

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA**

HILSON HENRIQUE DAUM

**SENSOR ÓPTICO PARA MONITORAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO
EM GOLFADAS**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2013**

HILSON HENRIQUE DAUM

**SENSOR ÓPTICO PARA MONITORAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO
EM GOLFADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do grau de "Mestre em Ciências" - Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Cicero Martelli

Co-orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

CURITIBA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

D241 Daum, Hilson Henrique

Sensor óptico para monitoração de escoamento bifásico em golfadas / Hilson Henrique Daum. – 2013.

79 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Cicero Martelli.

Coorientador: Marco José da Silva

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2013.

Bibliografia: f. 77-79.

1. Escoamento bifásico – Monitorização. 2. Gás – Escoamento. 3. Escoamento em golfadas. 4. Detectores óticos. 5. Espectroscopia de infravermelho. 6. Simulação (Computadores). 7. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Martelli, Cicero, orient. II. Silva, Marco José da, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação N°. 644

“Sensor óptico para monitoração de escoamento bifásico em golfadas.”

por

Hilson Henrique Daum

Orientador: Prof. Dr. Cicero Martelli

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 9h30 do dia 04 de outubro de 2013. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Marco José da Silva, Dr.
(Presidente – UTFPR)

Prof. Marcos Vinicio Haas Rambo, Dr.
(Copel/UFPR)

Prof. Daniel Rodrigues Pipa, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Ricardo Lüders, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP- da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP - e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT- por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás -PRH-ANP/MCT – PRH10-UTFPR.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado me mostrando o caminho correto e me dado o discernimento necessário para chegar até aqui. Mesmo com muitas dificuldades, limitações e tribulação, o importante é agradecer e louvar pelas conquistas.

Não posso deixar de agradecer a minha família, pois cada página deste documento contém uma história vivenciada em família. Mais importante que status e título, foi a oportunidade que Deus nos deu de partilhar e vivenciar as dificuldades vencidas pela fé.

Durante a caminhada deste mestrado, “nas idas e vindas Ponta Grossa - Curitiba”, tive a oportunidade de conhecer grandes amigos que passaram a fazer parte da minha história, e com um grande carinho quero agradecer a eles pelo grande incentivo que me deram para chegar até aqui. Obrigado, Virgínia, Frédéric, Felipe, Guilherme e Maurem. Gostaria de agradecer aos colegas de laboratório, em especial ao Rodolfo e ao Professor Valmir, que contribuíram significativamente para a realização deste trabalho.

Também agradeço aos colegas do LACIT, que contribuíram para a realização deste trabalho, em Especial ao Professor Carlos Amaral, que ajudou significativamente no processamento dos dados desta dissertação. E ao professor Estanislau que me auxiliou na correção deste documento.

Agradeço também ao Professor Cicero Martelli e ao Professor Marco José da Silva, que me orientaram e me deram a oportunidade de alcançar mais esse objetivo. Agradeço também ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor petróleo e gás – PRH-ANP/MCT – PRH10-UTFPR.

RESUMO

DAUM, Hilson. Sensor óptico para monitoração de escoamento bifásico em golfadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013

Escoamentos bifásicos gás-líquido estão presentes em inúmeras aplicações de engenharia, como por exemplo, na produção de petróleo, onde óleo e gás escoam nas linhas de produção. A monitoração online do escoamento bifásico é de grande importância para operação segura e eficiente dos processos de produção. Assim, nos últimos anos tem-se buscando o desenvolvimento de técnicas simples e de baixo custo para monitoração do escoamento da produção. Das diversas formas que um escoamento bifásico se apresenta, o padrão de escoamento em golfadas é o mais comum nas linhas de produção. Este trabalho apresenta um sistema óptico infravermelho que mede especificamente a velocidade das bolhas de gás em um escoamento em golfadas. Esse sistema emprega componentes optoeletrônicos operando a 950 nm juntamente com uma peça adutora utilizada para manter estáticos o emissor e receptor de luz. O circuito eletrônico responsável pelo funcionamento do sensor é composto por três canais de medição modulados em frequências diferentes. Dessa forma pelo tempo de trânsito que uma bolha leva no percurso entre os canais, pode-se calcular a velocidade da bolha. Essa técnica óptica traz a vantagem de ser um sistema de medição não invasivo e pode ser utilizado para outros fluidos, mas é necessário adaptar o comprimento de onda de trabalho de acordo com as características do fluido a ser detectado. O sistema desenvolvido foi testado em uma planta piloto sob diversas condições operacionais e comparado com sensores de referência (*wire-mesh* e câmera de alta velocidade). Resultados obtidos mostram o bom desempenho do sistema com relação aos sensores de referência.

Palavras chave: Gás-Líquido, Velocidade de Bolha, Escoamento em Golfadas, Infravermelho.

ABSTRACT

DAUM, Hilson Henrique. Optical sensor for monitoring of two-phase slug flow. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Gas-liquid two-phase flows are present in many engineering applications such as in petroleum production, where oil and gas stream in the production lines. The online monitoring of two-phase flow is of great importance for safe and efficient operation of production processes. Thus, in recent years there has been an attempt to develop simple and low cost techniques for flow production monitoring. Among the various ways a two-phase flow may occur in a pipe, the flow pattern known as slug flow is the most common in production lines. This work presents an infrared optical system that specifically measures the translational speed of gas bubbles in slugs flow. This system employs optoelectronic components operating at 950 nm along with a mechanical assembly used to assure optical alignment of light emitters and receivers. The electronic circuitry responsible for operating the sensor consists of three measuring channels modulated at different frequencies, thus by measuring the time lag a gas bubble needs to travel from one channel to another, one can calculate speed of gas bubble. This optical technique has the advantage of being a non-invasive measurement system and can be used for other fluids, but it is necessary to adapt the working wavelength according to the characteristics of the fluid to be detected. The developed system was tested in a pilot plant under various operating conditions and compared with reference sensors (wire-mesh and high-speed camera). Results show the good performance of the system with respect to the reference sensors.

Keywords: Optical Sensor, Two-phase gas-liquid flow, Bubble velocity, Slug Flow, Infrared.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Imagem demonstrando reflexão especular; feixe de luz refletido tem o mesmo ângulo de inclinação do feixe de luz incidente. (b) Imagem demonstrando reflexão difusa, mostra a imagem distorcida por causa da superfície irregular.	19
Figura 2: Exemplo da Lei de Snell que mostra a aplicação da equação 3, onde está exemplificado o ângulo de inclinação do feixe de luz incidido e o refratado.	20
Figura 3: Gráfico indicando o comprimento de onda em que há o pico de absorção da água.	22
Figura 4: Em (a) encontram-se os padrões de escoamento para tubo na vertical. Em (b) encontram-se os padrões de escoamento na horizontal.	23
Figura 5: Apresentação de um mapa de fluxo para escoamento horizontal Fonte: DUKLER; YEHUDA, (1986).	24
Figura 6: Sonda óptica para detecção de escoamento bifásico	28
Figura 7: Sinal do sensor óptico medindo o fluxo multifásico	28
Figura 8: Técnica óptica para medir escoamento de Taylor	29
Figura 9: Diagrama de blocos do protótipo inicial	31
Figura 10: Em (a) se encontra a peça adutora usinada. Em (b) é mostrado o parafuso vazado alojando o LED	32
Figura 11: Imagem mostrando as dimensões da peça adutora.	33
Figura 12: Diagrama de blocos explicando as etapas de funcionamento do circuito eletrônico do sensor óptico.	34
Figura 13: Foto do circuito eletrônico desenvolvido para aquisição de dados do sensor óptico	35
Figura 14: Fluxograma explicando o funcionamento do programa de aquisição de dados.	36
Figura 15: Imagem mostrando o sinal óptico adquirido pelo programa de aquisição de dados elaborado em linguagem Labview	36
Figura 16: Imagem mostrando os componentes do sensor <i>wire mesh</i>	37
Figura 17: Imagem adquirida de uma bolha escoando no padrão de golfadas.	39
Figura 18: Desenho esquemático ilustrando o funcionamento e o posicionamento dos sensores.	40

Figura 19: Protótipo utilizado para a realização da modelagem numérica	42
Figura 20: Sinal utilizado para fazer comparação com a modelagem matemática.	43
Figura 21: Comparação dos raios refratados com o sinal adquirido.	44
Figura 22: Medição de absorção de luz utilizando a peça de alumínio	45
Figura 23: O gráfico apresenta o resultado da caracterização realizada dentro da peça adutora..	46
Figura 24: Fluxograma do experimento dentro da caixa de acrílico	47
Figura 25: Resultado da medição na caixa de acrílico.	47
Figura 26: Imagem do experimento para adquirir resultados referentes ao espelho de água	48
Figura 27: Resultado do experimento do espelho de água	49
Figura 28: Caracterização do sinal em função da altura do líquido	50
Figura 29: Imagem mostrando a posição dos emissores e receptores para a realização do experimento utilizando os três canais.	51
Figura 30: Resultado de caracterização em função da altura do líquido utilizando os três canais.	52
Figura 31: Mapa de escoamento para as medidas realizadas.....	53
Figura 32: Resultado da medição de velocidade entre os canais.....	54
Figura 33: Gráfico de comparação de velocidade de translação da bolha utilizando <i>wire mesh</i> , câmera e sensor óptico	56
Figura 34: Medição feita com o sensor <i>wire mesh</i>	56
Figura 35: Sinal do sensor óptico.	57
Figura 36: Gráfico mostrando a modificação da bolha dentro do sensor.....	61
Figura 37: Sinal óptico com imagem de uma golfada, ambos com as mesmas velocidades porém sem sincronia.....	62
Figura 38: Sinal do sensor óptico em sincronia com a golfada.....	63
Figura 39: Gráfico de comparação do sinal do sensor óptico com a superfície da bolha.	64
Figura 40: Sensor de areia.	69
Figura 41: Resultados do sensor de areia	70
Figura 42: Função da reta aplicada aos resultados de decantação de areia...	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação das velocidades do gás em relação à velocidade do líquido J_L 0,5m/s	58
Quadro 2: Resultado obtido variando a velocidade do líquido e mantando a velocidade do gás próximo de $0,35 \pm 0,05$ m/s	59
Quadro 3: Resultados apresentados para a velocidade do líquido de J_L 2,5m/s.	60
Quadro 4: Quadro mostrando o sinal adquirido de cada canal para a velocidade J_L 0,5m/s e J_G 1,3m/s. (A) Canal 1; (B) canal 2; (C) canal 3; (D) os três canais.	72
Quadro 5: Todos os resultados adquiridos com o sensor óptico.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes para a velocidade de translação da bolha - (BENDIKSEN, 1984).....	26
Tabela 2: Tabela que indica os melhores pontos de medição com o sensor óptico.....	55
Tabela 3: Validação do sensor óptico com a câmera para velocidades do líquido de 0,5 e 1,0 m/s	65
Tabela 4: Validação do sensor óptico com a câmera para velocidades do líquido de 1,5 e 2,5 m/s	66

LISTA DE SIGLAS

A/D – Analógico/Digital

CC – Corrente contínua

CdTe – Telureto de Cádmio

DAQ – Aquisição de dados (*Data Acquisition*)

DSP – Processamento digital de sinal (*Digital Signal Processing*)

He - Hélio

IR – Infra vermelho (*Infrared*)

J_L – Velocidade do líquido (*liquid velocity*)

J_G – Velocidade do gás (*gas velocity*)

LED – Diodo emissor de luz (*Light emitting diode*)

LFD – Laser de deslocamento do foco (*laser focus displacement*)

Ne – Neônio

V - Volts

VI – Instrumento virtual (*virtual instrument*)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1.	FUNDAMENTOS ÓPTICOS	18
2.1.1.	Espectro eletromagnético	18
2.1.2.	Interação da luz com a matéria	19
2.1.3.	Espectroscopia do infravermelho	20
2.1.4.	Espectroscopia da água	21
2.2.	ESCOAMENTO BIFÁSICO	22
2.2.1.	Padrões de escoamento bifásico	23
2.3.	MODELO DE VELOCIDADE DE TRANSLAÇÃO DA BOLHA	25
2.4.	SENSORES PARA MONITORAÇÃO DE ESCOAMENTO	26
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	CABEÇA SENSORA	30
3.1.1.	Protótipo inicial	30
3.2.	CIRCUITO ELETRÔNICO DE MODULAÇÃO E DEMODULAÇÃO	33
3.3.	PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	35
3.4.	SENSOR <i>WIRE MESH</i>	36
3.5.	CÂMERA	38
3.6.	FUNCIONAMENTO DA PLANTA DE ESCOAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR ÓPTICO	39
4.	SENSOR ÓPTICO	42
4.1.	MODELAGEM NUMÉRICA	42
4.2.	CARACTERIZAÇÃO	44
4.2.1.	Experimento de caracterização 1	44
4.2.2.	Experimento de caracterização 2	46
4.2.3.	Experimento de caracterização 3	47
4.2.4.	Experimento de caracterização 4	49
4.2.5.	Experimento de caracterização 5	50
5.	RESULTADOS	53
5.1.	MEDIÇÃO DE VELOCIDADE	53
5.2.	SENSOR ÓPTICO E <i>WIRE MESH</i>	56
5.3.	MEDIÇÕES COM O SENSOR ÓPTICO PARA VÁRIAS VELOCIDADES DE LÍQUIDO E GÁS NO PADRÃO GOLFADAS	57
5.4.	COMPARAÇÃO DOS SINAIS ADQUIRIDOS COM A CÂMERA	62

6. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	67
APÊNDICE I.	69
APÊNDICE II.	72
REFERÊNCIAS:	77

1. INTRODUÇÃO

Com a recente descoberta das reservas de petróleo na camada do pré-sal, e visando melhorar processos e equipamentos na indústria petrolífera, tem-se investido muito em pesquisa e desenvolvimento de equipamentos para monitoração da produção de petróleo, pois existem grandes dificuldades nessas operações principalmente em condições *offshore*, onde grandes pressões estão presentes por conta das grandes profundidades.

Na extração e produção de petróleo bruto, grandes quantidades de gás, água e outros fluidos estão presentes e dificultam o processo; sendo assim, a medição de taxas de fluxo individual de cada fluido é necessária para administração do reservatório e distribuição da produção. Pensando nesse problema, nos últimos anos vêm sendo estudadas várias técnicas de medição de fluxo com fluidos escoando com diferentes características, fenômeno denominado escoamento multifásico (SHOHAM, 2006).

O problema da vazão multifásica, envolvendo gás e líquido, é que transforma a operação de bombas de elevação em ação complexa e pode levar à falha elétrica e mecânica da bomba. Nesse cenário, observa-se a necessidade de um sensor capaz de operar nas condições de pressão e temperatura encontradas em poços de petróleo do pré-sal. O estudo de escoamento multifásico é de extrema importância para a indústria petrolífera, e um dos grandes problemas que se procura resolver é saber a quantidade de CO₂ diluído no petróleo, entre outros materiais que possam atrapalhar a exploração de petróleo; outro problema a ser resolvido é saber, também, a quantidade de materiais orgânicos e inorgânicos que ficam depositados na tubulação de escoamento, deteriorando os tubos e impedindo a passagem de fluidos (OLIVEIRA, 2003).

Ao analisar os empecilhos citados que a presença do gás diluído em petróleo pode trazer para a exploração, é necessário fazer um estudo dos fluidos que escoam na extração de petróleo; para isso, pretende-se construir um sensor que seja capaz de identificar a presença de diferentes fluidos no escoamento, como também elaborar uma forma de mensurar o volume de cada líquido escoando pela tubulação.

Para contribuir com a pesquisa no desenvolvimento do sensor em que se tem interesse, este documento relata o trabalho referente a um sensor óptico aplicado a escoamento bifásico, água e ar. Esse sensor é baseado na absorção da radiação

infravermelha pela água, o que permite detectar a presença de bolhas mediante o aumento de sinal óptico na presença de ar. Esse sensor, além de sofrer influências da absorção óptica, é, também, muito influenciado pelo fenômeno da refração e da reflexão.

Com a possibilidade de realizar medições utilizando três canais ópticos optou-se por fazer um estudo de velocidade de bolhas, pois contém a velocidade do líquido (J_L) juntamente com a velocidade do gás (J_G); com isso, foi possível alcançar maior exatidão e precisão nos resultados, e, também, estudar o comportamento da bolha durante um curto período.

Para validar os resultados adquiridos deste trabalho, foi necessário utilizar sensores de referência com os quais fosse possível comparar os dados adquiridos pelo sensor óptico. Para acompanhar a evolução da bolha na tubulação e identificar suas características de comportamento, utilizou-se uma câmera com alta taxa de aquisição de imagens para medir e comparar a velocidade recebida do sensor óptico.

Técnicas para monitoração de escoamento vêm sendo estudados há um bom tempo, pois há interesse da indústria química e petrolífera, entre outras, em que ocorre escoamento multifásico, em seus processos industriais. Um dos primeiros trabalhos apresentados por Taitel e Duckler (1986), que produziram resultados utilizando sensor com eletrodos, se tornou referência para trabalhos posteriores.

Sensores ópticos com aplicações para escoamento bifásico e multifásico são de desenvolvimento recente. Um exemplo disso é o trabalho de Óriol *et al.* (2008), que construiu um sensor que detecta um corante em escoamento bifásico (água e ar), utilizando a técnica de absorção de luz utilizando uma fonte emissora com comprimento de onda correspondente ao espectro de absorção do corante.

Para medição de velocidade de bolhas, o trabalho feito por Long *et al.* (2012) se utiliza de dois feixes do Laser de He-Ne para poder registrar o tempo de passagem das bolhas de Taylor e assim conseguir calcular sua velocidade de translação.

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi a quantitativa; sendo assim, houve a necessidade de comparar os resultados do sensor óptico com o sensor *wire mesh* e com a câmera de aquisição de imagens de alta velocidade, pois eles são referência para validar os resultados desta dissertação.

Este trabalho está dividido em seis partes. No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica que mostra o embasamento utilizado para a realização do

projeto. No capítulo 3 estão descritos os equipamentos utilizados para a realização do experimento. Logo em seguida, no capítulo 4, é relatado como foi implementado o sensor para realização do experimento e para coletar os dados que constam no capítulo 5. No capítulo 6 está a conclusão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o estudo bibliográfico com o qual foi adquirida toda a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. São apresentados os principais conceitos referentes ao sensor óptico desenvolvido bem como os fenômenos físicos envolvidos no escoamento.

2.1. FUNDAMENTOS ÓPTICOS

A fundamentação óptica necessária para compreender este trabalho está diretamente ligada à definição de luz e às definições de absorção, reflexão e refração de luz. Essas definições são fundamentais para o entendimento do sinal recebido pelo fotodetector.

2.1.1. Espectro Eletromagnético

A luz branca é constituída por todas as cores. O primeiro a reconhecer isso foi Isaac Newton ao perceber que o prisma dispersa a luz branca e não cria novas cores, como se pensava antigamente. O olho e o cérebro humano compreendem a luz branca como sendo uma mistura de frequências com energias semelhantes (HECHT, 1987).

Mesmo que a luz tenha sua velocidade característica no vácuo, ela viaja com diferentes velocidades quando passa por diferentes meios. Por exemplo, a luz viaja a cerca de $2,25 \times 10^8$ m/s na água, muito mais lentamente do que o seu normal, $3,00 \times 10^8$ m/s, no vácuo, a velocidade se altera porque o índice de refração foi alterado durante o percurso.

A radiação infravermelha ocorre espontaneamente em nosso cotidiano, pois as moléculas de qualquer objeto acima do zero absoluto, ou zero de kelvin, irradiam energia infravermelha, embora com intensidade menor (HECHT, 1987).

A radiação infravermelha (IR) foi descoberta em 1800 pelo astrônomo Willian Herschel (ADRADE, 2009). A radiação pode ser dividida em quatro níveis:

- IR próximo do visível, que se estende de 780 a 3000nm;
- IR intermediário, com comprimentos de onda de 3000 a 6000nm;
- IR térmico, de 6000 a 15000nm;
- IR longínquo, de 15000nm a 1 μ m.

2.1.2. Interação da luz com a matéria

Esta seção apresenta a interação da luz com a matéria especificamente para lei de reflexão e refração.

A figura 1(a) mostra um exemplo de reflexão especular que pode ser definida pela igualdade dos ângulos entre o raio incidente e o raio refletido em relação a normal; mostra que o ângulo entre o raio incidente e o raio refletido são iguais para uma superfície refletora de pouca irregularidade. Também existe reflexão para superfícies com irregularidades, mas o ângulo entre o raio incidente e o raio refletido continua sendo igual perante a normal, pois a mesma acompanha perpendicularmente a reta tangente à irregularidade. A figura 1(b) mostra que quando uma fonte de luz incide em uma superfície irregular, os raios apresentam maior dispersão e a imagem refletida ficará distorcida.

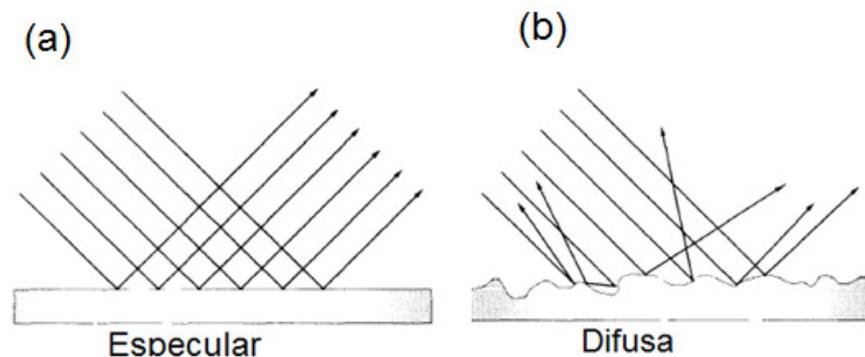


Figura 1: (a) Imagem demonstrando reflexão especular; feixe de luz refletido tem o mesmo ângulo de inclinação do feixe de luz incidente. (b) Imagem demonstrando reflexão difusa, mostra a imagem distorcida por causa da superfície irregular.

Fonte: adaptado de Hecht (1987)

A lei da refração também é conhecida como lei de Snell. A equação 1 determina que a luz se propaga inicialmente no meio de menor índice de refração, ou seja, $n_i < n_t$, sendo que $\text{sen } \theta_i > \text{sen } \theta_t$. Dessa forma, pode-se afirmar que os raios se aproximam da normal. Mas se houver alteração, e o feixe luminoso se propagar inicialmente no meio com maior índice de refração $n_i > n_t$, então os raios luminosos tendem a se afastar da normal. De acordo com a equação 1, percebe-se que os raios incidentes e os raios refratados pertencem ao mesmo plano (HECHT, 1987).

$$n_i \text{sen } \theta_i = n_t \text{sen } \theta_t \quad (1)$$

A relação da equação 1 também pode ser demonstrada através da figura 2, onde é possível ver o feixe de luz sendo refratado, pois o índice de refração do água

é maior do que o do ar; sendo assim, o raio refratado se aproxima da normal. É possível perceber na figura 2 que existe uma mudança de direção do feixe incidido quando atravessa a superfície de separação entre os meios; dessa forma, a parte mais adiantada da onda se atrasa por causa da água e se aproxima da normal; logo, a parte mais atrasada se propaga mais rapidamente, pois o meio em que está sendo propagada é o ar.

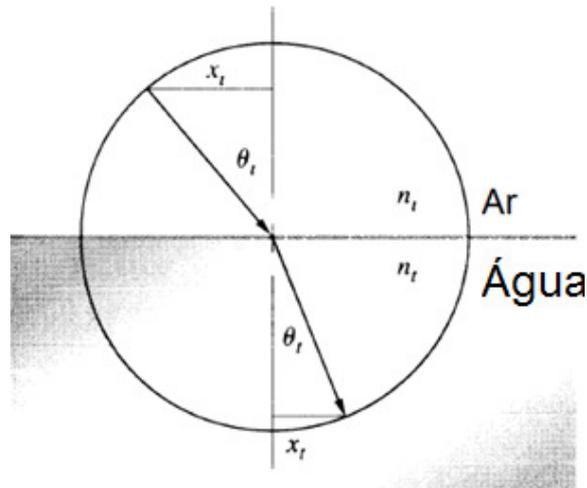


Figura 2: Exemplo da Lei de Snell que mostra a aplicação da equação 3, onde está exemplificado o ângulo de inclinação do feixe de luz incidido e o refratado.
Fonte: Adaptado de Hecht (1987)

2.1.3. Espectroscopia do Infravermelho

A espectroscopia é uma técnica que permite analisar e identificar moléculas através da absorção de comprimentos de onda. Como a absorção de comprimentos de onda é diferente para cada molécula, pode-se dizer que cada molécula possui uma assinatura (CSELE, 2004). O termo espectroscopia pode ser definido como o estudo da transmissão, absorção, e reflexão da energia incidente em qualquer objeto. Como cada elemento possui sua característica físico-química, através da espectroscopia pode-se examinar e determinar o nível de absorção de luz. A espectroscopia está dividida em duas partes (ATKINS, 2003):

- Espectroscopia por emissão,
- Espectroscopia por absorção.

