

Análise comparativa de dois sensores ópticos para a caracterização experimental do escoamento bifásico ar-água

Melissa Grahl Figueredo¹
Jacqueline Biancon Copetti²

Resumo

Este trabalho descreve a caracterização do escoamento bifásico ar-água, através de um tubo de pequeno diâmetro (2,6 mm), utilizando dois sensores ópticos não intrusivos (LED-LDR; LED IV-fototransistor - sensor de tubo) e uma câmera de alta velocidade. Padrões de escoamento da mistura para diferentes condições de vazões de água e volumes de ar são identificados, assim como a fração de vazio e a velocidade da bolha. Uma metodologia de processamento dos sinais dos sensores e das imagens é proposta e permite a validação da técnica, através da comparação de áreas de bolhas. Os menores erros encontrados foram para o padrão pistonado (0,02 a 4,49%) e os maiores para o de bolhas (-10,23 a -4,37%). Os sensores foram calibrados em relação à fração de vazio média dada pelas imagens e uma boa correlação foi encontrada com a tensão do sensor. O sensor de tubo apresentou resultados superiores ao LDR.

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

Abstract

This work describes the two-phase flow characterization (air-water) in a small diameter tube (2.6mm) using two non-intrusive optical sensors (LED-LDR; LED IV phototransistor - tube sensor) and a high speed video camera. Flow patterns of the mixture for different conditions of water flows and air volumes are identified, as well as the void fraction and bubble velocity. A methodology for processing sensors signals and images is proposed and allows the validation of the technique by comparing bubble areas. The lowest errors were for the plug pattern (0.02 to 4.49%) and the largest errors were the bubble pattern (-10.23 to -4.37%). The sensors were calibrated in relation to the mean void fraction given by the images and a good correlation was found with the sensor voltage. The response of tube sensor was superior to the LDR.

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

¹ Engenheira eletricista pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Canoas, RS, Brasil. Professora nos cursos técnicos em eletrônica e automação industrial na Escola de Educação Profissional SENAI, Porto Alegre, RS. E-mail: melissagrahl@gmail.com.

² Doutora em Engenharia pela Universidad Politécnica de Madrid, Madri, Espanha. Professora e pesquisadora nos cursos de graduação e mestrado em Engenharia Mecânica e mestrado profissional em Engenharia Elétrica na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS. E-mail: jcopetti@unisin.br.

1 Introdução

O escoamento bifásico é o caso mais simples de escoamento multifásico, sendo composto por apenas duas fases que podem ser: sólido-líquido, líquido-líquido e líquido-gás. Seu estudo mostra-se importante em aplicações, tais como: na indústria de energia, do petróleo, química, onde se encontram tubos de dimensões maiores.

Ao se considerar tubos e canais de menores dimensões que, segundo Kandlikar e Grande (2003), são aqueles com diâmetro hidráulico menor que 3 mm, o escoamento bifásico vem sendo aplicado em sistemas microeletromecânicos, dissipadores de calor para componentes eletrônicos, engenharia de processos químicos, engenharia médica e genética, bioengenharia, entre outros (SERIZAWA; FENG; KAWARA, 2002). Nesse contexto, a caracterização do escoamento, envolve a identificação dos padrões de escoamento bifásico e o cálculo da fração de vazio.

A fração de vazio é uma grandeza adimensional que representa a fração de gás presente em um escoamento bifásico e pode ser definida em termos da área da seção transversal ou do volume. É um parâmetro que permite determinar a densidade, a viscosidade bifásica e a velocidade média relativa das duas fases, sendo ainda fundamental em modelos para prever as transições de padrões de escoamento, transferência de calor e queda de pressão.

Thome (2010) apresenta definições e imagens dos padrões em escoamentos bifásicos, em tubos horizontais convencionais (de maior diâmetro), sendo eles: escoamento de bolhas, estratificado, ondulado, intermitente pistonado, intermitente em golfadas e escoamento anular. A literatura relata algumas diferenças nos padrões para tubos de diâmetros menores, como os apresentados por Triplett *et al.* (1999), Serizawa, Feng e Kawara (2002), Kawaji e Chung (2004) e Revellin *et al.* (2006), os quais apresentam as diferenças no padrão de escoamento entre mini e microcanais. Em canais de diâmetro reduzido,

os efeitos gravitacionais diminuem e têm sido verificada a ausência do padrão estratificado, assim como variação nas fronteiras de transição entre os padrões. A figura 1 apresenta os padrões característicos de mini e microcanais.

Para obter experimentalmente a fração de vazio e identificar padrões de escoamento, podem ser utilizadas diversas técnicas com uso de sensores. Entretanto, em função da dimensão do canal, tais técnicas devem ser não invasivas e não intrusivas, de forma a não atravessar as paredes do canal e não perturbar o escoamento, assim preservando as suas características. Com essas características, podem ser empregados sensores ópticos, capacitivos, de impedância, de ultrassom, além do processamento de imagens.

As técnicas que empregam sensores ópticos vêm sendo implementadas por diversos pesquisadores. Nesses casos, entre o emissor e o receptor, encontra-se o tubo, onde o fluido escoar, o qual atua como meio de propagação da incidência de luz. O interesse é que o receptor seja 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, ou ao padrão de escoamento.

Revellin *et al.* (2006), com o objetivo de caracterizar quantitativamente as transições dos padrões de escoamento na ebulição do fluido refrigerante R-134a, em um microtubo horizontal de 0,5 mm de diâmetro interno, empregaram dois pares de sensores ópticos compostos por diodos lasers, com potência inferior a 1 mW, e lentes para focar o feixe no centro do microtubo, e fotodiodos como receptores. Além disso, utilizaram uma câmera de alta velocidade, para registro das imagens dos padrões. Por processamento de sinais, foi possível determinar a frequência de bolhas de vapor geradas, a taxa de coalescência dessas bolhas, a velocidade média e a fração de vazio.

Também empregando diodos lasers, mas com LDR como receptor, Jana *et al.* (2007) observaram o comportamento dos escoamentos

bifásicos ar-água e querosene-água em um tubo de 25,44 mm de diâmetro, a fim de identificar padrões de escoamento e suas transições em tubos horizontais e verticais. Foram identificados os padrões de escoamento, a frequência de geração das bolhas, as taxas de coalescência, a velocidade média e a fração de vazio. Foi realizada uma comparação com dados obtidos com um sensor por condutividade. Embora os

