

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E**  
**INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**TIAGO PIOVESAN VENDRUSCOLO**

**TÉCNICAS ÓPTICAS PARA INVESTIGAÇÃO DE**  
**ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

**TESE**

**CURITIBA**

**2016**



TIAGO PIOVESAN VENDRUSCOLO

# **TÉCNICAS ÓPTICAS NO INFRAVERMELHO PARA INVESTIGAÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Cicero Martelli

CURITIBA

2016

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

V453t  
2016 Vendruscolo, Tiago Piovesan  
Técnicas ópticas para investigação de escoamentos multifásicos /  
Tiago Piovesan Vendruscolo.-- 2016.  
125 f. : il. ; 30 cm

Texto em português com resumo em inglês  
Disponível também via World Wide Web  
Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática  
Industrial, Curitiba, 2016  
Bibliografia: f. 107-113

1. Escoamento multifásico – Medição. 2. Petróleo. 3. Detectores. 4.  
Tomografia óptica. 5. Simulação (Computadores). 6. Engenharia elétrica  
– Dissertações. I. Silva, Marco José da. II. Martelli, Cicero. II.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

---

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. 138

# **Técnicas Ópticas para Investigação de Escoamentos Multifásicos.**

por

**Tiago Piovesan Vendruscolo**

**Orientador:** Prof. Dr. Marco Jose da Silva (UTFPR)

**Coorientador:** Prof. Dr. Cicero Martelli (UTFPR)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h do dia 14 de outubro de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

---

Prof. Dr. Marco Jose da Silva  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho  
(LACTEC)

---

Prof. Dr. Sthener Rodrigues Vieira Campos  
(PETROBRAS)

---

Prof. Dr. Daniel Rodrigues Pipa  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Moises Alves Marcelino Neto  
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

---

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)



Esta tese é dedicada a toda minha família, pelo constante apoio e encorajamento que me deram forças ao longo da minha vida.





# Agradecimentos

---

Agradeço inicialmente ao meu orientador Prof. Dr. Marco José da Silva e Co-orientador Prof. Dr. Cicero Martelli, pela orientação, competência, dedicação e amizade prestados, que foram imprescindíveis para o êxito desse trabalho. Também agradeço pelo auxílio e dúvidas esclarecidas aos professores Marcelo Victor Wüst Zibetti e Daniel Rodrigues Pipa.

Aos meus pais, Abeloni e Angela, e a minha irmã Franciele pelo incentivo e apoio em todos os momentos ao longo da minha vida, sem os quais eu não teria chegado até aqui.

A minha namorada Rosana por todo apoio e companheirismo ao longo dessa jornada.

Aos amigos e colegas de Laboratório pela ajuda direta ou indireta na realização deste trabalho e pela amizade: Eduardo Nunes dos Santos, Aluísio do Nascimento Wrasse, Jean Nakatu longo, Guilherme Weber, Frederico Mariano Aguiar, Guilherme Dutra, Rodolfo Patyk, Maína Silva, Murilo Kramar, Cesar Ofuchi, Andrea Chia, Robert Fischer, João Paulo Bazo e aos colegas do NUEM – Núcleo de escoamentos multifásicos: Ernani Kopp, Fernando Castillo, Reinaldo Justiniano e Cristiane Cozin. Também gostaria de agradecer pelo apoio prestado aos professores Rigoberto Morales, Flávio Neves e Valéria Arruda.

Também gostaria de agradecer pela acolhida durante meu estágio doutoral no centro de pesquisas Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Alemanha, em especial ao Prof. Dr. Uwe Hampel e ao meu supervisor Eckhard Schleicher.

Pelo apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP –, 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 – e do Programa de Formação de Recursos Humanos da PETROBRAS - PRH10-UTFPR.

Pelo apoio financeiro durante o estágio doutoral no centro de pesquisa Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, como bolsista da CAPES - Proc. n°99999.003903/2015-00.



Ministério da  
Ciência e Tecnologia

Ministério da  
Educação



Curitiba, Outubro de 2016

Tiago Piovesan Vendruscolo

“The scientific man does not aim at an immediate result. He does not expect that his advanced ideas will be readily taken up. His work is like that of a planter - for the future. His duty is to lay foundation of those who are to come and point the way.”

— Nikola Tesla



# Resumo

---

Escoamentos multifásicos estão presentes em diversos processos da natureza bem como em atividades industriais como em reatores químicos, plantas de geração de energia, e também na exploração, produção e transporte de petróleo e gás. Na produção de petróleo, é comum encontrar-se escoando pelos dutos, uma mistura que pode conter duas ou mais fases compostas por óleo, gás e água, assumindo diversos padrões de escoamentos com configurações espaciais distintas. Em muitos casos o tipo de escoamento determina a eficiência e segurança dos processos e equipamentos onde ocorrem. Em função disso, várias técnicas já foram desenvolvidas para realizar a investigação experimental de escoamentos em tubulações ou componentes industriais, no entanto, no caso específico do óleo cru, poucas técnicas foram desenvolvidas devido a suas particularidades, como por exemplo, sua alta viscosidade, que em alguns casos impossibilita o uso de técnicas intrusivas, bem como, por ser uma substância isolante eletricamente não é possível o uso de algumas técnicas de medição por impedância. O uso de técnicas ópticas, como por exemplo câmera de vídeo ou sensores ópticos no espectro visível também não pode ser utilizado devido a opacidade natural do petróleo nessa faixa do espectro.

No entanto, o uso de técnicas de espectroscopia óptica demonstra ser uma importante técnica para a análise de diversas substâncias devido ao fato do espectro óptico ser único para cada substância, com isso, escolhendo-se um comprimento de onda apropriado, é possível fazer a investigação de uma determinada substância. No caso do óleo cru, ele possui uma alta transparência na faixa do infravermelho médio e distante, o que possibilitaria sua investigação.

Juntamente com a espectroscopia óptica, a tomografia óptica é uma importante técnica para a análise de escoamentos bifásicos, por ser não intrusiva e não invasiva, juntamente com uma boa resolução espacial e temporal. Com isso, foram desenvolvidos nesse trabalho dois tomógrafos ópticos na faixa do infravermelho próximo (950 nm)

com o intuito de demonstrar a aplicabilidade dessa técnica em escoamentos bifásicos água-ar vertical e horizontal. Também foram realizados diversos testes da transmitância no infravermelho médio (MIR), e testes iniciais de tomografia óptica no petróleo. Os resultados obtidos mostram que essa é uma técnica viável para o desenvolvimento de sensores que possam realizar a investigação de escoamentos que envolvem óleo cru.

**Palavras-chave:** Tomografia óptica, Infravermelho médio, Escoamento bifásico, Espectroscopia óptica.

# Abstract

---

Multiphase flows are present in many processes of nature as well as in industrial activities for instance in chemical reactors, power generation plants, as well as in exploration, production and transportation of oil and gas.

In oil production, a mixture of two or more phases composed by oil, gas and/or water is commonly found. Such multiphase mixtures stream in pipes and equipment assuming different patterns with different spatial configurations. In numerous situations, flow behavior determines the efficiency and safety of processes and equipment inside which they occur. As a result, various techniques have been developed to investigate multiphase flows. However, in the specific case of crude oil, only a few techniques have been developed and even fewer found use in industrial applications so far.

Crude oil is a substance completely opaque in the visible light spectrum. However, optical spectroscopy has proven an important technique for the analysis of several substances due to the fact that the optical spectrum is unique for each substance. In this way, it is possible to investigate different substances by choosing a suitable wavelength. In the case of crude oil, it presents a high transparency in the range of mid and far infrared, which allows for the development of non-invasive measuring techniques.

Along with optical spectroscopy, optical tomography has proved an alternative technique for the analysis of flow. Thus, in this work two optical tomographs in the near infrared range (950 nm) were developed in order to demonstrate the feasibility of its use in the investigation of two-phase air-water flows. Several tests of light transmittance through crude oil were conducted in mid-infrared (MIR), as well as initial test of optical tomography in crude oil. The results obtained shown that this is a viable option for flow investigation involving crude oil.

**Keywords:** Optical Tomography, Mid-infrared, Two-phase flows, Optical Spectroscopy.



# Sumário

---

Agradecimentos .....	vii
Resumo.....	xi
Abstract .....	xiii
Sumário .....	xv
Lista de Figuras.....	xviii
Lista de Tabelas .....	xxii
Lista de Símbolos.....	xxiii
Lista de Acrônimos.....	xxv
<b>Capítulo 1</b> <b>Introdução.....</b>	<b>29</b>
1.1   Motivação .....	29
1.2   Objetivos .....	30
<b>Capítulo 2</b> <b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>33</b>
2.1   Estudo do infravermelho.....	33
2.1.1 Parâmetros dos sensores ópticos.....	35
2.1.2 Sensores infravermelho .....	36
2.1.3 Espectroscopia do petróleo na região do infravermelho .....	38
2.2   Fundamentos da tomografia .....	40
2.2.1 Introdução.....	40
2.2.2 Tomografia computadorizada óptica .....	41
2.2.3 Reconstrução de imagens.....	42
2.3   Técnicas para medição de escoamentos bifásicos .....	45
2.3.1 Escoamento bifásico .....	46
2.3.2 Imageamento de escoamento bifásico .....	51
<b>Capítulo 3</b> <b>Tomógrafo Óptico no Infravermelho Próximo .....</b>	<b>59</b>
3.1   Tomógrafo óptico de uma polegada .....	59

3.1.1	Descrição do sistema.....	60
3.1.2	Firmware .....	64
3.1.3	Software.....	66
3.1.4	Resultados .....	69
3.2	Tomógrafo óptico de 2 polegadas .....	75
3.2.1	Descrição do sistema.....	75
3.2.2	Planta de escoamento utilizada e matriz de medidas.....	76
3.2.3	Validação do tomógrafo óptico com o sensor Wire-Mesh.....	78
3.3	Conclusão.....	81
<b>Capítulo 4</b>	<b>Infravermelho Médio .....</b>	<b>83</b>
4.1	Seleção de componentes.....	83
4.1.1	Receptores .....	83
4.1.2	Emissor .....	86
4.2	Testes de transmitância .....	86
4.2.1	Sistema para a medição da transmitância.....	86
4.2.2	Resultados .....	87
4.3	Tomografia no petróleo .....	89
4.3.1	Descrição do sistema.....	89
4.3.2	Resultados .....	90
4.4	Conclusão.....	91
<b>Capítulo 5</b>	<b>Sistema de Inferência por Espalhamento Óptico .....</b>	<b>93</b>
5.1	Descrição do sistema .....	93
5.2	Processamento de dados.....	95
5.2.1	Extração de parâmetros do escoamento.....	95
5.3	Resultados.....	97
5.3.1	Situação 1: Identificação direta do padrão de escoamento .....	98
5.3.2	Situação 2: Mudança de velocidade .....	98
5.3.3	Situação 3: Estimativa dos parâmetros do escoamento.....	100
5.4	Conclusão.....	101
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>103</b>

6.1 Trabalhos Futuros .....	104
<b>Referências .....</b>	<b>107</b>
<b>Apêndice A – Lista de Publicações.....</b>	<b>114</b>
<b>Apêndice B – Parâmetros dos Componentes.....</b>	<b>116</b>
<b>Apêndice C – Hardware .....</b>	<b>117</b>
<b>Anexo A – Software .....</b>	<b>120</b>
<b>Anexo B – Planta De Escoamento Bifásico .....</b>	<b>124</b>

# Lista de Figuras

---

Figura 2.1: Princípio de funcionamento de detectores térmicos (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011)).....	37
Figura 2.2: Princípio de funcionamento de detectores quânticos. (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011)).....	38
Figura 2.3: Medidas de FTIR para as cinco substâncias indicadas no gráfico (PATYK, 2015). .....	39
Figura 2.4: Transmitância do petróleo no infravermelho.....	40
Figura 2.5: Processos da tomografia computadorizada.....	41
Figura 2.6: Esquema básico da tomografia óptica. ....	42
Figura 2.7: Modelo utilizado para a criação de cada projeção.....	43
Figura 2.8: Sinograma gerado a partir da Transformada de Radon. ....	43
Figura 2.9: Matriz $A$ no algoritmo de <i>backprojection</i> para imagens com resolução de 16 x 16. ....	44
Figura 2.10: Padrões de escoamento bifásico ar-água em (a) horizontal (b) vertical..	50
Figura 2.11: a) Esquema básico do sensor para investigação de escoamentos trifásicos. b) Foto do escoamento trifásico. (WOLFFENBUTTEL et al., 2002).....	52
Figura 2.12: Escoamento de golfada ar-água-decano em um capilar de 2 mm. Em cinza claro representa ar, cinza escuro: decano e em branco a água. (WOLFFENBUTTEL et al., 2002) .....	52

Figura 2.13: Design básico do tomógrafo óptico. Na esquerda a vista horizontal e na direita a vista seccional (SCHLEICHER et al., 2008).....	53
Figura 2.14: Arranjo típico de eletrodos em sistemas de: (a) ECT, com 8 eletrodos. (b) ERT/EIT, com 8 eletrodos .....	55
Figura 2.15: Imagem detalhando planos transmissores e receptores e os pontos de cruzamentos (eletrodos).....	56
Figura 3.1: Placa eletrônica desenvolvida.....	60
Figura 3.2: Resposta espectral para o LED (a) e para o fotodiodo (b).....	61
Figura 3.3: Foto do tomógrafo óptico onde podem ser vistos os componentes ópticos e a base de fixação.....	61
Figura 3.4: Diagrama de bloco da placa eletrônica do tomógrafo de uma polegada...	62
Figura 3.5: Esquema de ativação de cada LED. ....	62
Figura 3.6: Amplificador de transimpedância .....	63
Figura 3.7: Placa de aquisição de dados PCIe – 7841R. ....	64
Figura 3.8: Fluxograma do <i>firmware</i> . ....	65
Figura 3.9: Identificação de cada ponto no frame ao longo do tempo.....	68
Figura 3.10: Esquema dos objetos de estudo. ....	69
Figura 3.11: Imagens reconstruídas com um objeto (a) e dois objetos bloqueadores (b) dentro da área de medição.....	69
Figura 3.12: Tomógrafo instalado na planta de escoamento horizontal. ....	70
Figura 3.13: Fração de vazio para diferentes velocidades superficiais para ar e água: a) $J_L= 0,5 \text{ m/s}$ , $J_G=.0,5 \text{ m/s}$ ; b) $J_L= 1,0 \text{ m/s}$ , $J_G=.0,5 \text{ m/s}$ ; $J_L= 1,5 \text{ m/s}$ , $J_G=.0,5 \text{ m/s}$ e $J_L= 1,5 \text{ m/s}$ , $J_G=.1,5 \text{ m/s}$ .....	71

Figura 3.14: Visualização lateral ao longo do tempo para diferentes velocidades superficiais para o ar e água. ....	72
Figura 3.15: Reconstrução 3D de escoamentos com diferentes velocidades superficiais para ar e água. ....	73
Figura 3.16: Escoamento sólido-líquido em uma bancada vertical. Tubo apenas com água (esquerda) e com areia escoando (direita).....	74
Figura 3.17: Escoamento vertical de areia na água. ....	74
Figura 3.18: Área investigada por cada conjunto óptico. ....	75
Figura 3.19: Diagrama de bloco do sistema montado para os testes, com ambas as técnicas sincronizadas.....	76
Figura 3.20: Diagrama esquemático da planta de escoamento vertical bifásico.....	77
Figura 3.21: Mapa com os padrões de escoamento para uma planta vertical de 2 polegadas. Em azul, os 66 pontos que foram medidos. ....	78
Figura 3.22: Visualização lateral para as medições realizadas para as seguintes velocidades superficiais para o gás e líquido ( $J_L$ e $J_G$ respectivamente): a) Golfadas: $J_L = 0$ m/s; $J_G = 0,3$ m/s, b) Agitado: $J_L = 0,2$ m/s; $J_G = 0,81$ m/s, c) Agitado: $J_L = 0,5$ m/s; $J_G = 0,81$ m/s, d) Bolhas dispersas: $J_L = 3$ m/s; $J_G = 0,81$ m/s. ....	79
Figura 3.23: Série temporal comparando a fração de vazio de ambos sensores, com o wire-mesh representado em vermelho e o tomógrafo óptico em azul. ....	80
Figura 4.1: Gráficos da variação do $R_{dark}$ em relação à temperatura .....	85
Figura 4.2: Diagrama do circuito de compensação de temperatura .....	85
Figura 4.3: Montagem para a medição da transmitância. ....	87
Figura 4.4: Foto da montagem para a medição da transmitância. ....	87

Figura 4.5: Cuvetas utilizadas nos testes de transmissão.....	88
Figura 4.6: Gráfico da transmitância em relação a espessura de petróleo.....	89
Figura 4.7: Montagem para a medição tomográfica.....	90
Figura 4.8: Objeto utilizado na medição tomográfica MIR.....	90
Figura 4.9: Montagem utilizada para a medição tomográfica.....	91
Figura 4.10: Imagem tomográfica reconstruída em 4,3 $\mu\text{m}$ com ar (a) e com petróleo (b).....	91
Figura 5.1: Sensor desenvolvido para medição de escoamentos bifásicos através de espalhamento óptico.....	94
Figura 5.2: Imagens obtidas a partir de uma câmera de alta velocidade, para escoamentos: a) monofásico, b) golfadas e c) bolhas dispersas.....	94
Figura 5.3: Exemplo da série temporal para os três fotodiodos, para velocidades superficiais de 0,5 m/s para o líquido e para o gás.....	96
Figura 5.4: Planta piloto de escoamento vertical.....	98
Figura 5.5: Gráficos das velocidades de referência utilizadas nas medições com o sensor óptico por espalhamento (em a) e c) ), com seus respectivos resultados em b) e d).....	99
Figura 5.6: Estimação das velocidades superficiais $J_G$ e $J_L$ utilizando o sensor óptico por espalhamento.....	101

# Lista de Tabelas

---

Tabela 2.1: Regiões do Infravermelho (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011)) .....	34
Tabela 2.2: Comparação de parâmetros entre sensores térmicos e quânticos. (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011)) .....	38
Tabela 2.3: Características dos sensores quanto o seu posicionamento na tubulação .	46
Tabela 2.4: Tabela comparativa das técnicas para investigação de escoamentos bifásicos. ....	58



## Lista de Símbolos

---

$\lambda$	Comprimento de onda
$b$	Contante de dispersão de Wien
W	Watts
T	Temperatura
$I$	Intensidade da luz transmitida
$I_0$	Intensidade da luz incidente
$R_V$	Responsividade em tensão
$R_I$	Responsividade em corrente
$\Phi_S$	Produto da potência de radiação e a área do pixel
$v_R$	Tensão de ruído do sensor
D	Detectividade
$A_S$	Área ativa do sensor
s	Distância do centro
$\theta$	Ângulo de rotação
$\alpha$	Fração de vazio
$\dot{W}$	Vazão mássica
$\dot{W}_G$	Vazão mássica do gás
$\dot{W}_L$	Vazão mássica do líquido
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica
$\dot{Q}_G$	Vazão volumétrica do gás
$\dot{Q}_L$	Vazão volumétrica do líquido
$\rho_G$	Densidade do gás

$\rho_L$	Densidade do líquido
$x$	Título de uma mistura
$\lambda_L$	Razão volumétrica de líquido
$S$	Razão de deslizamento
$V_G$	Velocidade do gás
$V_L$	Velocidade do líquido
$J$	Velocidade superficial total
$J_L$	Velocidade superficial do líquido
$J_G$	Velocidade superficial do gás
$V^H$	Dados da calibração alta
$V^L$	Dados da calibração baixa
$V_{cal}^L$	Arquivo de calibração baixa
$V_{cal}^H$	Arquivo de calibração alta
$V_{o\_cal}$	Arquivo final calibrado
$R_D$	Resistência do fotoreceptor no escuro
$V_c$	Tensão calculada
$V_m$	Tensão medida
$V_s$	Tensão de saída do sensor
$I_s$	Corrente de saída do sensor
$P_b$	Menor potência utilizada na lâmpada
$P_m$	Potência da lâmpada utilizada na medição.
dB	Decibéis
Hz	Hertz

## Lista de Acrônimos

---

ADC	Conversor analógico-digital ( <i>Analog-to-digital converter</i> )
CT	Tomografia computadorizada ( <i>Computed tomography</i> )
DAC	Conversor digital-analógico ( <i>Digital-to-analog converter</i> )
DMA	Acesso direto a memória ( <i>Direct memory access</i> )
ECT	Tomografia por capacitância elétrica ( <i>Electrical capacitance tomography</i> )
EIT	Tomografia por impedância elétrica ( <i>Electrical impedance tomography</i> )
ERT	Tomografia por resistência elétrica ( <i>Electrical resistance tomography</i> )
FIR	Infravermelho Distante ( <i>Far infrared</i> )
FPGA	<i>Field-programmable gate array</i>
FPS	Frames por segundo
FTIR	Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier ( <i>Fourier transform infrared spectroscopy</i> )
HU	Unidade Hounsfield
LED	Light Emitting Diode
MIR	Infravermelho médio ( <i>Mid infrared</i> )
NEP	Potência equivalente de ruído ( <i>Noise-equivalent power</i> )
NIR	Infravermelho próximo ( <i>Near infrared</i> )
PID	Controlador proporcional integral derivativo ( <i>Proportional-integral-derivative</i> )
SNR	Relação sinal-ruído ( <i>Signal to noise ratio</i> )

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
NUEM	Núcleo de Escoamentos Multifásicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PRH	Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná





# Capítulo 1 Introdução

---

Este capítulo de abertura apresentará a motivação e os objetivos desta tese, juntamente com uma introdução do que será abordado no decorrer do trabalho.

## 1.1 Motivação

Em diversas atividades industriais, onde linhas de escoamentos estão presentes em várias etapas da produção, conduzindo desde gás ou vapor de água, até líquidos e misturas de substâncias, como acontece, por exemplo, na indústria de óleo e gás, indústrias químicas em geral, e plantas de geração de energia, é de fundamental importância o monitoramento e o conhecimento prévio do comportamento desses fluidos nas tubulações e equipamentos situados ao longo da linha de escoamento.

Na produção de petróleo, é comum encontrar-se escoando pelos dutos, uma mistura que pode conter duas ou mais fases de óleo, gás e água, assumindo diversos padrões de escoamentos com configurações espaciais distintas(AZZOPARDI, 2006). Em muitos casos o tipo de escoamento determina a eficiência e segurança dos processos e equipamentos onde ocorrem. Em função disso, o desenvolvimento de técnicas capazes de realizar a medição experimental de parâmetros de escoamentos como o padrão de escoamento ou vazões, juntamente com o monitoramento em tempo real, são de grande importância para o controle e otimização de processos e projeto de equipamentos.

Nos últimos anos, várias técnicas foram desenvolvidas para fazer a investigação de diversas substâncias industriais, no entanto, no caso específico do petróleo, poucas técnicas foram desenvolvidas devido a suas particularidades, como por exemplo, sua alta viscosidade que pode impossibilitar o uso de técnicas intrusivas, e também, por ser uma substância isolante não é possível o uso de diversas técnicas de medição por impedância. Também, pelo fato do petróleo ser opaco no espectro de luz visível, não permite o uso de imageamento por câmeras de vídeo convencionais. No entanto, a partir de experimentos ópticos espectroscópicos, analisou-se que em algumas faixas do

espectro o petróleo possui uma relativa transparência, o que permite a sua análise utilizando técnicas ópticas simples, bem como de imageamento tomográfico(VENDRUSCOLO et al., 2015a).

Imageamento tomográfico tem sido amplamente utilizado há vários anos na medicina com o uso do tomógrafo de raios-x, que é uma técnica não intrusiva e de grande confiabilidade. Contudo, nos últimos anos, o conceito de imageamento tomográfico não está mais restrito somente à área médica, esta técnica também vem sendo empregada com sucesso e confiabilidade em processos industriais. A maior limitação no uso do tomógrafo de raios-x, é o seu alto custo e tamanho, além de ser necessário o uso de blindagens específicas contra a radiação emitida. Com isso, dependendo da situação, tem-se pesquisado o uso de tomógrafos ópticos, que é uma técnica de baixo custo e compacta, que pode ser adaptada para diversas aplicações, bastando apenas escolher um comprimento de onda específico apropriado para a substância em questão.

A partir disso, decidiu-se por utilizar técnicas ópticas para fazer a investigação do petróleo. Neste trabalho, será abordado o desenvolvimento de dois tomógrafos ópticos na faixa do infravermelho próximo (950 nm) utilizado para a investigação de escoamentos água-ar, com o fim de validar a prova de conceito da técnica, além de uma técnica óptica utilizando laser. Juntamente, também serão apresentados testes no infravermelho médio com o petróleo, a fim de determinar a viabilidade da investigação dessa substância, tornando possível o desenvolvimento de técnicas que possibilitarão uma análise detalhada de escoamentos envolvendo petróleo, o que não é possível atualmente.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de estudos sobre técnicas ópticas para a investigação de escoamentos bifásicos, onde foram desenvolvidos dois tomógrafos ópticos na faixa de 950 nm para a investigação de escoamentos bifásicos. Um tomógrafo 16 x 16 canais (16 LEDs e 16 fotodiodos) foi desenvolvido para ser utilizado em tubulações de uma polegada. O segundo tomógrafo óptico é para o uso em tubulações de 2 polegadas, com o número de canais incrementado para 32 x 32. O desenvolvimento dos tomógrafos ópticos foi dividido entre as seguintes tarefas:



- Desenvolvimento do *hardware* do tomógrafo, consistindo nas partes emissoras e receptoras;
- Desenvolvimento de *firmware* responsável pelo controle de uma placa de aquisição de dados;
- Desenvolvimento de um *software* responsável pelo controle do sistema bem como pelos processamentos de imagens tomográficas on-line;
- Desenvolvimento de um algoritmo responsável pela reconstrução das imagens tomográficas off-line;
- Realização de testes em escoamentos bifásicos horizontal e vertical utilizando água e ar como fases;
- Realização de testes iniciais de escoamento vertical água-areia com o tomógrafo de uma polegada.

Também foi desenvolvido uma técnica óptica utilizando laser, que permitiu a extração de importantes parâmetros do escoamento através da análise do espalhamento óptico do feixe emitido pelo laser.

Juntamente com o desenvolvimento das técnicas anteriores, foram realizados testes na região do infravermelho médio, com o intuito de verificar a viabilidade do uso dessa faixa do espectro para a análise do óleo cru. Para isso, foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- Medição da transmitância máxima do infravermelho médio no petróleo,
- Realização de ensaios tomográficos utilizando objetos opacos imersos no petróleo, utilizando um protótipo simples de tomógrafo.



# Capítulo 2 Revisão Bibliográfica

---

Este capítulo apresentará os conhecimentos necessários e utilizados no desenvolvimento dessa tese, onde serão abordados os temas relativos ao estudo do infravermelho, fundamentos da tomografia e estudos espectroscópicos do petróleo no infravermelho.

## 2.1 Estudo do infravermelho

Radiação infravermelha é uma radiação eletromagnética em que seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) varia entre a luz visível ( $\lambda = 380$  nm até 780 nm) e a radiação de micro-ondas ( $\lambda = 1$  mm – 1 m). Essa radiação situa-se no domínio térmico, com isso, medindo o comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida por um corpo, é possível saber qual é a sua temperatura (BUDZIER; GERLACH, 2011). Como exemplo disso, o olho humano é adaptado para ter sua sensibilidade mais alta na faixa de  $\lambda = 550$  nm, que corresponde à temperatura superficial do sol (aproximadamente 5700 K). Essa relação pode ser calculada pela Lei de Wien pela seguinte equação:

$$\lambda_{\max} = \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{T}} \quad (2.1)$$

onde:  $\lambda_{\max}$  é o comprimento de onda em metros com a máxima intensidade de radiação eletromagnética;  $\mathbf{b}$  é a constante de dispersão de Wien, que é  $2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m.K}$  e  $\mathbf{T}$  é a temperatura.

No entanto, em temperatura ambiente, a irradiação térmica dos corpos tem um comprimento de onda em torno de 10  $\mu\text{m}$ . Com isso, a visualização da radiação emitida pelos corpos nessa temperatura só é possível através de aparelhos específicos que trabalham na faixa do infravermelho.

Devido à radiação infravermelha compreender uma faixa bastante ampla do espectro, ela é dividida em regiões menores, conforme podemos ver na tabela 2.1:

Tabela 2.1: Regiões do Infravermelho (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011))

Região	Comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ]	Temperatura [K]	Observações
Infravermelho próximo (NIR)	0,9 – 1,5	3222 – 1933	Emissão de corpos quentes ( $>1000\text{ }^\circ\text{C}$ )
Infravermelho médio (MIR)	1.5 – 8	1932 – 362	Emissão de corpos quentes ( $>300\text{ }^\circ\text{C}$ )
Infravermelho distante (FIR)	8 – 13	361 – 223	Emissão de corpos em temperatura ambiente

Dentre as vantagens no uso das técnicas que utilizam a radiação infravermelha, podemos citar:

- Medição sem contato permitindo o uso em lugares de difícil acesso, ou em peças energizadas,
- Medições em alta velocidade devido ao fato da radiação se propagar na velocidade da luz,
- Medições pontuais, sem interferência do ambiente.

O espectro de transmitância de uma substância funciona como uma impressão digital, ou seja, é único para cada substância (CSELE, 2004). Isso faz com que a análise espectral de um material revele a sua composição. Com isso, nos últimos anos estão sendo desenvolvidas diversas tecnologias capazes de fazer a análise específica para diversos materiais. No caso do espectro infravermelho, temos como exemplo, o seu uso em áreas, como:

- Análise de solos: Onde através da análise espectroscópica é possível fazer a análise do carbono e/ou nitrogênio (BELLON-MAUREL; MCBRATNEY, 2011; CHRISTY, 2008; MICHEL et al., 2009).
- Análise de motores de combustão: Medição da concentração de gases (MULROONEY et al., 2007, 2008; WRIGHT et al., 2005, 2010).
- Análise de leite: Medidas de parâmetros como a composição mineral, proteínas, entre outros (CALAMARI; GOBBI; BANI, 2016; DE MARCHI et al., 2014; MCDERMOTT et al., 2016).

- Análise de cerveja: Medidas da concentração de álcool e dos extratos (CERNUDA et al., 2016; IÑÓN; GARRIGUES; DE LA GUARDIA, 2006).

Para o desenvolvimento de equipamentos que façam essa análise, é necessário fazer inicialmente a seleção dos componentes que irão compor o sistema. Essa escolha é realizada com base nos parâmetros dos componentes ópticos, que serão detalhados a seguir.