A espectroscopia por emissão ocorre no emissor de luz, pois quando uma molécula ou átomo sofre a transição de um estado de energia elevada para o estado de energia baixa, a energia excedente é liberada na forma de fótons.

Normalmente o comprimento de onda da luz absorvida é característica da espécie absorvente; prova disso é que toda molécula tem comportamento diferente.

A aplicação da espectroscopia no infravermelho é uma técnica que permite a análise e identificação do material pela absorção de moléculas complexas; isso ocorre porque as ligações entre os átomos de massas diferentes têm diferentes ligações que demonstram ter um comprimento de onda característico para que ocorra absorção de luz. Assim, pode-se dizer, por exemplo, que uma ligação comum entre carbono e hidrogênio tem características diferentes das características de uma ligação carbono e oxigênio. Logo, assim se podem identificar as moléculas pelo espectro de absorção.

2.1.4. Espectroscopia da água

De acordo com Atkins (2003), a lei Beer – Lambert mostra que a intensidade da radiação transmitida, através de uma amostra, diminui exponencialmente com a espessura da amostra e com a molaridade da solução. Dessa forma, a Lei de Beer-Lambert pode ser representada pela equação 2, onde k representa o coeficiente de absorção, b indica a concentração molar do composto e l mostra o comprimento do percurso. I Indica a intensidade transmitida e I_0 intensidade incidente.

$$\ln \frac{I}{I_0} = -k b l \quad (2)$$

A lei de Beer-Lambert justifica a razão de utilizar um emissor de luz com o comprimento de onda característico para que a água possa absorver a luz incidente.

A figura 3 mostra o gráfico de absorção da água. Pode-se perceber que o pico de absorção no infravermelho está compreendido entre 940nm a 980nm. Sendo assim, é possível perceber que a fonte óptica utilizada, para o desenvolvimento do sensor óptico, tem o comprimento de onda de emissão próximo ao espectro de absorção da água.

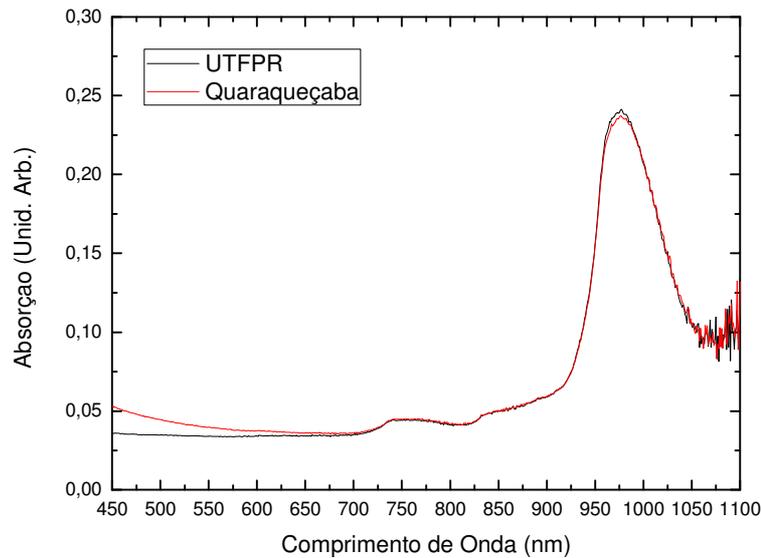


Figura 3: Gráfico indicando o comprimento de onda em que há o pico de absorção da água
Fonte: DUTRA (2011)

2.2. escoamento bifásico

De acordo com Azzopardi (2006), o fluxo multifásico pode aparecer em equipamentos relativamente simples, como oleodutos, mas também ocorre em geometrias mais complexas como trocadores de calor, reatores químicos e separadores de fase. Há varias combinações possíveis para escoamento multifásico: sólido-gás, sólido-líquido, líquido-gás.

O escoamento multifásico ocorre na indústria petrolífera durante a produção e transporte do fluido e do gás; esse tipo de escoamento vem sendo estudado tanto na posição vertical como na horizontal para resolver os problemas de exploração e de escoamento de produção dos poços de petróleo; um dos primeiros trabalhos publicados sobre escoamento bifásico foi escrito por Taitel e Dukler (1977) e desde então as pesquisas estão evoluindo cada vez mais. A motivação para pesquisar esse assunto é que há grande interesse na indústria petrolífera, química, geotérmica entre outras. Empresas dessas áreas têm grande interesse em conseguir resultados satisfatórios na área de escoamento e ainda não existe equipamento que possa aferir de maneira correta os tipos e a quantidade de fluido que estão percorrendo um determinado trecho da tubulação em um determinado sistema. Dessa forma, as empresas que necessitam trabalhar com esse tipo de escoamento têm feito grandes investimentos para desenvolver sensores que possam indicar o mais exato possível

a quantidade e o volume de cada fluido que está passando pela tubulação em um determinado momento.

2.2.1. Padrões de escoamento bifásico.

De acordo com Shoham (2006), a diferença fundamental entre o escoamento monofásico e bifásico está na existência do padrão de fluxo ou regime de fluxo em duas fases, ou seja, isso se refere a uma configuração geométrica do gás e as fases do líquido em um tubo. Shoham cita que o problema central do escoamento bifásico está em determinar um padrão de escoamento para analisar o sistema bifásico.

Na figura 4 estão representados os padrões de escoamento para medição na vertical (a), e na horizontal(b).

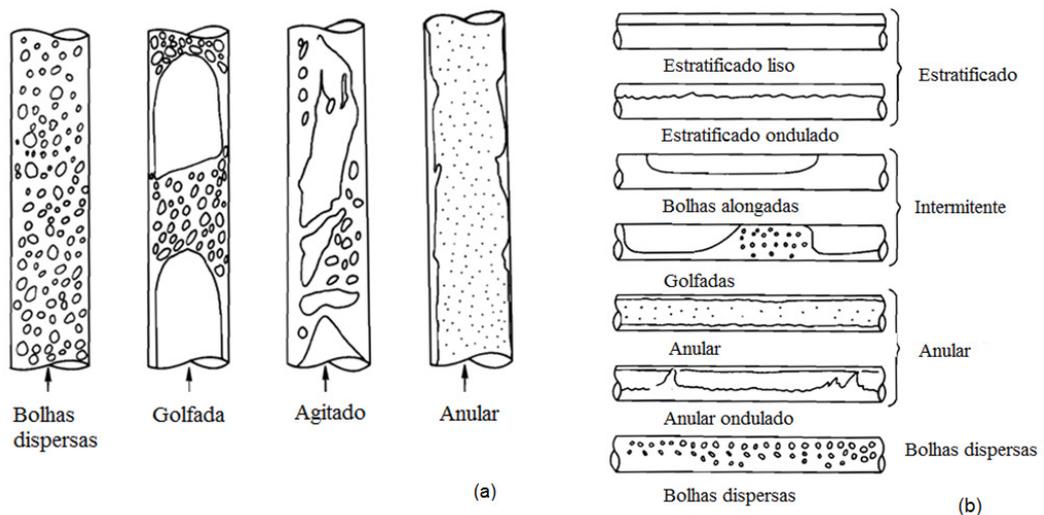


Figura 4: Em (a) encontram-se os padrões de escoamento para tubo na vertical. Em (b) encontram-se os padrões de escoamento na horizontal. Fonte: Adaptado de Dukler; Yehuda (1986)

O escoamento horizontal tem classificações, como escoamento estratificado (estratificado suave e estratificado ondulado) escoamento intermitente (escoamento em golfadas e escoamento de bolhas alongadas), escoamento anular e escoamento em bolhas dispersas. A figura 5 mostra o mapa de fluxo do escoamento horizontal.

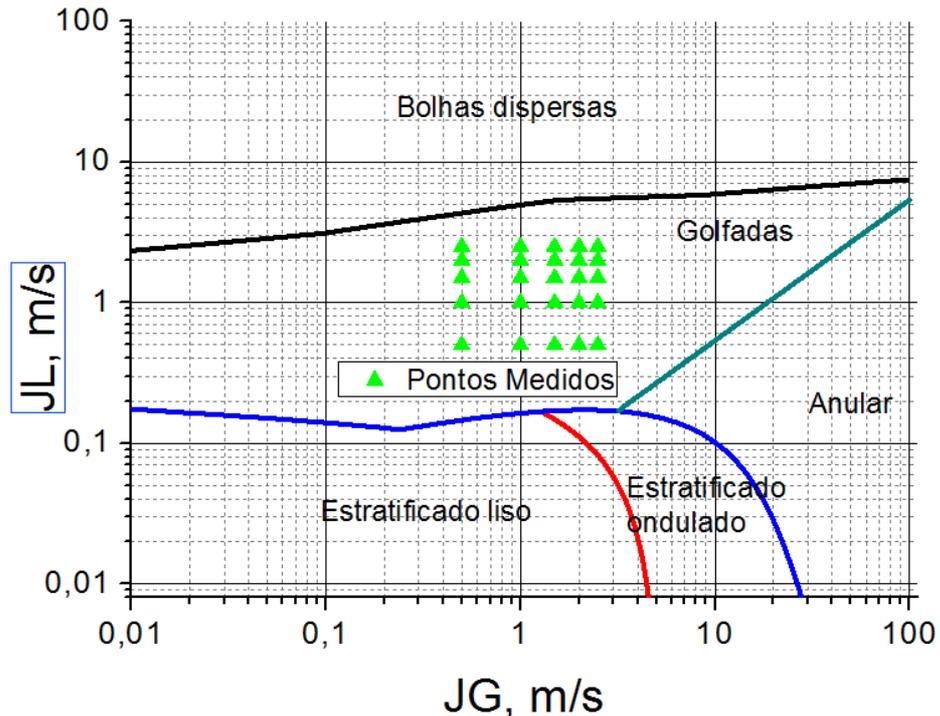


Figura 5: Apresentação de um mapa de fluxo para escoamento horizontal Fonte: DUKLER; YEHUDA, (1986)

O fluxo estratificado ocorre para taxas de escoamento de gás e líquido relativamente altas. Pode-se dizer que nesse tipo de escoamento as duas fases do líquido estão separadas por gravidade: o líquido fica no fundo do tubo e o gás fica no topo. Esse padrão de escoamento se subdivide em outros dois padrões:

- ✓ **Estratificado liso:** essa subdivisão ocorre para taxas de escoamento suave para gás e água (SHOHAM, 2006).
- ✓ **Estratificado ondulado:** com esse padrão de escoamento obtêm-se altas taxas de escoamento do gás e suaves ondas na superfície do líquido (SHOHAM, 2006)

O padrão intermitente de escoamento é caracterizado por alternar o gás e o líquido no tubo. Esse padrão é subdividido em golfadas e bolhas alongadas. A forma como ambos se comportam é semelhante, mas as bolhas alongadas ocorrem quando o líquido está calmo, livre de pequenas bolhas. Já, ao contrário, para altas taxas de escoamento de gás com pequenas bolhas sendo arrastadas é usado o termo “escoamento em golfadas” (SHOHAM, 2006).

O fluxo anular ocorre para taxas de escoamento de gás muito altas, e se pode perceber que no núcleo de escoamento do líquido pode haver pequenas bolhas sendo arrastadas. Observa-se na figura 4 que o filme de líquido em torno da parede

apresenta uma espessura maior no fundo do que no topo, mas isso irá depender da magnitude do volume do gás e da taxa de escoamento do líquido (SHOHAM, 2006).

As bolhas dispersas ocorrem quando se tem alta velocidade de líquido e baixa velocidade de gás (SHOHAM, 2006).

Para os padrões de escoamento vertical fica difícil estabelecer uma simetria, mas segundo Shoham a simetria nesse tipo de escoamento está mais em torno do eixo do tubo. Como o padrão de escoamento horizontal, o vertical também se subdivide em outros padrões como (SHOHAM, 2006):

- ✓ **Golfadas:** esse escoamento é simétrico em torno do eixo do duto; a melhor fase do gás é apresentada em forma de bala; o gás embolsado é denominado “Taylor Bubble” com um diâmetro igual ao diâmetro do duto.
- ✓ **Agitado:** é similar a golfadas mas muito mais caótico e sem limites claros entre as duas fases; isso ocorre para altas taxas de escoamento de gás.
- ✓ **Anular:** Como no caso do escoamento horizontal, em que o gás apresenta alta taxa de vazão e o líquido baixa taxa de escoamento, no escoamento vertical ocorre da mesma forma.
- ✓ **Bolhas dispersas:** Também é similar ao escoamento horizontal; é considerado escoamento homogêneo por apresentar alta taxa de vazão do líquido e também condições em que o gás é disperso com bolhas discretas.

2.3. MODELO DE VELOCIDADE DE TRANSLAÇÃO DA BOLHA

Para que se possa calcular a velocidade de translação da bolha alongada (U_T), ou bolha de Taylor é utilizada a equação 3 proposta por Nicklin (1961).

$$U_T = C_0 J + U_D = C_0 J + C_1 \sqrt{gD} \quad (3)$$

onde J é a velocidade da mistura e U_D é a velocidade de propagação das bolhas de Taylor em um meio estagnado (*drift, velocit*).

Bendixsen (1984) encontrou os coeficientes C_0 e C_1 que dependem dos números adimensionais de Froude (Fr) e do número de Reynolds (Re). Esses coeficientes são apresentados na tabela 1

Tabela 1- Coeficientes para a velocidade de translação da bolha -(BENDIKSEN, 1984)

Número de Reynolds	Número de Froude	C_o	C_∞
	$Fr_M \geq 3,5$	1,2	0
$Re_M \geq 1000$	$Fr_M < 3,5$	1,0	$0,54 * \cos(\theta)$
$Re_M < 1000$		2,0	$0,54 * \cos(\theta)$

Por definição, Fr é o número de Froude e Re o número de Reynolds; estas relações são apresentadas nas equações 4 e 5, onde μ_L é a massa específica e ρ_L é a viscosidade do líquido.

$$Fr = J/\sqrt{gD} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_L J D}{\mu_L} \quad (5)$$

2.4. SENSORES PARA MONITORAÇÃO DE ESCOAMENTO

O interesse por estudar a monitoração de escoamento motivou vários pesquisadores a desenvolver sensores (utilizando várias técnicas diferentes) que fossem capazes de detectar os diferentes fluidos que escoam em uma tubulação. Entre os grandes pioneiros a desenvolver um sensor utilizando eletrodos estão Taitel e Duckler, (1977). Esse sensor se prestava a caracterizar e monitorar o escoamento.

Em 1996, também utilizando a técnica por eletrodos, Elkow *et al.* (1996) fez um sensor com eletrodos helicoidais em torno de uma tubulação com 9,53mm de diâmetro; esse sensor se destaca, também, por ser uma técnica não intrusiva. Com essa mesma técnica por eletrodos, Tomoji Takamasa *et al* (2000) fez uso de um deslocamento do foco do laser (LFD) na parede externa de um tubo de acrílico para poder medir as bolhas interfaciais no escoamento bifásico vertical. Em 2011, Wuqiang Yang *et al* (2011) elaborou um sistema de escoamento multifásico com óleo, água e nitrogênio, e conseguiu obter resultados significativos utilizando oito canais com eletrodos.

O sensor de raio-x é muito aplicado na medição de vazão de fluidos tóxicos. Por esse motivo desperta interesse de muitos pesquisadores que buscam desenvolver um sensor, utilizando essa técnica para monitoração de escoamento multifásico. Hori *et al.* (1998) criou um tomógrafo de raio-x utilizando telureto de cádmio (CdTe) e conseguiu um desempenho excelente para visualização de eventos dinâmicos voltados a escoamento bifásico (água e ar). Clarijs *et al* (2003) escreveu

artigo onde mostra o projeto de uma geometria para geração de raios-X para medir quantidades relativas de óleo, água e gás. O princípio de medição se baseia na atenuação do sinal.

Importante citar também o trabalho do Remenieras *et al* (1996); ele realizou um estudo e mostrou área de concentração das bolhas em um escoamento bifásico; para obter tais resultados foi utilizada uma sonda ultrassônica; o princípio de medição desse sistema se explica pelo efeito Doppler. Mohd Hafiz *et al.* (2006) construiu um tomógrafo ultrassônico para reconstruir uma imagem do escoamento bifásico (água e ar); ele utilizou dezesseis pares de sensores e os sensores foram montados em volta do tubo experimental.

Dyakowski (1995) apresentou um artigo de revisão de várias técnicas de sensores já desenvolvidos, sensores como o de tomografia por impedância, técnicas utilizando capacitância, resistência, raios-x e raios gama, técnica de ressonância magnética e, por fim, a técnica utilizando sensor óptico.

Em 2008, Oriol construiu um sensor óptico para escoamento vertical; esse trabalho apresenta resultados referentes a um sensor óptico de monitoração multifásica em escoamento vertical e horizontal utilizando água, ar e corante. O corante foi injetado para possibilitar a medição das velocidades dos fluidos; inicialmente se pretendia detectar somente o corante (ORIOLE *et al.*, 2008).

O sensor relatado no artigo de Oriol é constituído por um emissor de luz branca, e possui fotorreceptores sensíveis ao comprimento de onda de 565nm; esse comprimento é próximo à máxima absorção de luz do corante, que é de 585nm (ORIOLE *et al.*, 2008). A figura 6 apresenta a foto do sensor.

Ao coletar os dados percebeu-se que o sensor não era sensível somente para o corante, mas também para água e ar, pois foi possível identificar, através do sinal coletado, a presença de água, de ar e do corante dentro da tubulação. Na presença de água o sensor óptico emite um sinal de 5V; quando a sonda óptica está submetida à presença de ar, o sinal do sensor diminui; quando o corante passa pela sonda óptica o sinal é absorvido. Na figura 7 é possível perceber que o sinal de detecção do corante é sobreposto ao sinal água e ar. Esses sinais também são fundamentados pela Lei de Beer-Lambert.

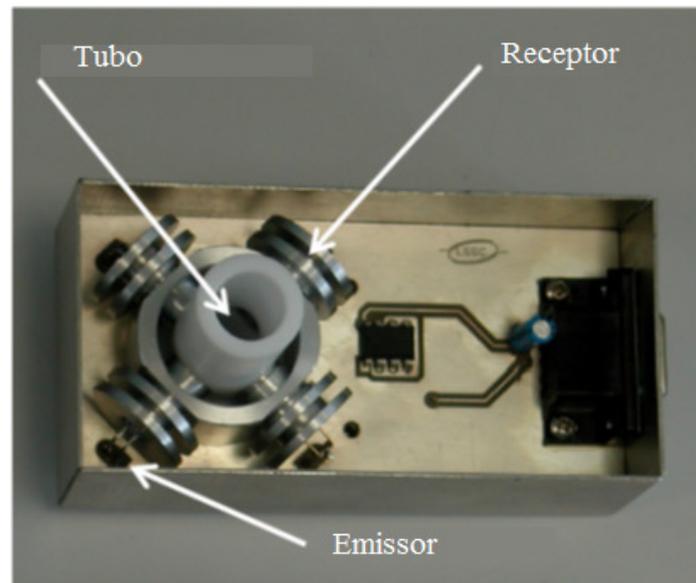


Figura 6: Sonda óptica para detecção de escoamento bifásico
 Fonte: Adaptado de Oriol *et al.*, (2008)

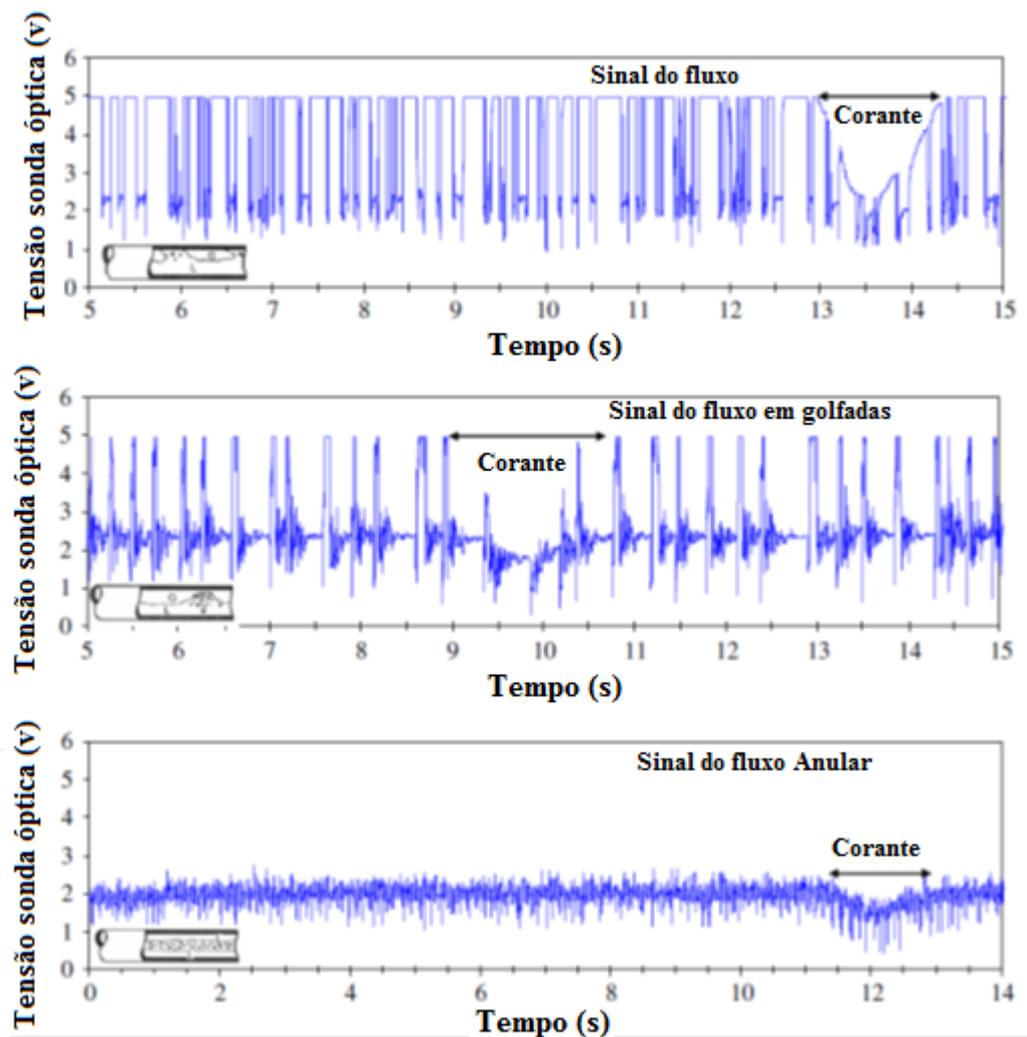


Figura 7: Sinal do sensor óptico medindo o fluxo multifásico
 Fonte: Adaptado de Oriol *et al.*, (2008)

Long *et al.* (2012) construiu um sistema óptico para medir os parâmetros de Taylor de gás-líquido em um tubo de 4mm de diâmetro. O fluxo de Taylor é caracterizado por bolhas de gás que quase preenchem a tubulação e são separadas por golfadas de líquido.

A figura 8 mostra que a parte de medição óptica é constituída de dois sensores ópticos, uma unidade de aquisição de dados e um computador. O emissor de luz é um laser de He e Ne comercial, de potência de saída de 5mW e 633nm; possui também, uma lente de configuração cilíndrica convexa, que foi utilizada para transformar o feixe circular em um feixe planar de 1mm de espessura. Dois feixes de luz são emitidos com a distância de 2 cm entre eles, utilizando um semi-espelho para separar os feixes; os dois feixes incidem sobre o duto de escoamento e com isso é possível medir a velocidade da bolha. A frequência de amostragem do sinal óptico foi fixado em 2 kHz. Nesse experimento foi utilizada também uma câmera de alta velocidade que foi adaptada para gravar o fluxo de escoamento de Taylor.