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

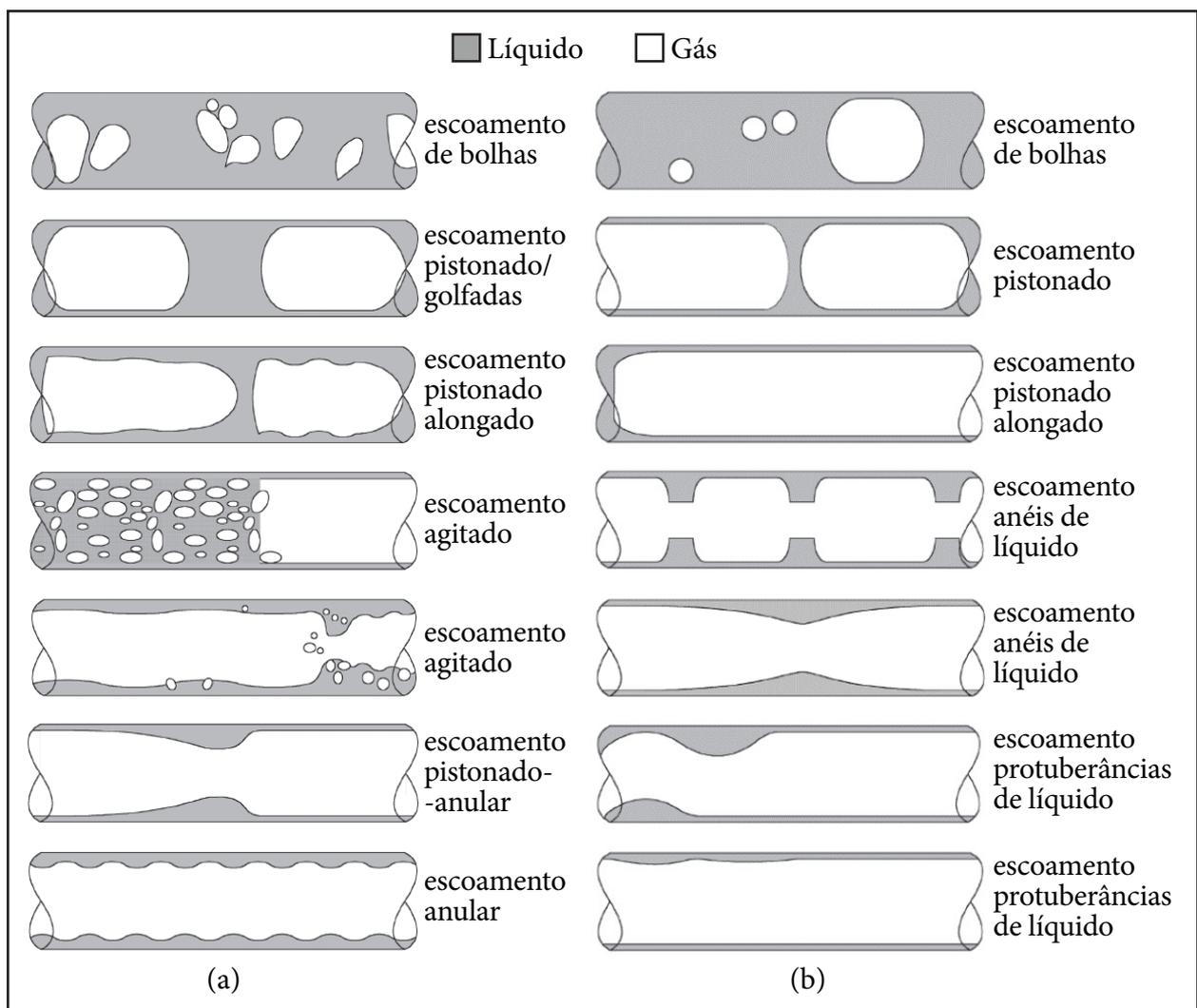


Figura 1 - Padrões de escoamento bifásico para (a) minicanais e (b) microcanais
Fonte: Adaptado de Kawaji e Chung (2004).

Wang *et al.* (2016) empregaram sensores ópticos próximos do infravermelho (NIR - *Near Infrared*) e apresentaram, como resultado do estudo, 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 esse sensor possui uma banda de absorção característica e sensibilidade na detecção da água, durante a medida da fração de vazio no escoamento. Os

autores 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 (foi utilizado um fotodiodo como receptor) e obtiveram uma equação simplificada, para a fração de vazio, para o escoamento anular de água-ar.

Neste trabalho, são apresentados os resultados de um estudo experimental do escoamento adiabático ar-água em um minicanal de 2,6 mm de diâmetro interno, considerando-se o emprego de dois sensores ópticos, e também o registro de imagens do escoamento. Através de uma metodologia específica, tem-se por objetivos validar a resposta dos sensores, identificar os padrões de escoamento, medir a velocidade das bolhas e obter a fração de vazio, para as condições de teste definidas, além de comparar a resposta dos sensores.

2 Procedimentos experimentais

2.1 Bancada experimental e condições de testes

A bancada de teste é representada no diagrama da figura 2 e consiste de um tubo de vidro com diâmetros externo e interno de 6,0 e 2,6 mm, respectivamente, e comprimento de 1200 mm, através do qual ocorre o escoamento da mistura bifásica ar-água. A circulação de água no sistema é realizada por uma bomba de engrenagens (*Tuthill*), cujo controle de velocidade e, por consequência de vazão de água, é feito por um inversor de frequência (WEG - modelo CFW500). O ar é introduzido no circuito, unindo-se à água no misturador, que é um dispositivo em acrílico com duas entradas, conforme detalhe apresentado na figura 2. Diferentes padrões de escoamento são gerados, a partir das diferentes vazões de água e de volumes de ar. Ao final do tubo, o ar é separado da água no banho térmico.

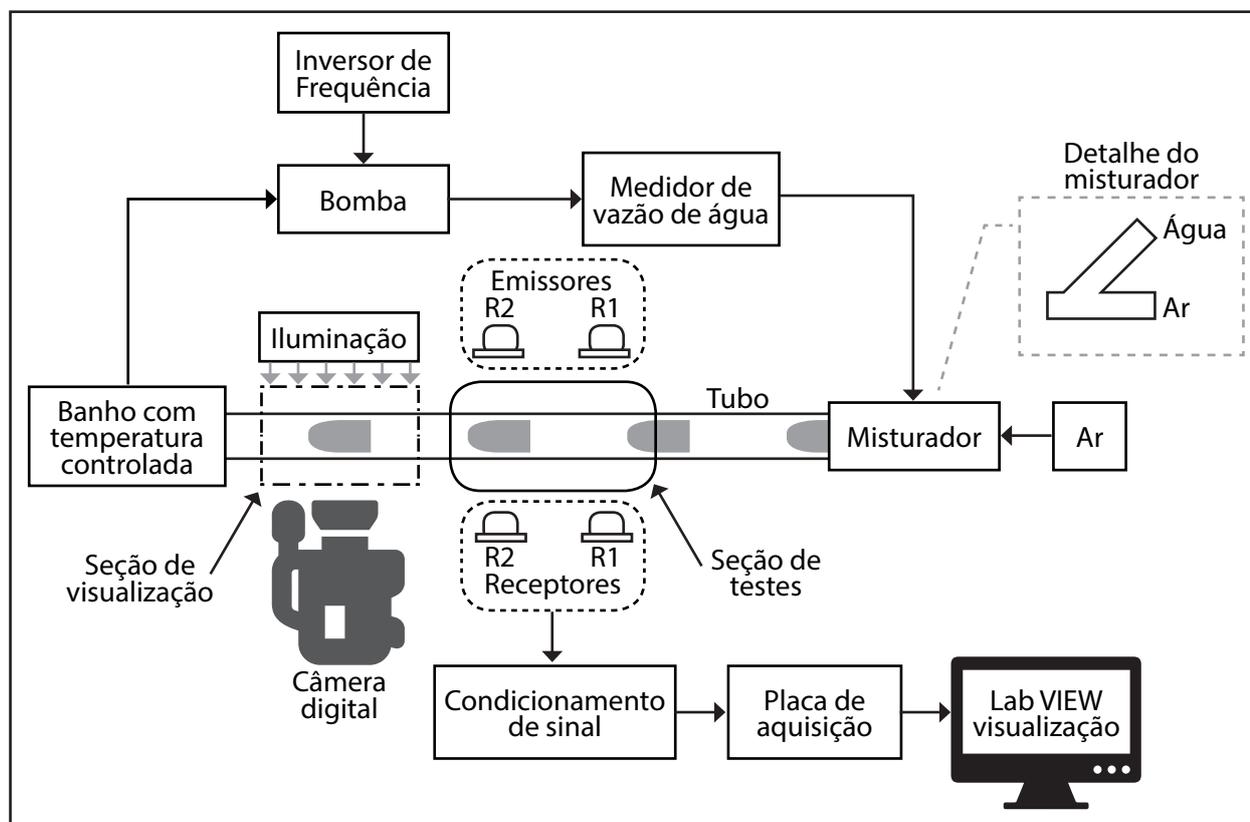


Figura 2 - Esquema da bancada de testes para estudos de escoamento bifásico
 Fonte: As autoras (2018).

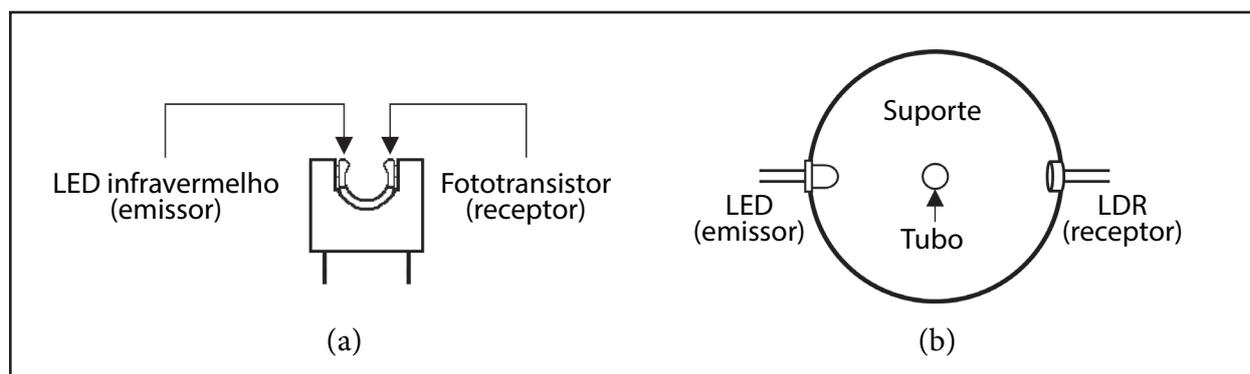


Figura 3 – Ilustração do (a) sensor de tubo – ST e do (b) sensor LDR
Fonte: As autoras (2018).