### 2.1.1 Parâmetros dos sensores ópticos

É comum descrever sensores ópticos através dos seus parâmetros. Abaixo, esses parâmetros serão explicados.

#### 2.1.1.1 Responsividade

A responsividade ( $R$ ) de um detector é a relação entre os sinais de saída e entrada do detector. A responsividade pode ser dada em volts ou amperes por watt. Conforme mostram as equações abaixo (BUDZIER; GERLACH, 2011):

Responsividade em tensão:

$$R_V = \frac{\Delta V_S}{\Delta \Phi_S} [\text{V/W}] \quad (2.2)$$

Responsividade em corrente:

$$R_I = \frac{\Delta I_S}{\Delta \Phi_S} [\text{A/W}] \quad (2.3)$$

sendo  $\Phi_S$  o produto da potência de radiação e a área do pixel,  $V_S$  a tensão de saída e  $I_S$  a corrente de saída do sensor.

A responsividade de cada detector é relativo a um comprimento de onda específico, essa dependência se chama *sensibilidade espectral* ou *responsividade espectral* do detector.

### 2.1.1.2 Potência equivalente de ruído (Noise Equivalent Power - NEP)

Levando em consideração que a radiação incidente no sensor gera uma relação sinal-ruído na saída do sensor, a NEP determina a menor potência que se consegue detectar. A equação é vista abaixo:

$$NEP = \frac{v_R}{\Delta V_S} \Delta \Phi_S [\text{W}] \quad (2.4)$$

ou,

$$NEP = \frac{v_R}{R_V} [\text{W}] \quad (2.5)$$

onde  $v_R$  é a tensão do ruído do sensor.

### 2.1.1.3 Detectividade ( $D$ )

É uma variável derivada do NEP, ela caracteriza o SNR (*signal-to-noise ratio*).

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (2.6)$$

Usando a detectividade é possível comparar qualitativamente diferentes sensores. Detectividade alta corresponde a sensores melhores. Nesse caso, é utilizada a detectividade específica  $D^*$ :

$$D^* = \frac{\sqrt{A_S}}{NEP} = \left[ \frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}} \right] \quad (2.7)$$

onde  $A_S$  é a área ativa do sensor.

## 2.1.2 Sensores infravermelho

Sensores infravermelho são divididos em dois grupos: Sensores térmicos e sensores quânticos.

### 2.1.2.1 Sensores térmicos:

Sensores térmicos funcionam através do efeito Seebeck ou efeito termoelétrico. Esse efeito gera uma diferença de potencial em uma junção de dois condutores de diferentes materiais em diferentes temperaturas, esse componente é comumente conhecido como termopar. Um exemplo de detector térmico utilizado para medir radiações infravermelhas é a termopilha. Uma termopilha é a união de diversos termopares ligados em série. Um diagrama do funcionamento de um sensor térmico é visto na figura 2.1:

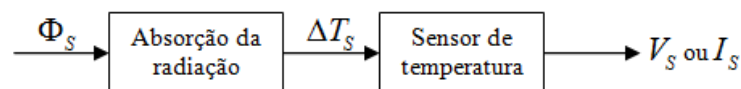


Figura 2.1: Princípio de funcionamento de detectores térmicos (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011))

Normalmente, sensores térmicos são fáceis de utilizar por não necessitarem de resfriamento e possuem relativo baixo custo, no entanto, por sua resposta ser diretamente proporcional a mudança de temperatura do elemento sensor, esses dispositivos possuem um tempo de resposta bastante alto, impossibilitando seu uso em aplicações em que é necessária a aquisição de dados em alta velocidade.

### 2.1.2.2 Sensores quânticos

Sensores quânticos funcionam através do efeito fotoelétrico, ou seja, devido à excitação de um elétron por um quantum de energia eletromagnética. Esses dispositivos são fabricados utilizando semicondutores, trabalhando em um comprimento de onda específico que depende do material utilizado na sua fabricação. Eles são divididos em dois subgrupos (YOUNG, 1998):

Efeito fotoelétrico externo: A luz incidente excita o elétron até o ponto em que este escapa completamente da superfície irradiada, do mesmo modo que uma quantidade de energia suficiente consegue libertar um elétron ligado num átomo.

Efeito fotoelétrico interno: A energia do quantum não basta para libertar o elétron da superfície do detector, mas é suficiente para excitar o elétron até o ponto em que este modifica a condutividade elétrica do material. Como exemplo de componente que utiliza esse princípio existe o fotocondutor. Quando a área ativa é exposta a radiação, aumenta o número de portadores, diminuindo a resistência.

Um diagrama do funcionamento de um sensor quântico é visto na figura 2.2:

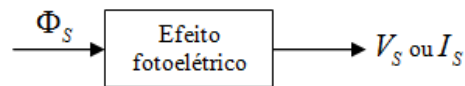


Figura 2.2: Princípio de funcionamento de detectores quânticos. (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011))

### 2.1.2.3 Comparação entre sensores térmicos e quânticos

Sensores térmicos e quânticos podem possuir grandes diferenças em seus parâmetros básicos quando são utilizados na faixa do infravermelho. Na tabela 2.2, podem-se ver suas principais diferenças.

Tabela 2.2: Comparação de parâmetros entre sensores térmicos e quânticos. (adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011))

Parâmetro	Sensor Térmico	Sensor Quântico
Responsividade		
Detectividade $D^*$	<p>Dependência no comprimento de onda determinada pela absorção da radiação.</p> <p>Variação na <math>D^*</math> é insignificante com o resfriamento.</p>	<p>Faixa de sensibilidade no comprimento de onda limitado pelos semicondutores usados.</p> <p><math>D^*</math> possui grande dependência ao resfriamento.</p>
Operação	Não necessita resfriamento.	Resfriamento é recomendado devido ao emprego de semicondutores.
Frequência	Até algumas centenas de Hz.	Até GHz.

onde:  $\lambda_c$  = comprimento de onda com maior intensidade

### 2.1.3 Espectroscopia do petróleo na região do infravermelho

Conforme citado anteriormente, o espectro de transmitância das substâncias é único, funcionando assim como uma impressão digital. Dessa forma, fazendo a escolha apropriada do comprimento de onda, é possível fazer a análise de uma ou mais



substâncias (CAREY et al., 2000; HEISE et al., 2013). Para o início dos estudos sobre a transmitância do petróleo no infravermelho, foram realizadas medições através da técnica espectroscópica por transformada de Fourier (FTIR - *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) para cinco substâncias, mostradas na figura 2.3.

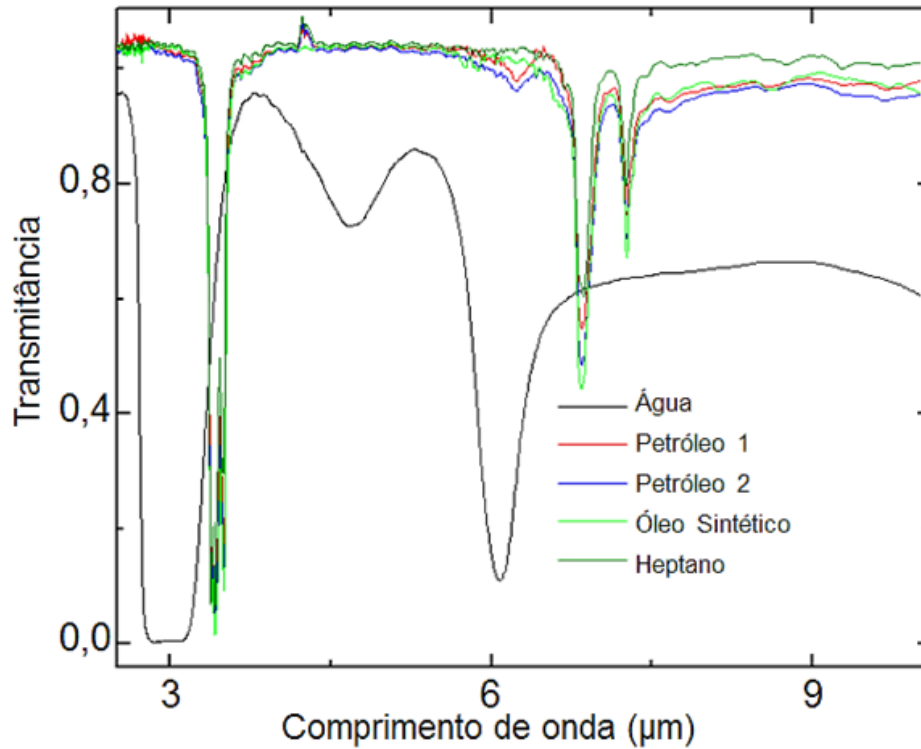


Figura 2.3: Medidas de FTIR para as cinco substâncias indicadas no gráfico (PATYK, 2015).

Como podem ser analisados na figura 2.3, todos os hidrocarbonetos utilizados nesse levantamento possuem uma transmitância equivalente no espectro do infravermelho.

Especificamente para o petróleo, que é a substância de interesse desse trabalho, foi gerado o gráfico com a transmitância normalizada apresentado na figura 2.4 (PATYK, 2015).

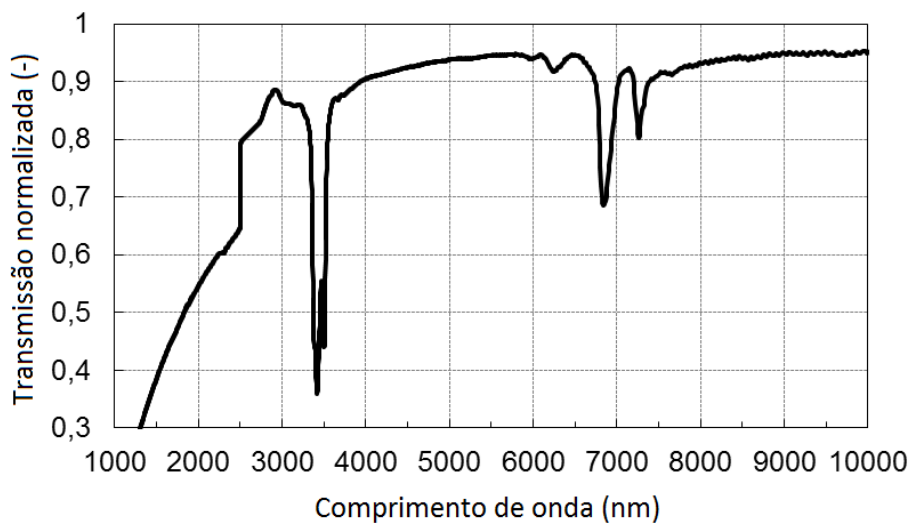


Figura 2.4: Transmitância do petróleo no infravermelho.

A partir desse gráfico, pode-se perceber que existem três janelas de oportunidades, a primeira entre 2,5 até 3,2, a segunda entre 3,6 até 6,5  $\mu\text{m}$  e a terceira entre 7,5 até 10  $\mu\text{m}$  em que é possível fazer a análise do petróleo utilizando componentes ópticos que trabalhem na faixa do infravermelho médio e distante. Um trabalho preliminar foi desenvolvido para demonstrar a capacidade de detecção de bolhas de ar e água fluindo no petróleo utilizando uma câmera térmica que opera na faixa de 8 a 12  $\mu\text{m}$  na qual foi possível visualizar ambas as bolhas em uma cuveta com 1,2 mm de espessura com petróleo (DUTRA et al., 2014).

## 2.2 Fundamentos da tomografia

### 2.2.1 Introdução

A tomografia computadorizada possui grande importância na área médica, sendo utilizada como um exame complementar de diagnóstico por imagem. Nesse caso, a tomografia é realizada utilizando raios-x, e é usada para apresentar uma imagem que representa uma fatia do corpo do paciente. No entanto, nos últimos anos, o conceito de imageamento tomográfico não está mais restrito somente à área médica, esta técnica também vem sendo empregada com sucesso e confiabilidade em processos industriais (EWERT et al., 2012; WEI; LEBLON; ROCQUE, 2011).

A tomografia é uma técnica complexa, onde os dados não podem ser interpretados diretamente a partir da aquisição. Antes, faz-se necessário o uso de

técnicas de reconstrução de imagens que resultarão em uma imagem da seção transversal do objeto de estudo. Na figura 2.5, é exemplificado o processo de tomografia computadorizada por raios-x de quarta geração, onde a medição é feita utilizando uma fonte de raios-x e uma matriz de detectores. Esse conjunto emissor-receptor rotaciona em torno do paciente adquirindo as projeções em diversos ângulos até completar  $360^\circ$ . Essa rotação pode ser feita mecanicamente, nos casos dos tomógrafos até a quarta geração, ou então através de bobinas defletoras que guiam o feixe de raios-x em torno do paciente, como nos casos de tomógrafos de quinta geração (*Electron Beam Tomography*) (POPESCU, 2009). O processo da aquisição de projeções gera uma matriz de dados chamada sinograma. A partir do qual, com o uso de técnicas de reconstrução de imagens, uma imagem tomográfica do paciente é reconstruída. No caso específico de imagens médicas, a reconstrução é feita utilizando uma escala de cinza que utiliza a unidade Hounsfield (HU) que varia de acordo com tipo de substância medido, sendo assim possível de distinguir órgãos internos e ossos.

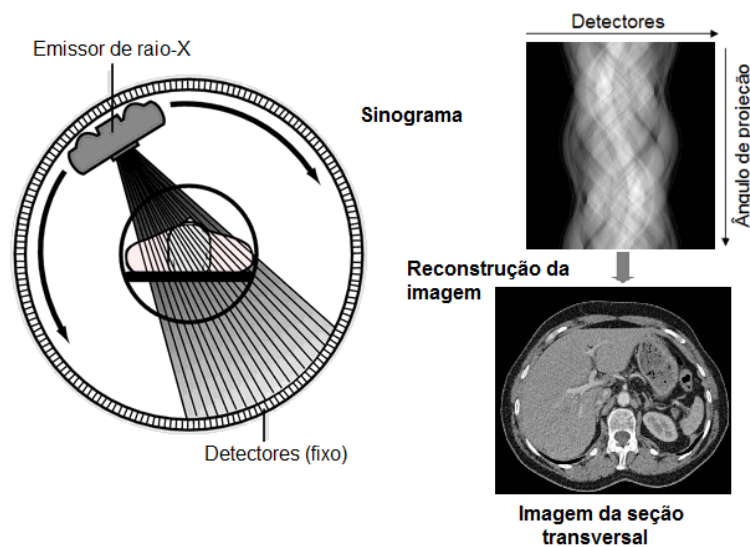


Figura 2.5: Processos da tomografia computadorizada.

### 2.2.2 Tomografia computadorizada óptica

O princípio da tomografia óptica é semelhante da tomografia por raios-x. A diferença fica por conta do conjunto emissor-receptor, que nesse caso é feito através de um conjunto de fontes luminosas e fotorreceptores ao redor da área de interrogação, conforme visto na figura 2.6.

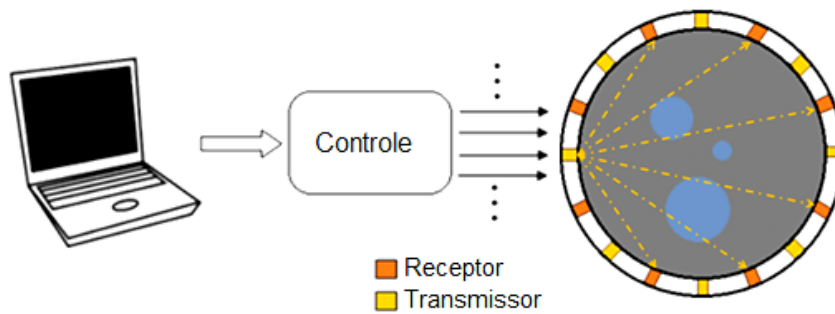


Figura 2.6: Esquema básico da tomografia óptica.

Uma vantagem da tomografia óptica é não possuir partes mecânicas e ser composta por componentes de tamanho reduzido, o que torna possível o desenvolvimento de equipamentos compactos e mecanicamente mais simples. No caso desse tipo de tomografia, a rotação é feita através da ativação sequencial dos LEDs até completar uma rotação em torno da área de interrogação. Cada vez que um LED é ativado, é realizada a aquisição de todos os fotorreceptores, formando uma matriz de dados chamada sinograma. Como esses componentes ópticos, em sua maioria, possuem um tempo de resposta na ordem de nano segundos, é possível realizar a medição tomográfica em alta velocidade.

### 2.2.3 Reconstrução de imagens

O método de tomografia utilizado neste trabalho é o de transmissão, ou seja, as intensidades dos sinais adquiridos dependem da transmitância do material em relação à radiação emitida sobre ele. Assim a radiação sofre uma atenuação exponencial proporcional aos coeficientes de atenuação do objeto, obedecendo a lei de Beer-Lambert.

#### 2.2.3.1 Transformada de Radon

Os trabalhos de reconstrução de imagens foram iniciados em 1917 pelo matemático austríaco Johann Radon (RADON, 1986), que desenvolveu a técnica conhecida como Transformada de Radon. A Transformada de Radon é uma técnica utilizada para criar matematicamente o sinograma de um objeto  $\mu(x,y)$  em um plano cartesiano como mostra a figura 2.7.

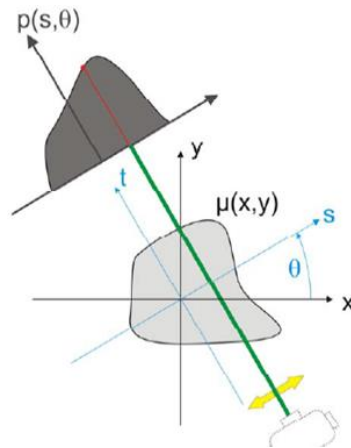


Figura 2.7: Modelo utilizado para a criação de cada projeção.

A transformada de Radon leva em consideração que os feixes emissores são paralelos e que possui um receptor para cada emissor (princípio do tomógrafo de primeira geração). Essa projeção é realizada em vários ângulos até formar uma rotação ao redor do objeto. Dessa forma, é calculada a integral de linha de cada feixe que atravessa o objeto para cada ângulo de rotação do tomógrafo.

Esse processo é feito utilizando a equação abaixo:

$$p(s, \theta) = R\{\mu(x, y)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(s - x \cdot \cos \theta - y \cdot \sin \theta) \mu(x, y) dx dy \quad (2.8)$$

onde  $s$  é a distância do centro,  $\theta$  é o ângulo de rotação e  $p(s, \theta)$  é a intensidade do sinal em determinado ângulo e distância.

Com isso, encontramos como resultado o sinograma mostrado na figura 2.8, onde as linhas são os ângulos de rotação e as colunas são os feixes, ou seja, cada pixel é um detector específico.

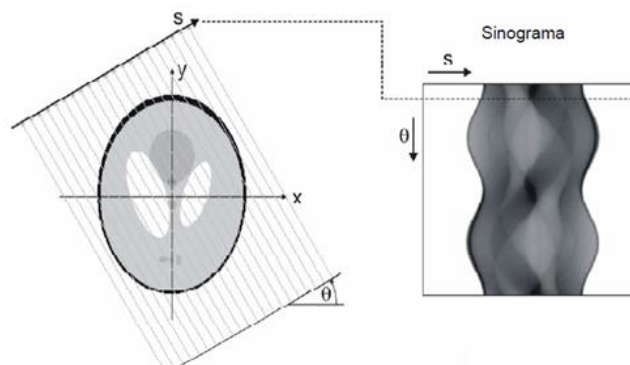


Figura 2.8: Sinograma gerado a partir da Transformada de Radon.

Para reconstruir a imagem a partir do sinograma, é utilizada a função inversa, chamada de Transformada Inversa de Radon. Essa técnica não é prática de ser implementada e também não é a mais aconselhada para ser usada nesse trabalho, tendo em vista que cada LED possui sua emissão na forma de leque, ou seja, mais de um receptor recebe o estímulo de cada emissor. Com isso, esse trabalho utilizou um método algébrico para realizar a reconstrução de imagens, utilizando uma matriz de pesos que representa os raios emitidos pelos LEDs. Esse método será explicado na sequência.

### 2.2.3.2 Método algébrico

Enquanto a Transformada inversa de Radon considera que os feixes emissores são retos e paralelos, o método algébrico (*Backprojection*) consiste em gerar uma matriz de pesos que representa os pixels da imagem pelo qual os feixes emissores passam. A matriz de pesos é específica para cada tomógrafo, pois ela leva em consideração a posição espacial dos emissores e receptores. Dessa forma, ela gera uma matriz de pesos para cada feixe do conjunto emissor-receptor, o feixe é calculado utilizando a função da reta e a posição de cada elemento do conjunto. Identificando cada pixel pelo qual o feixe atuará, como pode ser visto na figura 2.9

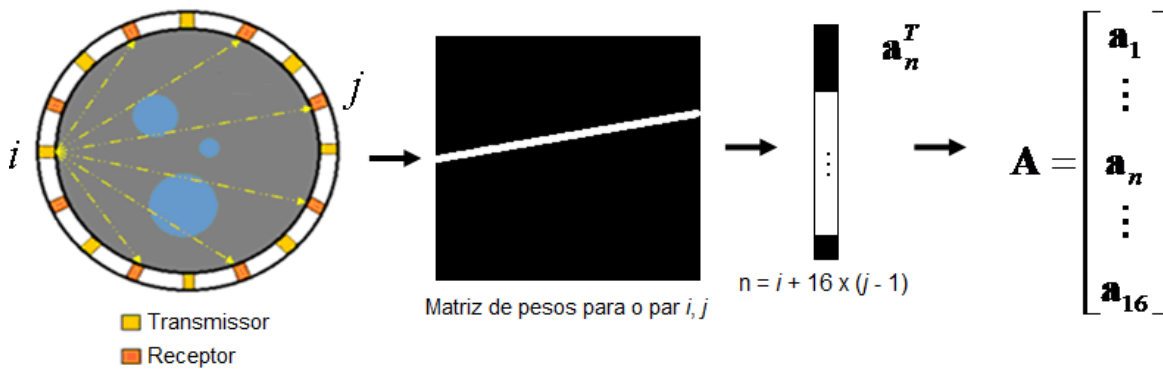


Figura 2.9: Matriz  $A$  no algoritmo de *backprojection* para imagens com resolução de 16 x 16.

Com isso, a reconstrução de imagens é realizada usando o método de *Backprojection*, que pode se formulado na forma de matriz como:

$$r_u = A^T e \tag{2.9}$$

onde  $r_u$  é a imagem reconstruída sem filtro,  $e$  é a matriz de sinograma e  $A$  é o operador de *backprojection* (matriz de transformação), em que cada linha  $a_n$  em  $A$  representa a matriz de pesos relativos a um feixe emissor, conforme apresentado na figura 2.9.

A matriz de operação  $\mathbf{A}$  foi calculada para todos os pares ópticos emissor-receptor. Os índices de refração dos materiais podem ser considerados no cálculo do caminho óptico para uma melhor precisão na reconstrução das imagens. Porém como os índices de refração do acrílico e a da água são próximos, eles não foram considerados para facilitar o processamento dos dados. O caminho óptico com refração será detalhado no decorrer dessa tese, e pode ser visto na figura 3.18.

Como o algoritmo de *Backprojection* geralmente reconstrói imagens bastante suavizadas, é recomendado o uso de filtros. O algoritmo de *Backprojection* filtrado pode ser implementado incluindo um passo de filtragem após o passo de *Backprojection*. A imagem filtrada, ordenada como um vetor  $\mathbf{r}$  é obtida da seguinte forma:

$$\mathbf{r} = \mathbf{W}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{r}_u \quad (2.10)$$

onde  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  é o inverso da matriz de transformação (representação espacial do filtro rampa (KAK; SLANEY, 1998)), e  $\mathbf{W}$  é a matriz suavizadora utilizada para reduzir as altas frequências do filtro rampa.

Caso a imagem reconstruída apresente um nível elevado de ruído, é possível fazer a redução utilizando o parâmetro de regularização  $\lambda$ , que fazendo a escolha apropriada de seu valor, nos fornece uma melhora no controle do ruído. A equação para a reconstrução regularizada é:

$$\mathbf{f} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{e} \quad (2.11)$$

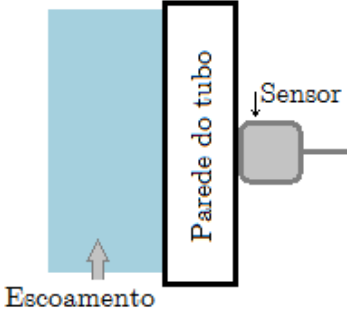
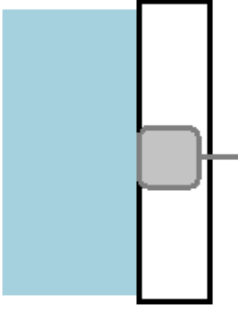
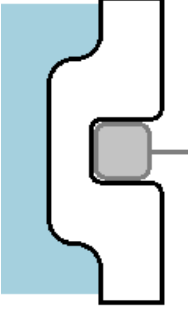
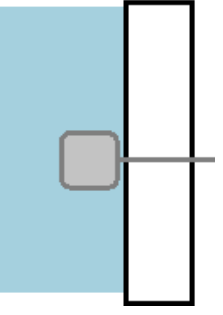
onde  $\mathbf{f}$  é a imagem reconstruída regularizada e  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade.

### 2.3 Técnicas para medição de escoamentos bifásicos

Devido à grande importância em entender o comportamento de escoamentos bifásicos, com o tempo foram surgindo algumas técnicas que tem por objetivo detalhá-lo de alguma forma. Cada técnica possui características bem distintas, podendo ser classificadas de acordo com vários parâmetros, tais como: resolução espacial e temporal, tipo de material onde podem ser utilizados, e se o sensor é intrusivo e/ou invasivo ou não (ver tabela 2.3). Devido a essas características, deve-se salientar que cada técnica não pode ser utilizada de forma universal, sendo que cada uma delas possuem vantagens

que podem ser importantes para uma aplicação, mas que pode acabar inviabilizando seu uso em outra.

Tabela 2.3: Características dos sensores quanto o seu posicionamento na tubulação

Característica	Não invasiva	Invasiva
Não intrusiva	 <p>Diagrama de sensor não invasivo e não intrusivo: um sensor externo mede a parede do tubo onde ocorre o escoamento. O sensor é externo ao tubo, e a parede do tubo é rotulada como 'Parede do tubo'. O escoamento é indicado por uma seta apontando para cima, rotulado como 'Escoamento'.</p>	 <p>Diagrama de sensor não invasivo e invasivo: um sensor externo mede diretamente o fluido dentro do tubo.</p>
Intrusiva	 <p>Diagrama de sensor intrusivo e não invasivo: um sensor interno mede a parede do tubo.</p>	 <p>Diagrama de sensor intrusivo e invasivo: um sensor interno mede diretamente o fluido dentro do tubo.</p>

A seguir, será feita uma breve explanação sobre escoamentos bifásicos, e na sequência serão explicadas algumas técnicas de investigação desenvolvidas nos últimos anos.

### 2.3.1 Escoamento bifásico

#### 2.3.1.1 Definições

Escoamento bifásico é uma classe do escoamento multifásico e tem como definição geral o escoamento de duas fases em um meio, que podem ser em dutos, equipamentos, meios porosos, entre outros.

As fases podem ser de três tipos, classificadas abaixo (FALCONE; HEWITT; ALIMONTI, 2009):

- i. Sólida: Composta normalmente por partículas relativamente pequenas. Essa fase é incompressível e suas interfaces com outras fases não são



deformáveis. Uma substância que ocorre com frequência nessa fase na indústria petrolífera é a areia,

- ii. Líquida: Essa fase é relativamente não compressível, mas suas interfaces com outras fases são deformáveis. Exemplos comuns dessa fase são água e óleos em geral,
- iii. Gasosa: Composta por substâncias compressíveis e deformáveis.

A importância do desenvolvimento de técnicas para medições de escoamentos é realizar a extração de parâmetros de interesse. Alguns parâmetros importantes na análise de escoamentos bifásicos gás-líquido (foco dessa tese) serão apresentados a seguir, onde farão parte da nomenclatura os seguintes subscritos:  $_G$  para o gás e  $_L$  para líquido.

a) Fração de vazio

Cada uma das fases (substâncias) ocupam uma parte da área da seção transversal  $A_T$  do tubo, a quantidade dessa substância nessa determinada seção transversal, é chamada de fração de fase. Em escoamentos bifásicos gás-líquido, um parâmetro utilizado é da fração de vazio, que é uma propriedade estatística que representa a probabilidade da existência de gás em uma determinada parte do escoamento.

$$\alpha = \frac{A_G}{A_T} = \frac{1 - A_L}{A_T} \quad (2.12)$$

onde  $A_G$  é a área ocupada pelo gás, e  $A_L$  é a área ocupada pelo líquido na seção transversal.

b) Vazão total

Indica a vazão em massa ( $\dot{W}$ ) ou em volume ( $\dot{Q}$ ) em função do tempo, são descrito pelas seguintes equações:

$$\dot{W} = \dot{W}_G + \dot{W}_L \quad (2.13)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_G + \dot{Q}_L \quad (2.14)$$

onde:

$$\dot{Q}_G = \frac{\dot{W}_G}{\rho_G} \quad (2.15)$$

$$\dot{Q}_L = \frac{\dot{W}_L}{\rho_L} \quad (2.16)$$

sendo  $\rho_G$  e  $\rho_L$  respectivamente, a densidade do gás e do líquido.

c) Título

O título de uma mistura gás-líquido é a relação entre a vazão total mássica de gás e a vazão total mássica do escoamento, conforme apresentado abaixo:

$$x = \frac{\dot{W}_G}{W} \quad (2.17)$$

d) Razão volumétrica de líquido (*liquid hold-up*)

É a relação entre a vazão volumétrica de líquido e a vazão volumétrica total do escoamento.

$$\lambda_L = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}} \quad (2.18)$$

Para escoamentos bifásicos homogêneos, ou seja, que a velocidade do gás e do líquido ( $V_G$  e  $V_L$  respectivamente) são iguais, pode-se considerar uma relação entre a fração de vazio e a razão volumétrica de líquido conforme apresentado abaixo:

$$\alpha = 1 - \lambda_L \quad (2.19)$$

Entretanto, escoamentos bifásicos homogêneos é uma situação idealizada, pois dificilmente ocorre em situações reais.

e) Razão de deslizamento (*slip ratio*)

É a razão entre a velocidade do gás e a velocidade do líquido

$$S = \frac{V_G}{V_L} \quad (2.20)$$

f) Velocidade de fase ou superficial

Velocidade de fase ou velocidade superficial é a relação entre a vazão volumétrica de cada fase dividido pela área do tubo, ou seja, é a velocidade específica da fase como se ela estivesse escoando sozinha no tubo.

$$J_G = \alpha \cdot V_G = \alpha \cdot \frac{\dot{Q}_G}{A_G} = \frac{\dot{Q}_G}{A_T} \quad (2.21)$$

$$J_L = (1-\alpha) \cdot V_L = (1-\alpha) \cdot \frac{\dot{Q}_L}{A_L} = \frac{\dot{Q}_L}{A_T} \quad (2.22)$$

A partir desses parâmetros, pode-se calcular a velocidade superficial total:

$$J = J_G + J_L \quad (2.23)$$

g) Relação fundamental do escoamento bifásico

Com as variáveis específicas do escoamento bifásico definidas, pode-se deduzir a relação fundamental do escoamento bifásico, que representa a razão entre os fluxos de massa, líquido e gás:

$$\frac{\dot{W}_L}{\dot{W}_G} = \frac{\rho_L}{\rho_G} \cdot \frac{V_L}{V_G} \cdot \frac{A_L}{A_G} \quad (2.24)$$

Recorrendo-se às definições descritas anteriormente, pode-se escrever na forma:

$$\frac{(1-x)}{x} = \frac{\rho_L}{\rho_G} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \quad (2.25)$$

### 2.3.1.2 Padrões de escoamento bifásico

Padrões de escoamentos são as distribuições espaciais das substâncias no escoamento. São determinados por diversos fatores (WHALLEY, 1996), como: vazões dos fluidos, condições de operação (temperatura, pressão, gravidade, etc), características do meio onde escoam, propriedades dos fluidos, diâmetro e inclinação da tubulação. Esses fatores influenciam o comportamento e a forma das interfaces entre as fases, formando vários tipos de padrões de escoamentos. Normalmente, os escoamentos bifásicos água-ar são classificados em quatro padrões de escoamentos (BARNEA et al., 1985; TAITEL; DUKLER, 1976) para o escoamento horizontal (figura 2.10a), divididos em: anular, golfadas, estratificado e bolhas dispersas. Para o escoamento vertical (WHALLEY, 1987) (figura 2.10b), os quatro padrões de escoamentos são divididos em: Bolhas dispersas, golfadas, agitado e anular. Conforme discutido anteriormente, os padrões de escoamentos dependem de diversos fatores bem como das substâncias que estão escoando. Como exemplo de padrão de escoamento bifásico líquido-líquido (água-óleo), podemos citar os desenvolvidos em (PIETRZAK, 2014), onde são identificados dez padrões de escoamentos distintos, devido ao fato da mistura de água com óleo gerar emulsões, fenômeno que não ocorre nos escoamentos água-ar.