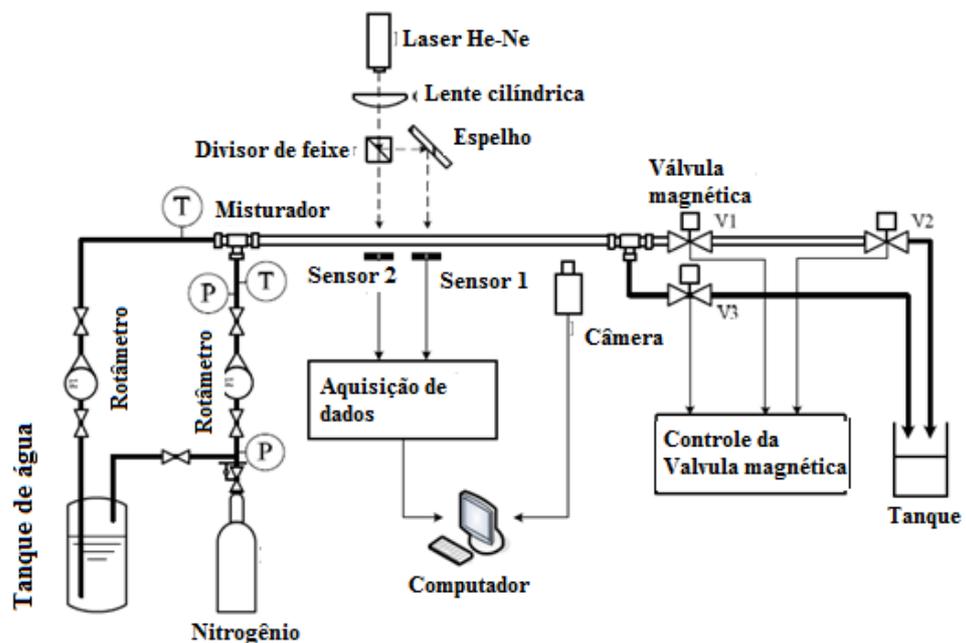


Figura 8: Técnica óptica para medir escoamento de Taylor
 Fonte: Adaptado Long *et al.*, (2012)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são discutidos os materiais e métodos utilizados para adquirir os resultados do projeto desenvolvido.

Para a realização deste projeto foi usinada uma peça adutora para alojar os emissores e receptores; também foi necessário desenvolver um circuito eletrônico. Para adquirir os dados do circuito eletrônico, foi utilizada a placa de aquisição de dados da *National Instruments* e elaborado um programa em linguagem Labview.

Dentro desse contexto, nesta seção primeiramente comenta-se sobre a peça adutora usinada em alumínio para alojar a fonte emissora e o receptor; em seguida, trata-se da parte eletrônica responsável pelo funcionamento do sensor. Para poder comparar os resultados e validá-los foi necessário utilizar uma planta didática de escoamento bifásico, que está descrita na seção 3.6. O sensor *wire mesh*, que está descrito na seção 3.4, foi utilizado para comparação dos dados com o sensor óptico, juntamente com uma câmera de alta velocidade que está descrita na seção 3.5.

3.1. CABEÇA SENSORA

A finalidade desta seção é expor as etapas necessárias desde o protótipo inicial até a peça adutora.

3.1.1. Protótipo inicial

No primeiro trabalho realizado para fundamentar esta dissertação, foi utilizado um protótipo com um tubo de acrílico transparente, onde foram instalados um emissor e um receptor infravermelhos como mostra a figura 9. Com isso, foi possível gerar e observar o primeiro resultado adquirido com o sensor óptico instalado no duto de escoamento fazendo passar pelo sensor uma bolha de ar.

Com o resultado obtido, percebeu-se a conveniência de implantar mais um emissor e receptor ficando o sistema com um par de emissores e outro par de receptores, que podem ser descritos também como dois canais ópticos (um canal óptico sempre contém um emissor e um receptor de luz infravermelha). Com os emissores estando afastados 5 cm um do outro e alinhados ao longo da tubulação obtém-se um feixe de luz emitido perpendicularmente à direção da tubulação. Com isso os receptores ficam alinhados com os seus respectivos emissores, na outra extremidade da secção da tubulação. Com esse protótipo foi possível adquirir a

primeira medição de velocidade utilizando a relação de distância pelo tempo; além desse procedimento foi necessário realizar um estudo sobre o sinal adquirido pelo sensor óptico e compará-lo com uma modelagem numérica utilizando as equações de Snell e Fresnel (BARONCINI et al., 2012)

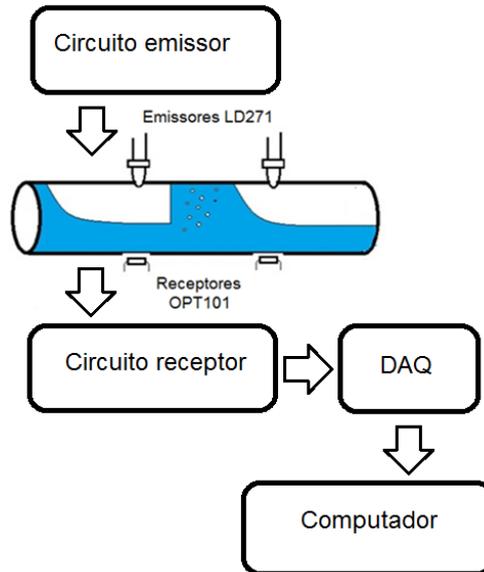


Figura 9: Diagrama de blocos do protótipo inicial
Fonte: Adaptado de Baroncini et al. (2012)

Também foi possível aplicar esse sistema de detecção (citado acima), baseado na absorção infravermelha, para decantação de areia em água, cujos resultados estão apresentados no apêndice I.

Após analisar os resultados adquiridos com a construção do protótipo, verificou-se a necessidade de obter um melhor alinhamento da fonte emissora com o receptor de luz, como também a necessidade de mais robustez, para que o sensor ficasse imune a qualquer forma de embate. A solução para isso foi projetar e fabricar uma peça adutora que fosse capaz de alojar o emissor e o receptor sem interferir no escoamento.

A obtenção da peça adutora possibilitou que três canais ópticos fossem instalados linearmente, afastados 5 cm um do outro.

3.1.2. Peça Adutora

Para obter um sistema robusto (imune a qualquer tipo de embate), prático, (que possa oferecer fácil acesso para a substituição do emissor e do receptor quando danificados) e que possa trazer resultado satisfatório, foi necessário fabricar um aparato em alumínio para alojar o LED e o fotodetector; com isso foi possível

obter maior alinhamento da fonte emissora com o receptor, como também foi possível que a distância de afastamento entre o emissor e o receptor ficasse igual para os três pontos de medição. Na figura 10 (a) e figura 10 (b) é possível ver o aparato mecânico, usinado em uma forma hexagonal, contendo 18 furos.

A praticidade deste projeto está na substituição dos LED's: caso um dos emissores ou receptores seja danificado, é possível substituí-lo por outro. Por isso foram projetados parafusos vazados por onde possam passar as conexões do LED. Para ajudar na vedação foi utilizado óring de 5 mm em cada LED, como mostra a figura 10(b).

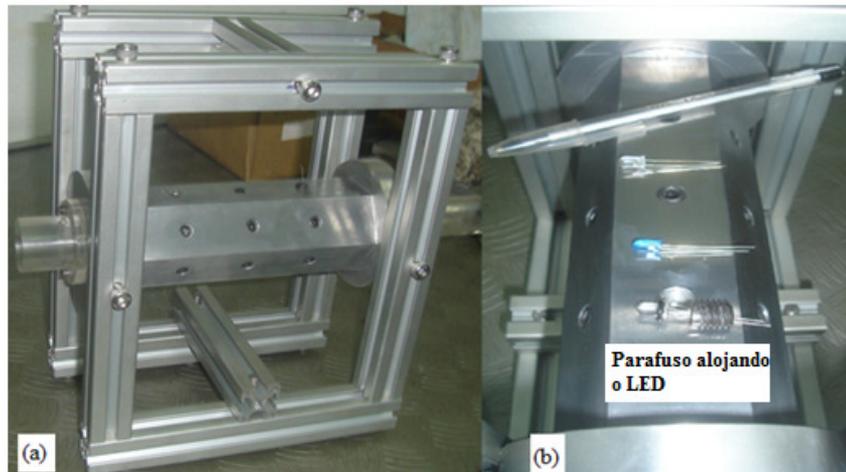


Figura 10: Em (a) se encontra a peça adutora usinada. Em (b) é mostrado o parafuso vazado alojando o LED

As conexões do emissor e do receptor passam por dentro do parafuso, como mostra a figura 10; o parafuso é rosqueado em um furo de 8 mm. No diâmetro de 6 mm, conforme indicado na figura 11, pode ser introduzido o emissor ou o receptor, pois ambos possuem as mesmas dimensões. Com isso, o que irá entrar em contato com o líquido da tubulação será apenas a parte superior do emissor e receptor utilizados neste projeto.

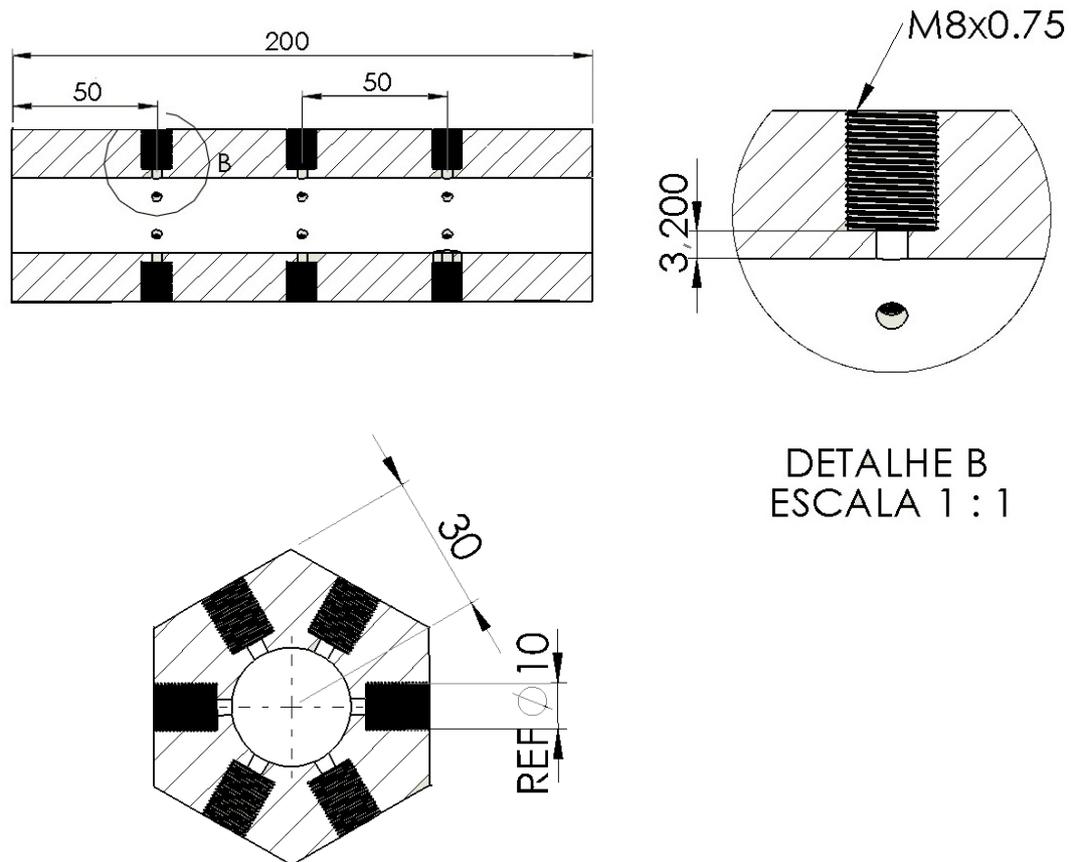


Figura 11: Imagem mostrando as dimensões da peça adutora.

3.2. CIRCUITO ELETRÔNICO DE MODULAÇÃO E DEMODULAÇÃO

Para o desenvolvimento do circuito eletrônico do sensor óptico, foi utilizado como referência o trabalho desenvolvido por Martelli *et al.* (2003). O circuito apresentado no trabalho de Virginia *et al.* (2012), uma evolução do circuito utilizado por Martelli *et al.*, também foi utilizado como referência para desenvolver este projeto final, pois ambos utilizam a mesma técnica de modulação e demodulação do sinal óptico. O circuito eletrônico do sensor é dividido em duas partes, circuito emissor e circuito receptor de sinal. O circuito emissor tem a finalidade de gerar uma senóide com um nível CC de 3V. O sistema de emissão possui três canais de emissão modulados em frequências diferentes. A razão de se usar três canais é poder medir a velocidade da bolha que passa pela tubulação; logicamente, dois canais seriam suficientes, mas foram utilizados três para obter maior precisão e resultados exatos. O emissor de luz utilizado é um LED LD271, com o comprimento de onda entre 940nm a 980nm.

A figura 12 apresenta um diagrama de blocos demonstrando o funcionamento do circuito eletrônico, onde primeiramente é mostrada a geração e emissão do sinal

de luz. A recepção do sinal é constituída de um fotodetector operando no infravermelho, que possui a responsividade espectral na banda do emissor de luz. Após o receptor de luz, foi colocado um capacitor para retirar o nível CC. Na sequência, utiliza-se um filtro passa-faixa com a finalidade de selecionar apenas a banda de frequência do emissor de luz que for desejada. Após a filtragem do sinal, é utilizado um retificador de precisão que converte o sinal modulado em um sinal CC. Esse sinal pode ser atenuado ou elevado, dependendo dos efeitos de absorção, refração e reflexão que ocorrem dentro do tubo. A figura 13 mostra a foto do circuito eletrônico.

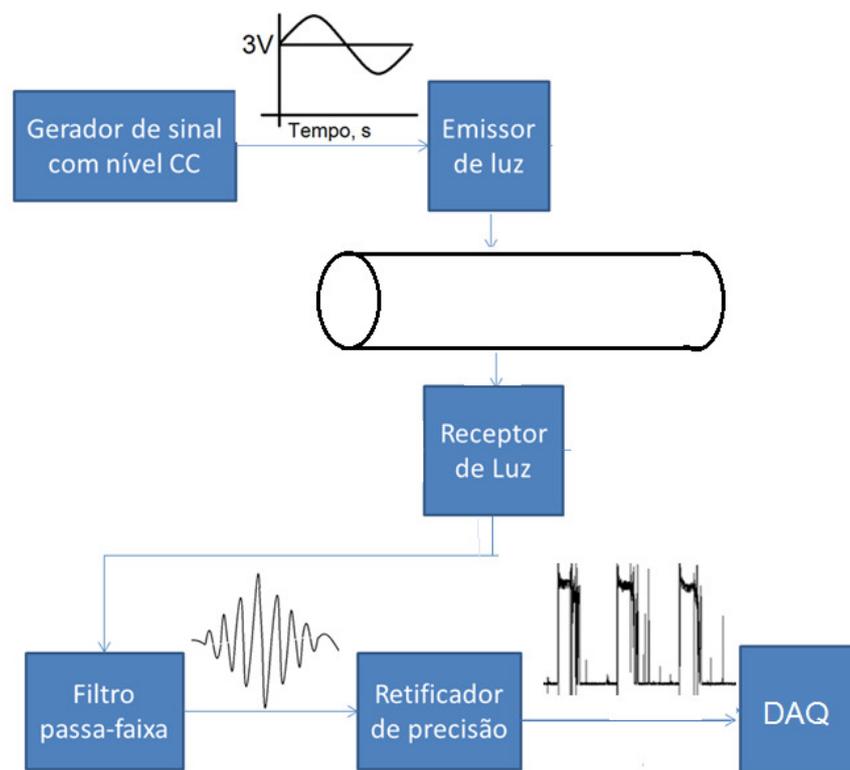


Figura 12: Diagrama de blocos explicando as etapas de funcionamento do circuito eletrônico do sensor óptico



Figura 13: Foto do circuito eletrônico desenvolvido para aquisição de dados do sensor óptico

3.3. PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os programas em Labview são chamados de instrumentos virtuais, ou VIs porque sua tela de operação imitam instrumentos físicos, como o osciloscópio e multímetros; o ambiente de desenvolvimento desses programas contém, também, um conjunto abrangente de ferramentas para aquisição, análise, demonstração e armazenamento de dados.

Com o Labview é possível construir uma interface de usuário, ou painel frontal, com controles e indicadores; controles são botões de pressão e outros mecanismos de entrada. Utilizando os mecanismos de entrada é possível construir uma interface com o computador valendo-se dos recursos do Labview, utilizando VIs e estruturas de controle.

O Labview pode ser usado para se comunicar com *hardware*, servindo-se da comunicação via RS232, RS485 e USB (INSTRUMENTS, 2010). Utilizando esse fundamento é que foi construído o *software* de aquisição de dados no Labview para poder adquirir os dados dos três canais de medição.

Na figura 14 está um fluxograma explicando os passos da programação para adquirir os dados do sensor. Primeiramente é necessário compilar a programação, como se encontra no fluxograma já citado. Após verificar que o *software* está ligado, é coletado o sinal através de uma VI de aquisição de dados, como é mostrado no gerador de gráficos apresentado na figura 15; caso o botão “salvar” esteja acionado,

os dados poderão ser salvos através de uma VI. Para que o programa funcione continuamente é necessário o uso de um *While Loop* que só para de funcionar quando a aquisição de dados for interrompida.

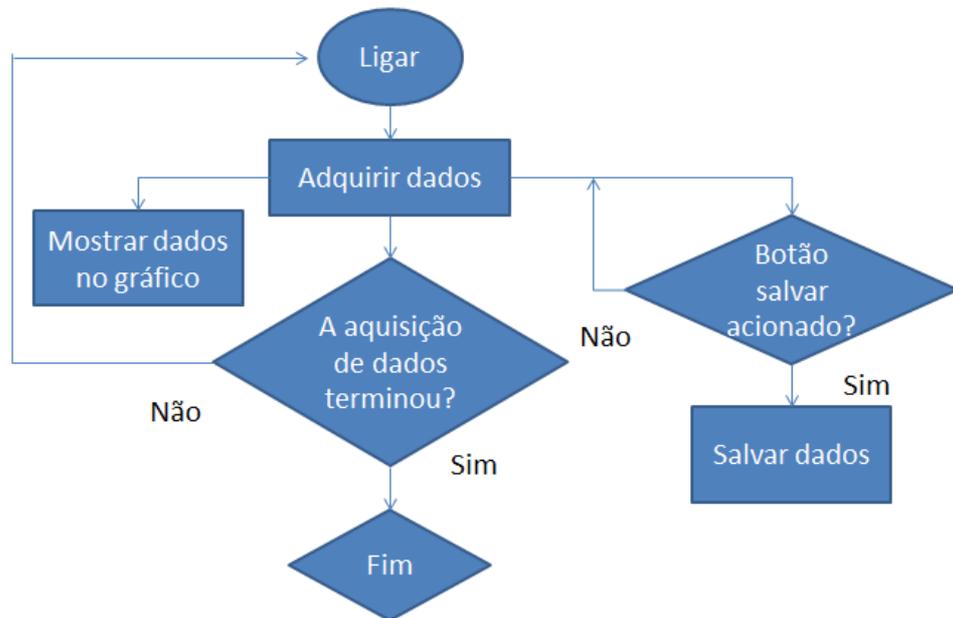


Figura 14: Fluxograma explicando o funcionamento do programa de aquisição de dados.

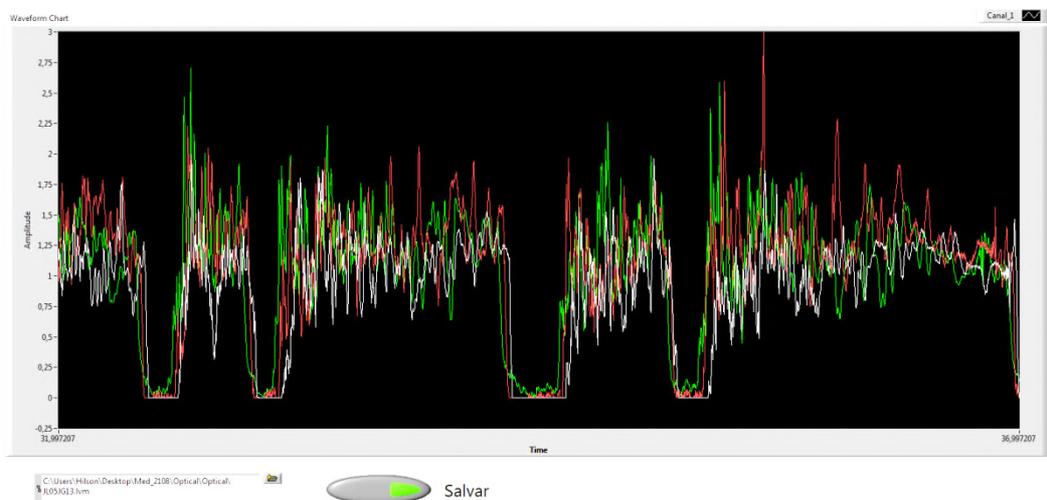


Figura 15: Imagem mostrando o sinal óptico adquirido pelo programa de aquisição de dados elaborado em linguagem Labview

3.4. SENSOR WIRE MESH

O sensor *wire mesh* permite realizar uma medição quantitativa da distribuição de fases de um líquido na secção transversal do tubo; também é possível medir a velocidade do escoamento e permite que seja feita a construção de uma distribuição em 3D. Prasser *et al.* (1998) apresenta um tomógrafo para alta velocidade; ele se

baseia na diferença de condutividade entre os arames; utiliza duas grades com 16 eletrodos cada e possui uma resolução de 1024 quadros por segundo.

Johnson (1984) patenteou um método para medir a quantidade de fluido em escoamento bifásico baseado nas diferentes condutividades elétricas dos líquidos escoantes; o aparelho apresentava uma malha de fios na horizontal e uma segunda na vertical, como mostra a figura 16. Os arames verticais apresentam uma distância predeterminada a partir dos arames horizontais; quando submetidos a uma determinada tensão é possível perceber a diferença de condutividade conforme o fluido que passa na tubulação.

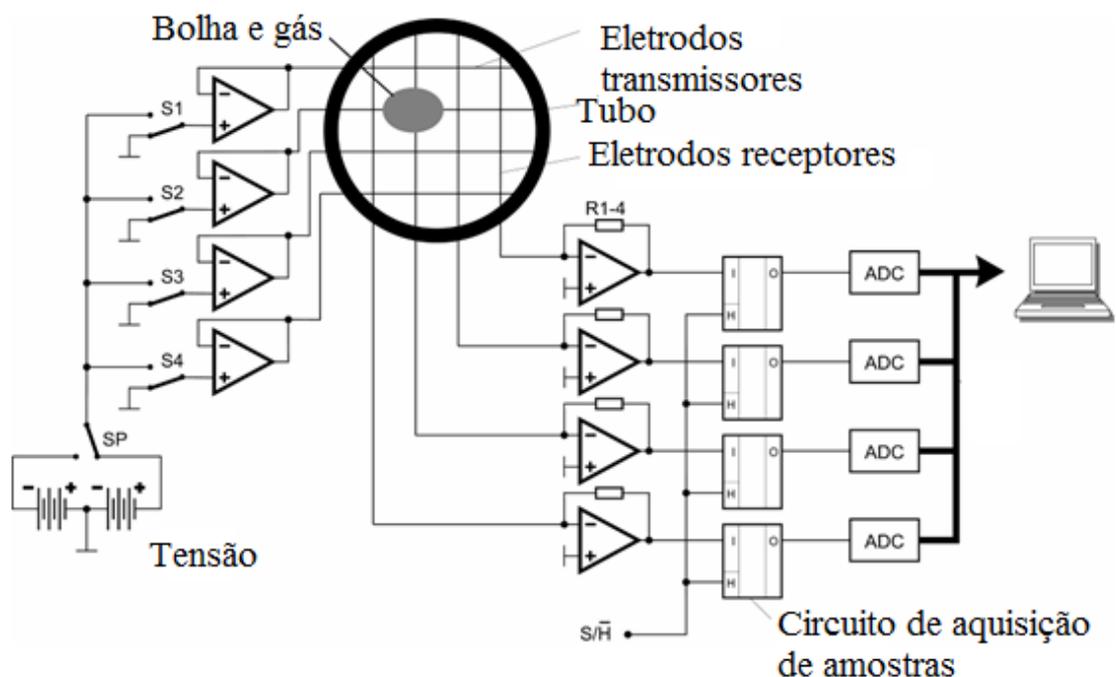


Figura 16: Imagem mostrando os componentes do sensor *wire mesh*
Fonte: Prasser (1998)

Na figura 16 exemplifica como funciona o sensor *wire mesh*. É utilizado, para apenas um sensor, um par de condutores, estando eles em planos diferentes e perpendiculares entre si; um condutor é o emissor e outro é o receptor. Os sensores funcionam por chaveamento: quando as chaves S1 a S4 são acionadas sucessivamente, é emitido um sinal quadrado. Depois que o sinal é emitido, o sinal adquirido conforme a condutividade do líquido, é amplificado e passa pelo módulo do circuito receptor e vai para o conversor analógico – digital e dessa forma faz-se possível a comunicação com o computador.