Dois pares de sensores ópticos são fixados na superfície externa do tubo, sendo usualmente formados por um emissor (E) e um receptor (R) que se encontram instalados, conforme indicado na figura 2. A figura 3a apresenta uma ilustração do sensor de tubo para líquidos OPB350 que, de acordo com o fabricante TT ELECTRONICS (2006), faz parte de uma série de sensores 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 adequado ao tubo empregado na bancada de testes. O líquido cria uma barreira entre o LED emissor infravermelho (pico de emissão em 890 nm) e o fototransistor receptor, fazendo com que a corrente elétrica no fototransistor diminua. Na presença da bolha, o receptor irá drenar mais corrente do que na presença de líquido, sendo essa variação o sinal desejado.

A ilustração do sensor LDR pode ser observada na figura 3b, sendo sua estrutura desenvolvida no Laboratório de Estudos Térmicos e Fluidodinâmicos (LETEF) da Unisinos (HOFF, 2014). O emissor de luz é um LED branco de alto brilho e, na direção oposta, tem instalado, horizontalmente, o receptor LDR (3 mm de diâmetro), cuja resistência elétrica diminui com

a passagem da bolha, em função do aumento da incidência luminosa.

Considerando o esquema da bancada da figura 2, o condicionamento de sinais para os receptores é composto por um amplificador, não inversor, com ajuste de ganho. Para manter as fontes emissoras estáveis, são empregadas fontes de corrente ajustáveis e ambos os circuitos condicionadores não têm alimentação simétrica.

Os sensores são utilizados aos pares, com a finalidade de identificar a passagem da bolha e medir sua velocidade ao longo do tubo. O sinal capturado pelo sensor é primeiramente ajustado pela etapa de condicionamento de sinais e segue para a placa de aquisição (*National Instruments NI USB-6009*). Um programa foi desenvolvido no LabView para visualização e aquisição do sinal.

Uma seção de visualização do escoamento é localizada, após os sensores, conforme se pode observar na figura 2. Nessa seção, o tubo passa por um recipiente de acrílico com água, cujo objetivo é minimizar os efeitos ópticos, durante a aquisição das imagens que é realizada por uma câmera de alta velocidade (*MotionPro Y4*), com taxa máxima de aquisição de 122.000 frames/segundo e resolução de 1024 x 16 pixels. A iluminação, na seção, é ajustada por um refletor de LEDs.

Testes foram realizados para diferentes vazões de água e volumes de ar, conforme se

apresenta na tabela 1. A medida da vazão de água é realizada por um transmissor de pressão, com orifício integrado da Yokogawa (faixa de vazão de 0,022 a 23 L/min ± 5%), e o volume de ar é inserido por meio de uma seringa de 3 mL com divisões de 0,02 mL.

Tabela 1 - Condições experimentais para os testes

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

Fonte: As autoras (2018).

Para analisar a repetibilidade do experimento e minimizar erros, relacionados à medição e aos ruídos do sensor, cada teste é realizado 30 vezes. Em cada teste, são registrados a imagem

da bolha capturada pela câmera e o sinal de tensão adquirido pelos sensores.

2.2 Método experimental

A figura 4 apresenta as principais etapas da metodologia empregada para validação e 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.

A partir do processamento das imagens, são encontradas as áreas das bolhas e é calculada a fração de vazão 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 validação dos sinais dos sensores é possível por meio da comparação entre os valores das áreas, obtidas no processamento das imagens, tomadas como padrão, e as áreas sob as curvas dos sinais dos sensores. Por fim, relaciona-se a fração de vazão e o sinal do sensor, para se obter a curva de calibração em cada sensor.

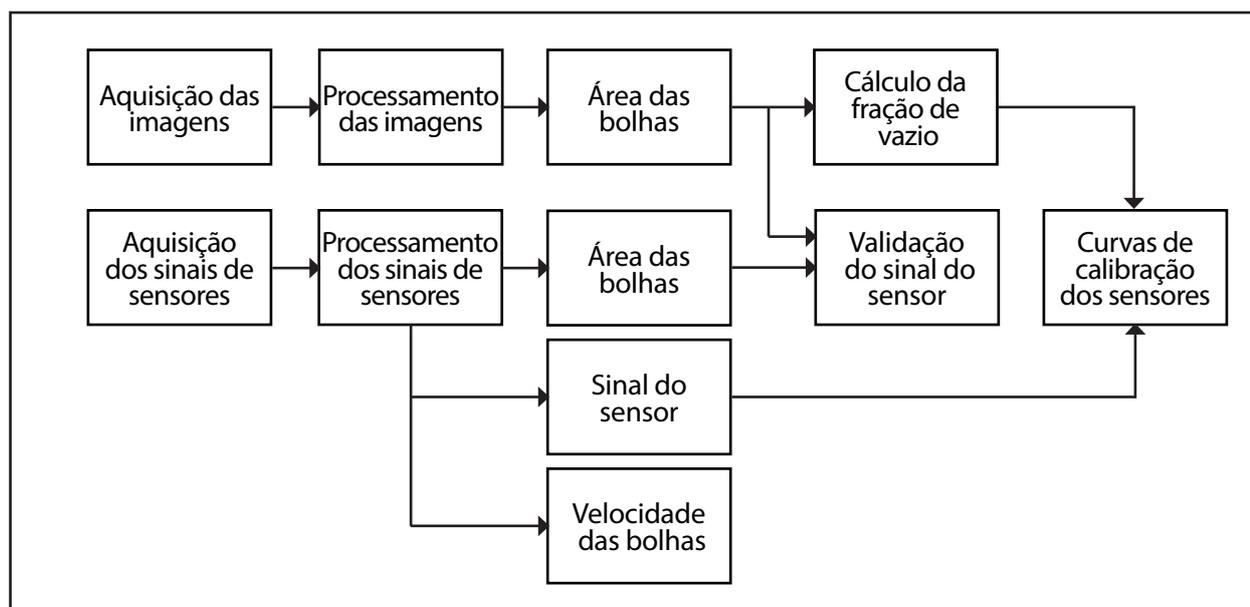


Figura 4 – Principais etapas da metodologia empregada para validação e calibração dos sensores ópticos
 Fonte: As autoras (2018).

2.2.1 Processamento de imagens

As imagens capturadas das bolhas de ar são registradas e processadas por meio de rotinas desenvolvidas no *software* Matlab da MathWorks®. O processamento das imagens é composto basicamente pelas etapas de aquisição, tratamento das imagens e identificação do contorno da bolha, que permitem o cálculo da área em pixel e em mm² e a identificação dos diâmetros. A partir da área, é calculada a fração de vazio transversal, α , dada pela equação 1 (Thome, 2010):

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (1)$$

onde, A_g e A_l representam, respectivamente, as áreas da seção do gás e do líquido.

A figura 5 apresenta um exemplo da imagem original (a), da imagem tratada para alterar brilho e contraste (b) e do contorno da bolha - linha branca segmentada (c).

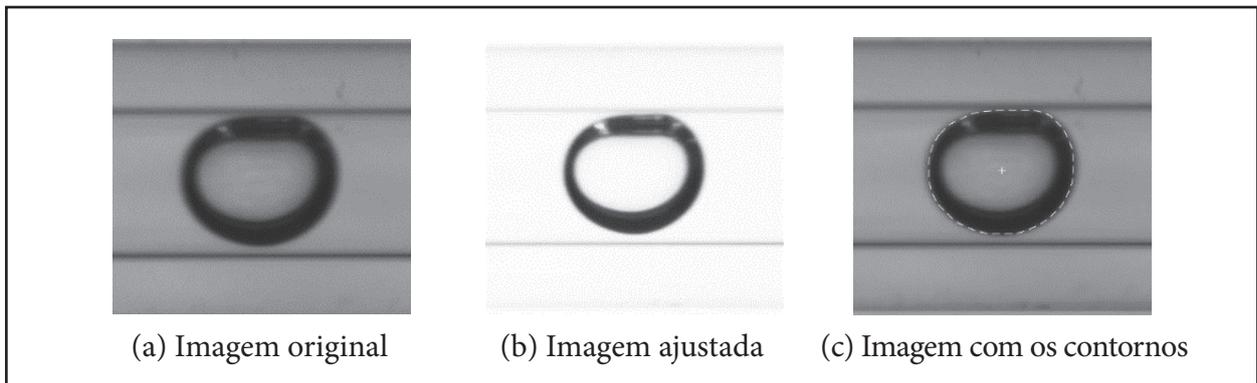


Figura 5 - Etapas do processamento de imagens
Fonte: As autoras (2018).