Os padrões golfadas e agitado em escoamentos água-ar, que serão mais utilizados nesse trabalho, são descritos abaixo:

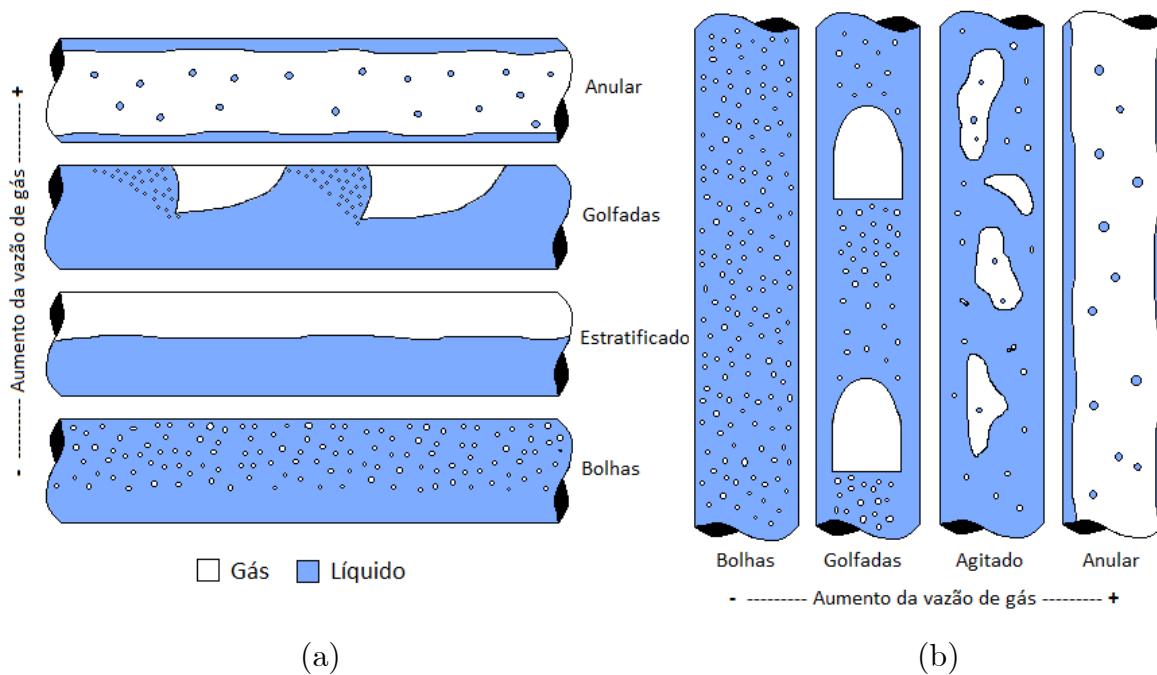


Figura 2.10: Padrões de escoamento bifásico ar-água em (a) horizontal (b) vertical.

a) Padrão de escoamento golfadas em dutos horizontais

Esse padrão de escoamento, também chamado de escoamento intermitente ou, em inglês, *slug flow* e *plug flow* é caracterizado pela alternância entre grandes bolhas chamadas de bolhas de Taylor, localizadas na parte superior do tubo, onde se concentram a maior parte da fração de gás desse escoamento, e pistões de líquido, localizados entre duas bolhas consecutivas.

b) Padrões de escoamento golfadas e agitado em dutos verticais

Escoamentos em golfadas em dutos verticais possuem características semelhantes aos dutos horizontais, com a diferença de que nesse caso as bolhas de Taylor geralmente são simétricas ao eixo da tubulação, e em alguns casos podem oscilar, descrevendo um movimento helicoidal. Escoamento no padrão agitado (*churn flow*) é semelhante ao escoamento em golfadas, porém mais caótico. Frequentemente as bolhas se quebram e coalescem com a seguinte.

### 2.3.2 Imageamento de escoamento bifásico

#### 2.3.2.1 Técnicas ópticas

Técnicas ópticas englobam uma ampla gama de sensores, que podem fazer uso da radiação (visível, infravermelha ou ultravioleta) diretamente através da medição da luz emitida por fontes como LEDs ou laser, por exemplo, assim como essa radiação também pode ser conduzida em guias como fibras ópticas, e serem medidas através do espalhamento, reflexão, transmissão, entre outros. Do lado oposto das fontes emissoras, são posicionados receptores que podem ser únicos, como fotodiodos, ou matrizes de receptores, como no caso de CCDs (JAMALUDIN et al., 2016a, 2016b). Essas técnicas podem ser divididas em técnicas simples, que realizam a análise do escoamento através da leitura direta do sensor, e técnicas complexas, em que são necessários processamentos de dados antes da extração de informações do sensor. A seguir será apresentado um exemplo de cada uma dessas técnicas.

Uma técnica simples híbrida (medição de impedância e óptico) para a investigação de escoamentos bifásicos e trifásicos foi apresentado por (WOLFFENBUTTEL et al., 2002). O esquema básico é visto na figura 2.11, onde são utilizados 3 conjuntos ópticos LED-fotodiodo no comprimento de onda de 940 nm

utilizados para diferenciar as fases gás-líquido (ar-água ou ar-decano), e também uma sonda de impedância para diferenciar as fases líquido-líquido (água-decano).

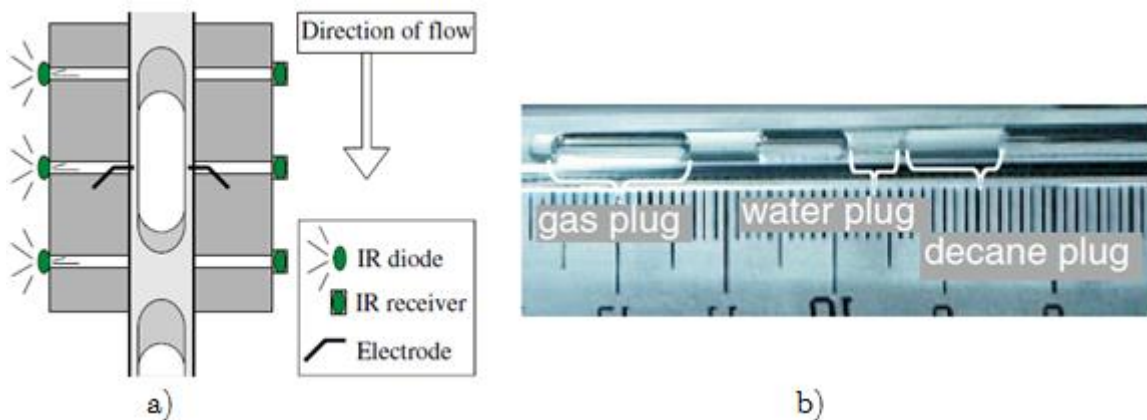


Figura 2.11: a) Esquema básico do sensor para investigação de escoamentos trifásicos. b) Foto do escoamento trifásico. (WOLFFENBUTTEL et al., 2002)

A figura 2.12 apresenta os sinais medidos pelo sistema. A parte “a” da figura é o resultado para o sensor de impedância, que mede sinal alto para ar e decano e sinal baixo para água. Na parte “b” é o sinal medido pelo sensor óptico, que apresenta sinal alto para o ar, sinal baixo para água e decano, e apresenta picos na interface líquido-líquido (água e decano). Dessa forma, unindo as duas técnicas é possível analisar o escoamento trifásico. Porém, a limitação dessa técnica é ter sido testada apenas para capilares, não sendo possível a reprodução de outros tipos de padrões de escoamentos como o agitado, que é comum na indústria.

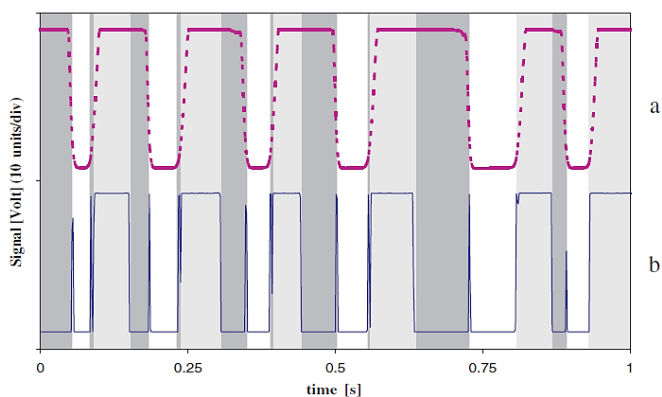


Figura 2.12: Escoamento de golfada ar-água-decano em um capilar de 2 mm. Em cinza claro representa ar, cinza escuro: decano e em branco a água. (WOLFFENBUTTEL et al., 2002)

Um tomógrafo óptico para escoamentos bifásicos ar-água foi desenvolvido por (SCHLEICHER et al., 2008), em que consistia de 256 emissores (LEDs de 3 mm e 640 nm de comprimento de onda) e 32 receptores (matriz de fotodiodos avalanche com a luz sendo guiada por uma fibra óptica). Como o diâmetro do duto medido é de 50 mm,

os emissores e receptores foram colocados em um disco de acrílico ao redor do duto, de forma que o leque de emissão de cada emissor consiga medir toda a largura do tubo. Um esquema do sistema pode ser visto na figura 2.13.

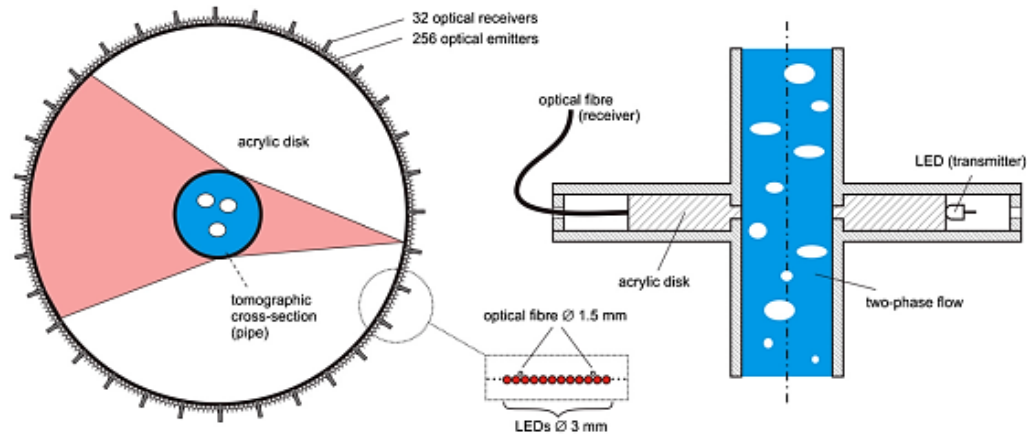


Figura 2.13: Design básico do tomógrafo óptico. Na esquerda a vista horizontal e na direita a vista seccional (SCHLEICHER et al., 2008).

A partir dos dados medidos, é necessário o uso de técnicas de reconstrução de imagens para ter a visualização do escoamento e então extrair os parâmetros desejados. As limitações desse tomógrafo é o seu grande tamanho, em que o disco de acrílico possui 280 mm de diâmetro e também a necessidade de adaptações na planta de escoamento, com o uso de flanges. O tomógrafo desenvolvido nessa tese visa ser compacto, além de ser construído fisicamente de forma que não seja necessário nenhum tipo de adaptação na planta de escoamento (com excessão do acesso óptico, limitação essa intrínseca a qualquer sistema óptico).

Outros trabalhos envolvendo tomografia óptica foram desenvolvidos por (RZAŞA, 2014), (ABDUL RAHIM et al., 2008) onde o primeiro desenvolveu um tomógrafo óptico utilizado para analisar escoamentos ar-água e a partir dele fazer a reconstrução do formato das bolhas. Enquanto o segundo artigo desenvolveu um tomógrafo óptico para a medição de vazão de massa para escoamentos líquido-sólido.

Dentre outros exemplos de técnicas ópticas, (JANA et al., 2007) desenvolveu uma sonda óptica, na qual através das diferenças de propriedades ópticas dos líquidos é feita a análise de escoamentos líquido-líquido (água-querosene).

### 2.3.2.2 Tomografia por raios-X e raios Gama

Tomografia por raios-X e raios Gama vem sendo utilizada ao longo dos anos em diversas áreas, como na área médica (somente raios-X), mas também é amplamente aplicada no estudo de escoamentos.

Estas técnicas tomográficas não invasivas apresentam alta resolução espacial, mas a maioria ainda possui baixa resolução temporal, devido a movimentação mecânica das partes do tomógrafo ao redor da tubulação. HEINDEL; GRAY; JENSEN, 2008b descreve o uso de tomografia por raios-X, assim como HAMPEL et al., 2007 o uso de raios gama. JOHANSEN, 2005 avalia a otimização desta técnica incorporando um número maior de fontes atuando diretamente a receptores, de forma a substituir as fontes móveis, reduzindo o tempo de aquisição de dados. Soluções de imageamento rápido por raios-X, *fast X-ray imaging* e *ultra-fast X-ray imaging*, utilizam o meio eletrônico ao invés do mecânico, alcançando taxas de 2000 FPS (HORI; FUJIMOTO; KAWANISHI, 1998) até 7000 FPS (HAMPEL; FISCHER, 2008). Outra técnica é capaz de realizar o mapeamento 2D com taxa de 10000 FPS, ou escaneamento 3D com taxa de 1000 FPS, descrita por (STÜRZEL et al., 2011). Estas técnicas de raios-X e gama são de grande importância em situações em que são utilizadas paredes metálicas, por exemplo, onde a utilização de outras técnicas se tornam inviáveis, no entanto, essas soluções ainda são relativamente complexas e de custos elevados.

### 2.3.2.3 Tomografia por impedância elétrica

Toda matéria possui uma impedância elétrica específica que é dividida em capacitância, relativa à sua permissividade elétrica, e condutância, relativa à condutividade elétrica. Esses parâmetros provocam uma alteração no campo elétrico aplicado na matéria, onde através de técnicas de medição apropriadas, os mesmos podem ser mensurados.

A partir disso, técnicas de EIT (*Electric Impedance Tomography*) foram desenvolvidas, as quais são divididas em ERT (*Electric Resistance Tomography*) e ECT (*Electric Capacitance Tomography*) (MARASHDEH et al., 2007) e (CAO et al., 2007).

Na EIT, vários eletrodos são dispostos igualmente espaçados em torno de um duto não condutor. A técnica ECT é amplamente utilizada para detecção de fração de vazio em misturas gás-líquido com líquidos não condutores, como exemplo, gás e óleo. Os sensores se localizam na parte externa da tubulação, como pode ser visto na figura 2.14a, onde os sinais de excitação gerados e medidos utilizam a diferença de potencial.



A variação de capacitância medida pelos eletrodos que realizam a medição é proporcional à permissividade elétrica da mistura, ou seja, proporcional à fração de gás e líquido dentro da tubulação. Essa técnica funciona apenas para misturas com fases de diferentes permissividades, onde se pode prever a concentração média da mistura (CROWE, 2006).

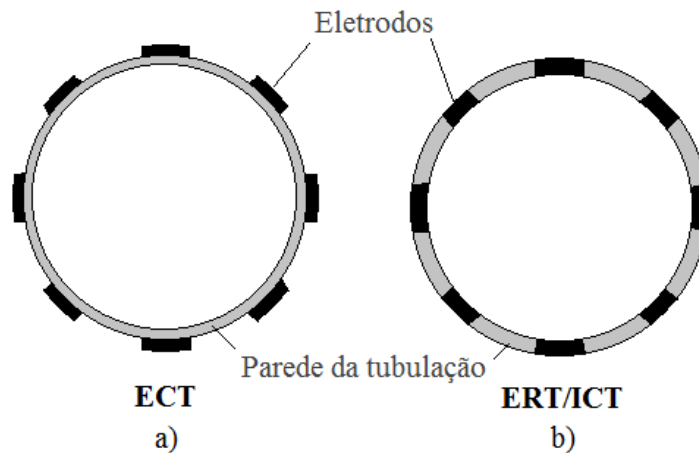


Figura 2.14: Arranjo típico de eletrodos em sistemas de: (a) ECT, com 8 eletrodos. (b) ERT/EIT, com 8 eletrodos

Na ERT, os sensores penetram na tubulação, pois precisam estar em contato com os fluídos de medição, como pode ser visto na figura 2.13b, porém são considerados não intrusivos devido ao seu baixo grau de intrusão. Normalmente são aplicados no mapeamento de distribuições de concentração em suspensões e emulsões e devem ser utilizados com fluídos que possuem condutâncias elétricas diferentes (por exemplo: água e ar). Correntes são aplicadas e diferenças de potencial são medidas. Em ambas as técnicas, os eletrodos transmissores são excitados um de cada vez, enquanto os outros sensores captam o sinal. O sinal resultante passa por um algoritmo de reconstrução e gera imagens que serão analisadas posteriormente. A resolução espacial da tomografia por impedância elétrica é baixa, porém sua resolução temporal é alta e possui um baixo custo. Para maiores detalhes sobre a medição com base em modalidades elétrica, ver (AHMED; ISMAIL, 2008; DYAKOWSKI, 2000; MARASHDEH; TEIXEIRA; FAN, 2014; TAPP et al., 2003; XIE et al., 1995; YANG; PENG, 2003; YORK, 2001; YORK et al., 2011).

#### 2.3.2.4 Sensor Wire-Mesh

O sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos, como também é conhecido, consiste de um sensor intrusivo utilizado para realizar o imageamento das fases de uma seção transversal do escoamento. Esse sensor foi inicialmente proposto por (PRASSER;

BOTTGER; ZSCHAU, 1998) para ser utilizado na investigação de escoamentos bifásicos gás-líquido.

Suas principais características são sua alta resolução temporal e espacial, proporcionando uma grande precisão na extração de parâmetros através das imagens geradas pelo sensor.

Este sensor é constituído por dois planos de fios esticados (fios de aço inoxidável) que formam um eletrodo em cada um dos cruzamentos (figura 2.15). Esses fios possuem 0,125 mm de diâmetro que se estendem em uma seção perpendicular à direção do fluxo que escoar na tubulação.

Um desses planos é transmissor e o outro é receptor, eles são montados com um ângulo de  $90^\circ$  e são separados por uma distância axial (a) de 1,5 mm

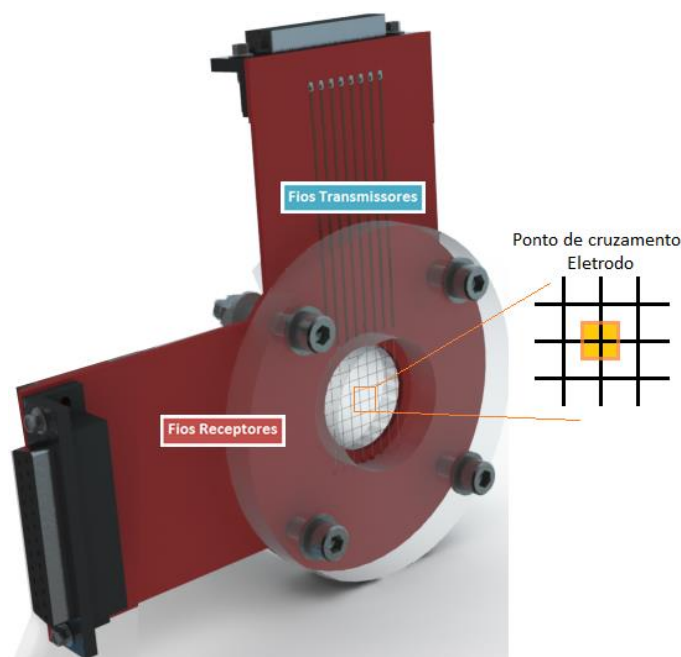


Figura 2.15: Imagem detalhando planos transmissores e receptores e os pontos de cruzamentos (eletrodos).

Inicialmente, os sensores *wire-mesh* eram capazes de realizar medições em fluídos através da condutividade elétrica (PRASSER; BOTTGER; ZSCHAU, 1998) em que era possível distinguir duas substâncias através da condutividade elétrica. Posteriormente uma nova técnica foi apresentada por (DA SILVA; SCHLEICHER; HAMPEL, 2007), na qual até duas substâncias eram identificadas através da permissividade elétrica. Uma terceira técnica, desenvolvida por (DA SILVA; SCHLEICHER; HAMPEL, 2009) faz tomografia do escoamento utilizando a

temperatura das substâncias que estão escoando pelos dutos. Uma outra técnica, desenvolvida por (VENDRUSCOLO, 2012), realiza a união das técnicas condutivas e capacitivas, possibilitando assim, a investigação de escoamentos trifásicos água-óleo-ar. No entanto, a maior desvantagem desse sensor é a sua intrusividade, o que acaba limitando o seu uso em algumas situações práticas, como escoamentos envolvendo sólidos ou líquidos com alta viscosidade.

### **2.3.2.5 Tabela comparativa entre as técnicas de investigação de escoamentos bifásicos**

Atualmente, existem diversas técnicas utilizadas para a investigação de escoamentos bifásicos, cada técnica possui suas vantagens e limitações, sendo assim, a melhor técnica a ser utilizada depende de quais fatores são essenciais na investigação. A tabela 2.4 apresenta resumidamente as características fundamentais das técnicas explicadas anteriormente. Pode-se avaliar que dentre as vantagens apresentadas pela tomografia óptica, é possível citar: alta resolução espacial para a investigação de escoamentos bifásicos (na ordem de mm) e temporal (acima de 500 frames por segundo), utilização simples e segura, não sendo necessário nenhum tipo de proteção ao operador, além de ser um sensor não-intrusivo/invasivo, o que possibilita a investigação de fase sólida ou de líquidos com alta viscosidade.

O custo depende da aplicação para a qual o tomógrafo óptico será desenvolvido. Possui um baixo custo quando trabalha no espectro visível ou do infravermelho próximo (utilizados para a investigação água-ar), faixas essas em que existe disponível uma ampla gama de componentes. No entanto, em comprimentos de onda onde os componentes não são produzidos em grande escala, os custos se tornam mais elevados, que é o caso do infravermelho médio, faixa utilizada para a investigação do petróleo.

Tabela 2.4: Tabela comparativa das técnicas para investigação de escoamentos bifásicos.

<b>Técnica de medição</b>	<b>Resolução Espacial</b>	<b>Resolução Temporal</b>	<b>Custo</b>	<b>Observações</b>
<b>Sensor capacitivo ou resistivo</b>	Não	Alta	Baixo	Medidas médias
<i>Hard-field tomography</i> (x-ray, g-ray)	Alta	Razoável	Alto	Proteção radiológica
<b>Sensor <i>Wire-Mesh</i></b> (resistivo e/ou capacitivo)	Alta	Alta	Baixo	Intrusivo
<b>Tomografia Óptica</b>	Alta	Alta	Relativo	Requer acesso ótico

# Capítulo 3 Tomógrafo Óptico no Infravermelho Próximo

---

Durante o doutorado, foram desenvolvidos dois tomógrafos ópticos que trabalham na faixa do infravermelho próximo (950 nm). O primeiro foi um tomógrafo óptico para tubos com uma polegada de diâmetro para análise de escoamentos água-ar para a prova de conceito, sendo que os testes do sistema foram realizados no laboratório NUEM da UTFPR. O segundo foi um tomógrafo óptico para tubos com 2 polegadas de diâmetro. Esse tomógrafo foi desenvolvido, testado e validado durante o estágio doutoral na Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf – HZDR, localizado em Dresden – Alemanha.

## 3.1 Tomógrafo óptico de uma polegada

O sistema é composto por um *hardware* juntamente com um *software* desenvolvido em plataforma LabVIEW que faz o seu controle e também o processamento de dados. Dessa forma, o sistema desenvolvido é composto por três partes:

- i. *Hardware*: Composto por uma placa eletrônica responsável pelo controle dos LEDs e pelo tratamento e interfaceamento dos sinais. E também por uma placa de aquisição de dados responsável pelo interfaceamento entre a placa eletrônica e o computador.
- ii. *Firmware*: Desenvolvido em LabVIEW, é compilado na FPGA que integra a placa de aquisição de dados.
- iii. *Software*: Desenvolvido em LabVIEW, é a interface homem-máquina que faz o controle do firmware e também o processamento dos dados para exibição em tempo real.

### 3.1.1 Descrição do sistema

#### 3.1.1.1 Hardware

O *hardware* do sistema tomográfico foi constituído em dois blocos. Por uma placa eletrônica desenvolvida no laboratório e por uma placa de aquisição de dados. A placa eletrônica desenvolvida é dividida em duas partes como pode ser visto na figura 3.1 (placa de circuito impresso no apêndice C), de forma que pode ser facilmente encaixada na tubulação sem a necessidade de qualquer alteração na planta de escoamento. A única exigência é o acesso óptico, já disponível na planta piloto do NUEM, por esta ser construída utilizando tubos de acrílico (anexo B). Esse fato mostra uma grande vantagem no uso da tomografia óptica, pois trata-se de uma técnica não intrusiva e não invasiva.

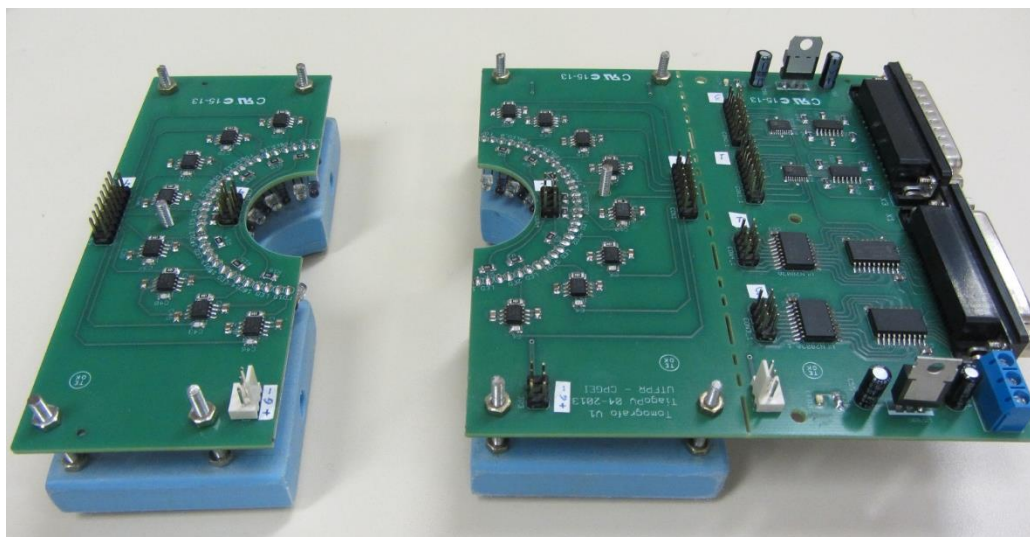


Figura 3.1: Placa eletrônica desenvolvida.

O tomógrafo foi desenvolvido com uma resolução de  $16 \times 16$ , ou seja, 16 emissores (LED) e 16 receptores (fotodiodos). Foram utilizados fotodiodos fabricados pela Stanley Electric, modelo PP3G07S com 3 mm de diâmetro e ângulo de abertura de  $155^\circ$ , e LEDs fabricados pela OSRAM, modelo SFH 409 com 3 mm de diâmetro e ângulo de abertura de  $40^\circ$ . Ambos trabalham na faixa de 950 nm, sendo que esse comprimento de onda foi escolhido por ser possível fazer a análise de escoamentos água-ar sem ter interferências significativas da luz ambiente, além de ser uma faixa com uma ampla gama de dispositivos ópticos de baixo custo. A resposta espectral desses componentes pode ser vista na figura 3.2.