Além da técnica por condutividade utilizada pelo *wire mesh* também pode ser utilizada a técnica que mede a capacitância entre os eletrodos, que possui um

tempo de resposta muito rápido para altas velocidades de escoamento (DA SILVA; SCHLEICHER; HAMPEL, 2007).

O *wire mesh* é um sensor robusto, e é utilizado como padrão para várias medições feitas dentro do LACIT; isso ocorre porque é um sensor mais preciso e exato que os outros, pois a técnica que se aplica nele já vem sendo estudada e desenvolvida há muitos anos.

3.5. CÂMERA.

Para a realização dessa medição, contou-se com a ajuda de uma câmera de alta velocidade para adquirir as imagens do escoamento e comparar com os dados do sensor óptico e do *wire mesh*, além de fazer uma comparação com a superfície da bolha e o sinal adquirido pelo sensor óptico.

As imagens adquiridas pela câmera possuem um tamanho de 500X232 pixels; a quantidade de frames por segundo varia de acordo com a velocidade de escoamento. Para fazer o tratamento das imagens adquiridas foi utilizado um *software* em MatLab que transforma a imagem em tons de cinza em uma imagem gradiente (AMARAL et al., 2013).

A figura 17 mostra os segmentos de cauda de uma golfada com velocidade superficial de 1,0 m/s. A técnica por segmentação em escala de cinza é baseada em transformações de morfologia matemática não linear de processamento de imagem; as principais operações examinam a imagem por um padrão que se chama elemento estruturante, que define a forma e o tamanho da região que deve ser considerada. Depois disso é aplicado um algoritmo de detecção de *watershed* para detectar os contornos das bolhas, como mostra a figura 17 (AMARAL et al., 2013).

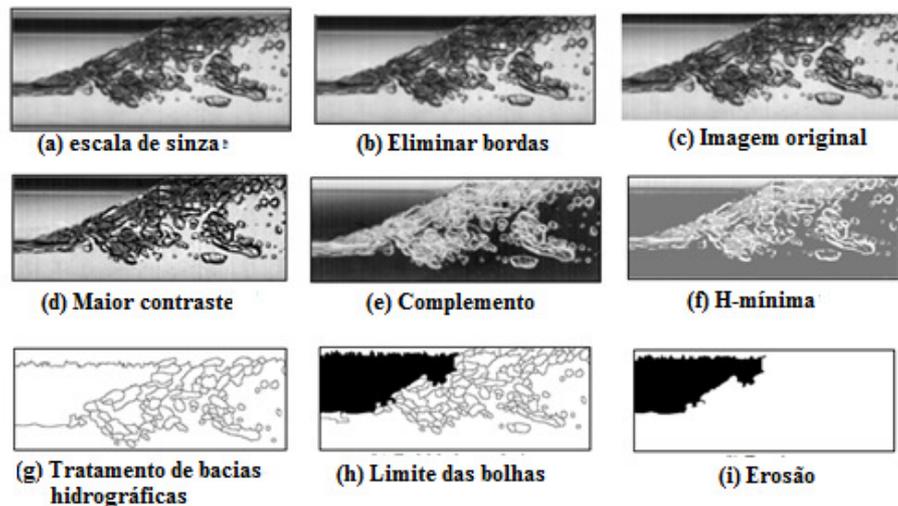


Figura 17: Imagem adquirida de uma bolha escoando no padrão de golfadas.
Fonte: Amaral *et al.*, (2010)

Para o tratamento de imagens das golfadas primeiro foi necessário cortar a borda superior e a borda inferior do tubo, como pode ser visto e comparado na figura 17 (a) e (b). Posteriormente a imagem passa por um filtro que a corrige quando o fundo é escuro, como pode ser observado na figura 17 (c); então a imagem filtrada é subtraída da imagem original, e, utilizando as duas técnicas é possível aumentar o contraste da imagem na figura 17 (d); depois as cores da imagem são invertidas, como mostra a figura 17 (e); em seguida os valores de intensidade que são abaixo do estipulado no artigo de Amaral (AMARAL *et al.*, 2013) são mostrados na imagem da figura 17(f). Na figura 17 (g) é usado o algoritmo de bacia hidrográfica baseado no trabalho de Kim (2003) que determina os contornos das bolhas; na figura 17(h) são encontrados os limites das bolhas de Taylor e na figura 17 (i) é retirada a erosão, ou seja, as pequenas bolhas geradas na cauda da golfada.

As imagens das golfadas mostradas nesta dissertação e na figura 17 é uma imagem panorâmica montada com junção de todas as fotos tiradas em alta velocidade. Maiores explicações sobre o algoritmo utilizado para a realização deste trabalho encontra-se no artigo de Amaral *et al.* (2012).

3.6. FUNCIONAMENTO DA PLANTA DE ESCOAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR ÓPTICO

Para a realização deste trabalho é utilizado o Laboratório de Ciências Térmicas-LACIT da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Foi utilizada a planta experimental, que se encontra esquematizada na figura 18. Essa planta mede

aproximadamente nove metros de comprimento e possui tubulações de acrílico com diâmetro interno de 26 mm; ela tem linhas independentes de ar e água, mas durante o processo experimental os dois elementos se mesclam através de um misturador; no final da planta o ar comprimido é liberado para a atmosfera e o líquido volta para um reservatório com capacidade de 100litros.

Na figura 18 está ilustrada a planta experimental de escoamento utilizada para adquirir os dados necessários para validação do funcionamento do sensor óptico; também está identificado o posicionamento de cada sensor para a realização do experimento. Utiliza-se um compressor para gerar ar comprimido para o sistema, e uma bomba hidráulica é acionada por um inversor de frequência; após comprimido, o ar é armazenado em um reservatório tipo pulmão.

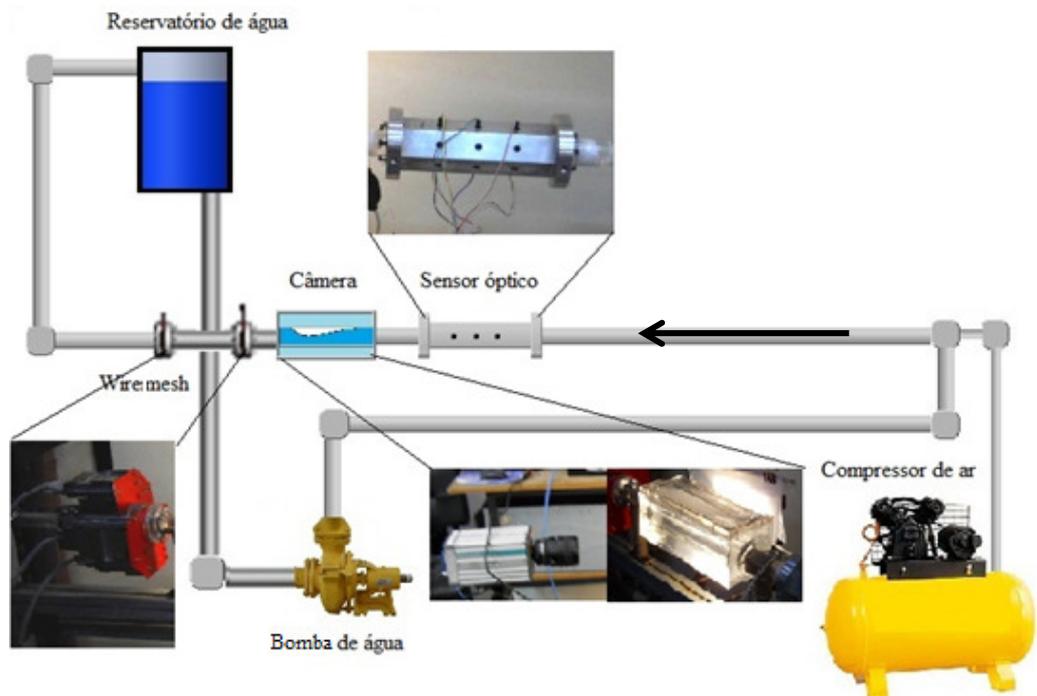


Figura 18: Desenho esquemático ilustrando o funcionamento e o posicionamento dos sensores.

Com isso tem-se a possibilidade de controlar a velocidade do líquido (J_L) e a velocidade do gás (J_G) e formar uma ampla variedade de padrões de escoamento que pode ir de J_G 0,5m/s e J_L 0,5m/s até J_G 2,5m/s e J_L 2,5m/s respectivamente. Como todo experimento precisa de um padrão de comparação, foi calculada a velocidade prevista por Bendiksen através dos valores obtidos pelos sensores instalados antes do misturador; esses sensores servem como referência para o ajuste das velocidades do líquido e do gás. Para medir a velocidade da água há um medidor de vazão mássica coriollis, modelo OPTIMASS/7300, antes do misturador e apresentam uma incerteza de 0,1% (KRHONE, 2000). Para calcular a velocidade do

gás, há um transdutor de pressão da Smar modelo LD302, com uma incerteza de medição de $\pm 0,1\%$ (SMAR, 2012).

Na figura 18 está ilustrado como foi montado o experimento. A câmera foi colocada entre o sensor óptico e o *wire mesh* por motivo estratégico para que a imagem e a velocidade adquirida da bolha sejam o mais próximo dos resultados dos sensores. Com essa montagem foi possível adquirir as imagens e compará-las com os resultados do sensor óptico. O posicionamento do sensor óptico e o do *wire mesh* também foram propositais, pois como o *wire mesh* é um sensor intrusivo, se colocado antes dos outros, a bolha poderia ser alterada.

4. SENSOR ÓPTICO

Para a realização das medições a serem relatadas nesta dissertação foi necessário seguir alguns passos, como também foi necessário realizar trabalho de caracterização e um estudo de modelagem numérica. Dentro desse contexto, neste capítulo serão apresentados resultados da caracterização do sensor para compreender os resultados obtidos pelo sensor e o estudo de modelagem numérica.

4.1. MODELAGEM NUMÉRICA

Para compreender os resultados que o sensor apresenta nesta dissertação, foi feita uma modelagem numérica realizada por Virginia Helena Baroncini e cedida gentilmente para este trabalho.

Para realizar a modelagem, foi construído um protótipo utilizando um tubo de acrílico com comprimento de 30 cm e diâmetro interno de 26 mm. Também é usado um par de emissores infravermelho (LD271) e um par de receptores infravermelho (OPT101), como mostra a figura 19. Esse protótipo está citado na seção 3.1.1, pois com o protótipo inicial é que foi possível realizar o estudo de modelagem numérica.

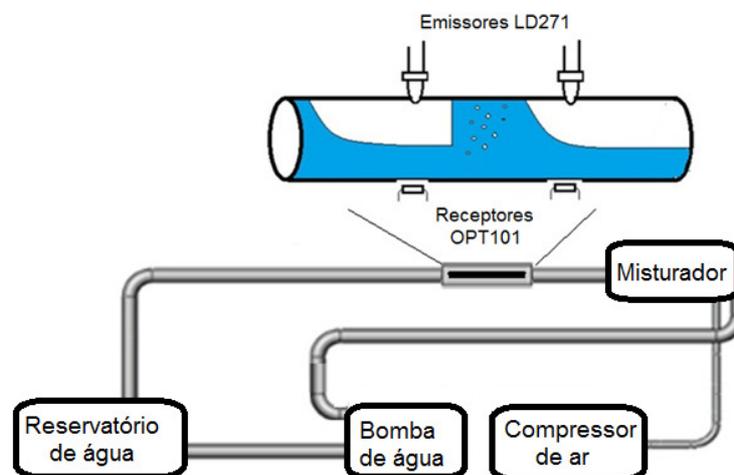


Figura 19: Protótipo utilizado para a realização da modelagem numérica
Fonte: Baroncini et al., (2012)

A figura 20 mostra o resultado obtido com o sistema implementado; o padrão utilizado para a aquisição de dados foi o de golfadas com velocidade do líquido (J_L) de 0,5 m/s e velocidade (J_G) do gás de 0,5m/s. O gráfico mostra que, quando há passagem de ar através do sensor, a amplitude do sinal é elevada e quando a amplitude do sinal diminui indica que há passagem de pistão de água e ocorre absorção do sinal infravermelho.

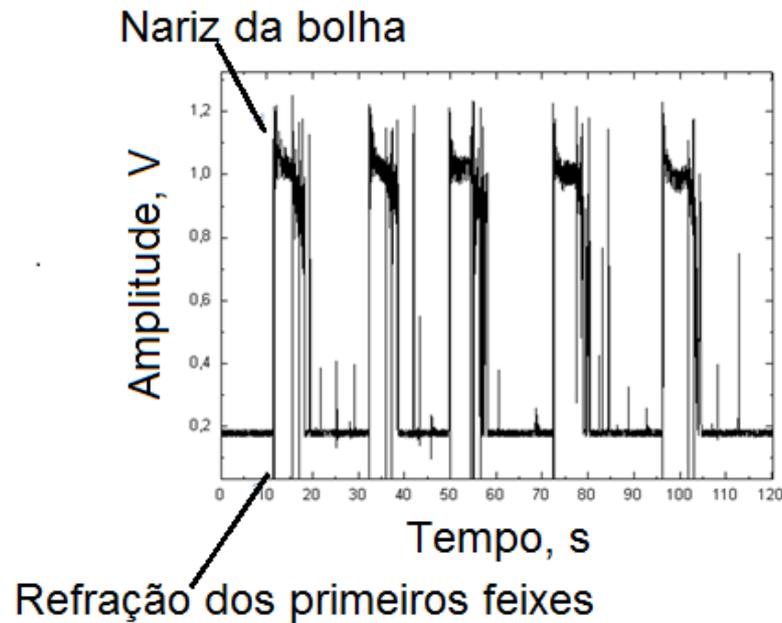


Figura 20: Sinal utilizado para fazer comparação com a modelagem matemática
Fonte: Baroncini *et al.*, (2012)

Com o resultado obtido, conforme a figura 20, foi possível fazer uma modelagem numérica baseada em óptica de raios utilizando diferentes ângulos de emissão. Para a modelagem numérica foi necessário fazer um algoritmo de programação utilizando o *software* MATLAB, e com esse algoritmo aplicar a Lei de Snell, as equações de Fresnel e a lei de Beer-Lambert.

Na figura 21 estão apresentados os raios transmitidos; observa-se que há uma semelhança do nariz da bolha com uma semicircunferência e que o comportamento dos raios ao atingirem a bolha é semelhante ao efeito de lentes; assim, o feixe incidente pode sofrer reflexão total, dependendo da posição e do formato da bolha. Para essa simulação é determinada a intensidade do sinal igual a 1, como se pode perceber na figura 21.

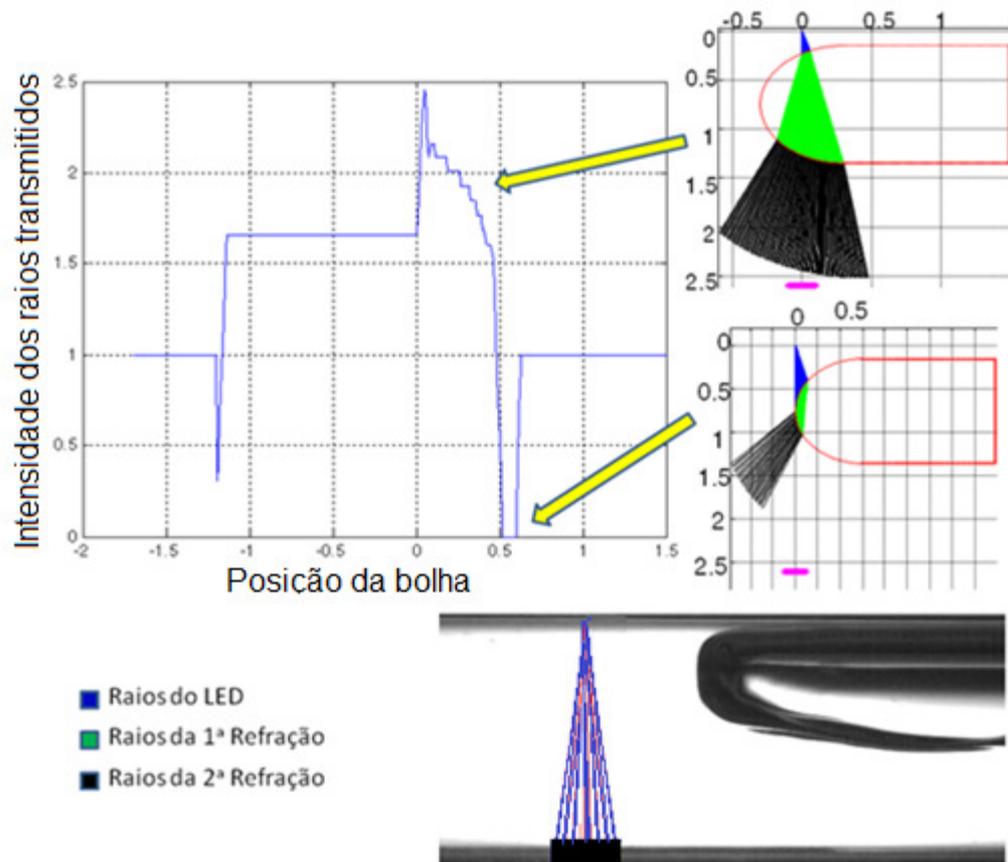


Figura 21: Comparação dos raios refratados com o sinal adquirido.
Fonte: adaptado de Baroncini et al., (2012)

4.2. CARACTERIZAÇÃO

O trabalho de caracterização foi feito para poder compreender os resultados apresentados pelo sensor óptico, que estão apresentados na tabela 3 e na tabela 4 na página 65, e os efeitos ópticos que ocorrem dentro da peça adutora. Esses resultados de caracterização foram realizados para verificar comportamento do sinal do sensor para as diferentes posições do emissor e do receptor.

4.2.1. Experimento de caracterização 1

A metodologia desse experimento consiste em adquirir dados utilizando o emissor de luz na parte superior da peça adutora e o receptor na parte inferior. Para esse procedimento foi utilizado o circuito eletrônico citado na seção 3.2.

Na figura 22 é apresentado o esquema montado para obter os resultados de caracterização do sensor óptico; nota-se que o LED está na parte superior e o fotodetector na parte inferior.

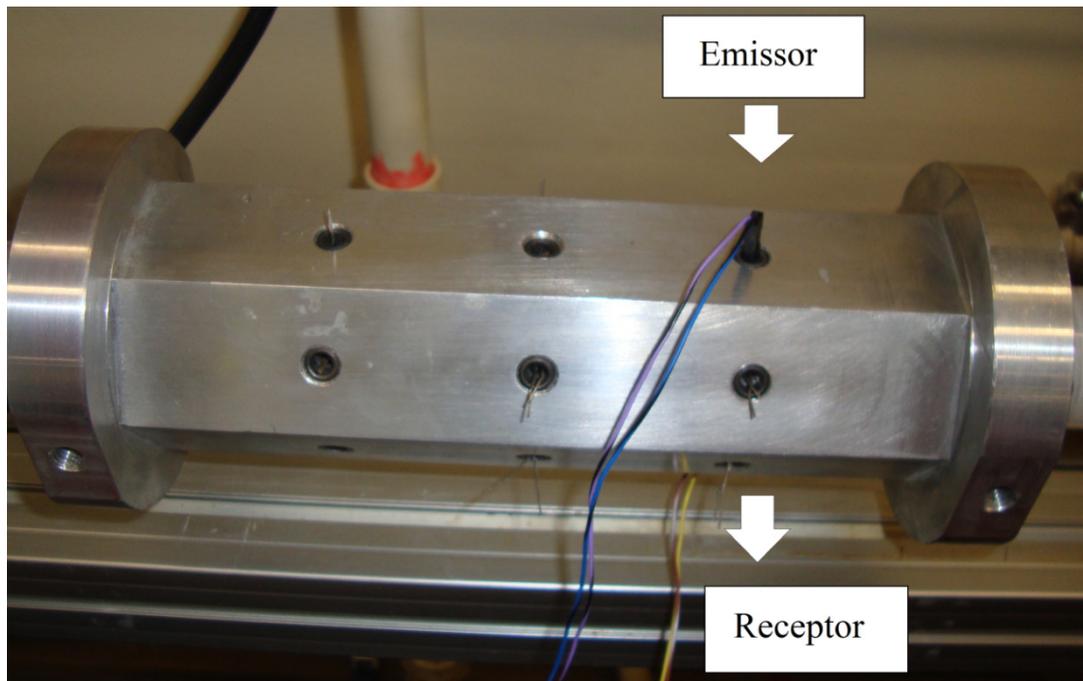


Figura 22: Medição de absorção de luz utilizando a peça de alumínio

Pode-se perceber no gráfico da figura 23 que o mínimo de água presente dentro do tubo já é o suficiente para que o sinal seja atenuado significativamente, mas é perceptível, também, que o sinal só é atenuado completamente quando o tubo está totalmente cheio. Dessa forma, percebe-se que na faixa de medição de 30 ml de água até 190 ml ocorre uma flutuação do sinal; essa flutuação ocorre por causa dos fenômenos de absorção, refração e reflexão. Para a realização deste experimento foi utilizada uma seringa graduada onde a água é inserida aos poucos. A cada quantia de água colocada, esperava-se cerca de 1 minuto até a superfície da água se estabilizar e não apresentar movimento; após estabilização do líquido, foi procedida a medição por cerca de 10 segundos para cada ponto e, com esses resultados, foi feita uma média aritmética simples para cada ponto. Com esses dados foi montado o gráfico que está na figura 23.

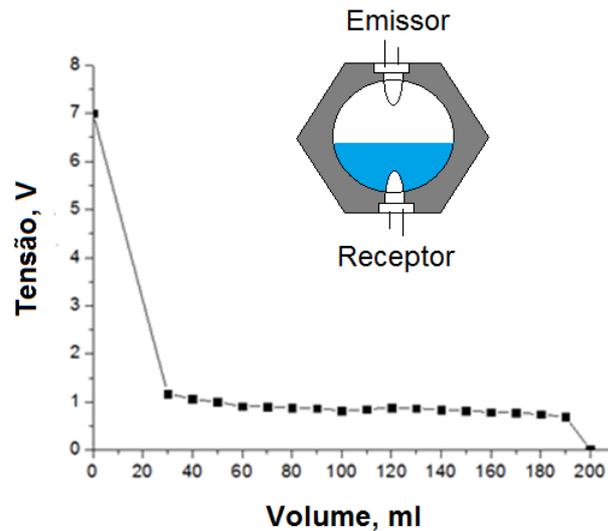


Figura 23: O gráfico apresenta o resultado da caracterização realizada dentro da peça adutora.

4.2.2. Experimento de caracterização 2.

Para a realização desse experimento foi utilizado o circuito eletrônico da seção 3.2. A metodologia aplicada nessa caracterização consiste em utilizar uma caixa de acrílico com o emissor fixado na parte superior e o receptor na parte inferior; também foi utilizada uma seringa graduada para, gradativamente, inserir água no recipiente.

Esse experimento é realizado para estudar se realmente existe a reflexão e se os dados apresentados na seção 4.2.1 estão corretos. Dessa forma, ao aumentar gradativamente o volume de água dentro da caixa de acrílico, haverá menos reflexão do que na peça de alumínio, mas os resultados são bem semelhantes. O diagrama de blocos da figura 24 mostra como foi montado o experimento. O procedimento utilizado na realização do experimento foi o mesmo utilizado no capítulo 4.2.1, mas foi colocada uma régua dentro da caixa para comparar a atenuação do sinal com a altura do líquido; essa caixa apresenta as dimensões de 20 cm de comprimento, 4 cm de altura e 10 cm de largura.



Figura 24: Fluxograma do experimento dentro da caixa de acrílico

Na figura 25 percebe-se que o mínimo de água presente dentro da caixa é o suficiente para atenuar o sinal significativamente. Após a coluna de água alcançar 5 mm, nota-se que o sinal vai atenuando gradativamente e conforme a água se aproxima do emissor o sinal sofre maior atenuação, como pode ser visto em 35 mm. Dessa forma fica evidente a absorção de água na região do infravermelho, como já foi mencionado no capítulo 2.1.4. Observa-se que quando se aproxima de 35 mm o sinal sofre uma maior absorção pois o líquido está muito próximo do emissor.

