



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS
ELETRÔNICOS

ANDRÉ LUIZ ALCÂNTARA OSTRUFKA

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE
VAZÃO MÁSSICA EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – DM – PPGESE - 001

JOINVILLE

2019

André Luiz Alcântara Ostrufka

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÃO
MÁSSICA EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Coorientador: Prof. Dr. Kleber Vieira de Paiva

Joinville

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ostrufka, André Luiz Alcântara

Análise de técnicas de medição para determinação de vazão
mássica em escoamentos multifásicos / André Luiz Alcântara
Ostrufka ; orientador, Anderson Wedderhoff Spengler,
coorientador, Kleber Vieira de Paiva, 2019.

119 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2. Sistemas de
medição multifásica. 3. Indústria de óleo e gás. 4. Vazão
mássica. I. Spengler, Anderson Wedderhoff . II. Paiva,
Kleber Vieira de. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Sistemas Eletrônicos. IV. Título.

André Luiz Alcântara Ostrufka

Análise de técnicas de medição para determinação de vazão mássica em escoamentos multifásicos

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Moises Ferber de Vieira Lessa, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodrigo Moreira Bacurau, Dr.
Universidade Estadual de Campinas

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Prof. Dr. Alexandro Garro Brito
Coordenador do Programa

Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler
Orientador

Prof. Dr. Kleber Vieira de Paiva
Coorientador

Joinville, 15 de outubro de 2019.

Este trabalho é dedicado a todos que de forma direta ou indireta
contribuíram para que hoje eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu gostaria de agradecer a Deus, pai infinitamente justo e bom, todo poderoso, causa primária de todas as coisas, por me dar a oportunidade de mais uma experiência aqui nesta morada.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Jeferson e Silviane, e também a minha irmã Jennifer por me acompanharem até aqui, ajudando na construção de quem eu sou hoje, me dando muito amor e carinho, sempre me ensinando o melhor e me proporcionando tudo que foi preciso para que eu pudesse chegar onde cheguei. Agradeço também a minha vó Ignez que desde a minha infância até o último momento em que estive conosco, sempre me amou e me ensinou muitas lições.

Agradeço a minha amada Géssica por me apoiar em todas as minhas decisões, ser a companheira que sempre sonhei e por me ajudar sempre que preciso, seja com seu carinho, sua atenção e pelo seu amor.

Agradeço aos colegas e professores que passaram pelo meu caminho nessa jornada acadêmica, em especial ao professor Anderson, por me orientar desde a época da graduação, sempre me dando o apoio necessário. Também agradeço aos professores Kleber e Jorge pelo auxílio importantíssimo, não somente no período de desenvolvimento deste trabalho, mas também em outros momentos durante minha passagem pela UFSC.

Agradeço aos amigos e colegas que também foram fundamentais para que eu pudesse construir a bagagem necessária para conquistar mais esta etapa, compartilhando conhecimento, ideias, risadas e conversas dos mais variados temas.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Jesus e a todos aqueles irmãos do plano maior que sempre estiveram ao meu lado, em todos os momentos da minha vida. Sempre na torcida para que eu seguisse o caminho que um dia eu mesmo me comprometi, e me apoiando para que eu sempre continuasse seguindo em frente.

Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. (Hammed, 1996)

RESUMO

Sistemas de medição multifásica são cada vez mais importantes para a indústria de óleo e gás, uma vez que essas tecnologias proporcionam uma maior eficiência para quantificar a produção quando comparadas a técnicas convencionais. Com base em um levantamento de diversas técnicas de medição de escoamentos multifásicos, este trabalho propõe a análise e o desenvolvimento de sistemas de medição de massa específica através de correlações analíticas e empíricas, velocidade de escoamento através de tomada de pressão diferencial em tubo de Venturi e fração de fase através de uma técnica de absorção óptica em infravermelho. Juntos esses sistemas podem ser utilizados para aferição de vazões mássicas em escoamentos multifásicos de água, óleo e ar. O desenvolvimento desses sistemas englobam o projeto e construção de circuitos eletrônicos de *hardware* para aquisição, conversão e processamento dos sinais medidos, assim como toda a estrutura de *software* para controle, automatização e gerenciamento dos testes experimentais. Ao longo do trabalho são descritos os principais aspectos de desenvolvimento e metodologia utilizados para construção de cada sistema de medição, assim como os resultados dos testes realizados para validação de cada sistema. As estimativas de massa específica e tomada de pressão diferencial em um tubo de Venturi foram realizadas utilizando uma bancada experimental multifásica com escoamento de água e ar, enquanto a determinação do perfil de variação da absorbância da luz em comprimentos de onda de 1490 nm e 850 nm foi feito para água, óleo e ar utilizando uma estrutura de alinhamento do conjunto emissor-receptor luminoso construída em laboratório. As estimativas de massa específica utilizando o sistema proposto foram validadas experimentalmente a partir da análise dos erros associados às medições. Os perfis de variação de pressão ao longo do tubo de Venturi foram determinados em bancada, porém, para que o algoritmo de cálculo das velocidades possa ser utilizado ainda é necessário que a modelagem física de um dos termos do sistema de equações seja realizada. Os testes com o sistema óptico permitiu caracterizar a variação da absorbância de cada líquido em relação a variação de altura de líquido. Para que as frações de fase possam ser determinadas a partir do sistema linear baseado na lei de *Beer-Lambert*, a estrutura de testes precisa de algumas modificações. Além dos testes realizados, alguns aperfeiçoamentos são necessários para que em trabalhos futuros seja possível utilizar os sistemas propostos em conjunto para aferição das vazões mássicas de água, óleo e ar em testes multifásicos de forma dinâmica.

Palavras-chave: Sistemas de medição multifásica. Indústria de óleo e gás. Vazão mássica. Massa específica. Velocidade de escoamento. Fração de fase.

ABSTRACT

Multiphase measurement systems are important to the oil & gas industry, since this kind of technology provides greater efficiency for quantifying production when compared to conventional techniques. Based on a survey of several multiphase flow measurement techniques, this work proposes the development of density measurement systems through analytical and empirical correlations, flow velocity through differential pressure in a Venturi and phase fraction through an infrared optical absorption technique. All those systems together can be used for estimating mass flow in multiphase water, oil and air flows. The development of these systems includes the design and construction of hardware electronic circuits for acquisition, conversion and processing of measured signals, as well as the entire software structure for control, automation and management of experimental tests. Throughout the work the key aspects of development and methodology used for the construction of each measurement system, as well as the results of the tests performed to validate each system are described. Estimation of specific mass and differential pressure in a Venturi tube were performed by using a multiphase experimental bench with water and air flow. In the other hand, the light absorbance variation profiles at 1490 nm and 850 nm wavelengths for water, oil and air were determined by using a laboratory built light emitter-receiver alignment structure. The density estimates using the proposed system were experimentally validated by measurement error analysis. The pressure variation profiles through Venturi were determined during tests, however, in order to use the algorithm that calculates flow velocities, one of the terms from the equation system still needs to be physically modelled. The optical system tests allowed each liquid absorbance to be characterized according to liquid height. To determine phase fractions based on the linear system built with Beer-Lambert law principles, the test structure needs some modifications. Despite the tests performed, some improvements are needed in future work so that it will be possible to use the jointly proposed systems to measure the mass flow rates of water, oil and air in multiphase tests dynamically.

Keywords: Multiphase measurement systems. Oil & Gas Industry. Mass flow. Density. Flow velocity. Phase fraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de aferição de vazão mássica a partir de medição de massas específicas, velocidades médias e frações de fase em escoamento multifásico de água, óleo e gás.	23
Figura 2 – Regimes de escoamento para fluxo bifásico vertical.	24
Figura 3 – Regimes de escoamento para fluxo bifásico horizontal.	25
Figura 4 – Visão superior e lateral de um medidor de massa específica por peso.	28
Figura 5 – Variação da massa específica de óleo <i>crude</i> com temperatura e pressão.	30
Figura 6 – Variação da massa específica de água com temperatura e pressão.	31
Figura 7 – Esquemático de um tubo de Venturi.	33
Figura 8 – Diagrama de um sistema de medição por absorção luminosa.	40
Figura 9 – Modelo 3D do <i>DF-5420 In-line Concentration (Density) Meter</i>	44
Figura 10 – Medidor Multifásico <i>Roxar MPFM 2600</i>	44
Figura 11 – <i>Medidor Multifásico Phasewatcher</i>	45
Figura 12 – Modelagem 3D da bancada de escoamento multifásico.	48
Figura 13 – Bancada de escoamento multifásico.	48
Figura 14 – Visão superior da bancada de escoamento multifásico e seus principais componentes.	49
Figura 15 – EPOSMote III.	50
Figura 16 – Placa eletrônica de automatização da bancada multifásica.	52
Figura 17 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> embarcado no EPOSMote III da placa de automatização da bancada experimental.	53
Figura 18 – Diagrama global da automatização da bancada experimental multifásica.	54
Figura 19 – Medidor <i>Coriolis</i> e transdutor de pressão ligados na tubulação de ar.	56
Figura 20 – Medidor <i>Coriolis</i> e transdutor de pressão ligados na tubulação de água.	56
Figura 21 – Tubo de Venturi acoplado à bancada experimental multifásica.	58
Figura 22 – Placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão.	59
Figura 23 – Posicionamento dos sensores de pressão diferencial no Venturi.	60
Figura 24 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> embarcado no EPOSMote III da placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão.	60
Figura 25 – Sistema linear de equações e legenda de significado dos termos ($A \cdot X = B$).	61
Figura 26 – Seções diferenciais do Venturi para cálculo de iterações pelo algoritmo.	63
Figura 27 – Espectro de absorção infravermelho da água e óleos <i>crude</i>	65
Figura 28 – Esquemático do LDI-1490-DFB-2.5G-20/80.	66

Figura 29 – Esquemático do LDI-850-FP-20/70.	66
Figura 30 – Desenho do PDI-80-2G-K.	67
Figura 31 – Estrutura interna do colimador.	67
Figura 32 – Placa eletrônica do sistema de medição de fração de fase com <i>lasers</i> e fotodiodo.	69
Figura 33 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> embarcado no TM4C123GH6PM do sistema de medição de fração de fase.	70
Figura 34 – Medidor de potência óptica KING-60S.	71
Figura 35 – Estrutura de alinhamento para testes do sistema de medição óptico.	72
Figura 36 – Estrutura de alinhamento para realização dos testes de medição óptica.	74
Figura 37 – Caso de teste contendo uma camada de ar e outra de líquido.	76
Figura 38 – Perfil de queda de pressão em um tubo de Venturi clássico.	82
Figura 39 – Curvas de queda de pressão ao longo do tubo de Venturi para escoamento monofásico de água considerando diferentes vazões do escoamento.	83
Figura 40 – Curvas de perda de carga ao longo do tubo de Venturi para escoamento de água-ar considerando vazão de ar constante.	84
Figura 41 – Curvas de perda de carga ao longo do tubo de Venturi para escoamento de água-ar considerando vazão de água constante.	84
Figura 42 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando alinhamento perfeito. (a) Sem efeito de refração. (b) Com efeito de refração.	88
Figura 43 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando um deslocamento longitudinal do emissor de 1 mm à direita.	89
Figura 44 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando um deslocamento angular de 2° do emissor. (a) Raio que chega mais a esquerda do emissor. (b) Raio que chega mais a direita do emissor.	90
Figura 45 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando deslocamento longitudinal e angular simultaneamente.	92
Figura 46 – Curva experimental de absorbância em função da altura de coluna de água com feixe de luz à 1490 nm.	94
Figura 47 – Curva experimental de absorbância em função da altura de coluna de água com feixe de luz à 850 nm.	94
Figura 48 – Curva experimental de absorbância em função da altura de coluna de óleo <i>crude</i> com feixe de luz à 850 nm.	95

Figura 49 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo <i>crude</i> com feixe de luz à 1490 nm.	95
Figura 50 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo térmico com feixe de luz à 1490 nm.	96
Figura 51 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo térmico com feixe de luz à 850 nm.	96
Figura 52 – Caminho da energia considerando perdas.	99
Figura 53 – Queda de potência luminosa para água, óleo <i>crude</i> e ar em 1490 nm.	100
Figura 54 – Queda de potência luminosa para água, óleo <i>crude</i> e ar em 850 nm.	101
Figura 55 – Esquemático da placa eletrônica de automatização da bancada experimental ...	113
Figura 56 – Esquemático da placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão.	114
Figura 57 – Esquemático da placa eletrônica do sistema de medição de fração de fase.	115

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{Q}	Vazão volumétrica total	$[m^3/s]$
\dot{Q}_g	Vazão volumétrica do gás	$[m^3/s]$
\dot{Q}_a	Vazão volumétrica da água	$[m^3/s]$
\dot{Q}_o	Vazão volumétrica do óleo	$[m^3/s]$
A	Área total da seção transversal do duto	$[m^2]$
V_l	Velocidade de escoamento do líquido	$[m/s]$
V_g	Velocidade de escoamento do gás	$[m/s]$
V_a	Velocidade de escoamento da água	$[m/s]$
V_o	Velocidade de escoamento do óleo	$[m/s]$
V	Velocidade de escoamento	$[m/s]$
α	Fração de fase do gás	$[-]$
β	Fração de fase da água	$[-]$
γ	Fração de fase do óleo	$[-]$
\dot{M}	Vazão mássica total	$[kg/s]$
ρ_g	Massa específica do gás	$[kg/m^3]$
ρ_a	Massa específica da água	$[kg/m^3]$
ρ_o	Massa específica do óleo	$[kg/m^3]$
ρ	Massa específica do fluido	$[kg/m^3]$
v	Volume da amostra	$[m^3]$
m	Massa da amostra	$[kg]$
C	Constante elástica da mola	$[N/m]$
τ	Período de oscilação	$[1/s]$
P_g	Pressão do gás	$[Pa]$
R_g	Constante do gás para o ar	$[\frac{kJ}{kg.K}]$

T_g	Temperatura do gás	[K]
Δ	Deflexão no centro do tubo	[m]
W	Peso combinado do tubo + fluido	[N]
L	Comprimento do tubo	[m]
E	Módulo de elasticidade do material do tubo	[N/m ²]
I	Momento de inércia do tubo	[m ⁴]
Z	Impedância acústica	[$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$]
c	Velocidade do som	[m/s]
V_{lam}	Velocidade média do escoamento laminar	[m/s]
μ	Viscosidade do fluido	[Pa. s]
$\frac{\Delta p}{\Delta x}$	Gradiente de pressão	[Pa/m]
R	Raio do tubo	[m]
V_{tur}	Velocidade média do escoamento turbulento	[m/s]
n	Constante exp. relacionada ao n° de Reynolds	[-]
V	Velocidade do fluido	[m/s]
p	Pressão do fluido	[Pa]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Altura do escoamento	[m]
D	Diâmetro da seção inicial do tubo de Venturi	[m]
d	Diâmetro da seção da garganta do tubo de Venturi	[m]
I_{ab}	Intensidade de radiação após atravessar o meio	[eunit]
I_I	Intensidade de radiação incidente	[eunit]
μ_{ab}	Coefficiente de absorção de massa	[cm ² /g]
d_{ab}	Espessura do meio absorvedor	[cm ² /g]
θ_1	Ângulo de incidência da luz no meio 1	[°]
θ_2	Ângulo de incidência da luz no meio 2	[°]

n_1	Índice de refração do meio 1	[–]
n_2	Índice de refração do meio 2	[–]
A_b	Absorbância	[–]
I_0	Intensidade da luz incidente	$[W/m^2]$
I_1	Intensidade da luz após passar pelo meio	$[W/m^2]$
ϵ	Absortividade molar	$[\frac{l}{mol.cm}]$
l	Caminho percorrido pela luz	$[cm]$
C_d	Concentração da substância	$[mol/l]$
\dot{m}	Vazão mássica	$[kg/s]$
c_d	Coefficiente de descarga	[–]
β	Razão entre diâmetros da garganta e seção inicial do Venturi	[–]
ϵ	Fator de expansividade	[–]
Δp	Pressão diferencial no Venturi	$[Pa]$
σ_{ρ_g}	Incerteza da massa específica do gás	$[kg/m^3]$
σ_{p_g}	Incerteza da massa específica do gás	$[Pa]$
σ_{T_g}	Incerteza da massa específica do gás	$[K]$
a_a	Altura de coluna de água	$[mm]$
a_o	Altura de coluna de óleo	$[mm]$
a_{ar}	Altura de coluna de ar	$[mm]$
a_{liq}	Altura de coluna do líquido	$[mm]$
l	Caminho total percorrido pela luz	$[mm]$
f_a	Fração de fase da água	[–]
f_o	Fração de fase do óleo	[–]
f_{ar}	Fração de fase do ar	[–]
$A_{b,T}$	Absorbância total do sistema	[–]
$A_{b,a}$	Absorbância da água	[–]

$A_{b,o}$	Absorbância do óleo	$[-]$
$A_{b,ar}$	Absorbância do ar	$[-]$
$A_{b,liq}$	Absorbância do líquido	$[-]$
P_1	Potência medida pelo fotodiodo	$[nW]$
P_0	Potência emitida pelo <i>laser</i>	$[nW]$
C_{d_a}	Concentração molar da água	$[mol/l]$
C_{d_o}	Concentração molar do óleo	$[mol/l]$
$C_{d_{ar}}$	Concentração molar do ar	$[mol/l]$
$C_{d_{liq}}$	Concentração molar do líquido	$[mol/l]$
ϵ_a	Absortividade molar da água	$[\frac{l}{mol.cm}]$
ϵ_o	Absortividade molar do óleo	$[\frac{l}{mol.cm}]$
ϵ_{ar}	Absortividade molar do ar	$[\frac{l}{mol.cm}]$
ϵ_{liq}	Absortividade molar do líquido	$[\frac{l}{mol.cm}]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivos Específicos.....	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CONCEITOS BÁSICOS.....	21
2.2	REGIMES DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS	23
2.3	MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS	25
2.3.1	Técnicas de medição de massa específica.....	26
2.3.1.1	Vibração	27
2.3.1.2	Peso	28
2.3.1.3	Ultrassom.....	29
2.3.1.4	Correlação Pressão/Temperatura.....	29
2.3.2	Técnicas de medição de velocidade de escoamento.....	31
2.3.2.1	Tubo de Venturi.....	32
2.3.2.2	Correlação Cruzada	35
2.3.3	Técnicas de medição de fração de fase.....	36
2.3.3.1	Impedância Elétrica	36
2.3.3.2	Atenuação de raios γ	38
2.3.3.3	Absorção Infravermelho	39
2.3.3.4	Fluorescência.....	42
2.3.3.5	Ressonância Magnética	43
2.3.4	Soluções comerciais.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	47
3.1.1	Automatização da Bancada Multifásica.....	50

3.2	SELEÇÃO DAS TÉCNICAS E DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	54
3.2.1	Sistema de Medição de Massa Específica.....	55
3.2.2	Sistema de Medição de Velocidade de Escoamento Líquido-Gás	57
3.2.3	Sistema de Medição de Fração de Fase.....	64
3.2.3.1	Placa eletrônica de controle do <i>laser</i> e dos fotodiodos	65
3.2.3.2	Estrutura de testes para sistema de detecção de fração de fase	71
3.2.3.3	Sistema linear de equações para determinação de fração de fase	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA	78
4.2	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	82
4.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE FASE	85
4.3.1	Análise de sensibilidade de alinhamento óptico e efeitos de refração.....	85
4.3.1.1	Alinhamento ideal	86
4.3.1.2	Alinhamento com pequenos deslocamentos.....	88
4.3.2	Curvas de absorbância e determinação das constantes <i>Kliq</i>.....	92
4.3.3	Caminho de energia e perdas de potência luminosa.....	98
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICE A – Esquemático da placa eletrônica de automatização da bancada experimental.....	113
	APÊNDICE B – Esquemático da placa eletrônica de aquisição de sensores diferenciais de pressão	114
	APÊNDICE C – Esquemático da placa eletrônica do sistema de medição de fração de fase	115

1 INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo possui um papel fundamental no fornecimento de combustíveis, como gasolina, óleo diesel, querosene e outros, que abastecem diversas indústrias no mundo todo, principalmente nos setores automobilístico, de transportes e de energia (CLEWS, 2016). Além disso, uma grande variedade de produtos essenciais para outros mercados também depende dessa indústria, como asfalto, fertilizantes, solventes, borrachas, lubrificantes, entre outros (ENEH, 2011).

A indústria do petróleo pode ser classificada em três áreas principais dentro da cadeia de produção, cada uma necessitando de tecnologias específicas para sua operação. A primeira área, conhecida como *upstream*, inclui os processos de extração e produção da matéria-prima extraída de reservatórios subterrâneos, que geralmente é composta em sua maior parte por óleo *crude* (petróleo) e gás natural (DEVOLD, 2013). A segunda área, *midstream*, abrange os processos de armazenamento e transporte dessas substâncias, incluindo desde tubulações até veículos de carga e transporte. Finalmente, a terceira área, chamada de *downstream*, contempla os setores de refinaria, marketing e distribuição, onde então os produtos chegam até o consumidor (JAFARINEJAD, 2016).

De acordo com BP (2018), a produção global de óleo no ano de 2017 chegou a 92,6 milhões de barris por dia, sendo os Estados Unidos, Arábia Saudita e Rússia os maiores produtores, com 13, 11,9 e 11,2 milhões de barris por dia, respectivamente. Já o consumo mundial, no mesmo ano, chegou a 98,2 milhões de barris por dia, considerando a existência de reservas mundiais. Isso mostra que a demanda por combustíveis fósseis ainda é muito grande. Atualmente, segundo Clews (2016), a taxa de crescimento da produção de petróleo no mundo chegou a um patamar de maturação, porém, mesmo com essas baixas taxas de crescimento, essa indústria ainda é responsável por satisfazer aproximadamente metade da demanda global de energia. Dado as projeções de crescimento do uso energético devido ao crescimento da população e desenvolvimento industrial, os produtos do petróleo provavelmente continuarão a ser necessários por pelo menos mais algumas décadas.

Mesmo não estando nas primeiras posições no ranking mundial de produção na indústria do petróleo, o Brasil possui um papel relevante neste segmento, principalmente após a descoberta do Pré-Sal, que potencializou muito a capacidade produtiva do país com suas

reservas estimadas em 50 a 90 bilhões de barris de hidrocarbonetos (óleo + gás natural) (OLIVEIRA; RUBIANO, 2012). De acordo com o relatório de Balanço Energético Nacional de 2017 (BRASIL, 2017), a produção doméstica de petróleo e produtos derivados atingiu uma média de 2,52 milhões de barris por dia, o que representa a maior parte do suprimento de energia interno do país, correspondente a 36,5%. Além disso, em 2017, este setor somou a quantia de 21,18 bilhões de dólares em exportação e 17,5 bilhões de dólares em importação. Esse grande potencial de produção vem principalmente da empresa estatal Petrobras, classificada como uma das 20 maiores companhias de óleo e gás com reservas comprovadas no mundo (JAFARINEJAD, 2016). Por ser uma empresa estatal, o governo brasileiro exerce grande influência na gestão da companhia, também atuando na regulação e quantificação da produção de óleo (SANTOS et al., 2016). A receita e o lucro gerado por essa indústria são determinados a partir de diversos fatores, sendo dois deles muito importantes. O primeiro é o preço do óleo *crude*, que varia de acordo com o mercado internacional e determina a precificação de todos os produtos derivados do mesmo. Por isso, esses valores podem oscilar dependendo da época ou da economia mundial. O segundo fator é referente a produção total de óleo e gás gerada pelos diversos pontos de extração (CLEWS, 2016), que deve ser medida ou estimada constantemente para que o monitoramento seja possível. Uma das principais maneiras de estimar a produção total é através da medição das vazões mássicas (fluxo) de cada uma das fases que compõe o escoamento multifásico.

Tecnologias que permitem medições precisas de fluxo são muito importantes economicamente, pois proporcionam a obtenção de informações necessárias para estimar a quantidade de matéria prima extraída. Erros sistemáticos nessas estimativas podem resultar em graves prejuízos econômicos (ORIJ; ODAGME, 2015). Além disso, essas medições também contribuem para a otimização da produção, que é realizada através de ajustes em válvulas de estrangulamento, controle de pressão de água injetada no poço para maximizar a extração, entre outros (FOSS; KNUDSEN; GRIMSTAD, 2018).

O método convencional usado para estimar a produção de um poço de extração consiste na utilização de um tanque separador especial usado para quantificar o volume de cada substância (água, gás e óleo) produzida em um intervalo de tempo. O fluxo de cada poço é direcionado individualmente para esse separador, parando a produção do mesmo durante o período de medição. O líquido é então separado em três fases dentro do separador: óleo, água e gás. Depois de um tempo suficiente para que a separação seja realizada, métodos de medição monofásica são aplicados em cada um para estimar a quantidade gerada de cada

substância naquele intervalo de tempo de medição (DAHL; MICHELSEN et al., 2005). Esses dados são gravados e utilizados como referência até que o próximo processo de medição seja realizado, podendo este ocorrer horas, ou até mesmo dias depois. Para poços que exigem um controle frequente, visando manter a estabilidade ou produzir com taxas de fluxo ótimas para operar em máxima capacidade, o método convencional pode ser insatisfatório (LORENTZEN et al., 2010).

Para a indústria de óleo e gás, é desejável que as medições de vazão mássica sejam realizadas em tempo real sem a separação das fases. Além de maximizar a produção através de um monitoramento constante, isso reduz os custos iniciais de instalação, pois não há a necessidade de toda a infraestrutura convencional de separação e medição (OLIVEIRA et al., 2009). Visando resolver este problema, diversas técnicas de medição de escoamento multifásico estão sendo estudadas para que sejam aplicadas em tempo real e de forma *in-line*, ou seja, diretamente nos escoamentos dentro das tubulações, sem que este seja desviado ou interrompido para a realização das medições (OLIVEIRA et al., 2007). Porém, a maioria das soluções comerciais de medição multifásica permanente são muito caras e apresentam alguns problemas de precisão e robustez para aplicações em ambientes adversos com difícil acesso para manutenção, como é o caso das plantas de extração de petróleo (LORENTZEN et al., 2010).

Essa breve descrição sobre a importância de métodos mais eficientes de medição de vazão mássica para um melhor controle de produção nesta indústria que ainda é uma das principais fontes energéticas do mundo é uma grande motivação para o desenvolvimento de soluções que ofereçam uma maior precisão e um menor custo na aplicação de equipamentos de medição multifásica em campo. Neste contexto, estudos sobre o uso conjunto de diferentes tecnologias, como diferencial de pressão em Venturi (PAN et al., 2019), espectroscopia óptica e absorção por infravermelho (BORGES et al., 2015) e medidores de fluxo por ultrassom (THORN; JOHANSEN; HJERTAKER, 2012), por exemplo, vêm sendo realizados para estimar a vazão mássica em aplicações da indústria do petróleo.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a análise e o desenvolvimento de sistemas de medição de vazões mássicas para escoamentos multifásicos típicos da indústria de óleo e gás. Através de sistemas de medição de massa específica, velocidade do escoamento e fração de fase, as vazões mássicas de cada fase podem ser aferidas através de equações e correlações.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral possa ser alcançado, alguns objetivos específicos precisam ser atendidos:

- Desenvolver circuito eletrônico para controle e instrumentação de uma bancada experimental de escoamento multifásico.
- Utilizar sensores ou equipamentos de medição capazes de medir pressão e temperatura na bancada experimental para que a aferição das massas específicas possa ser realizada.
- Desenvolver sistema eletrônico (plataforma *hardware/software*) que utilize sensores de pressão diferencial para permitir que as velocidades de escoamento para fases líquida e gasosa possam ser determinadas através de equações de conservação de massa e quantidade de movimento.
- Validar o sistema de medição de pressões diferenciais através do acoplamento do mesmo a um tubo de Venturi ligado à bancada experimental, permitindo medições de pressão ao longo de escoamentos multifásicos de mistura líquido-gasoso.
- Desenvolver sistema eletrônico (plataforma *hardware/software*) que utilize dispositivos ópticos (*lasers* e fotodiodos) para estimar as frações de fase das três principais fases em um escoamento típico (óleo, água e gás), através da aplicação de princípios da lei de Beer-Lambert.
- Validar o sistema de medição óptico através de testes com colunas estáticas de líquido que permitam a caracterização do perfil de absorbância de cada fluido e da construção de um sistema de equações para estimar as frações de fase.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O restante deste trabalho é dividido em capítulos que foram organizados da seguinte maneira.