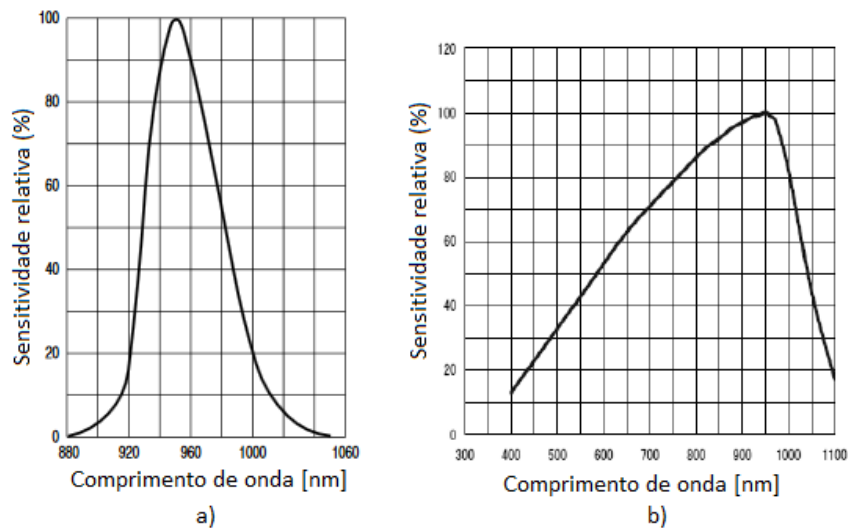


Figura 3.2: Resposta espectral para o LED (a) e para o fotodiodo (b).

Os LEDs e fotodiodos foram colocados no tomógrafo lado-a-lado de forma intercalada, como pode ser visto na figura 3.3 onde os LEDs são os componentes escuros e os fotorreceptores são transparentes. A placa eletrônica é fixada em uma base de nylon que é utilizada para acoplar o tomógrafo na tubulação, além de dar sustentação mecânica à placa eletrônica.

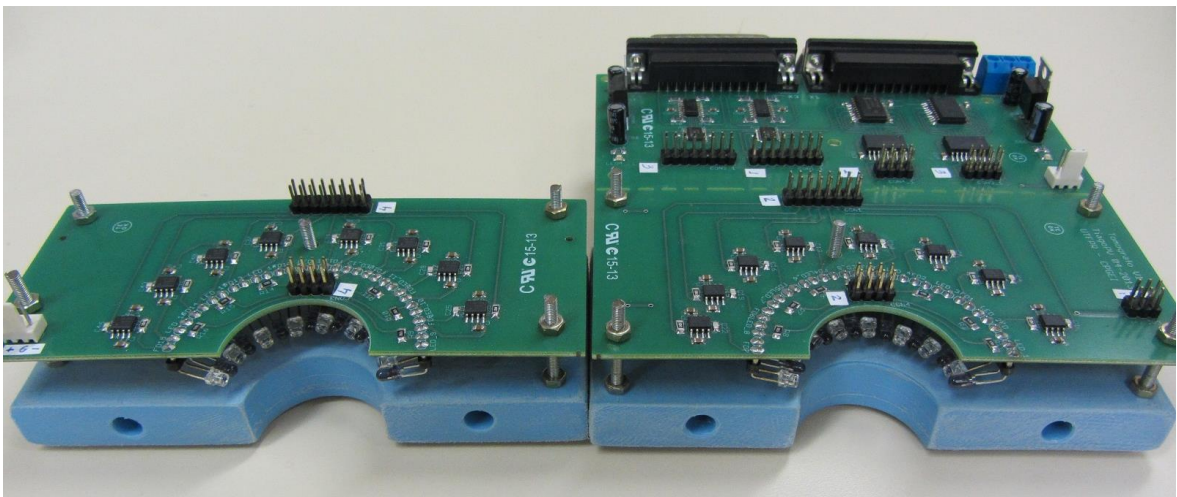


Figura 3.3: Foto do tomógrafo óptico onde podem ser vistos os componentes ópticos e a base de fixação.

A eletrônica é dividida em duas partes: transmissora e receptora, onde a transmissora é responsável pelo controle dos LEDs e a receptora faz o tratamento e o interfaceamento do sinal. O diagrama resumido da placa eletrônica pode ser visto na figura 3.4.

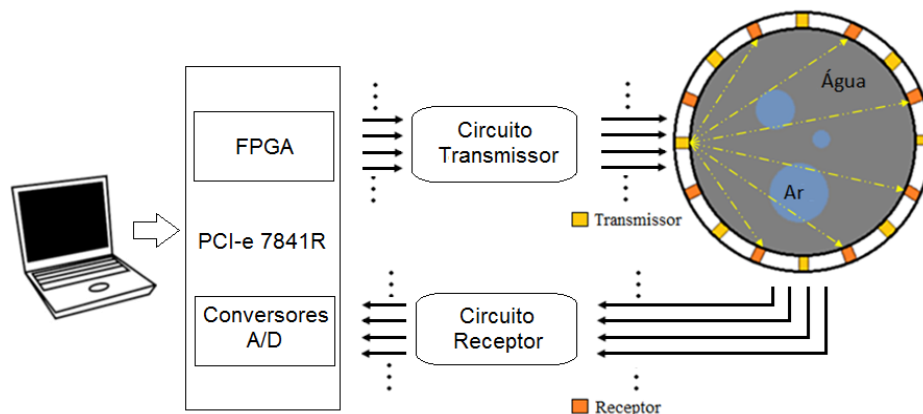


Figura 3.4: Diagrama de bloco da placa eletrônica do tomógrafo de uma polegada.

### a) Transmissor

A parte transmissora é responsável pelo chaveamento dos LEDs, que são ligados um de cada vez, de forma sequencial até formar um frame, conforme esquema mostrado na figura 3.5. O chaveamento é feito através da FPGA (*Field-programmable gate array*) da placa PCI-e 7841R. Como os sinais provenientes da placa de aquisição possuem amplitude de 3,3 volts, foram utilizados drivers para adaptar os sinais de 3,3 para 5 volts, além de que esse driver também funciona como buffer, protegendo a placa de aquisição de dados de qualquer sobrecarga. Neste trabalho foram utilizados dois drivers, modelo 74HCT244D (NXP semiconductors) que possuem oito canais cada. Após, os sinais passam pelo driver ULN2803A (Texas Instruments), para amplificar a corrente que alimenta os LEDs. Nesse caso, foi utilizada uma corrente pulsada de 100 mA para obter a máxima potência do LED.

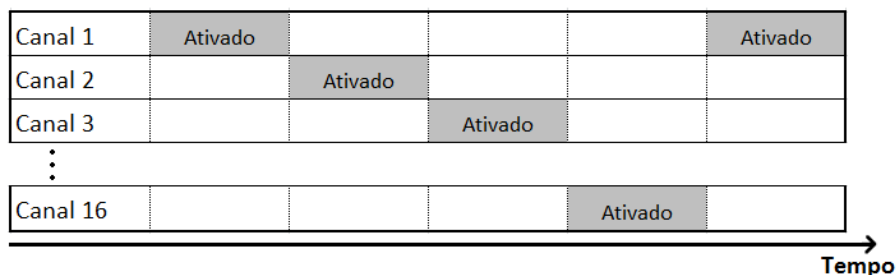


Figura 3.5: Esquema de ativação de cada LED.

### b) Receptor

A parte receptora é composta por um banco com 16 amplificadores de transimpedância, utilizando amplificadores operacionais modelo OPA604 (Texas Instruments), que convertem a corrente dos fotodiodos em uma tensão equivalente (figura 3.6). Como a



placa de aquisição possui somente 8 canais analógicos, os 16 canais receptores são multiplexados utilizando switches ADG734 (Analog Devices), controlados pela FPGA. Após, os sinais passam por um buffer LMH6722 (National Semiconductors) para garantir alta impedância.

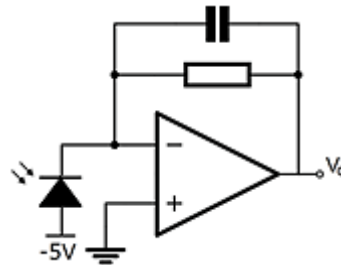


Figura 3.6: Amplificador de transimpedância

c) Placa de aquisição de dados (DAQ)

Utilizou-se neste projeto a placa de aquisição de dados PCIe-7841R, conforme vista na figura 3.7, fabricada pela National Instruments. Esta placa tem como principais características:

- 8 entradas analógicas, com taxas de amostragem independentes de 200kHz com 16 bits de resolução, com variação de  $\pm 10$  V,
- 8 saídas analógicas, com taxa de atualização independente de 1MHz, com 16 bits de resolução, com variação de  $\pm 10$  V,
- 96 linhas digitais que podem ser configuradas como entradas ou saídas com taxas de atualização de até 40 MHz,
- FPGA Virtex-5 LX30,
- Três canais DMA (*Direct Memory Access*) para a transmissão de dados em alta velocidade.



Figura 3.7: Placa de aquisição de dados PCIe – 7841R.

### 3.1.2 Firmware

O *firmware* desse trabalho foi desenvolvido em LabVIEW e é compilado na FPGA integrada na placa de aquisição de dados PCIe-7841R, ele é responsável por fazer o controle e aquisição da placa eletrônica explicada anteriormente.

#### 3.1.2.1 LabVIEW

O *firmware* e o *software* utilizados nesse sistema tomográfico foram desenvolvidos em LabVIEW, que é uma linguagem gráfica, também conhecida como linguagem G, desenvolvida pela National Instruments. Essa linguagem tem como diferencial o uso de blocos gráficos, que representam instruções e funções específicas, ao invés de linhas de comandos.

A programação desenvolvida em LabVIEW nesse trabalho é dividida em duas partes. A primeira parte é um *firmware* compilado na FPGA. A outra parte é um *software* que faz a interface homem-máquina, além de realizar processamentos que possibilitam o monitoramento da tomografia em tempo real.

#### 3.1.2.2 Fluxograma

O *firmware* compilado na FPGA faz o controle da parte transmissora da placa eletrônica fazendo o chaveamento dos LEDs através das saídas digitais, além de fazer a sincronia com a aquisição dos dados da parte receptora da placa eletrônica. Basicamente, o *firmware* funciona de acordo com o fluxograma da figura 3.8.

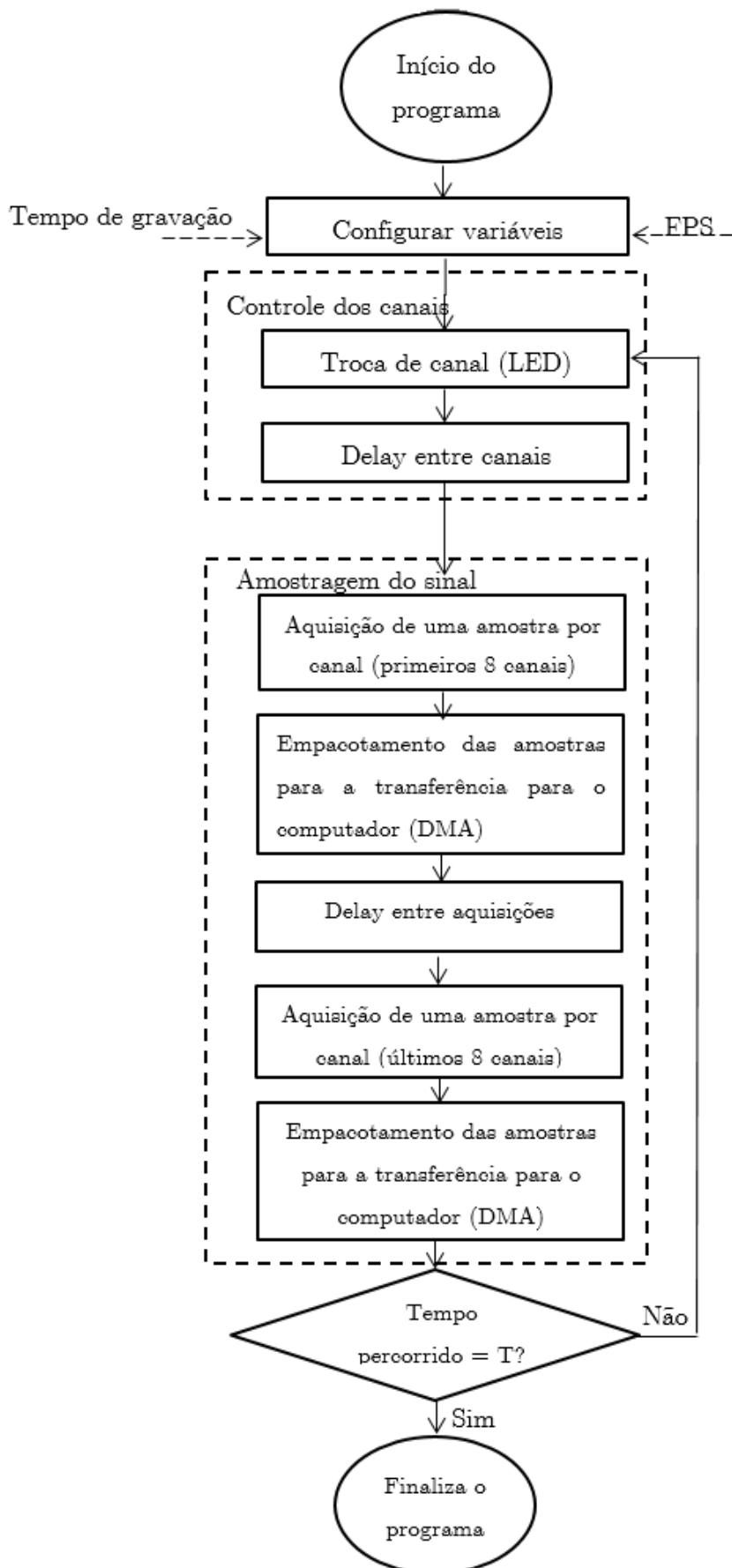


Figura 3.8: Fluxograma do *firmware*.

A placa de aquisição possui 8 canais de entrada analógicos amostrados simultaneamente em 200 kHz. Como o tomógrafo possui 16 canais receptores, é necessário fazer a multiplexação dos canais, dessa forma eles são divididos em dois grupos de 8 canais cada, amostrados de forma sequencial. A transferência dos dados da placa de aquisição para o computador é realizada utilizando dois canais DMA (*Direct Memory Access*). Cada canal analógico possui um conversor analógico/digital de 16 bits, com isso, quatro canais são empacotados em um canal de 64 bits e transferidos através de um canal DMA para o computador onde são desempacotados.

Conforme mostrado no fluxograma, inicialmente são configuradas 2 variáveis:

- Frames por segundo (FPS): É a velocidade de gravação do sistema, em que pode ser usada uma velocidade de até 1000 FPS. Para a visualização em tempo real, é automaticamente configurado em 30 FPS, que é o suficiente para criar um vídeo com boa fluidez (padrão na indústria cinematográfica).
- Tempo de gravação: Tempo total para a aquisição de dados.

### 3.1.3 Software

O *software*, desenvolvido em LabVIEW, é dividido em 3 interfaces independentes:

- Visualização: Executada em tempo real, realiza a reconstrução tomográfica pela técnica de *backprojection*, podendo ser realizado o monitoramento do escoamento.
- Gravação: Executada em tempo real, é a parte onde é feita a gravação dos arquivos da medição, podendo configurar o tempo e a velocidade (FPS).
- Calibração: Executada após a medição, é onde são processados e criados os arquivos de calibração utilizados para a visualização em tempo real.

#### 3.1.3.1 Visualização

Nessa parte do *software* pode ser feito o monitoramento em tempo real do escoamento, com a velocidade de visualização fixa em 30 FPS. A tela do *software* pode ser vista no anexo A.1, em que todas as suas funções são detalhadas. A reconstrução é realizada pela técnica de *backprojection*.

### 3.1.3.2 Gravação

Na tela de gravação, inicialmente são configurados os parâmetros: tempo e FPS, detalhados anteriormente. Com isso, são gerados dois arquivos, um arquivo TDMS, que é um arquivo binário proprietário da National Instruments, otimizado para uso com LabVIEW. Esse arquivo é utilizado posteriormente para a criação dos arquivos de calibração do sistema. Além desse arquivo, também é gerado um arquivo binário, que é utilizado nos processamentos em MatLab. Uma imagem da tela de gravação pode ser vista no anexo A.2.

### 3.1.3.3 Ajuste

O ajuste dos dados, inclui a calibração e normalização dos dados. A calibração do sistema é importante devido as mudanças que podem ocorrer no ambiente, tais como iluminação, bem como as mudanças que podem ocorrer na eletrônica e nos componentes ópticos. Com isso, mede-se o escoamento com o tubo vazio, que nos fornece a calibração alta  $V^H$ , ou seja, os valores máximos que os dados poderão ter, e também com o tubo cheio de água, que nos fornecerá a calibração baixa  $V^L$ .

Para a criação do arquivo de calibração  $V_{cal}^x$ , onde  $x$  é a calibração alta ( $H$ ) ou baixa ( $L$ ), é usado como entrada o arquivo medido de calibração alta, no caso, com tubo vazio, ou de calibração baixa, com o tubo cheio de água. Para cada ponto é realizada a soma de todas as amostras e dividido pelo número total de amostras, como pode-se ver na equação (3.1).

$$V_{cal}^x(i, j) = \sum_{k=0}^n \frac{V_{cal}^x(i, j, k)}{n-1} \quad (3.1)$$

onde  $i$  e  $j$  são as linhas e colunas da matriz, e  $k$  é o tempo. Conforme apresentado na figura 3.9.

Com isso, o arquivo de calibração é calculado de forma independente para cada um dos 256 pontos que formam o frame, gerando um arquivo de calibração em duas dimensões ( $i, j$ ).

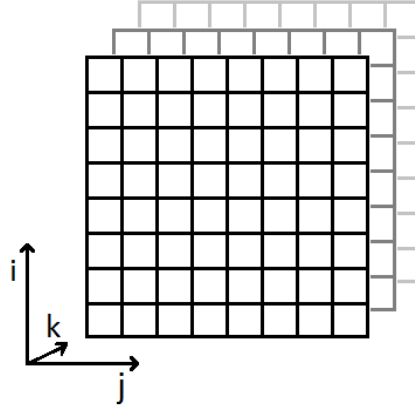


Figura 3.9: Identificação de cada ponto no frame ao longo do tempo

O arquivo final, em que mediu-se o escoamento, é calibrado usando a equação a seguir:

$$V_{o\_cal}(i, j, k) = \frac{V_o(i, j, k) - V_{cal}^L(i, j)}{V_{cal}^H(i, j) - V_{cal}^L(i, j)} \quad (3.2)$$

onde  $V_o$  é o arquivo medido no escoamento.

Com isso, os valores calibrados devem variar entre 0 e 1, mas em alguns casos, como o arquivo de calibração é a média dos valores medidos, podem ocorrer valores que fiquem fora dessa faixa de calibração, devido a ruídos. Para corrigir isso, é utilizado o sistema abaixo para manter todos os valores dentro desse limiar.

$$\bar{V}_{o\_cal}(i, j, k) = \begin{cases} 0 & \text{se } V_{o\_cal}(i, j, k) < 0 \\ V_{o\_cal}(i, j, k) & \text{se } 0 \leq V_{o\_cal}(i, j, k) \leq 1 \\ 1 & \text{se } V_{o\_cal}(i, j, k) > 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

No anexo A.1, explicados na seção anterior, temos a parte do *software* da visualização onde são configurados os controles da calibração, tais como a escolha dos arquivos de calibração alta e baixa e os valores do limite superior e inferior, que usualmente variam entre 0 e 1. A tela do *software* que gera os arquivos de calibração pode ser vista no anexo A.3.

### 3.1.4 Resultados

Diversos testes foram realizados com o tomógrafo óptico, inicialmente foram feitos testes estáticos para analisar a capacidade de detecção de objetos conhecidos, após, foram feitos testes na planta piloto de escoamento bifásico horizontal e vertical (teste exploratório) do NUEM.

#### 3.1.4.1 Testes estáticos

Para analisar a funcionalidade do sistema, foram realizadas medições utilizando objetos conhecidos que bloqueiam totalmente os feixes emitidos nesse comprimento de onda. Como o diâmetro total da área de medição do tomógrafo é de 32 mm, foram utilizados objetos cilíndricos com 8 mm de diâmetro como objetos de estudo para o imageamento tomográfico de acordo com a figura 3.10.

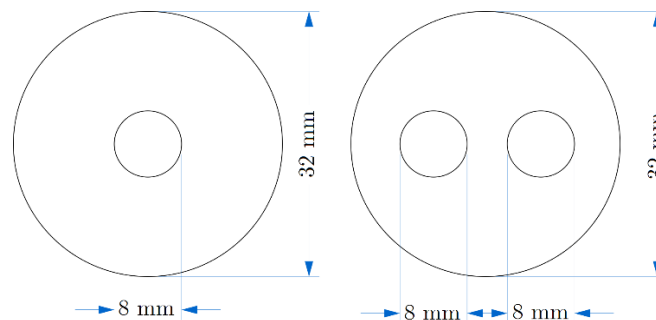


Figura 3.10: Esquema dos objetos de estudo.

A figura 3.11, mostra o resultado utilizando um e dois objetos, que podem ser claramente identificados. Essas imagens foram geradas usando como limiares de calibração: LEDs ligados com a área de medição vazia (calibração alta) e LEDs desligados (calibração baixa). A imagem foi reconstruída utilizando o algoritmo de *backprojection* de acordo com a seção 2.2.3.2.

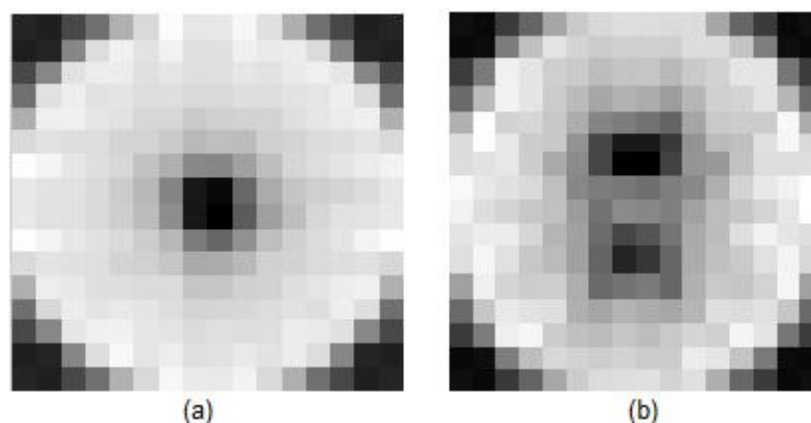


Figura 3.11: Imagens reconstruídas com um objeto (a) e dois objetos bloqueadores (b) dentro da área de medição.

### 3.1.4.2 Testes em escoamentos bifásicos

Testes foram realizados instalando o tomógrafo óptico na planta piloto de escoamentos bifásicos horizontal água-ar (figura 3.12) localizada no NUEM (ver anexo B), onde diferentes tipos de escoamentos foram reproduzidos, foi variada a velocidade superficial do gás ( $J_G$ ) de 0,5 m/s até 2 m/s e a velocidade superficial da água ( $J_L$ ) de 0,5 m/s até 2,5 m/s. A velocidade de aquisição utilizada no tomógrafo óptico foi de 500 frames por segundo.

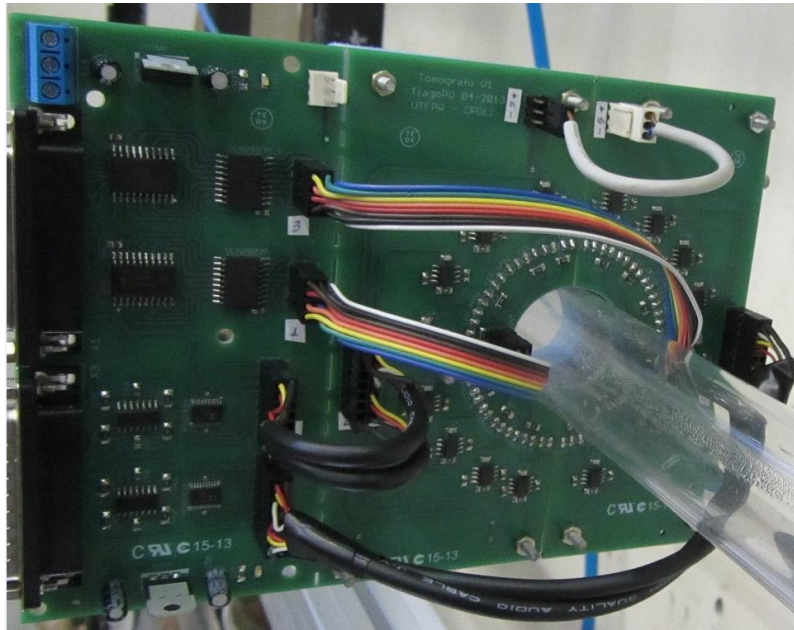


Figura 3.12: Tomógrafo instalado na planta de escoamento horizontal.

#### a) Fração de vazio

Esse cálculo nos informa a quantidade de ar na água. Abaixo, foi calculada uma estimativa para a fração de vazio para alguns escoamentos. Esse cálculo é feito a partir dos dados calibrados, reconstruídos e binarizados ( $V_{bin}$ ). A binarização é realizada para evitar a suavização das bordas após a reconstrução. Como o arquivo está binarizado, os pixels correspondentes ao ar recebem o valor 1, enquanto os pixels correspondentes a água recebem o valor zero. Dessa forma, todos os pixels de cada frame são somados de acordo com a eq. 3.4, resultando em uma matriz 1D em função do tempo ( $k$ ) com a quantidade de ar presente naquele frame. O processamento foi calculado utilizando 700 frames (1,2 segundo).

$$\alpha(k) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{V_{bin}(i,j)}{n_T} \quad (3.4)$$



onde  $n$  é o tamanho da imagem,  $i$  e  $j$  são as coordenadas dos pixels da imagem e  $n_T$  é o total de pixel da imagem.

Na figura 3.13 são apresentados os resultados referentes a quatro escoamentos com diferentes velocidades superficiais para a água e o ar. Essas medidas, no entanto, não estão validadas, servindo como exemplo de aplicação que poderá ser implementada futuramente com o tomógrafo, a validação foi realizada com o tomógrafo apresentado a seguir.

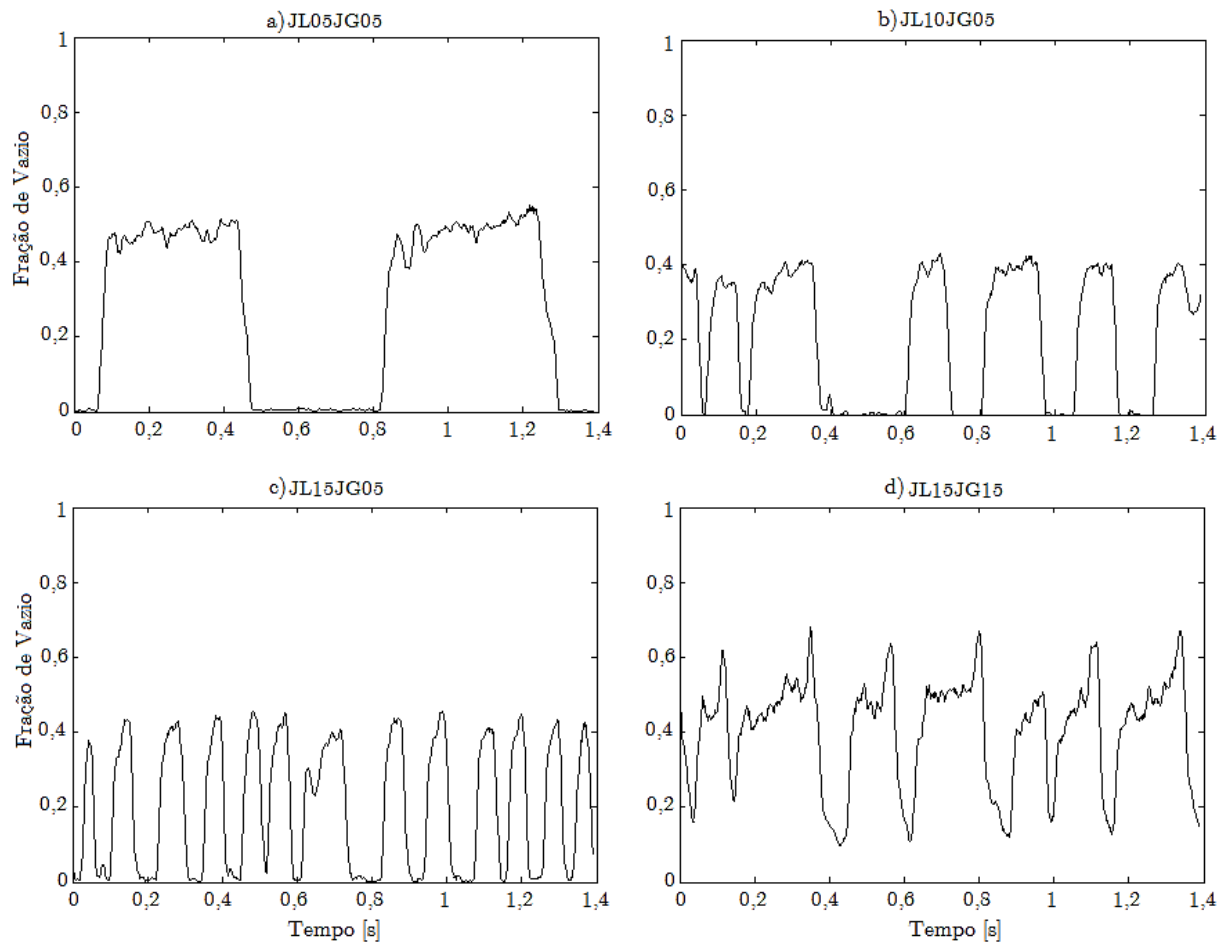


Figura 3.13: Fração de vazio para diferentes velocidades superficiais para ar e água: a)  $J_L=0,5$  m/s,  $J_G=0,5$  m/s; b)  $J_L=1,0$  m/s,  $J_G=0,5$  m/s; c)  $J_L=1,5$  m/s,  $J_G=0,5$  m/s e  $J_L=1,5$  m/s,  $J_G=1,5$  m/s.

## b) Visualização lateral da série medida ao longo do tempo

Nessa visualização, foi selecionado uma linha transversal (linha central) da imagem tomográfica reconstruída, e empilhada ao longo dos 700 frames em que foi processada a mesma parte do arquivo da seção anterior. Essa reconstrução pode nos dar uma estimativa do formato das bolhas, como pode ser visto na figura 3.14.