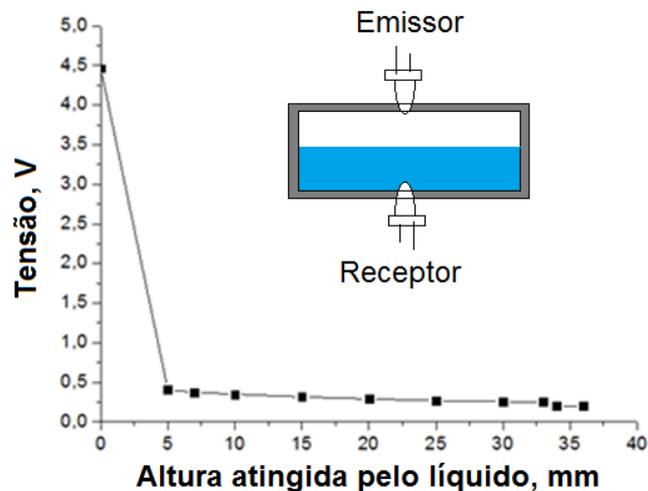


Figura 25: Resultado da medição na caixa de acrílico.

4.2.3. Experimento de caracterização 3.

Para a realização deste experimento foi utilizado um sinal contínuo utilizando uma fonte de tensão. O sinal recebido pelo fotodetector vai direto para DAQ. Esse resultado é obtido da seguinte forma: em uma caixa de acrílico, medindo 5cmx5cmx8cm, foi colocado um emissor infravermelho em um lado da caixa e o receptor no lado oposto a uma altura de 5 cm, como mostra a figura 26. Foi deixado

escorrer a água lentamente, até preencher toda a caixa, para poder observar o que poderia acontecer com o sinal.

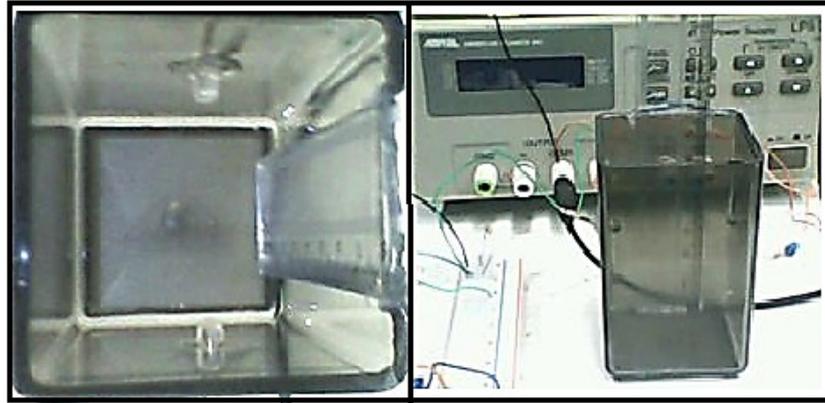


Figura 26: Imagem do experimento para adquirir resultados referentes ao espelho de água

São consideradas como condição inicial para o ensaio a caixa vazia e com o nível de tensão próximo de 1,5V. Esperava-se que, à medida que a água fosse preenchendo a caixa de acrílico, o nível de tensão apenas diminuísse, pois se esperava ver apenas a absorção da água; não era esperado que após um determinado tempo voltasse a haver um pico de tensão, como mostra a figura 27; esse experimento foi repetido três vezes para confirmar o resultado.

A figura 27 mostra o resultado obtido no experimento; esse resultado mostra que existe uma reflexão muito grande da água; isso ocorre também pelo fato de que o LED possui uma abertura numérica e, de acordo com o nível em que o líquido está, o feixe de luz será mais refletido até o receptor. Nota-se que os resultados são bem parecidos. Esse resultado acontece porque, à medida que o nível da água vai subindo, o espelho formado pela sua superfície atinge o campo de maior incidência da abertura numérica do LED; conseqüentemente, haverá uma reflexão um pouco maior. Além da reflexão é possível perceber também absorção da água.

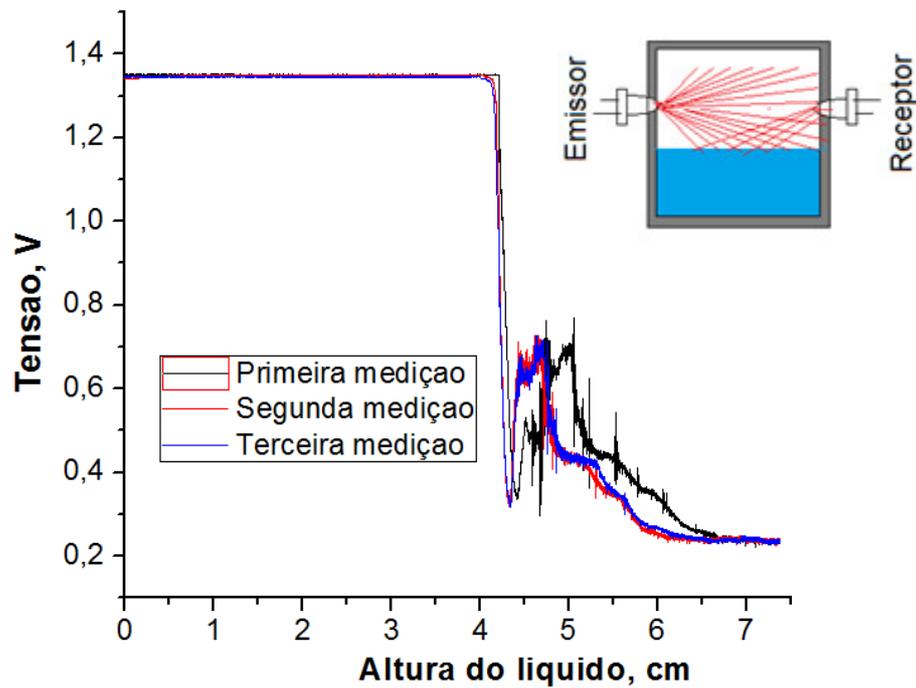


Figura 27: Resultado do experimento do espelho de água

4.2.4. Experimento de caracterização 4

A realização desse experimento consistiu em repetir o mesmo procedimento dos capítulos anteriores, mas ao invés de utilizar uma caixa de acrílico utilizou-se a peça adutora.

Para a aquisição dos dados não foi utilizado um sinal modulado, ou seja, não foi utilizado o circuito desenvolvido, mas optou-se por utilizar um sinal CC direto da fonte de alimentação.

De acordo com o gráfico da figura 28, é possível entender que no estágio inicial, ou seja, quando não há água no tubo, o sinal está em aproximadamente 1,43V; quando se colocam 30 ml de água, a mesma atinge 2 cm de altura no cilindro na posição horizontal e curiosamente o sinal é elevado minimamente mas isso é de grande importância, pois foi possível identificar a influência da tubulação no resultado final. Além de se ter o fenômeno de absorção, reflexão e refração da água, tem-se também a reflexão da peça de alumínio. Observa-se que em 15 mm de altura do líquido, como mostra a figura 28, o sinal sofre absorção, mas nota-se que em 14 mm novamente o sinal é elevado; isso ocorre porque a água atingiu o ângulo de abertura numérica do LED, que tem maior incidência de luz. Esperava-se que, depois que a água encobrisse o LED, a superfície da água se tornasse um espelho e

houvesse uma nova elevação do sinal, mas o que aconteceu foi apenas absorção do feixe de luz.

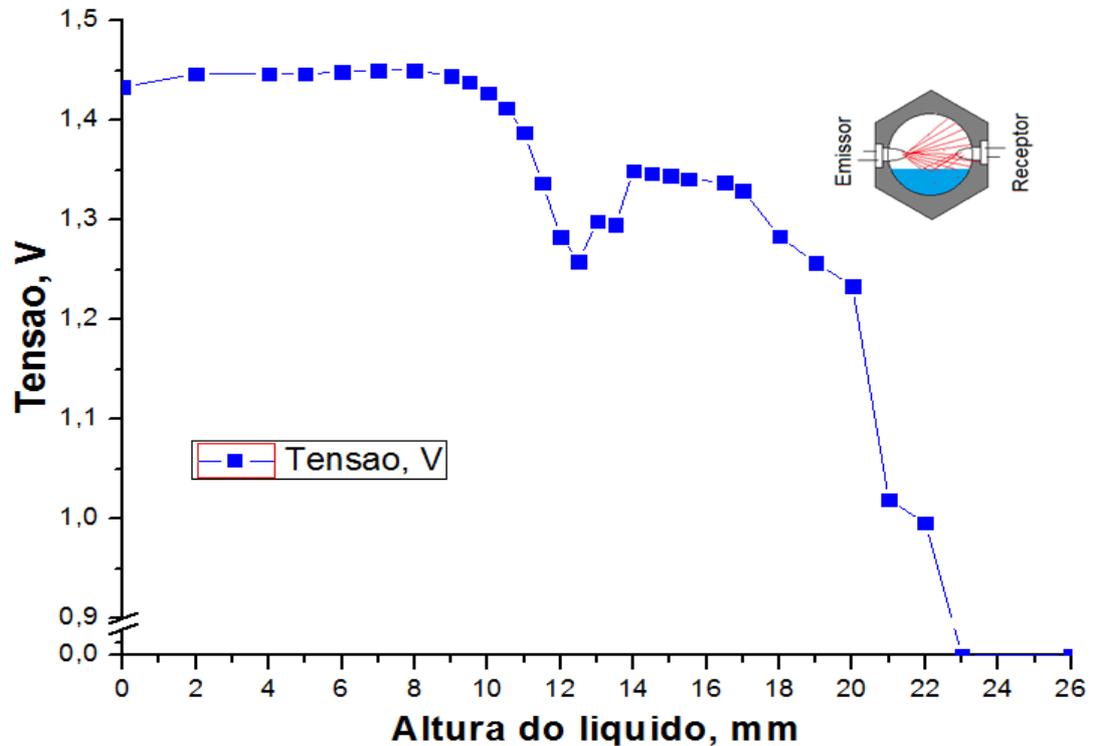


Figura 28: Caracterização do sinal em função da altura do líquido

4.2.5. Experimento de Caracterização 5

Para aquisição dos dados trabalhados neste capítulo foi utilizada a peça adutora (já descrita). O procedimento para adquirir tais dados foi igual aos anteriores, mas aqui foi utilizado o circuito feito para o sensor óptico e, além disso, foram utilizados os três emissores e receptores dos canais ópticos do circuito eletrônico.

Os emissores foram ajustados em frequências diferentes e colocados no protótipo mecânico conforme mostra a figura 29.

Como nos experimentos anteriores, esperava-se que os três canais atenuassem o sinal ao mesmo tempo, mas o resultado apresentado é diferente, pois absorção, refração, reflexão e o efeito de lente causado pela água são diferentes para cada um dos experimentos. Percebe-se que o emissor de luz, quando está na parte inferior, nos primeiros pontos de medição, demora mais para atenuar, mas ele chega a zero volt antes dos outros canais, ao 10 mm, como mostra a linha verde da figura 30. O canal que está com um LED na diagonal superior (linha da cor vermelha

na figura 30), e o outro com o LED na parte superior (linha da cor azul na figura 30) apresentam comportamento semelhante, a única diferença é que se pode perceber menor absorção no canal que está na diagonal.

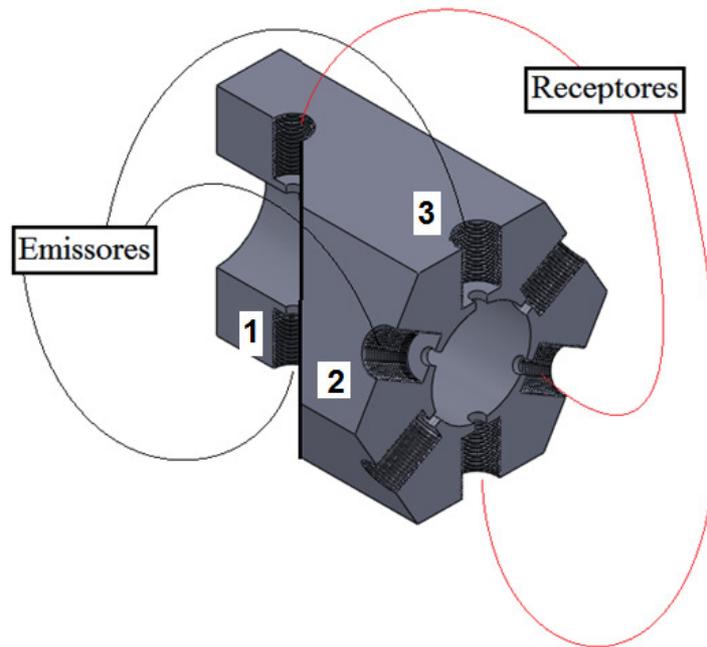


Figura 29: Imagem mostrando a posição dos emissores e receptores para a realização do experimento utilizando os três canais.

Os resultados apresentados neste capítulo mostram a grande influência dos fenômenos ópticos presentes nas aquisições de dados. Esse estudo tem uma grande relevância porque até o momento não se consegue determinar o que é refração, reflexão ou absorção através do sinal coletado. Mas mesmo com a dificuldade de interpretar o sinal óptico, ao comparar os resultados adquiridos com os resultados da câmera pode-se perceber certa semelhança.

Com os resultados de caracterização adquiridos pode-se perceber a presença da lei de Beer-Lambert, como também a presença de refração e reflexão. A Lei de Beer-Lambert diz que a absorção é exponencial, depende da intensidade da luz aplicada e espessura do material absorvedor. Tanto os resultados adquiridos na peça adutora como os resultados adquiridos na caixa de acrílico, apresentaram um resultado que tende a ser exponencial. Nota-se que na peça adutora houve maior flutuação do sinal, porque há maior reflexão no interior da peça.

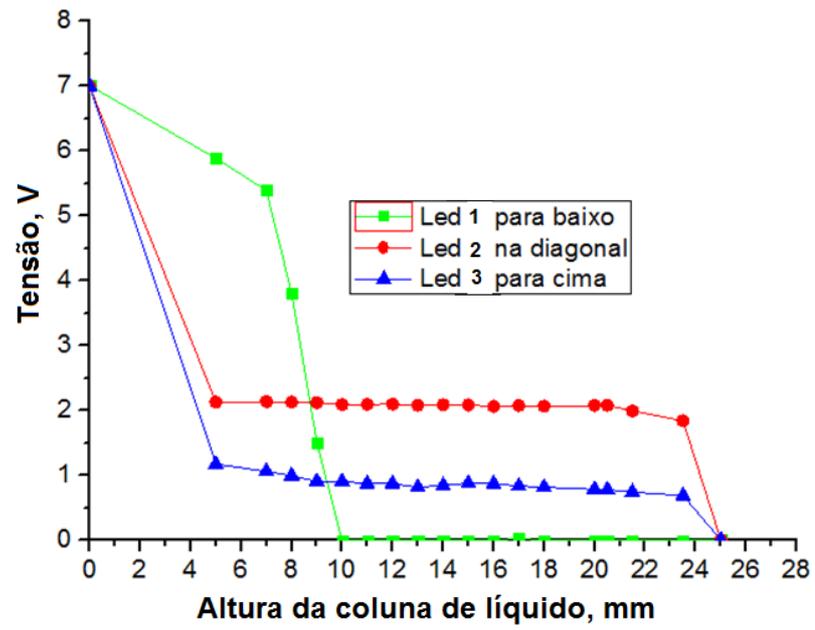


Figura 30: Resultado de caracterização em função da altura do líquido utilizando os três canais

5. RESULTADOS

A finalidade deste capítulo é mostrar os resultados adquiridos pelo sensor, suas limitações e também sua resposta para variadas velocidades de gás líquido. Não foram inseridos todos os resultados de velocidade neste capítulo, o restante está no apêndice II. São apresentados os resultados obtidos de acordo com a metodologia já explicada na seção 3. Os dados adquiridos pelo sensor foram validados utilizando a câmera de alta velocidade e o sensor *wire mesh*.

5.1. MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

Para conseguir os dados de velocidade, foi necessário instalar a câmera e o *wire mesh* bem próximos do sensor óptico, como mostra a figura 18 da seção 3.6; com isso foi possível detectar a diferença de sensibilidade entre os sensores.

Na figura 31 encontra-se o mapa de escoamento com as medidas feitas no experimento; nele é possível perceber que todos os dados adquiridos se referem a golfadas.

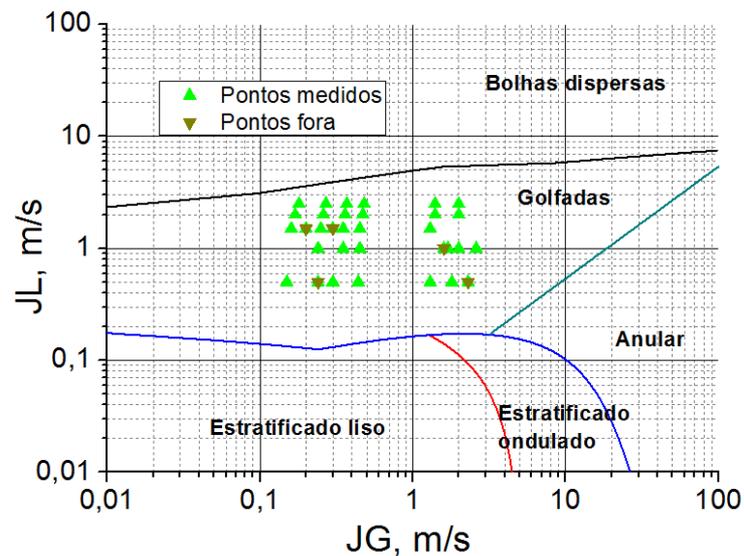


Figura 31: Mapa de escoamento para as medidas realizadas

A medição de velocidade do sensor óptico é adquirida através de três canais (cujo funcionamento já foi mostrado no capítulo 3.2) para que se possa obter uma média da velocidade e conseguir obter resultado exato. Na figura 32 é apresentado o gráfico para ver quais pontos não ficaram de acordo com a velocidade de Bendiksen; essa medida de velocidade foi obtida através da diferença de tempo entre o canal 1 e 2. Foram observados oito pontos de medição fora da velocidade

de Bendiksen; isso ocorreu por limitação do sensor óptico na detecção de golfadas para as velocidades de escoamento ajustadas. Posteriormente no mesmo gráfico, é observado que houve diminuição na dispersão dos pontos referente as medições de velocidade entre os canais 1 e 3.

Na figura 32 também é apresentado os resultados referente as velocidades entre os canais 2 e 3; nota-se que os pontos estão bem semelhantes aos dados de velocidade dos outros canais.

O resultado de velocidade entre os canais pode variar, pois a bolha se modifica durante o escoamento; foi feita a medição com os três canais para obter uma média e reduzir o erro. Ao verificar o resultado da média de velocidade percebeu-se que de todos os pontos medidos com o sensor óptico apenas cinco pontos ficaram fora da velocidade prevista por Bendiksen. Fazendo uma análise de porcentagem (foram observados 33 pontos), é possível afirmar que apenas 15% dos pontos não ficaram dentro da velocidade prevista por Bendiksen.

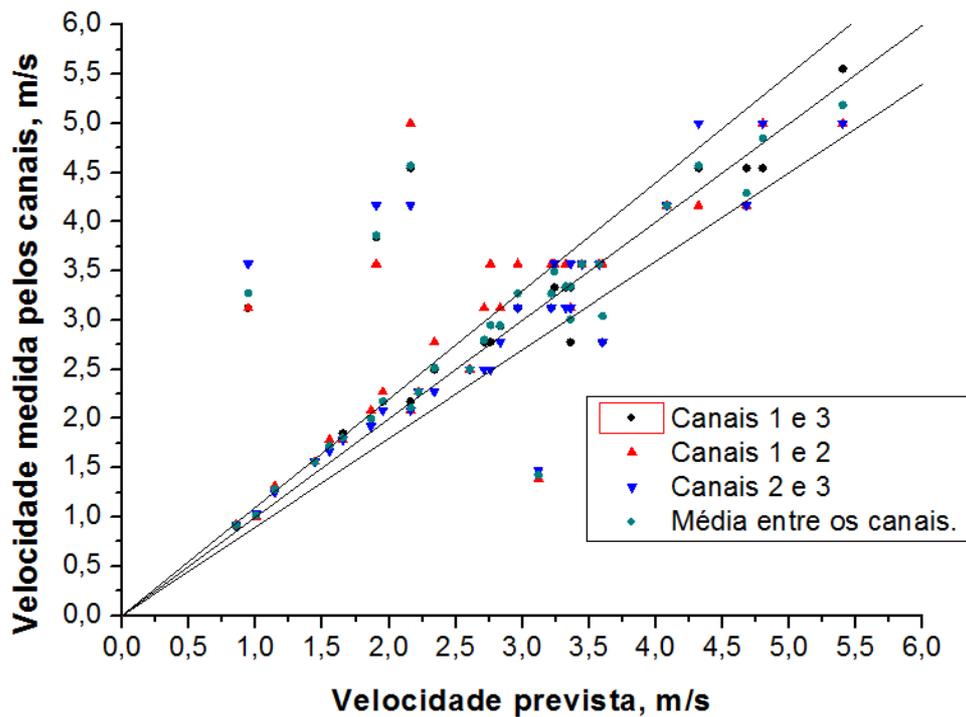


Figura 32: Resultado da medição de velocidade entre os canais.

Tabela 2: Tabela que indica os melhores pontos de medição com o sensor óptico.

Pontos que ficaram de acordo com a velocidade de bendiksen		Pontos que não estão de acordo com a velocidade de bendiksen	
J _G	J _L	J _G	J _L
0,15	0,5	0,24	0,5
0,3	0,5	2,3	0,5
0,44	0,5	1,6	1
1,3	0,5	0,2	1,5
1,8	0,5	0,3	1,5
2,3	0,5		
0,24	1		
0,35	1		
0,45	1		
1,6	1		
1,7	1		
2	1		
2,6	1		
0,16	1,5		
0,25	1,5		
0,2	1,5		
0,35	1,5		
0,3	1,5		
0,45	1,5		
1,3	1,5		
0,17	2		
0,26	2		
0,36	2		
0,47	2		
1,4	2		
2	2		
0,18	2,5		
0,27	2,5		
0,37	2,5		
0,48	2,5		
1,4	2,5		
2	2,5		

O gráfico da figura 33 apresenta a comparação dos resultados de velocidade de translação das bolhas utilizando *wire mesh*, câmera e o sensor óptico. Com esse resultado foi possível perceber que os sensores possuem certa correlação em comum, mas muitos pontos não estão dentro dessa correlação; isso ocorre por causa da limitação de cada técnica de monitoração para tal medida, mas mesmo assim os sensores possuem um padrão nas medições. Observa-se que para medições com a velocidade do gás baixa obtêm-se os resultados mais dispersos. Esses resultados dispersos estão apresentados dentro do triângulo vermelho.

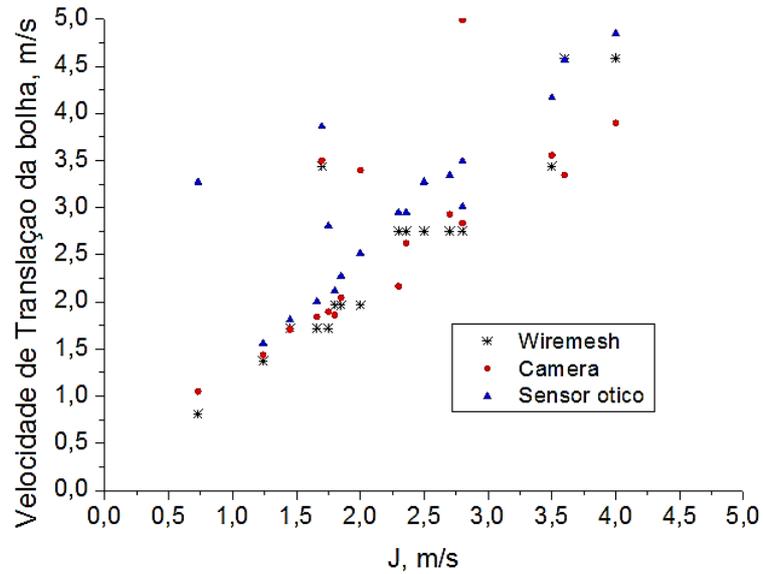
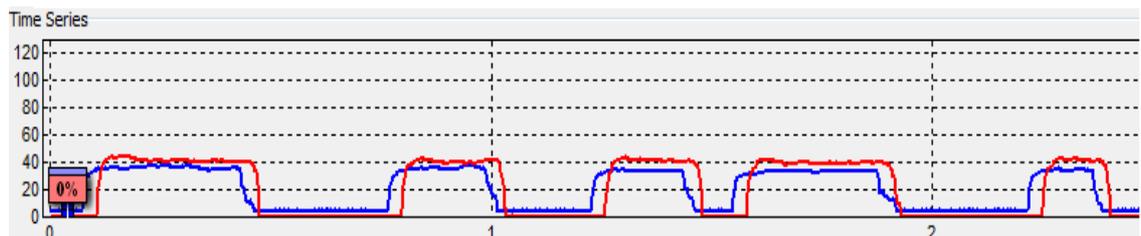


Figura 33: Gráfico de comparação de velocidade de translação da bolha utilizando *wire mesh*, câmera e sensor óptico

5.2. SENSOR ÓPTICO E *WIRE MESH*

Para validar os resultados do sensor óptico é importante fazer uma comparação do sinal do sensor óptico com o sinal do *wire mesh*. Na figura 34 é apresentado o sinal do *wire mesh* para um escoamento J_L 0,5 m/s e J_G 0,44m/s.