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica que aborda conceitos básicos referentes a medição de vazão mássica em escoamentos multifásicos e os principais regimes de escoamentos possíveis em dutos verticais e horizontais. Além disso, esse capítulo aborda diversas técnicas de medição de massa específica, velocidade e fração de fase em um escoamento multifásico que podem ser usados em sistemas para aferição de vazão mássica na indústria do petróleo. Por fim, algumas soluções comerciais que adotam algumas das técnicas discutidas são apresentadas.

No Capítulo 3 uma discussão é feita a cerca de quais técnicas de medição foram selecionadas dentre as discutidas no capítulo anterior. Em seguida, é apresentada a bancada experimental de escoamento multifásico, mostrando suas principais características e componentes, além de também abordar o processo de automatização parcial feito na bancada experimental. As estruturas de *hardware* e *software* dos sistemas de medição desenvolvidos neste trabalho também são descritas, assim como toda a estrutura desenvolvida para realização dos testes experimentais.

No Capítulo 4 os resultados de cada teste realizado são apresentados, assim como a discussão acerca destes resultados. Para o sistema de medição de massa específica, foram utilizados equipamentos para medir pressão e temperatura em diferentes condições de escoamento para ar e água com o intuito de comprovar a possibilidade de estimar as massas específicas por correlações. Os testes relacionados ao sistema de medição de velocidade de escoamento consistiram na medição das pressões diferenciais ao longo do Venturi para escoamentos monofásicos e bifásicos. Por fim, para o sistema de medição de fração de fase, foram realizados testes para caracterizar a absorbância luminosa de cada fluido de interesse, assim determinando as constantes do sistema linear de equações que permite a estimativa das frações de fase. Além disso, também foram realizadas análises de sensibilidade de alinhamento do sistema óptico e análises das perdas de energia devido a outros fenômenos ópticos.

Finalmente, no capítulo de conclusão são discutidos os principais e mais importantes

pontos resultantes do desenvolvimento deste trabalho, assim como as sugestões de trabalhos futuros para dar continuidade e aperfeiçoar os resultados alcançados no presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como principal objetivo de apresentar fundamentos importantes referentes aos escoamentos multifásicos e suas diversas técnicas de medição, assim como apresentar o que está sendo estudado e desenvolvido pela comunidade científica em relação a medição multifásica para aplicações na indústria petrolífera.

Primeiramente, são apresentados alguns conceitos básicos sobre medição de vazão mássica por aferição. Em seguida, os regimes de escoamento mais comuns são apresentados para fluxo vertical e horizontal em tubulações. Finalmente, diversas técnicas de medição multifásica são apresentadas, considerando separadamente os métodos de medição de cada grandeza necessária para a aferição da vazão mássica, sendo elas as massas específicas, velocidades médias de escoamento e frações de fase.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Como já mencionado anteriormente, é de grande interesse para a indústria do petróleo a determinação precisa e em tempo real da vazão mássica das substâncias extraídas de poços de petróleo. Porém, técnicas que possibilitam a determinação direta das vazões mássicas de água, óleo e ar sem a necessidade da separação das fases em ambiente de extração ainda não estão disponíveis comercialmente. Por isso, métodos de medição por aferição são necessários (THORN; JOHANSEN; HJERTAKER, 2012).

A vazão volumétrica total de um escoamento com três fases pode ser definida como a soma das vazões volumétricas de cada fase, como mostrado na Equação (1):

$$\dot{Q} = \dot{Q}_g + \dot{Q}_a + \dot{Q}_o \quad (1)$$

onde \dot{Q} é a vazão volumétrica total e \dot{Q}_g , \dot{Q}_a e \dot{Q}_o são as vazões volumétricas do gás, água e óleo, respectivamente.

Cada vazão volumétrica, por sua vez, pode ser definida como uma função da velocidade de escoamento, da fração de seção transversal e da área total da seção transversal do duto pelo qual a mistura flui. Portanto, a Equação (1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\dot{Q} = A(\alpha V_g + \beta V_a + \gamma V_o) \quad (2)$$

onde A é a área total da seção transversal do duto, V_g , V_a e V_o são as velocidades médias do gás, água e óleo, respectivamente, e α , β e γ são as frações de seção transversal do gás, água e óleo, nesta ordem.

Uma vez que a soma das três frações de seção transversal deve ser igual a 1, apenas as frações de duas fases precisam ser medidas, pois a terceira pode ser calculada a partir das mesmas. Portanto, a Equação (2) é reformulada a seguir.

$$\dot{Q} = A([1 - (\beta + \gamma)]V_g + \beta V_a + \gamma V_o) \quad (3)$$

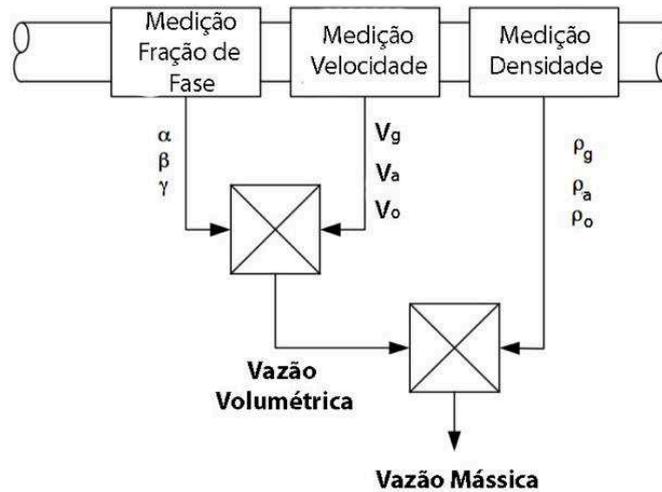
Para obter a vazão mássica, basta que seja feita a multiplicação entre a vazão volumétrica e a massa específica da fase em questão. Fazendo isso para os três casos, a vazão mássica total é encontrada de acordo com a Equação (4).

$$\dot{M} = A([1 - (\beta + \gamma)]V_g\rho_g + \beta V_a\rho_a + \gamma V_o\rho_o) \quad (4)$$

onde \dot{M} é a vazão mássica total e ρ_g , ρ_a e ρ_o são as massas específicas médias do gás, água e óleo, respectivamente.

Sendo assim, a vazão mássica total do sistema pode ser aferida através da medição das frações de seção transversal de duas das três fases existentes, assim como as velocidades médias e massas específicas de cada uma das três fases. Além disso, as vazões mássicas de cada fase também podem ser aferidas individualmente. Portanto, como ilustrado na Figura 1, adaptada de Thorn, Johansen e Hammer (1999), é necessário um sistema composto por três subsistemas de medição, sendo um para medir massa específica, um segundo para medir velocidade de escoamento e o terceiro para medir fração de fase. Neste trabalho, cada subsistema será desenvolvido e testado individualmente para validar o funcionamento das três partes que juntas podem compor o sistema de medição de vazões mássicas. Porém, a união desses subsistemas para de fato aferir as vazões mássicas deverá ser feita em trabalhos futuros.

Figura 1 - Sistema de aferição de vazão mássica a partir de medição de massas específicas, velocidades médias e frações de fase em escoamento multifásico de água, óleo e gás.



Fonte: Adaptada de Thorn, Johansen e Hammer (1999).

2.2 REGIMES DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

De acordo com Soo (1989), um escoamento multifásico consiste em dois ou mais fluidos imiscíveis escoando em uma determinada direção, separados por uma interface conexa, desconexa ou uma combinação de ambos. Portanto, as fases se referem a diferentes substâncias que não se misturam e possuem uma interface entre si.

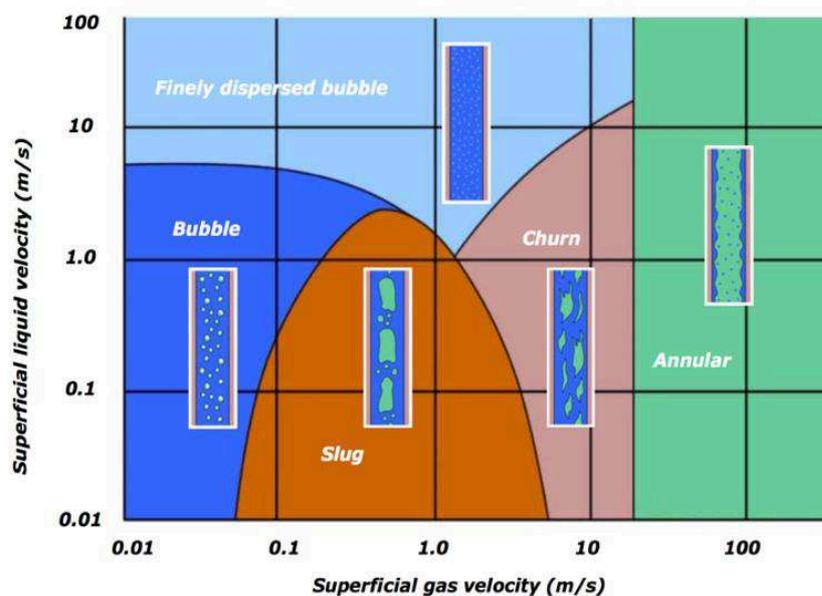
Escoamentos multifásicos podem ser classificados em diferentes regimes de escoamento, que dependem das condições de operação, propriedades dos fluidos, velocidade de escoamento de cada fase, assim como a orientação e a geometria das tubulações. A distribuição espacial e temporal das fases do escoamento variam de acordo com esses regimes, geralmente não estando sob o controle do operador. A transição entre um regime e outro, geralmente, ocorre de forma gradual (LIEJIN et al., 2009).

Nas colunas de produção de petróleo, assim como nos dutos de produção, é comum encontrar escoamentos multifásicos compostos por água, óleo e gases, porém, nestes casos, para classificar o regime de escoamento em operação, geralmente se assume um escoamento bifásico, considerando apenas uma fase líquida, que compreende tanto o óleo quanto a água, e uma fase gasosa. Isso é possível, pois na maioria dos casos as velocidades do escoamento de óleo e água são praticamente iguais, sendo que esses fluxos bifásicos podem ocorrer vertical ou horizontalmente (VILLELA, 2004). Por este motivo, neste trabalho, para o sistema de

medição de velocidades de escoamento, será considerado que a diferença entre as velocidades da água e do óleo é desprezível, permitindo que os testes sejam feitos considerando apenas duas fases no escoamento, uma líquida (água) e outra gasosa (ar). Podem ser encontrados na Figura 2 os principais regimes de escoamento possíveis, considerando a variação da velocidade superficial do líquido e do gás em um escoamento bifásico fluindo em um duto vertical.

Quando a velocidade superficial do líquido é muito maior do que a do gás, o escoamento tende a se comportar em um regime disperso com pequenas bolhas (*finely dispersed bubble*). Para velocidades superficiais baixas de gás e líquido, pode ser observado um padrão de bolhas (*bubble*), onde a fase gasosa tem uma distribuição em bolhas dentro da fase líquida. Quando a quantidade de gás aumenta, as bolhas tendem a coalescer, formando então um escoamento pistonado (*slug*), com bolhas de gás com dimensões muito maiores. Com maiores velocidades do gás, o escoamento tende a se tornar mais instável, gerando a quebra das bolhas que resultam em um fluxo caótico, denominado regime agitado (*churn*). Finalmente, quando a velocidade do gás é muito alta, o regime anular (*annular*) predomina, onde o líquido flui pelas extremidades do duto formando um anel, sendo que o gás tende a se concentrar no centro.

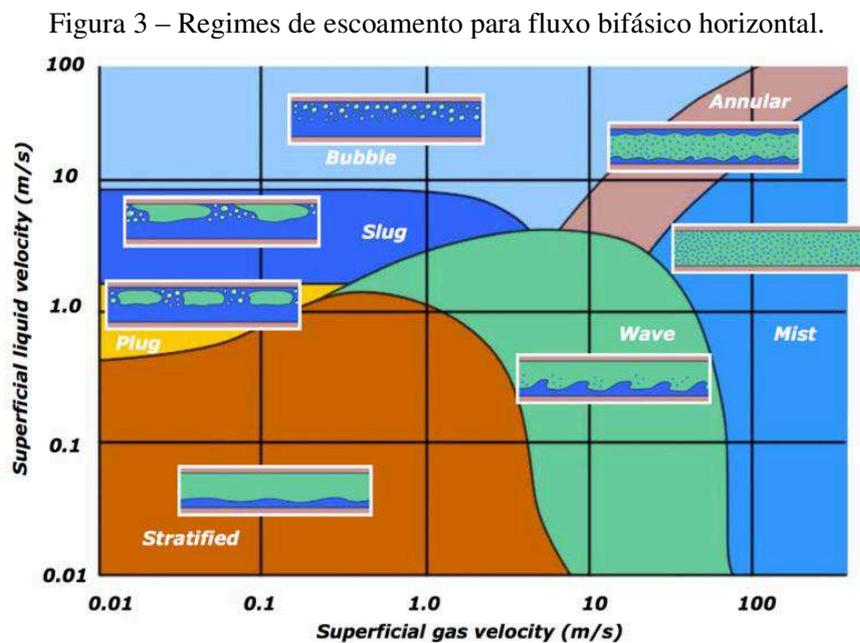
Figura 2 – Regimes de escoamento para fluxo bifásico vertical.



Fonte: Dahl, Michelsen et al. (2005).

Na Figura 3, por sua vez, podem ser encontrados os principais regimes possíveis para um fluxo em duto horizontal. Para baixas velocidades de gás e líquido, é comum observar um

regime estratificado (*stratified*), sendo que o líquido escoar na parte inferior, enquanto o gás na parte superior. Aumentando a velocidade do gás, oscilações na interface começam a ocorrer, gerando um padrão caótico no escoamento, ou um regime ondulatório (*wave*). Caso a velocidade do gás seja muito alta, um regime misto (*mist*) pode ser observado. Quando a velocidade superficial do líquido é muito maior do que a do gás, o regime de bolhas (*bubble*) predomina, sendo que a maioria tende a escoar na parte superior do duto. Com velocidades do líquido um pouco menores, considerando velocidade baixa do gás, os regimes golfado (*plug*) e pistonado (*slug*) ocorrem, apresentando bolhas maiores que também tendem a escoar na parte superior do duto. Por fim, quando ambas as velocidades são muito altas, o regime anular (*annular*) é predominante.



Fonte: Dahl, Michelsen et al. (2005).

2.3 MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Tradicionalmente, para determinar a quantidade de gás, água e óleo extraída dos poços de petróleo, grandes separadores são usados para que, periodicamente, esses valores sejam estimados através de medidas individuais de cada fase (ZENG et al., 2016). Porém, além de não possibilitar medições em tempo real, exigindo que a produção seja paralisada durante o período de medição, esses equipamentos apresentam peso e dimensões muito elevadas,

ocupando um espaço valioso dentro das plataformas de extração. Além disso, esses separadores não podem operar facilmente em qualquer regime de escoamento, e podem precisar de horas para que o escoamento se estabilize e medidas aceitáveis possam ser realizadas (THORN; JOHANSEN; HJERTAKER, 2012). Neste contexto, sistemas de medição multifásica surgem como uma alternativa para evitar problemas deste tipo, uma vez que apresentam geralmente dimensões muito menores, além de poderem realizar medições contínuas e com tempos de estabilização inferiores (BERGE et al., 2011).

A tecnologia embarcada em sistemas de medição multifásica é muito mais complexa do que a usada em separadores convencionais, e por esse motivo, muitas vezes a precisão de tais sistemas são menores do que o esperado. Portanto, estudos de diferentes técnicas são necessários para otimizar a precisão das medições e garantir que estarão dentro dos padrões exigidos pelas normas dos órgãos reguladores (SAAD et al., 2017).

Os estudos sobre técnicas de medição multifásica se iniciaram na década de 80, porém, como no setor de óleo e gás o tempo em que um produto leva para sair do estágio de pesquisa e chegar no mercado é muito grande quando comparado a outras indústrias, somente 20 anos depois que empresas começaram a comercializar produtos para atender essa demanda (COUNCIL, 2007). Mesmo assim, como as tecnologias de medição multifásica envolvem sistemas complexos, apesar dos diversos avanços no setor de pesquisa ao longo dos últimos anos, a indústria ainda é carente de soluções que atendam melhor os requisitos de operação e eficiência desses equipamentos.

A seguir, diversas técnicas de medição de massa específica, velocidade e fração de fase são apresentadas, assim como alguns trabalhos de pesquisa desenvolvidos usando tais métodos. Em seguida, são apresentadas soluções comerciais que utilizam algumas dessas técnicas para realizar a aferição de vazão mássica.

2.3.1 Técnicas de medição de massa específica

Massa específica é uma propriedade física fundamental que expressa a quantidade de massa de uma substância por unidade de volume, geralmente representada pela letra grega ρ (BJØRNDAL, 2007).

Em um escoamento típico de gás, água e óleo de uma tubulação de extração, geralmente, a massa específica de cada fase não muda rapidamente. Por isso, na maioria dos casos, as massas específicas são medidas em outras partes do processo produtivo ou

periodicamente através dos separadores já existentes. Isso faz com que não haja a necessidade de medições contínuas e em tempo real das massas específicas, o que é feito apenas com as velocidades e frações de fase (THORN; JOHANSEN; HJERTAKER, 2012). Neste trabalho, as massas específicas serão estimadas a partir do escoamento inicial de cada fase individualmente, logo após entrarem na primeira seção de tubulação e antes de se misturarem entre si na bancada experimental.

Mesmo considerando o fato de que as massas específicas não precisem ser medidas de forma tão frequente, cada setor da indústria de óleo e gás possui necessidades específicas em relação a medida dessa grandeza. Por isso, existem pesquisas para desenvolver e melhorar técnicas de medição de massa específica em escoamentos com uma ou mais fases (OBIE, 2018). Existem inúmeras técnicas de medição de massa específica de fluidos que são usadas em laboratórios no desenvolvimento de pesquisas com fluidos estáticos e em escoamento, assim como em equipamentos fabricados para uso industrial. A seguir, algumas técnicas que usam diferentes princípios de medição de massa específica de fluidos são apresentadas.

2.3.1.1 Vibração

Tubos de vibração são muito usados na indústria para medição contínua de massa específica em sistemas de escoamento de fluidos (BJØRNDAL, 2007). Basicamente, o sistema consiste em um tubo em formato de U que é excitado em uma determinada frequência. Através de um sensor óptico, o período de vibração é medido, e em seguida, um amplificador excita novamente o sistema com uma vibração de amplitude baixa (KAYUKAWA; HASUMOTO; WATANABE, 2003). A partir disso, é possível atribuir o valor da massa específica do fluido por meio do modelo de vibração representado pela Equação (5).

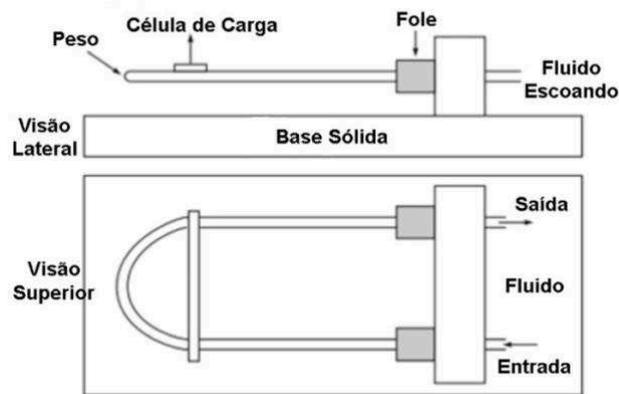
$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{\rho v + m}{C}} \quad (5)$$

onde τ é o período de oscilação, ρ é a massa específica do fluido, v é o volume da amostra, m é a massa da amostra e C é a constante da mola (FURTADO et al., 2009).

2.3.1.2 Peso

Técnicas que utilizam o peso do líquido para medir sua massa específica são bastante antigas, algumas podendo ser usadas tanto para fluidos estáticos quanto para escoamentos (STEPHAN, 2001). Existem medidores que operam através da existência de uma célula de carga que é acoplada a uma seção de tubo por onde o fluido escoava. Durante o escoamento, devido ao peso do líquido a estrutura tende a se deformar, mudando o sinal lido pela célula de carga. Como o volume interno do tubo é conhecido, a variação de massa específica pode ser detectada, uma vez que a massa de líquido é medida. Na Figura 4 é mostrado como esse medidor pode ser construído.

Figura 4 – Visão superior e lateral de um medidor de massa específica por peso.



Fonte: Adaptada de Obie (2018).

Outra técnica de medição usando o peso do líquido é apresentada por Falcone, Hewitt e Alimonti (2009). Seu medidor apresenta uma seção horizontal de tubo com um medidor de deflexão acoplado ao centro, medindo a deflexão no centro do tubo. Sabendo a elasticidade do tubo, é possível determinar a massa específica do fluido escoando por ele através da Equação (6).

$$\Delta = \frac{1}{384} \frac{WL^3}{EI} \quad (6)$$

onde Δ é a deflexão no centro do tubo, W é o peso combinado do tubo e do fluido escoando, L é o comprimento do tubo, E é o módulo de elasticidade do material do tubo e I é o momento de inércia do tubo.

2.3.1.3 Ultrassom

Essa técnica consiste na utilização de um transdutor transmissor de ondas ultrassônicas, que emite um sinal a ser medido, depois de determinado tempo, por um outro transdutor receptor. Ao posicionar os transdutores de modo que a onda sonora atravessasse o meio pelo qual o escoamento está passando, é possível identificar o tempo gasto para que o sinal sonoro saia do transmissor e chegue ao receptor. Com essa informação, algumas propriedades do fluido podem ser determinadas, incluindo sua massa específica (GYSLING, 2005).

Os transdutores podem ser dispostos em diferentes configurações de posicionamento ao longo do duto para otimizar a força do sinal acústico (KAZYS et al., 2015). Geralmente, essa técnica permite que a massa específica possa ser medida através da razão entre a impedância acústica Z e a velocidade do som c , como mostrado na Equação (7).

$$\rho = \frac{Z}{c} \quad (7)$$

Dependendo do meio pelo qual a onda sonora passa, alguns fenômenos indesejados podem ocorrer, como atenuação do sinal, que acaba interferindo no resultado da medição. O método de reflexão múltipla, que consiste no uso de emissões pulsadas em uma determinada frequência, pode ser uma forma de minimizar esse problema. Isso ocorre pois dessa forma a influência das perturbações acabam se tornando menos intensas e o sinal que trafega no meio acaba sendo dependente apenas do coeficiente de reflexão, que está relacionado com a impedância acústica específica do fluido. Outros métodos também são utilizados neste contexto, como o método de reflexão de referência, que usa princípios de propagação de onda plana em um meio de referência, método de reflexão angular, de transmissão, entre outros (HOICHE; HUSSEIN; BECKER, 2013).

2.3.1.4 Correlação Pressão/Temperatura

Outra forma de determinar a massa específica de fluidos pode ser feita através do uso de correlações entre massa específica e variações de temperatura e pressão. Essas correlações

podem ser empíricas ou analíticas, dependendo do fluido que se deseje medir. Além disso, esse método se torna um dos mais simples, uma vez que sensores de temperatura e pressão são de fácil acesso e o processo de medição é relativamente simples.

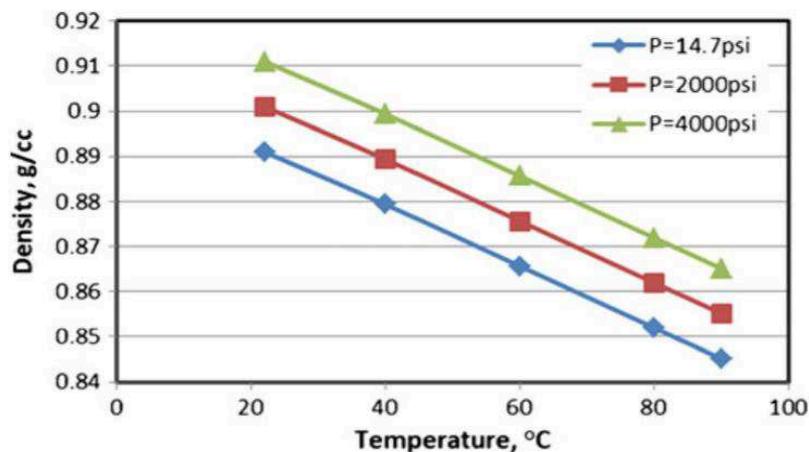
A massa específica de um gás pode ser obtida através da lei de gás ideal, que é uma equação de estado que se aplica apenas para gases levando em consideração algumas simplificações de seu estado real. Através da Equação (8), conhecendo a constante do gás R_g para o ar ($= 0,286 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) e realizando as medições de temperatura e pressão, é possível determinar sua massa específica nessas condições.

$$P_g = \rho_g R_g T_g \quad (8)$$

onde P_g é a pressão do gás, ρ_g é a massa específica do gás e T_g é a temperatura do gás.

Já para o caso de líquidos, como água e óleo *crude*, diversas correlações empíricas podem ser aplicadas. Karnanda et al. (2013) realizou diversos experimentos e medições de propriedades de algumas substâncias para verificar seus comportamentos em relação a variação de grandezas físicas do sistema. Dentre as análises, foi verificado o efeito da variação de temperatura e pressão em diversas propriedades de óleos *crude*, como massa específica, viscosidade, entre outras. Na Figura 5 pode ser visto como a massa específica do óleo *crude* pode variar com a temperatura e pressão.

Figura 5 – Variação da massa específica de óleo *crude* com temperatura e pressão.

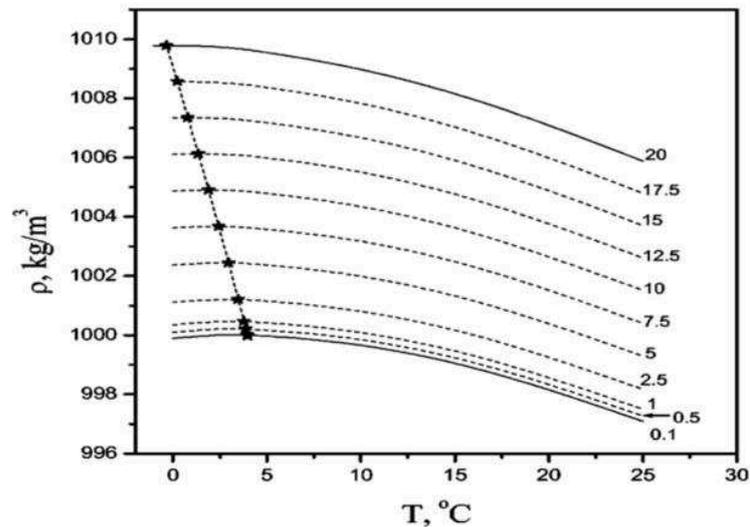


Fonte: Karnanda et al. (2013).

Experimentos similares podem ser realizados para determinar como é o perfil de variação da massa específica da água com a temperatura e pressão. Na Figura 6 os resultados

das análises de variação de massa específica da água desenvolvidas por Schmelzer, Zanotto e Fokin (2005) podem ser analisadas.

Figura 6 – Variação da massa específica de água com temperatura e pressão.



Fonte: Schmelzer, Zanotto e Fokin (2005).

2.3.2 Técnicas de medição de velocidade de escoamento

Velocidade é um dos parâmetros mais importantes no estudo de dinâmica dos fluidos, uma vez que diversos fenômenos relacionados ao escoamento podem ser estudados através da medição dessa grandeza. A vazão mássica, por exemplo, pode ser avaliada a partir de medidas de velocidade local e instantânea de uma ou mais fases do escoamento, assim como a velocidade média de cada uma (BRUNETTI, 2008).

Em escoamentos internos em dutos, quando a condição de não escorregamento é considerada, a velocidade do fluido nas paredes é igual a zero, enquanto a velocidade máxima ocorre na parte central do tubo. Portanto, considerando uma determinada seção transversal, o perfil de velocidade do escoamento diminui à medida que o eixo se distancia do centro. Isso ocorre tanto para escoamentos laminares quanto turbulentos (DINARDO; FABBIANO; VACCA, 2016).

