ao comprimento da bolha.

Outra informação adquirida através do sinal apresentado na Fig. (3.11c) diz respeito ao comportamento do sensor na detecção do início e do fim da bolha, ou seja, na faixa do sinal que se encontra entre 0 e 1. Para isso um programa desenvolvido identifica e segmenta o sinal em duas partes, uma para o início da bolha e outra para o final, pois esse sinal representa o comportamento da fração de vazio, e será utilizado na etapa de calibração dos sensores.

Para o cálculo da velocidade média da bolha (u_g), foram utilizados dois sensores separados entre si por uma distância de 0,040 m (Fig. (3.12a)). Os sensores geram dois sinais como mostrado na Fig. (3.12b), entretanto estes sinais estarão separados entre si por um dado intervalo de tempo, que será utilizado para o cálculo da velocidade. O intervalo é encontrado através de um programa que identifica nas matrizes de dados o primeiro valor máximo de cada sensor, identificando suas posições na matriz. Através desta posição é possível localizar os valores de tempo para os dois sensores, encontrar a diferença entre eles e calcular a velocidade.



(a) posição dos sensores



(b) sinais resultantes

Figura 3.12: Ilustração da posição do par de sensores e dos sinais resultantes.

3.2.3 Verificação do Sinal do Sensor Óptico

Considerando-se que os padrões de escoamentos captados através da câmera de alta velocidade representam os mesmos padrões captados pelos sensores ópticos, a verificação da resposta do sensor é possível através da comparação entre os dados obtidos a partir das imagens com aqueles provenientes dos sensores empregados.

Especificamente, a comparação será realizada entre as áreas da bolha obtidas no processamento de imagens e a área sob a curva do sensor. Nota-se a necessidade de normalização dos valores obtidos, visto que se encontram em unidades de medidas diferentes. A partir das áreas adimensionais uma análise estatística será aplicada para o cálculo do erro médio relativo, que representa o quanto o dado adquirido pelo sensor em média se afastou daquele obtido a partir da imagem. A Eq. (3.6) apresenta o cálculo do erro médio relativo – *EMR* para *n* amostras:

$$EMR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A_{Npix} - A_{Nsensor}}{A_{Npix}} 100\% \quad (3.6)$$

onde A_{Npix} é o valor normalizado para a área da imagem, em pixel, e $A_{Nsensor}$, é o valor normalizado para a área sob a curva do sensor, em V.s (Volts-segundos).

Outro parâmetro a ser observado será a amplitude do EMR. De forma geral a amplitude é considerada como uma medida rápida da variabilidade e consiste na diferença entre o mais alto e o mais baixo valor de um determinado conjunto de dados e servirá para demonstrar as variações do EMR encontrado.

O coeficiente de correlação é uma função estatística que permite verificar o grau de relação linear entre dois conjuntos de dados. Valores de coeficientes de correlação próximos a -1 ou 1 indicam, respectivamente, correlação negativa e positiva e, à medida que se afastam destes valores indicam uma correlação fraca entre os dados analisados. O cálculo do coeficiente de correlação entre os valores das áreas das imagens e as dos sensores, assim como a correlação entre as áreas dos sensores, permitirá verificar a coerência entre as medidas.

A Eq. (3.7) apresenta a equação para o cálculo do coeficiente correlação (r_{xy}):

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.7)$$

onde $\text{Cov}(X,Y)$ é a covariância entre os conjuntos de dados e σ_x e σ_y os desvios padrões dos dados.

3.2.4 Calibração dos Sensores

Validados os dados dos sensores para os diferentes padrões de escoamento, é realizada a calibração. Esta consiste em uma curva de ajuste da variação no nível de tensão obtida pelos sensores ópticos em relação às frações de vazio. Para construir a curva são usados os dados dos testes a diferentes condições, portanto para diferentes padrões de bolhas.

Isto pode ser feito correlacionando as imagens da bolha e da curva do sensor, medindo a variação do diâmetro ponto a ponto, do início e do final da bolha, ou seja, de cada seção transversal da bolha (como mostrado na subseção 3.2.1.2), com o nível de tensão gerado pelo sinal do sensor óptico como apresenta a Fig. (3.13).

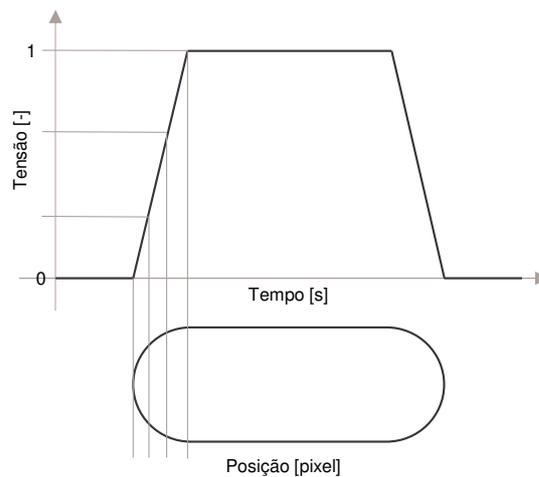


Figura 3.13: Relação entre a curva do sinal do sensor óptico com a imagem do escoamento, para o cálculo local do diâmetro da parte frontal da bolha.

Para uma mesma bolha o sinal gerado pelo sensor e a imagem registram períodos diferentes, porque são equipamentos distintos nos quais cada um tem a sua velocidade de aquisição dos dados. Portanto, deve-se equalizar os dois registros à mesma base de comparação. Os dados referentes ao diâmetro da bolha e, conseqüentemente, o da fração de vazio são resultantes do processamento de imagem realizado no Matlab.

A equalização das escalas é realizada de modo a permitir alterar o eixo das abcissas dos dados dos sensores para que fiquem na mesma escala do eixo das abcissas das imagens.

Por fim, estando a fração de vazio e os dados da tensão de cada um dos sensores nas mesmas escalas, um processo de análise dos dados é realizado selecionando apenas os dados em posições semelhantes para a obtenção da curva de calibração. A metodologia e um exemplo do processo são apresentados no APÊNDICE D.

Obtendo-se a curva de calibração é possível avaliar, através do coeficiente de determinação, R^2 , a qualidade do ajuste da curva em relação aos dados adquiridos. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, sendo 1 o indicativo de um ajuste perfeito da curva para com os dados. Este valor é normalmente fornecido pelos programas que fornecem as curvas ajustadas, como é o caso do Matlab, do Excel, entre outros.

3.2.5 Erro Padrão

Para auxiliar na verificação da resposta de alguns parâmetros, foi calculado o erro padrão da média ou *SEM* (*standard error of mean*), que é uma medida de variação de uma média amostral em relação à média da população. Sendo assim, é uma medida que ajuda a verificar a confiabilidade da média amostral calculada. O erro padrão da média $\sigma_{\bar{x}}$ é dado por:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.9)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra e n o número de amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ÁREA DAS IMAGENS

Para os testes especificados na Tab. (3.1), foram adquiridas 30 amostras e, a partir do processamento das imagens foram obtidos os valores médios das áreas, conforme apresenta a Fig. (4.1).

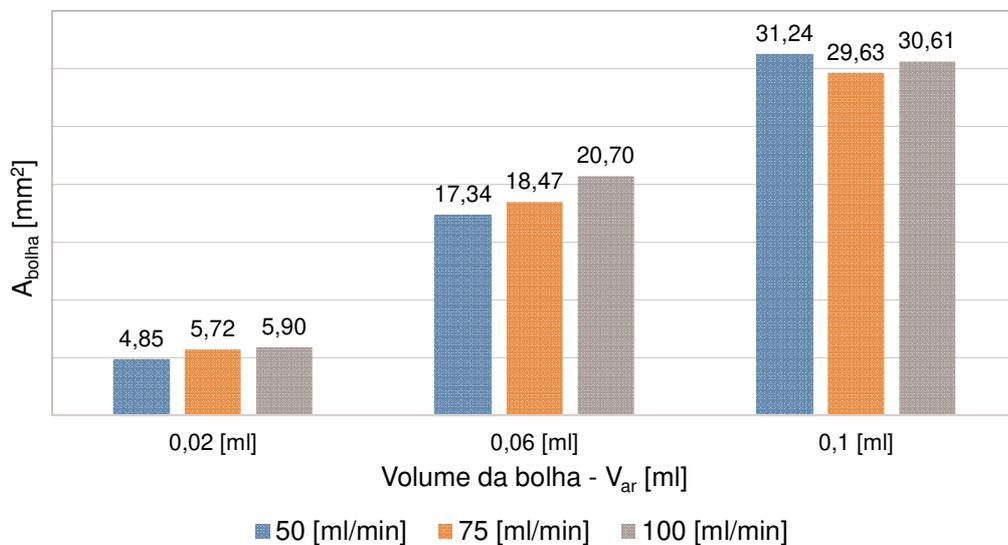


Figura 4.1: Valores médios das 30 amostras para as áreas das imagens processadas para as bolhas de 0,02, 0,06 e 0,10 ml.

O erro padrão da média, $\bar{\sigma}_x$ (Eq. (3.9)) apresentado na Tab. (4.1) indica a variabilidade dos valores médios e são consequência de fatores, tais como a injeção de ar através da seringa, dos ajustes da câmera, da luminosidade e em escala menor, dos parâmetros inseridos do programa de processamento de imagens.

Tabela 4.1: Valores médios das áreas das imagens para as três vazões de água e diferentes volumes de ar.

Volume de ar, v_{ar} [ml]	Área média, A_{bolha} [mm^2]	Erro padrão, $\bar{\sigma}_x$ [mm^2]
0,02	5,49	$\pm 0,05$
0,06	18,84	$\pm 0,15$
0,10	30,49	$\pm 0,07$

4.2 ÁREA DOS SENSORES

A Tab. (4.2) apresenta os valores médios das áreas medidas a partir do sinal dos sensores para as condições de testes definidas na Tab. (3.1).

Tabela 4.2: Áreas sob a curva dos sensores para os parâmetros de testes propostos.

Sensor	Volume de ar [ml]	Área sob a curva do sensor, A_{sensor} [V.s]		
		Vazão de água [ml/min]		
		50 ml/min	75 ml/min	100 ml/min
SG	0,02	0,027	0,018	0,013
	0,06	0,080	0,049	0,041
	0,10	0,141	0,075	0,058
SP	0,02	0,025	0,017	0,012
	0,06	0,076	0,047	0,039
	0,10	0,133	0,073	0,055
ST	0,02	0,027	0,018	0,013
	0,06	0,080	0,049	0,040
	0,10	0,140	0,074	0,056
LDR	0,02	0,034	0,023	0,018
	0,06	0,085	0,054	0,046
	0,10	0,143	0,080	0,062

Comparando-se as áreas para as vazões de água de 50, 75 e 100 ml/min verificou-se que para um mesmo volume de ar, as áreas obtidas através do sinal dos sensores apresentavam-se diferentes. Esse aspecto mostra a influência da vazão de água sob o tempo de aquisição dos sinais pelos sensores, ou seja, se a bolha de ar passa mais rápido, menor será o tempo de captação do sinal pelo sensor, o que resultará em uma área menor sob a curva.

Com o intuito de comparar os valores médios das áreas obtidas pelos sensores, para os diferentes volumes de ar e independente da vazão de água testada, foi necessário primeiro retirar o fator tempo do resultado e depois normalizá-lo em relação ao valor máximo entre as médias das áreas calculadas. Os resultados para as áreas e o erro padrão são apresentados na Tab. (4.3).

Tabela 4.3: Valores normalizados para as áreas sob a curva para todos os sensores.

Volume de ar [ml]	Área Normalizada para cada Sensor, $A_{\text{Sensor}} [-]$			
	SG	SP	ST	LDR
0,02	$0,2210 \pm 0,001$	$0,2092 \pm 0,001$	$0,2217 \pm 0,001$	$0,2896 \pm 0,002$
0,06	$0,6251 \pm 0,004$	$0,6195 \pm 0,004$	$0,6180 \pm 0,003$	$0,6919 \pm 0,005$
0,10	$0,9780 \pm 0,006$	$0,9725 \pm 0,004$	$0,9684 \pm 0,005$	$1,0735 \pm 0,004$

Em função da normalização, observa-se que o LDR possui área maior que 1 para o volume de ar de 0,10 ml, indicando assim que suas medidas ficam acima da média dos outros sensores, característica que também pode ser identificada para os volumes de ar de 0,02 e 0,06 ml. Isso acontece uma vez que o LDR demora mais para detectar o final da bolha, como mostra a Fig. (4.2b), fazendo com que a área sob a curva seja maior. Em relação às medidas de áreas para os outros sensores, os valores são próximos.

Calculando-se o coeficiente de correlação (Eq.(3.7)) entre as áreas das imagens e as áreas medidas pelos sensores (APÊNDICE F), identificou-se que o sensor LDR foi o sensor o qual a correlação foi mais fraca, ocorrendo em 55,6% das vezes, para um total de 9 valores médios das correlações. Por outro lado, o sensor de tubo foi aquele cuja correlação forte ocorreu em 88,9% das 9 correlações médias.

A correlação entre as áreas dos sensores demonstrou que o sensor de tubo e o sensor pequeno foram aqueles que apresentaram melhor correlação entre si, ocorrendo em 55,6% das 9 correlações médias, o que possivelmente esteja relacionado ao fato de que tais sensores possuem as menores áreas de recepção. A correlação mais fraca entre os sensores, foi entre o sensor LDR e o sensor grande, ocorrendo em 44,4% das 9 correlações médias. Nota-se o sensor LDR, para as correlações entre imagens e sensores e entre sensores, foi aquele que mostrou as correlações mais fracas, como consequência das medidas de suas áreas que são maiores em função de sua característica de resposta.

A Fig. (4.2a) apresenta o sinal normalizado para o início da bolha e a Fig. (4.2b) para o final da bolha. Estes sinais representam o comportamento da fração de vazio, e são utilizados na etapa de calibração dos sensores. Ainda, por meio da Fig. (4.2) é possível verificar que a resposta do sensor ST é mais rápida na detecção, tanto o início como o final da bolha.