2.2.2 Processamento dos sinais dos sensores

Os sinais adquiridos pelos sensores, em cada teste, são curvas, conforme se apresenta na figura 6, e estão relacionadas ao padrão de bolha gerado. O sinal original passa 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. A partir dos dados limitados entre 0 e 1, calcula-se a área sob a curva, que representa a área da bolha, tendo sua amplitude relacionada ao diâmetro e o período relacionado ao comprimento da bolha. Para exemplificar as etapas do processamento dos sinais, a figura 6 apresenta os dados originais para o sensor de tubo - ST (a), o mesmo sinal invertido (b) e o sinal limitado retirando-se os picos (c).

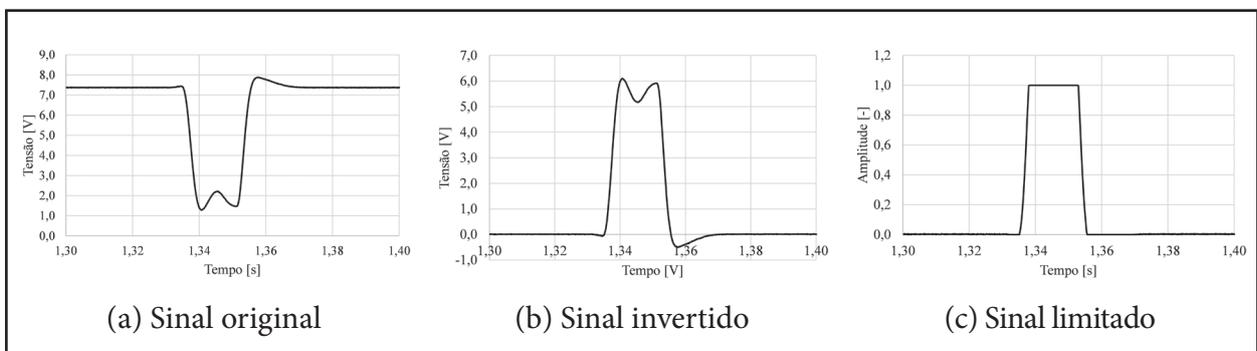


Figura 6 - Etapas do processamento dos sinais dos sensores
Fonte: As autoras (2018).

Para o cálculo da velocidade da bolha, são utilizados dois sensores (figura 7a), separados entre si, por uma distância de 0,04 m, que geram dois sinais separados entre si, por um dado intervalo de tempo (Δt), conforme figura 7b. O intervalo é encontrado por meio de uma

rotina computacional que identifica nas matrizes de dados o primeiro valor máximo de cada sensor, identificando suas posições na matriz. Utilizando essas posições, é possível localizar os valores de tempo para os dois sensores, encontrar a diferença entre eles e calcular a velocidade.

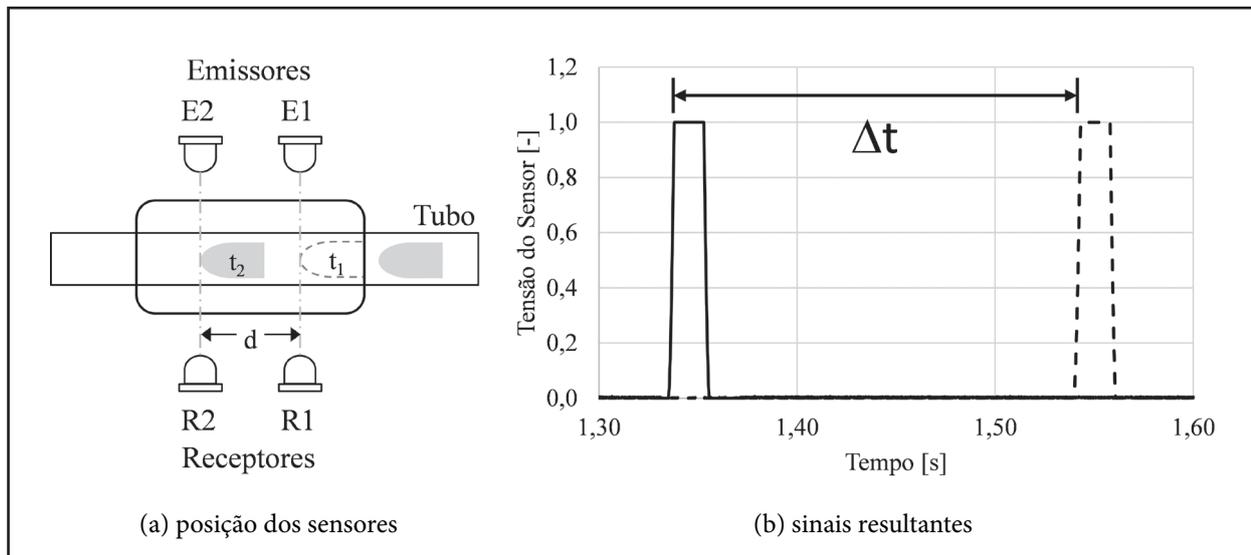


Figura 7 – Ilustração da posição do par de sensores e dos sinais resultantes
 Fonte: As autoras (2018).

2.2.3 Validação do sinal do sensor

A validação dos sensores é realizada com o auxílio das imagens correspondentes de cada padrão de escoamento. Por meio do processamento de imagens e do sinal dos sensores, são calculadas as áreas normalizadas das bolhas ($Area_{imagem}$) e da curva dos sinais ($Area_{sensor}$), que são então comparadas, utilizando-se o erro médio relativo (EMR) para as 30 amostras, conforme a equação 2.

$$EMR = \frac{1}{n} \sum \frac{Area_{imagem} - Area_{sensor}}{Area_{imagem}} \cdot 100 \quad (2)$$

2.2.4 Curva de calibração dos sensores

Validados os dados dos sensores para diferentes padrões de escoamento, é realizada a calibração. Ela consiste de 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.

Correlaciona-se a imagem da bolha e com a curva do sensor, medindo a variação do diâmetro, ponto a ponto, do início e do final da bolha, ou seja, cada seção transversal da bolha, com o nível de tensão, gerado pelo sinal do sensor.

Para uma mesma bolha, no entanto, 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. Assim, os dois registros são equalizados à mesma base de comparação, alterando-se o eixo das abcissas dos dados dos sensores que se encontra em segundos, para que fique na mesma escala do eixo das abcissas das imagens, que é dada em pixel. A partir dessa equalização, é possível relacionar a fração de vazio e os dados da tensão do sensor LDR e do sensor ST, obtendo-se as curvas de calibração.

2.2.5 Erro padrão

Para auxiliar na verificação da resposta de alguns parâmetros, é calculado o erro padrão da média, σ_x , 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 é obtido, dividindo o desvio padrão, σ ,

da amostra pela raiz quadrada do número de amostras, n , conforme a equação 3.

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

3 Resultados e discussão

A figura 8 apresenta os padrões e os sinais dos sensores LDR e ST adquiridos para uma vazão de água de 75 mL/min.