Para escoamentos laminares e perfis completamente desenvolvidos em dutos circulares, a velocidade média pode ser obtida através da Equação (9), obtida empiricamente.

$$V_{lam} = \frac{1}{4\mu} \frac{\Delta p}{\Delta x} R^2 \quad (9)$$

onde V_{lam} é a velocidade média do escoamento laminar, μ é a viscosidade do fluido, $\Delta p/\Delta x$ é o gradiente de pressão e R é o raio do tubo.

Em escoamentos turbulentos, a velocidade média pode ser medida em aproximadamente 3/4 do raio R . Portanto, a velocidade média de um escoamento turbulento pode ser determinada através da Equação (10).

$$V_{tur} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} V_{lam} \quad (10)$$

onde V_{tur} é a velocidade média do escoamento turbulento e n é uma constante experimental relacionada com o número de Reynolds, obtida por Dinardo, Fabbiano e Vacca (2016).

Em escoamentos multifásicos, é importante determinar a velocidade média de todas as fases, uma vez que a vazão mássica de cada uma depende diretamente disso. Lembrando que para escoamentos multifásicos de água, óleo e gás, é comum que as velocidades das duas fases de líquido sejam muito próximas, o que permite que o escoamento seja tratado como tendo uma fase líquida e outra gasosa neste contexto. A seguir, algumas técnicas que usam diferentes princípios de medição de velocidade de escoamentos são apresentadas.

2.3.2.1 Tubo de Venturi

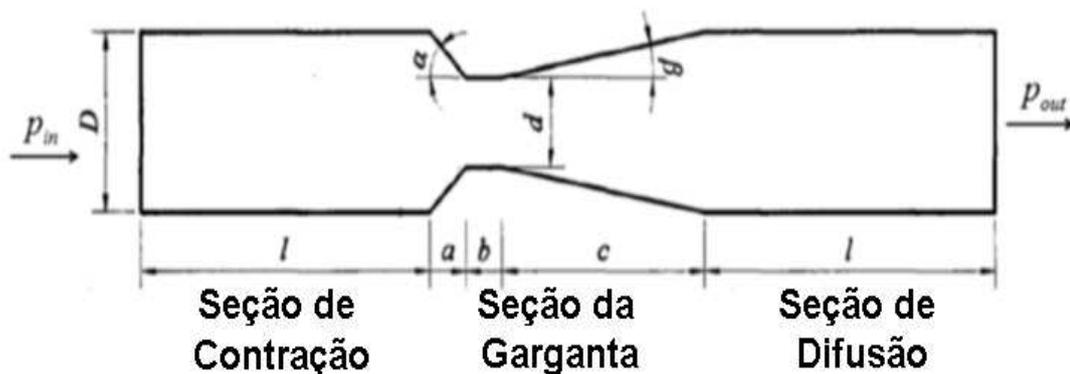
O efeito Venturi ocorre quando um fluido escoar de forma constante através de um tubo fechado. Se a seção transversal do tubo diminuir, pode ser observado que a velocidade do escoamento aumenta nessa região, ao mesmo tempo que a pressão estática diminui. Já nas regiões onde a área da seção transversal é maior, o efeito é o oposto. Neste caso, a velocidade do fluido acaba diminuindo e a pressão estática crescendo (SCHEAUA, 2016). Em escoamentos monofásicos de líquido, esse efeito pode ser explicado pelo princípio de Bernoulli, que pode ser expresso pela Equação (11). Esse princípio determina que se a energia cinética do fluido aumenta, o que está diretamente relacionado com o aumento de velocidade, considerando que não há variação da energia potencial (escoamento horizontal), a energia associada a pressão tem que diminuir para que o princípio não seja violado (QIN; DUAN, 2017).

$$p + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gh = \text{constante} \quad (11)$$

Para casos de escoamentos bifásicos de líquido-gás, também é possível utilizar tubos de Venturi modificados para determinar as velocidades de cada fase, porém, neste caso, em vez de utilizar o princípio de Bernoulli, um sistema de equações baseados nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento deve ser resolvido para que a determinação das velocidades seja possível, o que será melhor explicado no próximo capítulo.

Um tubo de Venturi é um equipamento que aplica o efeito Venturi para realizar medições de velocidade de fluidos. Este equipamento é caracterizado por ser um tubo por onde o fluido de teste esco, que contém inicialmente uma contração da seção transversal, seguido de uma expansão, formando assim uma garganta. Portanto, pode ser afirmado que um tubo de Venturi possui três seções principais, sendo uma seção de contração, uma seção de garganta e uma seção de difusão, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquemático de um tubo de Venturi.



Fonte: Adaptada de Zhang (2017).

Uma vez que a massa específica do fluido em escoamento é conhecida, colocando sensores de pressão em pontos ao longo do tubo de Venturi, desde a seção inicial de diâmetro D , até a garganta de diâmetro d , é possível determinar a velocidade média do escoamento utilizando equações de conservação. Essa técnica é uma das mais utilizadas como parte de medidores de escoamento multifásico, tanto para a indústria do petróleo, como para outras

indústrias, principalmente para a determinação de velocidade das fases, mas também para estimar as vazões mássicas utilizando outras técnicas em conjunto. Isso ocorre devido a simplicidade de medição oferecido pelo tubo de Venturi, o que permitiu que muitos estudos e aplicações desta tecnologia fossem feitos.

Lindsay et al. (2001) usaram técnicas avançadas de processamento de sinal e redes neurais para examinar o potencial de melhoria das medições de um sistema que utiliza um tubo de Venturi como parte de um sistema de medição multifásica. Foi constatado que as redes neurais apresentam uma ótima performance quando o escoamento é composto apenas por fases de gás e líquido, porém, a performance não foi tão satisfatória na existência de três fases, indicando a necessidade de outros sensores complementares.

Peixiang et al. (2009) desenvolveram um método de aferição de vazões mássicas e volumétricas para sistemas de escoamento líquido-gás em tubos, se baseando apenas em medidas de diferencial de pressão usando um tubo de Venturi, sem nenhum equipamento adicional para medida de fração de fase. Através da medição da temperatura e da pressão absoluta na seção de contração do Venturi, assim como a queda de pressão diferencial entre a seção inicial e a garganta, foi possível demonstrar que é possível estimar as vazões do ar e da água em um escoamento bifásico através de correlações empíricas, com erros residuais aceitáveis, entre 8 e 13%.

Liang et al. (2012) apresentam um estudo de um escoamento de gás-líquido em um tubo de Venturi montado horizontalmente. Através das medições de pressão ao longo do tubo, foi constatado que o grau de flutuação de pressão neste tipo de escoamento depende fortemente da qualidade do gás. Porém, a relação entre o padrão de desvio do diferencial de pressão e a qualidade do gás não é monótona.

Pan et al. (2019) desenvolveram um método de medição *in-line* de vazão de gás em escoamentos multifásicos de baixa qualidade e pressão. Uma correlação linear foi feita baseada em um modelo modificado de separação de fluido através de regressão linear. O método consiste na utilização de um tubo de Venturi para determinação de velocidade e uma técnica de atenuação de raios γ para a fração de fase. O efeito do tamanho do Venturi foi testado, e foi constatado que a precisão de medição aumenta com o diâmetro da entrada. O sistema pode ser usado tanto para escoamentos bifásicos, como para escoamentos de água, óleo e gás. Além disso, para escoamentos estáveis os resultados foram melhores do que para escoamentos intermitentes.

2.3.2.2 Correlação Cruzada

Esse método se baseia basicamente em processamento de sinal para determinar a velocidade de escoamentos. Primeiramente, uma determinada propriedade do escoamento é medida por dois sensores iguais que são colocados em posições diferentes dentro do medidor, espaçados por uma distância conhecida. O primeiro sensor então realiza a medição, e somente depois de um período de tempo, o segundo sensor realiza a medida. Esses sinais então servem de entrada para uma rotina de correlação cruzada, que aplica algoritmos sobre os dois sinais medidos. O intervalo de tempo que resulta em uma melhor correspondência entre os dois sinais é considerado como o tempo necessário para que o fluido flua do primeiro sensor até o segundo. Como a distância entre os sensores é conhecida, é possível calcular a velocidade de escoamento do fluido (DAHL; MICHELSEN et al., 2005). Diversas tecnologias de medição podem ser usadas para a realização de correlação cruzada, como por exemplo, medida de diferencial de pressão, absorção de raios γ ou micro-ondas, impedância elétrica, entre outros.

Tan e Dong (2010) propõem um sistema que usa tomografia de resistência elétrica de dois planos, fazendo correlação cruzada com os dados de dois eletrodos localizadas um em cada plano. Os resultados mostram que para escoamentos de duas fases o método busca de forma dinâmica os segmentos de sinal mais adequados. A velocidade obtida através da correlação cruzada é uma velocidade estrutural do escoamento, e a relação dessa velocidade com a velocidade da mistura é afetada pela vazão de água no escoamento.

Gajewski (2013) apresenta uma discussão detalhada sobre erros de quantificação e amostragem causados por conversores A/D em medidores de velocidade por correlação cruzada em escoamentos bifásicos de gás e sólidos. A discussão se baseia principalmente na análise de sistemas de medição reais que usam sondas eletrostáticas para detectar pequenas mudanças na carga de partículas sólidas em dutos de transporte pneumático.

Zhai et al. (2014) usaram uma sonda de capacitância com fios paralelos em um sistema de medição usando correlação cruzada. Primeiramente, a distribuição do campo de sensibilidade do sistema foi investigada através do método de elementos finitos. Depois, foram realizados testes com escoamento em *loop* para detectar a velocidade através da correlação cruzada usando sinais de flutuação de tensão medidos pelas duas sondas. Os resultados indicaram que as características do método dependem da estrutura de escoamento

de óleo e água. Por isso, foi utilizado um modelo de onda cinemática para prever a velocidade homogênea de seis diferentes padrões de escoamento horizontal de óleo e água.

Shi et al. (2016) desenvolveram um sistema de medição de velocidade para um escoamento de água e óleo em um tubo horizontal que usa um método de correlação cruzada baseada em sondas ultrassônicas instaladas em dois pontos do escoamento. A velocidade é calculada levando em consideração o regime de escoamento e a distribuição de fase. Os resultados experimentais mostraram que a velocidade do escoamento calculada pelo modelo obteve uma boa precisão, apresentando um erro relativo menor que 5%.

2.3.3 Técnicas de medição de fração de fase

Como já mencionado anteriormente, a fração de fase é um dos principais parâmetros de um escoamento multifásico a ser medido para que seja possível determinar as vazões mássicas de cada fase, uma vez que está diretamente relacionado com a quantidade em que cada fase está sendo extraída em uma operação de extração de petróleo, por exemplo. Assim como os outros parâmetros já abordados, a medição de fração de fase pode ser uma tarefa difícil, devido a deslizamento interfases e variações não lineares dependendo do regime de escoamento (SU; TAN; DONG, 2017).

Em geral, a fração de fase pode ser expressa em termos de área ou volume. Fração de volume pode ser entendida como a razão entre o volume ocupado por uma das fases em relação um volume de determinado tubo pelo qual o escoamento ocorre. Já no caso da fração de área, sua definição consiste na razão entre a área ocupada por uma fase em relação a área total da seção transversal do tubo por onde todas as fases passam em um determinado instante (TAN; DONG, 2015).

Escoamentos multifásicos possuem estruturas complexas, muitas vezes aleatórias, com interfaces que variam no tempo. Isso faz com que a medição precisa das frações de fase seja um grande desafio. Além disso, existe um crescente interesse por soluções de medição não invasivas (SU; TAN; DONG, 2018). Esses métodos de medição de fração de fase em escoamentos multifásicos podem ser classificados de acordo com o princípio de medição, como nos exemplos mostrados a seguir.

2.3.3.1 Impedância Elétrica

Os métodos que usam impedância elétrica para medição de fração de fase têm como

princípio que o fluido escoando no tubo pode ser caracterizado como um condutor elétrico. Ao medir a impedância elétrica sobre o diâmetro do tubo, propriedades elétricas da mistura podem ser determinadas, como capacitância, sendo que essa medida depende da condutividade e da permissividade do óleo, gás e água. A permissividade pode ser medida usando sensores capacitivos, tipicamente colocando um eletrodo em cada lado do escoamento. Os eletrodos agem como um detector de capacitância, sendo que a leitura pode ser medida entre os eletrodos. Essa capacitância, portanto, varia quando a permissividade muda, de acordo com o fluxo de óleo, gás e água (DAHL; MICHELSEN et al., 2005).

Tomografia elétrica em geral apresenta um campo vulnerável a interações de fase, o que dificulta que os resultados de distribuição de fase sejam tão precisos quanto na tomografia por radiação. Porém, tomografia elétrica apresenta uma estrutura simples e operação confiável, com taxas de erro médias menores de 5% (HUANG; WANG; LI, 2003).

Silva et al. (2011) apresentam um sensor baseado em medição de permissividade (capacitância) a ser aplicado na geração de imagens da distribuição de fração de fase e investigação de escoamento de óleo e água em dutos horizontais. Os valores de fração de fase são calculados a partir de dados provenientes do sensor usando vários modelos de permissividade.

Lawal (2014) usaram um método de impedância elétrica para medir a fração de vazio em escoamentos multifásicos de água, ar e areia. Uma configuração de quatro eletrodos côncavos foi usada, sendo que estes foram montados em uma circunferência na parte externa do tubo e são excitados por uma tensão externa. O objetivo deste trabalho foi investigar o efeito das partículas de areia na performance do sensor de capacitância para medir da fração de vazio neste tipo de escoamento. Além disso, foi usado um *software* de elementos finitos para implementar o problema.

Silva et al. (2017) desenvolveram um sensor de capacitância não intrusivo, simples e barato para medição de fração de vazio em escoamentos líquido-gás. O sensor possui um gerador de frequência que aplica um sinal senoidal com frequência adequada em um circuito de entrada de sinal, que converte a variação da capacitância das duas fases, proporcional a fração de fase, em um sinal de tensão que vai para um amplificador. O sinal de saída do amplificador vai para um computador que o interpreta.

2.3.3.2 Atenuação de raios γ

A atenuação de raios γ ocorre quando uma fração de raios passa por um meio absorvedor sem interagir com o mesmo. Ao entrar em contato com um escoamento, os feixes de radiação não se defletem, o que permite a detecção da fração de fase do campo de escoamento, assim como a distribuição de fases de uma forma precisa (SUZUKI et al., 2008). De acordo com McAlister (2012), a atenuação de raios γ pode ser descrita através da Equação (12).

$$I_{ab} = I_I e^{-\mu_{ab} d_{ab}} \quad (12)$$

onde I_{ab} é a intensidade de radiação após atravessar o meio, I_I é a intensidade de radiação incidente, μ_{ab} é o coeficiente de absorção de massa e d_{ab} é a espessura do meio absorvedor.

Para sistemas de escoamento bifásico, geralmente é necessário apenas um sistema único de atenuação de raios γ . Porém, para sistemas com três fases, duas medidas de fração de fase independentes devem ser feitas, sendo que a fração da terceira fase é obtida pela relação unitária das somas de todas as fases. Por isso, uma outra técnica pode ser usada em conjunto, ou duas medidas devem ser feitas de forma independente usando um sistema duplo de medição via atenuação de raios γ (FRØYSTEIN; KVANDAL; AAKRE, 2005). Em técnicas de medição que usam radiação, um ponto ótimo entre possuir uma boa velocidade ou uma boa precisão de medição deve ser encontrado, devido a natureza estatística das fontes de radiação. Quanto maior é a precisão necessária, mais tempo custará para que a medição possa ser realizada. Fontes radioativas fortes podem aumentar a velocidade de medição, mas isso trás maiores riscos de operação (HEINDEL; GRAY; JENSEN, 2008).

Salgado et al. (2010) apresentam uma nova metodologia de medição capaz de identificar regimes de escoamento com uma boa precisão, além de calcular as frações de volume em escoamentos multifásicos de água, óleo e gás. O método é baseado em interpretação de distribuição de largura de pulso de raios γ por meio de redes neurais artificiais. As redes neurais propostas conseguiram realizar identificações corretas de todas as três fases com uma precisão aceitável.

Hoffmann e Johnson (2011) usaram um instrumento de atenuação transversal dupla de raios γ para medir fração de fase em diferentes posições de escoamentos. Devido a grandes quantidades de ruídos na medição, uma cuidadosa análise de dados se mostrou necessária.

Técnicas de análise para escoamentos de três fases foram desenvolvidas e testadas, além de serem comparadas com dados de calibração para escoamentos monofásicos e bifásicos.

Sharifzadeh et al. (2017) realizaram um estudo de viabilidade para o projeto e construção de um homogeneizador em *loop* com um sensor de raios γ para medição de fração de fase em misturas sólido-líquido. Esse estudo foi realizado para que posteriormente um mecanismo de geração de bolhas fosse acoplado, permitindo a medição em três fases usando a técnica de atenuação de raios γ com um sistema de medição duplo.

2.3.3.3 Absorção Infravermelho

Cada material ou espécie química possui um número de bandas de absorção dentro de um comprimento de onda específico do espectro eletromagnético. Isso significa que, ao transmitir luz à um fluido, por exemplo, no comprimento de onda correto, é possível identificar diversas informações referentes a aquela substância (CAREY et al., 2000).

Baseado na teoria de absorção de luz, se um raio luminoso monocromático passa através de um meio, a energia da luz é parcialmente absorvida, sendo essa quantidade relacionada ao número de moléculas existentes dentro do domínio de medição, ou seja, entre o transmissor e receptor do feixe luminoso (ZHAO et al., 2004).

Outros fenômenos, como reflexão e refração, devem ser considerados para que a teoria de absorção seja válida. A quantidade de minerais e sais na composição dos fluidos do escoamento influencia na maior ou menor existência de reflexão, uma vez que as substâncias sólidas aumentam as possibilidades desse fenômeno ocorrer. A refração é um processo importante e que precisa ser considerado. Esse fenômeno ocorre quando a luz é desviada de uma trajetória retilínea devido a mudança de meio de propagação. Os ângulos dos feixes luminosos antes e depois da interface entre dois meios de propagação podem ser relacionados através da Lei de Snell, representada na Equação (13).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (13)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração do meio 1 e 2, e θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência entre os raios de luz e a normal à interface entre os meios.

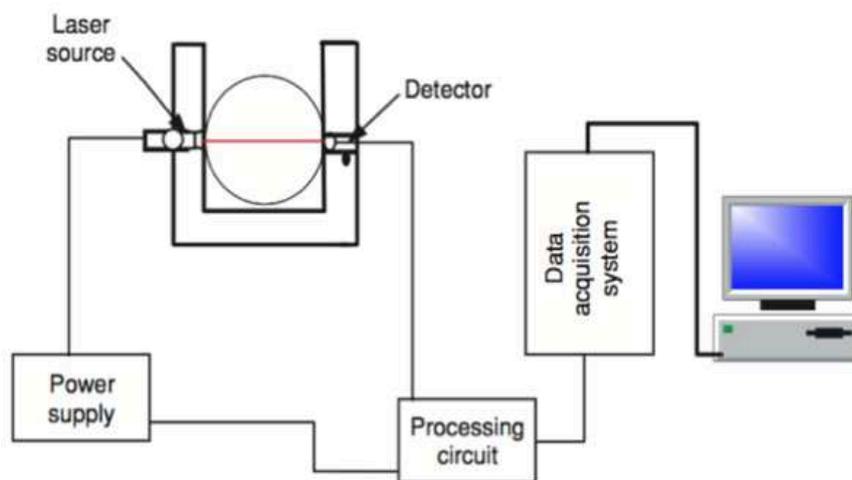
Para concentrar ao máximo os raios de luz em uma determinada direção ou em um foco específico, colimadores podem ser usados para concentrar esses raios de luz, fazendo com que estes se propaguem da forma desejada. Além disso, também podem ser usados para forçar que a luz fique mais concentrada em uma direção perpendicular ao plano de emissão (ATTWOOD; KTISTIS, 1989).

A absorvância luminosa (A_b) pode ser definida pela relação logarítmica da razão da intensidade luminosa uma vez tendo atravessado o meio (I_1) e a intensidade luminosa incidente (I_0) ao meio. Além disso, através da lei de *Beer-Lambert*, é possível perceber que a absorvância é linearmente proporcional ao produto da absorvidade molar do meio (ϵ), caminho percorrido pela luz (l) e concentração molar da substância (C_d), como mostrado na Equação (14).

$$A_b = -\log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = \epsilon C_d l \quad (14)$$

Na Figura 8 pode ser visto um exemplo de como o emissor luminoso e o receptor podem ficar dispostos em um duto de escoamento para que a absorção possa ser detectada pelo sistema.

Figura 8 – Diagrama de um sistema de medição por absorção luminosa.



Fonte: Jana et al. (2007).

Vendruscolo et al. (2014) apresentam um estudo preliminar sobre o desenvolvimento de um sistema de tomografia óptica para monitoramento em tempo real de escoamentos

bifásicos de líquido-gás. O sistema conta com 16 emissores e 16 receptores ópticos operando em frequências próximas ao infravermelho. Além disso, uma técnica de reconstrução de imagem é implementada. O tempo de resposta dos canais individuais são otimizados de modo a permitir medidas com alta taxa de transmissão, podendo chegar a até 1000 *frames* por segundo. Apesar da baixa resolução do sistema, os testes iniciais com escoamentos de água e ar se mostraram promissores, permitindo o monitoramento em tempo real.

Arunkumar et al. (2016) desenvolveram uma técnica para identificação das fases de um escoamento de água e ar usando sensores infravermelhos. Os experimentos foram feitos de forma que o escoamento passasse por um tubo de vidro de 4,7 mm de diâmetro com 0,3 mm de espessura de parede. Ao emitir os raios infravermelhos de forma contínua em direção ao interior do tubo, foi possível identificar que os raios de luz eram refratados ao passar pelo vidro e pelos fluidos do escoamento, uma vez que os sinais de corrente do receptor eram gravados através de um sistema de aquisição de dados. A partir da variação de corrente, foram identificados os regimes de escoamento borbulhado, pistonado e estratificado. Além disso, simulações numéricas também foram desenvolvidas considerando as mesmas condições de teste. Por fim, os resultados experimentais e computacionais foram comparados com os resultados obtidos através de um processo de fotografia de alta velocidade aplicado para os diferentes padrões de escoamento bifásico. Os padrões encontrados através dos sensores infravermelhos foram muito semelhantes aos obtidos através das demais técnicas utilizadas.

Kiefer et al. (2016) propõem um estudo sobre espectroscopia infravermelho de reflexão atenuada total aplicada a uma série de configurações de emulsão de água-óleo para identificação de interfaces. A estabilização molecular da mistura pode ser identificada através da análise do espectro infravermelho, onde as mudanças nas frequências vibracionais e a força do sinal indicam alterações no ambiente molecular na interface água-óleo. Os resultados obtidos sugerem que a adição de um emulsificante em 1% do peso não leva a uma maior estabilização da emulsão.

Sarkodie, Fergusson-Rees e Diaz (2018) apresentam uma ampla revisão sobre o uso de sensores ópticos infravermelho não intrusivos para uso em escoamentos de gás e líquido dentro de tubos. Várias considerações importantes referentes ao desempenho dos sensores infravermelho são discutidas, desde divergência de raios, medição local e global, efeitos de luz ambiente e variações de temperatura. Vários estudos experimentais são abordados,

apresentando ótimos resultados para identificação de regime de escoamento e determinação de fração de fase. Por fim, com o objetivo de diminuir as limitações de acessibilidade na penetração de luz infravermelho em tubos opacos, como sugestão para desenvolvimentos futuros, uma modificação conceitual é proposta referente as superfícies de instalação que usam acoplamentos transparentes e opacos.

2.3.3.4 Fluorescência

Este método é baseado no conceito físico de luminescência, que consiste na emissão de luz de um objeto ou substância quando excitado de alguma forma. Quando este fenômeno acontece, uma perda de energia ocorre e se a emissão for contínua, o sistema deve ter uma fonte externa de energia. Fluorescência é um método onde alguma substância ou objeto é excitado por irradiação em um determinado comprimento de onda, resultando em uma emissão de radiação em um comprimento de onda diferente. Esta emissão carrega informações quantitativas e qualitativas sobre sua fonte. Quando a luz atinge uma molécula, seu estado eletrônico muda de um estado estável para estados com muitos níveis de vibração de excitação eletrônica. A intensidade da fluorescência é proporcional a quantidade da substância analisada, o que reflete, na existência de mais de uma fase, na fração de cada uma (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2017).

A fluorescência de óleos *crude* deriva de frações aromáticas de hidrocarbonetos, que são fortemente influenciados por suas composições químicas, assim como pela concentração ou fração do mesmo. Esse princípio oferece alta sensibilidade, bom potencial de diagnóstico, e relativa simplicidade de instrumentação, porém, é difícil de aplicar em tubos para medição contínua em locais de extração de petróleo, uma vez que seus resultados são melhores em aplicações com fluidos estáticos (STEFFENS et al., 2011).

Angelini et al. (1992) usaram uma técnica de medição de fração de fase em um escoamento bifásico que se baseia em um mecanismo combinado de absorção e emissão de radiação. Nessa aplicação, foi usado o princípio de fluorescência induzida em ultravioleta, sendo que a transmissão da radiação ultravioleta incidente e a fluorescência emitida passam por fibras ópticas miniaturizadas usadas no equipamento. A técnica demonstrou boa capacidade de medição, especialmente para escoamentos com líquidos altamente dispersos.

Ramos et al. (2001) realizaram experimentos preliminares para demonstrar o uso de um método combinado que usa princípios de refletância e fluorescência para medir fração de

volume em escoamentos de três fases. Foram utilizadas sondas de fibra ótica para detectar a fluorescência do óleo no escoamento, sendo que a refletância também foi detectada pelo mesmo equipamento.

2.3.3.5 Ressonância Magnética

Mapeamento por ressonância magnética é uma aplicação da espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN). Na RMN, o núcleo interno é envolvido por um forte campo magnético estático e é perturbado por oscilações de outro campo magnético mais fraco. Como resposta, um sinal eletromagnético com a frequência característica do campo magnético do núcleo é produzido. RMN permite determinar a estrutura de moléculas em uma solução, o que torna essa técnica muito popular em muitas áreas, como médica, biológica e química (GEROTHANASSIS et al., 2002).

Para aplicações de escoamentos multifásicos, essa técnica pode ser utilizada para detectar a fração de cada fase presente. Porém, para uma boa precisão, o escoamento deve ser o mais homogêneo possível. Esse método é completamente não intrusivo e pode medir, além da fração de fase, outros parâmetros importantes, como velocidade e difusão (LAKSHMANAN et al., 2017).

2.3.4 Soluções comerciais

Além dos diversos estudos e pesquisas que trazem resultados muito importantes para o desenvolvimento das tecnologias de medição de escoamentos multifásicos, devido a grande demanda por soluções que proporcionem melhoria na produção da indústria de óleo e gás, algumas alternativas comerciais que utilizam técnicas como as apresentadas na seção anterior já estão disponíveis no mercado.

Desenvolvido pela empresa chinesa DFMC, o DF-5420 *In-line Concentration (Density) Meter* é um equipamento capaz de medir continuamente a concentração e a massa específica de diversos materiais e líquidos em processos industriais, incluindo óleo *crude* em aplicações de extração de petróleo. Esse dispositivo se baseia no efeito de absorção e conta com uma fonte de raios γ e um detector para receber os dados sobre o escoamento (BFMC, 2018). O intervalo de medição para a concentração é de 0-100 %, enquanto o erro associado

corresponde a $\pm 0,1-1 \%$. Na Figura 9 é possível verificar um modelo 3D que ilustra a aparência do equipamento.

Figura 9 – Modelo 3D do *DF-5420 In-line Concentration (Density) Meter*.



Fonte: BFMC (2018).