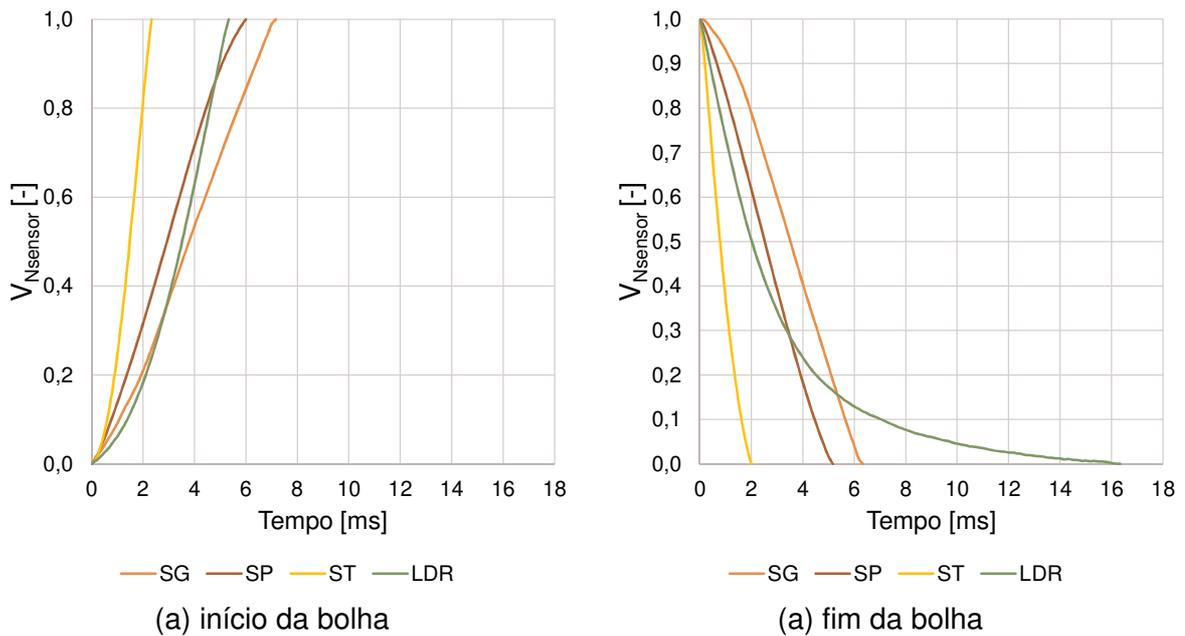


Figura 4.2: Sinais dos sensores para a transição entre água-ar (a) e ar-água (b) na vazão de água de 100 ml/min e volume de água de 0,10 ml.

4.3 VERIFICAÇÃO DO SINAL DOS SENSORES

Para a verificação do sinal dos sensores, as áreas calculadas através das imagens e aquelas obtidas a partir da curva do sinal dos sensores são comparadas. A Fig. (4.3) apresenta o resultado da comparação para as 30 amostras realizadas na condição de vazão de água de 100 ml/min e volume de ar de 0,1 ml. Como as áreas das imagens e as dos sensores estão em unidades de medidas diferentes, estas foram normalizadas em relação ao valor máximo de cada uma. Para os outros valores de vazão de água e volume, os gráficos podem ser vistos no APÊNDICE E.

Embora existam diferenças entre os valores, o comportamento das curvas da Fig. (4.3) manteve-se aproximadamente o mesmo, indicando a validade do uso do sensor para captar o padrão de escoamento. Complementando esta análise, a Tab. (4.4) apresenta os resultados para todas as condições de testes estabelecidas e o erro médio relativo calculado pela Eq. (3.6). Este erro indica a variação entre os valores das áreas dos sensores SG, SP, ST e LDR em relação à área da imagem adotada como padrão.

Analisando-se os dados da Tab. (4.4) verifica-se que os maiores erros médios relativos foram os obtidos para o volume de ar de 0,02 ml, o que se deve

provavelmente à imprecisão no volume de ar inserido através da seringa, cujas divisões eram de 0,02 ml em 0,02 ml.

Considerando-se a vazão de água como referência para a análise, identificou-se que os maiores erros foram os encontrados para o sensor LDR, sendo eles -9,36%, 5,03% e 8,84%, respectivamente para as vazões de água de 100, 75 e 50 ml/min.

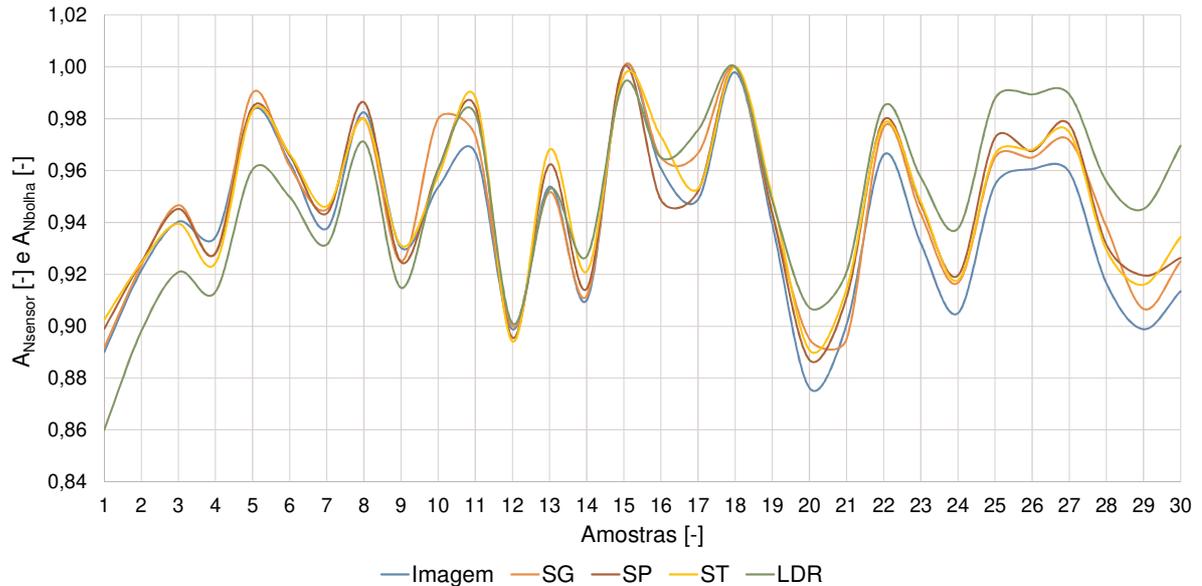


Figura 4.3: Comparativo entre as áreas normalizadas das imagens bolhas e dos sinais dos sensores grande (SG), pequeno (SP), de tubo (ST) e LDR para vazão de água de 100 ml/min e volume de ar de 0,1 ml.

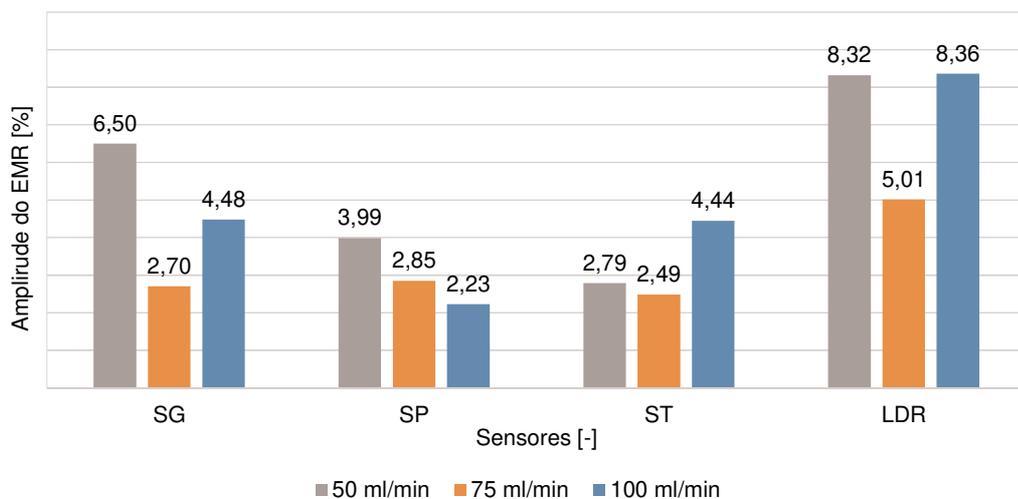


Figura 4.4: Amplitude do erro médio relativo para cada sensor.

A Fig. (4.4) apresenta os valores das amplitudes dos erros de cada sensor, ou seja, a diferença absoluta entre o maior e o menor erro apresentado na Tab. (4.4). Nota-se que o sensor SP e ST foram aqueles cujas amplitudes dos erros para as vazões de água propostas ficaram menores, já o LDR foi o sensor com as maiores variações de erro.

Tabela 4.4: Erro médio relativo para as áreas medidas pelos sensores.

Vazão de água [ml/min]	Sensor	Erro Médio Relativo, EMR [%]		
		Volume de ar, v_{ar} [ml]		
		0,02 ml	0,06 ml	0,10 ml
50	SG	6,62	2,63	0,12
	SP	-4,37	-0,38	-0,41
	ST	-5,99	3,34	3,20
	LDR	-8,84	2,81	-0,52
75	SG	-2,91	0,21	0,47
	SP	-3,36	-0,51	-0,56
	ST	-2,93	-0,44	-0,52
	LDR	-5,03	0,02	0,34
100	SG	-5,14	3,42	-0,66
	SP	-2,97	1,45	-0,74
	ST	-4,61	0,17	-0,87
	LDR	-9,36	4,49	-1,00

4.4 FRAÇÃO DE VAZIO E SINAL DOS SENSORES

A etapa de calibração depende da fração de vazio, que é calculada pela Eq. (2.3) utilizando-se os resultados dos diâmetros obtidos a partir dos contornos das bolhas (Fig. (3.8)) e calculados pela Eq. (3.3). Os dados resultantes desta etapa são fração de vazio em função da posição para todas as condições de vazão de água e volume de ar testadas, conforme apresenta a Fig. (4.5).

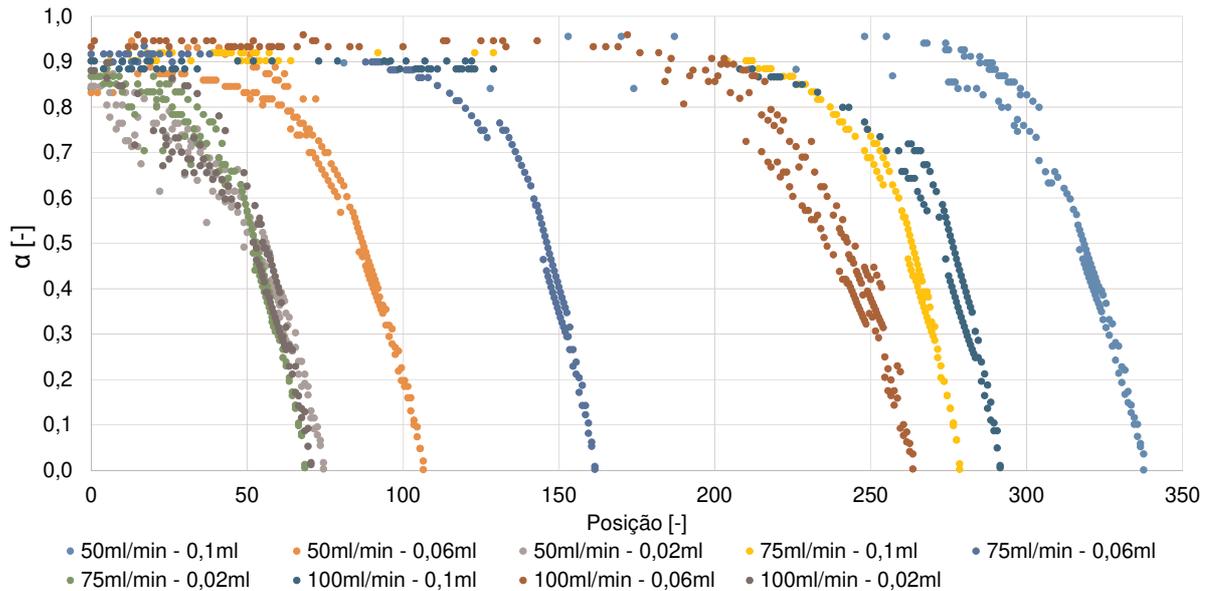


Figura 4.5: Frações de vazio calculadas a partir das imagens para as condições propostas na Tab. 3.2.

Para se obter a fração de vazio resultante, os dados são deslocados para que fiquem alinhados em uma mesma posição no eixo horizontal, tomando-se a posição mais à direita como padrão. As posições registradas no gráfico da Fig. (4.5) são diferentes em função da posição da bolha na imagem original e da forma como o Matlab interpreta os dados, entretanto, esta mudança de posição não altera o comportamento dos dados. Depois do deslocamento dos dados, estes são processados para que se retirem os dados repetidos, resultando assim em uma única curva (Fig. (4.6)), cujos dados representam por fim, o comportamento da fração de vazio.

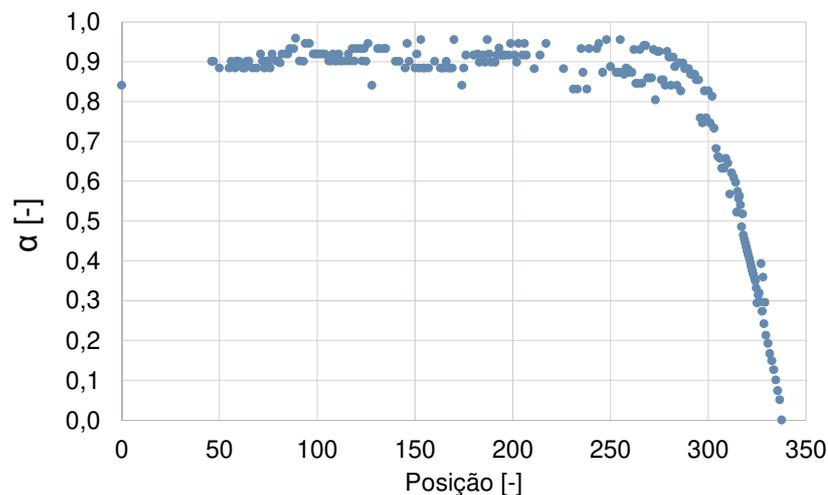


Figura 4.6: Variação da fração de vazio ao longo do comprimento das bolhas de ar.

Os resultados para a tensão dos sensores, como os representados na Fig. (4.2), foram obtidos utilizando-se uma amostra representativa para cada sensor que, após passarem pelo processo de equalização descrito na subseção 3.2.1.2, podem ser visualizados juntamente com a fração de vazio na Fig. (4.7), a fim de demonstrar que os eixos das abcissas para a fração de vazio e para a tensão dos sensores encontra-se na mesma escala.