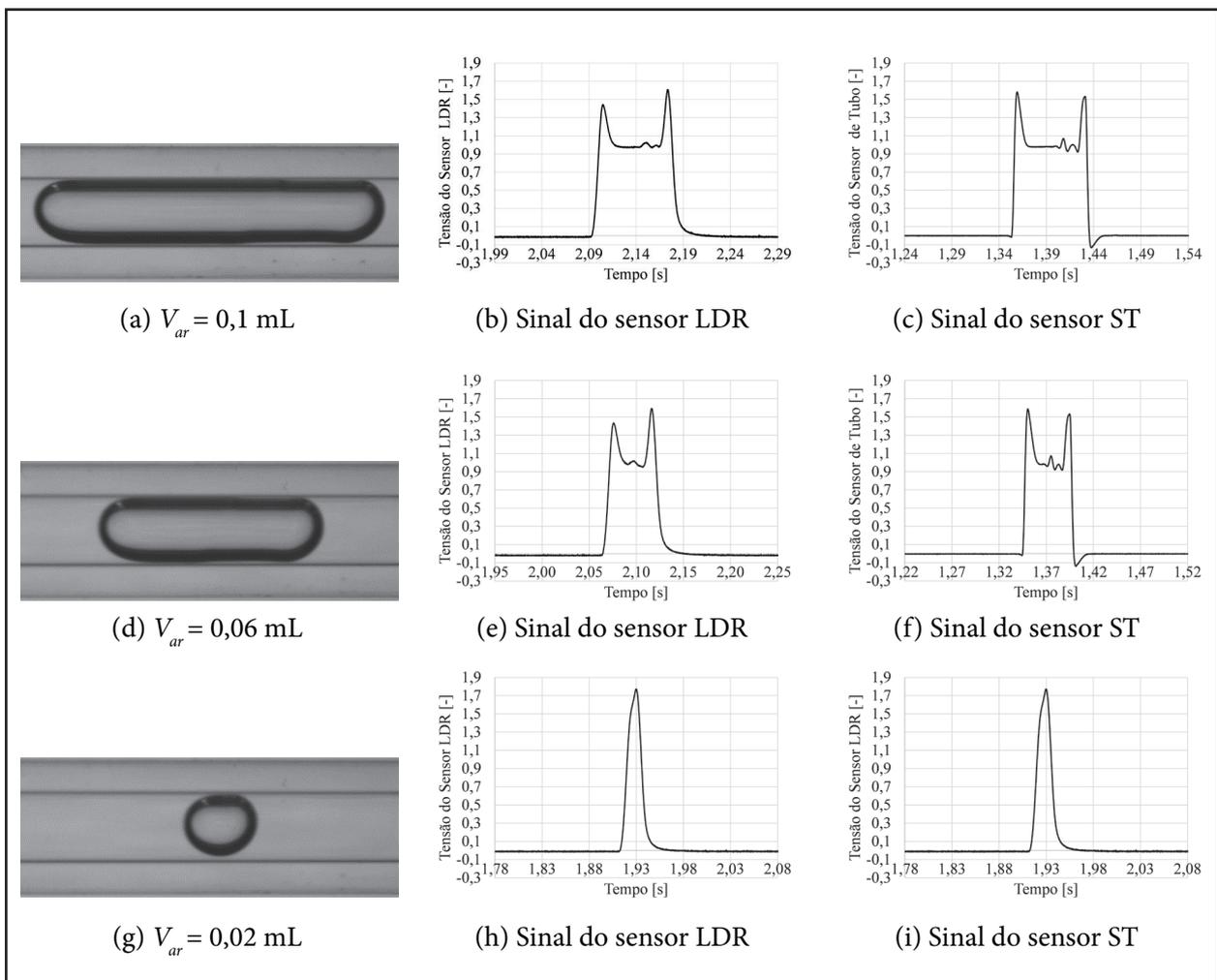


Figura 8 – Imagens dos padrões de bolhas e os respectivos sinais para os sensores LDR e de tubo para líquidos ST
Fonte: As autoras (2018).

Para os volumes de ar (V_{ar}) de 0,1 e 0,06 mL, o padrão de escoamento é pistonado, conforme se verifica nas figuras 8a e 8d, sendo diferenciado pelo comprimento que é consequência do volume de ar inserido. Na figura 8g, observa-se

o padrão de escoamento de bolhas, resultado de um volume de ar de 0,02 mL.

Embora o tubo utilizado seja considerado um minicanal, de acordo com Kandlikar e Grande (2003), identificam-se similaridades

nos resultados apresentados nas figuras 8a e 8d, padrão pistonado; e figura 8g, padrão de bolha, com os padrões identificados e apresentados por Kawaji e Chung (2004), na figura 1b.

Ao se comparar os sinais para os padrões pistonado das figuras 8a e 8d, percebe-se que são semelhantes. Por outro lado, para o padrão de escoamento de bolhas da figura 8g, há diferença entre os sinais dos sensores, sendo para o LDR mais pontiagudo (figura 8h), consequência do tempo de resposta, que é mais lento, em relação ao sensor de ST (figura 8i). Ainda, analisando-se o sinal do ST (figura 8i), percebe-se que ele é capaz de identificar o padrão levemente alongado da bolha, caracterizado pela descida do sinal entre os picos, a qual se assemelha ao comportamento para

os padrões pistonado. Embora a aplicação comercial do sensor de tubo ST seja a simples detecção de ar ou líquido, percebe-se que tal sensor é capaz de detectar as peculiaridades das bolhas, ao contrário do sensor LDR.

Comparando-se os resultados dos sensores com os apresentados por Revellin *et al.* (2006), na figura 9, verifica-se que os sinais são similares para o padrão de bolhas, porém percebe-se a diferença dos sinais para o escoamento pistonado que tiveram picos mais suaves, em relação aos resultados apresentados na figura 8b, 8c, 8e e 8f. 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.

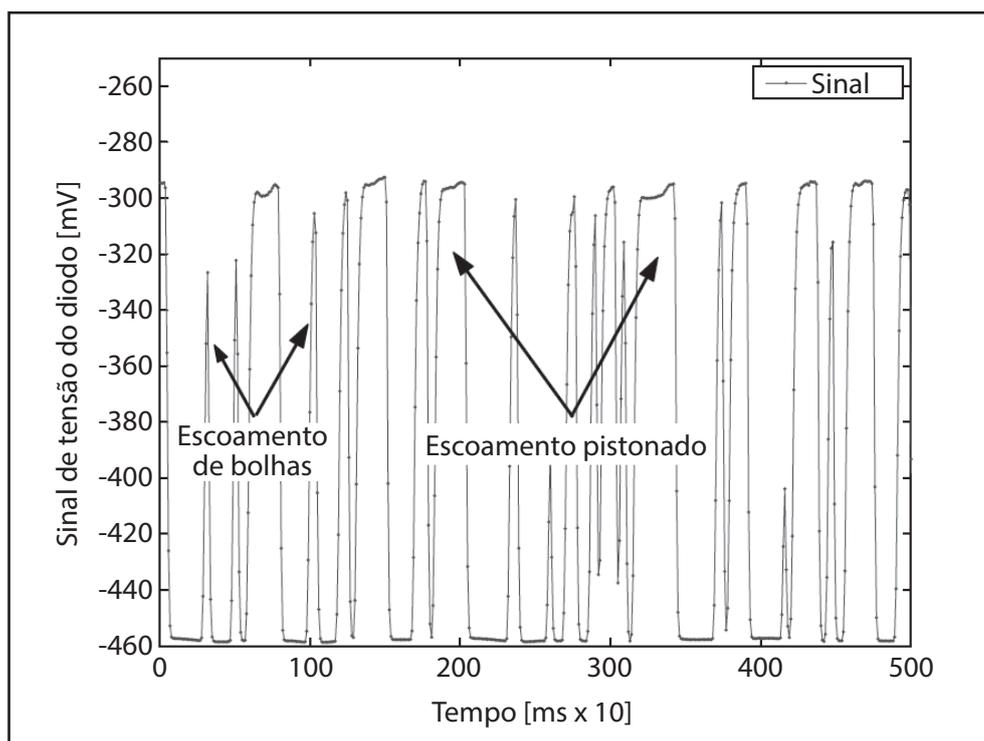


Figura 9 – Padrões de escoamento na ebulição do fluido refrigerante R-134a em um microtubo horizontal de 0,5 mm de diâmetro interno
Fonte: Adaptado de Revellin *et al.* (2006).

Com o propósito de validar os sensores, por meio de uma comparação entre área da imagem e área do sinal do sensor, são consideradas 30 amostras para cada teste, conforme definido na

tabela 2. A partir do processamento das imagens, são obtidos os valores médios das áreas para diferentes volumes de ar e vazões de água, conforme apresenta o gráfico da figura 10.

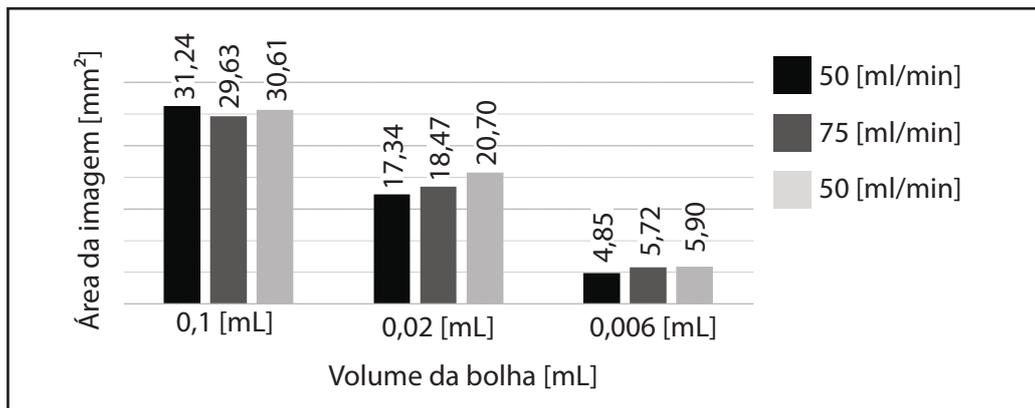


Figura 10 - Valores médios para as áreas das imagens processadas para diferentes padrões de bolhas
Fonte: As autoras (2018).