Um exemplo de medidor de vazão mássica comercial é o Roxar MPFM 2600. Esse equipamento utiliza uma técnica de medição de fração de fase baseada em impedância. Além disso, as velocidades das fases do escoamento são identificadas através de um tubo de Venturi e a aplicação de uma técnica de correlação cruzada. Um sistema com vários eletrodos é usado para determinar informações locais do escoamento, próximas a parede do tubo, como informações de distribuição de fase nas seções transversais (BRANDT; TOL; RUDEN, 2010). A incerteza relativa para medição de vazão mássica de líquido e gás é igual a 10 %. Na Figura 10, extraída do site do fabricante, é possível visualizar uma imagem do medidor multifásico Roxar MPFM 2600. Outro medidor comercial que usa técnica de impedância é o *Flowatch 3I*, do fabricante Pietro Fiorentini S.p.A. (NAJMEDINI; HABIBI, 2018).

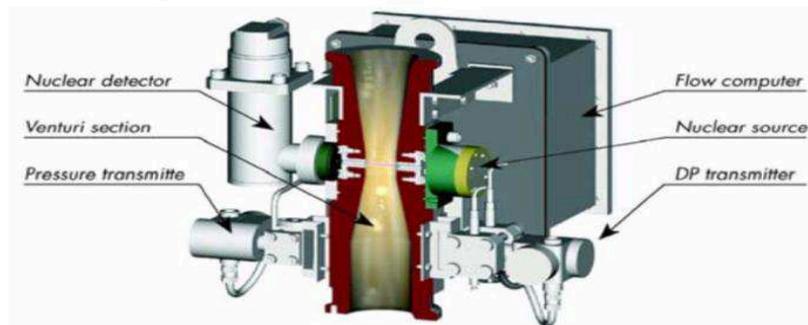
Figura 10 – Medidor Multifásico *Roxar MPFM 2600*.



Fonte: Brandt, Tol e Ruden (2010).

Outro medidor de vazão mássica comercial é o *Phasewatcher*, do fabricante Schlumberger Ltd. Esse equipamento utiliza uma técnica de medição de fração de fase baseada em atenuação de raios γ com mecanismo duplo. Além disso, as velocidades das fases do escoamento são identificadas através de um tubo de Venturi. O equipamento é composto por um tubo de Venturi interno, uma fonte e um detector de radiação, transdutores de temperatura e pressão e um computador de bordo (AL-KHAMIS et al., 2008). As incertezas de vazão mássica para água, óleo e gás são 0,3, 0,5 e 0,8 %, respectivamente. Na Figura 11 uma imagem em corte do medidor multifásico *Phasewatcher* é mostrada, evidenciando seus componentes internos. Outro medidor comercial que usa a técnica de atenuação de raios γ é o *Mixmeter*, do fabricante Jiskoot Quality Systems (NAJMEDINI; HABIBI, 2018).

Figura 11 – Medidor Multifásico *Phasewatcher*.



Fonte: Al-Khamis et al. (2008).

Thorn, Johansen e Hjertaker (2012) fizeram um levantamento de diversos outros medidores comerciais que usam diferentes princípios de funcionamento. Nesse estudo, foi constatado que a maioria das soluções comerciais que estão atualmente disponíveis no mercado usam uma combinação de tecnologias de sensoriamento e avançadas técnicas de processamento de sinal para atingir os requisitos para aplicações da indústria do petróleo. Porém, o desafio de desenvolver medidores capazes de realizar medições contínuas e precisas de escoamentos multifásicos de água, óleo e gás não foi completamente resolvido, uma vez que esse setor exige que esses equipamentos sejam operados em ambientes muito hostis. Além disso, a melhoria da eficiência dos processos de produção é um ponto chave, assim como a redução de custos, que ainda é um grande desafio para os pesquisadores e fabricantes desse tipo de tecnologia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que um sistema de medição multifásica possa ser desenvolvido em laboratório, devido a complexidade desses sistemas e as exigências atreladas aos diversos tipos de escoamentos possíveis, é muito importante que exista algum mecanismo que simule os escoamentos ou as condições encontradas nos processos de extração de petróleo. Juntamente a isso, todo o projeto e construção das plataformas eletrônicas de *hardware* e *software* são necessárias para que os procedimentos de medição possam ser realizados. Por causa disso, além do desenvolvimento dos subsistemas de medição em si, bancadas e estruturas de teste capazes de gerar condições propícias para a validação dos mesmos foram montadas e/ou aperfeiçoadas. Com base nos recursos disponíveis, nas tendências de mercado e no potencial de desenvolvimento científico, foram selecionadas técnicas de medição específicas para cada sistema de medição (sistema de medição de massa específica, velocidade de escoamento e fração de fase), para que estes sejam desenvolvidos e testados com o intuito de validar o funcionamento de cada técnica individualmente. Uma vez que as variações de massa específica em aplicações voltadas à extração de petróleo não variam consideravelmente, é comum encontrar sistemas que medem a massa específica de cada fase individualmente, sendo posteriormente considerado que esses valores se mantêm os mesmos no escoamento multifásico. Por esse motivo, os testes realizados para o sistema de medição de massa específica foram feitos na bancada com escoamentos monofásicos de cada fluido.

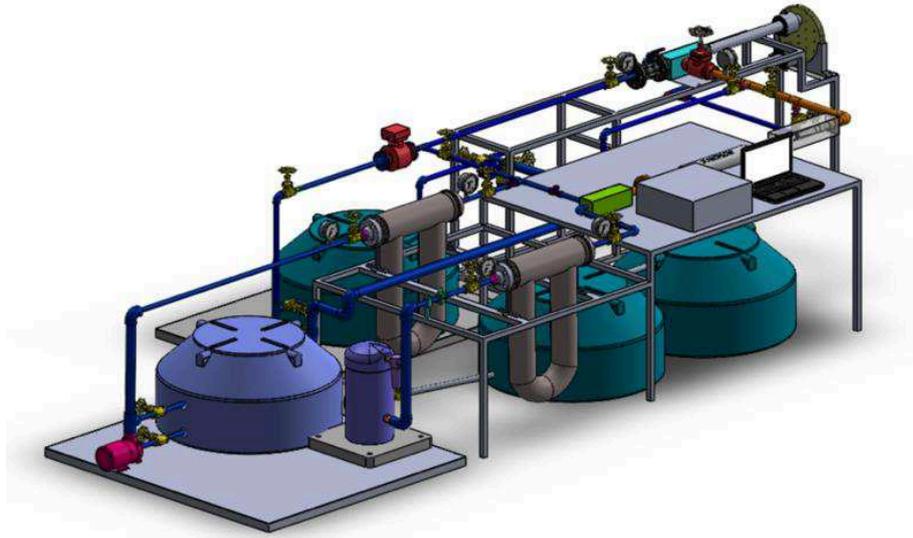
Este capítulo tem o intuito de apresentar primeiramente a bancada experimental de escoamento multifásico que foi utilizada para alguns testes dos sistemas de medição, assim como sua automatização parcial feita para que o controle das bombas hidráulicas e a leitura dos sensores acoplados pudessem ser realizados de forma remota pelo operador. Além disso, este capítulo também justifica a escolha das técnicas de medição mostradas no capítulo anterior que foram selecionadas considerando os três sistemas de medição que possibilitam a aferição das vazões mássicas em um escoamento multifásico. Também são apresentadas informações referentes ao desenvolvimento dos sistemas de medição adotados. Isso inclui desde características de *hardware*, como os componentes utilizados nos circuitos eletrônicos e as lógicas de funcionamento, características de *software*, abordando diagramas que descrevem o funcionamento das rotinas de operação e controle de cada mecanismo, e detalhes referentes a aplicação e utilização desses equipamentos na bancada de teste e na estrutura de alinhamento óptico construída para os testes de medição de fração de fase.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Para caracterizar um escoamento típico encontrado em processos de extração de petróleo, no mínimo três fases devem ser consideradas, sendo elas água, óleo e gás. Por isso, a bancada experimental de escoamento multifásico construída no laboratório T2F do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina foi idealizada para possibilitar a geração de escoamentos dentro de tubulações de teste de até três fases distintas, sendo duas fases de líquido e uma de ar. Neste caso, o ar é usado no lugar dos gases extraídos durante a extração principalmente por motivos de segurança e conveniência, pois o ar é uma substância gasosa de fácil acesso e oferece poucos riscos de explosão por não ser inflamável. Já para o caso do óleo, amostras de óleo *crude* real foram coletadas para serem utilizadas na execução dos testes. Porém, neste trabalho, esta bancada pôde ser utilizada apenas para testes com água e ar. Devido ao óleo *crude* ser inflamável e volátil, algumas adaptações preventivas na bancada são necessárias para garantir a segurança dos equipamentos e dos operadores da mesma durante a operação com este óleo, porém, até o fim do desenvolvimento deste trabalho essas medidas ainda não tinham sido finalizadas. Outro aspecto que inviabilizou o uso de óleo nos testes envolvendo a bancada multifásica foi o complexo procedimento de limpeza da mesma, que demanda muito tempo. Como o cronograma de uso da bancada é bastante concorrido dentre os diversos pesquisadores do laboratório T2F, e considerando também que o tempo de desenvolvimento deste trabalho foi limitado, foi decidido por fazer os testes utilizando óleo *crude* em uma outra estrutura desenvolvida especificamente para testes do sistema de medição de fração de fase, que será detalhada em uma seção futura. Na

Figura 12 uma visão 3D da bancada multifásica modelada em um *software* CAD é mostrada, sendo que a parte de trás da bancada é evidenciada mostrando principalmente os tanques de armazenamento de líquido, enquanto na Figura 13 uma imagem real da bancada multifásica montada e pronta para operação pode ser vista. Neste caso, a parte da frente da bancada está em foco, mostrando com mais detalhes a seção de teste que permite o escoamento simultâneo de até três fases.

Figura 12 – Modelagem 3D da bancada de escoamento multifásico.



Fonte: Autor.

Figura 13 – Bancada de escoamento multifásico.

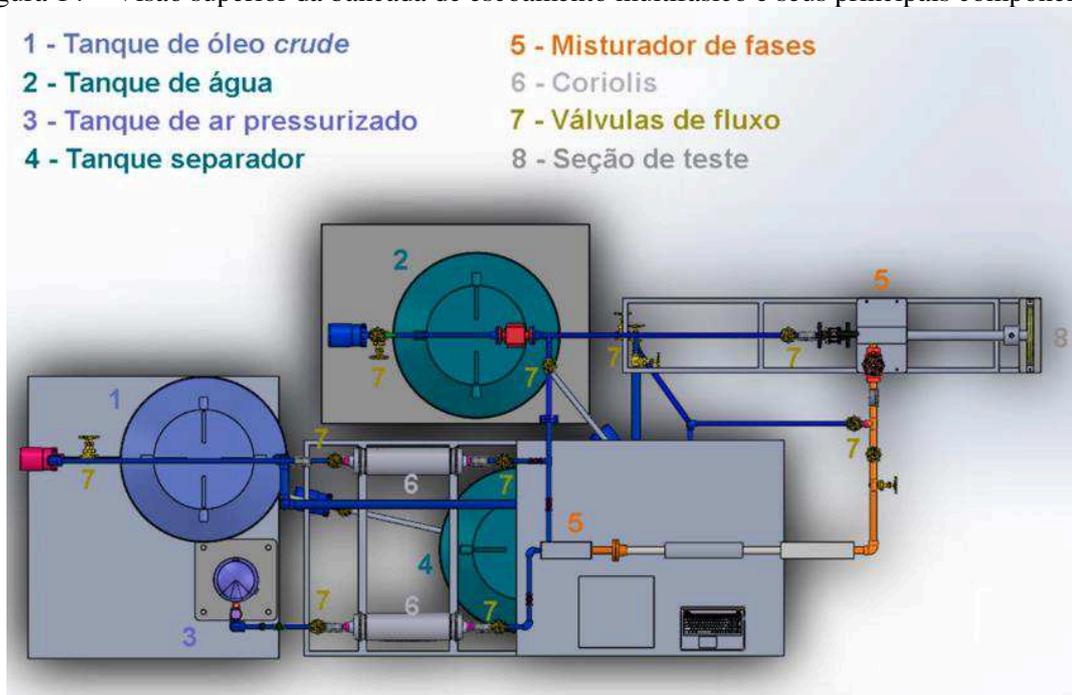


Fonte: Autor.

Como mostrado na Figura 14, a bancada multifásica é composta por um conjunto de componentes que permitem a geração de escoamentos multifásicos. Primeiramente, antes de serem misturados, os fluidos são armazenados em tanques individuais, sendo que os tanques de água e óleo possuem bombas hidráulicas para permitir que os fluidos saiam do tanque em direção às tubulações. Já o tanque de ar opera apenas com a abertura e fechamento de válvula, uma vez que a própria pressão do tanque já faz com que o fluido se desloque. Na saída do

tanque de óleo e de ar, existem medidores *Coriolis*, da marca EMERSON, modelo CMF200, que podem ser usados para medir a vazão de saída de cada fluido, assim como temperatura, massa específica e outras grandezas. Junto ao *Coriolis* também existem transdutores de pressão da EMERSON, modelo 2051, que podem medir a pressão manométrica do escoamento na entrada do sistema. Dependendo da configuração em que as válvulas forem dispostas, os fluidos são direcionados para os misturadores de fase, que basicamente funcionam como um ponto na tubulação onde duas fases distintas se encontram e se misturam. A seção de testes é o ponto em que o escoamento já passou pelos estágios de mistura. Neste ponto, é possível acoplar sensores ou dispositivos para que seja coletada alguma informação do escoamento multifásico. Por fim, depois de passar pela seção de testes o escoamento é direcionado para dois tanques separadores, onde as substâncias permanecem misturadas até que um processo de limpeza ou separação seja realizado (apenas um dos dois tanques separadores é visível na Figura 14). A bancada também permite acoplar um tomógrafo e um tubo de Venturi após o primeiro misturador de fase. Como mencionado anteriormente, foram realizados apenas testes com mistura de ar e água utilizando esta bancada.

Figura 14 – Visão superior da bancada de escoamento multifásico e seus principais componentes.



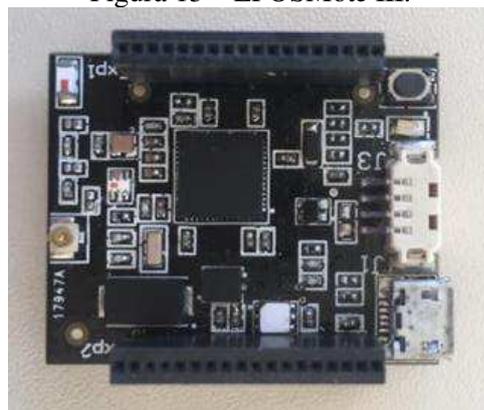
Fonte: Autor.

3.1.1 Automatização da Bancada Multifásica

Durante este trabalho foi desenvolvido um sistema parcial de automatização da bancada multifásica, de modo que o acionamento das bombas de água e óleo seja controlado remotamente através de um computador, assim como as leituras de sensores dispostos no equipamento. Já as válvulas de fluxo, que controlam a passagem dos fluidos por determinados caminhos nas tubulações, são controladas de forma manual, devido a não existência de válvulas solenoides que permitam o acionamento remoto das mesmas. Além disso, o controle de liberação de ar comprimido na linha também é feito de forma manual através de uma válvula no próprio tanque de armazenamento de ar.

A automatização da bancada foi desenvolvida utilizando como base uma plataforma de sensoriamento não comercial desenvolvida pelo Laboratório de Integração de *Software/Hardware* da Universidade Federal de Santa Catarina. Esse dispositivo, chamado EPOSMote III, que pode ser visto na Figura 15, foi desenvolvido para ser a plataforma base do sistema operacional EPOS, também criado pelo mesmo laboratório com o intuito de facilitar aplicações com múltiplos sensores que se comunicam de forma *Wireless*. O EPOSMote III conta com um microcontrolador “*System-on-Chip*” *Wireless* CC2538 de 2.4 GHz (IEEE 802.15.4), que combina um processador ARM Cortex-M3 de 32-bits com uma memória de RAM de 32 kB e uma memória *flash* de 512 kB, com velocidade de *clock* de até 32 MHz.

Figura 15 – EPOSMote III.



Fonte: Autor.

Com base nesse dispositivo, foi desenvolvida uma placa eletrônica responsável por integrar a leitura de todos os sensores existentes na bancada multifásica. Além disso, essa placa também é responsável por permitir a comunicação entre os inversores de frequência,

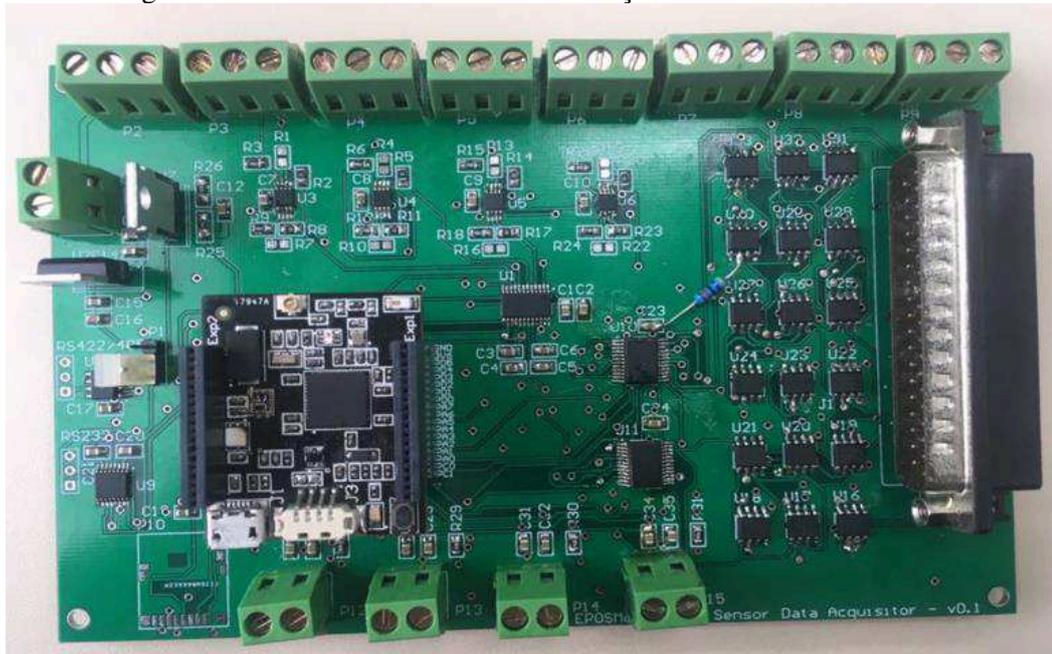
que controlam as bombas dos tanques de água e óleo, com o EPOSMote III, via protocolo MODBUS/RS485, e do EPOSMote III com o computador, via comunicação serial. Através do computador, o operador pode monitorar o sistema e atuar sobre as bombas hidráulicas.

Essa placa eletrônica necessita de uma alimentação externa de 12 V, e foi desenvolvida para possibilitar a aquisição dos dados de um grande número de sensores, possibilitando futuramente a adição de mais sensores à bancada. Neste contexto, ela possui 18 entradas para termopares tipo T, 4 entradas para sensores de temperatura do tipo RTD, e 8 entradas para sensores com saída em corrente (4-20 mA), que podem englobar desde sensores absolutos/diferenciais de pressão, até sensores de vazão magnéticos, *Coriolis*, transdutores de pressão, entre outros. Os principais componentes eletrônicos que compõem a placa são:

- 18 conversores ADC MAX31855 (Conversores analógico-digital específicos para termopares);
- 4 conversores ADC MAX31865 (Conversores analógico-digital específicos para sensores de temperatura RTD);
- 1 conversor ADC MAX1300 (Conversor analógico-digital de 8 canais específico para sensores de saída em corrente, 4-20mA);
- 2 multiplexadores CD74HC4067 (Como o número de sensores é maior do que o número de entradas digitais do EPOSMote III, há a necessidade de multiplexar os canais de sinal dos sensores);
- 1 circuito integrado de interface serial RS485 (Utilizado para estabelecer comunicação entre o EPOSMote III e os inversores de frequência);
- 1 regulador de tensão LM350 e 1 regulador de tensão μ A78M05CKC (Utilizados para garantir tensões de 3,3 V e corrente de até 500 mA em pontos específicos do circuito, respectivamente).

Na Figura 16 é mostrada uma imagem da placa eletrônica finalizada, já com o EPOSMote III acoplado ao sistema. O esquemático eletrônico da placa, mostrando a disposição de todos os componentes citados anteriormente no circuito, assim como as demais conexões necessárias para o seu funcionamento pode ser encontrado no APÊNDICE A.

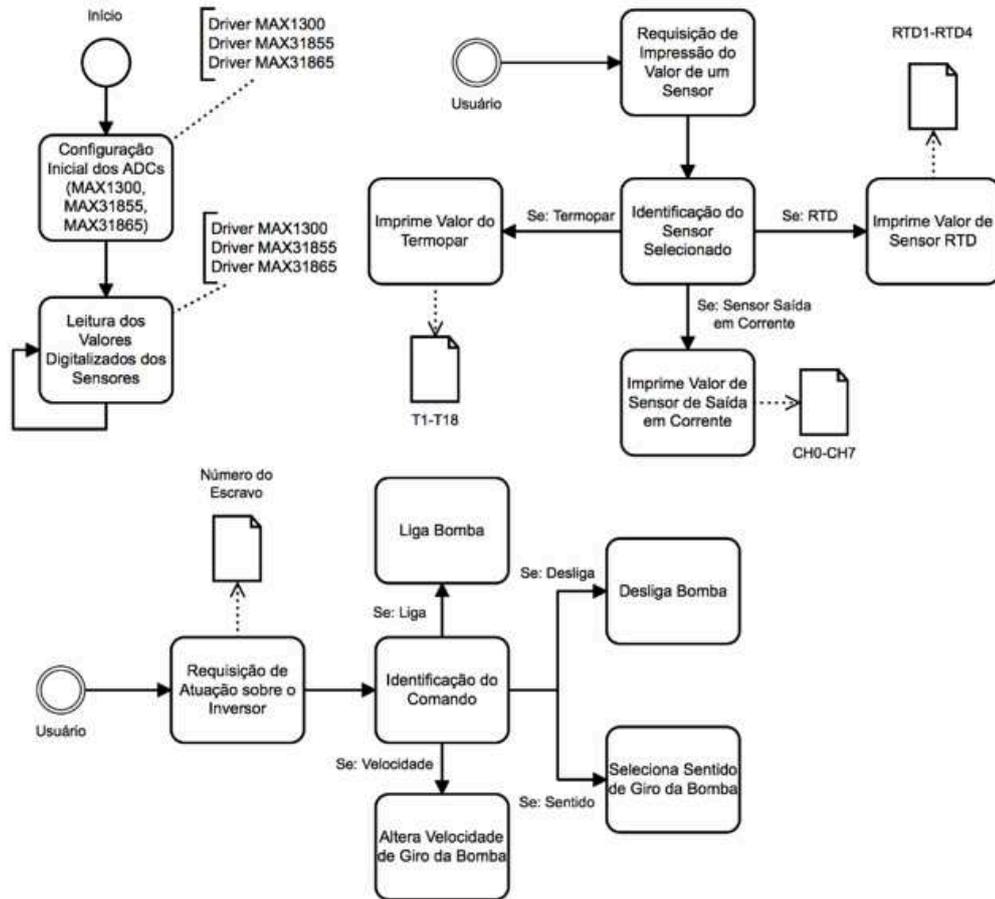
Figura 16 – Placa eletrônica de automatização da bancada multifásica.



Fonte: Autor.

Assim como a plataforma de *hardware*, toda a estrutura de *software* para a aplicação foi desenvolvida, utilizando os recursos do sistema operacional EPOS. O código foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++, de tal modo que a aquisição de todos os sensores ocorre em tempo real, sendo possível realizar a obtenção dos dados de qualquer um através de comandos provenientes do computador através do *software* LabVIEW. Existe um EPOSMote III conectado ao computador que assume o papel de *gateway*, ou seja, serve apenas como um intermediário entre a comunicação do outro EPOSMote III conectado à placa eletrônica e o computador operado pelo usuário. Além da leitura de sensores, esse sistema permite o controle e atuação dos dois inversores de frequência CFW500 conectados às bombas de óleo e água da bancada multifásica. A comunicação entre esses dispositivos ocorre através do protocolo MODBUS/RS485, considerando o EPOSMote III acoplado à placa como sendo o dispositivo mestre e os dois inversores como sendo os escravos. Na Figura 17 é apresentado um fluxograma que ilustra como a rotina do *software* embarcado funciona. Como pode ser visto, existem quatro possibilidades de comandos que o operador pode mandar ao inversor (Liga bomba, desliga bomba, sentido de rotação e velocidade de rotação da bomba). Em paralelo, requisições de leitura dos sensores podem ser feitas continuamente para que estas informações possam ficar sendo atualizadas na tela do operador em tempo real.

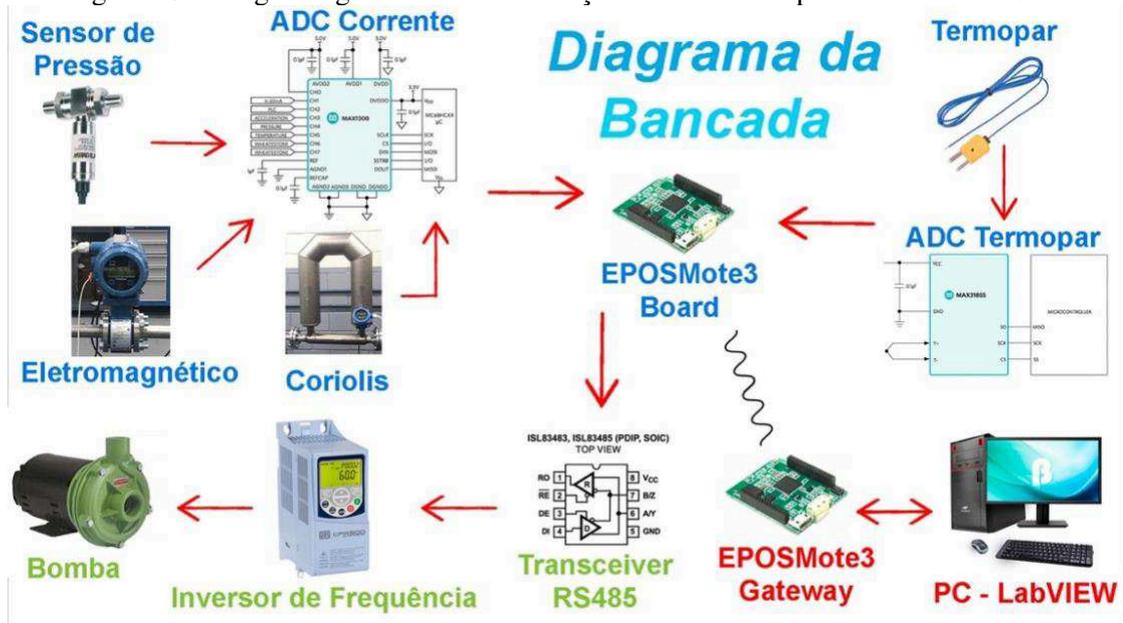
Figura 17 – Fluxograma de funcionamento do *software* embarcado no EPOSMote III da placa de automatização da bancada experimental.



Fonte: Autor.

Para facilitar o entendimento do funcionamento da bancada após integrar o sistema de automatização, um diagrama global que ilustra as conexões dos diversos componentes eletrônicos e mecânicos da bancada pode ser visto na Figura 18. Como pode ser visto, existe um EPOSMote III que é conectado à placa de automatização que possui os diversos conversores ADC que permitem a conexão dos diversos sensores, desde termopares, sensores de pressão, *Coriolis*, medidor de vazão eletromagnético, entre outros. Além disso, também há um *transceiver* RS485 na placa que conecta o sistema aos inversores de frequência que estão ligados as bombas hidráulicas. Do outro lado, se comunicando via ondas de rádio, um outro EPOSMote III (*Gateway*) é conectado ao computador por onde o operador monitora e atua sobre o sistema através de uma interface em LabVIEW.

Figura 18 – Diagrama global da automatização da bancada experimental multifásica.



Fonte: Autor.

3.2 SELEÇÃO DAS TÉCNICAS E DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Dentre todas as técnicas apresentadas para a medição de parâmetros em escoamentos multifásicos, foram selecionadas três técnicas a serem desenvolvidas ao longo desse trabalho, sendo uma técnica referente à medição de massa específica, uma para medição de velocidade e outra para a fração de fase.