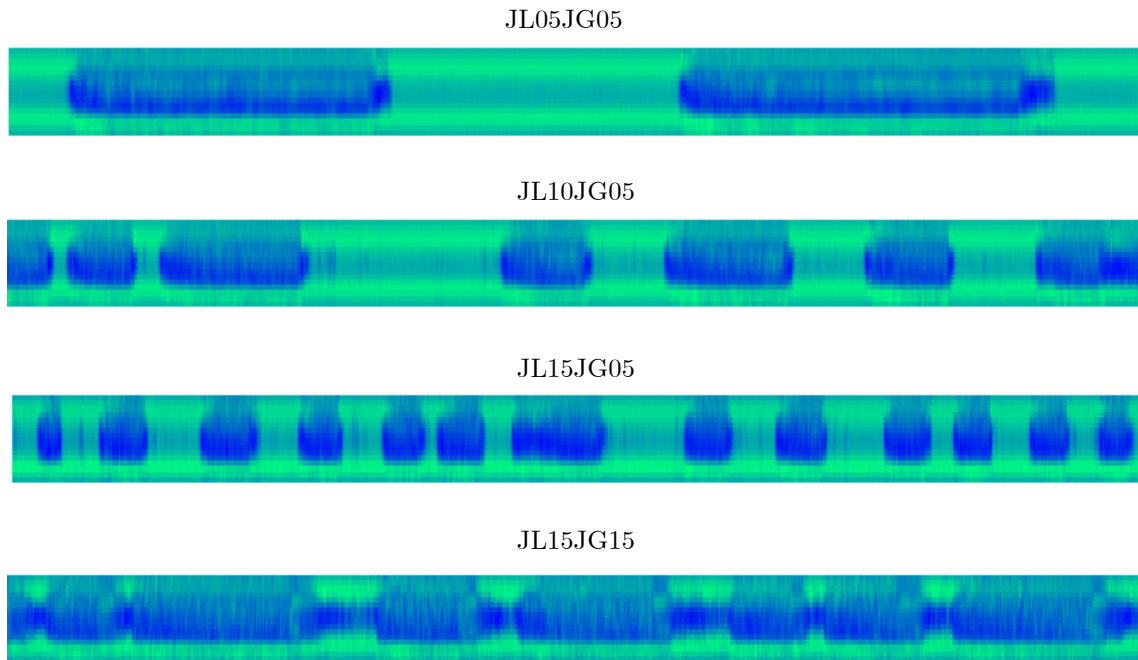
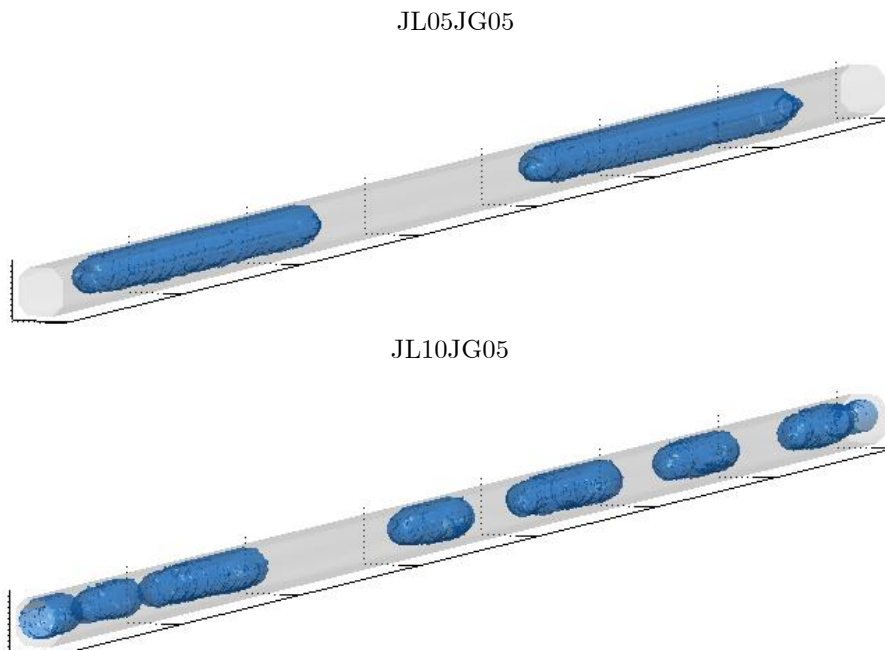


Figura 3.14: Visualização lateral ao longo do tempo para diferentes velocidades superficiais para o ar e água.

c) Reconstrução 3D

Outra alternativa possível para os dados medidos é a reconstrução 3D, essa reconstrução é feita a partir das imagens tomográficas reconstruídas anteriormente, sendo aplicada a função *isosurface* do MatLab. Nesse caso, foram utilizados os mesmos 700 frames dos processamentos anteriores, conforme visto na figura 3.15 abaixo.



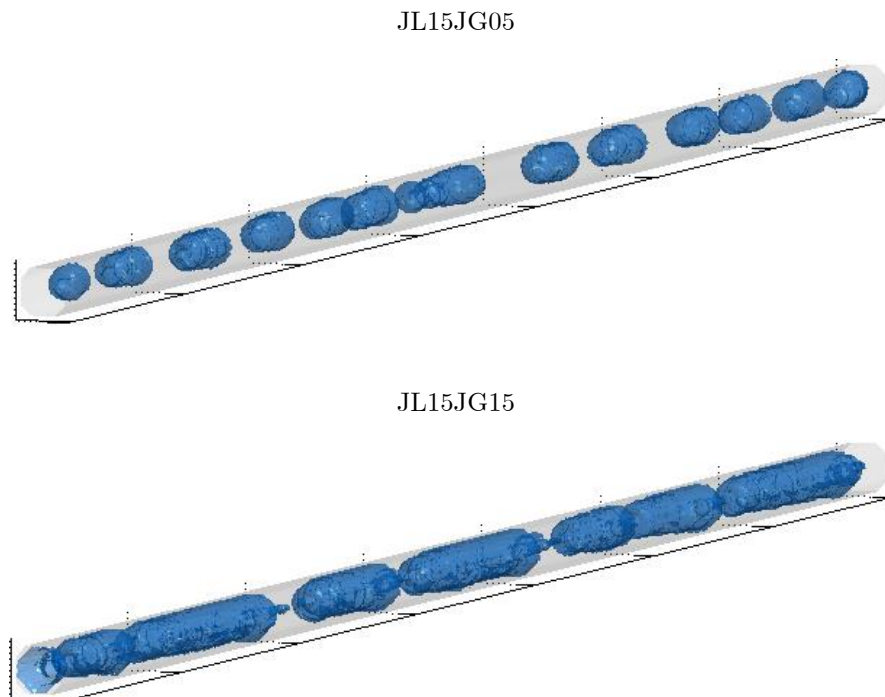


Figura 3.15: Reconstrução 3D de escoamentos com diferentes velocidades superficiais para ar e água.

Os resultados apresentados até aqui demonstraram que a tomografia óptica é viável para a análise de escoamentos bifásicos horizontais água-ar.

### 3.1.4.3 Medida exploratória

Como o tomógrafo óptico é um sistema não intrusivo, ele possibilita a investigação de escoamentos que possuem fases sólidas. Na indústria petrolífera, um exemplo de fase sólida é a presença de areia escoando nos dutos, formando um escoamento sólido-líquido, com isso, foi realizado um teste exploratório para analisar o comportamento do tomógrafo nessa situação. O teste foi desenvolvido utilizando uma bancada vertical com água parada, conforme pode ser visto na figura 3.16. Uma determinada quantidade de areia foi colocada na água, com a medida sendo feita enquanto a areia passa pelo tomógrafo. O resultado é mostrado na figura 3.17, onde a areia é representada em azul. Como a areia contém partículas muito pequenas, o tomógrafo consegue medir apenas a envoltória do total de areia que está passando pelo sensor, o que é suficiente para identificar a presença de sólidos no escoamento, vantagem essa que é possível pelo fato dessa técnica ser não intrusiva.

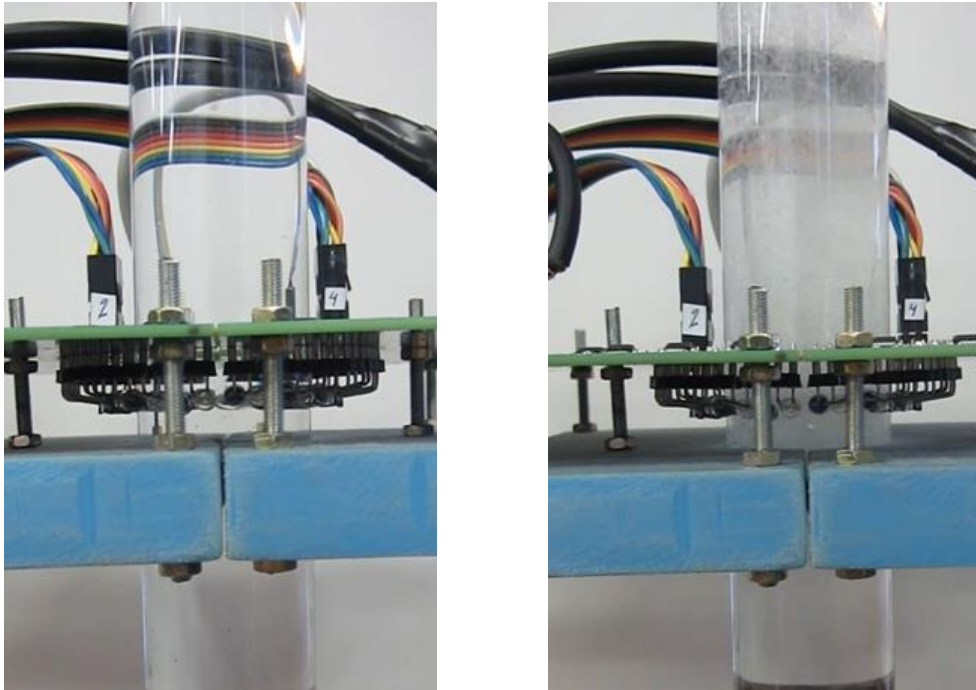


Figura 3.16: Escoamento sólido-líquido em uma bancada vertical. Tubo apenas com água (esquerda) e com areia escoando (direita).

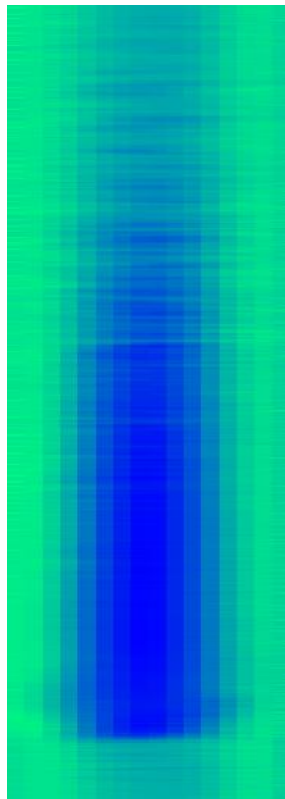


Figura 3.17: Escoamento vertical de areia na água.

## 3.2 Tomógrafo óptico de 2 polegadas

Diferentemente do NUEM, onde a planta de escoamento bifásico possui uma polegada de diâmetro interno, no centro de pesquisa HZDR o diâmetro interno padrão é de duas polegadas, com isso foi projetado um novo tomógrafo óptico. Esse tomógrafo óptico foi desenvolvido com o intuito de validar o tomógrafo óptico para escoamentos bifásicos, utilizando o sensor Wire-Mesh condutivo como sensor de referência. Esse sistema também será detalhado em três partes: *hardware*, *software* e *firmware*. Como a base é semelhante ao tomógrafo óptico desenvolvido anteriormente, essas partes serão explanadas de forma resumida.

### 3.2.1 Descrição do sistema

Devido a esse sistema possuir o dobro do diâmetro do tomógrafo anterior, esse tomógrafo foi desenvolvido na configuração 32x32 canais, ou seja, 32 emissores (LED) e 32 receptores (fotodiodos). Isso fez com que fosse necessária a inserção de demultiplexadores na parte transmissora, assim como mais um estágio de multiplexação na parte receptora da placa eletrônica. No conjunto óptico, que opera em 950 nm, tanto os LEDs (modelo SFH 409) quanto os fotodiodos (modelo TEFD4300F) possuem ângulo de abertura de  $\pm 20^\circ$ . Levando em consideração o ângulo de abertura dos componentes ópticos, a refração do acrílico e da água e a fonte emissora a 0,5 mm de distância do tubo, foi realizada a simulação da área de investigação para uma fonte emissora, o que resultou na figura 3.18.

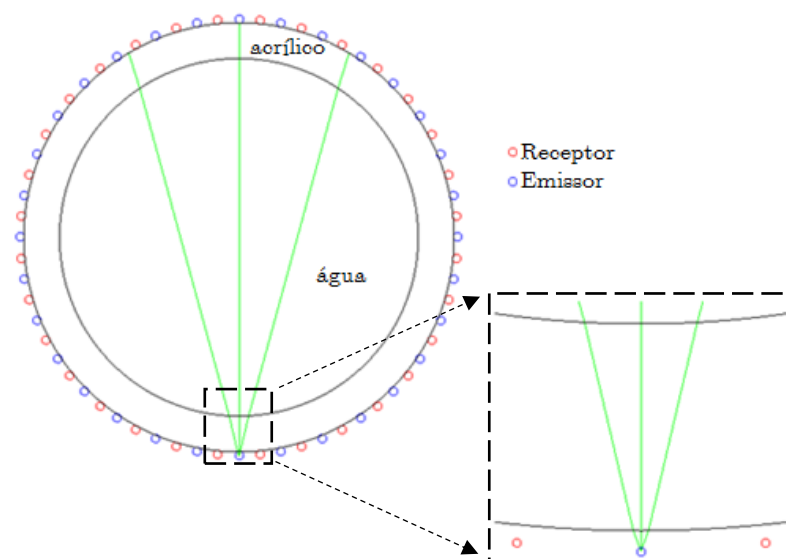


Figura 3.18: Área investigada por cada conjunto óptico.

A influência gerada por essa área de investigação será discutida no decorrer dos testes. A placa de circuito impresso e uma foto do tomógrafo pode ser vista no apêndice C. Esse tipo de montagem, com o conjunto óptico próximo do tubo foi escolhida com a intenção de se desenvolver um sensor o mais compacto possível.

Outra diferença desse sistema em relação ao anterior, é a implementação de uma saída digital na FPGA que é utilizada para sincronizar o tomógrafo óptico com o sensor Wire-Mesh, conforme apresentado na figura 3.19. A sincronia é realizada sincronizando cada frame do tomógrafo com o primeiro frame de uma sequência de 10 frames no sensor Wire-Mesh. Para obter um alto detalhamento, as medições foram desenvolvidas com velocidades de aquisição de 500 FPS no tomógrafo óptico (máxima velocidade possível do sistema) e 5000 FPS no sensor Wire-Mesh.

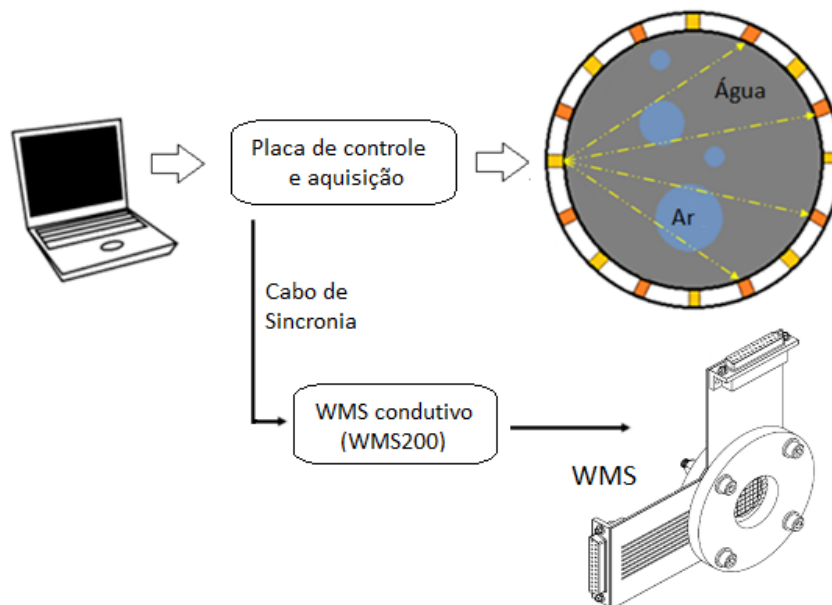


Figura 3.19: Diagrama de bloco do sistema montado para os testes, com ambas as técnicas sincronizadas.

### 3.2.2 Planta de escoamento utilizada e matriz de medidas

Uma planta de escoamento vertical foi utilizada para a geração controlada de escoamentos bifásicos, com seu esquemático apresentado na figura 3.20. A planta é construída com tubos de acrílico com 50 mm de diâmetro interno e 60 mm de diâmetro externo com a seção de testes localizada a 1,9 m acima do misturador, que combina os escoamentos de água com ar.

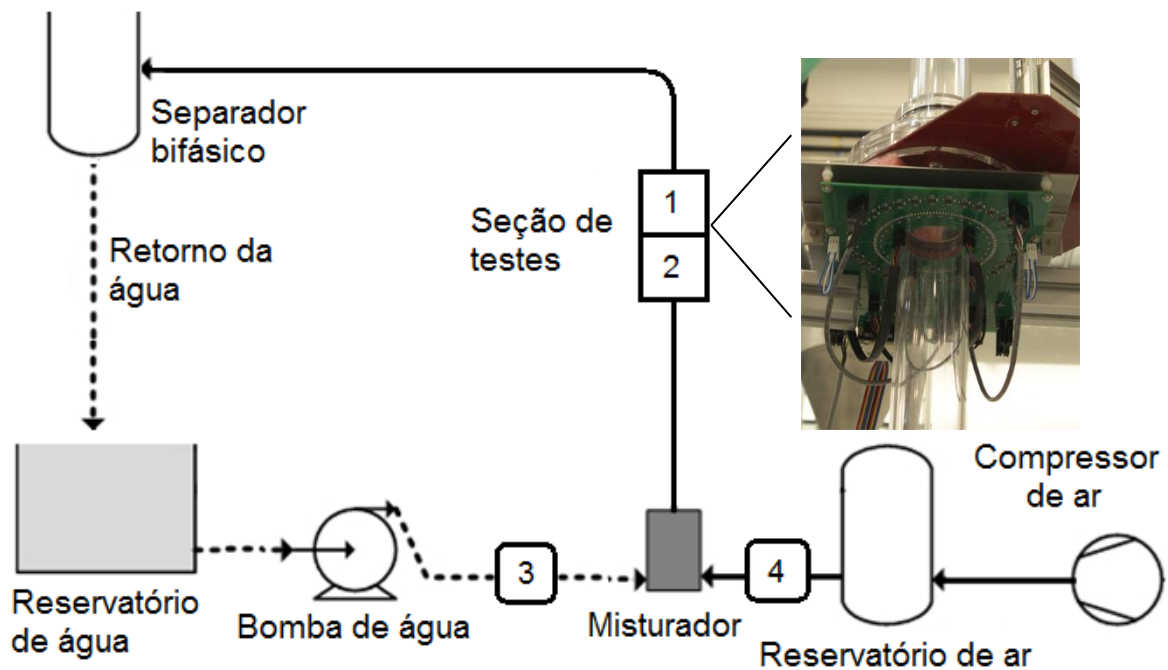


Figura 3.20: Diagrama esquemático da planta de escoamento vertical bifásico.

Para garantir alta confiabilidade nos dados de referência, a velocidade do escoamento de líquido foi medida utilizando um sensor de fluxo eletromagnético modelo MAG1100 (fabricado pela Siemens), posicionado na posição '3' da figura 3.20, o controle da velocidade do líquido foi feita manualmente através de válvulas. Para a linha de gás, sua medição e controle foi feita utilizando um sensor de pressão diferencial, localizado na posição '4', modelo FMA-2610A (fabricado pela Omega) que também possui uma válvula para o controle automático da vazão de gás.

Na seção de testes, foi instalado o tomógrafo óptico na posição '2'. Como o tomógrafo óptico é constituído por duas partes, pode ser facilmente acoplado ao tubo. Três centímetros acima do tomógrafo óptico, na posição '1', foi instalado com o uso de flanges um sensor Wire-Mesh condutivo, modelo WMS200, fabricado pela Teletronic Rossendorf GmbH.

Na intenção de cobrir a maior área possível no mapa de escoamento, 66 medidas foram realizadas, abrangendo os escoamentos nos padrões: bolhas dispersas, golfadas e agitado, a matriz com todos os pontos medidos pode ser vista na figura 3.21. As linhas que dividem os padrões de escoamentos, foram calculados especificamente para a planta de escoamento bifásico em questão, utilizando a modelagem de Taitel (TAITEL;

DUKLER, 1976). Os pontos medidos cobriram todos os escoamentos possíveis de serem reproduzidos pela planta de escoamento.

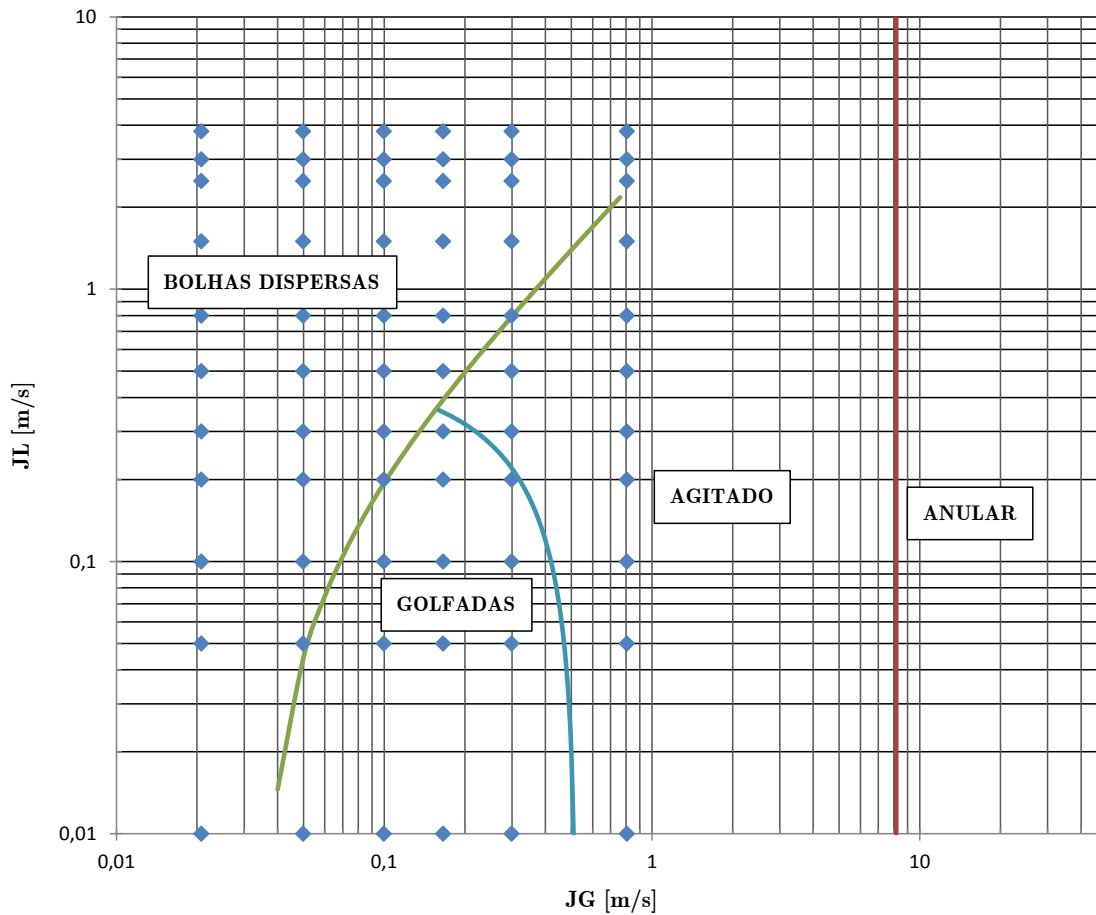


Figura 3.21: Mapa com os padrões de escoamento para uma planta vertical de 2 polegadas. Em azul, os 66 pontos que foram medidos.

### 3.2.3 Validação do tomógrafo óptico com o sensor Wire-Mesh

A partir dos dados calibrados (ver seção 3.1.3 c)) e processados (ver seção 2.2.3 b)), testes comparativos foram realizados entre o tomógrafo óptico e o sensor Wire-Mesh. Dois tipos de comparações foram realizados, a primeira é apenas visual, através da visualização lateral, enquanto que na segunda foram calculados os desvios padrão da fração de vazio entre os sensores.

#### 3.2.3.1 Visualização lateral

Para a realização dos testes comparativos, inicialmente é necessário fazer a reconstrução de imagens do sistema tomográfico, no caso do sensor Wire-Mesh, por ser um método de imageamento direto, essa etapa não é necessária. Inicialmente, é realizado o ajuste



da resolução temporal do sensor Wire-Mesh para a mesma resolução do tomógrafo óptico (500 FPS). Após, é necessário sincronizar os dados dos sensores. Esse ajuste é indispensável devido à distância entre os sensores. A sincronia é realizada utilizando correlação cruzada, sendo que esse processo deve ser realizado de forma individual para cada medida, devido as diferenças na velocidade dos escoamentos.

Na figura 3.22, é apresentada a visualização lateral ao longo do tempo (mostrando apenas a linha central da imagem) para quatro testes realizados, sendo o sensor Wire-Mesh é a imagem apresentada no lado esquerdo de cada escoamento.

Esses resultados apresentam as imagens binarizadas de ambos os sensores, esse procedimento foi necessário para tornar possível o cálculo da fração de vazio do tomógrafo óptico (seção 3.1.4.2). Pois a reconstrução de imagens do tomógrafo óptico não é capaz de processar ruídos aleatórios provocado pelo espalhamento óptico, por exemplo. Nas imagens apresentadas, a fração de gás (ar) é apresentada em branco, enquanto a fração de líquido (água) aparece em preto. No caso do sensor Wire-Mesh, a água representa a máxima condutividade enquanto que para o tomógrafo óptico ela representa a transmitância mínima (ou máxima absorção).

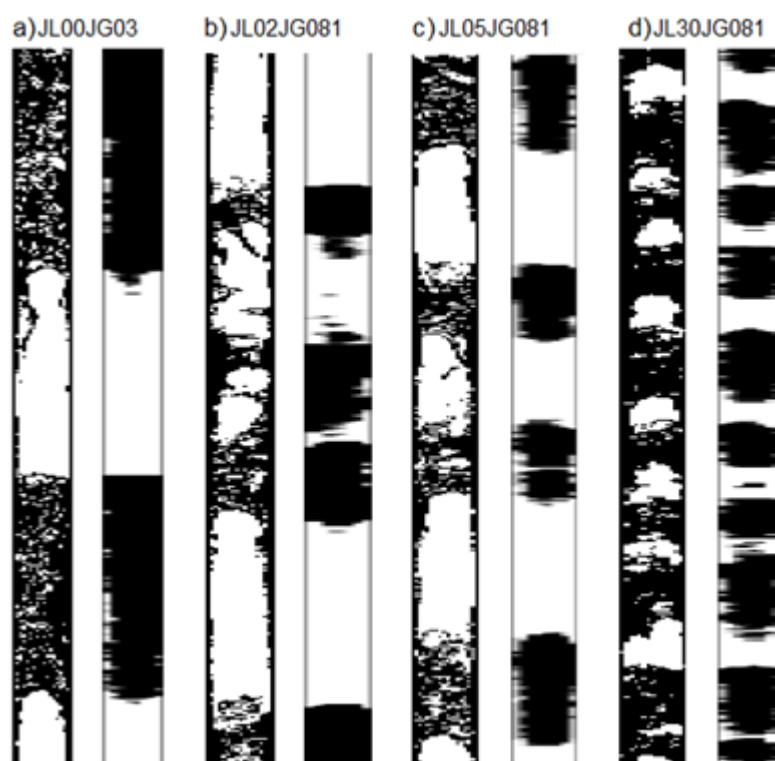


Figura 3.22: Visualização lateral para as medições realizadas para as seguintes velocidades superficiais para o gás e líquido ( $J_L$  e  $J_G$  respectivamente): a) Golfadas:  $J_L = 0$  m/s;  $J_G = 0,3$  m/s, b) Agitado:  $J_L = 0,2$  m/s;  $J_G = 0,81$  m/s, c) Agitado:  $J_L = 0,5$  m/s;  $J_G = 0,81$  m/s, d) Bolhas dispersas:  $J_L = 3$  m/s;  $J_G = 0,81$  m/s.

Analisando as imagens, pode-se observar uma boa similaridade entre os sensores na análise do comportamento dos escoamentos, no entanto, o sistema não consegue detectar pequenas bolhas ou o formato das grandes bolhas com detalhamento, isso é devido principalmente a pequena área de investigação gerada por cada emissor, devido ao baixo ângulo de abertura do conjunto óptico, como pode ser visto na figura 3.18. A consequência disso é a limitação em medir pequenas bolhas longe do centro do tubo, pois apenas alguns conjuntos ópticos detectarão essas bolhas, dificultando a reconstrução real do escoamento.

### 3.2.3.2 Comparação da fração de vazio

Após a etapa de reconstrução e binarização dos dados tomográficos, foi calculada a fração de vazio (ver seção 3.1.4.2.a) ao longo do tempo dos escoamentos para as mesmas medidas anteriores para ambos os sensores, apresentada na figura 3.23. O sensor Wire-Mesh é representado pela linha vermelha, enquanto o tomógrafo óptico é azul. As três primeiras medidas mostram 2 segundos. A quarta medida, onde a velocidade do líquido é alta, é mostrado apenas um segundo para facilitar a visualização do resultado.