A partir dos valores das áreas da figura 10, a tabela 2 apresenta os valores médios das áreas encontradas para todas as vazões de água e o erro padrão da média (equação 3), considerando-se bolhas de 0,1, 0,06 e 0,02 mL. Os erros padrões da média, apresentados na tabela,

indicam 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 menor escala, dos parâmetros inseridos do programa de processamento de imagens.

Tabela 2 - Valores médios das áreas das imagens para diferentes volumes de ar

Volume de ar [mL]	0,02	0,06	0,10
Área média [mm ²]	5,49	18,84	30,49
Erro padrão [mm ²]	±0,05	±0,15	±0,07

Fonte: As autoras (2018).

Assim, as áreas calculadas, através das imagens e aquelas obtidas, a partir da curva do sinal dos sensores são comparadas. A figura 11 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, elas foram normalizadas em relação ao valor máximo de cada uma.

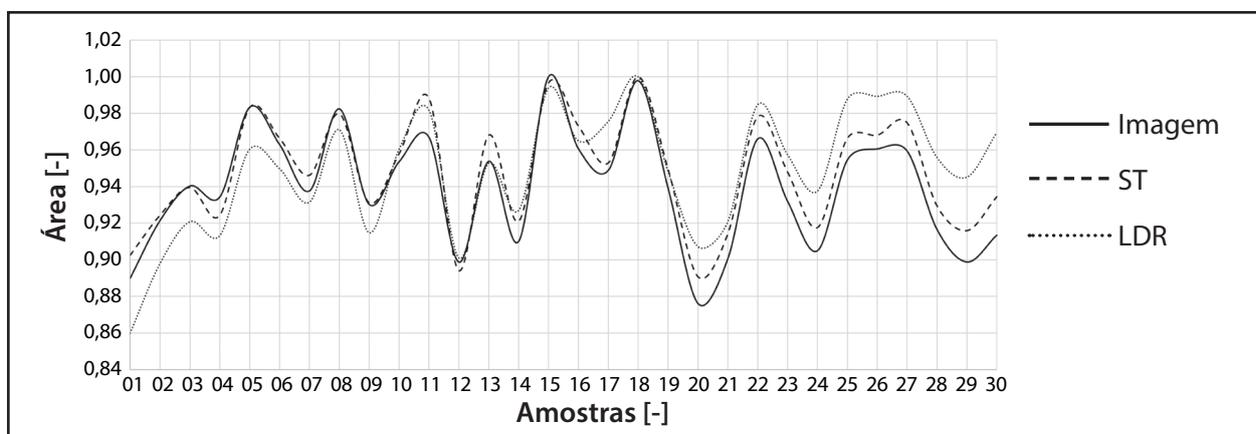


Figura 11 - Comparativo entre as áreas normalizadas das imagens bolhas e dos sinais do sensor de tubo ST e do sensor LDR para vazão de água de 100 mL/min e volume de ar de 0,1 mL
Fonte: As autoras (2018).

Embora existam diferenças entre os valores, o comportamento das curvas da figura 11 manteve-se aproximadamente o mesmo, indicando a validade do uso do sensor para captar o padrão de escoamento. Complementando essa análise, a tabela 3 apresenta os resultados

para todas as condições de testes estabelecidas e o Erro Médio Relativo (EMR), calculado pela equação 2. Esse erro indica a variação entre os valores das áreas dos sensores LDR e do tubo, em relação à área da imagem adotada como padrão.

Tabela 3 - Erro médio relativo das áreas medidas pelos sensores para diferentes condições

Vazão de água [mL/min]	Erro Médio Relativo, EMR [%]					
	50		75		100	
Volume da bolha [mL]	ST	LDR	ST	LDR	ST	LDR
0,10	3,20	-0,52	-0,52	0,34	0,87	-1,00
0,06	3,34	2,81	-0,44	0,02	0,17	4,49
0,02	-5,99	-4,37	-6,88	-10,23	-4,61	-9,36

Fonte: As autoras (2018).

Para o padrão de escoamento, pistonado com volume 0,06 mL, foram encontrados os menores erros médios relativos que ficaram entre 0,02 e 4,49%. Porém, o padrão de escoamento tipo bolha, com volume de 0,02 mL, teve os maiores erros médios relativos, com valores entre -10,23% e -4,37%, que são resultado da imprecisão, durante a geração das bolhas com a seringa. De forma geral, observa-se que os maiores erros médios relativos, -9,36% e 10,23%, foram, respectivamente, aqueles encontrados, para o sensor LDR, nas vazões de 100 mL/min e 75 mL/

min e o menor volume de ar.

A tabela 4 apresenta os resultados das áreas, obtidas com os sinais dos sensores, ST e LDR, para as vazões de água de 50, 75 e 100 mL/min. Para um mesmo volume de ar, pode ser verificado que as áreas diminuíam da menor para maior vazão. Isso porque a vazão de água influencia sobre 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.

Tabela 4 – Áreas sob a curva dos sensores LDR e de tubo ST para os parâmetros de testes propostos

Volume da bolha [mL]	Área sob a curva do sensor [Vs]					
	Vazões de água [mL/min]					
	50 mL/min		75 mL/min		100 mL/min	
	ST	LDR	ST	LDR	ST	LDR
0,10	0,140	0,143	0,074	0,080	0,056	0,062
0,06	0,080	0,085	0,049	0,054	0,040	0,046
0,02	0,027	0,034	0,018	0,023	0,013	0,018

Fonte: As autoras (2018).

Com o intuito de comparar os valores médios das áreas obtidas pelos sensores LDR e de tubo para líquido ST, para os diferentes volumes de ar e independente da vazão de água testada,

foi primeiro, necessário retirar o fator tempo do resultado e, depois, normalizá-lo em relação ao valor máximo entre as médias das áreas calculadas. Os resultados são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Valores normalizados para as áreas sob a curva dos sensores LDR e de tubo para líquido ST

Volume da bolha [mL]	Área normalizada [-]	
	ST	LDR
0,10	0,961 ± 0,051	1,039 ± 0,035
0,06	0,613 ± 0,024	0,687 ± 0,048
0,02	0,220 ± 0,010	0,287 ± 0,021

Fonte: As autoras (2018).

De acordo com esses resultados, o LDR possui área maior que 1 para o volume de ar de 0,1 mL, indicando, assim, que suas medidas ficaram acima da média do sensor ST, devido a um tempo de resposta do LDR maior. O tempo de resposta pode ser verificado pela inclinação das

curvas nas figuras 12a e 12b que são resultados de testes realizados a uma vazão de água de 100 mL/min e o volume de ar de 0,1 mL. Dessa forma, o sensor de tubo ST possui características superiores, no que refere à medição da área, em relação ao sensor LDR.

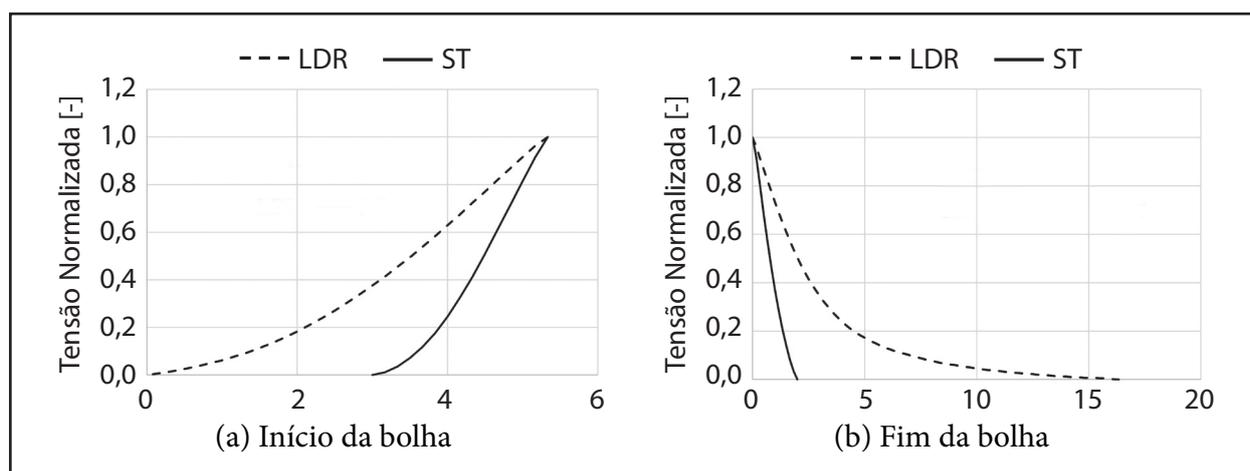


Figura 12 – Inclinação da curva dos sinais dos sensores LDR e de tubo ST para as transições (a) água-ar e (b) ar-água
Fonte: As autoras (2018).