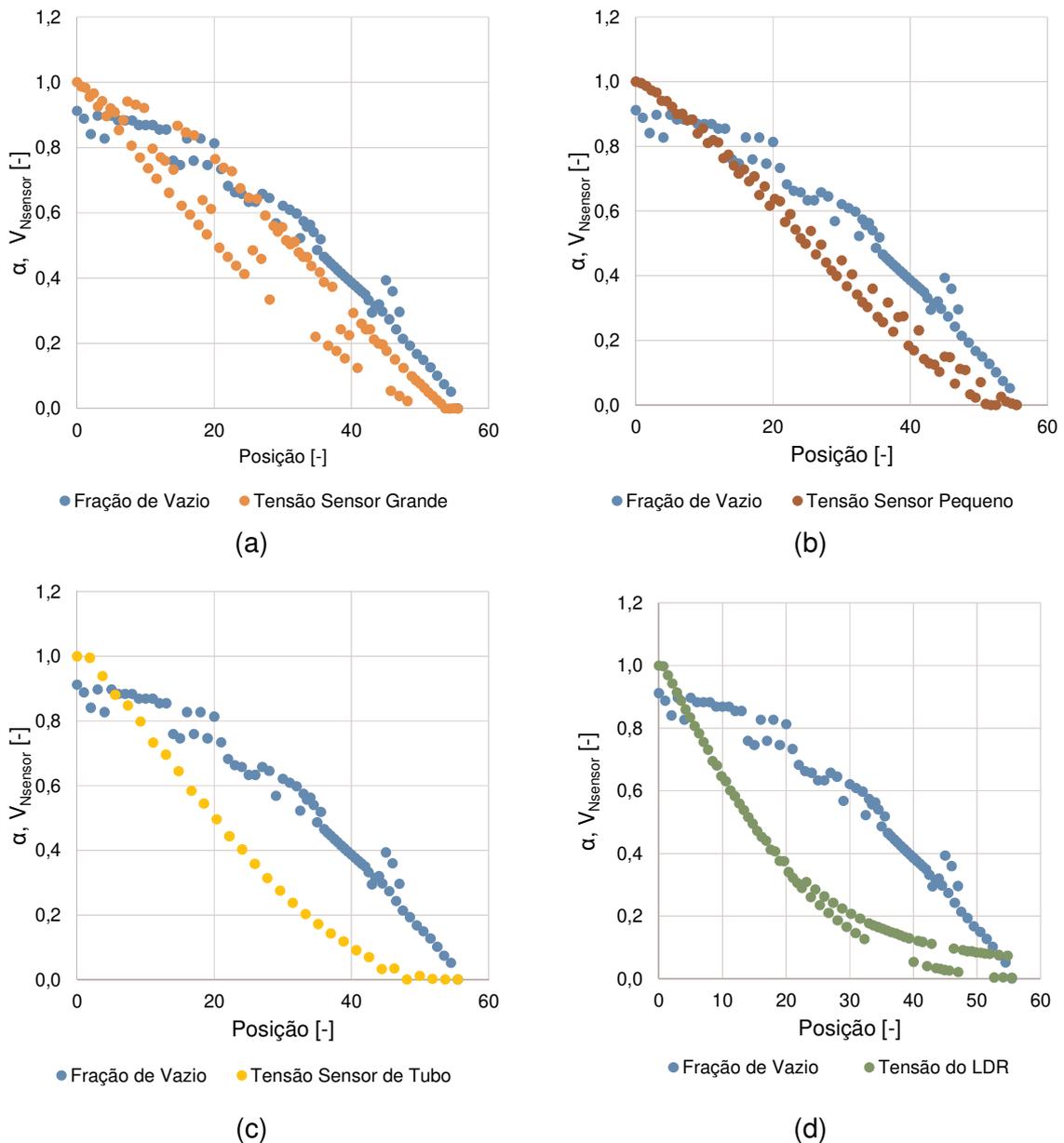


Figura 4.7: Dados da fração de vazio e dos sinais equalizados para os sensores SG (a), SP (b), ST (c) e LDR (d).

4.5 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A partir das informações apresentadas na Fig. (4.7), onde se tem a fração de vazio (α) e tensão do sensor ($V_{Nsensor}$) com a mesma escala no eixo da abcissa, é possível plotar α em função da $V_{Nsensor}$ para cada um dos sensores e ajustar suas respectivas curvas de calibração.

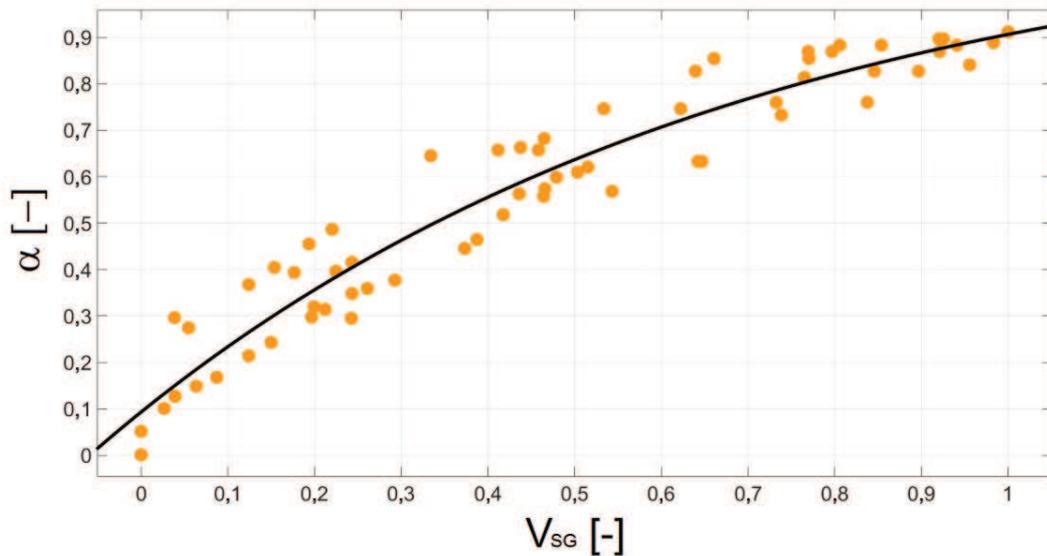


Figura 4.8: Curva de calibração para o sensor SG.

Para todos os sensores foram testadas as aproximações através de polinômios de terceira ordem e exponenciais de segunda ordem. As aproximações através de exponenciais, não só resultaram em melhores coeficientes de determinação R^2 , como visualmente parecem se ajustar melhor, desta forma optou-se por apresentar as equações aproximadas utilizando-se exponenciais de segunda ordem.

A curva de ajuste para o sensor grande (Fig. (4.9)) é dada Eq. (4.1) para valores de V_{SG} de 0 a 1, com $R^2 = 0,928$.

$$\alpha(V_{SG}) = -1,135e^{(-1,351V_{SG})} + 1,228e^{(-0,023V_{SG})} \quad (4.1)$$

Utilizando-se os dados da tensão normalizada do sensor SG que deram origem à curva e os aplicando na Eq. (4.1), encontrou-se para a fração de vazio um desvio

médio de $\bar{\sigma}_x = 0,029$ e erro médio relativo de $EMR = -2,89\%$ em relação ao valor medido.

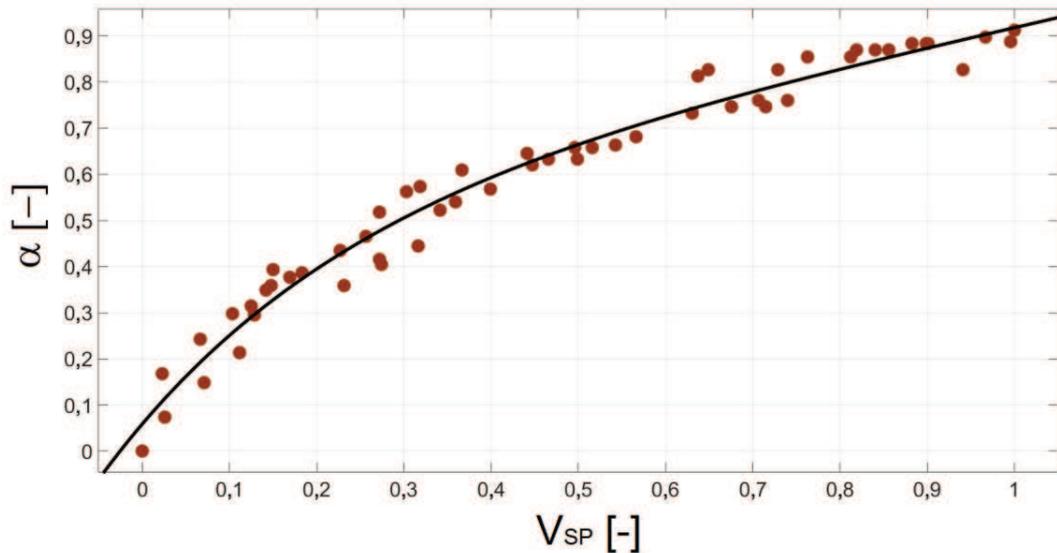


Figura 4.9: Curva de calibração para o sensor pequeno.

A curva de ajuste para o sensor SP (Fig. (4.10)) é dada Eq. (4.2) para valores de V_{SP} de 0 a 1, com $R^2 = 0,973$.

$$\alpha(V_{SP}) = 0,622e^{(0,407V_{SP})} - 0,563e^{(-3,494V_{SP})} \quad (4.2)$$

Da mesma forma, utilizando-se os dados da tensão normalizada do sensor SP que deram origem à curva e os aplicando na Eq. (4.2), encontrou-se para a fração de vazão um desvio médio de $\bar{\sigma}_x = 0,016$ e erro médio relativo de $EMR = -0,71\%$.

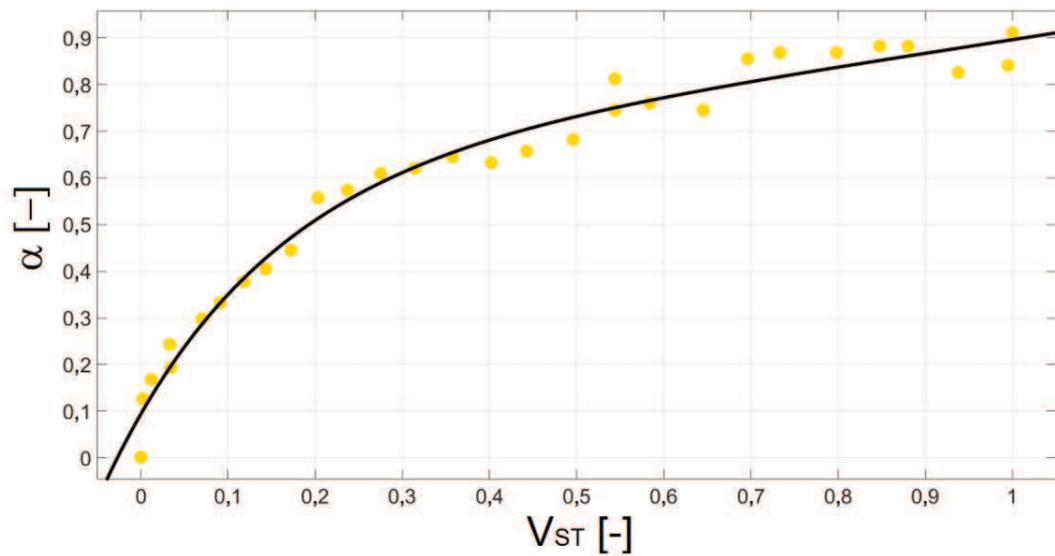


Figura 4.10: Curva de calibração para o sensor de tubo.

Para o sensor de tubo ST a curva de tendência aproximada da Fig. (4.11), resulta na Eq. (4.3), para valores de V_{ST} de 0 a 1, com $R^2 = 0,979$.

$$\alpha(V_{ST}) = 0,660e^{(0,309V_{ST})} - 0,567e^{(-5,391V_{ST})} \quad (4.3)$$

Neste caso foi encontrado um desvio médio de $\bar{\sigma}_x = 0,015$ e erro médio relativo de EMR = - 1,78% para a fração de vazio, α .

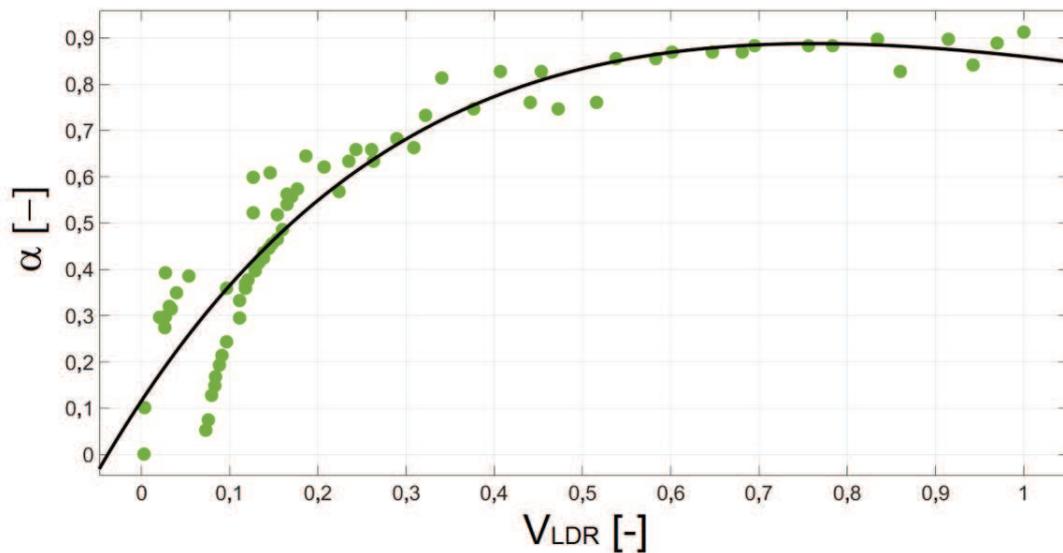


Figura 4.11: Curva de calibração para o sensor LDR.

A curva de ajuste para o sensor LDR (Fig. (4.12)) é dada Eq. (4.4) para valores de V_{LDR} de 0 a 1, com $R^2 = 0,874$.

$$\alpha(V_{LDR})=2,055e^{(-0,640V_{LDR})}-1,939e^{(-2,159V_{LDR})} \quad (4.4)$$

Por fim, para Eq. (4.4) da fração de vazio para o LDR, encontrou-se um desvio médio de $\bar{\sigma}_x = 0,032$ e erro médio relativo de $EMR=-14,62\%$.