Devido a simplicidade do método, assim como a precisão dos resultados, as massas específicas serão obtidas através do uso de correlações analíticas e empíricas que relacionam a variação da massa específica com a mudança de condições de temperatura e pressão do sistema. Para isso, basta que as medições de temperatura e pressão sejam feitas em pontos da bancada onde cada fase esteja escoando antes de se misturar às demais. Isso pode ser feito utilizando sensores comerciais de custo médio e de fácil operação, ou qualquer equipamento de medição disponível em laboratório capaz de medir tais grandezas. O sistema de medição de massa específica pode ser diretamente conectado a placa de automatização da bancada, uma vez que as leituras de pressão e temperatura, assim como a leitura de outros sensores na bancada, podem ser centralizadas neste dispositivo capaz de converter e processar os dados provenientes dos sensores.

O sistema de medição de velocidade de escoamento será baseado na tomada de pressão

diferencial usando um tubo de Venturi, uma vez que essa é a técnica mais utilizada neste tipo de aplicação, além de já existir um equipamento como este disponível no laboratório. O tubo de Venturi utilizado é um tubo modificado para disponibilizar diversos pontos ao longo de seu comprimento para que diferentes tomadas de pressão possam ser realizadas individual ou simultaneamente. Para isso, uma placa eletrônica dedicada à leitura e processamento dos sinais dos sensores de pressão diferencial foi desenvolvida.

Finalmente, a medição de fração de fase será feita através da técnica de absorção óptica no infravermelho. Essa é uma técnica bastante promissora em meio as demais, principalmente por não oferecer um custo tão alto quando comparado a outras tecnologias, permitindo que o desenvolvimento em laboratório seja possível, além de ter grande potencial para evoluir como uma solução comercial de baixo custo no futuro. Outras características que contribuíram na escolha dessa técnica para medição de fração de fase foi a não utilização de radiação que ofereça perigo aos seres humanos e ao ambiente.

3.2.1 Sistema de Medição de Massa Específica

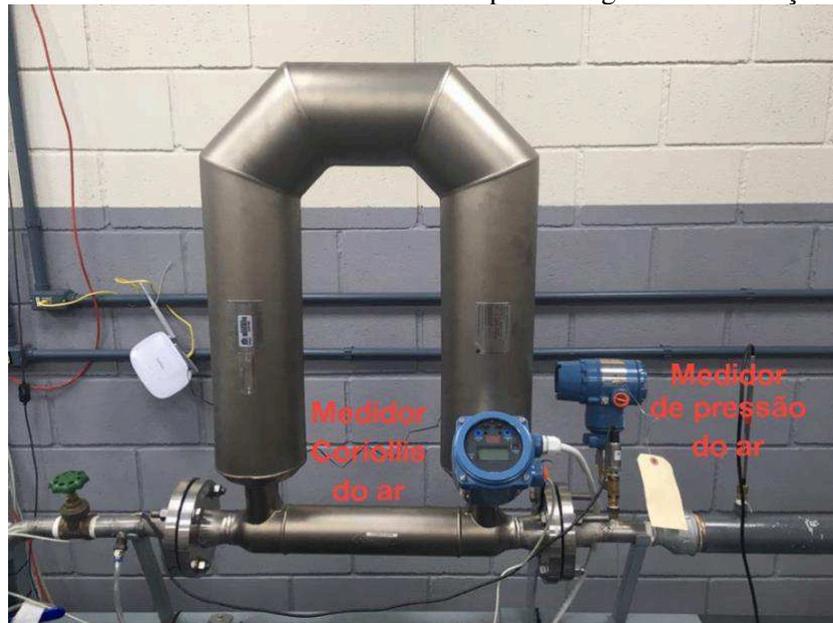
Massa específica é a primeira grandeza das três necessárias para que seja possível aferir as vazões mássicas de um escoamento multifásico. Como já dito anteriormente, a técnica escolhida para o sistema de medição de massa específica foi a baseada em correlações analíticas e empíricas que relacionam a variação da massa específica com a mudança de condições de temperatura e pressão do sistema.

Existe uma grande variedade de sensores e equipamentos de medição que possibilitam medir temperatura e pressão de um escoamento. Na hipótese de um protótipo ser construído para ser operado nas estações de petróleo, para ter uma boa precisão e um baixo peso, sensores RTD poderiam ser escolhidos para fazer a leitura de temperatura, por exemplo. Da mesma forma, sensores de pressão com saída em corrente (4-20 mA) também oferecem robustez e uma precisão aceitável.

Nas tubulações de saída dos tanques de ar e água da bancada multifásica existem em cada uma um medidor *Coriolis*, que apesar de serem equipamentos fabricados para medir principalmente vazão mássica, também é capaz de medir a temperatura do escoamento. Além disso, também existe nesta mesma parte da tubulação um transdutor de pressão acoplado. Dito

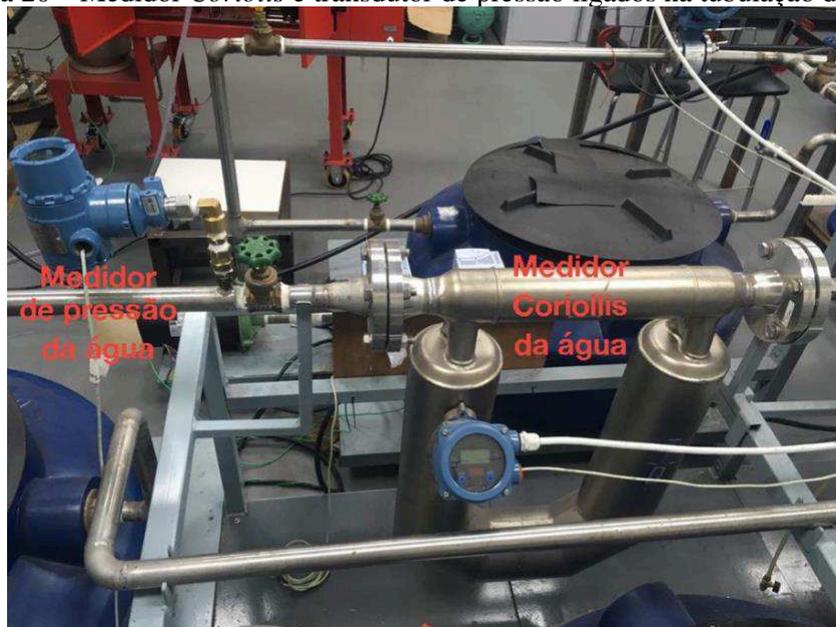
isso, mesmo tendo disponível em laboratório sensores de temperatura RTD e outros sensores de pressão, optou-se por utilizar os *Coriolis* e transdutores de pressão para medir temperatura e pressão para agilizar os procedimentos de medição. A Figura 19 e Figura 20 mostram os medidores *Coriolis* e transdutores de pressão acoplados nas linhas de escoamento de ar e água, respectivamente.

Figura 19 – Medidor *Coriolis* e transdutor de pressão ligados na tubulação de ar.



Fonte: Autor.

Figura 20 – Medidor *Coriolis* e transdutor de pressão ligados na tubulação de água.



Fonte: Autor.

Adquirindo as informações medidas por esses sensores e armazenando os dados no computador, é possível usar as correlações apresentadas na Equação (8) e na Figura 6 para encontrar as massas específicas a partir dos dados de temperatura e pressão.

3.2.2 Sistema de Medição de Velocidade de Escoamento Líquido-Gás

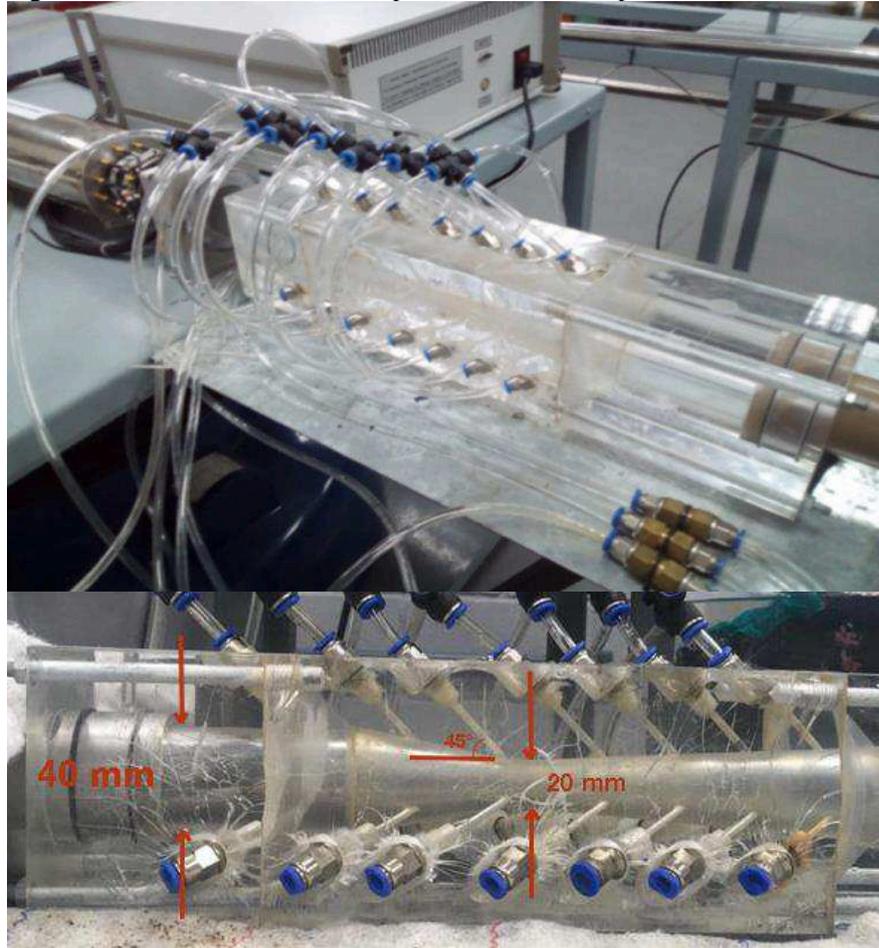
O sistema de medição de velocidades é baseado na tomada de pressão diferencial através da utilização de um tubo de Venturi modificado para permitir medições simultâneas de velocidade de gás e líquido. Em escoamentos multifásicos típicos da indústria de óleo e gás, a velocidade da água e óleo é similar. Portanto, duas medições de velocidade média são suficientes para permitir a determinação das vazões de cada fase (juntamente com as medições de fração de fase e massas específicas). Na

Figura 21, são apresentadas imagens do tubo de Venturi modificado instalado na bancada multifásica, assim como alguns aspectos de sua geometria. O Venturi utilizado neste trabalho é feito de acrílico, permitindo a visualização do escoamento interno ao tubo. Como pode ser melhor visualizado na

Figura 21, o diâmetro interno da entrada é do Venturi é de 40 mm, enquanto o diâmetro interno da garganta é de 20 mm. Além disso, existem diversos pontos possíveis para medição de pressão ao longo do Venturi, sendo que esses pontos possuem uma angulação de 45° para minimizar a entrada de bolhas de ar do escoamento nos pontos onde são conectados os sensores de pressão diferencial.

Durante a execução dos testes, diferentes vazões mássicas de água e ar foram selecionadas para verificar o comportamento do sistema em condições diversas. Como em cada condição de teste a vazão de um dos fluídos era mantida constante, enquanto o outro variava, o medidor *Coriollis* e um anemômetro de fio quente foram utilizados como referência para que as vazões pudessem ser controladas da maneira desejada. Além disso, a bancada multifásica também conta com um tomógrafo de impedância que tem a capacidade de medir as velocidades das fases em escoamento. Este equipamento pode ser utilizado para validar o sistema de medição de tomada de pressão no Venturi.

Figura 21 – Tubo de Venturi acoplado à bancada experimental multifásica.



Fonte: Autor.

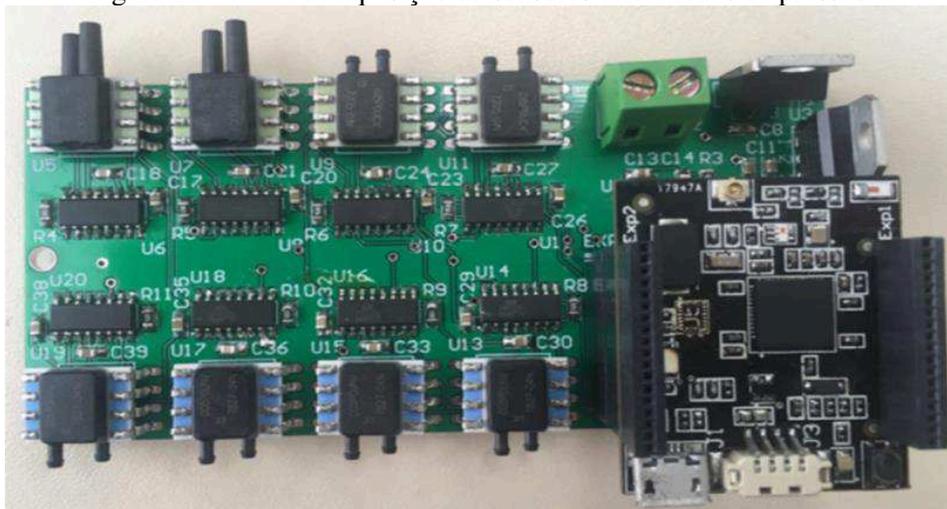
Para realizar a medição de pressão nos diversos pontos do Venturi, foi desenvolvida uma placa eletrônica exclusiva para adquirir os dados das medições e realizar as conversões dos sinais analógicos para digital. A placa de aquisição de pressão diferencial conta com oito sensores diferenciais de pressão com capacidades de medição distintas. Todos os oito sensores apresentam saída em corrente (4-20 mA), o que permite a utilização de apenas um conversor ADC MAX1300 para converter os sinais analógicos em sinais digitais, uma vez que este possui um número de canais suficientes para a aplicação. Além disso, para cada sensor é necessário um amplificador de sinal INA125 com tensão de referência de precisão. Assim como a placa de automatização da bancada, a placa de medição de pressão diferencial foi desenvolvida tendo como base o EPOSMote III, que neste caso, recebe os valores de medição já convertidos em sinais digitais e os envia de forma *wireless* para o *gateway* conectado ao computador. Os seguintes sensores de pressão diferencial foram utilizados:

- 4 sensores de pressão diferencial NSCDRRN005PDUNV (leituras entre +/- 5 psi);
- 2 sensores de pressão diferencial TSCDDRN015PDUCV (leituras entre +/- 15 psi);
- 2 sensores de pressão diferencial TSCDJN001PDUCV (leituras entre +/- 1 psi).

Na Figura 22 é apresentada uma imagem da placa de aquisição de pressão diferencial construída em laboratório, já com os sensores e com o EPOSMote III conectado. O esquemático eletrônico da placa de leitura de pressão, que engloba as ligações entre os conversores ADC e os amplificadores operacionais, além de mostrar os pontos de conexão dos sensores e demais componentes básicos necessários para o funcionamento do circuito pode ser encontrado no APÊNDICE B. Assim como na placa de automatização da bancada, há um regulador de tensão LM350 e um regulador de tensão μ A78M05CKC no circuito, responsáveis por garantir tensões de 3,3 V e corrente de até 500 mA em pontos específicos do circuito. Além disso, o circuito também conta com um inversor de tensão ADM8828 para gerar uma tensão de -5 V necessária para o funcionamento dos amplificadores operacionais.

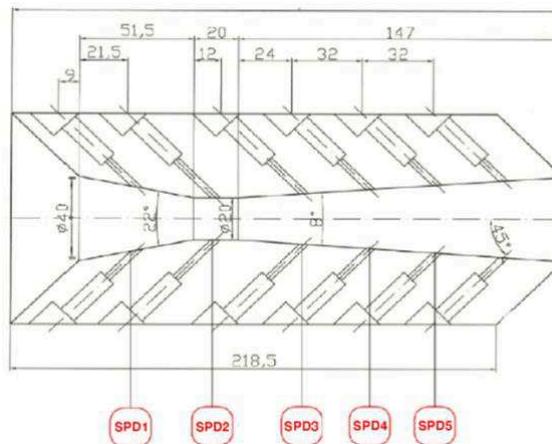
Na Figura 23 é mostrado como os 5 sensores de pressão diferencial foram posicionados no tubo de Venturi, sendo SPD1 e SPD2 sensores de +/- 15 psi, e SPD3, SPD4 e SPD5 sensores de +/- 5 psi. Além disso, algumas dimensões do tubo são apresentadas em milímetros.

Figura 22 – Placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão.



Fonte: Autor.

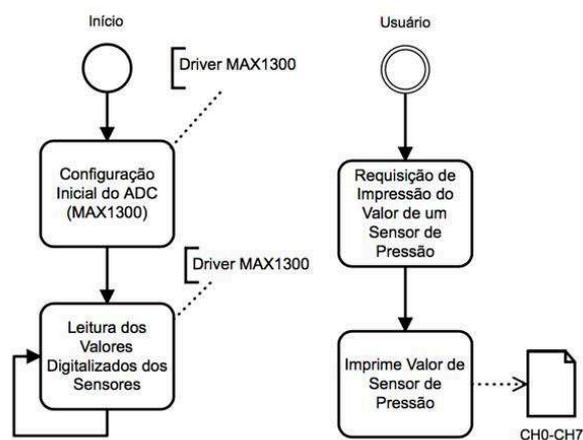
Figura 23 – Posicionamento dos sensores de pressão diferencial no Venturi.



Fonte: Adaptado de Chien (2019).

Assim como para o sistema de controle da bancada multifásica, a estrutura de *software* para a obtenção e pré-processamento dos sinais dos sensores de pressão também foi desenvolvida por completo em C++, utilizando os recursos do sistema operacional EPOS. O código foi desenvolvido conforme mostrado na Figura 17, porém, de uma forma mais simplificada. Para este caso, foi utilizado apenas o driver MAX1300 como interface entre o código da aplicação e o *hardware* conectado aos sensores. Na Figura 24 é apresentado um fluxograma que ilustra como a operação do sistema ocorre em termos do *software* embarcado no EPOSMote III. Como pode ser visto, as requisições de leitura dos sensores de pressão podem ser feitas continuamente para que as informações possam ficar sendo atualizadas na tela do operador em tempo real.

Figura 24 – Fluxograma de funcionamento do *software* embarcado no EPOSMote III da placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão.



Fonte: Autor.

Uma vez que os dados de pressão são medidos e armazenados, é necessária a realização de uma etapa de pós-processamento para estimar as velocidades das fases líquida e gasosa do escoamento. O Venturi é um equipamento muito utilizado para determinação de velocidade de escoamentos monofásicos, porém, a partir da utilização de um tubo de Venturi modificado, existem maneiras de estimar as velocidades de escoamentos bifásicos através do uso de algoritmos que implementam e resolvem equações diferenciais que governam os fenômenos que envolvem fluidos em escoamento (equações de conservação).

O algoritmo descrito por Chien (2019) permite a obtenção das velocidades das fases de um escoamento líquido-gás a partir da medição das pressões diferenciais em um tubo de Venturi modificado. O algoritmo foi originalmente desenvolvido para resolver um sistema linear de quatro equações diferenciais, sendo duas delas as equações de conservação da massa para o gás e para o líquido, a equação de conservação de quantidade de movimento líquido-gás, e uma equação proveniente do modelo de escorregamento proposto por Zuber e Findlay (1965). Na Figura 25 o sistema linear de equações é apresentado, sendo este composto pelas quatro equações mencionadas acima, a serem resolvidas pelo algoritmo. Além disso, a Figura 25 conta com uma legenda com os significados de cada termo das equações do sistema.

Figura 25 – Sistema linear de equações e legenda de significado dos termos ($A \cdot X = B$).

$$\begin{bmatrix} 1 - \alpha C_0 & -C_0(1 - \alpha) & -C_0(V_g - V_l) & 0 \\ \alpha \rho_g & 0 & \rho_g V_g & \alpha V_g (d\rho_g/dP) \\ 0 & (1 - \alpha)\rho_l & \rho_l V_l & 0 \\ 2\alpha \rho_g V_g & 2(1 - \alpha)\rho_l V_l & \rho_g V_g^2 - \rho_l V_l^2 & 1 + \alpha V_g^2 (d\rho_g/dP) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dV_g}{dz} \\ \frac{dV_l}{dz} \\ \frac{d\alpha}{dz} \\ \frac{dP}{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dV_s}{dz} \\ \frac{\alpha \rho_g V_g dA}{A dz} \\ \frac{(1 - \alpha)\rho_l V_l dA}{A dz} \\ -\frac{\alpha \rho_g V_g^2 + (1 - \alpha)\rho_l V_l^2 dA}{A dz} - [\alpha \rho_g + (1 - \alpha)\rho_l]g \cos \theta - \left(\frac{dp}{dz}\right)_f \end{bmatrix}$$

α - Fração de vazio
 V_g - Velocidade do gás [m/s]
 ρ_g - Massa específica do gás [kg/m³]
 g - Aceleração da gravidade [m/s²]
 V_s - Velocidade de escorregamento [m/s]
 θ - Ângulo de inclinação do tubo [°]
 $\left(\frac{dp}{dz}\right)_f$ - Perda de carga (efeito viscoso) $\left[\frac{Pa}{m}\right]$

C_0 - Parâmetro de distribuição
 V_l - Velocidade do líquido [m/s]
 ρ_l - Massa específica do líquido [kg/m³]
 P - Pressão estática [N/m²]
 z - Comprimento do tubo [m]
 A - Área total da seção transversal [m²]

Fonte: Adaptada de Chien (2019).

Essas equações foram derivadas considerando a não existência de mudança de fase e reação química entre os fluidos. Como pode ser visto, existem quatro variáveis que precisam ser encontradas para que o sistema seja resolvido, sendo elas a velocidade do gás V_g , a velocidade do líquido V_l , a fração de vazão α e a pressão estática P .

O termo $\left(\frac{dp}{dz}\right)_f$, referente a perda de carga que considera os efeitos viscosos que ocorrem no escoamento, é um dos mais importantes para que o sistema de equações possa dar resultados precisos. Porém, a modelagem física deste termo é um tema de pesquisa bastante complexo e que já é foco de estudos aprofundados por parte de pesquisadores da área de fluidos. A modelagem correta deste termo não faz parte do escopo deste trabalho, portanto, apesar da realização das medições de pressão diferencial no Venturi para diversas configurações de escoamento líquido-gás, a utilização desse sistema não foi feita devido a falta da modelagem do termo de perda de carga. Contudo, assim que este problema for solucionado por algum pesquisador, o método poderá ser aplicado sobre as medições feitas durante os testes na bancada.

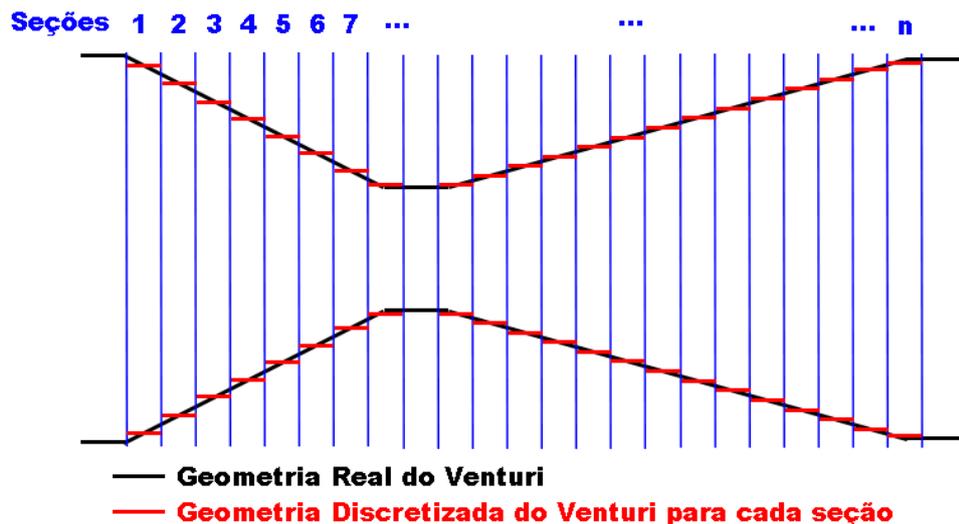
A norma ABNT NBR ISO 5167 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) especifica a geometria e o modo de utilização de tubos de Venturi, além de estabelecer maneiras para se calcular vazão mássica e as incertezas associadas. A partir disso, de acordo com a Equação (15), disponibilizada pela norma em questão, é possível calcular o valor máximo da vazão mássica, grandeza proporcional à velocidade ($\dot{m} = \rho VA$), para um escoamento monofásico de líquido ou de gás. Na Equação (15), \dot{m} é a vazão mássica, C_d é o coeficiente de descarga, β é a razão entre os diâmetros da garganta e da seção inicial do Venturi, ε é o fator de expansividade, d é o diâmetro da garganta do Venturi, Δp é a pressão diferencial e ρ a massa específica do fluido de acordo com a temperatura e pressão a qual o volume está submetido.

$$\dot{m} = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (15)$$

Com base nisso, o algoritmo descrito por Chien (2019) constrói uma matriz com diversas posições contendo valores de velocidade que variam de zero até o valor máximo calculado, sendo que uma das dimensões da matriz compõe os valores de velocidade do líquido e a outra os valores das velocidades do gás. Além disso, o algoritmo divide o

comprimento do Venturi em várias seções, onde em cada uma são feitas iterações para achar as velocidades cujo desvio entre a curva de pressões teóricas calculada e as pressões medidas de forma experimental seja o menor possível. Na Figura 26 é apresentado um esquemático que mostra como o Venturi é dividido em um número finito de seções, onde em cada seção as propriedades físicas naquela região são consideradas como constantes, permitindo que os cálculos possam ser realizados de uma forma discreta. Para realizar a primeira iteração, o algoritmo assume valores iniciais para V_g e V_l que existam dentro da matriz criada. Isso permite que um valor inicial para α também seja estimado. O processo iterativo é realizado a partir da implementação do método de Runge-Kutta de quarta ordem. Como já dito anteriormente, para obter resultados mais precisos, o termo da equação de conservação de quantidade de movimento referente a perda de carga do sistema $\left(\frac{dp}{dz}\right)_f$, deve ser modelado de forma a considerar a influência da variação de geometria em fenômenos como propagação da camada limite. Caso isso não seja feito, pode ser adotada a suposição de que a perda de carga em dutos convergentes/divergentes pode ser aproximada por coeficientes de fricção de tubos retos em cada uma das várias seções do Venturi dividida pelo algoritmo, como ilustrado em vermelho na Figura 26, porém, essa suposição não garante uma precisão muito aceitável das velocidades calculadas.

Figura 26 – Seções diferenciais do Venturi para cálculo de iterações pelo algoritmo.



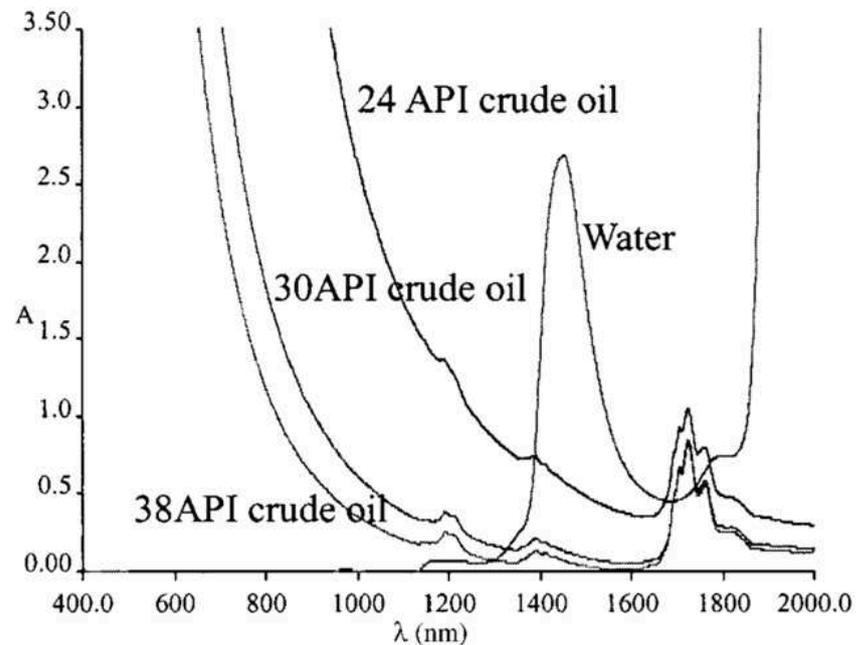
Fonte: Autor.