**Figura 34: Medição feita com o sensor *wire mesh*.
Fonte: Software elaborado por Eduardo Nunes dos Santos**

Nota-se que o sinal do *wire mesh* é mais limpo, não tem tantas oscilações geradas pela golfada.

As mesmas velocidades de escoamento utilizadas no *wire mesh* foram utilizadas no sensor óptico para fazer uma comparação do sinal; na figura 35 se encontra o sinal do sensor óptico; nota-se que existe uma grande ocorrência de perturbações no sinal, mas essas perturbações (que serão discutidas posteriormente) trazem informações importantes sobre a superfície da bolha.

Os dados adquiridos não estão sincronizados, mas são gerados com as mesmas velocidades de gás e de líquido.

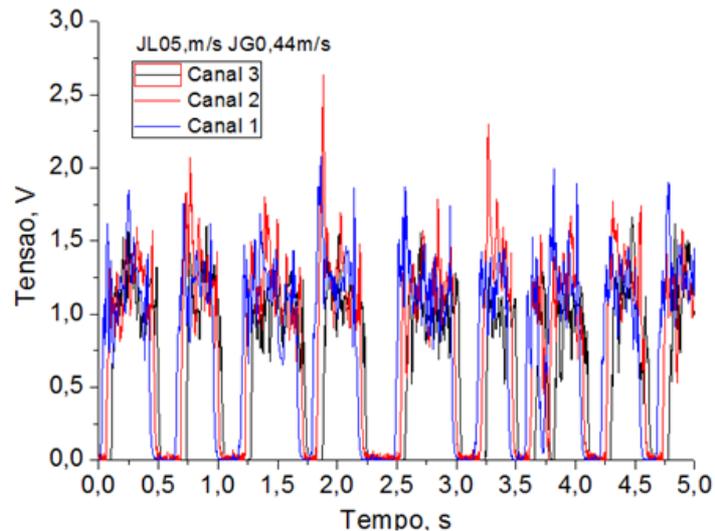


Figura 35: Sinal do sensor óptico

Pode-se perceber que o sensor óptico, mesmo possuindo um sinal com muitas oscilações, consegue realizar medições compatíveis com as do *wire mesh*.

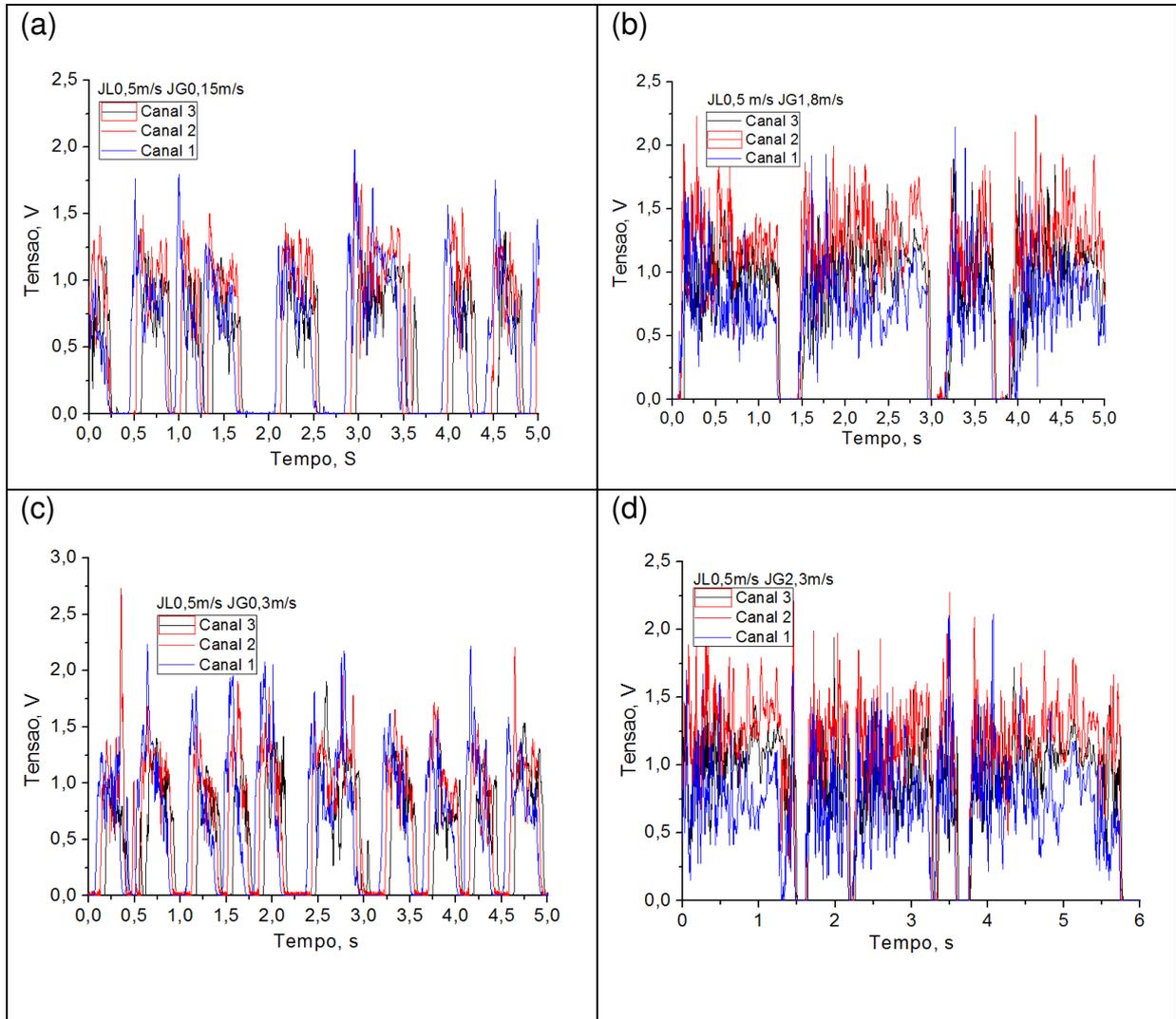
O resultado mostrado na figura 35, foi coletado com o mesmo padrão de escoamento para os dois sensores, mas isso não significa que sejam as mesmas bolhas.

5.3. MEDIÇÕES COM O SENSOR ÓPTICO PARA VÁRIAS VELOCIDADES DE LÍQUIDO E GÁS NO PADRÃO GOLFADAS.

Além de fazer comparações com as outras técnicas de monitoração, é de extrema importância testar as limitações do sensor óptico. Com esses resultados é possível perceber que, amplitude do sinal atenua conforme a velocidade do gás diminui e a velocidade do líquido aumenta; quando a velocidade do gás aumenta, a amplitude do sinal também aumenta. Com isso, nota-se que o sensor óptico tem dificuldade em detectar bolhas menores com velocidade do líquido alta; um exemplo que pode ser citado é com J_L 2,5m/s e J_G 0,18m/s.

No quadro 1, os dados foram adquiridos utilizando os três canais de medição, e pode-se perceber que há uma pequena distância de tempo entre eles, de modo que é possível calcular a velocidade de translação da bolha. Além de poder medir a velocidade, pode-se perceber a variação do sinal óptico para os diferentes tipos de escoamento. No quadro 1 (a) conseguiu-se resultado para baixa velocidade do gás, mas isso só foi possível porque a velocidade do líquido também está baixa; nota-se, também, que há maior quantidade de bolhas no quadro 1 (a) e (c) do que no quadro

1(b) e (d) que apresentam velocidade de gás bem maior; isso ocorre porque a bolha se divide com mais facilidade durante o percurso, ou seja, pequenas bolhas são formadas em baixas velocidades de gás.

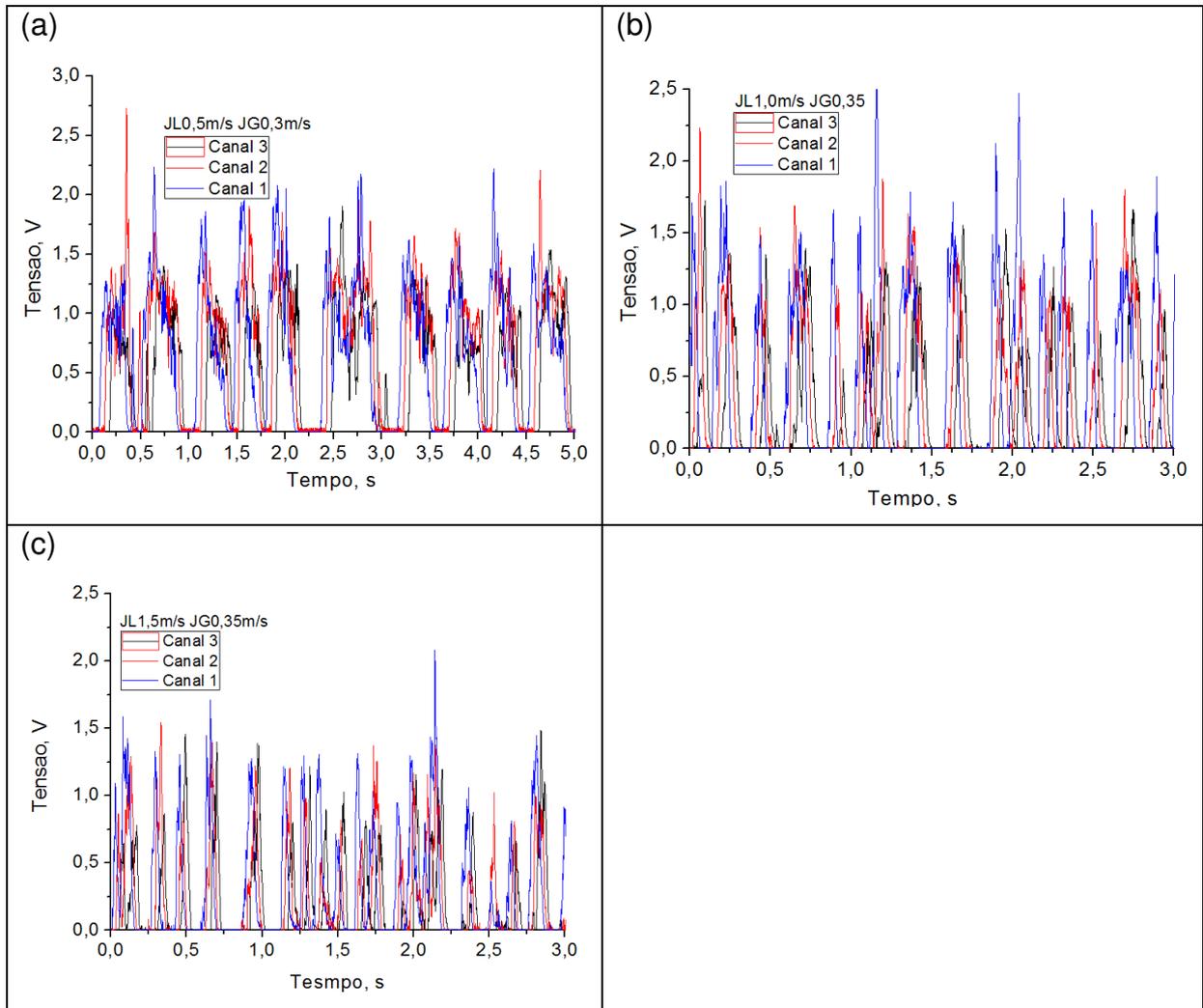


Quadro 1: Comparação das velocidades do gás em relação à velocidade do líquido J_L 0,5m/s

Os melhores resultados que se pode conseguir com o sensor óptico são quando as velocidades do líquido e do gás estão com valores próximos uma da outra ou quando a velocidade do gás é maior que a do líquido; isso ocorre porque a bolha que passa na tubulação é mais detectável do que uma bolha de menor tamanho, que seria o caso para os padrões de escoamento que assumem valores para velocidades do líquido extremamente maiores do que a velocidade do gás.

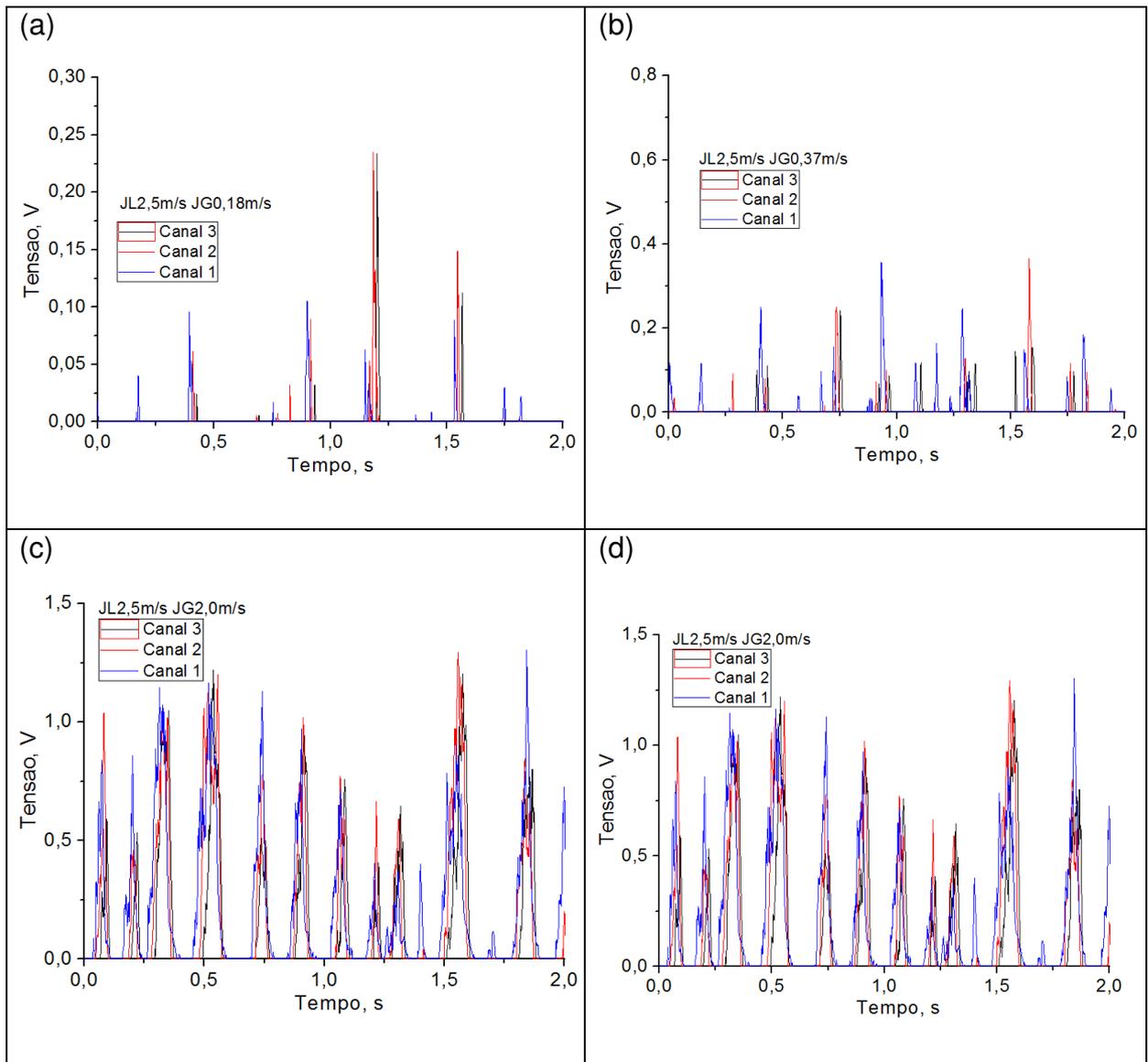
Ao analisar o resultado exposto no quadro 2, percebe-se que quando foi variada a velocidade do líquido e mantida, a velocidade do gás próximo de J_G 0,3 m/s, à medida que a velocidade do líquido aumenta a amplitude do sinal diminui, ou

seja, quando o padrão de escoamento fica próximo de bolhas dispersas a resposta do sensor vai diminuindo.



Quadro 2: Resultado obtido variando a velocidade do líquido e mantando a velocidade do gás próximo de $0,35 \pm 0,05$ m/s

No quadro 3 percebe-se a limitação do sensor para detectar bolhas relativamente pequenas; nota-se que no quadro 3 (a) e (b) o resultado tende ao fracionamento das bolhas, ou seja, a bolha de ar fica muito pequena, com isso há maior absorção da luz infravermelha além de apresentar pouca reflexão e refração, o que resulta em poucas condições de calcular a velocidade do gás, pois nem todos os canais conseguem detectar uma bolha nessas proporções, já que, por causa do seu tamanho, pode não atravessar o feixe óptico.



Quadro 3: Resultados apresentados para a velocidade do líquido de J_L 2,5m/s.

Com a pequena distância entre os canais já é possível perceber a modificação da bolha de ar na tubulação. A figura 36 mostra o resultado adquirido com velocidade do gás 2,0m/s e velocidade do líquido 2,5m/s; é possível perceber que o canal 1 se modifica durante o percurso entre o pico 1 até o pico 3, assim como também o canal 2 e 3. O pico 3 mostra que os canais estão com quase a mesma amplitude; isso prova que os canais estão ajustados com o mesmo ganho.

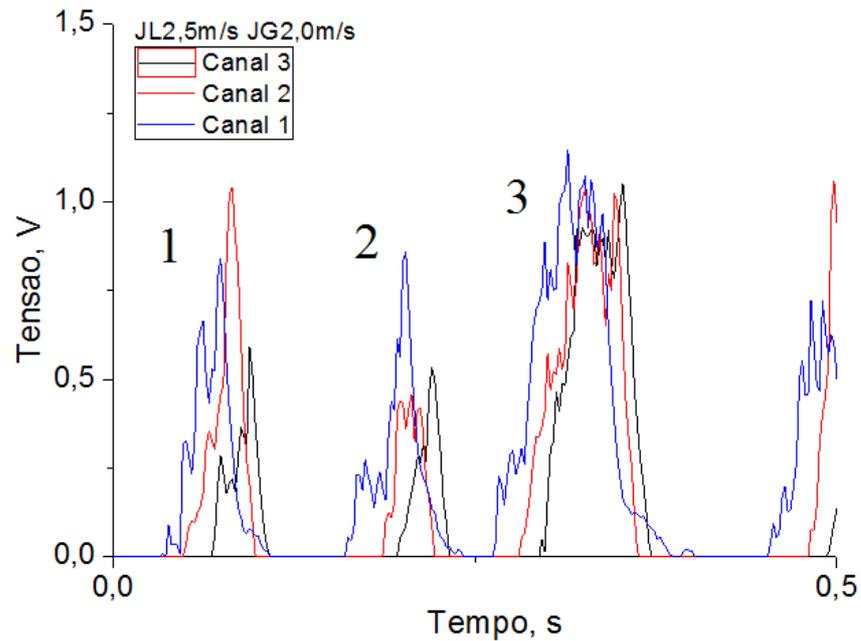


Figura 36: Gráfico mostrando a modificação da bolha dentro do sensor.

Na figura 37 é apresentada uma montagem feita com uma golfada com a velocidade do líquido de 2,5m/s e velocidade do gás 2,0 m/s, o sinal adquirido pelo sensor não pertence à imagem mostrada, mas pertence ao mesmo padrão de escoamento. Essa imagem é referente ao pico 3 da figura 36, porém foi ampliado para poder perceber a evolução da golfada dentro da tubulação do sensor entre o canal 1 e o canal 3. Nessa mesma imagem é perceptível a dificuldade que se tem de medir a velocidade da golfada pela cauda; esse padrão de escoamento apresenta velocidades relativamente altas e com isso são gerados pequenas bolhas na cauda. O sensor óptico não consegue detectar grandes quantidades de pequenas bolhas, nota-se que apenas o canal 1 detectou parte da cauda da golfada enquanto os outros canais não conseguiram adquirir essa medição.

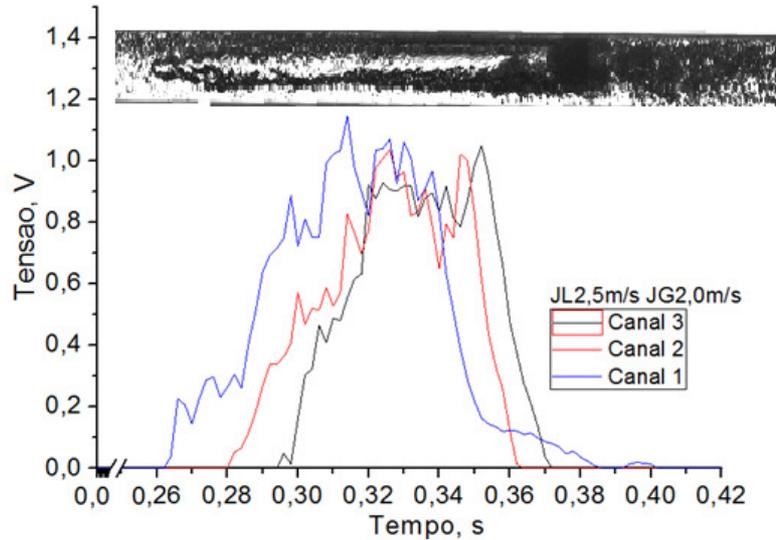


Figura 37: Sinal óptico com imagem de uma golfada, ambos com as mesmas velocidades porém sem sincronia.

5.4. COMPARAÇÃO DOS SINAIS ADQUIRIDOS COM A CÂMERA

Com a perspectiva de compreender o sinal adquirido pelo sensor óptico foi feita uma análise comparando o sinal do sensor óptico com a imagem da câmera; a realização dessa medida não tem a finalidade de aferir a fração de vazio e, sim, comparar os dados do sensor óptico com as imagens da câmera. Para a realização dessa medida foram inseridos 240 ml de ar na tubulação e alterada a velocidade do líquido para cada medição. Para mensurar a quantidade de ar, foram utilizadas 4 seringas de 60 ml cada e pressionadas ao mesmo tempo.

Através desse experimento pôde-se perceber a grande dificuldade que se tem de interpretar o sinal óptico, pois não há como identificar o que é absorção, refração, reflexão e efeito de lente. Com os resultados adquiridos, o que se pode medir com o sensor óptico é a quantidade de bolhas que passa pela tubulação e a velocidade delas. Uma outra dificuldade está relacionada com o formato das bolhas, pois esperava-se que as mesmas ficassem inteiras. Mas ao longo da tubulação elas começavam a se dividir, principalmente com o aumento da velocidade do líquido.

A figura 38 mostra uma montagem feita com o sinal óptico e com filmagem da golfada passando pela tubulação; tanto o sinal óptico quanto a filmagem se referem à mesma quantidade de gás inserida na tubulação; nota-se que a quantidade de bolhas indicadas pelo sensor óptico é a mesma quantidade apontada pela filmagem; nota-se, também, que o sensor responde muito bem à detecção da bolha, cujo

tamanho é proporcional ao pico de tensão do sensor óptico. É possível perceber que até mesmo as menores bolhas foram detectadas pelo sistema óptico.

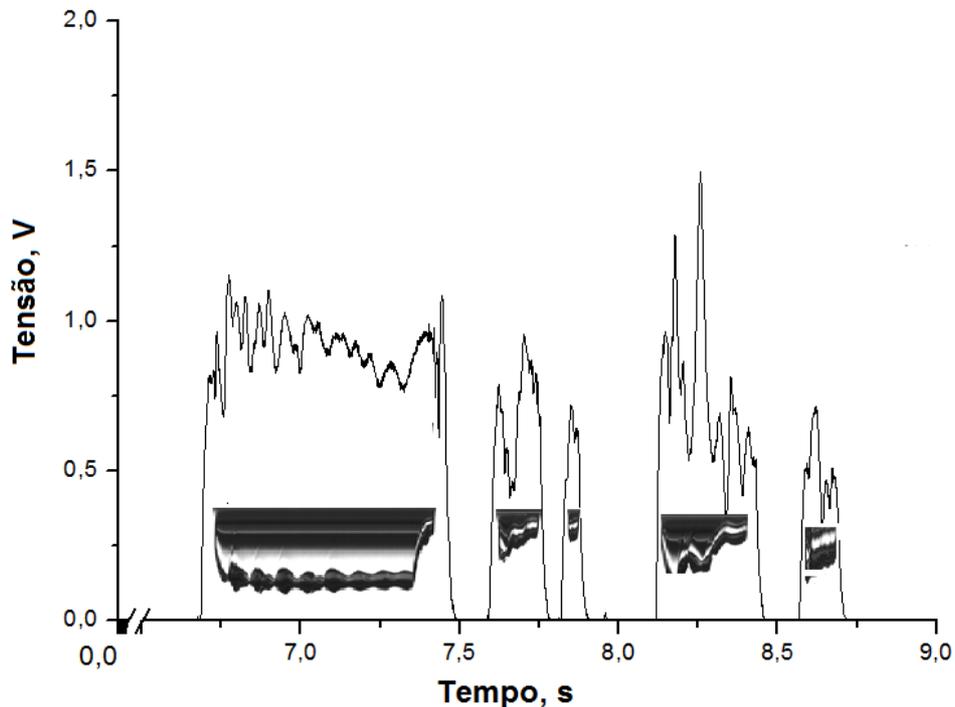


Figura 38: Sinal do sensor óptico em sincronia com a golfada.