Conforme a Fig. (4.2), resposta do sinal do sensor LDR para início (Fig.(4.2a)) e final da bolha (Fig. (4.2b)) possuem curvaturas diferentes entre si e, comparando-se esta diferença com as dos outros sensores, percebe-se que para o LDR esta diferença é mais evidente. Estas diferenças nas curvaturas entre os dois sinais do LDR ocasionam a dispersão dos dados no início da curva de calibração do LDR (Fig. (4.12)) e assim um uma curva com um ajuste pior em comparação com os outros sensores, sendo comprovada pelo seu R^2 de 0,874.

De acordo com o comportamento observado para as respostas dos sensores nas condições de testes propostas na Tab. (3.3), identificou-se que independente da vazão de água ou do volume de ar adotado, a resposta de cada sensor manteve-se a mesma, o que permitiu a obtenção de suas respectivas curvas de calibração.

4.6 PADRÕES DE ESCOAMENTO E SINAIS DOS SENSORES

A Fig. (4.13) apresenta os resultados dos padrões de bolhas e os respectivos sinais dos sensores para os volumes de ar de 0,1, 0,06 e 0,02 ml, em uma vazão de água de 75 ml/min.

Nota-se que as imagens das bolhas apresentadas na Fig. (4.13a) e (4.13b) configuram o padrão de escoamento pistonado, e a imagem da Fig. (4.13c) caracteriza o escoamento de bolhas.

Comparando-se os sinais dos sensores para os diferentes volumes de ar, observa-se a relação entre o comprimento da bolha e a largura do sinal, que representa o tempo gasto pelo sensor na detecção a bolha.

Os sinais dos sensores representam as respostas em relação início e final de bolha e quanto maior for a excursão do sinal, melhor será a visualização de suas características. Desta forma, para os circuitos condicionadores de sinais os ajustes de ganho para os receptores e os ajustes de corrente dos emissores, foram realizados

para que o sinal dos sensores tivesse a máxima excursão em amplitude, sem que houvesse saturação do sinal.

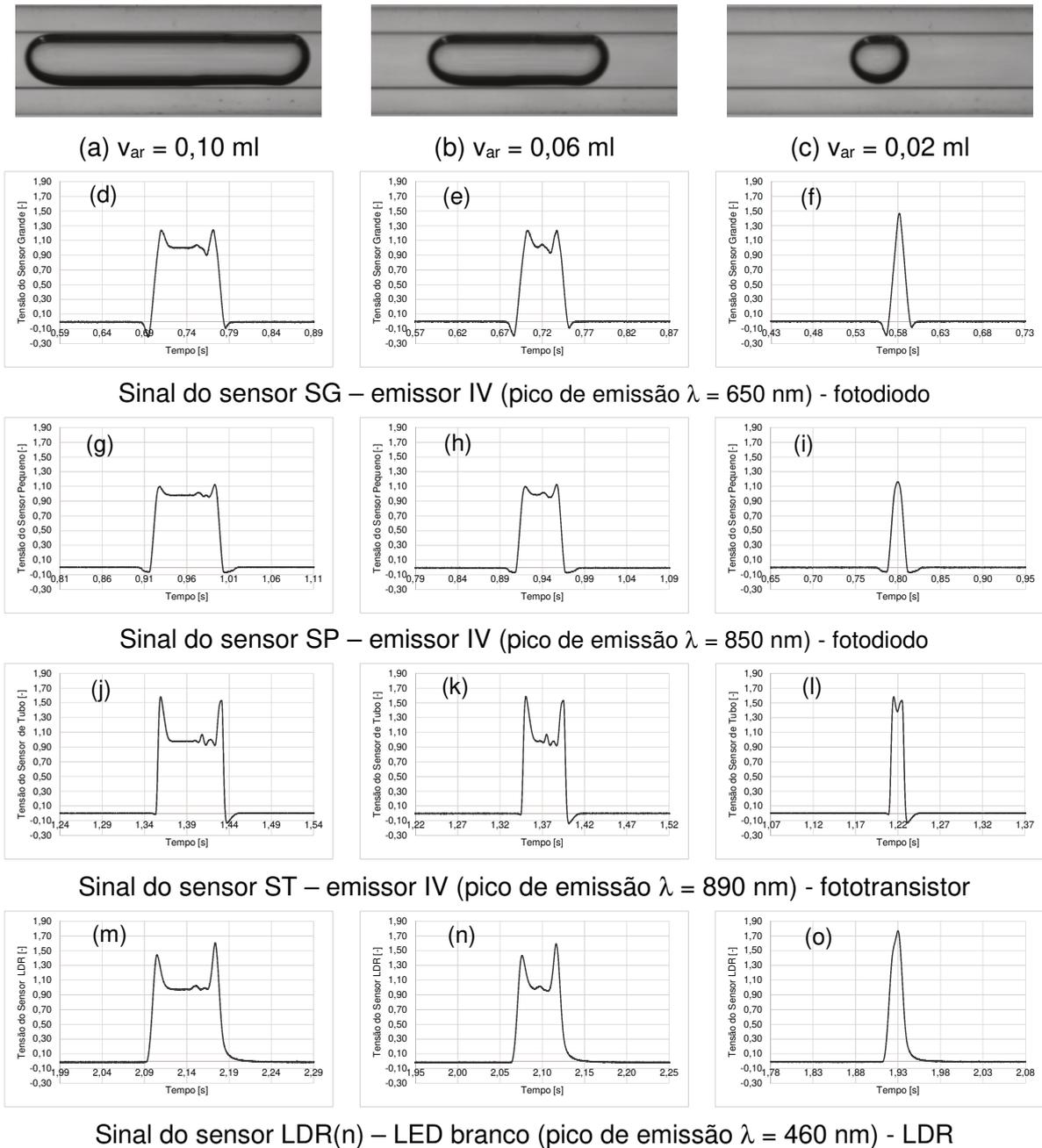


Figura 4.12: Imagens e sinais para volumes de ar de 0,10, 0,06 e 0,02 ml e vazão de água de 75 ml/min.

Através dos sinais apresentados na Fig. (4.13d) a (4.13o) percebe-se que de forma geral os sensores possuem resposta similares, visto que a bolha detectada é a mesma, entretanto percebem-se características distintas entre os sensores. Os sinais dos sensores grande (SG – Fig. (4.13d) a (4.1f)) e pequeno (SP – Fig (4.13g) a (4.13i))

são semelhantes entre si pois ambos os receptores são fotodiodos e são menos sensíveis em relação ao sensor de tubo (ST- Fig. (4.13j) a (4.13l), cujo receptor é um fototransistor. Por meio das Fig. (4.13j) e (4.13k) percebe-se que os picos identificados pelo ST são maiores do que os do SG, Fig. (4.13d) e (4.13e), e SP, Fig. (4.13g) e (4.13h). Ainda em relação aos picos, o sensor LDR, Fig. (4.13m) e (4.13n), possui resposta semelhante ao sensor de tubo ST.

Outro aspecto a se considerar seria a área de recepção dos sensores, como ilustra a Fig. (4.14), onde em cinza tem-se a área do sensor e em branco a área equivalente a uma bolha de 0,02 ml. Nota-se que para o sensor ST seu receptor estará sempre coberto durante a passagem da bolha de ar, independente do volume.

Os sinais apresentados na Fig. (4.13) são normalizados de acordo com Eq. (3.5), de forma que quando o sensor detecta somente ar, o nível de tensão é igual a 1. Isso é percebido na Fig. (4.13) para os padrões de escoamento pistonado, que são resultado dos volumes de ar de 0,10 e 0,06 ml. Para o volume de ar de 0,02 ml, que é o escoamento de bolhas, os sensores SG, SP e LDR identificaram um sinal pontiagudo, já o sensor ST (Fig. (4.13l)) percebeu que a bolha era levemente alongada, o que pode ser percebido na leve descida da amplitude do sinal em seu centro. Essa característica demonstra que o sensor ficou totalmente coberto com ar, embora não por muito tempo, como ilustra a Fig. (4.14c).

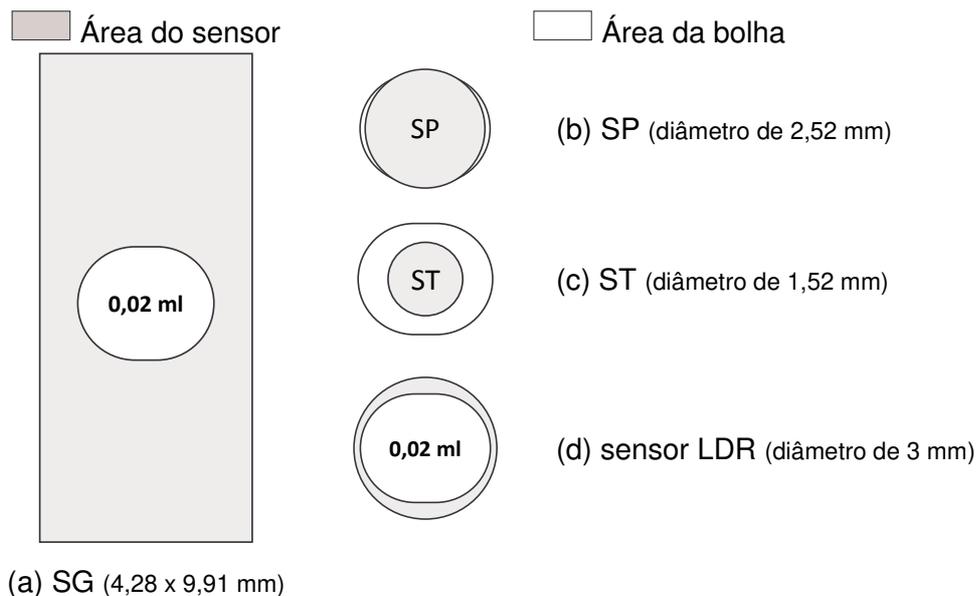


Figura 4.13: Ilustração das dimensões dos receptores em relação à passagem de uma bolha de 0,02 ml.

Comparando-se os resultados apresentados para o padrão de bolhas nas Fig. (4.13f), (4.13i) e (4.13o) com os apresentados por Revellin et al. (2006) na Fig. (2.18a) e (2.18b), nota-se que os sinais são similares em ambos os casos. Para o escoamento pistonado percebe-se que os sinais da Fig. (2.18b) e (2.18c) assemelham-se com os sinais dos sensores SG e SP, Fig. (4.13d), (4.13e), (4.13g) e (4.13h), já que os sensores empregados são também fotodiodos.

Para os sensores ST e LDR, Figs. (4.13j), (4.13k), (4.13m) e (4.13n), percebe-se que os picos foram maiores em relação aos sinais da Fig. (2.18) e, que tais características podem ser consequência das especificidades do sistema de emissão e recepção empregados e do meio de propagação do sinal do emissor através do tubo, que são diferentes de um estudo para o outro.

As imagens e os sinais para as vazões de água de 50 e 100 ml/min apresentam características semelhantes às apresentadas na Fig. (4.13) e podem ser vistos no APÊNDICE E.

4.7 VELOCIDADES MÉDIAS

Visando estudos futuros relacionados ao desenvolvimento de mapas de padrões de escoamento a velocidade superficial, U_g pode ser obtida a partir da velocidade média (u_g) e da fração de vazão (α) conforme definição apresentada na Tab. (2.1). Desta forma, são calculadas as velocidades médias (u_g) para cada sensor, conforme apresenta a Fig. (4.15), na qual observa-se ainda o valor da velocidade média (u_m) obtido a partir das velocidades médias de cada sensor.

Percebe-se a partir dos valores apresentados na Fig. (4.15) que as velocidades medidas mantiveram a proporção em relação às vazões adotadas, demonstrando que todos os sensores são capazes de realizar a medida da velocidade média, já que os valores calculados se mantiveram nos mesmos patamares.

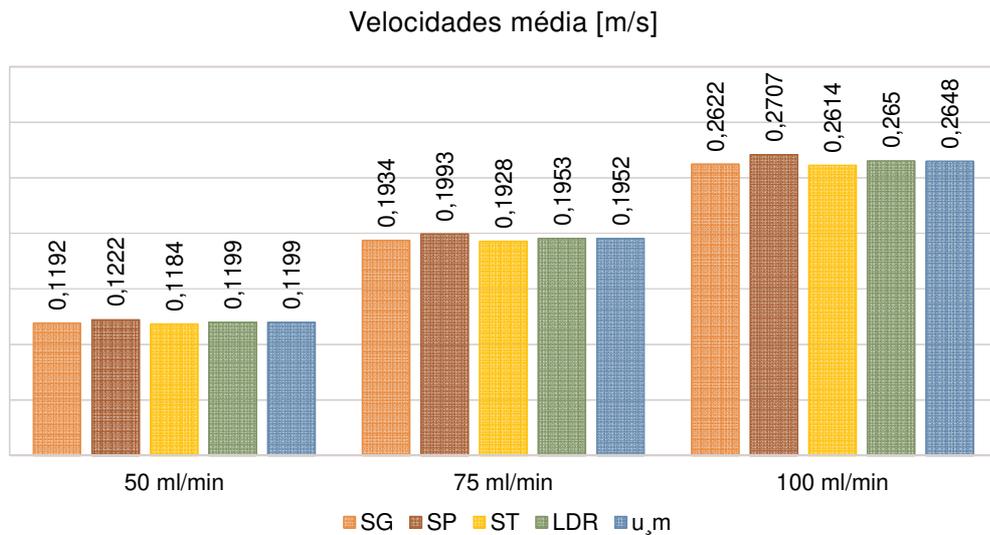


Figura 4.14: Velocidades médias para cada sensor e velocidade média entre todos os sensores.

O erro médio relativo apresentado na Tab. (4.5) é calculado em relação à velocidade média (u_m) encontrada a partir das velocidades médias de todos os sensores e, embora os erros sejam estejam entre -4,92 e 2,17%, as diferenças de velocidades entre os sensores são consequência, principalmente, da variação da medida da distância entre os sensores.

Tabela 4.5: Erro médio relativo da velocidade de cada sensor em relação ao valor médio entre todas as velocidades.