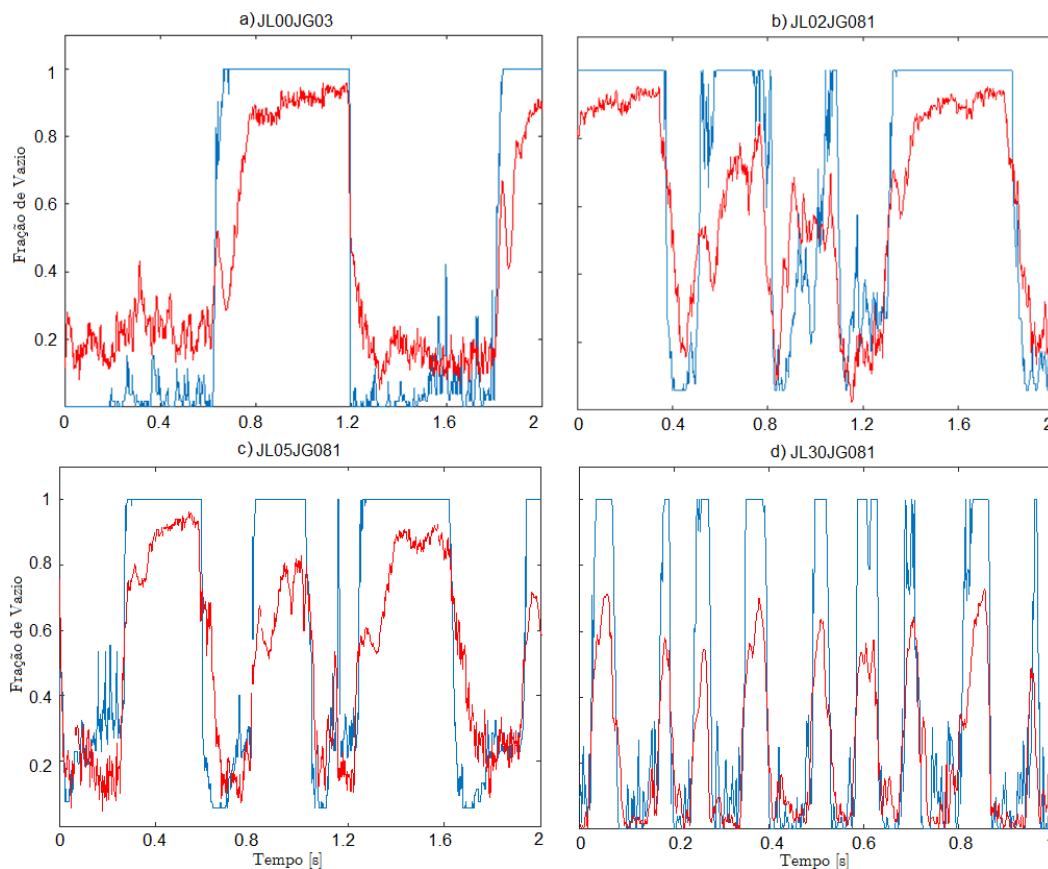


Figura 3.23: Série temporal comparando a fração de vazio de ambos sensores, com o wire-mesh representado em vermelho e o tomógrafo óptico em azul.

A partir da fração, foi calculado o desvio padrão para as medidas completas (120 segundos), utilizando o sensor Wire-Mesh como sinal de referência. Para a medida de golfadas (a) foi calculado um desvio de  $\pm 11,6\%$ , para os escoamentos agitado (b e c) foram calculados os desvios de  $\pm 9,7\%$  e  $\pm 7,2\%$ . O desvio máximo encontrado para todas as medidas, foi para o padrão de bolhas dispersas (d), em que foi encontrado o valor de  $\pm 56\%$ . O fator principal para esse desvio, como comentado anteriormente, é a dificuldade em medir pequenas bolhas.

### 3.3 Conclusão

O desenvolvimento do tomógrafo óptico de uma polegada provou que a tomografia óptica pode ser aplicada em escoamentos horizontais, possibilitando, além do imageamento tomográfico do escoamento, a extração da fração de vazio. Por ser uma técnica não intrusiva, também possibilita a investigação de escoamentos com uma fase sólida.

O desenvolvimento do segundo tomógrafo, de 2 polegadas, demonstrou que essa técnica é bastante versátil, sendo relativamente simples o seu desenvolvimento para diversas aplicações, pois tanto as mudanças na resolução quanto no diâmetro da tubulação podem ser realizadas através de pequenas modificações de hardware. A validação mostrou que o tomógrafo óptico pode ser utilizado para medições bifásicas, em que a análise do comportamento de escoamentos, principalmente golfadas e agitado, que são os padrões considerados mais críticos (e comuns) pela indústria de óleo e gás, podem ser feitos com uma boa confiabilidade. Melhorias podem ser implementadas para a análise de escoamentos com bolhas dispersas, selecionando componentes que aumentem a área de interrogação de cada conjunto óptico.



# Capítulo 4 Infravermelho Médio

---

Neste capítulo, serão detalhados os estudos que foram realizados utilizando o infravermelho médio na investigação de petróleo. Inicialmente foi realizada uma seleção de componentes, englobando emissores e detectores de diferentes tecnologias, seguido pelos testes.

## 4.1 Seleção de componentes

Atualmente existe uma ampla gama de componentes ópticos para os mais diversos comprimentos de onda. No entanto, especificamente para a região do infravermelho médio, na faixa de 2 a 4,5  $\mu\text{m}$ , a variedade de componentes ainda é escassa. Dessa forma, foi realizada uma seleção de componentes que mais se adaptavam aos testes pretendidos, para então analisar se é possível sua implementação em sistemas ópticos.

### 4.1.1 Receptores

Para o desenvolvimento dos testes no infravermelho médio, foram adquiridos componentes ópticos para as seguintes faixas do espectro:

- 1 a 2,9  $\mu\text{m}$ : Fotocondutor quântico FDPS3X3, possui área ativa de 3x3 mm composta de sulfeto de chumbo (PbS), fabricado pela Thor Labs, com pico no comprimento de onda de 2,2  $\mu\text{m}$ .
- 3 a 4,8  $\mu\text{m}$ : Fotocondutor quântico P9696-02, possui área ativa de 2x2 mm composta de seleneto de chumbo (PbSe), fabricado pela Hamamatsu, com pico no comprimento de onda de 4,0  $\mu\text{m}$ .
- 4,3  $\mu\text{m}$  e 5,02  $\mu\text{m}$ : Termopilha HEIMANN HTS E21 F4.31/5.02. Termopilha com 2 janelas, com filtros em 4,305 e 5,02  $\mu\text{m}$ .

As especificações técnicas sobre esses componentes podem ser vistos no apêndice B.

Esses componentes possuem uma variação de corrente na sua saída, com isso, é necessário o uso de amplificadores de transimpedância para converter essa corrente em uma tensão equivalente. No entanto, outro detalhe precisa ser levado em consideração, como a dependência térmica do componente, que é explicado na próxima seção.

Também foram adquiridos componentes ópticos fabricados pela MicroSensor Technology, sendo realizados testes com LEDs e fotodiodos na faixa de 2  $\mu\text{m}$ . Esses componentes possuem como principais características, o baixo tempo de resposta, e a facilidade no controle e interfaceamento. No entanto, a partir de testes realizados em laboratório, foi constatado que tanto a potência de emissão dos LEDs quanto a sensibilidade de detecção dos fotodiodos são baixas para o propósito deste trabalho. Como os resultados obtidos com esses componentes não foram satisfatórios, eles não serão comentados nesse trabalho.

#### 4.1.1.1 Compensação de temperatura

Os receptores para o infravermelho médio geram um sinal muito baixo em sua saída, sendo necessário o uso de amplificadores com ganho 1000 ou superior, de forma que qualquer sinal ou ruído indesejado acabe inviabilizando a medição correta do sinal. Uma característica desses receptores é a indesejada sensibilidade a variações de temperatura ambiente. Mesmo uma pequena variação na temperatura do encapsulamento do sensor, gera um sinal de offset em sua saída que satura o estágio de amplificação devido ao alto ganho utilizado. Em função disso, é fundamental manter a temperatura constante durante as medições. Como isso não foi possível, nesse experimento foi desenvolvido um sistema que compensasse essa variação de temperatura, mantendo o fotocondutor calibrado em tempo real.

Para realizar esse procedimento de calibração, é necessário inicialmente levantar a curva do comportamento da resistência do fotocondutor em função da temperatura. Essa curva é fornecida pelo datasheet do componente, porém, para a máxima eficácia, é necessário encontrar a equação da curva para esse fotocondutor em específico. Para isso, foram realizadas medidas mantendo o fotocondutor totalmente isolado da qualquer fonte de luz em uma câmara térmica, com sua temperatura sendo variada de 5 a 50°C. Durante essa variação de temperatura, foi medida a resistência no escuro ( $R_{\text{dark}} - R_{\text{D}}$ ) utilizando um multímetro Minipa ET2042. Gerando o gráfico da  $R_{\text{dark}}$  em função da temperatura para o fotocondutor apresentado na figura 4.1.

O resultado para a  $R_D$  pode ser visto na figura 4.1.

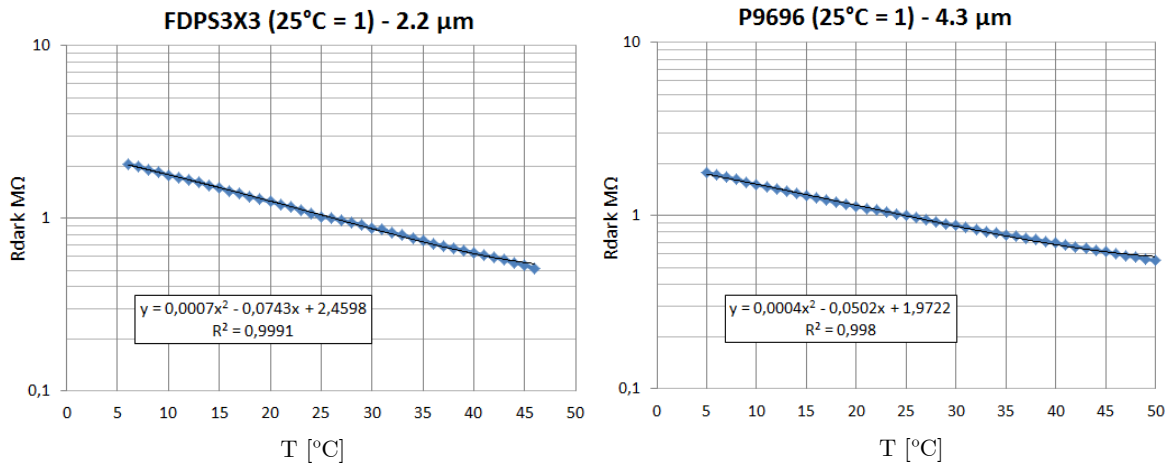


Figura 4.1: Gráficos da variação do  $R_{dark}$  em relação à temperatura

O gráfico encontrado apresentou o comportamento esperado de acordo com o datasheet, porém esse levantamento é necessário para realizar o cálculo da equação da curva, que é específico para cada componente. A partir da equação da curva encontrada, foi desenvolvido um circuito baseado na técnica proposta por (DE ARCAS et al., 2008), capaz de anular a corrente proveniente do fotocondutor gerada pela variação da temperatura, conforme esquema apresentado na figura 4.2:

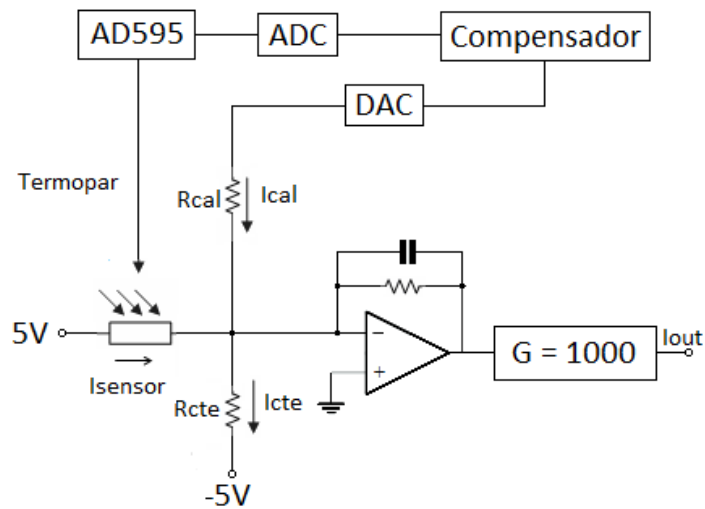


Figura 4.2: Diagrama do circuito de compensação de temperatura

A corrente resultante desse circuito é:

$$I_{out} = I_{sensor} + I_{cal} - I_{cte} \quad (4.1)$$

onde  $I_{\text{out}}$ : corrente da saída do sistema,  $I_{\text{sensor}}$ : corrente gerada pelo fotocondutor,  $I_{\text{cal}}$ : corrente gerada pelo resistor de calibração e  $I_{\text{cte}}$ : corrente gerada pelo resistor utilizada para zerar a corrente quando  $T=5^{\circ}\text{C}$ .

A variação total do  $R_D$  para o P9696 é de aproximadamente 0,5 a 2  $\text{M}\Omega$ , com isso, é utilizado um  $R_{\text{cte}}$  de 470  $\text{K}\Omega$ , ligado em -5 V responsável por zerar a corrente de saída  $I_{\text{out}}$  para o  $R_D = 470 \text{ K}\Omega$  equivalente a uma temperatura em torno de  $5^{\circ}\text{C}$ , qualquer variação de temperatura acima disso deve ser compensada em tempo real utilizando um controlador. A temperatura da carcaça do fotocondutor foi medida utilizando um termopar tipo K juntamente com um compensador de junção fria AD595 (Analog Devices) para interfaceá-lo com um conversor analógico-digital (ADC). A partir da temperatura medida é calculada a tensão necessária a ser aplicada no  $R_{\text{cal}}$  (100  $\text{K}\Omega$ ) através de um conversor digital-analógico (DAC) necessário para zerar a corrente do sistema. Com o desenvolvimento desse sistema, foi possível realizar a medição com os componentes para o infravermelho médio sem se preocupar com a variação de temperatura ambiente, garantindo maior confiabilidade nos dados obtidos.

#### 4.1.2 Emissor

Foram utilizados como fonte emissora de radiação infravermelha média dois componentes:

Fonte de luz (Oriel 1 kW), que utiliza uma lâmpada de halogênio com temperatura de cor 3200 K. Para a modulação da luz emitida, foi utilizado um *Chopper* mecânico (EG&G modelo 197).

Emissor de fio quente: HSL EMIRS200, com pico de emissão em 4  $\mu\text{m}$ .

## 4.2 Testes de transmitância

Usando como base o gráfico da transmitância da radiação infravermelha no petróleo mostrado na figura 2.4, foram medidas diversas cuvetas com diferentes espessuras para encontrar a máxima transmitância do petróleo no infravermelho médio.

### 4.2.1 Sistema para a medição da transmitância

Para os testes de transmissão no petróleo, foram desenvolvidas duas montagens distintas. A primeira é para medir o máximo comprimento possível de transmissão do infravermelho no petróleo. Ela é composta conforme detalhado na figura 4.3, onde é



utilizado o canhão de luz com lâmpada de halogênio como fonte de infravermelho. Essa radiação é modulada utilizando um Chopper mecânico em 1,5 kHz. Para detector foi utilizado o P9696-02 ligado ao compensador de temperatura explicado anteriormente. Após, foi utilizado um amplificador de baixo ruído e baixo offset LT1114 (Linear Technology) com ganho 1000 ligado a um AD630 (Analog Devices) implementado como Lock-in. Entre o par óptico, foram utilizadas cuvetas de diversos comprimentos.

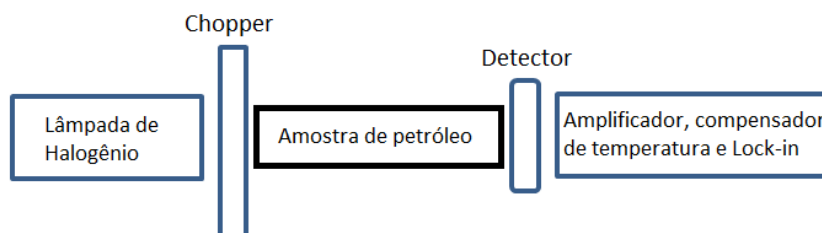


Figura 4.3: Montagem para a medição da transmitância.

Nas extremidades da cuveta são utilizadas janelas ópticas. Nesse caso, janelas ópticas de vidro não são o ideal para os testes de transmitância máxima, devido a sua relativa absorção na faixa do infravermelho (KITAMURA; PILON; JONASZ, 2007), no entanto, para os testes iniciais com espessuras de até 30 mm, lamínulas de vidro com 0,5 mm de espessura foram utilizadas, pois nesse caso, a pequena espessura das lamínulas não afetaram essas medições, além de serem mais fáceis de adapta-las aos suporte de alumínio (figura 4.5). Para as medições com espessuras maiores (60 mm) foram utilizadas janelas de safira que possuem alta transparência no MIR (DOBROVINSKAYA; LYTVYNOV; PISHCHIK, 2009), (figura 4.4), permitindo medições com espessuras maiores.



Figura 4.4: Foto da montagem para a medição da transmitância.

## 4.2.2 Resultados

Antes de utilizar a montagem mais complexa explicada anteriormente, foram realizados testes simples utilizando um emissor de fio quente HSL EMIRS200 com uma termopilha

com filtro em 4,3  $\mu\text{m}$ . Embora tenha sido possível realizar medições com cuvetas de até 5 mm, feitas com armação de alumínio e lamínulas de vidro (ver figura 4.5), foi constatado que esses componentes não eram ideais para o nosso propósito. Pois o fio quente possui uma potência de emissão infravermelha muito baixa, que em conjunto com a termopilha, por serem componentes térmicos, possuem o tempo de resposta muito alto, o que inviabilizaria o seu uso futuro em técnicas ópticas para escoamentos.

A partir disso, novos testes foram realizados, utilizando a montagem explicada na seção 4.2.1, onde foi utilizado como fonte emissora uma lâmpada de halogênio e como detector o fotocondutor P9696-02, para medir a transmitância no infravermelho médio na faixa de 4  $\mu\text{m}$ . Durante a medição, foi feita a compensação da temperatura (de acordo com a seção 4.1.1.1).

Foram utilizadas como cuvetas nas espessuras de 3 a 30 mm os componentes apresentados na figura 4.5, com armação em alumínio e lamínulas de vidro como janela óptica. Para o teste de 60 mm foi utilizado um segmento de duto em PVC de uma polegada de diâmetro com janelas ópticas de safira (figura 4.4)

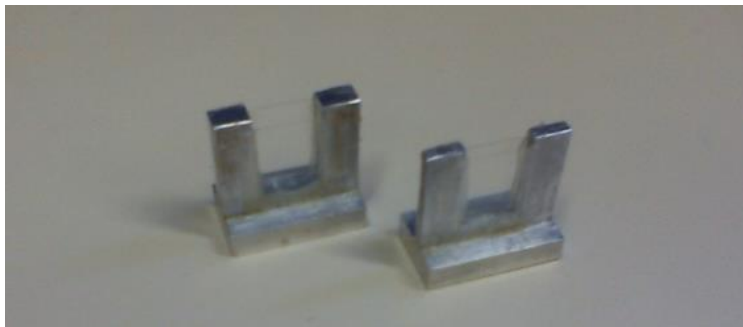


Figura 4.5: Cuvetas utilizadas nos testes de transmissão.

Os testes foram realizados utilizando duas potências diferentes na lâmpada. A primeira potência utilizada na lâmpada foi de 175 W para espessuras de 3 a 30 mm e a segunda foi de 500 W para a espessura de 60 mm, essa mudança na potência foi necessária devido ao fato do sinal medido com 500 W ficar saturado para espessuras abaixo de 5 mm. No entanto, com 175 W não é suficiente para espessuras acima de 15 mm. Os valores medidos foram calculados levando em consideração a potência utilizada na lâmpada de acordo com a eq. 4.2.

$$V_c = V_m \cdot \left( \frac{P_b}{P_m} \right)^2 \quad (4.2)$$

onde:  $V_c$  = tensão calculada,  $V_m$  = tensão medida,  $P_b$  = menor potência utilizada na lâmpada e  $P_m$  = potência da lâmpada utilizada na medição.

Na figura 4.6, foi calculada a relação sinal/ruído para a transmitância do infravermelho médio no petróleo, esse cálculo foi feito a partir do ruído  $V_r$  que era medido quando o fotocondutor não estava recebendo a luz radiada, de acordo com a eq 4.3.

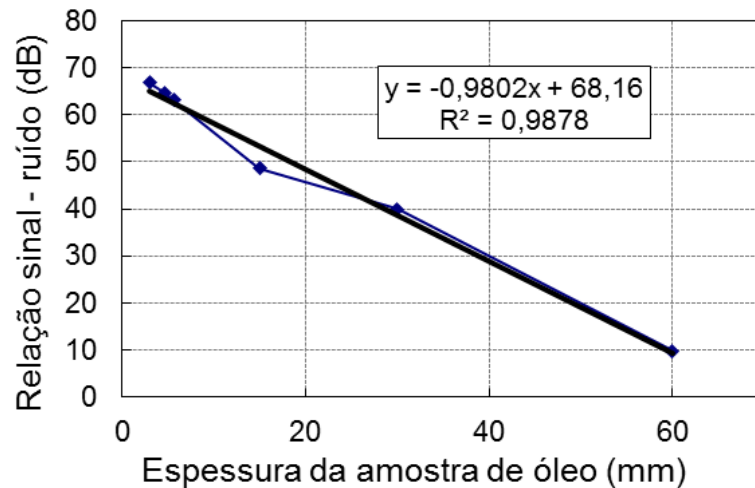


Figura 4.6: Gráfico da transmitância em relação a espessura de petróleo.

$$SNR = 20 \cdot \log \left( \frac{V_c}{V_r} \right) \quad (4.3)$$

Conforme os resultados apresentados no gráfico, foi possível detectar sinal até uma espessura de 60 mm de petróleo. Essa espessura pode ser aumentada trocando a fonte óptica por outra que seja específica para o infravermelho médio.

### 4.3 Tomografia no petróleo

A partir dos testes de transmissão, que provaram ser possível a medição do petróleo no infravermelho médio, foram realizados testes tomográficos, utilizando um protótipo de tomógrafo de primeira geração.

#### 4.3.1 Descrição do sistema

A segunda montagem foi um sistema tomográfico para medir objetos dentro do petróleo, conforme mostrado na figura 4.7. Esse sistema é composto da lâmpada de Halogênio modulada pelo *Chopper*. Foi utilizado o detector P9696-02, juntamente com

o circuito compensador de temperatura e amplificação. Entre o par óptico, foi montada uma estrutura onde é possível fazer a rotação e o deslocamento do objeto.

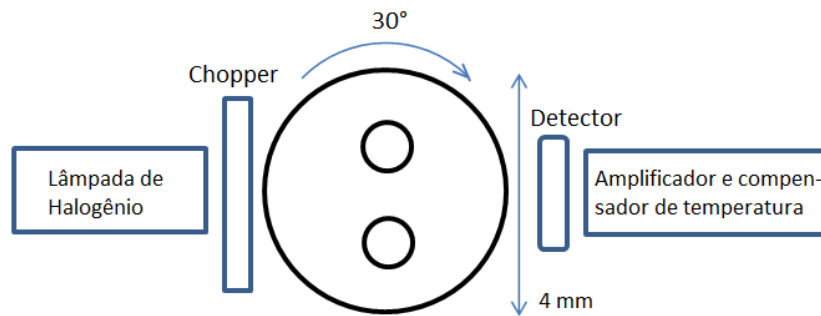


Figura 4.7: Montagem para a medição tomográfica.

### 4.3.2 Resultados

Foram realizados testes com um protótipo de um tomógrafo de primeira geração (um emissor e um receptor), utilizando um tubo de acrílico de 32 mm de diâmetro externo e 26 mm de diâmetro interno (aproximadamente a metade da espessura total dos testes de transmitância). Concluiu-se ser possível o uso do acrílico através de medidas realizadas anteriormente utilizando placas de acrílico com diferentes espessuras, verificando-se que ele possui boa transparência para o infravermelho médio. Foram utilizados dois objetos cilíndricos conhecidos que absorvem a radiação incidente. O objeto de estudo pode ser visto na figura 4.8.



Figura 4.8: Objeto utilizado na medição tomográfica MIR.

O diagrama do setup de medição é o mostrado na figura 4.7. Para a rotação do objeto foi utilizada uma base rotacional, onde foram utilizados 12 ângulos de medição (passos de  $30^\circ$ ), e 6 linhas para cada projeção (4 mm de deslocamento). Uma foto dessa montagem, com petróleo dentro do tubo, pode ser vista na figura 4.9.

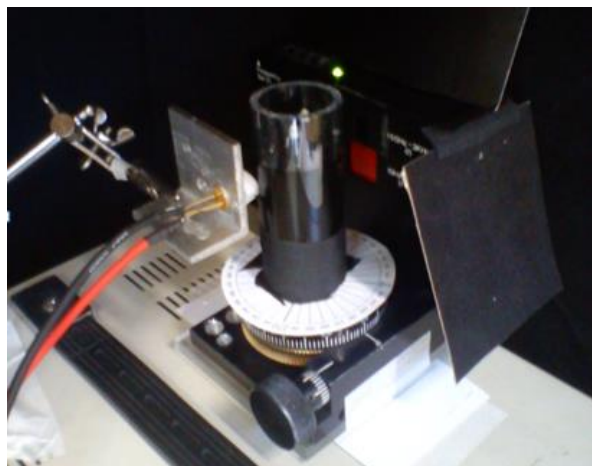


Figura 4.9: Montagem utilizada para a medição tomográfica.

Como pode ser visto na figura 4.9, tanto a rotação quanto o deslocamento foram feitos de forma manual. Foram feitas duas medições, em  $4,3 \mu\text{m}$ . A primeira medição com o tubo vazio (ar), com resultado apresentado na figura 4.10 (a). Após, o tubo foi preenchido com petróleo, resultando na medição mostrada na figura 4.10 (b).

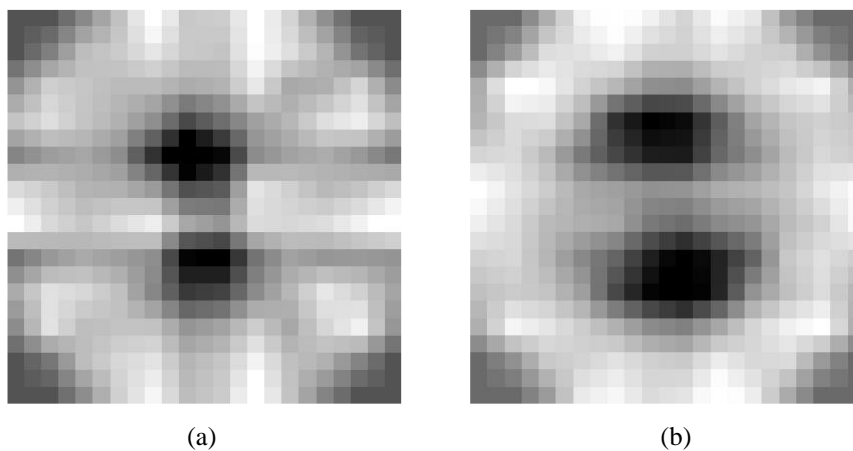


Figura 4.10: Imagem tomográfica reconstruída em  $4,3 \mu\text{m}$  com ar (a) e com petróleo (b).

Embora o resultado tenha ficado bastante próximo, percebe-se que houve um aumento no tamanho dos objetos. A princípio, isso pode ser o resultado de características ópticas como o espalhamento. Outro fator relevante é o sistema ser totalmente manual, o que acaba comprometendo a precisão da medição.

#### 4.4 Conclusão

Com o estudo realizado no infravermelho médio, foi confirmado que é possível fazer a investigação do petróleo nessa faixa do espectro, mais especificamente em  $4,3 \mu\text{m}$ , em

que foi possível a medição de sinal em até 60 mm de espessura de óleo cru, além da realização de uma tomografia simples em um tubo de 26 mm de diâmetro interno. No entanto, devido ao reduzido número de componentes existente no mercado, ainda não é possível a implementação prática desses sistemas.

# Capítulo 5 Sistema de Inferência por Espalhamento Óptico

---

Este trabalho, realizado em conjunto com o aluno de pós-doutorado Robert Fischer, teve como foco a estimação individual das velocidades superficiais do líquido e do gás em escoamentos bifásicos vertical água-ar além de identificar mudanças na velocidade, utilizando um sistema de baixo custo, que consiste na análise do espalhamento óptico. Diferentemente da tomografia óptica, esse sistema não é capaz de realizar o imageamento do escoamento, no entanto, é possível a extração de parâmetros importantes, resultando em uma técnica de grande valia e fácil implementação para a análise e monitoramento de escoamentos bifásicos.

## 5.1 Descrição do sistema

Na figura 5.1 é apresentado o esquemático do sensor utilizado, onde o princípio de funcionamento é a análise do espalhamento e da refração da luz emitida. A luz proveniente do laser (5 mW de potência no comprimento de onda de 532 nm) é transmitida através de um tubo de acrílico transparente em um ângulo oblíquo à superfície do tubo. Do lado oposto ao laser, do lado de fora do tubo de acrílico, é utilizado um papel difusor dividido por paredes opacas em três segmentos (ou janelas). A luz incidente em cada janela é medida por um fotodiodo instalado a 1 cm de distância da superfície do tubo. Para evitar qualquer interferência da iluminação ambiente, o tubo é coberto com um material opaco, com exceção da janela de entrada do laser e das três janelas de saída.

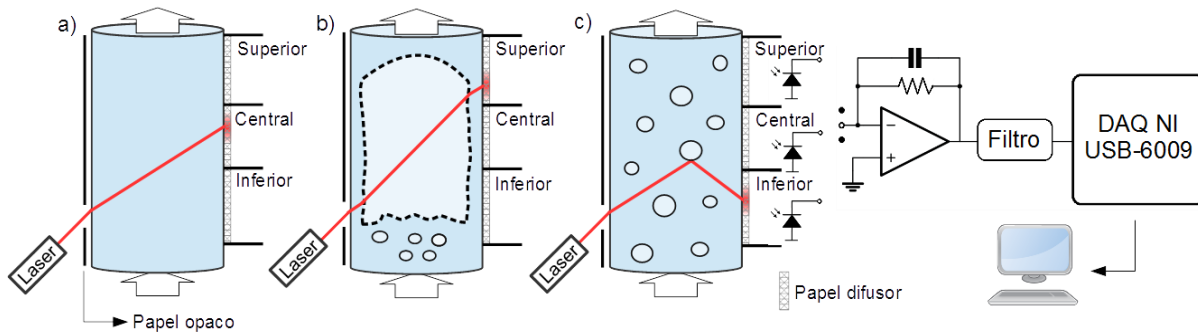


Figura 5.1: Sensor desenvolvido para medição de escoamentos bifásicos através de espalhamento óptico.

De acordo com o tipo de escoamento, a maior parte da luz emitida é direcionada para uma janela específica. No caso apresentado na figura 5.1 a), onde ocorre um escoamento monofásico com água, o feixe laser sofre refração e é medido na janela central. No caso da segunda situação, apresentado na figura 5.1 b), a presença de uma grande bolha de ar (escoamento de golfadas), que possui índice de refração menor que a água, direciona o laser para a janela superior. Já no terceiro caso mostrado na figura 5.1 c), em que apresenta um escoamento com bolhas dispersas, o pequeno diâmetro de cada bolha faz que o laser seja refletido na superfície dessas pequenas bolhas e atinja a janela inferior.