Na área de escoamento multifásico, pesquisadores tentam criar ou aprimorar técnicas para conseguir estudar, também, a superfície da bolha; pretendia-se com esse sistema identificar algo mais próximo das expectativas. Na figura 39 é apresentada uma montagem utilizando a imagem adquirida pela câmera com o gráfico da figura 38; são colocados os dados da primeira bolha; como os dados foram adquiridos ao mesmo tempo, o sinal de tensão medido pertence à golfada que está na imagem.

Nota-se que a superfície da bolha apresenta uma grande influência no sinal adquirido; o fato de o sinal do sensor óptico variar bastante é por causa da superfície da bolha; o efeito de lente é muito presente nas medições com o sensor óptico. Logo se percebe que na realidade o que se chama de ruído na verdade são as perturbações da superfície da golfada. No nariz da golfada é possível notar que as perturbações apresentam maior amplitude, mas logo essa amplitude diminui. O fato interessante, porém, é que há um efeito de lente muito grande na cauda da golfada, pois a amplitude do sinal aumentou nesse instante.

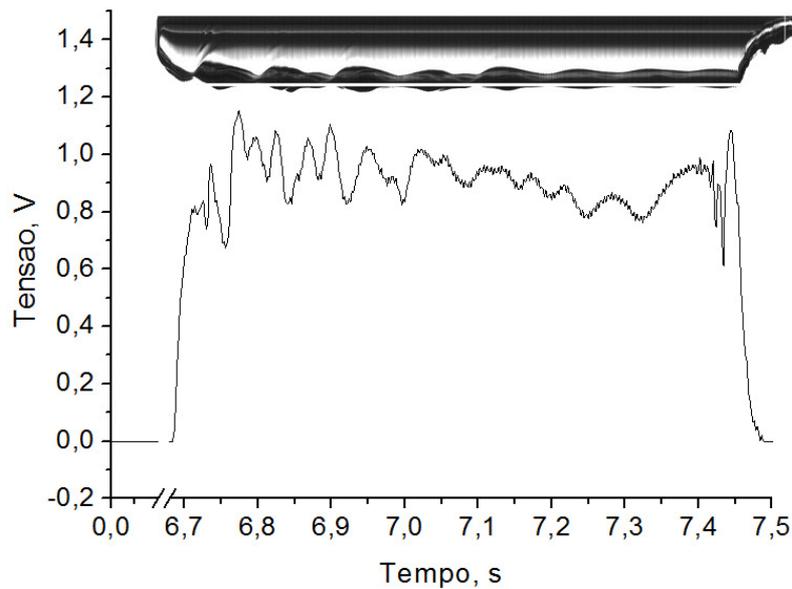


Figura 39: Gráfico de comparação do sinal do sensor óptico com a superfície da bolha

Na Tabela 3 são mostrados os resultados para validar o sinal do sensor óptico. Para cada filmagem há um sinal do sensor óptico; a primeira medição, na qual o gráfico do sensor óptico está em vermelho, é a mesma medida que consta na figura 38. O resultado importante obtido com esse experimento foi que a quantidade de bolhas filmadas foi a mesma quantidade que o sensor detectou; até mesmo com a velocidade do líquido maior, é possível detectar muito bem; nota-se que, com a velocidade do líquido de 2,5 m/s, foram contabilizadas dez bolhas, a mesma quantidade que consta com o sinal do sensor.

Tabela 3: Validação do sensor óptico com a câmera para velocidades do líquido de 0,5 e 1,0 m/s

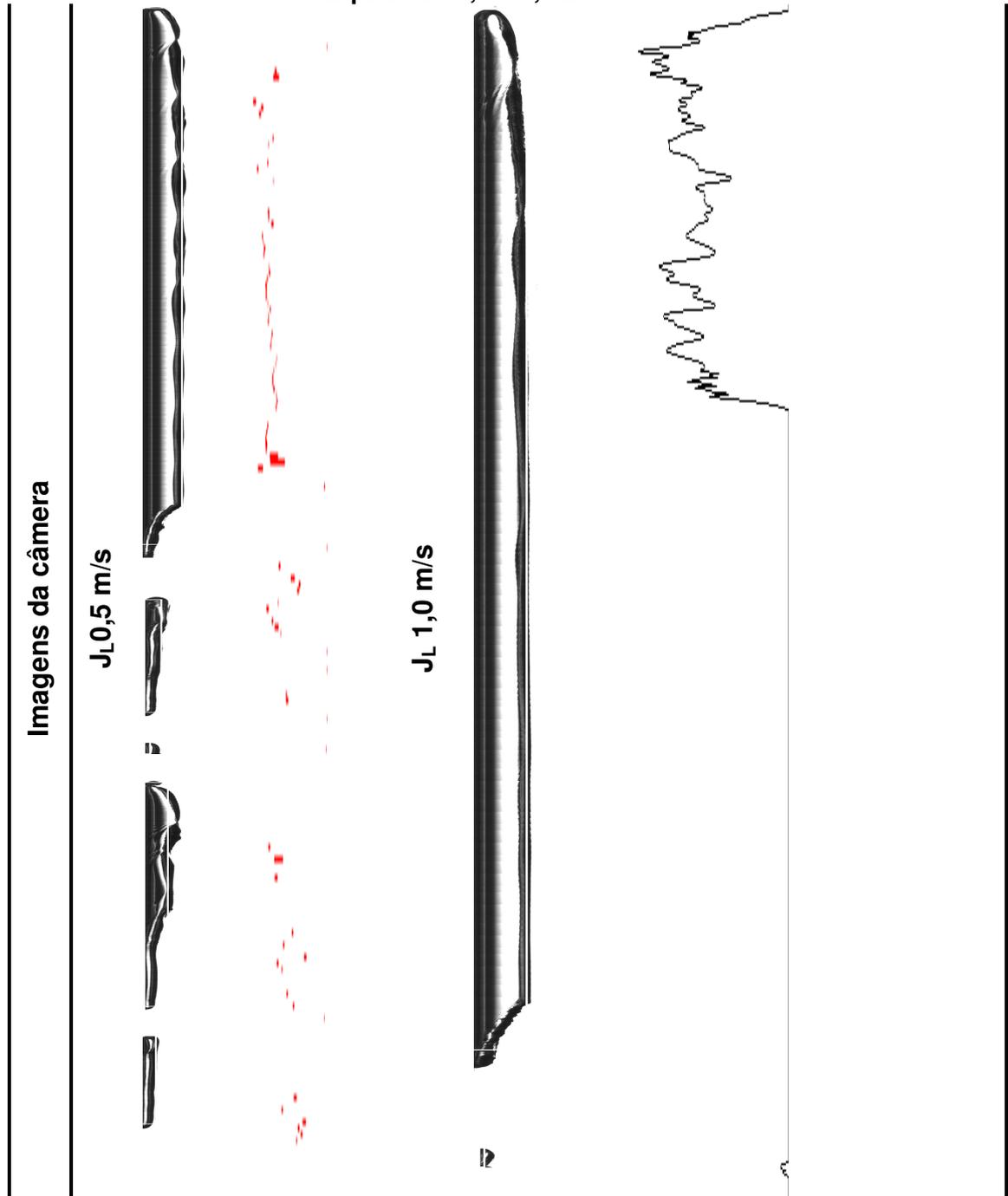
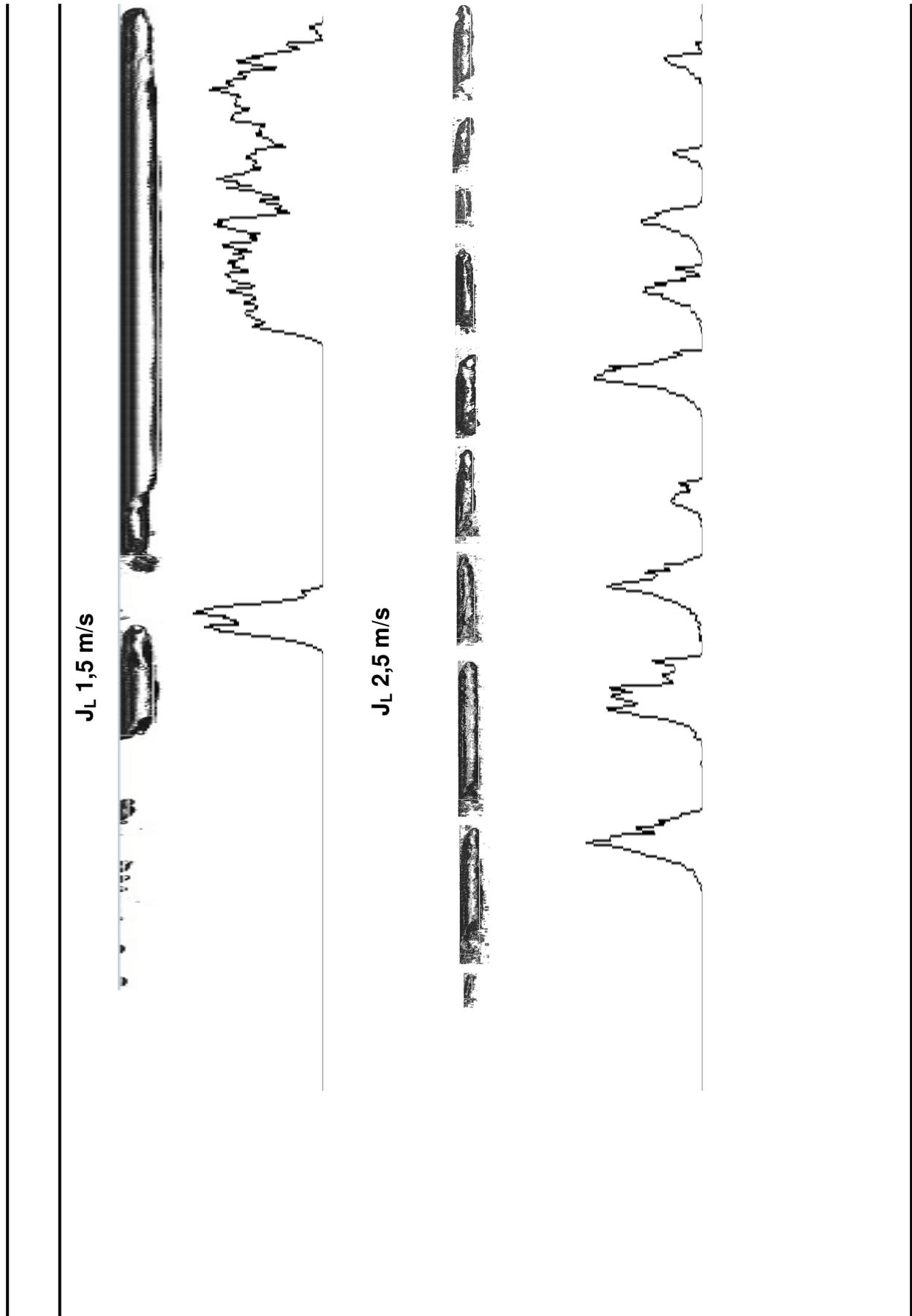


Tabela 4: Validação do sensor óptico com a câmera para velocidades do líquido de 1,5 e 2,5 m/s



6. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Os objetivos traçados foram alcançados; exemplo disso foi a usinagem da peça adutora, o desenvolvimento de da nova placa eletrônica e um programa de aquisição de dados. Com esses recursos foi possível fazer o experimento e validar os dados adquiridos pelo sensor óptico comparando-os com os dados do *wire mesh* e as imagens adquiridas pela câmera.

Ao elaborar o primeiro protótipo, utilizando um tubo de acrílico, e adquirir o primeiro resultado, verificou-se a grande dificuldade em interpretar o sinal adquirido. Além de interpretar o sinal, tinha-se a pretensão de conseguir medir a velocidade da bolha que passa pela tubulação; ao adquirir os resultados com protótipo construído em um tubo de acrílico, conseguiu-se medir a velocidade de translação da bolha e também fazer uma moldagem numérica utilizando as Leis de Snell e Fresnel.

Os resultados adquiridos com este trabalho são consequência das teorias citadas no texto; a absorção, a reflexão e a refração são as hipóteses que ditam os resultados adquiridos pelo sensor. A funcionalidade do sensor, bem como as suas limitações e potencialidades, sua robustez e um ótimo alinhamento das fontes emissoras com os fotodetectores, contribuíram para a finalização deste trabalho. A modulação e demodulação do sinal óptico, geradas e adquiridas pela placa circuito, apresentaram-se eficazes e não geraram falhas; isso proporcionou adquirir resultados em ampla faixa de trabalho, variando as velocidades do líquido e do gás.

Os experimentos de caracterização apresentaram resultados interessantes, diferentes do que se esperava, e foram de fundamental importância para compreender a resposta do sensor às golfadas geradas na planta de escoamento. Através dos experimentos de caracterização, pode-se perceber que o que se chamava de “ruído” do sensor óptico podia ser informação necessária com relação à superfície da bolha e isso pôde ser provado nas medições com a câmera.

Este trabalho apresentou resultados com relação à construção e análise do sensor óptico para escoamento bifásico, mas apresenta limitações como, por exemplo, que com ele fica muito difícil reconstruir uma imagem dos fluidos que passam pela tubulação, pois a peça adutora apresenta poucos pontos para reconstruir uma imagem.

Uma das grandes vantagens desse sistema é que ele pode ser usado para outros fluidos, mas é necessário colocar o par de semicondutores adequado para a faixa de absorção que se deseja trabalhar.

Para trabalhos futuros, o ideal é aprimorar esse sistema utilizando um DSP e elaborar um circuito de aquisição aprimorado para esse sistema. Também é importante fazer um programa de aquisição de dados em uma linguagem de programação mais sofisticada, com o qual se possa medir *on line* a velocidade e a fração de vazio do escoamento, o que não é possível realizar com o atual programa. Os próximos passos é realizar experimentos com petróleo na região de infravermelho.

APÊNDICE I

SENSOR DE DETECÇÃO DE AREIA

Para essa técnica de medição foi utilizado o mesmo sistema eletrônico que foi utilizado no sensor de vazão do artigo de Virginia (BARONCINI et al., 2012) com sinal modulado em 2kHz. Também foi utilizado o mesmo sistema de aquisição de dados, a placa de aquisição da Texas Instruments e *software* feito em Labview.

Para obter resultados com esse sensor, foi necessário colocar em um tubo de acrílico 10 ml de água e fixar o emissor e o receptor de forma que eles ficassem alinhados, como mostra a figura 40. Mas o objetivo com o sensor de areia era medir a decantação da areia, ou seja, medir quanto tempo a areia leva para assentar no fundo do tubo. O funcionamento desse sensor é semelhante a agitar uma garrafa com certa quantidade de água e de areia com baixa granulometria formando uma mistura praticamente homogênea e observar o tempo necessário para decantação da areia. Ao realizar esse experimento foi possível notar que, conforme aumentava a quantidade de areia colocada dentro do tubo, o sinal recebido pelo receptor diminuía.

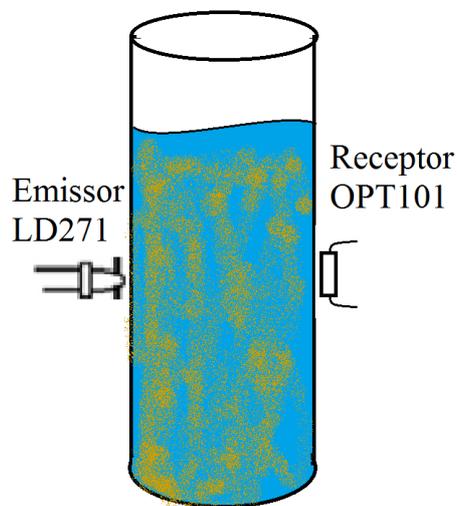


Figura 40: Sensor de areia

O resultado desse experimento pode ser visto na figura 41. Para a realização do experimento, primeiramente foi tirada uma referência de medição com a água, ou seja, foram adquiridos dados sem ter percentual algum de areia dentro do tubo; o resultado adquirido está representado pela cor preta. Após isso foram adicionadas porcentagens de areia de acordo com os valores que estão na legenda da figura 41; observando a figura, é possível perceber que para 1% de areia em relação a 100 ml

de água ocorre a maior atenuação do sinal; o que pode explicar esse fenômeno é que, como o LED e o fotodiodo ficam submersos, a água irá absorver parte do feixe de luz e a outra parcela sofre espalhamento devido aos grãos de areia presentes no tubo. Aos poucos os grãos de areia vão descendo para o fundo do tubo. O que evita que os grãos de areia desçam rapidamente é a tensão superficial da água.

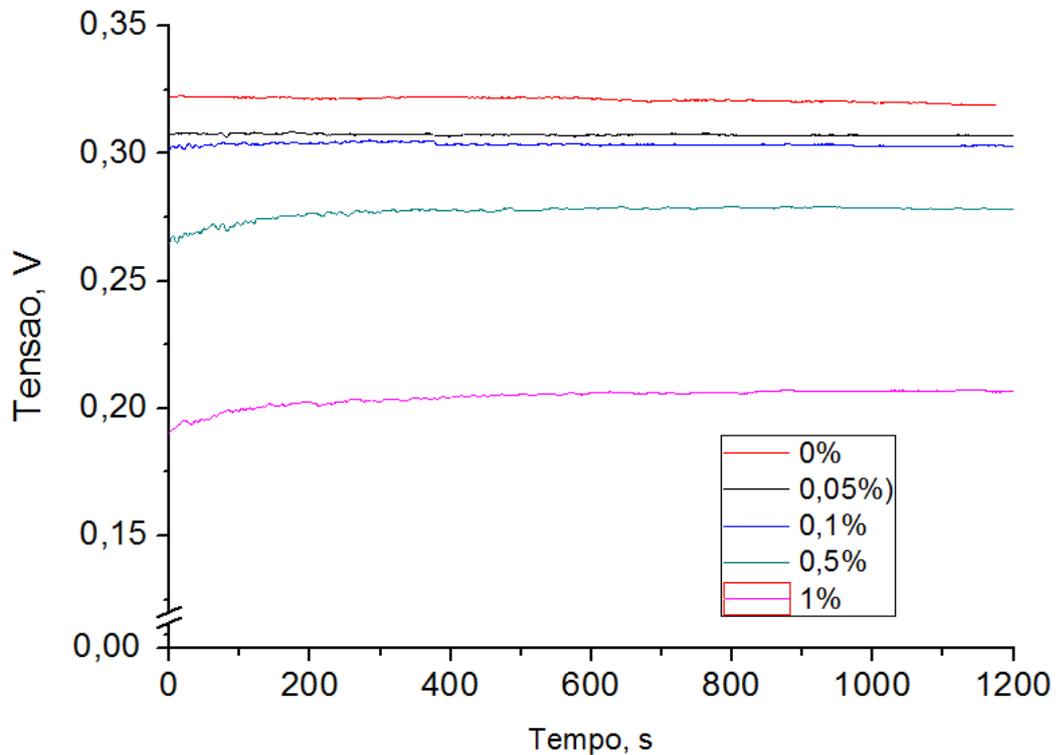


Figura 41: Resultados do sensor de areia

Na figura 42 é apresentado o gráfico que mostra a atenuação do sinal adquirido pelo sensor em função do volume. Com isso é possível perceber que quanto mais volume de areia é colocado no tubo, mais o sinal é atenuado. Com o gráfico da figura 42 fica evidente a curva de atenuação do sinal conforme o volume da areia colocado na tubulação. A função que melhor define as tendências desse resultado é a função da reta (relação 13 mostrada no gráfico da figura 42). Os gráficos e a função foram gerados através do software OringiPro.

$$y = 0,32455 - 0,11869x \quad (13)$$

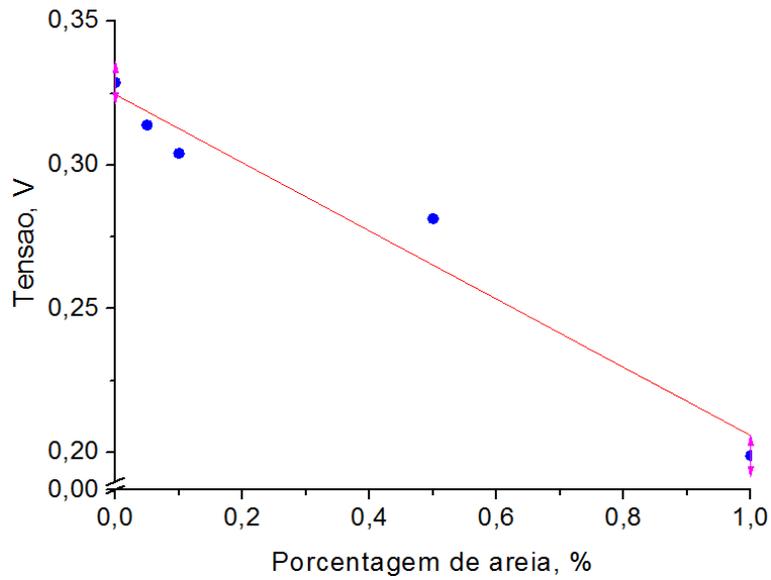


Figura 42: Função da reta aplicada aos resultados de decantação de areia

A motivação para esse estudo se dá pelo fato de que quando o petróleo é retirado do subsolo ele passa por dois processos para retirar as impurezas que é a filtração e a decantação. Com esse estudo será possível fazer um sensor que possa monitorar a decantação do petróleo e também estudar o tempo que demora para que as impurezas sejam separadas do petróleo