Vazão de água [ml/min]	Erro Médio Relativo, EMR [%]			
	SG	SP	ST	LDR
50	0,58	-1,92	1,25	0,00
75	1,50	-3,42	2,00	-0,08
100	2,17	-4,92	2,84	-0,17

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados experimentais para o estudo do escoamento bifásico ar-água em um minicanal por meio de quatro sensores ópticos diferentes, para as vazões de água de 50, 75 e 100 ml/min e volumes de ar de 0,1, 0,06 e 0,02 ml. Os resultados apresentados foram a verificação do sinal dos sensores em relação às respectivas imagens de padrões de bolhas, as curvas de calibração, a identificação dos padrões de escoamento e a medida da velocidade média da bolha.

A partir dos resultados obtidos percebe-se que os quatro sensores ópticos aplicados foram capazes de caracterizar o escoamento bifásico ar-água em um minicanal, sendo identificados os padrões pistonado e de bolhas isoladas e determinada a fração de vazio.

Em relação aos sensores empregados foi possível identificar que a área ativa de recepção dos sensores influenciou em sua velocidade de resposta para detectar a diferença entre as fases líquida e gasosa, desta forma constatou-se que o sensor de tubo para líquido, composto por um emissor IR e fototransistor como receptor, foi aquele que respondeu em menor tempo, visto possuir a menor área ativa de recepção entre todos os sensores aplicados.

Dois programas foram desenvolvidos no Matlab, um para o processamento das imagens, que permitiu calcular as áreas das bolhas e determinar a fração de vazio, e outro para o processamento de sinais dos sensores, que permitiu calcular a área sob a curva do sinal adquirido e identificar o comportamento dos sensores para captar o início e final das bolhas de ar.

Comparando-se as áreas das bolhas das imagens com as dos sinais dos sensores, identificou-se que embora o sensor LDR possuísse os maiores erros médios relativos, estes foram inferiores a 9,5% o que possibilitou a verificação dos sensores. Constatou-se ainda que os maiores erros médios relativos foram aqueles calculados para o volume de ar de 0,02 ml, como consequência da imprecisão na seringa utilizada para a inserção de ar.

Por meio dos dados obtidos para as áreas sob as curvas dos sensores foi possível verificar que o sensor LDR mediu valores de áreas maiores em relação aos outros sensores, isso foi resultado de sua resposta mais lenta, principalmente, para captar o final das bolhas. Foi identificado também, não só para o sensor LDR, como

para os outros sensores, uma relação entre os tempos de transição entre as fases (início e final da bolha) e o valor da área medida.

O processo de equalização entre a fração de vazio originária das imagens e do sinal dos sensores, possibilitou a obtenção das curvas de calibração para os sensores que foram aproximadas por exponenciais de segunda ordem. Através dos coeficientes de determinação R^2 das curvas encontradas para os quatro sensores empregados, percebeu-se que a pior aproximação foi aquela obtida para o sensor LDR, como consequência de sua característica de resposta.

Para cada vazão de água foram medidas as velocidades das bolhas através do uso de pares de sensores, obtendo-se resultados satisfatórios, com erros médios relativos menores que 5% para todos os sensores.

Considerando-se os resultados encontrados, entende-se que alguns aspectos possam ser aprimorados a fim de se minimizar os erros, tais como a inserção das bolhas com maior precisão e a construção de suportes que permitam um melhor alinhamento entre os emissores e receptores e melhor medida da distância entre os sensores.

Outros estudos poderão ser realizados a fim de se observar melhor o comportamento dos sensores para vazões de água superiores a 100 ml/min, bem como para padrões escoamento diferentes daqueles identificados neste trabalho, por meio de diferentes vazões de ar. Estudos relacionados aos mapas de transição de padrões a partir as informações adquiridas sobre a velocidade da bolha também são uma possibilidade, bem como a análise da fração de vazio em relação aos modelos estabelecidos na literatura. Ainda, poderiam ser realizados estudos para a análise da velocidade das bolhas em relação à velocidade superficial do líquido e do gás, assim como o cálculo da razão de deslizamento e da frequência de passagem de bolhas

Em relação aos estudos para predição das transições de um padrão de escoamento para outro, a implementação de um sistema por meio de lógica fuzzy, que utilizasse a frequência das bolhas, área ou valores de tensão, poderia ser pensado. Ao contrário da lógica booleana na qual as respostas se limitam a um estado ou a outro, a lógica fuzzy permitiria uma descrição mais legitimista das transições entre os padrões, onde por exemplo em determinado momento o escoamento poderia pertencer 40% para um padrão e 60% para outro.

O emprego dos sensores estudados não se limita ao escoamento bifásico ar-água e, em se tratando de escoamentos em minicanais, poderiam ser implementados

em aplicações tais como no transporte de medicamentos na biomédica e para fluidos com diferentes viscosidades. Em um contexto industrial, os sensores poderiam ser aplicados em malhas de controle de microssistemas de refrigeração, adequando-se seus suportes nas seções de visualização, ou então, desenvolvendo-se sensores de mesma tecnologia conformados ao canal de escoamento.

REFERÊNCIAS

AHMED, W. H.; ISMAIL, B. I. Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements. **Bentham Science Publishers Ltd.**, 2008.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. v. 1.

CANIÈRE, H.; T'JOEN, C.; WILLOCKX, A.; DE PAEPE, M. Capacitance signal analysis of horizontal two-phase flow in a small diameter tube. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, p. 892-904, 2008.

CONEY, M. W. E. The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow. **IOPscience** p. 903-910, 1973.

DAVID, N.; DJILALI, N.; WILD, P. Fiber Bragg grating sensor for two-phase flow in microchannels. **Microfluid Nanofluid** v. 13, p. 99-106, 2012.

GALLAS, M. R. **Coerência**. 14 mar. 2005. Disponível em: < <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf> > Acesso em: 16 mar. 2017.

GIJSENBURGH, P.; PUERS, R. Permittivity-based void fraction sensing for microfluidics. **Sensors and Actuators A**, v. 195, p. 64-70, 2013.

HOFF, A. G.; **Desenvolvimento de um sensor óptico para medidas de fração de vazio em um minicanal**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2013.

ITO, D.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Micro wire-mesh sensor for two-phase flow measurement in a rectangular narrow channel. **Flow Measurement and Instrumentation** v. 22, p. 377-382, 2011.

JANA, A. K.; MANDAL, T. K.; CHAKRABARTI, D. P.; DAS, G.; DAS, P. K. An optical probe for liquid-liquid two-phase flows. **Measurement Science and Technology** v. 18, p. 1563-1575, 2007.

JUNG, S. Y.; PARKA, H. W.; LEE, S. J. Simultaneous measurement of bubble size, velocity and void fraction in two-phase bubbly flows with time-resolved X-ray imaging. **Journal of Synchrotron Radiation** v. 21, p. 424-429, 2014.

KANDLIKAR, S.G.; GRANDE, W. J. Evolution of Microchannel Flow Passages- Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology. **Heat Transfer Engineering** v. 24, n. 1, p. 3-17, 2003.

KANDLIKAR, S.G.; GARIMELLA, S.; LI, D.; COLIN, S.; KING, M.R. **Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels**. Oxford: Elsevier, 2006.

KAWAJI, M.; CHUNG, P. M. Y. Adiabatic Gas–Liquid Flow in Microchannels. **Microscale Thermophysical Engineering** v. 8, p. 239-257, 2004.

KENDOUSH, A. A.; SARKIS, Z. A. A nonintrusive auto-transformer technique for the measurement of void fraction. **Experimental Thermal and Fluid Science** v. 13, p. 92-97, 1996.

MARKTECH, Optoelectronics. **Emissores MTPS8065WC e MTPS8086P**. Revisão: 23/05/2011. Disponível em: <<http://www.marktechopto.com/pdf/products/datasheet>>. Acesso em: 20/03/17.

MEHENDALE S. S.; JACOBI, A. M.; SHAH, R.K. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. **ASME Applied Mechanics Reviews** v. 53, n. 7, p.157 – 193, 2000.

MISHIMA, K.; HIBIKI, T.; NISHIHARA, H. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 19, p. 115-124, 1993.

MORALES, R. E. M.; SIECZKOWSKI, W. C.; NETO, R. do C. de L.; LIBERT, N.; ARRUDA, L. V. R. de; SILVA, M. J. da. Desenvolvimento de uma sonda capacitiva para medição de fração de vazio. **VI Congresso Rio Automação**. Rio de Janeiro, 2011.

OFUCHI, C. Y.; ARRUDA, L.V.R.; NEVES J., F.; MORALES, R. E. M. Caracterização de escoamentos bifásicos horizontais em golfadas utilizando ultrassom. **2º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos**. São Carlos, 2010.

OLIVEIRA, M.L.; COPETTI, J.B.; FREITAS, W.X.; HOFF, A. Caracterização de um escoamento bifásico em mini tubo com uso de sensor óptico. **VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM2014**. Uberlândia, MG, 2014.

OPTO DIODE. **Receptor Photodiodo ODD-42WB**. Revisão: 26/02/13. Disponível em: <<http://optodiode.com/pdf/ODD-42WB.pdf>>. Acesso em: 20/03/17.

PARANJAPE, S.; RITCHEY, S. N.; GARIMELLA, S. 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.; THOME, J. R.; DUPONT, V.; URSENBACHER, T.; ZUN, I. Characterization of diabatic two-phase flows in microchannels: Flow parameter results for R-134a in a 0.5 mm channel. **International Journal of Multiphase Flow** v. 32, p. 755–774, 2006.

SERIZAWA, A.; FENG, Z.; KAWARA, Z. Two-phase flow in microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science** v. 26, p. 703-714, 2002.

SILVA, M. J. da; ARRUDA, L. V. R.; MORALES, R. E. M. Investigação experimental de escoamento bifásico gás-líquido em tubulações através da técnica *wire-mesh*. **2º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos**. São Carlos, 2010.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentos de Processamento Digital de Imagens**. Uma abordagem prática com exemplos em Matlab. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SUNROM Technologies. **Light Dependent Resistor – LDR**. 28 jul. 2008. Disponível em: < <http://kennarar.vma.is/thor/v2011/vgr402/ldr.pdf> > Acesso em: 08 mar. 2017.

THOME, J. R. **Engineering Data Book III**. Suíça: Wolverine Tube, Inc. Engineering Thermal Innovation, 2010.

TIBIRIÇÁ, C. B.; NASCIMENTO, F. J.; RIBATSKI, G. Film thickness measurement techniques applied to micro-scale two-phase flow systems. **Experimental Thermal and Fluid Science** v. 34, p. 463-473, 2010.

TRIPLETT, K. A.; GHIAASIAAN, S. M.; ABDEL-KHALIK, S. I.; SADOWSKI, D.L. Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I: two-phase flow patterns. **International Journal of Multiphase Flow** v. 25, p. 377-394, 1999.

TT ELECTRONICS. **Fluid & Bubble sensing – POB350. Application Bulletin 235**. Nov. 2016. Disponível em: < <http://www.ttelectronics.com/themes/ttelectronics/datasheets/optek> > Acesso em: 22 mar. 2017.

TT ELECTRONICS. **Tube Liquid Sensor OPB350 Series**. Fev. 2006. Disponível em: < <http://www.mouser.com/ds/2/414/OPB350-184396.pdf> > Acesso em: 10 out. 2016.

UNIVERSITY OF LEEDS - FACULTY OF ENGINEERING. **Industrial Process Tomography - Platform II grant funded by EPSRC**. Disponível em: <<https://www.leeds.ac.uk/olil/tomography/index.php>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

VISHAY Semiconductors. **Silicon PIN Photodiode – BPV10NF**. 29 mai. 2015. Disponível em: < <http://www.vishay.com/docs/81503/bpv10nf.pdf> > Acesso em: 14 mar. 2017.

WANG, M. Impedance mapping of particulate multiphase flows. **Flow Measurement and Instrumentation** v. 6 p. 183–189, 2005.

WANG, C.; ZHAO, N.; FANG, L.; ZHANG, T.; FENG, Y. Void fraction measurement using NIR technology for horizontal wet-gas annular flow. **Experimental Thermal and Fluid Science** v. 76, p. 98-108, 2016.

YANG, C.; SHIED, C. Flow pattern of air-water and two-phase R-134a in small circular tubes. **International Journal of Multiphase Flow** v. 27, p. 1163-1177, 2001.

YE, J.; PENG, L.; WANG, W.; ZHOU, W. Helical Capacitance Sensor-Based Gas Fraction Measurement of Gas–Liquid Two-Phase Flow in Vertical Tube with Small Diameter. **IEEE SENSORS JOURNAL**, v. 11, n. 8, p. 1704-1710, 2011.

ZEGUAI, S.; CHIKH,S. TADRIST, L. Experimental study of two-phase flow pattern evolution in a horizontal circular tube of small diameter in laminar flow conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, v.55, p. 99-110, 2013.

APÊNDICE A – IMAGENS DA BANCADA DE TESTES E O DO MISTURADOR

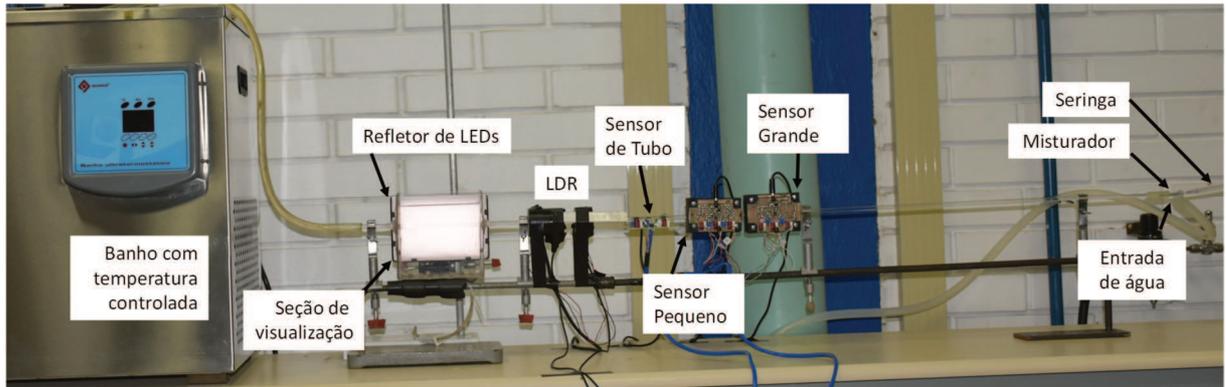
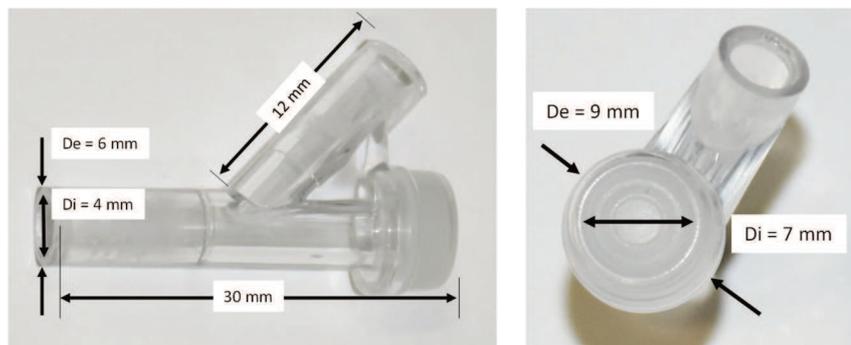


Figura A.1: Imagem da bancada de testes utilizada.