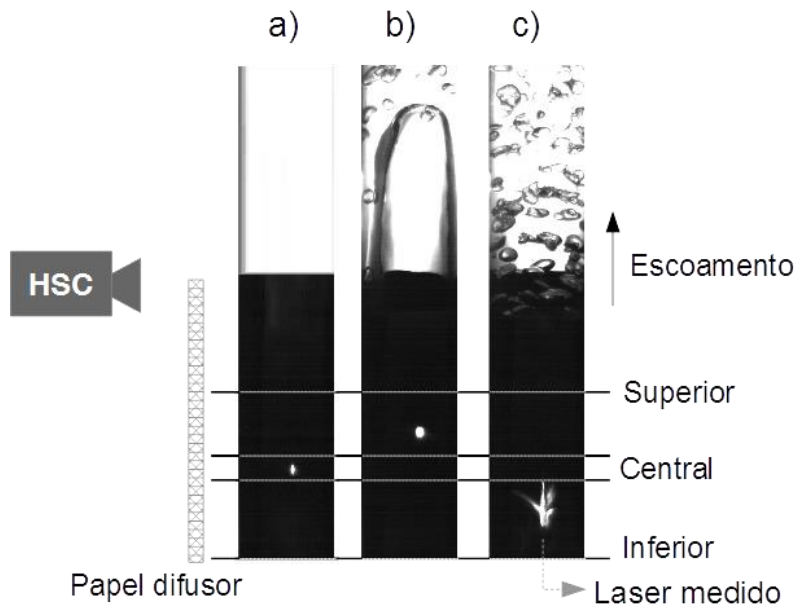


Figura 5.2: Imagens obtidas a partir de uma câmera de alta velocidade, para escoamentos: a) monofásico, b) golfadas e c) bolhas dispersas.

A figura 5.2 a), b) e c), apresenta medições desses três comportamentos utilizando uma câmera de alta velocidade (HSC) para visualizar o comportamento do laser (nesse caso, os fotodiodos foram removidos). Na parte superior da imagem, é



apresentada uma foto do escoamento real no tubo, sendo possível visualizar as bolhas. Na parte inferior, foi colocado um papel difusor para analisar o comportamento do laser nas três situações.

A corrente gerada pelos fotodiodos em resposta ao laser atingindo as diferentes janelas, é convertida em uma tensão proporcional utilizando amplificadores de transimpedância. A malha de feedback foi otimizada especificamente para cada fotodiodo com o intuito de obter o máximo ganho de transimpedância, mantendo o tempo de resposta na ordem de microsegundos, garantindo que as medidas possam ser realizadas em alta velocidade. Os sinais resultantes são filtrados por um filtro passa-baixa com frequência de corte em 15 kHz, e então são amostrados a uma taxa de 5 kHz utilizando uma placa de aquisição de dados (DAQ USB-6009 fabricada pela National Instruments).

## 5.2 Processamento de dados

Diversas informações sobre as características do escoamento podem ser encontradas a partir da análise da série temporal dos dados provenientes do sensor em comparação a um sinal de referência. No entanto, não é possível a medição direta da velocidade de cada fase, pois cada combinação das duas fases, com velocidades distintas, produzem uma série temporal específica, como se fosse uma impressão digital. Com isso, uma alternativa bastante utilizada para a extração de parâmetros de escoamentos é o uso de técnicas de aprendizado de máquina, como por exemplo: máquina de vetores de suporte (SVM) (JI et al., 2014; WANG; ZHANG, 2009), redes neurais artificiais (FAN; YAN, 2014; ROSA et al., 2010; SHABAN; TAVOULARIS, 2015), e sistemas de inferência fuzzy (BANASIAK et al., 2014; DE MESQUITA et al., 2012). Para a implementação desse tipo de técnica, é necessária a extração de parâmetros do sinal medido para a posterior comparação (treinamento) com um sinal de referência.

### 5.2.1 Extração de parâmetros do escoamento

Na figura 5.3, é apresentado um exemplo da série temporal para os três fotodiodos, para velocidades superficiais de 0,5 m/s para o líquido e para o gás (escoamento de golfadas). As áreas sombreadas da série superior podem ser interpretadas como sendo a passagem de grandes bolhas, enquanto que os picos da série inferior, marcados pelos

“x” são as pequenas bolhas. As áreas sombreadas na série temporal central, representam as áreas com poucas ou nenhuma bolha.

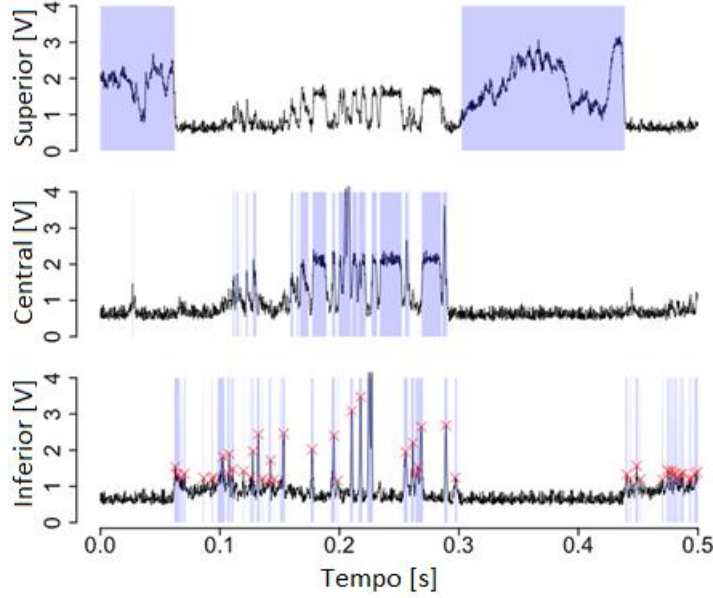


Figura 5.3: Exemplo da série temporal para os três fotodiodos, para velocidades superficiais de 0,5 m/s para o líquido e para o gás.

Para realizar a comparação dos sinais provenientes do sensor com as condições de escoamentos conhecidas, foram extraídos 12 parâmetros (numerados de 1 a 12 na sequência) em uma janela de medição  $W$  de 1 a 6 segundos. Os parâmetros de 1 a 3, calculados com as equações 5.1, 5.2 e 5.3 são a relação entre os sinais integrados de cada fotodiodo, calculados com base nos dados  $S$  de 14 bit provenientes da placa de aquisição de dados, representados pela linha preta na figura 5.3.

$$f_1 = \frac{\int_W S_{superior}}{\int_W S_{central}} \quad (5.1)$$

$$f_2 = \frac{\int_W S_{superior}}{\int_W S_{inferior}} \quad (5.2)$$

$$f_3 = \frac{\int_W S_{central}}{\int_W S_{inferior}} \quad (5.3)$$

Os parâmetros de número 4 a 6 são baseados nos sinais binarizados  $b_{superior}$ ,  $b_{central}$  e  $b_{inferior}$  das áreas sombreadas apresentadas na figura 5.3, com isso, é calculada a fração de tempo em que cada fotodiodo é iluminado pelo laser, de acordo com as equações abaixo:

$$f_4 = \frac{\int_w b_{superior}}{\int_w 1} \quad (5.4)$$

$$f_5 = \frac{\int_w b_{central}}{\int_w 1} \quad (5.5)$$

$$f_6 = \frac{\int_w b_{inferior}}{\int_w 1} \quad (5.6)$$

A partir dos sinais  $b_{superior}$  e  $b_{central}$  também são gerados os parâmetros de número 7 a 10, em que os parâmetros  $f_7$  e  $f_8$  são o número de eventos para cada sinal, e os parâmetros  $f_9$  e  $f_{10}$  são a duração média desses eventos, sendo que no fotodiodo superior, os eventos são as grandes bolhas, enquanto que no fotodiodo central são os momentos sem bolhas. Os dois últimos parâmetros,  $f_{11}$  e  $f_{12}$ , são o número de picos e a distância média entre os picos do sinal  $b_{inferior}$ , que representam as pequenas bolhas.

### 5.3 Resultados

O sistema foi testado usando uma planta piloto de escoamento vertical, localizada no NUEM - UTFPR conforme mostrado na figura 5.4, que utiliza tubos de acrílico com 26 mm de diâmetro interno e 32 mm de diâmetro externo. O sensor óptico foi instalado a 2,38 metros de altura acima do misturador de água e ar. Para garantir dados de referência precisos (utilizados para o treinamento do sistema), o fluxo mássico líquido foi medido com um sensor Coriolis (Micromotion, model F050S11), enquanto que o fluxo de gás foi medido com três placas de orifício calibradas e com correção de temperatura. Os equipamentos são conectados por uma rede Fieldbus Foundation ao computador. Um programa desenvolvido em LabVIEW calcula a velocidade superficial do gás e do líquido  $J$  [m/s] na posição do sensor óptico baseado no fluxo volumétrico  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] do sensor de referência e a área seccional do tubo  $A$  como  $J = Q/A$ .

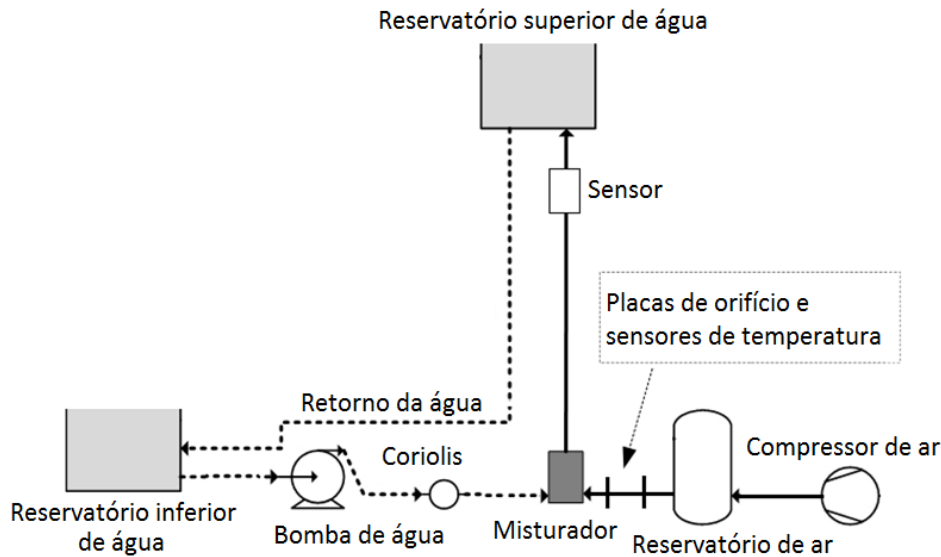


Figura 5.4: Planta piloto de escoamento vertical

### 5.3.1 Situação 1: Identificação direta do padrão de escoamento

Para identificar o padrão de escoamento, é suficiente realizar apenas a análise dos sinais provenientes do sensor, sem a necessidade de nenhum sinal de referência, pois: Luz atingindo o fotodiodo superior indica a presença de grandes bolhas, enquanto que a passagem de pequenas bolhas gera um sinal no fotodiodo inferior. Escoamento monofásico, ou seja, apenas com água, produz um sinal constante no fotodiodo central. Mudanças no padrão de escoamento, por exemplo, de bolhas dispersas para golfadas (uma grande bolha seguida ou não de pequenas bolhas), pode ser detectado em uma fração de segundos apenas comparando o sinal dos fotodiodos (uma discussão detalhada sobre padrões de escoamentos pode ser encontrada em (HEWITT, 2006)). Especialmente para processos onde essas mudanças podem ocasionar situações críticas, esse sensor pode servir como um alarme prévio que pode ser facilmente integrado a um sistema de segurança da planta. Devido às dinâmicas não-lineares que governam o desenvolvimento do escoamento ao longo da planta, os dados medidos em um ponto possuem uma validade local, sendo necessário o monitoramento individual em cada ponto crítico, o que torna esse sensor um sistema promissor e viável devido ao seu baixo-custo.

### 5.3.2 Situação 2: Mudança de velocidade

Nessa situação é analisado se o sistema é capaz de detectar mudanças de velocidade no escoamento ao longo do tempo. A figura 5.5 mostra dois casos em que o  $J_G$  ou o  $J_L$

mudam ao longo do tempo, enquanto o outro parâmetro é controlado para permanecer o mais próximo possível do valor original. Os primeiros 30 segundos de cada medida foram utilizados para treinar o módulo de processamento de dados (o treinamento é marcado nas áreas sombreadas na figura 5.5 a) e c)). A fase de treinamento é seguida por um rápido pulso no parâmetro livre, e então uma fase de relaxamento para a condição original, e, finalmente o parâmetro livre é lentamente incrementado e reduzido.

O processamento de dados foi realizado detectando desvios  $\Delta_t$  dos parâmetros de escoamento pelo cálculo da distância Manhattan (norma L1) entre o vetor dos parâmetros  $f_t$  em qualquer momento e o vetor do parâmetro de referência  $f_{ref}$ , conforme equação 5.7.

$$\Delta_t = \|f_t - f_{ref}\|_1 \quad (5.7)$$

sendo que  $f_{ref}$  são os valores médios dos parâmetros de referência, calculados durante o treinamento.

Os resultados encontrados são apresentados na figura 5.5 b) e d). Apesar de terem acontecido mudanças no padrão de escoamento nos casos c) e d), alternando entre bolhas dispersas e golfadas, gerando dados não lineares, a resposta processada mostrou uma boa relação qualitativa com a medida de referência. Oscilações na medida de referência em a) e b) ocorrem devido ao controle automático da bomba de água tentando reajustar a velocidade da água para a velocidade escolhida inicialmente.

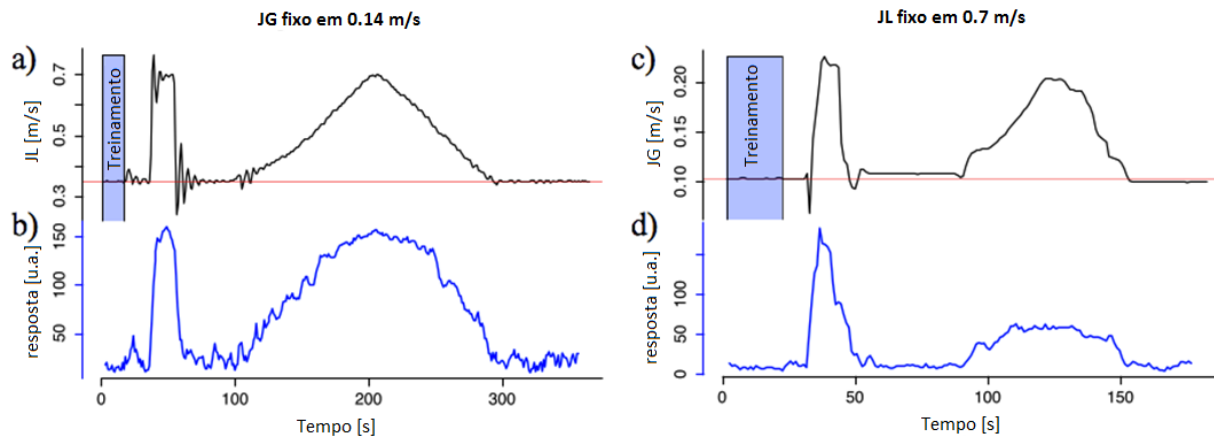


Figura 5.5: Gráficos das velocidades de referência utilizadas nas medições com o sensor óptico por espalhamento (em a) e c) ), com seus respectivos resultados em b) e d).

### 5.3.3 Situação 3: Estimativa dos parâmetros do escoamento

Os mesmos parâmetros utilizados anteriormente também podem ser usados para reconhecer e distinguir específicas “impressões digitais” do escoamento. Algoritmos típicos de classificação podem ser utilizados nessa situação para estimar os padrões de escoamento, por exemplo. Porém, vale lembrar que em várias aplicações de campo, o objetivo não é apenas a classificação do escoamento, mas também uma boa estimativa de parâmetros contínuos dos escoamentos. Nesse caso, é preferível o uso de modelos de regressão. Entretanto, para esses modelos, a qualidade da estimativa depende fortemente de pontos de treinamento próximos, utilizados para a interpolação. Dessa forma, foram medidos 16 pontos de escoamentos bifásicos distintos, marcados pelos pontos na figura 5.6, que também mostra a linha teórica de transição entre cada padrão de escoamento (TAITEL; DUKLER, 1976) (os padrões de escoamentos puderam ser confirmados visualmente). Com isso, esse terceiro teste foi realizado com a intenção de estimar os valores do  $J_G$  e  $J_L$  nos escoamentos medidos.

Os dados gravados foram processados utilizando janelas de tempo que variam entre 3 a 6 segundos. A partir dos parâmetros extraídos durante o processamento, foi utilizado o modelo de Regressão Multivariada por Splines Adaptativa (MARS) (FRIEDMAN, 1991), calculado com o software R utilizando o pacote ‘earth’ (versão 3.2-7) para encontrar uma aproximação nos valores de  $J_G$  e  $J_L$  em relação as medidas de referência, baseado somente nos parâmetros extraídos dos sinais provenientes do sensor.

O resultado encontrado é apresentado na figura 5.6, onde os pontos foram medidos utilizando os equipamentos industriais aferidos da planta de escoamento bifásico, enquanto que as barras de erro representam o resultado encontrado a partir do processamento dos dados do sensor. As barras de erro azuis e vermelhas, representam a diferença entre o resultado apontado pelo modelo e os valores reais medidos, para janelas de tempo de 3 e 6 segundos respectivamente. Os erros médios calculados para as medidas com janelas de tempo de 3 segundos foram de 4% para o  $J_L$  e 3% para o  $J_G$ , e de 3% para o  $J_L$  e 2% para o  $J_G$  para a janela de tempo de 6 segundos. Esses resultados indicam claramente que o sensor é capaz de distinguir diferentes escoamentos, incluindo a velocidade superficial de cada fase, desde que, o modelo de regressão seja treinado com um número suficiente de pontos. Além da

velocidade superficial, também é possível medir a velocidade média frontal das bolhas (DO AMARAL et al., 2013; RUIXI et al., 2013).

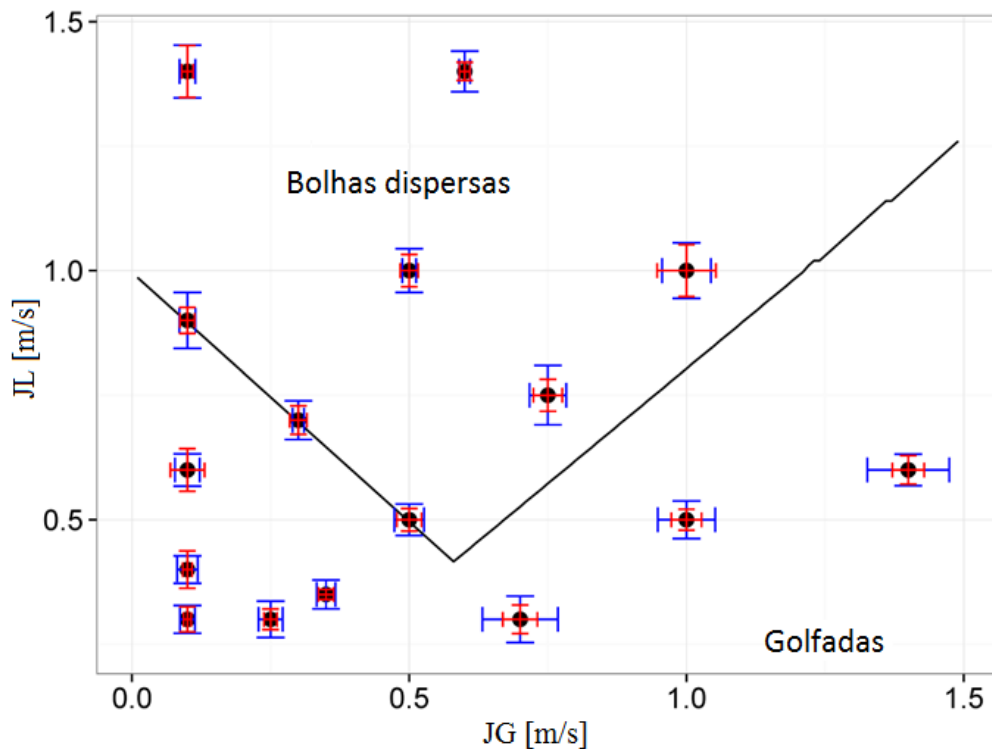


Figura 5.6: Estimativa das velocidades superficiais  $J_G$  e  $J_L$  utilizando o sensor óptico por espalhamento.

## 5.4 Conclusão

Este sensor mostrou ser uma solução altamente eficaz no monitoramento de escoamentos bifásicos, podendo inclusive medir individualmente as velocidades superficiais de cada fase. Entre as características do sensor proposto, podem ser destacadas sua fácil construção, em que é composto por 3 fotodiodos e um laser de baixo custo, e o processamento de dados, que depende apenas dos sinais medidos diretamente pelo sensor, dispensando qualquer processamento digital de sinal prévio, garantindo a detecção e monitoramento de quaisquer mudanças no escoamento em milissegundos. Podendo ser utilizado como um equipamento complementar no sistema de segurança da planta de escoamento.

Como qualquer equipamento, esse sensor possui suas limitações, que é a necessidade de uma janela óptica que, em conjunto com os fluidos medidos possuam transparência no comprimento de onda utilizado no sensor. No entanto, conforme discutido ao longo desta tese, levando em consideração o fato de que cada substância possui seu próprio espectro de transmitância, esse sistema pode ser utilizado para uma

gama elevada de substâncias, incluindo o petróleo, desde que, o seu conjunto óptico seja migrado para o comprimento de onda apropriado.



# Capítulo 6 Conclusão

---

A investigação de escoamentos multifásicos é muito comum em diversas atividades industriais, fato esse que torna a investigação desse fenômeno um ponto chave na segurança e eficiência de processos que ocorrem nesse meio industrial. Isso levou ao desenvolvimento de uma gama de sensores que possam monitorar esse fenômeno. No entanto, a investigação de escoamentos que envolvem petróleo ainda é bastante limitada. De forma que se fez necessário o desenvolvimento dessa tese, na busca de técnicas que possam auxiliar na solução desse problema.

A utilização de um tomógrafo óptico na faixa do infravermelho próximo (950 nm) mostrou-se uma técnica muito promissora na investigação de escoamentos água-ar por ter uma ótima resolução temporal (acima de 500 FPS) e boa resolução espacial, em que através dos testes realizados, provou ser capaz de investigar os padrões de escoamento golfadas e agitado, que são considerados os mais críticos e frequentes pela indústria. Por ser uma técnica não intrusiva, também permite a investigação de escoamentos com componentes sólidos, sendo necessário somente um acesso óptico nas tubulações.

Outro trabalho desenvolvido nessa tese foi a estimação de parâmetros dos escoamentos utilizando o espalhamento óptico. O sensor desenvolvido, de construção simples e baixo custo, provou ser uma técnica de grande valia na identificação de mudanças nas velocidades superficiais do escoamento, além de ser possível a identificação das velocidades individuais do líquido e do gás.

As atividades que envolveram os testes desenvolvidos no infravermelho médio, mostraram ser viável a futura investigação de escoamentos com petróleo devido a sua boa transparência nessa faixa do espectro. Os estudos mostraram ser viável detectar sinal em até 60 mm de petróleo, além de ser possível identificar objetos imersos no mesmo, através de uma reconstrução tomográfica simples em um tubo de 26 mm de diâmetro interno.

Dessa forma, com a disponibilidade comercial de novos componentes ópticos que possuam uma maior potência de emissão e também maior sensibilidade no espectro do infravermelho médio, será possível a migração das técnicas apresentadas, que tornarão possível a investigação de escoamentos com petróleo utilizando equipamentos ópticos, possibilitando uma melhor compreensão do comportamento de escoamentos que envolvam essa substância.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Durante as análises executadas ao longo dessa tese, foram percebidos aprimoramentos que possam melhorar os resultados obtidos, dando continuidade para essas técnicas e originando novos trabalhos na área. As ideias principais serão apresentadas abaixo.

- Tomografia óptica:
  1. Aumento no número de canais: Aumentando o número de canais, é possível extrair uma maior quantidade de dados, o que resultará em imagens com maior resolução espacial.
  2. Mudança na montagem física: Nesse trabalho, os tomógrafos foram montados mantendo o conjunto óptico encostado no tubo, o que resultava em pontos cegos que dificultam a análise de escoamentos no padrão bolhas dispersas. A utilização de componentes ópticos juntamente com uma montagem de acordo com a apresentada por (SCHLEICHER et al., 2008) pode amenizar esse problema. No entanto, isso aumentará o tamanho físico do tomógrafo.
  3. A utilização de técnicas de reconstrução de imagens mais complexas possibilitariam um imageamento tomográfico de melhor qualidade além de facilitar a extração de parâmetros de interesse.
  
- Desenvolvimento no infravermelho médio:
  1. Tomografia no petróleo: Os resultados tomográficos podem ser melhorados com o desenvolvimento de um tomógrafo de primeira geração automatizado, o que reduziria os erros produzidos pela falta de precisão no manuseamento manual. Juntamente com a automatização, a utilização de outros componentes também acarretaria em melhores resultados, como por exemplo, a utilização de um tubo de safira como janela óptica, que

possui uma alta transparência no infravermelho médio, bem como a utilização de um laser como fonte emissora.

2. Análise dos benefícios do compensador de temperatura e do resfriamento dos componentes: Tendo em vista o foco no desenvolvimento de técnicas industriais e a continuidade desse trabalho, é importante uma análise detalhada das vantagens e desvantagens de cada técnica, decidindo qual seria a melhor opção para o desenvolvimento de um tomógrafo óptico no infravermelho médio para aplicação na indústria.

- Sistema de inferência por espalhamento óptico:

1. Novos testes poderiam ser realizados em escoamentos horizontais. Também pode ser testada a influência do ângulo de inclinação do laser nos resultados.

2. Tendo em vista os bons resultados e a simplicidade mecânica e eletrônica dessa técnica, um novo trabalho pode ser realizado migrando o conjunto óptico (laser e receptores) para a faixa do infravermelho médio, para a análise de escoamentos envolvendo petróleo.



# Referências

---

- ABDUL RAHIM, R. et al. Real time mass flow rate measurement using multiple fan beam optical tomography. **ISA transactions**, v. 47, n. 1, p. 3–14, jan. 2008.
- AHMED, W. H.; ISMAIL, I. B. Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements. **Recent Patents on Electrical Engineering**, v. 1, n. 1, 2008.
- AZZOPARDI, B. **Gas-liquid Flows**. New York: Begell House, 2006.
- BANASIAK, R. et al. Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 58, p. 1–14, 2014.
- BARNEA, D. et al. Gas-liquid flow in inclined tubes: Flow pattern transitions for upward flow. **Chemical Engineering Science**, v. 40, n. 1, p. 131–136, 1985.
- BELLON-MAUREL, V.; MCBRATNEY, A. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils – Critical review and research perspectives. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 7, p. 1398–1410, jul. 2011.
- BUDZIER, H.; GERLACH, G. **Thermal Infrared Sensors**. Germany: Wiley, 2011.
- CALAMARI, L.; GOBBI, L.; BANI, P. Improving the prediction ability of FT-MIR spectroscopy to assess titratable acidity in cow's milk. **Food Chemistry**, v. 192, p. 477–484, fev. 2016.
- CAO, Z. et al. A calculable sensor for electrical impedance tomography. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 140, n. 2, p. 156–161, 2007.
- CAREY, S. J. et al. Chemical species tomography by near infra-red absorption. v. 77, p. 111–118, 2000.
- CERNUDA, C. et al. Improved quantification of important beer quality parameters based on nonlinear calibration methods applied to FT-MIR spectra. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, 20 ago. 2016.

- CHRISTY, C. D. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 10–19, abr. 2008.
- CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.
- CSELE, M. **Fundamental light source and lasers**. [s.l.] Wiley, 2004.
- 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.
- DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. **Advanced wire-mesh sensor technology for fast flow imaging**. 2009 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques. **Anais...IEEE**, maio 2009
- DE ARCAS, G. et al. Design of an Intelligent Front-End Signal Conditioning Circuit for IR Sensors. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 55, n. 1, p. 14–20, 2008.
- DE MARCHI, M. et al. Invited review: Mid-infrared spectroscopy as phenotyping tool for milk traits. **Journal of dairy science**, v. 97, n. 3, p. 1171–86, mar. 2014.
- DE MESQUITA, R. N. et al. Classification of natural circulation two-phase flow patterns using fuzzy inference on image analysis. **Nuclear Engineering and Design**, v. 250, p. 592–599, 2012.
- DO AMARAL, C. E. F. et al. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 33, p. 257–264, out. 2013.
- DOBROVINSKAYA, E. R.; LYTVYNOV, L. A.; PISHCHIK, V. Properties of Sapphire. In: **Sapphire**. Boston, MA: Springer US, 2009. p. 55–176.
- DUTRA, G. et al. Optical Imaging Through Crude Oil. **Advanced Photonics**, p. SeTh1C.4, 2014.
- DYAKOWSKI, T. Applications of electrical tomography for gas–solids and liquid–solids flows — a review. **Powder Technology**, v. 112, n. 3, p. 174–192, 2000.
- EWERT, U. et al. Mobile Computed Tomography for Inspection of Large Stationary Components in Nuclear and Aerospace Industries. **Materials Transactions**, v. 53, n. 2,

p. 308–310, 2012.

FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering**. First edit ed. [s.l.] Elsevier, 2009.

FAN, S.; YAN, T. Two-phase air-water slug flow measurement in horizontal pipe using conductance probes and neural network. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 2, p. 456–466, 2014.

FRIEDMAN, J. H. Multivariate Adaptive Regression Splines. **The Annals of Statistics**, v. 19, n. 1, p. 1–67, mar. 1991.

HAMPEL, U. et al. High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications. **Review of Scientific Instruments**, v. 78, 2007.

HAMPEL, U.; FISCHER, F. Ultra Fast Electron Beam X-Ray Tomography and its Application to Multiphase Flow Measurement. p. 565–569, 2008.

HEINDEL, T. J.; GRAY, J. N.; JENSEN, T. C. An X-ray system for visualizing fluid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 19, p. 67–78, 2008a.

HEINDEL, T. J.; GRAY, J. N.; JENSEN, T. C. An X-ray system for visualizing fluid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 19, n. 2, p. 67–78, abr. 2008b.

HEISE, H. M. et al. Recent advances in mid- and near-infrared spectroscopy with applications for research and teaching, focusing on petrochemistry and biotechnology relevant products. **European Journal of Physics**, v. 34, n. 6, p. S139–S159, 1 nov. 2013.

HEWITT, G. F. **Gas-Liquid Flow** Begellhouse, , 2006. (Nota técnica).

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

IÑÓN, F. A.; GARRIGUES, S.; DE LA GUARDIA, M. Combination of mid- and near-infrared spectroscopy for the determination of the quality properties of beers. **Analytica chimica acta**, v. 571, n. 2, p. 167–74, 7 jul. 2006.