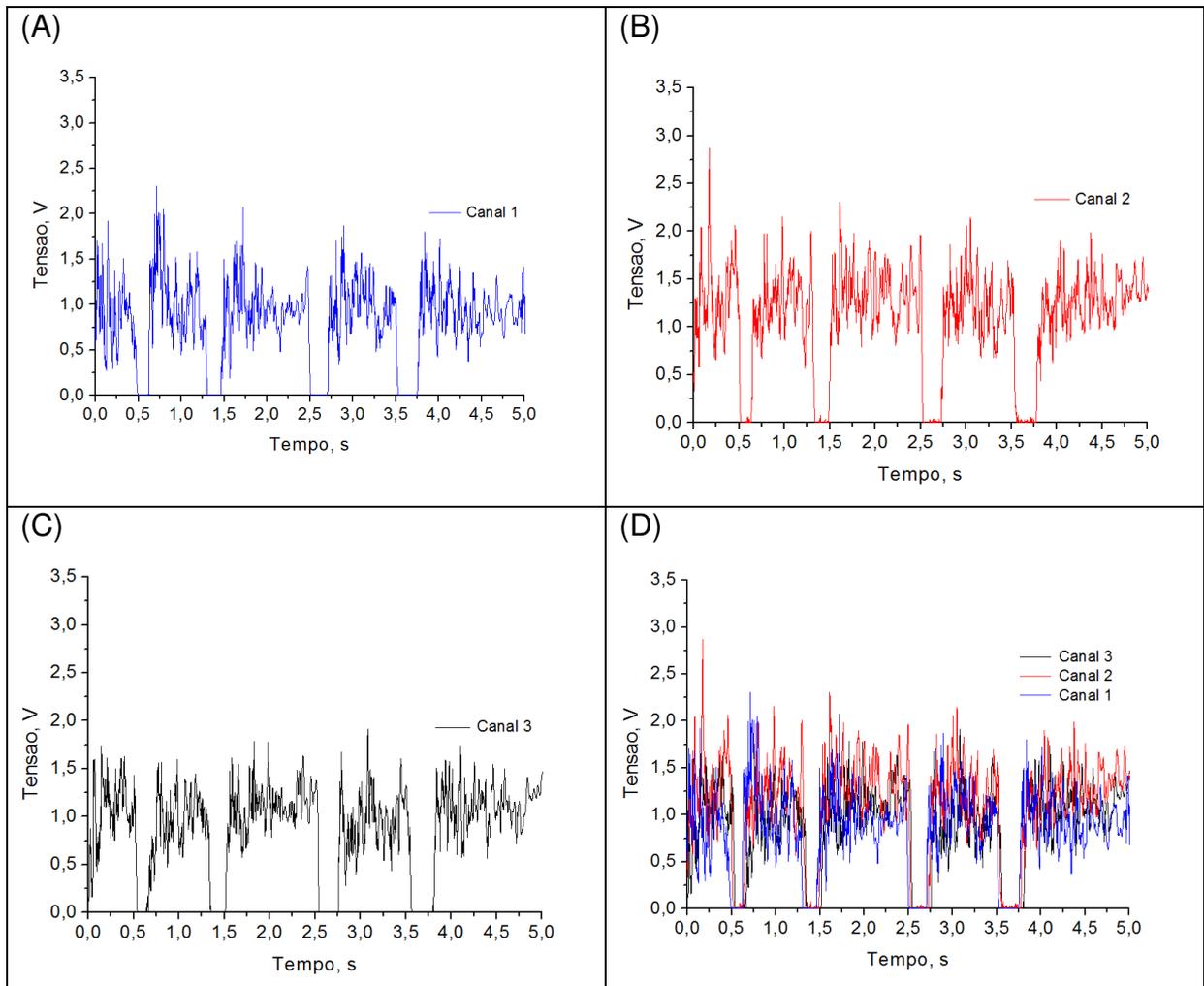
APÊNDICE II

RESULTADOS DO SENSOR ÓPTICO

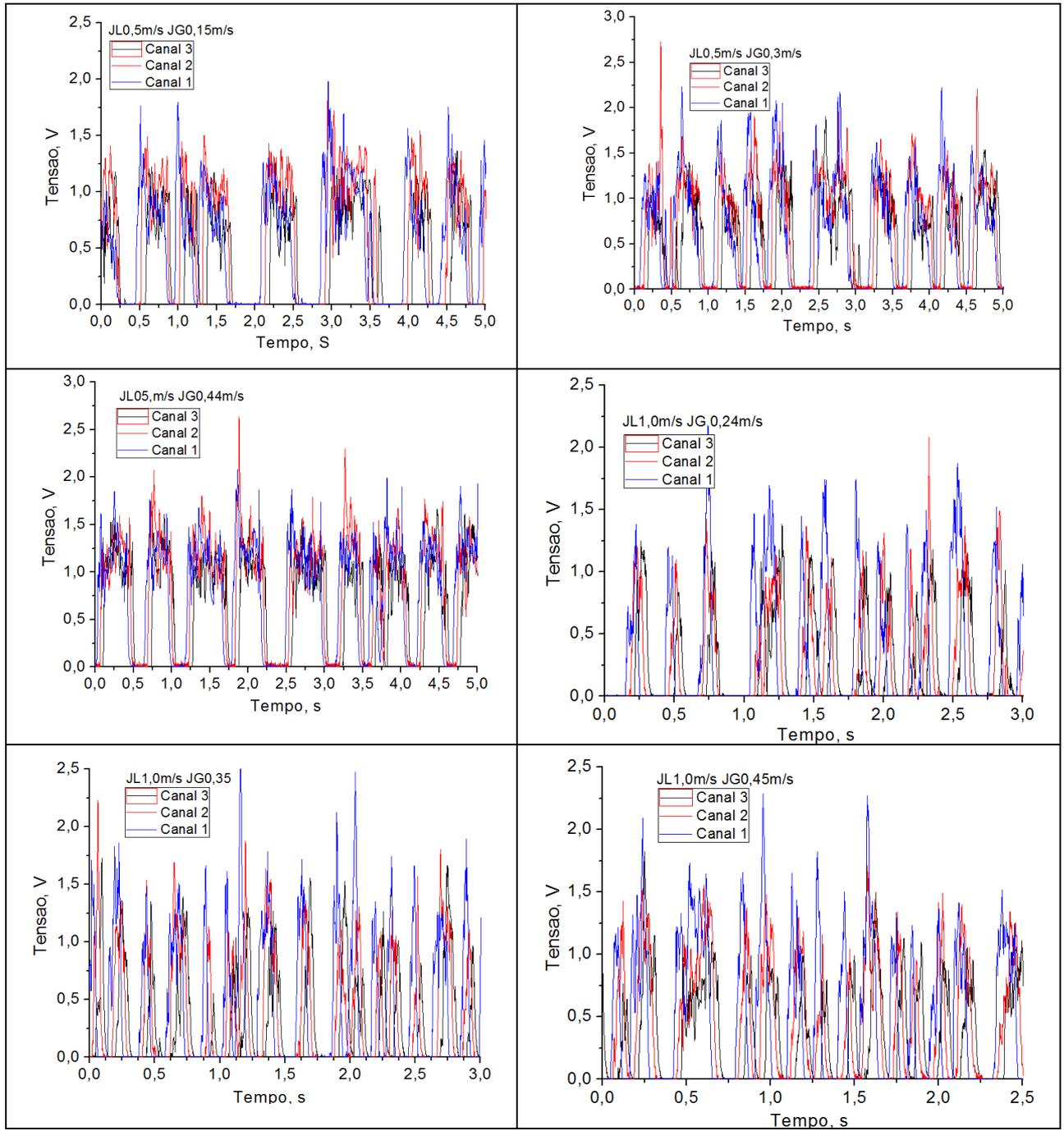
Neste apêndice estão apresentados todos os resultados adquiridos com sensor óptico para as diferentes velocidades de líquido e gás.

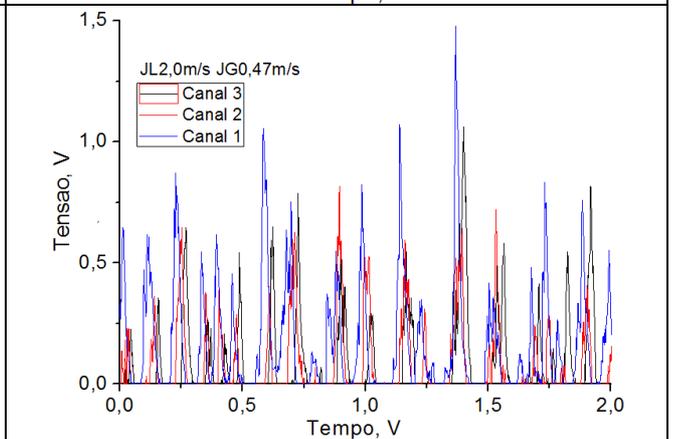
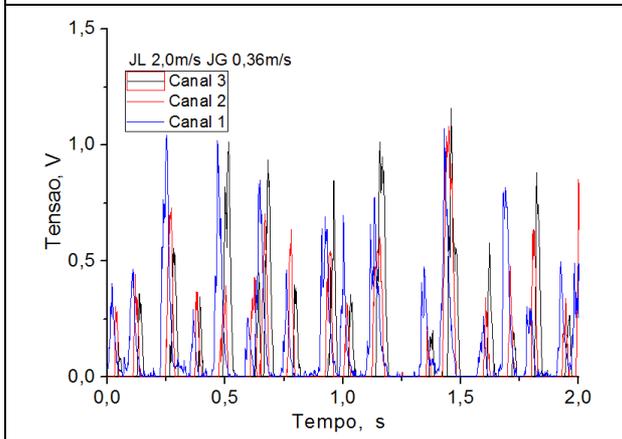
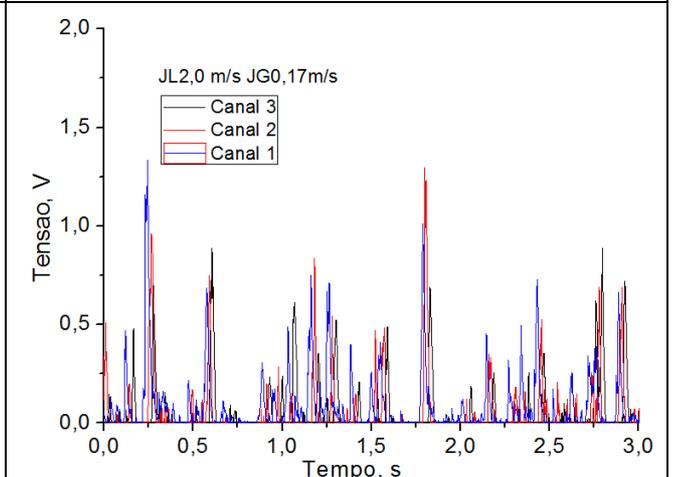
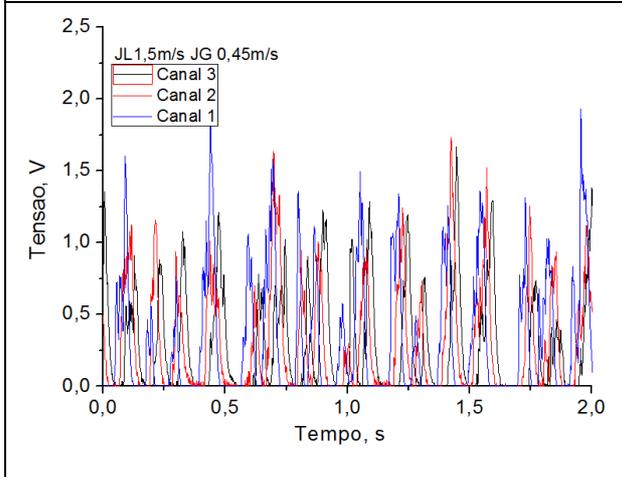
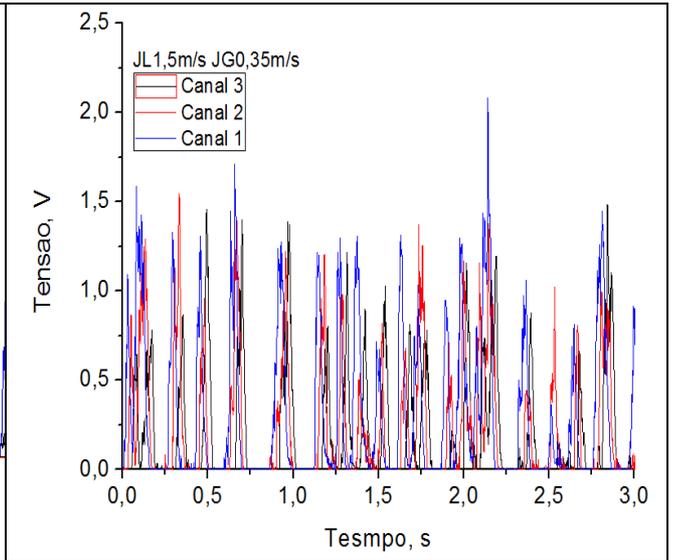
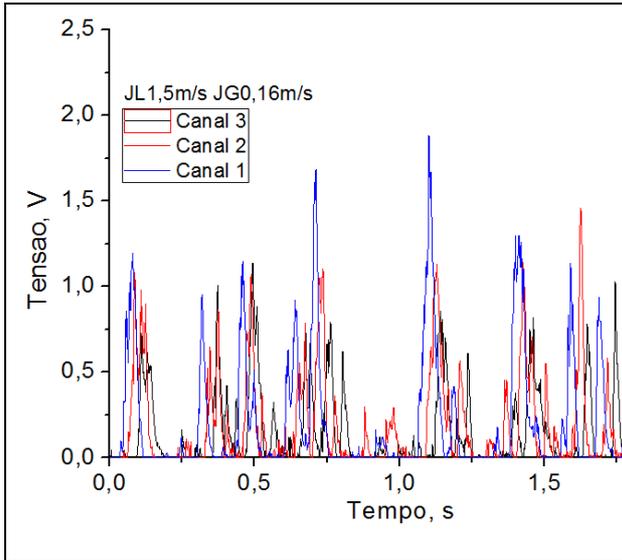
No quadro 4 é apresentado para cada canal o resultado da medição realizada para a velocidade do líquido J_L 0,5m/s e J_g 1,3m/s. Com esses dados nota-se a diferença e também a semelhança entre os canais de medição.

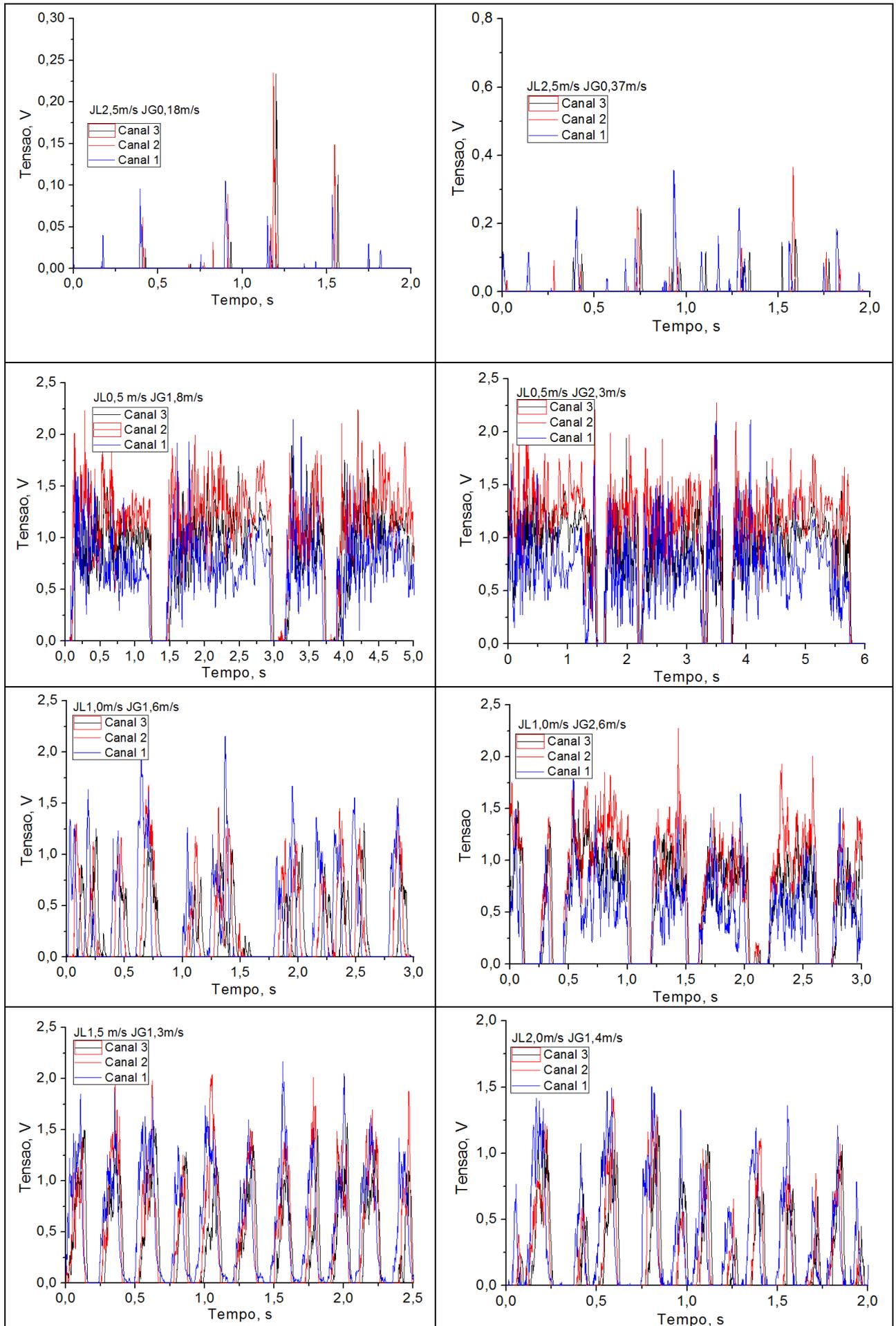
No quadro 5 são apresentados os gráficos de todos os resultados adquiridos com o sensor óptico utilizando os três canais de medição.

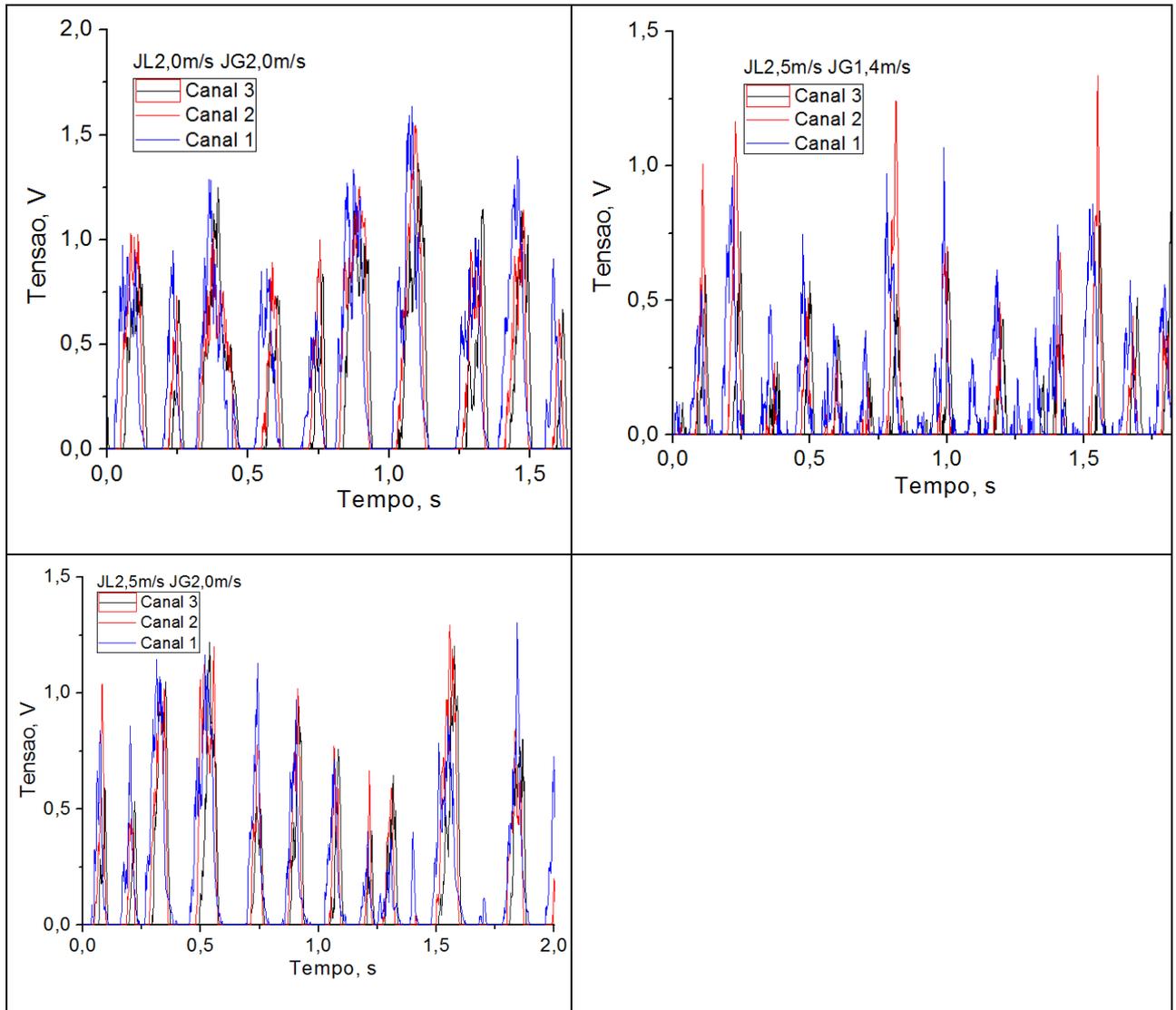


Quadro 4: Quadro mostrando o sinal adquirido de cada canal para a velocidade J_L 0,5m/s e J_g 1,3m/s. (A) Canal 1; (B) canal 2; (C) canal 3; (D) os três canais.









Quadro 5: Todos os resultados adquiridos com o sensor óptico.

REFERÊNCIAS:

ADRADE, C. R. **Espectroscopia no infravermelho propriedades da madeira e do carvão de plantio clonal de eucalyptus sp** . [S.I.] Universidade Federal de Lavras, 2009.

AMARAL, C. E. F. et al. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, p. 1–10, 2013.

ATKINS, P. **Físico-química**. 7. ed. ed. Rio de Janeiro BRJ: Livros Técnicos e Científicos, 2003.

BARONCINI, V. H. V et al. Sensor Óptico para Monitoramento do Escoamento Bifásico : Modelagem Numérica e Implementação. **Momag**, 2012.

BARRY J. AZZOPARDI. **Gas-Liquid Flows**. Begell Hou ed. [S.I.] Begell House, 2006. p. 331

BENDIKSEN, K. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984.

CARLOS E. F. DO AMARAL, RAFAEL F. ALVES, MARCO J. DA SILVA, LÚCIA V. R. ARRUDA, LEYZA B. DORINI, R. E. M. M. Bubble Identification Based on High Speed Videometry data: algorithm and validation. **Springer Link**, v. 7441, p. 870–876, 2012.

CLARIJS, M. C. et al. X-ray spectrum generation for a multiphase flow meter. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 3, p. 713–717, jun. 2003.

CSELE, M. **Fundamentals Of Light Sources And Lasers**. [S.I.] A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2004. p. 337

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 7, p. 2245–2251, 2007.

DUKLER, A. E.; YEHUDA, T. Flow Pattern Transitions In Gas-Liquid Systems: Measurement And Modeling. **Multiphase Science and Technology**, v. 2, n. 1-4, 1986.

DUTRA, G. **instrumentação optoeletrônica para caracterização de escoamento multifásico**. [s.I.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

DYAKOWSKI, T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 343–353, 1 mar. 1995.

ELKOW, K. J.; REZKALLAH, K. S. Void fraction measurements in gas - liquid flows using capacitance sensors. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n. 8, p. 1153–1163, 1 ago. 1996.

FAZALUL RAHIMAN, M. H. et al. Ultrasonic Transmission-Mode Tomography Imaging for Liquid/Gas Two-Phase Flow. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 6, p. 1706–1715, dez. 2006.

H. PRASSER; BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas – liquid flows. **Referencia é da Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, n. 1998, p. 111–119, 1998.

HECHT, E. **Optics, 2nd Edition**. [S.l.] Addison-Wesley, 1987. p. 676

HORI, K.; FUJIMOTO, T.; KAWANISHI, K. Development of ultra-fast X-ray computed tomography scanner system. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 45, n. 4, p. 2089–2094, 1998.

INSTRUMENTS, N. **Getting Started with LabVIEW**, 2010.

JOHNSON, I. D. **Method and apparatus for measuring water in crude oil**, 13 dez. 1984. Disponível em: <<http://www.freepatentsonline.com/4644263.html>>. Acesso em: 15 out. 2012

KIM, J.-B.; KIM, H.-J. Multiresolution-based watersheds for efficient image segmentation. **Pattern Recognition Letters**, v. 24, n. 1-3, p. 473–488, jan. 2003.

KRHONE. OPTIMASS Handbook. 2000.

LONG, J. et al. Online parameters measurement of Taylor flow in small channels using optical technique. **2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings**, p. 2322–2325, maio. 2012.

MARTELLI, C. **Termômetro para altas temperatura (0-400°C) com redes de Bragg em Fibra ótica**. [S.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Brasil., 2003.

NICKLIN, D. J. Two Phase Flow in vertical tubes. **Chemical Engineering Science**, 1962.

OLIVEIRA, M. F. D. DE. **Análise da Aplicação de um Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino na Produção de Petróleo**. [S.l.] PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO, 2003.

ORIOU, J. et al. Characterization of the two-phase flow regimes and liquid dispersion in horizontal and vertical tubes by using coloured tracer and non-intrusive optical detector. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. Issue 1, p. 24–34, 2008.

REMENIERAS, J. P. et al. **Multiphase pipe flow velocity profile measurements by Doppler ultrasound containing a high level of colored noise** IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. **Anais IEEE**, 1996

SHOHAM, O. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes**.

SMAR. Transmissor de Pressão Fieldbus-LD302. 2012.

TAITEL, Y. Flow pattern transition in rough pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 3, n. 6, p. 597–601, 1977.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 3, n. 6, p. 585–596, dez. 1977.

TAKAMASA, T.; KOBAYASHI, K. Measuring interfacial waves on film flowing down tube inner wall using laser focus displacement meter. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 9, p. 1493–1507, set. 2000.

YANG, W. et al. **Multiphase flow measurement by electrical capacitance tomography** 2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques. **Anais IEEE**, maio. 2011