3.2.3 Sistema de Medição de Fração de Fase

O sistema de medição de fração de fase será baseado no princípio de absorção óptica por infravermelho. Para isso, será necessária a utilização de emissores luminosos (*lasers*) e receptores luminosos (fotodiodos) para identificar a fração de fase de uma determinada substância no escoamento. Como mostrado no capítulo de revisão bibliográfica, a diferença entre a intensidade luminosa emitida pelo *laser* e recebida pelo fotodiodo ao atravessar o escoamento pode ser relacionada com a quantidade de determinado fluido absorvedor através da lei de *Beer-Lambert*, expressa pela Equação (14). Portanto, o desenvolvimento de uma placa eletrônica capaz de controlar o funcionamento do *laser* e processar os dados gerados pela leitura dos fotodiodos é necessário para que o sistema de medição de fração de fase possa operar como esperado. Diferente do sistema de medição de velocidade de escoamento, neste caso é muito importante diferenciar as duas fases que compõe a fase líquida (óleo e água), pois as proporções de cada fase podem ser muito diferentes entre si. Porém, como já mencionado anteriormente, não foi possível realizar testes incluindo óleo na bancada experimental de escoamento multifásico. Isso gerou a necessidade de realizar os testes envolvendo óleo de forma separada para o sistema de medição de fração de fase. Na Figura 27 é mostrado um gráfico que apresenta o espectro de absorção luminosa em infravermelho da água e alguns tipos de óleo *crude*, considerando a variação do comprimento de onda da luz. Como pode ser visto no gráfico, o pico de absorção para a água ocorre em um comprimento de onda de aproximadamente 1490 nm, enquanto para os óleos *crude*, comprimentos de onda próximos a 850 nm já garantem uma alta absorção. O fato de os picos de absorção para cada fluido ocorrer em comprimentos de onda diferentes garante que quando uma mistura de água e óleo for submetida a um feixe luminoso com alguma das duas frequências, um dos fluidos terá uma absorção muito mais intensa do que o outro.

Uma vez que a fração de fase consiste na porcentagem de cada substância em relação a uma área, um volume, ou até mesmo uma altura de coluna de líquido, a soma das três frações de fase do escoamento resulta em uma relação unitária, o que permite que ao medir a fração de fase de duas fases (óleo e água), a terceira (ar) possa ser encontrada através dessa relação. Por causa disso, e considerando as faixas de comprimento de onda para alta absorção, o sistema de medição consiste em um conjunto de dois *lasers*, sendo um específico para absorção em 1490 nm (alta absorção pela água) e outro para o 850 nm (alta absorção para óleo *crude*).

Figura 27 – Espectro de absorção infravermelho da água e óleos *crude*.



Fonte: Zhao et al. (2004).

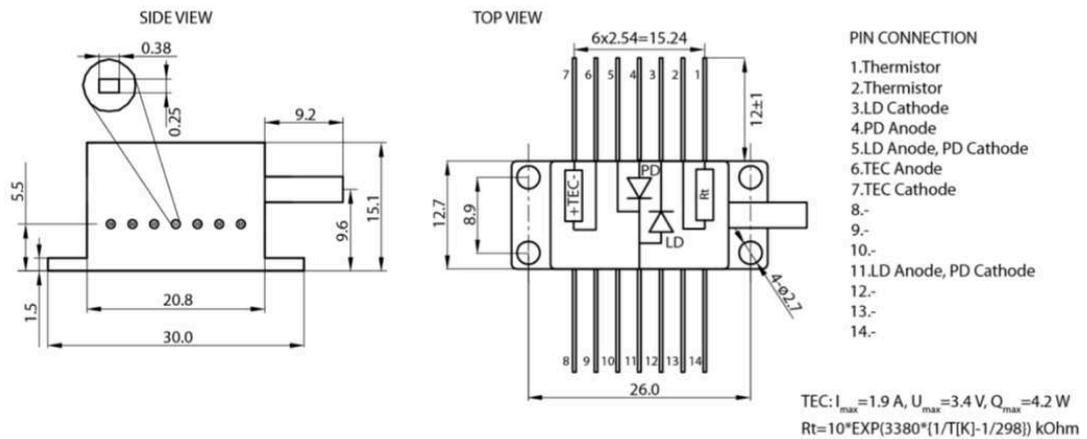
Neste trabalho, foram desenvolvidas duas placas eletrônicas equivalentes, sendo que cada uma tem a capacidade de conter um *laser* (cada uma com um modelo diferente) e até oito fotodiodos. Porém, neste trabalho foram usados apenas dois canais de fotodiodo em cada placa, sendo que um é conectado a um fotodiodo externo que serve como o receptor, e outro é conectado a um fotodiodo existente internamente à cavidade do *laser* para monitorar a intensidade luminosa de saída do feixe luminoso.

3.2.3.1 Placa eletrônica de controle do *laser* e dos fotodiodos

Como dito anteriormente, foram desenvolvidas duas placas equivalentes para controle dos *lasers* e fotodiodos, sendo que uma possui um *laser* do modelo LDI-1490-DFB-2.5G-20/80, fabricado pela LASERCOM, com a capacidade de emissão em comprimentos de onda de 1490 nm e potência de saída de até 20 mW, escolhido para a absorção em água. A outra placa, por sua vez, possui um *laser* do modelo LDI-850-FP-20/70, também fabricado pela LASERCOM, com a capacidade de emissão em comprimentos de onda de 850 nm e potência

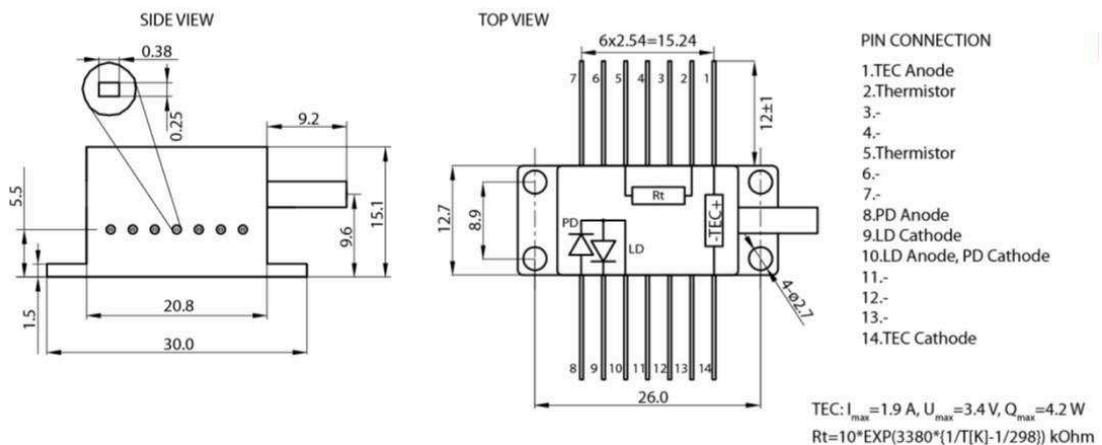
de saída de até 20 mW, compatível com o que foi apresentado na Figura 27. Ambos os *lasers* possuem fotodiodos internos que permitem o monitoramento da intensidade luminosa em que o feixe é emitido antes de se propagar para fora do *case* do dispositivo. Além disso, eles também possuem um termistor NPT e um TEC internamente. O termistor tem a função de realizar leituras de temperatura no interior do *laser*, enquanto o TEC tem a função de controlar esta temperatura a partir de um controle Proporcional-Integral implementado no próprio *laser*. Na Figura 28 e Figura 29 os esquemáticos internos do LDI-1490 e LDI-850 podem ser vistos, respectivamente, demonstrando suas dimensões físicas, alguns de seus componentes internos e a disposição dos pinos de cada um.

Figura 28 – Esquemático do LDI-1490-DFB-2.5G-20/80.



Fonte: LaserCom-LDI1490 (2019).

Figura 29 – Esquemático do LDI-850-FP-20/70.

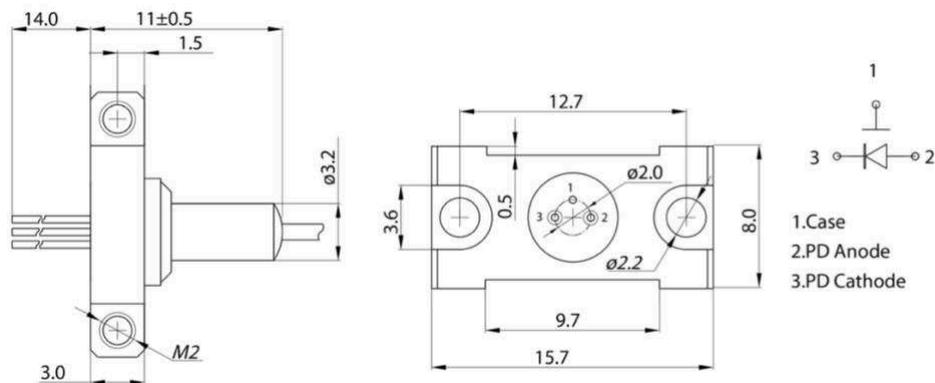


Fonte: LaserCom-LDI850 (2019).

Também foram utilizados dois fotodiodos PDI-80-2G-K, do fabricante LASERCOM, com um intervalo espectral de operação de 800-1650 nm, potência de entrada de até 10 mW

em frequências de pulso de até 2 GHz, sendo um para cada uma das placas desenvolvidas. Na Figura 30 é possível visualizar um desenho do fotodiodo PDI-80-2G-K, demonstrando suas dimensões físicas em milímetros e a disposição dos três pinos existentes.

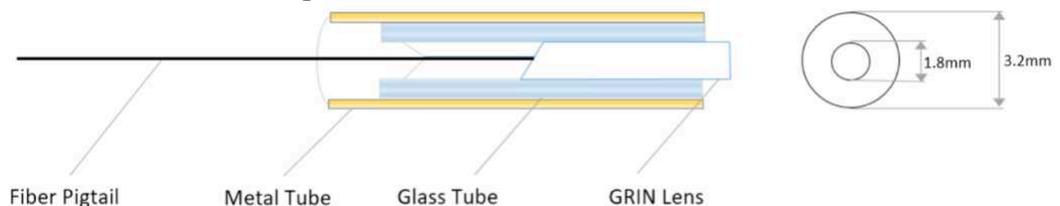
Figura 30 – Desenho do PDI-80-2G-K.



Fonte: LaserCom-PDI80 (2019).

Tanto os *lasers* quanto os fotodiodos escolhidos possuem uma interface óptica padrão em fibra óptica com conector do tipo FC(APC) na extremidade. Por causa disso, e também para auxiliar na focalização do feixe luminoso ao sair da fibra, colimadores compatíveis com o padrão de conexão óptica FC(APC) foram necessários para a utilização do sistema. Foram utilizados quatro colimadores *single mode* com fibra óptica, do fabricante ADOptix, sendo dois deles para comprimento onda de operação de $1480 \pm 30 \text{ nm}$ (um conectado na saída do LDI-1490 e outro na entrada do fotodiodo) e dois para comprimento onda de operação de $850 \pm 20 \text{ nm}$ (um conectado na saída do LDI-850 e outro na entrada do fotodiodo). A geometria de todos os colimadores utilizados é exatamente a mesma, sendo o diâmetro da lente igual à 1,8 mm e a distância focal de 40 mm. Na Figura 31 é mostrada a estrutura interna do colimador, incluindo as principais partes e os diâmetros do case e lente.

Figura 31 – Estrutura interna do colimador.

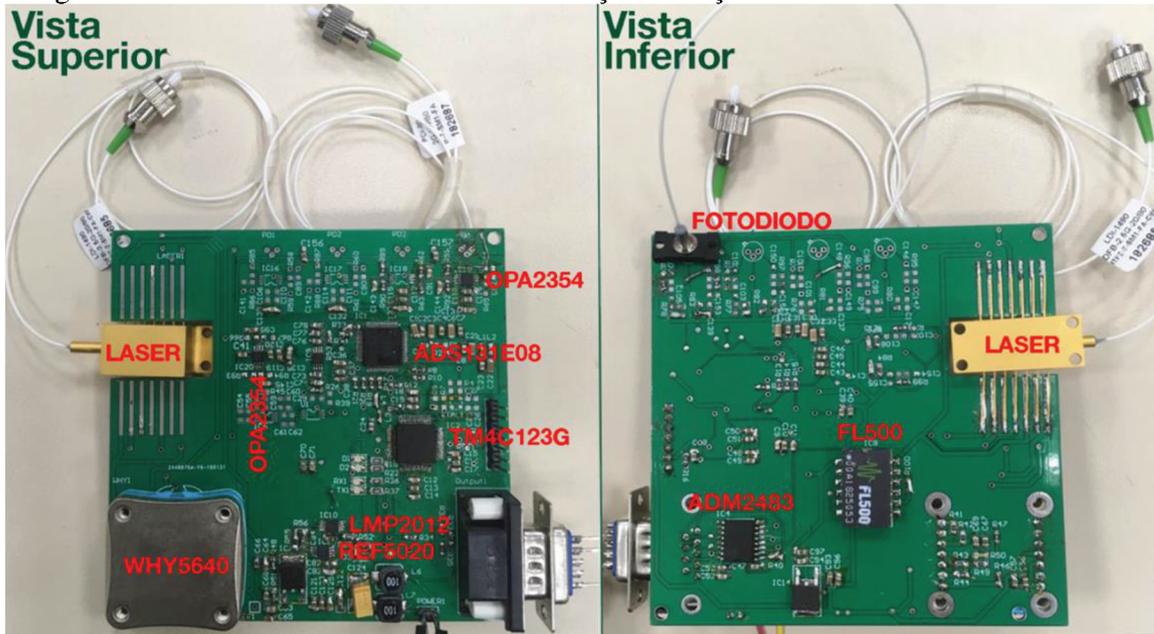


Fonte: ADOptix (2018).

O projeto da placa foi feito de forma que um microcontrolador comercial TM4C123GH6PM, o mesmo usado na plataforma *Tiva LaunchPad Series C*, da empresa *Texas Instruments*, seja responsável por controlar o funcionamento do sistema. Este microcontrolador conta com um processador ARM Cortex-M4F de 32-bits com uma memória RAM de 32 kB e uma memória *flash* de 256 kB, com velocidade de *clock* de até 80 MHz. Os sinais analógicos dos dois fotodiodos de cada placa são amplificados por amplificadores operacionais OPA2354 antes de serem convertidos em sinais digitais pelo ADS131E08, um ADC sigma-delta da *Texas Instruments*, de 24 bits, 64 kSPS, 8 canais com amostragem simultânea e com amplificador de ganho programável embutido. O microcontrolador se comunica com o ADC através do protocolo SPI, e permite que as informações sejam enviadas para o computador via protocolo UART/USB ou via RS485 através do *transceiver* isolador ADM2483. Em cada placa, um FL500, driver de baixa potência para diodos *laser*, assume a função de fonte de corrente para o *laser*. Este circuito integrado exige que uma tensão específica seja aplicada em alguns de seus pinos (VSET1/VSET2) para que este seja configurado de acordo com a necessidade da aplicação. Para isso, um regulador de tensão de precisão REF5020 e um amplificador operacional LMP2012 são usados para garantir os níveis de tensão corretos para a alimentação do *laser*. Além disso, o circuito também conta com um controlador de temperatura WHY5640 responsável por controlar o TEC interno do *laser* de acordo com um controlador Proporcional-Integral utilizando os dados medidos pelo termistor interno do *laser*.

Na Figura 32 são apresentadas imagens dos dois lados (vista superior e inferior) de uma das duas placas eletrônicas com o *laser*, fotodiodo e demais componentes do circuito. O esquemático eletrônico da placa pode ser encontrado no APÊNDICE C. No esquemático, como pode ser visto, existem dois *lasers* representados. Porém, quando as placas de circuito impresso foram feitas, apenas um *laser* foi considerado em cada uma.

Figura 32 – Placa eletrônica do sistema de medição de fração de fase com *lasers* e fotodiodo.



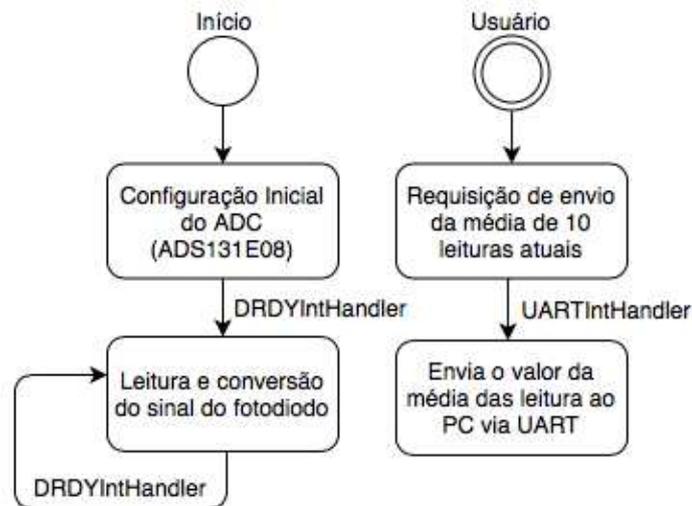
Fonte: Autor.

Para cada uma das placas desenvolvidas, considerando que os existem dois modelos de *lasers* diferentes (1490 nm e 850 nm), foi necessário dimensionar resistores e capacitores dos circuitos de acordo com as demandas de tensão de referência e ganhos de cada um.

A estrutura de *software* para o sistema de medição de fração de fase foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C através da IDE *Code Composer Studio*, porém, o microcontrolador é responsável apenas pelo gerenciamento do conversor ADS131E08, que realiza a leitura analógica do sinal do fotodiodo e o digitaliza, enviando essas informações ao computador. Todo o pós-processamento do sinal digital de tensão para determinar as frações de fase é feito diretamente pela rotina em LabVIEW, uma vez que mudanças podem ser feitas mais facilmente sem a necessidade de compilação de código no microcontrolador. Na Figura 33 é apresentado um fluxograma que ilustra como a rotina do *software* embarcado no microcontrolador funciona. Ao inicializar o sistema, todas as configurações de *clock*, portas, interrupções e comunicação do sistema são realizadas, incluindo as etapas de inicialização do ADS131E08, descritas no *datasheet* do dispositivo (TEXAS INSTRUMENTS, 2017). Em seguida, através de uma interrupção GPIO acionada pelo evento de borda de descida do pino DRDY do ADC (que ocorre quando uma conversão é finalizada), a leitura dos sinais em cada canal é feita, sendo que os valores lidos são armazenados em variáveis. Esse processo se

repete continuamente, e a cada 10 conversões uma média é feita em cima dos últimos valores lidos. Enquanto isso, uma outra interrupção UART é acionada quando a interface em LabVIEW envia um comando para leitura. Neste momento, os valores atuais armazenados nas variáveis de média de leitura são enviados via UART para o computador.

Figura 33 – Fluxograma de funcionamento do *software* embarcado no TM4C123GH6PM do sistema de medição de fração de fase.



Fonte: Autor.

Uma forma alternativa de fazer a leitura da potência luminosa do *laser*, tanto conectando diretamente na fibra óptica, ou após a passagem da luz pelo meio absorvedor utilizando um colimador no emissor, é através do medidor de potência óptica KING-60S, do fabricante Joinwit. Esse dispositivo possui um fotodiodo acoplado com uma abertura externa que permite a entrada da luz por uma área circular de diâmetro igual a 3,2 mm, permitindo medições de frações de nano-Watt até no máximo 10 mW. Além dos comprimentos de onda de 1490 nm e 850 nm, esse equipamento permite medições em 980, 1300, 1310, 1550 e 1625 nm com erro de mais ou menos 0.1%. A Figura 34 mostra uma imagem do medidor de potência óptica KING-60S.

Figura 34 – Medidor de potência óptica KING-60S.



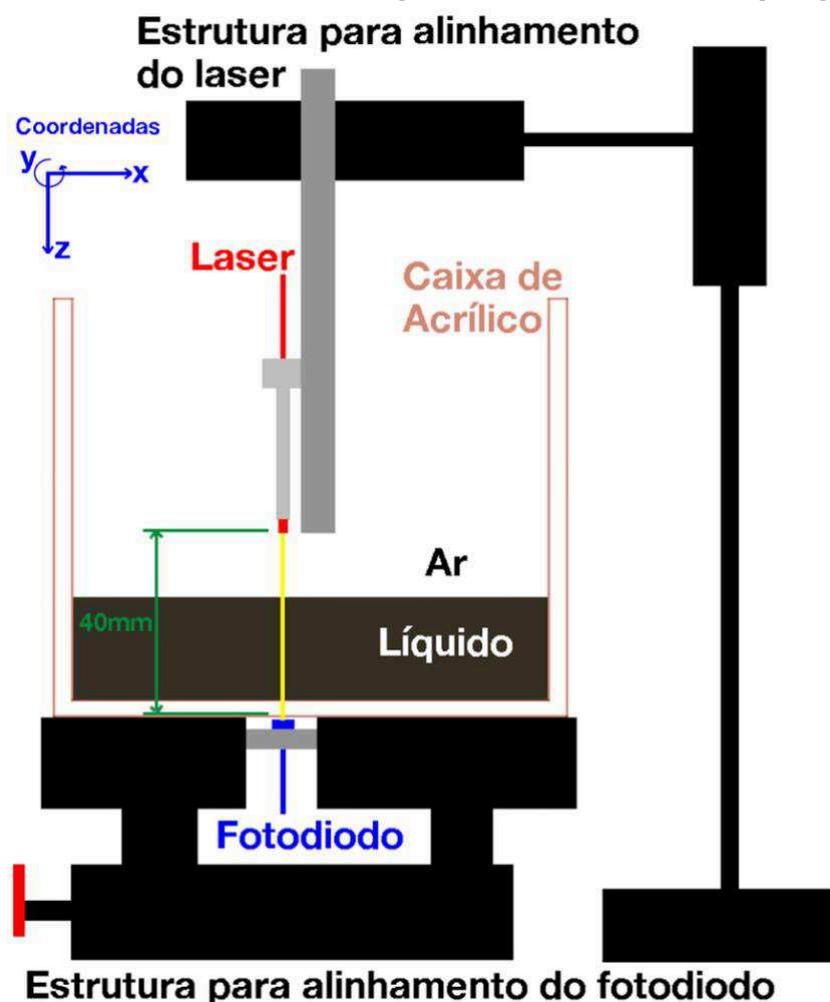
Fonte: Autor.

3.2.3.2 Estrutura de testes para sistema de detecção de fração de fase

Como já mencionado, devido a impossibilidade de uso da bancada experimental multifásica em testes que incluem a presença de óleo *crude*, os testes de caracterização de absorção luminosa do sistema de medição de fração de fase precisaram ser realizados utilizando uma estrutura montada especificamente para esse sistema. Devido a maior complexidade no desenvolvimento de uma bancada para testes dinâmicos, e considerando que futuramente a bancada multifásica estará apta para testes com óleo *crude*, optou-se por desenvolver uma estrutura de alinhamento entre o emissor e receptor luminoso de modo que os testes permitam a caracterização do sistema a partir da análise da absorção da luz em diferentes meios através de colunas estáticas de líquidos. Esse sistema tem o intuito de validar o funcionamento do sistema de medição por absorção infravermelho, uma vez que os testes estáticos podem validar como e quanto cada fluido absorve nos dois comprimentos de onda selecionados. Uma vez que os testes estáticos validem o funcionamento do sistema, para verificar seu comportamento em outras configurações mais complexas, é importante que este também seja submetido futuramente a testes com escoamentos dinâmicos. Portanto, recomendamos para trabalhos futuros que venham a dar continuidade ao desenvolvimento realizado no presente trabalho que realizem tais testes.

A estrutura de testes consiste em um conjunto de fixadores mecânicos posicionados de tal forma a alinhar da melhor forma possível o emissor e o receptor luminoso, de modo que permita que um recipiente de acrílico seja posicionado entre eles, para que então camadas de fluídos possam ser colocadas em posição para realização dos testes. É importante mencionar que pela falta de equipamentos específicos de alinhamento óptico, foi observado uma considerável limitação de precisão nos processos de alinhamento. A Figura 35 ilustra como o recipiente com os fluídos são posicionados entre o receptor e emissor luminoso. Como a distância focal do colimador é igual a 40 mm, para garantir ao máximo que os raios cheguem o mais concentrado possível no receptor, uma distância de aproximadamente 40 mm entre o emissor e o receptor foi fixada na estrutura de alinhamento óptico. Além disso, a estrutura foi feita de modo a permitir que o recipiente de acrílico pudesse ser removido para fins de limpeza sem prejudicar o alinhamento da estrutura.

Figura 35 – Estrutura de alinhamento para testes do sistema de medição óptico.



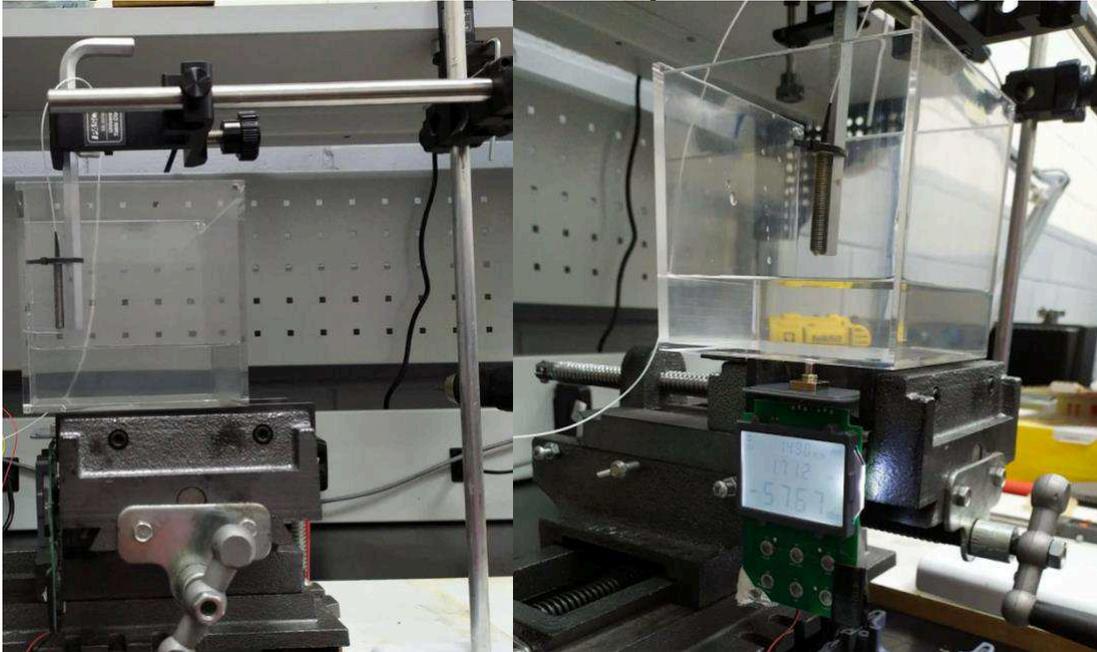
Fonte: Autor.