JAMALUDIN, J. et al. Optical Tomography System: Application Of Charge Coupled Device (CCD) For Solid And Transparent Objects Detection. **Jurnal Teknologi**, v. 78,

n. 7-4, 24 jul. 2016a.

JAMALUDIN, J. et al. Charge coupled device based on optical tomography system in detecting air bubbles in crystal clear water. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 50, p. 13–25, ago. 2016b.

JANA, A K. et al. An optical probe for liquid–liquid two-phase flows. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 5, p. 1563–1575, 1 maio 2007.

JI, H. et al. Voidage measurement of gas–liquid two-phase flow based on Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 40, p. 199–205, 2014.

JOHANSEN, G. A. Nuclear tomography methods in industry. **Nuclear Physics**, v. 752, p. 696c–705c, 2005.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of Computerized Tomographic Imaging**. [s.l.] New York: IEEE Press, 1998.

KITAMURA, R.; PILON, L.; JONASZ, M. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature. **Applied Optics**, v. 46, n. 33, p. 8118, 2007.

MARASHDEH, Q. et al. A Multimodal Tomography System Based on ECT Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, p. 426–433, 2007.

MARASHDEH, Q. M.; TEIXEIRA, F. L.; FAN, L. Adaptive Electrical Capacitance Volume Tomography. v. 14, n. 4, p. 1253–1259, 2014.

MCDERMOTT, A. et al. Effectiveness of mid-infrared spectroscopy to predict the color of bovine milk and the relationship between milk color and traditional milk quality traits. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 5, p. 3267–3273, maio 2016.

MICHEL, K. et al. Use of near- and mid-infrared spectroscopy to distinguish carbon and nitrogen originating from char and forest-floor material in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 1, p. 63–70, fev. 2009.

MULROONEY, J. et al. Detection of carbon dioxide emissions from a diesel engine using a mid-infrared optical fibre based sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 136, n. 1, p. 104–110, maio 2007.

MULROONEY, J. et al. A mid-infrared optical fibre sensor for the detection of



carbon monoxide exhaust emissions. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 144, n. 1, p. 13–17, maio 2008.

PATYK, R. L. **Métodos ópticos para caracterização de petróleo e dióxido de carbono**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

PIETRZAK, M. Flow patterns and volume fractions of phases during liquid–liquid two-phase flow in pipe bends. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 54, p. 247–258, abr. 2014.

POPESCU, S. **Fifth generation x-ray computed tomography system and operating method** 2009. US7634045

PRASSER, H.-M.; BOTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas–liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, n. 2, p. 111–119, jun. 1998.

RADON, J. On the determination of functions from their integral values along certain manifolds. **Medical Imaging, IEEE Transactions on**, v. MI, n. 4, p. 170–176, 1986.

ROSA, E. S. et al. **Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas–liquid flows**. International Journal of Multiphase Flow. **Anais...**2010

RUIXI, D. et al. Optical method for flow patterns discrimination, slug and pig detection in horizontal gas liquid pipe. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 32, p. 96–102, ago. 2013.

RZĄSA, M. R. Selection of optical tomography parameters for gas bubble shape analysis. **Chemical and Process Engineering**, v. 35, n. 1, p. 19–33, 1 jan. 2014.

SCHLEICHER, E. et al. Design of an optical tomograph for the investigation of single- and two-phase pipe flows. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 9, p. 094006, 1 set. 2008.

SHABAN, H.; TAVOULARIS, S. The wire-mesh sensor as a two-phase flow meter. **Measurement Science and Technology**, v. 26, n. 1, 2015.

STÜRZEL, T. et al. Experimental facility for two- and three-dimensional ultrafast electron beam x-ray computed tomography. **The Review of scientific instruments**, v. 82, n. 2, p. 023702, fev. 2011.

- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AICHE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47–55, jan. 1976.
- TAPP, H. S. et al. Chemical engineering applications of electrical process tomography. **Sensors and Actuators**, v. B 92, p. 17–24, 2003.
- VENDRUSCOLO, T. P. **Sensor wire-mesh de impedância para investigação de escoamentos multifásicos**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- VENDRUSCOLO, T. P. et al. Mid-infrared optical tomography for imaging through petroleum : a feasibility study. p. 5–8, 2015a.
- VENDRUSCOLO, T. P. et al. Multiphase flow parameter estimation based on laser scattering. **Measurement Science and Technology**, v. 26, n. 7, p. 075205, 2015b.
- WANG, H. X.; ZHANG, L. F. Identification of two-phase flow regimes based on support vector machine and electrical capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 11, 2009.
- WEI, Q.; LEBLON, B.; ROCQUE, A. LA. On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties : a review 1. v. 2140, p. 2120–2140, 2011.
- WHALLEY, P. B. **Boiling, Condensation Gas-Liquid Flows**. [s.l.] Oxford Science Publication, 1987.
- WHALLEY, P. B. **Two-Phase Flow and Heat Transfer**. [s.l.] USA: Oxford University Press, 1996.
- WOLFFENBUTTEL, B. M. A. et al. Novel method for non-intrusive measurement of velocity and slug length in two- and three-phase slug flow in capillaries. **Measurement Science and Technology**, v. 13, n. 10, p. 1540, 2002.
- WRIGHT, P. et al. Toward in-cylinder absorption tomography in a production engine. 2005.
- WRIGHT, P. et al. High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine. **Chemical Engineering Journal**, v. 158, n. 1, p. 2–10, 15 mar. 2010.
- XIE, C. G. et al. Electrical Tomography Techniques for Process Engineering Applications. **The Chemical Engineering Journal**, v. 56, p. 127–133, 1995.

YANG, W. Q.; PENG, L. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 14, p. R1–R13, 2003.

YORK, T. et al. Agile Sensing Systems for Tomography. v. 11, n. 12, p. 3086–3105, 2011.

YORK, T. A. Status of electrical tomography in industrial applications. **Journal of Electronic Imaging**, v. 10, p. 698–619, 2001.

YOUNG, M. **Óptica e Lasers**. [s.l.] Edusp, 1998.

## Apêndice A – Lista de Publicações

### Publicações utilizadas como base para o desenvolvimento desta tese:

- Vendruscolo, Tiago. P.; Santos, Eduardo. N.; Schleicher, Eckhard; Hampel, Uwe; Martelli, Cicero; Da Silva, Marco J. “Comparison of Optical Tomography and Wire-Mesh Sensor Applied to Visualize Two-Phase Flow”. *WCIPTS - 8th World Congress on Industrial Process Tomography* Iguassu Falls, PR, Brazil, September 26 to 29, 2016
- Vendruscolo, Tiago P.; Fischer, Robert ; Martelli, Cicero ; Rodrigues, Rômulo L P ; Morales, Rigoberto E M ; Da Silva, Marco J. “Multiphase flow parameter estimation based on laser scattering”. *Measurement Science & Technology*, v. 26, p. 075205, 2015.
- Vendruscolo, Tiago P.; Patyk, Rodolfo L. ; Dutra, Guilherme ; Martelli, Cicero ; Morales, Rigoberto E. M. ; Da Silva, Marco J. “Mid-infrared optical tomography for imaging through petroleum: A feasibility study”. In: *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2015, Pisa. Italy 2015. p. 1400.
- Vendruscolo, Tiago. P.; Patyk, Rodolfo ; Dutra, Guilherme. ; Morales, Rigoberto E. M. ; Martelli, Cicero ; Da Silva, Marco J. “Gas-liquid slug flow investigated by an optical tomography system”. In: *BECEM-Brazilian Meeting of Boiling, Condensation and Multiphase Flows*, 2015, Campinas.
- Vendruscolo, Tiago P.; Fischer, Robert ; Martelli, Cícero ; Rodrigues, Rômulo L. P. ; Morales, Rigoberto E. M. ; Da Silva, Marco J. “Two-phase flow measurement based on oblique laser scattering”. In: *Fifth Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2015, Jeju, South Korea. p. 965541.
- Vendruscolo, Tiago P.; Zibetti, Marcelo V. W. ; Patyk, Rodolfo L. ; Dutra, Guilherme ; Morales, Rigoberto E. M. ; Martelli, Cicero ; Da Silva, Marco J. “Development of NIR optical tomography system for the investigation of two-phase flows”. In: *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2014, Montevideo. 2014. p. 1576-1579.

---

Vendruscolo, Tiago P.; Patyk, Rodolfo ; Dutra, Guilherme ; Martelli, Cicero ; Morales, Rigoberto E. ; Da Silva, Marco J. “Infrared optical tomography applied to two-phase flow monitoring”. In: *OSA - Optical Sensors*, 2014, Barcelona. Advanced Photonics. p. SeTh3B.6.

**Outras publicações não relatadas na tese:**

Dos Santos, E N ; Vendruscolo, T P ; Morales, R E M ; Schleicher, E ; Hampel, U ; Da Silva, M. J. “Dual-modality wire-mesh sensor for the visualization of three-phase flows”. *Measurement Science & Technology*, v. 26, p. 105302, 2015.

Dutra, Guilherme ; Martelli, Cicero ; Patyk, Rodolfo L. ; Da Silva, Marco J. ; Vendruscolo, Tiago P.; Morales, Rigoberto E. M. “Optical imaging of air and water bubbles flowing through oil”. 2015, Jeju. p. 96550T.

Dutra, Guilherme ; Martelli, Cicero ; Patyk, Rodolfo ; Da Silva, Marco J. ; Vendruscolo, Tiago P. ; Morales, Rigoberto E. “Optical Imaging Through Crude Oil”. In: *Optical Sensors*, 2014, Barcelona. Advanced Photonics, 2014. p. SeTh1C.4.

Dos Santos, E. N. ; Vendruscolo, T. P. ; Morales, R. E. M. ; Da Silva, M.J. “Data fusion for dual-modality wire-mesh sensor”. In: *7th World Congress on Industrial Process Tomography*, 2013, Krakow. Proceedings of WCIPT7, 2013.

Wrasse, A. N.; Vendruscolo, T. P. ; Castaldo, F. C. ; Da Silva, M. J. “Capacitive Array Sensor for Direct Imaging of Two-Phase Flows”. In: *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 2014, Belém. Proceedings of ENCIT 2014, 2014.

## Apêndice B – Parâmetros dos Componentes

### Fotocondutor P9696-02

Type No.	Measurement condition	Peak sensitivity wavelength $\lambda_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Cut-off wavelength $\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )	Photo sensitivity $S^*3$ $\lambda=\lambda_p$ $V_S=15\text{ V}$		$D^*$ (500, 600, 1)		$D^*$ ( $\lambda_p$ , 600, 1) ( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ )	Rise time $t_r$ 0 to 63 %	Dark resistance $R_d$ ( $\text{M}\Omega$ )
	Element temperature $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			Min. (V/W)	Typ. (V/W)	Min. ( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ )	Typ. ( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ )		Max. ( $\mu\text{s}$ )	
P9696-02	25	4.0	4.8	$1.5 \times 10^3$	$3.0 \times 10^3$	$1 \times 10^8$	$2.5 \times 10^8$	$2.5 \times 10^9$	10	0.1 to 3
P9696-03				$6.7 \times 10^2$	$1.3 \times 10^3$					
P3207-07 *2				$1.4 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3$					
P9696-102	-10	4.1	5.1	$5.6 \times 10^3$	$7.5 \times 10^3$	$2.5 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$5 \times 10^9$	20	0.5 to 10
P9696-103				$2.5 \times 10^3$	$3.3 \times 10^3$					
P9696-202	-20	4.2	5.2	$6.7 \times 10^3$	$1 \times 10^4$	$5 \times 10^8$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^{10}$		
P9696-203				$3.0 \times 10^3$	$4.7 \times 10^3$					

\*2: Half width 400 nm

\*3: Chopping frequency=600 Hz, load resistance=nearly equal to detector dark resistance

Figura Apêndice B.1: Especificações do fotocondutor P9696-02.

### Termopilha

Thermopile Sensor							
IR filter F1: CWL 4.305 $\mu\text{m}$ , HPBW 125nm				IR filter F2: CWL 5.02 HPBW 250nm			
No.	Thermopile 1 (F4.31)			Thermistor	Thermopile 2 (F5.02)		
	Widerstand Resistance $k\Omega$	Signal-Spannung Signal Voltage $\mu\text{V}$	Zeitkonstante Time constant ms	Widerstand Resistance $k\Omega$	Widerstand Resistance $k\Omega$	Signal-Spannung Signal Voltage $\mu\text{V}$	Zeitkonstante Time constant ms
1	82,4	62	typ 10	100	82,4	107	typ 10
2	83,9	63	typ 10	100	83,9	107	typ 10
3	83,9	64	typ 10	100	83,9	107	typ 10
4	83,8	62	typ 10	100	83,9	104	typ 10
5	83,9	64	typ 10	100	83,9	106	typ 10

Figura Apêndice B.2: Especificações da termopilha.

### Emissor de fio quente HSL EMIRS200

#### Electrical/Optical characteristics ( $T_c=25^{\circ}\text{C}$ )

Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Conditions
Cold Resistance	35	45	55	$\Omega$	
Hot Resistance		72		$\Omega$	450 mW
Electrical input power		450		mW	end of heating cycle
Operating voltage		5.7	6.3	V	450 mW
Operating current		80	90	mA	450 mW
Heating time constant		11		ms	
Cooling time constant		17		ms	
Peak emission wavelength		4.0		$\mu\text{m}$	450 mW
Emissivity	0.9	0.95			VIS to 15 $\mu\text{m}$
Lifetime (measured)		>40'000		hours	50% duty cycle, 30 Hz, 450 mW, ongoing
Heating area		2.1x1.8		mm <sup>2</sup>	
Case Temperature		47		$^{\circ}\text{C}$	50% duty cycle, 30 Hz, 450 mW

Figura Apêndice B.3: Especificações do emissor de fio quente.

## Apêndice C – Hardware

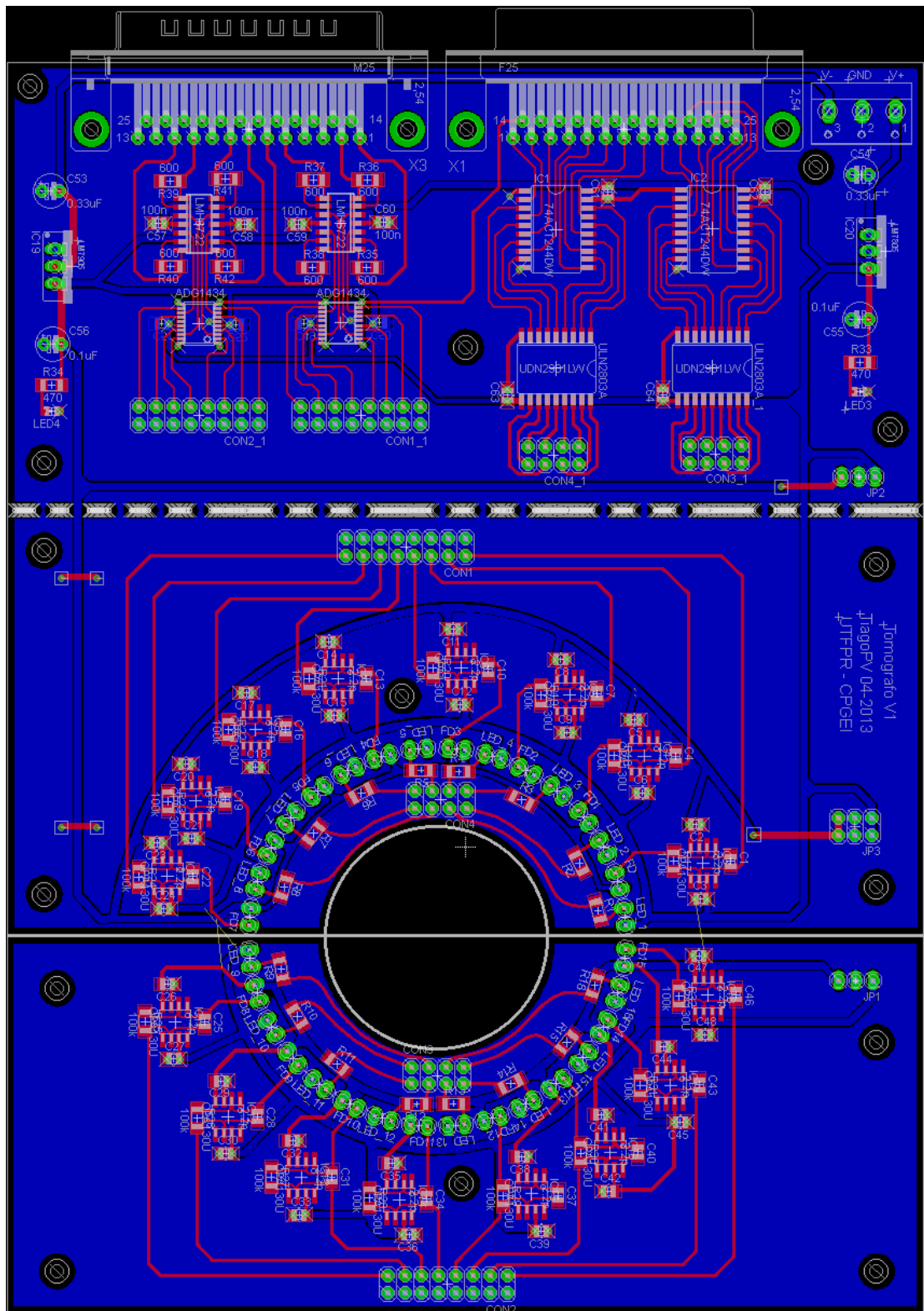


Figura Apêndice C.1: Tomógrafo de uma polegada – resolução de 16 x 16.

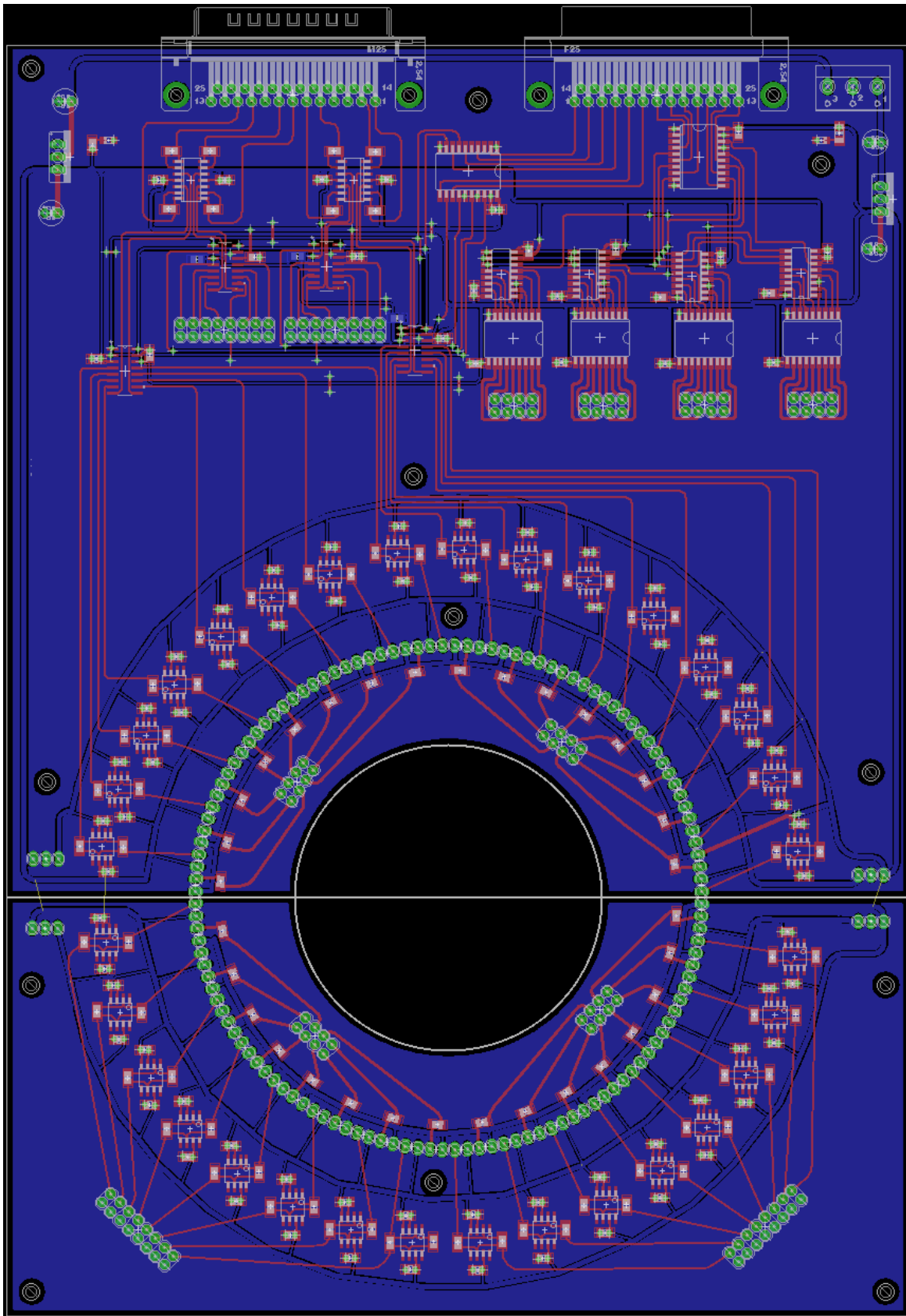


Figura Apêndice C.2: Tomógrafo de duas polegadas – resolução de 32 x 32.



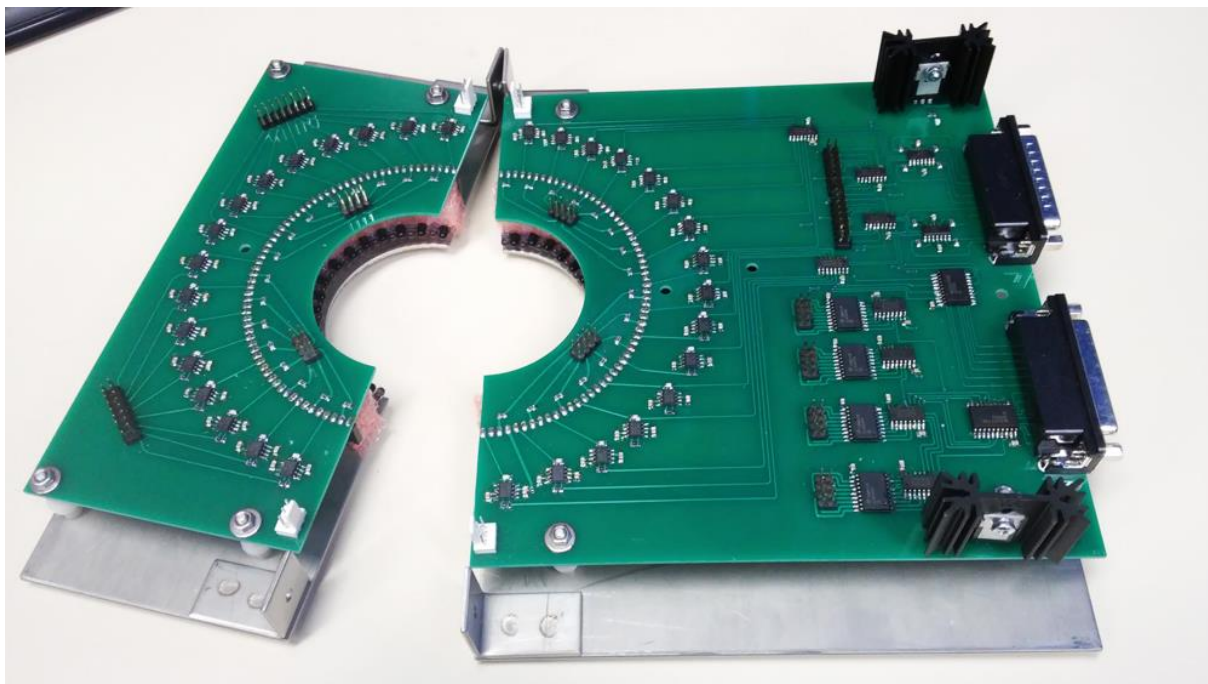


Figura Apêndice C.3: Foto do tomógrafo de duas polegadas.

## Anexo A – Software

### A.1) Visualização

A figura A1 mostra a tela de visualização do sistema, os números apresentados na figura são detalhados abaixo:

Sinograma: Tela de visualização do sinograma, ou seja, os sinais medidos dos fotodiodos, sem nenhum tipo de reconstrução.

Backprojection: Tela de visualização da imagem tomográfica reconstruída com o método de reconstrução de backprojection.

Interpolado: Tela de visualização da imagem do ítem 2 interpolada.

Janela de visualização ao longo do tempo.

Modo: É utilizado para a calibragem do sistema, em que é possível realizar a gravação normal, ou gravar com os LEDs desligados.

Pontos apresentados na figura 0.1:

1. FPS: Configurado automaticamente em 30.
2. Rotação: Rotaciona as imagens apresentadas, em passo de 90°.
3. Calibração baixa: Arquivo de calibração em que são medidos os menores valores de radiação.
4. Calibração alta: Arquivo de calibração em que são medidos os maiores valores de radiação.
5. Limiar: Força os valores calibrados entre os valores configurados no limite superior e inferior.
6. Cantos: O sinograma é reconstruído pela leitura dos 16 fotodiodos, no entanto, os 3 fotodiodos vizinhos de cada lado do LED ativo não recebem o sinal emitido, mas acabam medindo algum sinal refletido, o que pode gerar ruído. Com esse botão esses fotodiodos podem ser zerados.
7. Limite superior e inferior: valores usados como limiar.

8. Calibragem: pode ser usado sem calibragem, com calibragem direta e com calibragem inversa.
9. Escoamento: É a janela de visualização ao longo do tempo. Essa visualização é gerada através da linha selecionada na janela de visualização Backprojection. Pode ser escolhido escoamento horizontal, vertical e estático (sem visualização).
10. N frames: Número de frames mostrado na janela de visualização para escoamento.
11. Filtro: Ativa ou desativa o filtro passa-baixo.
12. Ordem: ordem do filtro.
13. Método: Método de interpolação usado, pode ser: Bilinear, nearest, bicubic spline e bicubic.
14. N: Fator de interpolação.



## Anexo A.2) Gravação

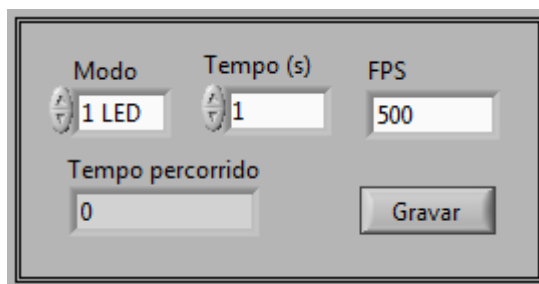


Figura Anexo A.2: Tela de gravação do software.

## Anexo A.3) Calibragem

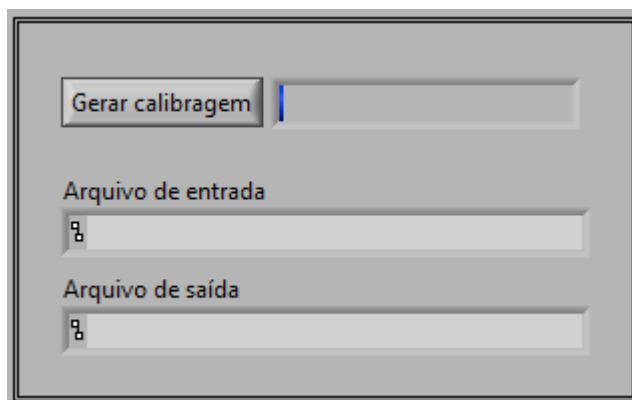


Figura Anexo A.3: Tela para a geração dos arquivos de calibragem.

## Anexo B – Planta De Escoamento Bifásico

Localizada no NUEM (Núcleo de Escoamentos Multifásicos) - UTFPR existe instalada uma planta piloto de escoamento bifásico água-ar, utilizada para o teste dos sensores desenvolvidos. Essa planta possui 9 metros de comprimento utilizando dutos de acrílico de 32 mm de diâmetro externo e 26 mm de diâmetro interno. O diagrama dessa planta é mostrado na figura B.1.

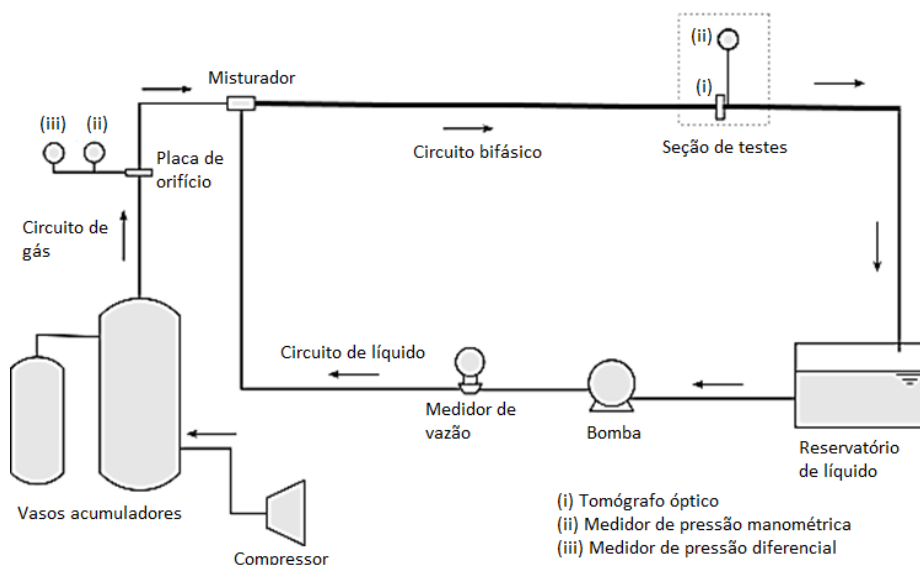


Figura Anexo B.1: Diagrama da planta de escoamento bifásico.

Essa planta pode operar em até 6 bar de pressão, possui locais de medição vertical e horizontal, além de ser possível realizar testes com diferentes inclinações. Essa planta é controlada por um sistema supervisor desenvolvido em LabVIEW pela equipe do NUEM. A tela do *software* é visto na figura B.2.



Figura Anexo B.2: Tela do *software* de controle e monitoramento da planta de escoamento bifásico.

Através desse *software*, é possível fazer o controle de parâmetro como: Pressão, temperatura e velocidades superficiais da água ( $J_L$ ) e do ar ( $J_G$ ). Também é possível fazer o controle por PID (Controlador proporcional integral derivativo) das velocidades superficiais da água e do ar, onde a bomba de água é controlada por um inversor de frequência.