Figura A.2: Imagem da câmera instalada na bancada de testes à direita e da aquisição da imagem à esquerda.



(a) vista lateral

(b) vista de cima

Figura A.3: Misturador ar-água.

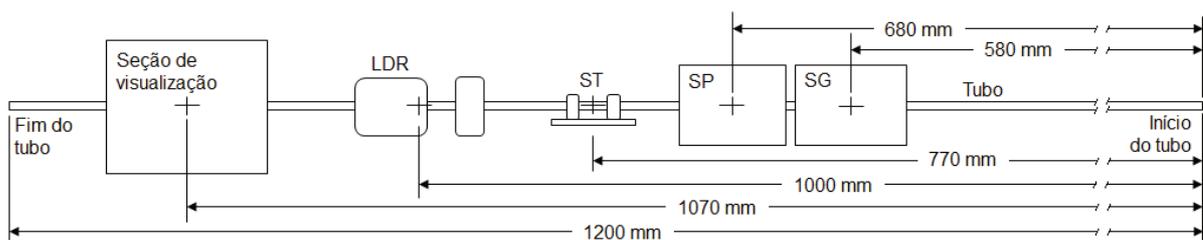


Figura A.4: Distância entre o misturador e os sensores.

APÊNDICE B – SUPORTES PARA OS SENSORES

Tabela B.1: Medidas dos suportes para os sensores grande e pequeno.

Sensor	l (mm)	h (mm)	Dc (mm) emissor	Dc (mm) receptor
Grande	76	68	5,4	9,4
Pequeno	75	50	5,4	14,1

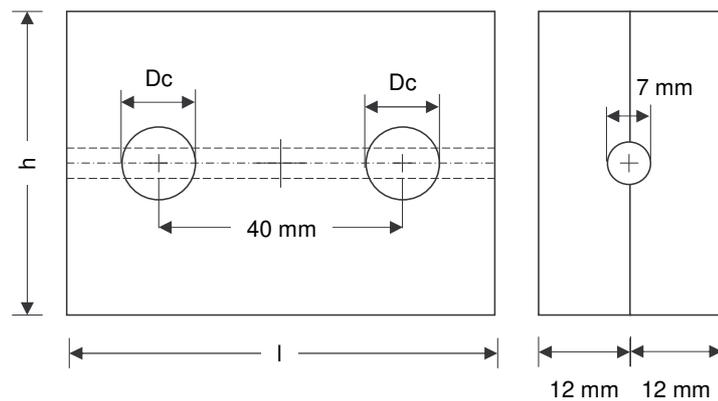


Figura B.1: Indicação das medidas dos suportes para os sensores pequeno e grande.

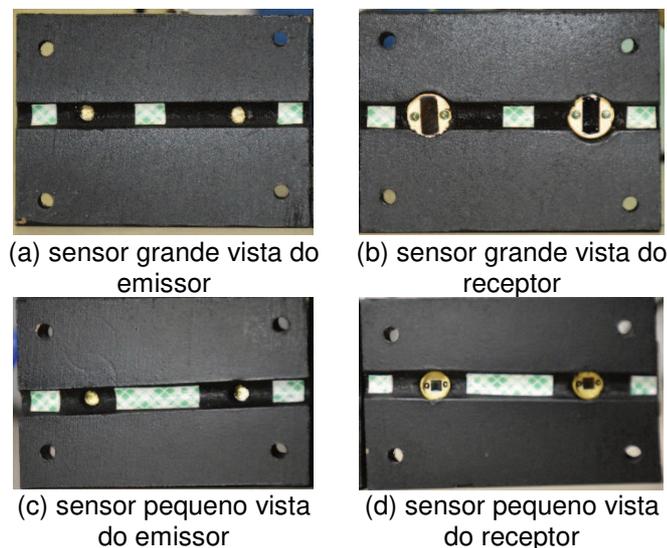


Figura B.2: Imagens da vista interna dos suportes para os sensores pequeno e grande.

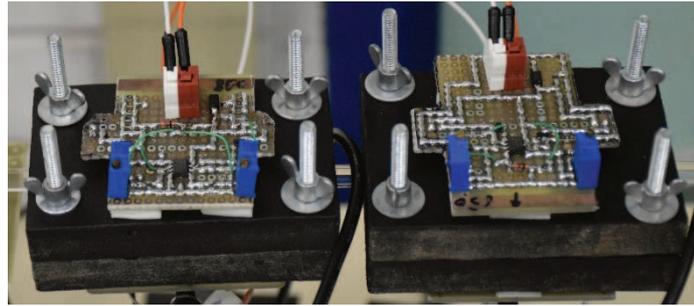


Figura B.3: Imagens das placas dos emissores afixadas aos suportes para os sensores pequeno à esquerda e grande à direita.

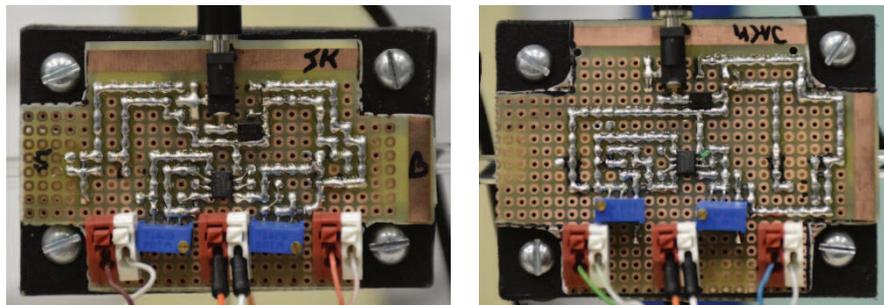
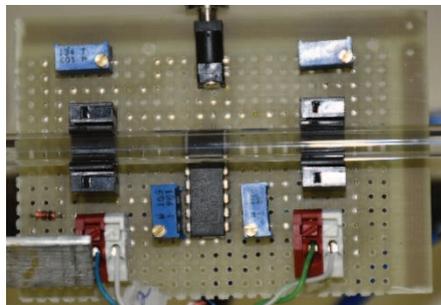
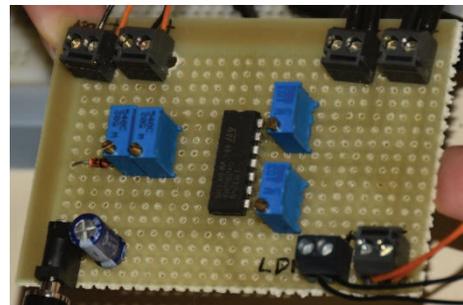


Figura B.4: Imagens das placas dos receptores afixadas aos suportes para os sensores pequenos à esquerda e grandes à direita.

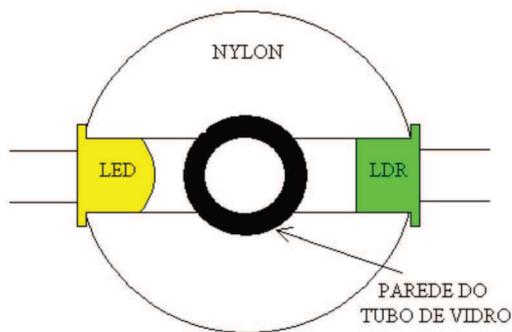


(50 mm x 70 mm)

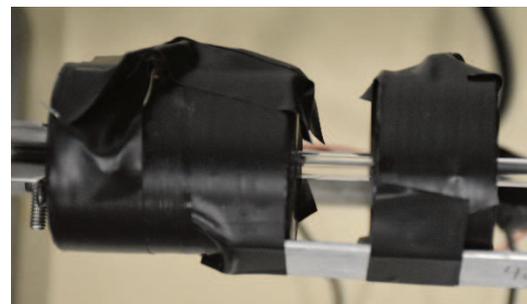


(50 mm x 70 mm)

Figura B.5: Imagens das placas dos sensores de tubo à esquerda e LDR à direita.



(a)



(b)

Figura B.6: Desenho (a) e imagem (b) do suporte para o sensor LDR.
Fonte: HOFF (2013) para imagem (a).

APÊNDICE C – ESQUEMAS ELETRÔNICOS DOS CIRCUITOS CONDICIONADORES DE SINAIS

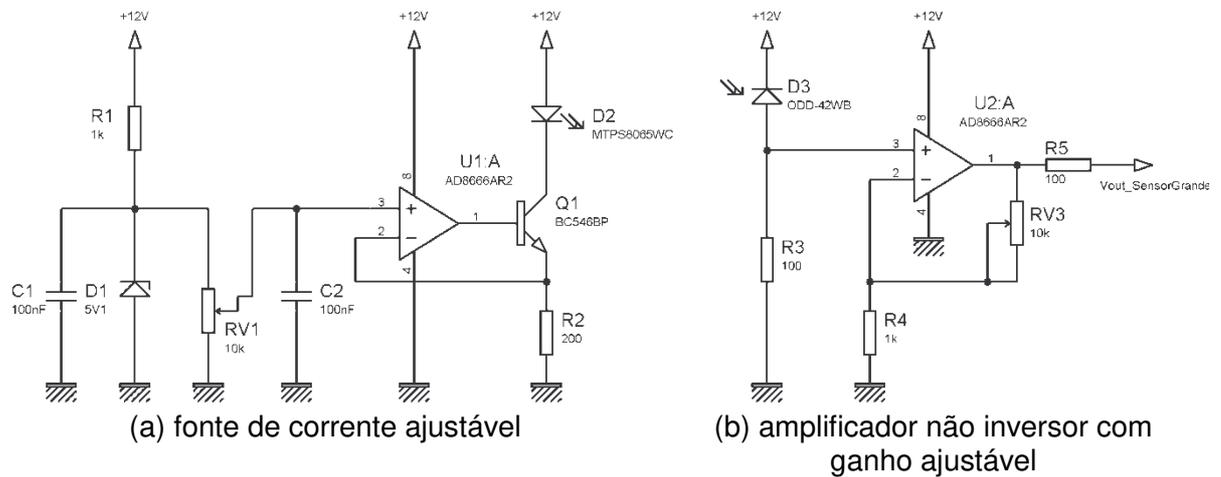


Figura C.1: Esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais para um dos sensores grande.

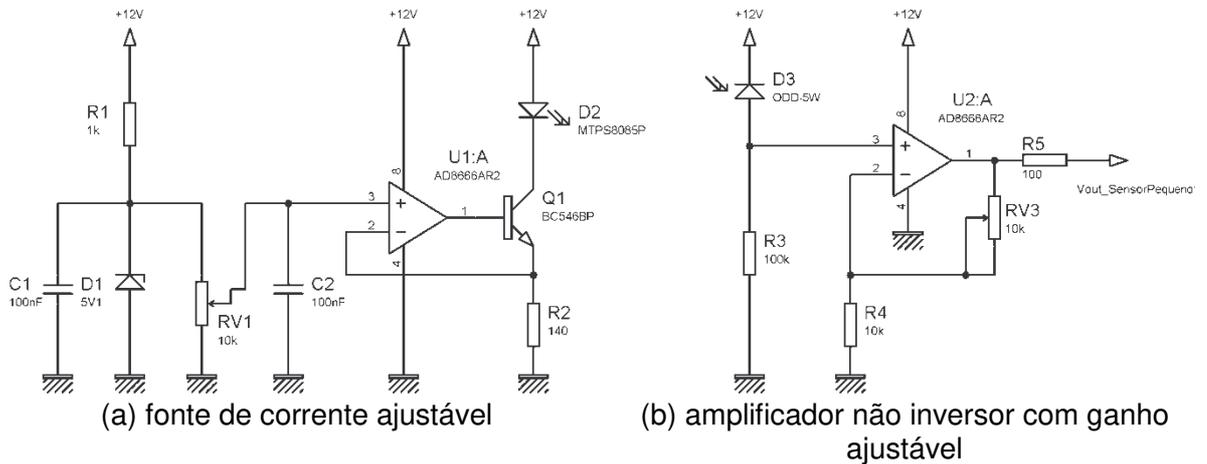


Figura C.2: Esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais para um dos sensores pequeno.

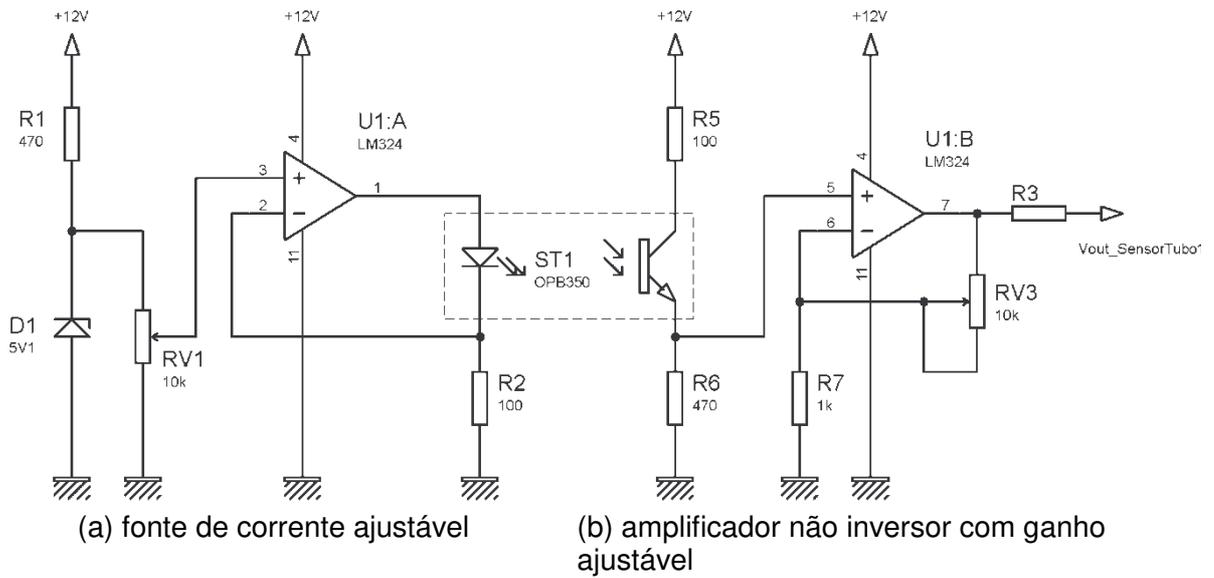


Figura C.3: Esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais para um dos sensores de tubo para líquidos.