Apesar de todo o sistema eletrônico desenvolvido para controlar a potência do *laser* e detectar os sinais captados pelo fotodiodo, não foi possível a utilização do sistema de leitura do sinal do fotodiodo para os testes experimentais. Inicialmente, foi planejado que tanto no lado do receptor quanto do emissor seriam conectados colimadores para emitir e receber os raios de luz após passar pelo líquido absorvedor. Porém, foi identificado que com essa configuração, o fotodiodo não recebia praticamente nada da potência luminosa emitida pelo *laser*. Como o diâmetro da lente do colimador utilizado é de apenas 1,8 mm, a área na qual a luz teria que ser focalizada para entrar na fibra óptica se mostrou muito pequena, sendo praticamente impossível de conseguir com os equipamentos disponíveis em laboratório. Por esse motivo, para que esse sistema funcione corretamente, é necessário um alinhamento de alta precisão entre os colimadores do receptor e do emissor, o que não foi possível devido a falta de equipamentos de precisão para alinhamento óptico. Sendo assim, apesar do sistema eletrônico estar em pleno funcionamento, com o intuito de realizar os testes experimentais dentro do tempo disponível para a realização deste trabalho, optou-se por utilizar o medidor de potência óptica KING-60S no lugar do fotodiodo da placa desenvolvida, pois este apresenta uma área maior por onde a luz consegue alcançar o fotodiodo (diâmetro de entrada do fotodiodo do medidor é de 3,2 mm). Ao testar a capacidade de detecção luminosa com o equipamento de alinhamento disponível, foi possível observar que desta forma o medidor de potência óptica é capaz de detectar uma parcela considerável da luz emitida pelo *laser*. Portanto, durante os testes, foi utilizado um colimador apenas no lado do emissor, enquanto que para o receptor foi usado diretamente o medidor de potência óptica sem a necessidade do uso de um colimador.

Para adequar o tamanho do medidor de potência óptica com a estrutura de alinhamento, foi necessário retirar o *case* plástico do dispositivo, uma vez que este atrapalhava o alinhamento entre o emissor e receptor. Na Figura 36 são mostradas imagens de como a estrutura de alinhamento foi montada para os testes. Como pode ser visto, o colimador que está conectado ao *laser* foi posicionado na parte superior, sendo que este foi colocado dentro de um parafuso com furo passante para que fosse possível uma melhor fixação na estrutura. Na parte de baixo, preso a uma mesa que permite deslocamento nos dois eixos horizontais, foi posicionado o medidor de potência óptica (sem o *case* plástico) para receber os raios luminosos após passar pelo líquido contido dentro da caixa de acrílico. Uma vez que a área

interna da base da caixa de acrílico é conhecida (120x120 mm), assim como sua espessura (3,5 mm), e sabendo que a distância entre o emissor e receptor é de aproximadamente 40 mm, foi possível controlar e verificar a altura da coluna de líquido inserida de forma indireta a partir do volume de líquido (em ml) colocado no recipiente com o auxílio de seringas.

Figura 36 – Estrutura de alinhamento para realização dos testes de medição óptica.



Fonte: Autor.

3.2.3.3 Sistema linear de equações para determinação de fração de fase

Uma vez que a área da base da caixa de acrílico é constante e conhecida, a altura de coluna de líquido acaba sendo o único grau de liberdade que varia no sistema. Portanto, é possível afirmar que o caminho percorrido pela luz (l na Equação (14), igual a 40 mm nesse caso) é proporcional a soma das alturas de coluna de fluido existentes dentro da caixa, como mostra a Equação (16).

$$a_a + a_o + a_{ar} = l = 40mm \quad (16)$$

onde a_a , a_o e a_{ar} são as alturas de coluna de água, óleo e ar, respectivamente. l é o caminho total percorrido pela luz do emissor ao receptor. Com base nisso, pode-se dizer que as frações de fase de cada substância para essa configuração de teste pode ser escrita de acordo com relação unitária mostrada na Equação (17).

$$f_a + f_o + f_{ar} = \frac{a_a}{l} + \frac{a_o}{l} + \frac{a_{ar}}{l} = 1 \quad (17)$$

onde f_a , f_o e f_{ar} são as frações de fase da água, óleo e ar, respectivamente, sendo que a soma das três deve ser igual a 1.

De acordo com a lei de *Beer-Lambert*, expressa pela Equação (14), a absorvância pode ser calculada a partir dos valores de intensidade luminosa incidente e da intensidade luminosa medida pelo fotodiodo após o feixe de luz passar pelo meio de propagação. Portanto, se considerarmos camadas de ar, água e óleo como meios de propagação, podemos dizer que a absorvância total do sistema é igual à soma das absorvâncias para cada substância, como mostra a Equação (18).

$$A_{b,T} = A_{b,a} + A_{b,o} + A_{b,ar} \quad (18)$$

onde $A_{b,T}$ é a absorvância total do sistema e $A_{b,a}$, $A_{b,o}$ e $A_{b,ar}$ são as absorvâncias da água, óleo e ar, respectivamente.

Como são utilizados apenas dois comprimentos de onda conhecidos (1490 nm e 850 nm), pode ser considerado que $A_{b,ar}$ é aproximadamente zero, uma vez que o ar não absorve a energia luminosa nessas frequências, portanto, a absorvância total acaba sendo composta apenas pelas parcelas de absorvância dos líquidos (a absorvância da camada de acrílico da caixa foi desprezada). Uma vez que a razão entre intensidades luminosas é um valor adimensional, é possível utilizar de forma equivalente a razão entre as potências recebidas e emitidas na função logarítmica. Sendo assim, a Equação (18) pode ser reformulada ao combiná-la com a Equação (14), levando em consideração que os caminhos percorridos pela luz em cada meio de propagação, para a configuração de teste utilizada, são iguais as alturas de coluna dos fluidos colocados dentro da caixa de acrílico, já mostrado na Equação (16).

$$A_{b,T} = -\log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right) = \epsilon_a C_{d_a} a_a + \epsilon_o C_{d_o} a_o \quad (19)$$

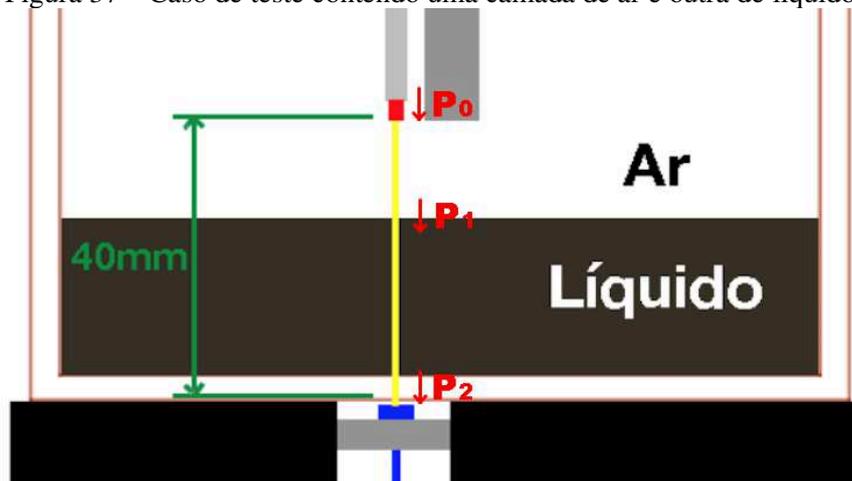
onde P_1 é a potência medida pelo fotodiodo, P_0 é a potência emitida pelo *laser*, ϵ_a e ϵ_o são as absorptividades molares da água e do óleo, C_{d_a} e C_{d_o} são as concentrações molares da água e do óleo, e a_a e a_o são as alturas de coluna da água e do óleo dentro da caixa de acrílico.

Uma vez que cada substância apresenta um diferente comportamento de absorção para diferentes comprimentos de onda, a Equação (19) pode ser considerada individualmente para os comprimentos de onda de 1490 nm e 850 nm. Dito isso, utilizando a Equação (17) e a Equação (19) para os dois comprimentos de onda utilizados, é possível construir um sistema linear de equações que relaciona as alturas de coluna de fluido com os valores de absorbância calculados através das potências emitida e recebida, como mostrado na Equação (20).

$$\begin{bmatrix} 1/l & 1/l & 1/l \\ \epsilon_{a,1490}C_{d_{a,1490}} & \epsilon_{o,1490}C_{d_{o,1490}} & 0 \\ \epsilon_{a,850}C_{d_{a,850}} & \epsilon_{o,850}C_{d_{o,850}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_a \\ a_o \\ a_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)_{1490nm} \\ -\log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)_{850nm} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A Figura 37 apresenta um caso de teste onde há apenas duas fases no caminho percorrido pela luz (efeitos relacionados a camada de acrílico são desprezados). Como pode ser visto, P_0 é a potência emitida pelo *laser*, P_1 é a potência que chega ao final da camada de ar ou a potência inicial que entra na camada de líquido, e P_2 é a potência que chega ao fotodiodo. Sabendo que a absorbância do ar é igual a zero, é possível afirmar que $P_0 = P_1$.

Figura 37 – Caso de teste contendo uma camada de ar e outra de líquido.



Fonte: Autor.

Se apenas o caminho percorrido pela luz através do líquido for analisado, segundo a lei de *Beer-Lambert*, a Equação (21) pode ser determinada. Neste caso, os termos ϵ_{liq} e C_{dliq} são constantes, uma vez que o primeiro é uma propriedade da substância e o segundo não varia ao longo do caminho percorrido pela luz nesta análise. Sendo assim, realizando testes individuais com cada líquido, pode-se encontrar uma relação linear entre $A_{b,liq}$ e a_{liq} , onde a inclinação desta reta equivale ao produto entre ϵ_{liq} e C_{dliq} , que podemos chamar de uma constante K_{liq} .

$$A_{b,T} = A_{b,liq} = -\log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = \epsilon_{liq} C_{dliq} a_{liq} \quad (21)$$

Com base nessas afirmações, se a constante K_{liq} para o óleo e água for determinada, nos comprimentos de onda de 1490 e 850 nm, o sistema linear da Equação (22) pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1/l & 1/l & 1/l \\ K_{a,1490} & K_{o,1490} & 0 \\ K_{a,850} & K_{o,850} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_a \\ a_o \\ a_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)_{1490nm} \\ -\log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)_{850nm} \end{bmatrix} \quad (22)$$

As constantes K_{liq} podem ser determinadas através de testes individuais de cada fluido para determinar relação da variação da absorvância luminosa a partir de diferentes alturas de coluna de fluido. Como essas relações devem ser lineares, as constantes K_{liq} são equivalentes aos valores da inclinação da reta para cada caso. Uma vez que as constantes são determinadas, as frações de fase podem ser encontradas a partir da solução do sistema linear da Equação (22) e das relações apresentadas na Equação (17).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de testes realizados para cada sistema de medição proposto. Depois de todo o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos equipamentos, bancadas, circuitos eletrônicos e sensores, cada sistema de medição foi submetido a um conjunto de testes. As próximas subseções apresentam os resultados obtidos nos testes do sistema de medição de massa específica, velocidade de escoamento e fração de fase, respectivamente. Apesar de terem sido realizados testes para todos os três sistemas de medição, devido a limitações dos equipamentos de laboratório, disponibilidade de recursos e outros fatores, para que os sistemas possam ser validados em escoamentos dinâmicos e contendo as três fases de forma simultânea, é necessário um maior aperfeiçoamento nos sistemas desenvolvidos no presente trabalho. Portanto, os testes realizados tiveram o intuito de validar cada sistema individualmente, dentro das possibilidades encontradas, sem realizar a junção de todos para poder de fato aferir as vazões mássicas de um escoamento multifásico.

4.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA

Para que as massas específicas possam ser determinadas a partir da técnica de medição por correlação, é necessário medir duas grandezas do escoamento, sendo elas temperatura e pressão. Essas grandezas podem ser medidas por uma grande variedade de equipamentos de medição encontrados no mercado. Como já mencionado no capítulo anterior, de acordo com os equipamentos que já estavam disponíveis e instalados na bancada experimental, foram utilizados neste trabalho os seguintes medidores para cada grandeza:

- Temperatura: *Coriolis* EMERSON CMF200
- Pressão: Transdutor de pressão EMERSON 2051

Com o objetivo de validar o funcionamento da técnica de medição de massa específica por correlações analíticas/empíricas, lembrando que não foi realizado nenhum teste com óleo *crude* nesta bancada, foram feitas medições para estimar as massas específicas para três escoamentos de água e três escoamentos de ar.

Segundo o manual da empresa Emerson Micro Motion (2019), a incerteza de medição de temperatura pelo *Coriolis* é de ± 1 °C, enquanto a incerteza de medição de massa específica pelo mesmo dispositivo é de $\pm 0,5$ kg/m³. Já o transdutor de pressão, de acordo com

Emerson Rosemount (2019), oferece uma incerteza de medição de pressão de $\pm 3,64 \text{ kPa}$.

Para os testes com escoamento de água, foram selecionadas três frequências (15, 20 e 25 Hz) no inversor de frequência que controla as bombas hidráulicas conectadas ao tanque reservatório de água. Cada frequência permite que o fluido seja bombeado para o sistema em uma determinada vazão mássica, que também pode ser medida diretamente pelo medidor *Coriolis* (lembrando que o *Coriolis* é um dispositivo capaz de medir várias grandezas ao mesmo tempo, como temperatura, vazão mássica, massa específica, entre outras).

Como o objetivo dos testes é validar se a técnica de cálculo das massas específicas utilizando as correlações tem a capacidade de gerar resultados coerentes, os valores de massa específica medidos pelo *Coriolis* foram adotados como referência e utilizados como base de comparação para os resultados obtidos através do método. Os resultados obtidos através da técnica de cálculo da massa específica foram avaliados a partir do erro percentual dos desvios em relação ao valor de referência. Em outras palavras, se a diferença entre o valor calculado e o valor de referência sobre o valor de referência for muito próximos de 0, significa que o método é capaz de gerar resultados aceitáveis.

A linha 1 no Quadro 1 apresenta as frequências aplicadas aos inversores de frequência em cada caso de teste, enquanto as vazões mássicas correspondentes a essas condições são mostradas na linha 2. Esses valores foram mantidos constantes durante cada teste. Na linha 3 estão os valores de massa específica medidos pelo *Coriolis* e que são utilizados como referência de comparação. Nas linhas 4 e 5 são apresentados os valores de temperatura e pressão medidos em cada teste pelo *Coriolis* e pelo transdutor de pressão, respectivamente. É importante lembrar que a pressão medida pelo transdutor de pressão é a pressão manométrica, portanto, é necessário que a pressão atmosférica seja somada ao valor medido para que então a pressão absoluta (linha 6) seja utilizada no gráfico da Figura 6 para a determinação da massa específica (linha 7).

Com os valores de massa específica obtidos através da técnica de correlação apresentados na linha 7 do Quadro 1, é possível encontrar o erro em relação ao valor de referência. O erro é calculado a partir da diferença dos valores calculado e de referência sobre o valor de referência, e é apresentado na linha 8 para os três casos. Como pode ser visto, nos três casos de teste realizados o erro em relação a referência ficou próximo de 0,1%, caracterizando que o método é capaz de gerar resultados aceitáveis para escoamento de água.

Quadro 1 – Dados dos testes medição de massa específica para escoamentos de água.

	LINHA	GRANDEZAS DO ESCOAMENTO	UNIDADES	ÁGUA		
CONST.	1	Frequência do Inversor	Hz	15	20	25
	2	Vazão Mássica (<i>Coriolis</i>)	kg/s	0,478	0,733	0,966
MEDIDO	3	Massa Específica (<i>Coriolis</i>)	kg/m ³	997,817	997,786	997,576
	4	Temperatura (<i>Coriolis</i>)	K	22,15	22,15	22,2
	5	Pressão Manométrica (Transdutor de pressão)	kPa	12,20	28,10	48,40
CALCULADO	6	Pressão Absoluta	kPa	113,52	129,42	149,72
	7	Massa Específica (correlação)	kg/m ³	998,43	998,57	998,71
	8	Erro em relação a referência.	%	0,06	0,08	0,11

Fonte: Autor.

Para o escoamento de ar não foi possível utilizar as medições de massa específica do *Coriolis* como referência para comparação com os valores estimados através do método. Isso ocorre porque a magnitude dos valores de massa específica do ar é muito próxima da incerteza de medição do *Coriolis*, o que torna inviável a comparação devido ao erro associado ser muito grande. Por esse motivo, considerando que a equação de gás ideal é muito aceita e utilizada pela comunidade científica, optou-se por verificar a precisão dos resultados para escoamento de ar através da aplicação de um método de propagação de erro sobre o cálculo da massa específica utilizando a equação de gás ideal a partir das incertezas oferecidas pelos medidores. Considerando a Equação (8), a incerteza do cálculo da massa específica pode ser encontrada através da propagação de erro de medição, como mostra a Equação (23).

$$\sigma_{\rho_g} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_g}{\partial P_g}\right)^2 \sigma_{P_g}^2 + \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_g}\right)^2 \sigma_{T_g}^2} \quad (23)$$

onde σ_{ρ_g} é a incerteza referente a massa específica calculada, σ_{P_g} é a incerteza de medição de pressão e σ_{T_g} é a incerteza de medição de temperatura (sabendo que R_g é uma constante).

Uma vez que o *Coriolis* utiliza os valores medidos de massa específica para calcular a

vazão mássica do escoamento, também não foi possível utilizar este parâmetro para diferenciar os três testes como feito nos casos anteriores. Por isso, foi utilizado um anemômetro de fio quente capaz de medir a velocidade de entrada do ar, que foi considerado como o parâmetro inicial mantido constante ao longo dos testes com ar. A velocidade, por sua vez, é controlada por uma válvula manual existente na entrada do sistema.

Como pode ser visto no Quadro 2, os valores de velocidade de escoamento são apresentados na linha 1. Nas linhas 2 e 3 são apresentados os valores de temperatura e pressão manométrica medidos em cada teste pelo *Coriolis* e pelo transdutor de pressão, respectivamente. Na linha 4 a pressão absoluta é mostrada, sendo resultado da soma da pressão manométrica e da pressão atmosférica. Na linha 5 os resultados dos cálculos de massa específica através da Equação (8) podem ser visualizados. Por fim, na linha 6 as incertezas associadas ao cálculo da massa específica obtidos a partir da Equação (23) podem ser verificados. Como pode ser visto, nos três casos de teste realizados as incertezas associadas ao cálculo das massas específicas foram próximas de $0,04 \text{ kg/m}^3$, o que corresponde a menos de 2% dos valores medidos. Portanto, o método adotado também é capaz de gerar resultados aceitáveis para escoamento de ar.

Quadro 2 – Dados dos testes medição de massa específica para escoamentos de ar.

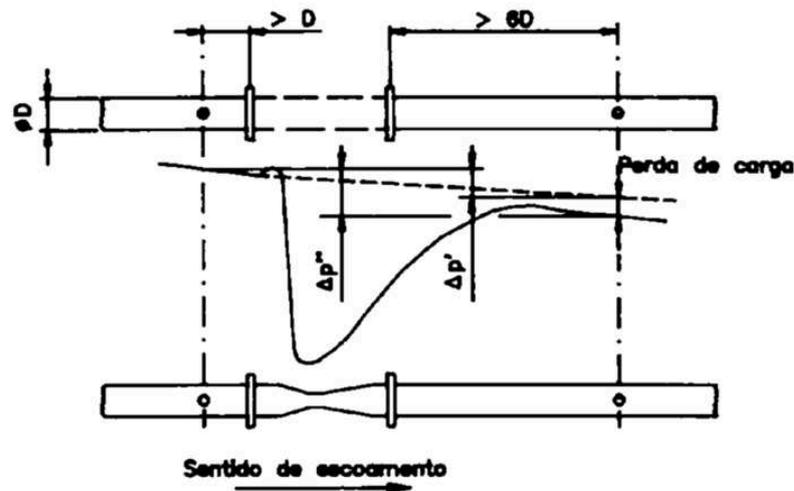
	LINHA	GRANDEZAS DO ESCOAMENTO	UNIDADES	AR		
CONST.	1	Velocidade do escoamento (anemômetro de fio quente)	m/s	0,30	0,40	0,50
MEDIDO	2	Temperatura (<i>Coriolis</i>)	K	296,07	296,08	296,13
	3	Pressão Manométrica (Transdutor de Pressão)	kPa	82,80	92,00	97,50
CALCULADO	4	Pressão Absoluta	kPa	184,12	193,32	198,82
	5	Massa Específica (correlação)	kg/m^3	2,174	2,283	2,348
	6	Incerteza Massa Específica	kg/m^3	0,04314	0,04316	0,04317

Fonte: Autor.

4.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

Utilizando o tubo de Venturi acoplado a bancada de escoamento multifásico, com os sensores de pressão diferencial e a placa de aquisição de pressões acoplados ao sistema, foi possível realizar alguns testes para validar o funcionamento do sistema de medição de velocidade de escoamento. De acordo com a norma ABNT NBR ISO 5167 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), a queda de pressão ao longo de um tubo Venturi clássico deve seguir um padrão de curva semelhante ao mostrado na Figura 38. Como pode ser visto, há uma queda brusca de pressão da primeira seção do Venturi até a garganta, e um crescimento mais suave e longo da garganta até o final do Venturi, sendo que a pressão final é um pouco menor do que a inicial devido a perda de carga.

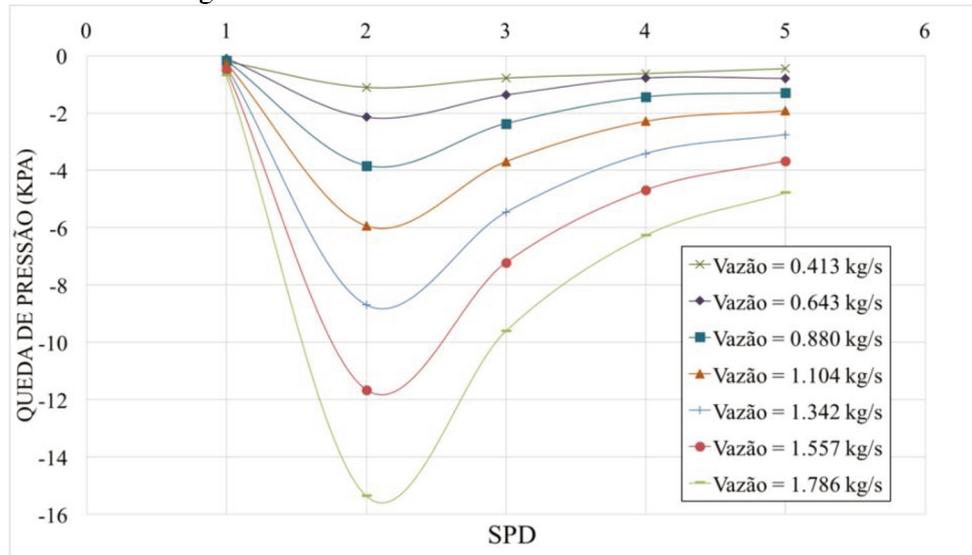
Figura 38 – Perfil de queda de pressão em um tubo de Venturi clássico.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003).

Para verificar se o tubo de Venturi utilizado opera de acordo com o especificado pela norma, foi realizado um teste inicial incluindo apenas um escoamento monofásico de água. Dessa forma, se o perfil de variação da queda de pressão ao longo do Venturi seguisse o mesmo padrão mostrado na Figura 38, os testes com mais de uma fase poderiam ser feitos considerando que os resultados seriam coerentes com as curvas esperadas. A Figura 39 mostra as curvas de queda de pressão ao longo do Venturi para diferentes condições de vazão testadas para um escoamento monofásico de água. As vazões utilizadas para cada caso de teste foram medidas utilizando o medidor *Coriolis*. Como pode ser visto, o perfil das curvas segue o mesmo padrão demonstrado pela norma, sendo que a magnitude da queda de pressão aumenta à medida que a vazão do escoamento é maior.

Figura 39 – Curvas de queda de pressão ao longo do tubo de Venturi para escoamento monofásico de água considerando diferentes vazões do escoamento.



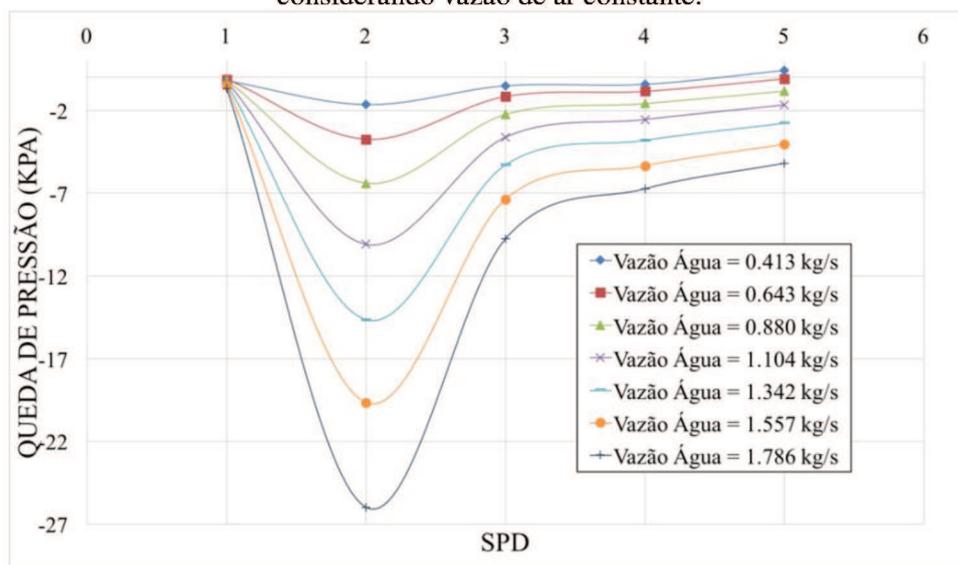
Fonte: Autor.

Esta análise apenas tem o objetivo de avaliar qualitativamente se o Venturi utilizado possui geometrias de acordo com a norma e não possui nenhuma falha que comprometa seu funcionamento normal. Uma vez que os resultados dos testes monofásicos se apresentaram coerentes, foram realizados testes envolvendo escoamentos multifásicos de ar e água, de modo a validar a técnica de medição para determinar as velocidades de ambas as fases do escoamento. Como no ambiente de extração as vazões de cada fase podem assumir diferentes valores entre uma e outra, é necessário verificar se o sistema de medição desenvolvido é capaz de capturar as informações do escoamento mesmo em diferentes combinações de vazão de entrada no sistema. Para isso, duas configurações de teste foram realizadas. A primeira configuração adotada considera uma vazão de entrada de ar no sistema como sendo constante, enquanto a vazão de entrada de água é diferente para cada teste realizado nesta configuração. Como pode ser visto na Figura 40, à medida que a vazão de entrada de água no sistema é maior, a queda de pressão no Venturi (escoamento com as duas fases) também aumenta. A segunda configuração de teste adotada considera uma vazão de entrada de água no sistema como sendo constante, enquanto a vazão de entrada de ar é diferente para cada teste realizado nesta configuração. Como pode ser visto na Figura 41, da forma semelhante ao caso anterior, à medida que a vazão de entrada de ar no sistema é maior, a queda de pressão no Venturi

(escoamento com as duas fases) também aumenta, porém, de forma menos intensa.

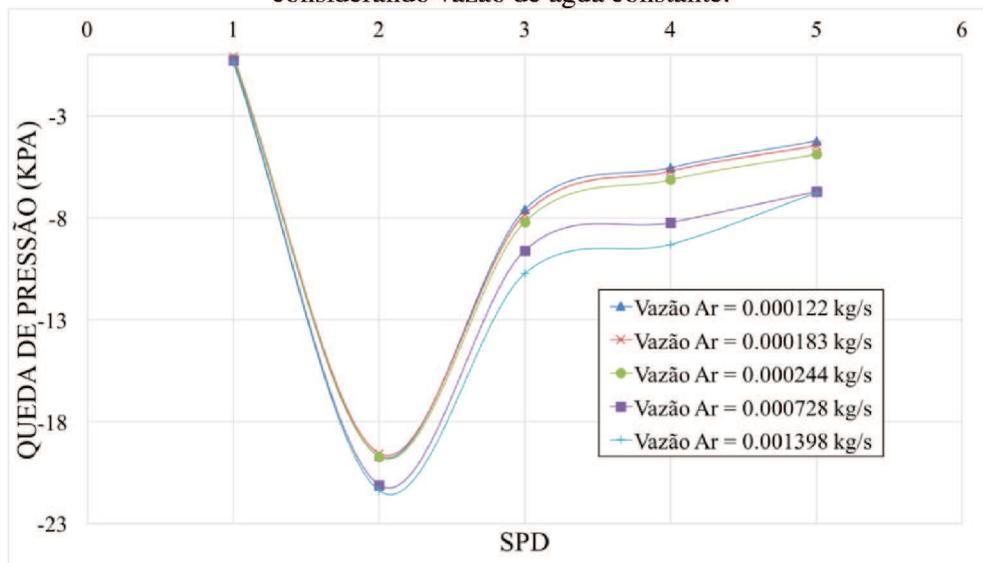
Como pode ser visto, os perfis de variação de pressão para os casos de escoamento multifásico seguem um perfil semelhante aos resultados apresentados nos testes monofásicos, porém, com algumas diferenças que tornam os perfis bifásicos levemente diferentes. Essas diferenças ocorrem principalmente devido aos fenômenos de perda de carga e características de escoamento de água e ar que tendem a perturbar o fluxo dentro do tubo.