Note que a figura 12a apresenta o sinal de tensão normalizado para o início da bolha, e a figura 12b para o final da bolha. Esses sinais representam o comportamento da fração de vazio e são utilizados na etapa de calibração dos sensores.

Para o cálculo da fração de vazio pela equação 1, são utilizados os resultados dos diâmetros obtidos pelo processamento de imagens, a partir dos contornos das bolhas (figura 5c). O resultado dessa etapa são valores de fração de vazio em função da posição, para todas as condições de vazão de água e volume de ar testados, conforme se apresenta na figura 13.

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 figura 13, são diferentes em função da posição da bolha na imagem original e da forma como o Matlab interpreta os dados, entretanto, essa mudança de posição não altera o comportamento dos dados. Depois do deslocamento dos dados, eles são processados, para que se retirem os dados repetidos, resultando, assim, em uma única curva (figura 14), cujos dados representam por fim, o comportamento da fração de vazio.

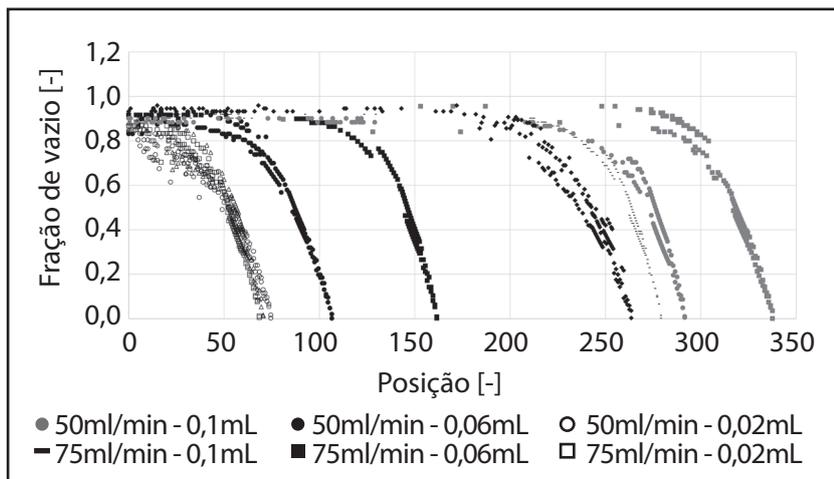


Figura 13 - Frações de vazio calculadas a partir das imagens para as condições propostas na tabela 2
 Fonte: As autoras (2018).

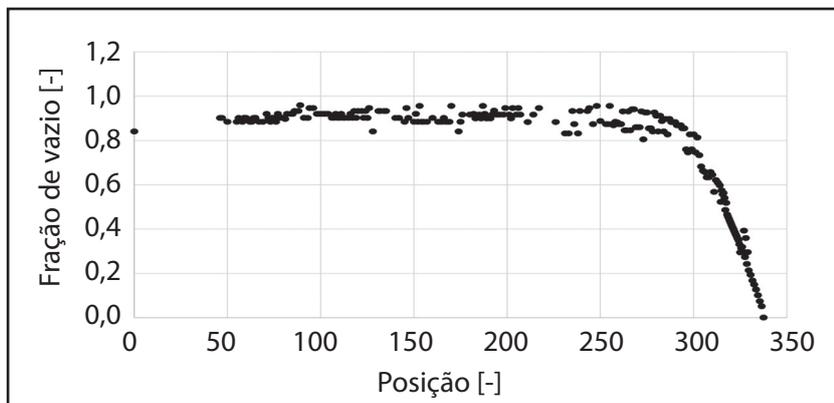


Figura 14 - Variação da fração de vazio ao longo do comprimento das bolhas de ar
 Fonte: As autoras (2018).

Os resultados para a tensão dos sensores LDR e de tubo ST, apresentados na figura 12, depois de equalizados, podem ser visualizados

juntamente com a fração de vazio, calculada, a partir das áreas das bolhas do processamento de imagens, nas figuras 15a e 15b.

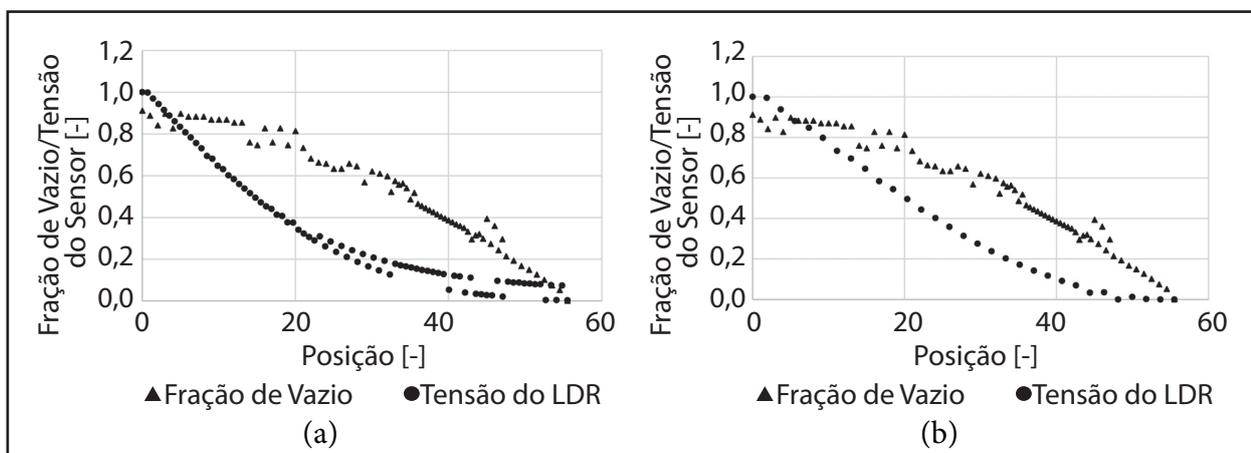


Figura 15 - Dados da fração de vazio e dos sinais de tensão equalizados para os sensores LDR (a) e de tubo, ST (b)
 Fonte: As autoras (2018).

A partir dos dados da figura 15, é possível então plotar a fração de vazio, em função da tensão do sensor, para o sensor LDR (figura 16) e para o sensor de tubo para líquido, ST (figura 17) e ajustar as respectivas curvas.

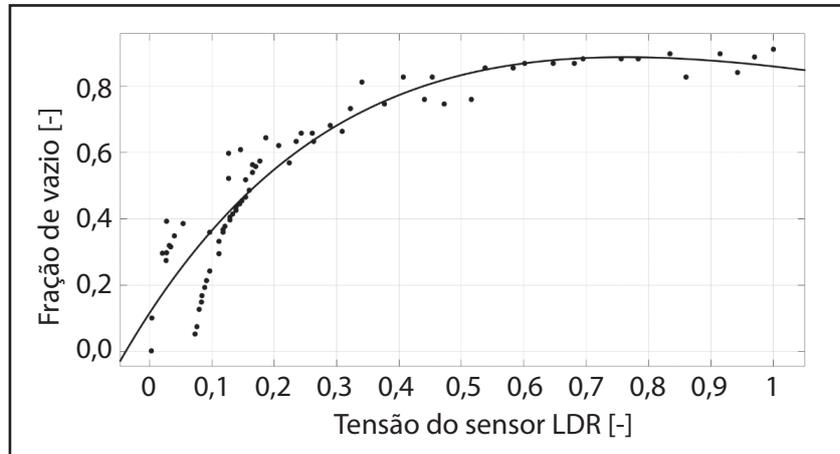


Figura 16 - Curva de calibração para o sensor LDR
Fonte: As autoras (2018).