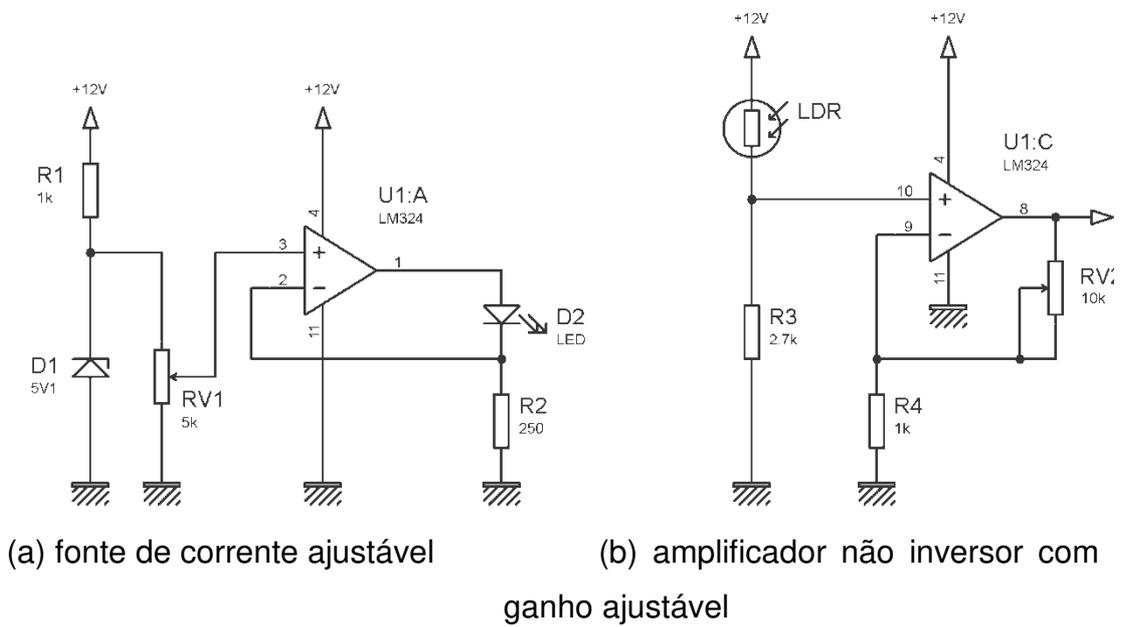


Figura C.4: Esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais para um dos sensores LDR.

APÊNDICE D – METODOLOGIA E EXEMPLO DAS MATRIZES PARA A EQUALIZAÇÃO DOS DADOS DOS SENSORES

Metodologia empregada para a equalização do sinal dos sensores em relação à imagem.

A matriz com os dados da fração de vazio, denominada de α contém j linhas por 2 colunas, onde o número de linhas j varia de imagem para imagem. A coluna 1 de α contém os dados referentes a posição da imagem em pixel (eixo das abcissas) e a coluna 2 os dados da fração de vazio (eixo das ordenadas). Já os sinais dos sensores são armazenados em uma matriz denominada SS com m linhas e 2 colunas, sendo que m varia de acordo com o sensor e as vazões de água e ar. A primeira coluna contém os dados do tempo em segundos (eixo das abcissas) e a segunda o sinal do sensor em volts (eixo das ordenadas).

A equalização das escalas é realizada através das Eq. (D.1) e (D.2), que permitem alterar o eixo das abcissas dos dados dos sensores para que fiquem na mesma escala do eixo das abcissas das imagens.

$$FAE = \frac{\alpha_{1,j}}{m-1} \quad (D.1)$$

$$SSE_{1,n} = SS_{1,n} + FAE \quad (D.2)$$

$$\begin{cases} SSE_{1,1} = \alpha_{1,1} \\ n=2 \rightarrow j \end{cases}$$

onde FAE é o fator de ajuste de escala, $\alpha_{1,j}$ é o dado da última posição da coluna 1 da matriz α e m é o número de linhas da matriz SS .

Para a Eq. (D2), $SSE_{1,n}$ representa os valores equalizados para o eixo das abcissas, que são obtidos somando-se o dado anterior da coluna 1 de SS ($SS_{1,(n-1)}$) com o fator de ajuste (FAE).

Ainda, o dado inicial do eixo das abcissas da matriz SS será mantido ($SSE_{1,1} = \alpha_{1,1}$), sendo modificados a partir da segunda linha ($n=2$) até o tamanho j que é o tamanho da matriz α com a qual deseja-se equalizar os dados do sensor.

Um exemplo mostrando o processo pode ser visto nas Tab. (D.1) e Tab. (D.2).

Tabela D.1: Exemplo de matrizes para o sensor grande, com os sinais dos sensores – SS e fração de vazio α .

Matriz SS			Matriz α			Matriz SSE		
linha	tempo [s]	Tensão SG [-]	linha	Posição [pixel]	Fração de Vazio α [-]	linha	Posição [pixel]	Tensão SG [-]
1	0,000	1,000	1	0,0	0,912	1	0,0	1,000
2	0,000	0,987	2	1,0	0,888	2	0,6	0,987
3	0,000	0,983	3	2,0	0,841	3	1,2	0,983
4	0,001	0,955	4	3,0	0,897	4	1,8	0,955
5	0,001	0,966	5	4,0	0,827	5	2,4	0,966
6	0,001	0,925	6	5,0	0,897	6	3,0	0,925
7	0,001	0,942	7	6,0	0,883	7	3,7	0,942
8	0,001	0,896	8	7,0	0,883	8	4,3	0,896
9	0,001	0,920	9	8,0	0,883	9	4,9	0,920
10	0,002	0,908	10	9,0	0,869	10	5,5	0,908
11	0,002	0,854	11	10,0	0,869	11	6,1	0,854
.
.
.
72	0,012	0,212	72	55,5	0,001	72	43,3	0,212
73	0,012	0,199				73	43,9	0,199
74	0,012	0,197				74	44,5	0,197
75	0,012	0,177				75	45,1	0,177
76	0,013	0,055				76	45,7	0,055
77	0,013	0,150				77	46,4	0,150
78	0,013	0,039				78	47,0	0,039
79	0,013	0,124				79	47,6	0,124
80	0,013	0,023				80	48,2	0,023
81	0,013	0,100				81	48,8	0,100
82	0,014	0,087				82	49,4	0,087
83	0,014	0,076				83	50,0	0,076
84	0,014	0,064				84	50,6	0,064
85	0,014	0,050				85	51,2	0,050
86	0,014	0,039				86	51,8	0,039
87	0,014	0,026				87	52,5	0,026
88	0,015	0,015				88	53,1	0,015
89	0,015	0,000				89	53,7	0,000
90	0,015	0,000				90	54,3	0,000
91	0,015	0,001				91	54,9	0,001
92	0,015	0,000				92	55,5	0,000

$m = 92$
 $j = 72$
 $\alpha_{1,j} = 55,5$
FAE = 0,61

Tabela D.2: Exemplo de análise dos dados para obtenção da curva de calibração do sensor.

Matriz SSE		Matriz α		Posição $\pm 0,3$	Dados para a curva de calibração	
Posição [pixel]	Tensão SG [-]	Posição [pixel]	Fração de Vazio α [-]		Tensão SG [-]	Fração de Vazio α [-]
0,0	1,000	0,0	0,912		1,000	0,912
0,6	0,987	1,0	0,888		0,983	0,888
1,2	0,983	2,0	0,841		0,955	0,841
1,8	0,955	3,0	0,897		0,925	0,897
2,4	0,966	4,0	0,827		0,896	0,827
3,0	0,925	5,0	0,897		0,920	0,897
3,7	0,942	6,0	0,883		0,854	0,883
4,3	0,896	7,0	0,883		0,941	0,883
4,9	0,920	8,0	0,883		0,806	0,883
5,5	0,908	9,0	0,869		0,769	0,869
6,1	0,854	10,0	0,869		0,921	0,869
.
.
.
43,3	0,212	55,5	0,001		0,334	0,645
43,9	0,199				0,543	0,568
44,5	0,197				0,515	0,621
45,1	0,177				0,504	0,609
45,7	0,055				0,479	0,598
46,4	0,150				0,466	0,574
47,0	0,039				0,464	0,557
47,6	0,124				0,436	0,563
48,2	0,023				0,220	0,486
48,8	0,100				0,418	0,518
49,4	0,087				0,388	0,465
50,0	0,076				0,193	0,455
50,6	0,064				0,373	0,445
51,2	0,050				0,243	0,415
51,8	0,039				0,154	0,405
52,5	0,026				0,225	0,396
53,1	0,015				0,293	0,377
53,7	0,000				0,124	0,368
54,3	0,000				0,261	0,359
54,9	0,001				0,243	0,349
55,5	0,000				0,243	0,295
					0,212	0,315
					0,199	0,320
					0,197	0,298
					0,177	0,393
					0,055	0,274
					0,150	0,243
					0,039	0,296
					0,124	0,214
					0,087	0,168
					0,064	0,149
					0,039	0,127
					0,026	0,101
					0,000	0,052
					0,000	0,001

APÊNDICE E – COMPARATIVO ENTRE AS ÁREAS NORMALIZADAS DAS IMAGENS DAS BOLHAS E DOS SINAIS DOS SENSORES PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 100, 75 E 50 ml/min E VOLUMES DE AR DE 0,10, 0,06 E 0,02 ml.

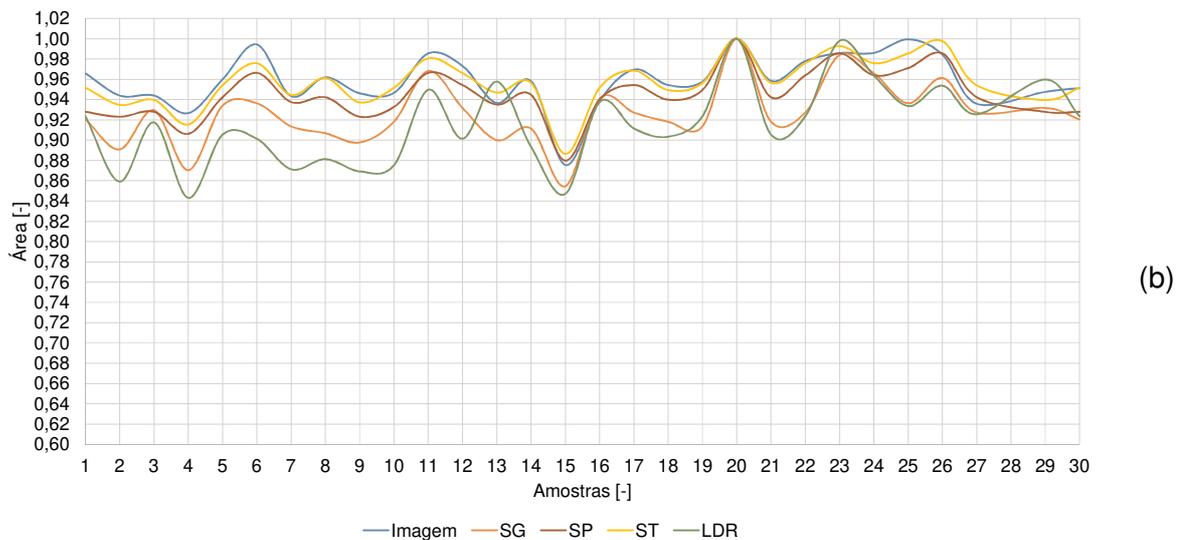
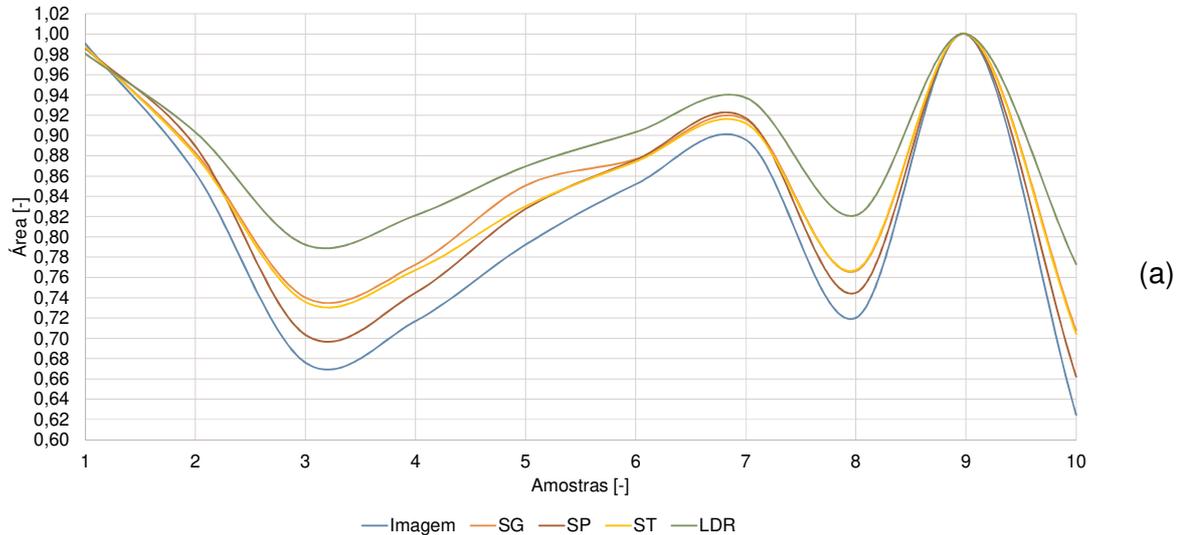


Figura E.1: Áreas normalizadas e áreas medidas pelos sensores para vazão de 100 ml/min e volumes de ar de 0,02 (a) e 0,06 ml (b).