Para ambos 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 R^2 , como visualmente parecem se ajustar melhor, dessa forma, optou-se por apresentar as equações aproximadas, utilizando-se exponenciais de segunda ordem.

A curva de ajuste para o sensor LDR (figura 16) é dada pela equação 4 para valores de V_{LDR} de 0 a 1. A medida do ajuste do modelo aos

valores observados foi dada pelo coeficiente de determinação R^2 que resultou em 0,874.

$$\alpha(V_{LDR}) = 2,055e^{(-0,64V_{LDR})} - 1,939e^{(-2,159V_{LDR})} \quad (4)$$

Utilizando-se os dados da tensão normalizada do LDR, que deram origem à curva e os dados, e aplicando-se a equação 4, o erro padrão da média e o erro médio relativo, para a fração de vazio foram, respectivamente, $\sigma_{\bar{x}} = 0,032$ e $EMR = 6,44\%$.

Para o sensor de tubo para líquido ST, a curva de tendência é apresentada na figura 17 e resulta na equação 5, para valores de V_{ST} de 0 a 1.

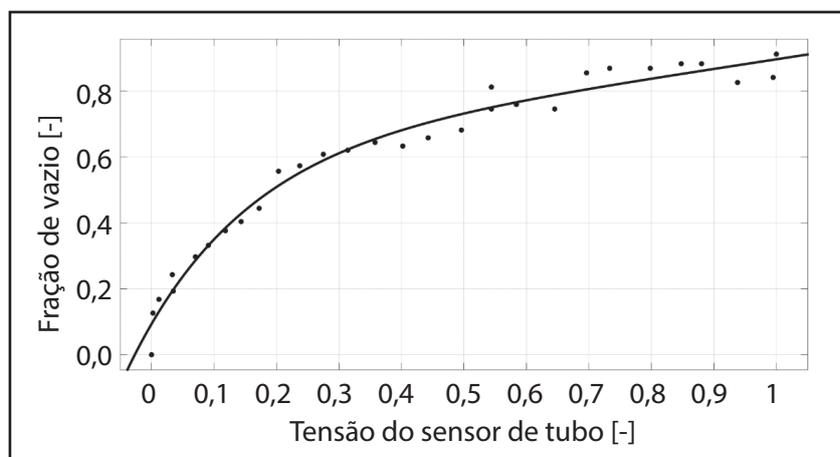


Figura 17 - Curva de calibração para sensor de tubo, ST.
Fonte: As autoras (2018).

$$\alpha(V_{ST}) = 0,66e^{(0,309V_{ST})} - 0,567e^{(-5,391V_{ST})} \quad (5)$$

A equação 5, encontrada para o sensor ST, apresentou um coeficiente $R^2 = 0,979$, indicando um ajuste melhor que o encontrado para o sensor LDR. Aplicando na equação 5 para os dados da tensão normalizada, os erros para a fração de vazio neste caso foram $\sigma_x = 0,016$ e $EMR = 3,14\%$.

Comparando os dados das curvas das figuras 16 e 17, verifica-se para o sensor LDR (figura 16) maior dispersão dos dados nos menores valores de tensão e fração de vazio. Isso pode ser explicado, avaliando-se a resposta do sinal dos sensores, para o início e fim da bolha apresentados, respectivamente, nas figuras 12a e 12b, onde as curvaturas do LDR são diferentes

entre si e muito mais pronunciadas em relação às do sensor ST. Percebe-se que tempo de resposta do sensor LDR influenciou na qualidade da curva de calibração e, sendo essa uma característica intrínseca do sensor, entende-se que sensor de tubo possui desempenho superior em relação ao LDR.

Visando estudos futuros, relacionados ao desenvolvimento de mapas de padrões de escoamento, o cálculo da velocidade média, que foi realizado, através do uso de pares de sensores, é um parâmetro necessário. Dessa forma, são apresentados na tabela 6, os valores das velocidades das bolhas medidas para os valores de vazão de água propostos e os respectivos erros padrão.

Tabela 6 - Velocidades da bolha medidas para diferentes vazões de água

Vazão [mL/min]	Velocidade da bolha ± erro padrão, σ_x [m/s]	
	ST	LDR
50	0,118 ± 0,00023	0,120 ± 0,00023
75	0,193 ± 0,00008	0,195 ± 0,00007
100	0,263 ± 0,00051	0,266 ± 0,00052

Fonte: As autoras (2018).

Nota-se que as velocidades medidas, apresentadas na tabela mantiveram a proporção em relação às vazões adotadas. O erro padrão da média σ_x é inferior a 0,00052 m/s para as três vazões testadas. Considerando que o erro padrão da média tem relação com a confiabilidade da média amostral e, sendo os resultados apresentados insignificantes em relação ao valor da velocidade, a comparação entre as velocidades medidas pelo sensor de tubo ST e pelo sensor LDR é suficiente para validar os dados medidos por ambos os sensores. Embora os resultados apresentem pequenas diferenças entre as velocidades dos sensores, essas são consequência da variação da medida da distância entre os sensores.

4 Conclusão

Neste trabalho, foram comparados dois sensores ópticos, sendo um deles formado por

um LED branco de alto brilho, como emissor, o LDR, como receptor, e o outro, por um sensor de tubo para líquido, formado por um LED emissor infravermelho e, um foto transistor, como receptor, para caracterizar os padrões de escoamento adiabático bifásico, ar-água, e as frações de vazio, em um minicanais horizontal de 2,6 mm de diâmetro.

A metodologia desenvolvida permitiu a validação dos sensores, a partir da comparação entre as áreas das imagens dos padrões de bolhas registradas com a câmera de alta velocidade e as áreas dos sinais dos sensores, resultando em uma boa correlação, a qual corroborou o emprego dos sensores LDR e de tubo para líquidos ST. Foram obtidas as curvas de calibração para os sensores, cujas aproximações por exponenciais de segunda ordem foram capazes de representar bem a relação entre a fração de vazio e a tensão dos sensores.

Ambos os sensores demonstraram ser capazes de identificar os padrões de escoamento, medir a velocidade da bolha e prover a fração de vazio. Apesar dos sensores proporcionarem resultados satisfatórios, para os objetivos propostos, comparando-se os erros médios relativos das áreas medidas pelos dois sensores e os coeficientes R^2 de suas curvas de calibração, conclui-se que o sensor de tubo ST apresenta melhores resultados, em relação ao sensor LDR, nas condições em que foram realizados os testes. Por outro lado, avaliando-se os aspectos econômicos e de aquisição no mercado nacional, o sensor LDR e seu LED emissor apresenta-se como uma opção de baixo custo, em relação ao sensor de tubo. E, além disso, é de fácil aquisição.

Para se estudar melhor o comportamento de ambos os sensores, trabalhos futuros devem ser desenvolvidos, utilizando-se uma faixa mais ampla de vazões de água e de ar, a fim de alcançar outros padrões de escoamento e avaliar o tempo de resposta de ambos os sensores. Seria possível ainda aprimorar os aspectos construtivos do suporte do sensor LDR, aproximando-se o LDR e o LED do contorno do tubo, evitando-se, assim, eventual absorção do sinal pelo canal do suporte que vai até o receptor, o que se assemelharia à construção do encapsulamento do sensor comercial de tubo.

Referências

- HOFF, A. G. **Desenvolvimento de um sensor óptico para medidas de fração de vazio em um minicanal**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale dos Sinos, São Leopoldo, 2014.
- JANA, A. K. *et al.* An optical probe for liquid-liquid two-phase flows. **Measurement Science and Technology**, v. 18, p. 1563-1575, 2007.
- KANDLIKAR, S. G.; GRANDE, W. J. Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. **Heat Transfer Engineering**, v. 24, n. 1, p. 3-17, 2003.
- KAWAJI, M.; CHUNG, P. M. Y. Adiabatic gas-liquid flow in microchannels. **Microscale Thermophysical Engineering**, v. 8, p. 239-257, 2004.
- REVELLIN, R. *et al.* 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.
- THOME, J. R. **Engineering data book III**. Decatur: Wolverine Tube, 2010.
- TRIPLETT, K. A. *et al.* 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. **Tube Liquid Sensor OPB350 Series**. 2006. Disponível em: < <http://www.mouser.com/ds/2/414/OPB350-184396.pdf> >. Acesso em: 10 out. 2016.
- WANG, C. *et al.* Void fraction measurement using NIR technology for horizontal wet-gas annular flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 76, p. 98-108, 2016.