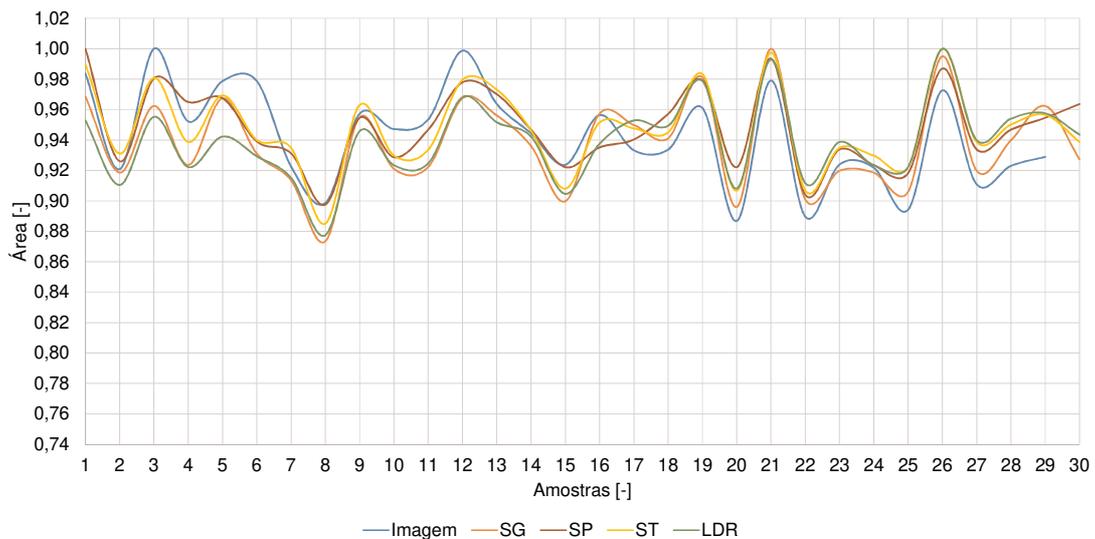
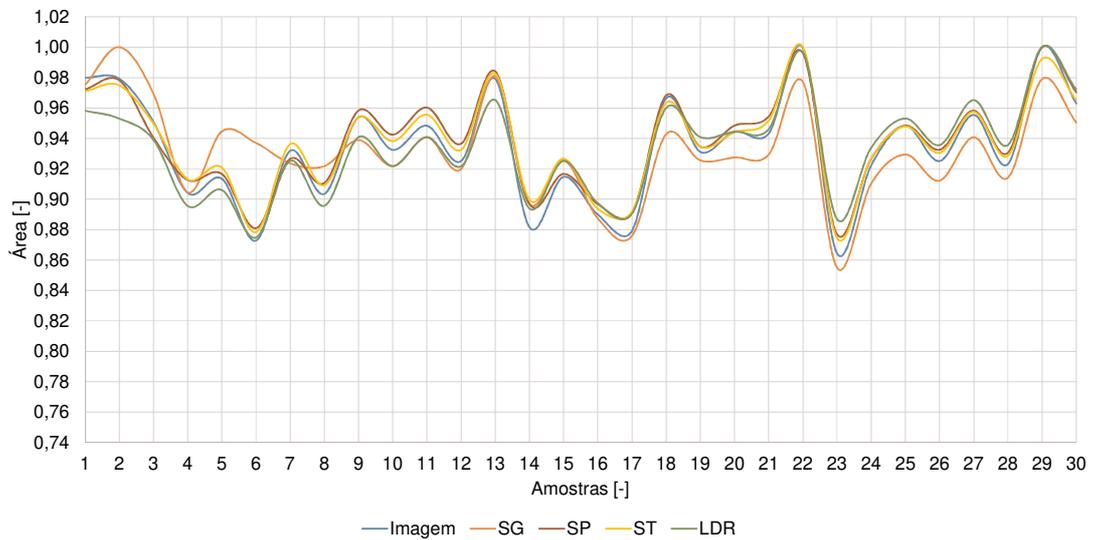
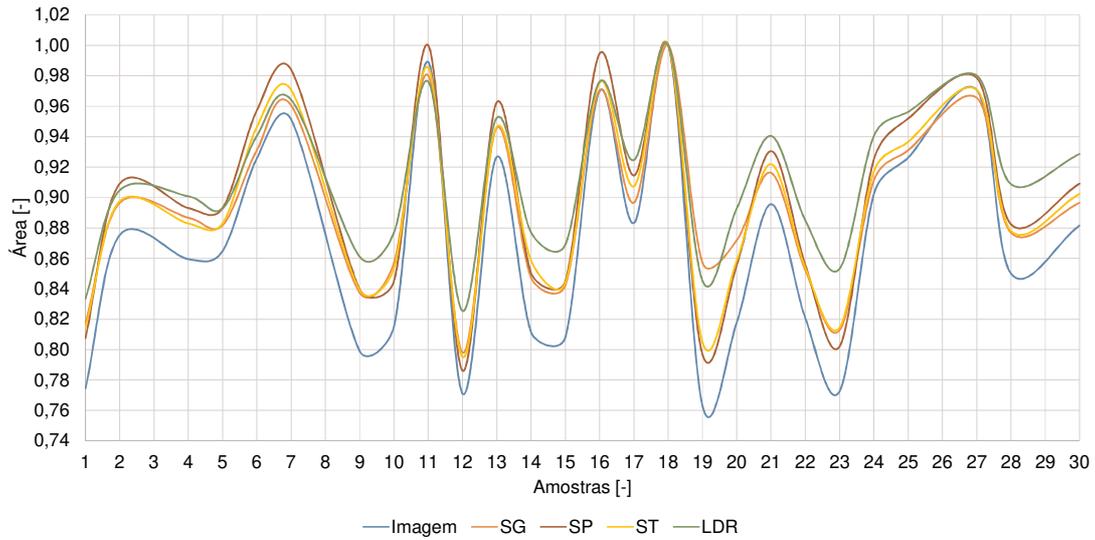


Figura E.2: Áreas normalizadas e áreas medidas pelos sensores para vazão de 75 ml/min e volumes de ar de 0,02 (a), 0,06 ml (b) e 0,10 ml (c).

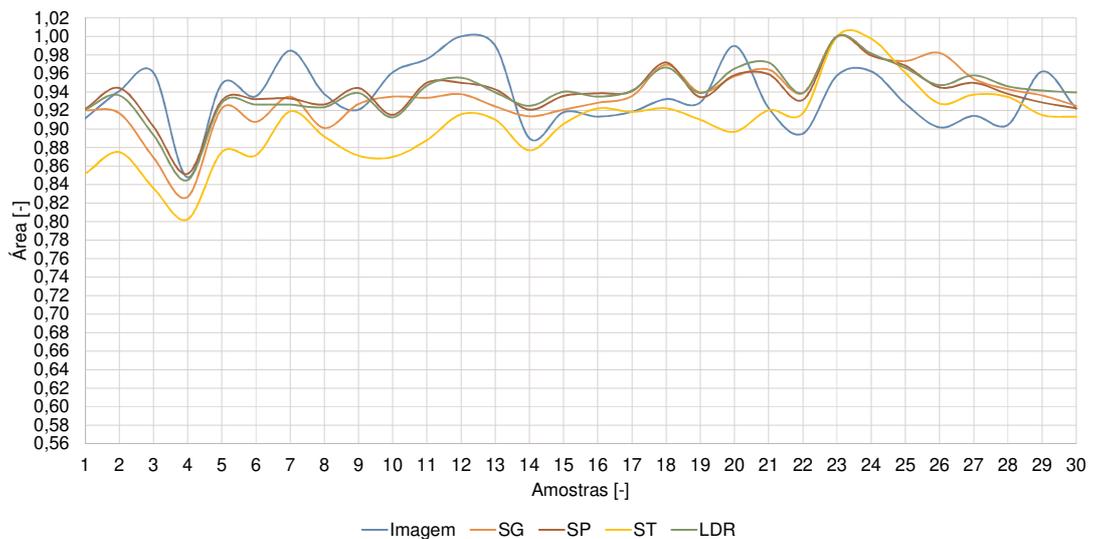
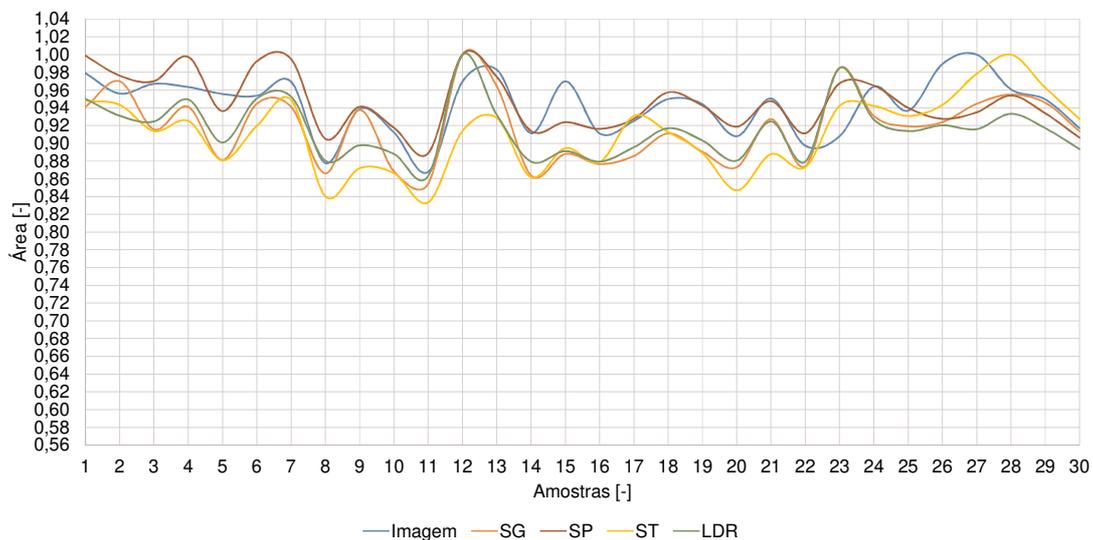
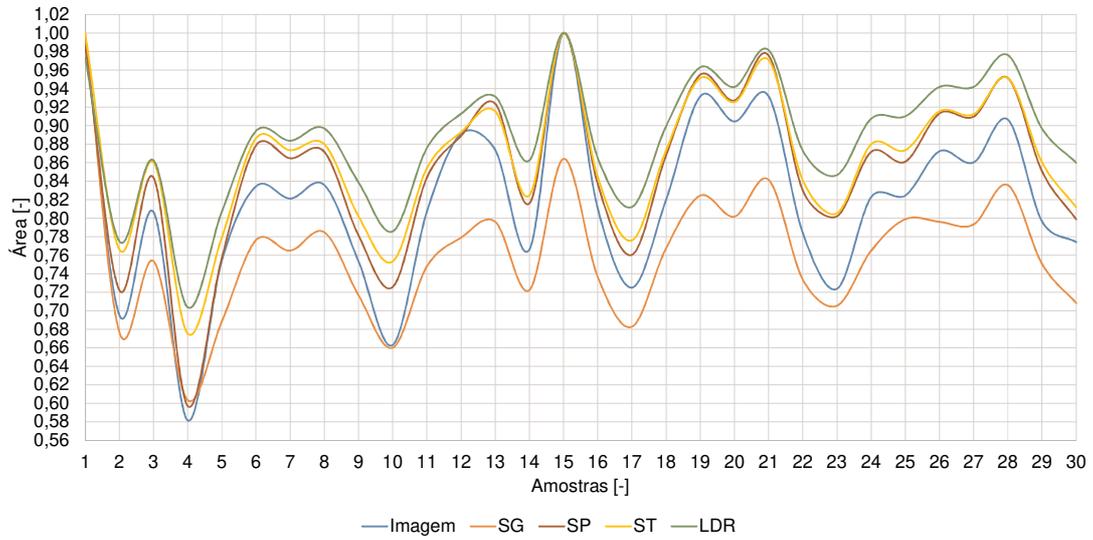


Figura E.3: Áreas normalizadas e áreas medidas pelos sensores para vazão de 50 ml/min e volumes de ar de 0,02 (a), 0,06 ml (b) e 0,10 ml (c).

APÊNDICE F – CORRELAÇÃO ENTRE AS ÁREAS MEDIDAS

Tabela F.1: Correlação entre as áreas das imagens e a dos sensores.

Vazão de água [ml/min]	Volume de ar [ml]	Imagem-SG	Imagem-SP	Imagem-ST	Imagem-LDR
50	0,02	0,939	0,977	0,985	0,963
	0,06	0,623	0,653	0,699	0,571
	0,10	0,290	0,431	0,242	0,379
75	0,02	0,978	0,992	0,995	0,982
	0,06	0,856	0,989	0,993	0,952
	0,10	0,785	0,838	0,823	0,645
100	0,02	0,997	0,998	0,999	0,997
	0,06	0,800	0,909	0,939	0,601
	0,10	0,969	0,969	0,969	0,759

Tabela F.2: Correlação entre as áreas dos sensores.

Vazão de água [ml/min]	Volume de ar [ml]	SG-SP	SG-ST	SG-LDR	SP-ST	SP-LDR	ST-LDR
50	0,02	0,997	0,998	0,998	0,997	0,996	0,999
	0,06	0,887	0,876	0,851	0,980	0,732	0,719
	0,10	0,967	0,961	0,825	0,982	0,836	0,840
75	0,02	0,976	0,981	0,975	0,996	0,982	0,987
	0,06	0,821	0,841	0,727	0,991	0,951	0,953
	0,10	0,882	0,971	0,935	0,932	0,839	0,919
100	0,02	0,919	0,945	0,901	0,993	0,990	0,983
	0,06	0,782	0,733	0,898	0,544	0,887	0,623
	0,10	0,903	0,864	0,928	0,835	0,971	0,870

Tabela F.3: Percentual de ocorrência para a correlação média entre as áreas das imagens e as áreas dos sensores.

Correlação	Percentual de ocorrência [%]			
	Imagem-SG	Imagem-SP	Imagem-ST	Imagem-LDR
Forte	0	11,1	88,9	0
Fraca	33,3	0	11,1	55,6

Tabela F.4: Percentual de ocorrência para a correlação média entre as áreas dos sensores.

Correlação	Percentual de ocorrência [%]					
	SG-SP	SG-ST	SG-LDR	SP-ST	SP-LDR	ST-LDR
Forte	0	11,1	11,1	55,6	11,1	11,1
Fraca	0	0	44,4	22,2	22,2	11,1