Figura 40 – Curvas de perda de carga ao longo do tubo de Venturi para escoamento de água-ar considerando vazão de ar constante.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Curvas de perda de carga ao longo do tubo de Venturi para escoamento de água-ar considerando vazão de água constante.



Fonte: Autor.

Como mencionado no capítulo anterior, o algoritmo descrito por Chien (2019) não inclui a modelagem do termo $\left(\frac{dp}{dz}\right)_f$ apresentado na Figura 25, que por si só já abrange um extenso tópico de pesquisa na área de estudo de dinâmica dos fluidos. Por esse motivo, não foi possível a utilização dos dados coletados no algoritmo, devido a baixa de precisão dos resultados pela ausência deste parâmetro essencial.

4.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE FASE

A partir da estrutura de alinhamento desenvolvida, e utilizando o medidor KING-60S como receptor óptico, foi possível realizar alguns testes para caracterizar o funcionamento do sistema de medição. Mesmo conseguindo captar uma parcela da luz emitida através do medidor de potência óptica, foi possível notar que a sensibilidade do alinhamento influenciava muito os resultados dos experimentos. Uma vez que os líquidos foram colocados dentro da caixa de acrílico, efeitos de refração e reflexão foram percebidos, sendo que ao colocar uma mínima camada de fluido, algumas vezes a potência recebida caía drasticamente. Portanto, uma análise de sensibilidade de alinhamento, considerando efeitos de refração com diferentes camadas de fluido se fez necessária.

4.3.1 Análise de sensibilidade de alinhamento óptico e efeitos de refração

Nesta seção, uma análise de sensibilidade do alinhamento óptico da estrutura utilizada é apresentada, incluindo os efeitos de refração decorrentes da mudança dos meios de propagação da luz ao longo do caminho percorrido pela mesma. Em todos os casos analisados, o eixo de coordenadas apresentado na Figura 35 foi adotado como referência.

O primeiro caso analisado foi assumindo alinhamento perfeito e sem nenhuma interface que pudesse promover efeitos de refração (apenas ar entre emissor e receptor), para demonstrar qual seria a trajetória dos raios luminosos considerando a distância focal do colimador utilizado.

Na sequência, foi analisado o caso onde o sistema está idealmente alinhado, porém, considerando camadas de ar, óleo *crude*, água e a espessura de acrílico da caixa que armazena

os fluidos. Nesta análise, podemos verificar o impacto do efeito de refração sem considerar falhas no alinhamento.

Em seguida, alguns casos são avaliados considerando a influência de pequenos desalinhamentos em dois graus de liberdade. O primeiro grau de liberdade é referente ao deslocamento longitudinal ao longo do eixo de coordenadas x entre o emissor e o receptor, enquanto o segundo grau de liberdade considera um deslocamento angular do emissor em relação ao eixo de coordenadas y .

Finalmente, todos os efeitos são considerados de forma simultânea para que se possa observar quão grande é a influência de pequenos desalinhamentos da estrutura no sinal que chega ao receptor.

Como a distância focal do colimador utilizado é de apenas 40 mm, os raios de luz que saem das regiões mais extremas de sua lente são incididos com um ângulo de inclinação maior do que os raios que saem de posições mais ao centro da lente do colimador. Por este motivo, os raios mais extremos (raios mais à direita e mais à esquerda em uma visão planificada) foram considerados nas análises por sofrerem as maiores influências de desalinhamento e refração, uma vez que o ângulo inicial é maior. Para o caso de desalinhamento angular, as trajetórias desses raios não são simétricas em relação ao eixo central do emissor, por esse motivo, foram calculados ângulos e deslocamentos referentes a cada um dos casos.

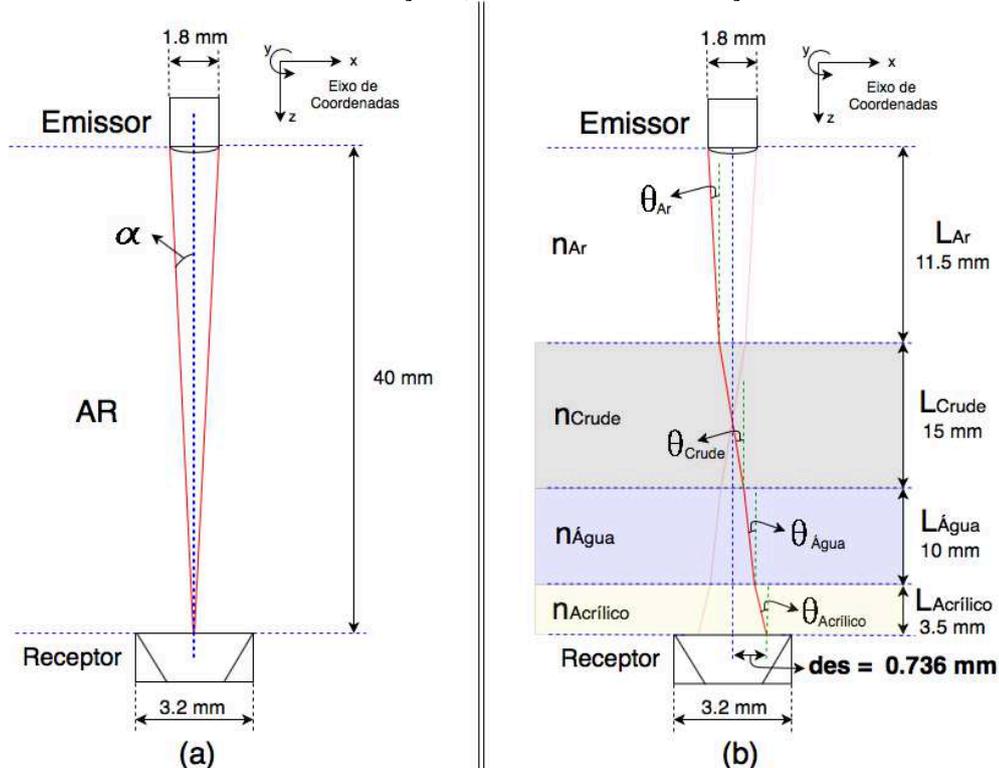
4.3.1.1 Alinhamento ideal

A primeira análise realizada considera um alinhamento perfeito, com somente ar entre o emissor e o receptor. O colimador utilizado foi projetado considerando o meio de propagação como sendo o ar, portanto, a geometria da lente nesta condição faz com que os raios ópticos sigam uma trajetória que resulta na distância focal de 40 mm. Como pode ser visto na Figura 42 – (a), se colocarmos o emissor e o receptor a uma distância de 40 mm, todos os raios emitidos tendem a chegar no ponto central da abertura do receptor, que possui um diâmetro de 3,2 mm. As linhas vermelhas no esquemático representam os raios de luz com maior ângulo de incidência emitidos pelo emissor. Todas as análises serão feitas considerando esses raios, pois quanto maior o ângulo em que o raio é emitido inicialmente, maior a influência sofrida devido a refração e ao desalinhamento. Sabendo que o diâmetro da lente é igual a 1,8 mm, é possível calcular o ângulo α formado entre o raio incidente e a linha normal

a área da superfície do receptor (linha pontilhada azul) através de um simples cálculo de trigonometria ($\alpha = 1,29^\circ$).

A segunda análise considera o mesmo alinhamento, porém, assumindo camadas com diferentes fluidos ao longo do caminho óptico. Como pode ser visto na Figura 42 – (b), foram considerados quatro diferentes meios de propagação em que a luz precisa atravessar. A camada mais abaixo representa a espessura da base da caixa de acrílico utilizada para colocar os fluidos, no valor de 3,5 mm. Logo acima do acrílico, para efeitos de análise, foi considerada uma camada de 10 mm de água, 15 mm de óleo *crude*, e o resto do caminho preenchido pelo ar (11,5 mm), totalizando assim a distância de 40 mm entre o emissor e o receptor. Como pode ser visto, a luz não segue mais a trajetória do esquemático anterior, porém, o ângulo θ_{Ar} apresenta o mesmo valor de α encontrado anteriormente, uma vez que até a primeira mudança de meio de propagação a luz faz a mesma trajetória analisada na Figura 42 – (a). Com essa informação, e sabendo os valores dos índices de refração de cada meio ($n_{Ar} = 1, n_{\text{Água}} = 1.33, n_{\text{Acrílico}} = 1.49, n_{\text{Crude}} = 1.5$), através da Equação (13) é possível encontrar todos os outros ângulos descritos no esquemático ($\theta_{Ar} = 1.29^\circ, \theta_{\text{Crude}} = 0.86^\circ, \theta_{\text{Água}} = 0.97^\circ, \theta_{\text{Acrílico}} = 0.87^\circ$). Uma vez que todos os ângulos são determinados, novamente utilizando cálculos de trigonometria é possível encontrar o deslocamento total do raio ao chegar no fim do percurso ($des = 0.736\text{mm}$). Neste caso, como o alinhamento está sendo assumido como ideal, os raios mais a esquerda e mais a direita que saem do emissor apresentam trajetórias equivalentes, porém, espelhadas, que resultam em deslocamentos iguais em ambas as direções ao longo do eixo x. Mesmo com o deslocamento ocorrido devido a refração, uma vez que o raio do receptor é igual a 1,6 mm, os raios ópticos ainda conseguem chegar em uma região dentro da área a qual o fotodiodo consegue detectá-los.

Figura 42 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando alinhamento perfeito. (a) Sem efeito de refração. (b) Com efeito de refração.



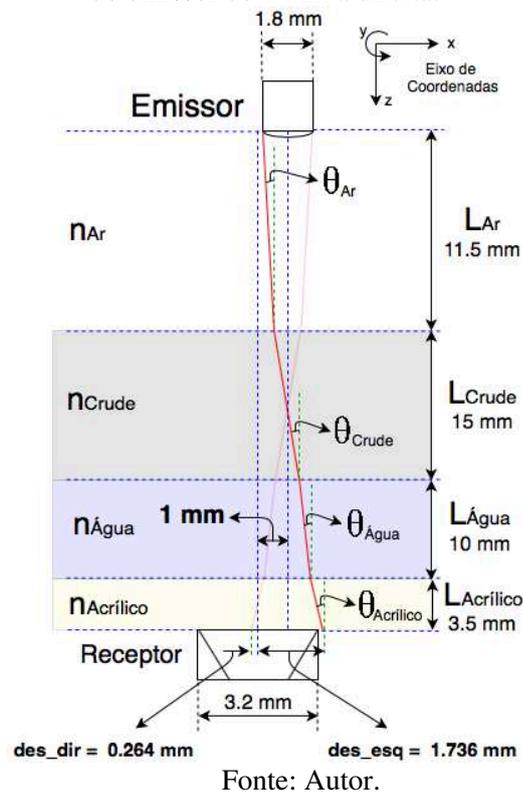
Fonte: Autor.

4.3.1.2 Alinhamento com pequenos deslocamentos

A partir de agora são introduzidos pequenos deslocamentos na posição do emissor para que se possa verificar a sensibilidade do sistema em relação a esses pequenos desalinhamentos. Primeiramente, foi considerado um deslocamento longitudinal do emissor em 1 mm à direita em relação ao centro do receptor. Como pode ser visto na Figura 43, o deslocamento longitudinal não altera os ângulos das trajetórias dos raios de luz, que permanecem os mesmos em relação ao apresentado na Figura 42 – (b). Portanto, para encontrar o deslocamento dos raios à direita do eixo vertical de referencia do receptor, basta somar o deslocamento inicial com o deslocamento encontrado na configuração sem desalinhamento, que já incluiu os efeitos de refração ($des_{dir} = 1 + 0.736 = 1.736 \text{ mm}$). Já para encontrar o deslocamento dos raios à esquerda do eixo vertical de referencia do receptor, basta subtrair o deslocamento encontrado na configuração sem desalinhamento pelo deslocamento inicial ($des_{esq} = 1 - 0.736 = 0.264 \text{ mm}$). Como pode ser visto, o deslocamento inicial de 1 mm faz com que uma pequena parcela dos raios que chegam à

direita do receptor não alcance completamente a área de captura, resultando em uma perda que não pode ser contemplada analisando apenas os efeitos de absorção.

Figura 43 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando um deslocamento longitudinal do emissor de 1 mm à direita.

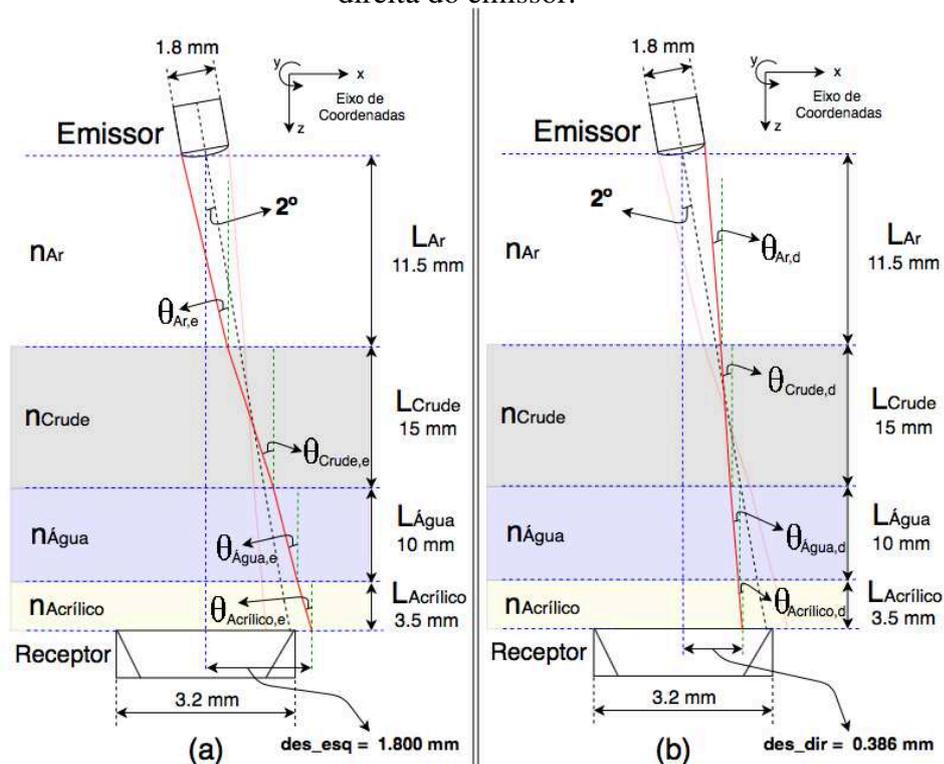


A segunda análise considera um deslocamento angular do emissor em 2° em relação ao eixo y . Neste caso, os ângulos iniciais de incidência dos raios nas duas extremidades do emissor no ar em relação a linha de referência no centro do receptor são diferentes, pois o sistema emissor como um todo sofreu rotação. Sendo assim, como pode ser visto na Figura 44 – (a), o ângulo $\theta_{Ar,e}$ é resultado da soma do ângulo de incidência inicial do colimador sem desalinhamento ($\alpha = 1.29^\circ$) com o ângulo de deslocamento aplicado, ($\theta_{Ar,e} = 2 + 1.29 = 3.29^\circ$). Já o ângulo $\theta_{Ar,d}$, visto na Figura 44 – (b), é resultado da subtração do ângulo de deslocamento aplicado pelo ângulo de incidência inicial do colimador ($\theta_{Ar,d} = 2 - 1.29 = 0.71^\circ$). A partir desses valores, novamente utilizando a Equação (13), é possível encontrar os demais ângulos para o raio representado na Figura 44 – (a), cujos valores são $\theta_{Ar,e} =$

$3.29^\circ, \theta_{Crude,e} = 2.19^\circ, \theta_{\acute{A}gua,e} = 2.47^\circ, \theta_{Acrylic,e} = 2.20^\circ$, e na Figura 44 – (b), cujos valores são $\theta_{Ar,d} = 0.71^\circ, \theta_{Crude,d} = 0.47^\circ, \theta_{\acute{A}gua,d} = 0.53^\circ, \theta_{Acrylic,d} = 0.47^\circ$.

Uma vez que todos os ângulos são determinados, novamente utilizando cálculos de trigonometria é possível encontrar o deslocamento dos raios à direita e à esquerda do centro do receptor ($des_esc = 1.800\text{ mm}$ e $des_dir = 0.386\text{ mm}$). Neste caso, percebemos que o deslocamento angular de 2° impacta um pouco mais no sistema do que o deslocamento longitudinal de 1 mm, fazendo com que uma maior parcela de raios emitidos não chegue completamente ao receptor.

Figura 44 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando um deslocamento angular de 2° do emissor. (a) Raio que chega mais a esquerda do emissor. (b) Raio que chega mais a direita do emissor.



Fonte: Autor.

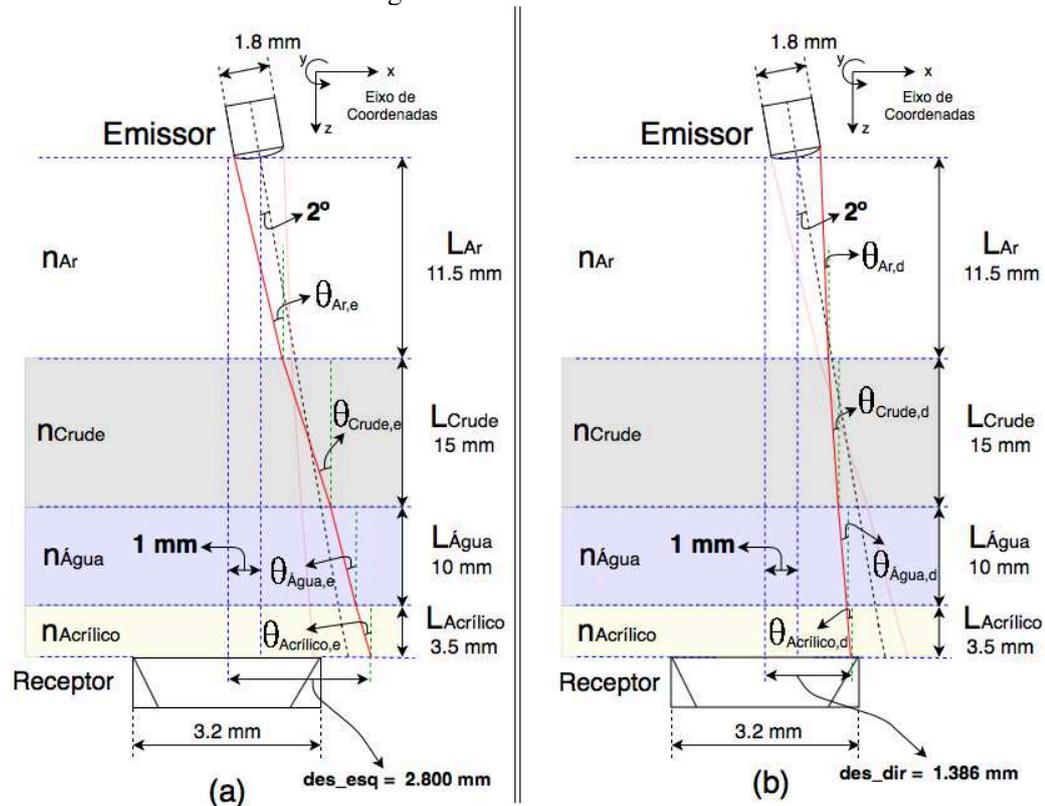
Por fim, a última análise de sensibilidade realizada para demonstrar o impacto do desalinhamento na quantidade de energia que realmente chega ao receptor visa compor os dois deslocamentos analisados anteriormente de forma individual, como pode ser visto na Figura 45 – (a) e Figura 45 – (b). Semelhante ao que ocorreu quando analisamos o deslocamento longitudinal, para encontrarmos o deslocamento total dos raios à esquerda e à direita do centro do receptor para este caso, basta somar o deslocamento longitudinal de 1 mm com o deslocamento encontrado através dos cálculos para os casos que consideram o

deslocamento angular de 2° , o que resulta em $des_{esq} = 1 + 1.800 = 2.800 \text{ mm}$ e $des_{dir} = 1 + 0.386 = 1.386 \text{ mm}$.

Neste caso, quando acoplamos os dois efeitos de desalinhamento ao sistema, a quantidade de energia que não chega ao receptor é muito maior, demonstrando que na prática, com os equipamentos utilizados para alinhamento óptico, que não garantem uma precisão confiável, é muito provável que uma quantidade de energia considerável seja perdida, o que não é resultado da absorção da luz pelos fluidos utilizados.

Além dos aspectos já discutidos, também existe a possibilidade de uma parcela da energia também ser dissipada devido a efeitos de reflexão que ocorrem em cada interface entre dois meios de propagação diferentes. Portanto, para que este sistema de medição seja mais preciso, é de fundamental importância a utilização de equipamentos mais sofisticados de alinhamento. Além disso, como pode ser visto, devido a refração provocada pelos meios de propagação, a distância focal do feixe resultante acaba sendo menor do que o projetado para o ar (40 mm). Por isso, um colimador com uma distância focal muito grande faria com que praticamente todos raios saíssem de forma perpendicular a área de emissão, considerando que a distância entre emissor e receptor seria muito menor do que a distância focal. Isso tornaria os problemas gerados pela refração muito menos significativos, e na prática, a maioria das perdas energéticas que não fossem provenientes da absorção dos fluidos fossem minimizadas. Portanto, é fortemente recomendado que em trabalhos futuros estas medidas sejam providenciadas.

Figura 45 – Esquemático da trajetória dos raios luminosos considerando deslocamento longitudinal e angular simultaneamente.



Fonte: Autor.

4.3.2 Curvas de absorvância e determinação das constantes K_{liq}

O sistema de medição utilizado ao longo desse trabalho não possui o sistema de alinhamento óptico ideal e não conta com um colimador que minimize os efeitos de reflexão, resultando em perdas energéticas que não podem ser previstas pela estrutura atual. Por esse motivo, os resultados dos testes experimentais multifásicos não podem ser exatamente previstos pelos sistemas de equação deduzidos no capítulo anterior, uma vez que isso só seria possível caso a estrutura de testes experimentais permitisse efeitos de absorção sem outras perdas. Apesar disso, todo o desenvolvimento a seguir foi realizado assumindo a não existência de perdas externas de energia, uma vez que futuramente os problemas existentes poderão ser resolvidos.

Além dos testes para identificar as curvas de variação da absorvância pela altura de água e de óleo *crude*, também foram utilizadas amostras de óleo térmico para transferência de calor *Klüberfood* NHT1 1-39 com o intuito de comparar seu perfil de absorvância com o dos demais líquidos, uma vez que por ser um óleo comercial, seus parâmetros podem ser encontrados no *datasheet* (o que não é possível com o óleo *crude*). Mesmo não utilizando

nenhum comprimento de onda específico para a absorção deste óleo, os resultados mostraram que em ambos os casos o óleo térmico apresenta uma absorção baixa quando comparado com a água em 1490 nm e óleo *crude* em ambos os comprimentos de onda.

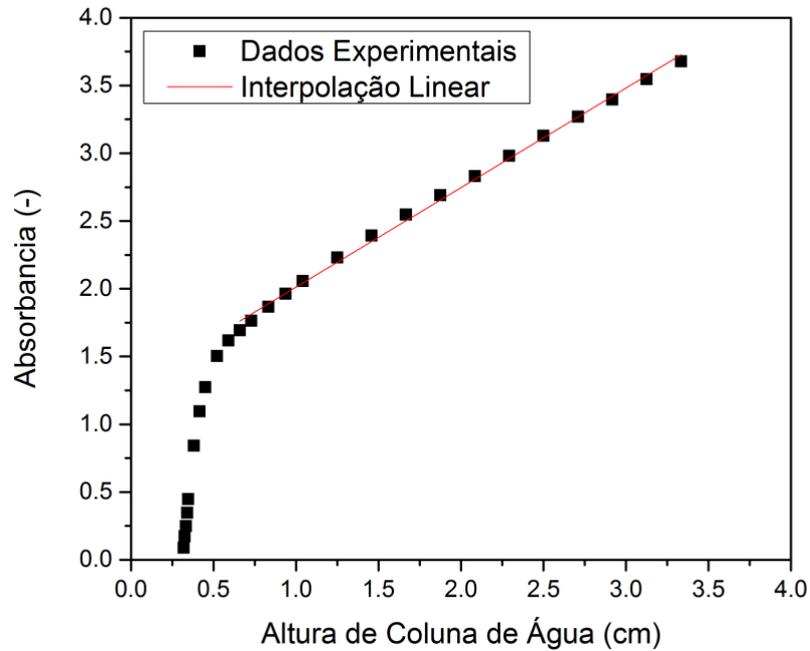
Com os dados provenientes dos testes realizados, seria possível criar um sistema linear de equações (como o mostrado na Equação (22)) para cada combinação possível de fluidos, como pode ser visto a seguir (considerando que o ar sempre está presente como uma das fases).

- Combinação 1: Ar, água e óleo *crude*.
- Combinação 2: Ar, água e óleo térmico.
- Combinação 3: Ar, óleo *crude* e óleo térmico.
- Combinação 4: Ar, água, óleo *crude* e óleo térmico.

(Para a combinação 4, seria necessário mais um comprimento de onda para compor um sistema linear com quatro equações e quatro incógnitas).

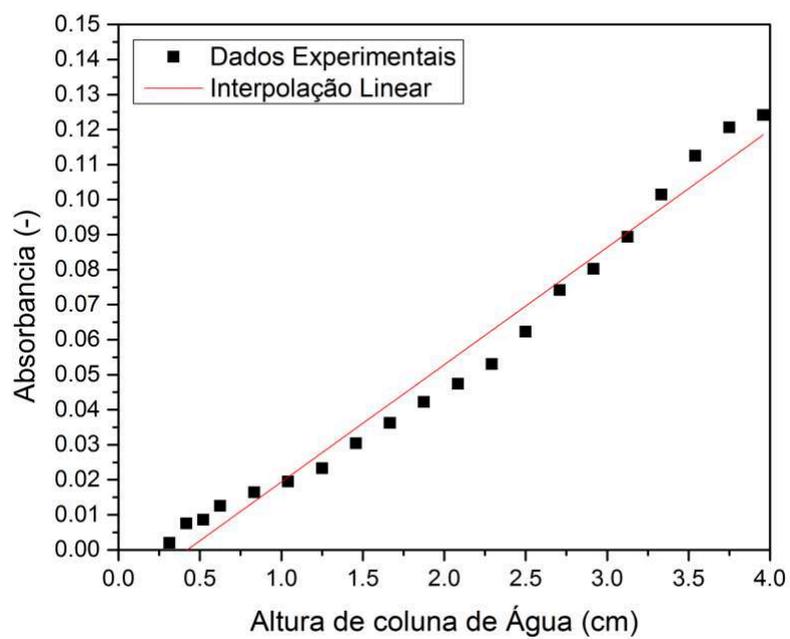
A seguir, as curvas experimentais obtidas através dos testes para a determinação das constantes K_{liq} que compõe o sistema linear. A Figura 46 é referente aos testes de água submetida a um raio óptico de 1490 nm, enquanto a Figura 47 abrange os dados relativos ao caso de água com raios de luz a 850 nm. A Figura 48 é referente aos testes de óleo *crude* submetido a um feixe de 1490 nm, enquanto a Figura 49 é relativa ao óleo *crude* com raios a 850 nm. E a Figura 50 é referente aos testes de óleo térmico submetido a um feixe de 1490 nm, enquanto a Figura 51 refere-se ao óleo térmico com raios de 850 nm.

Figura 46 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de água com feixe de luz em 1490 nm.



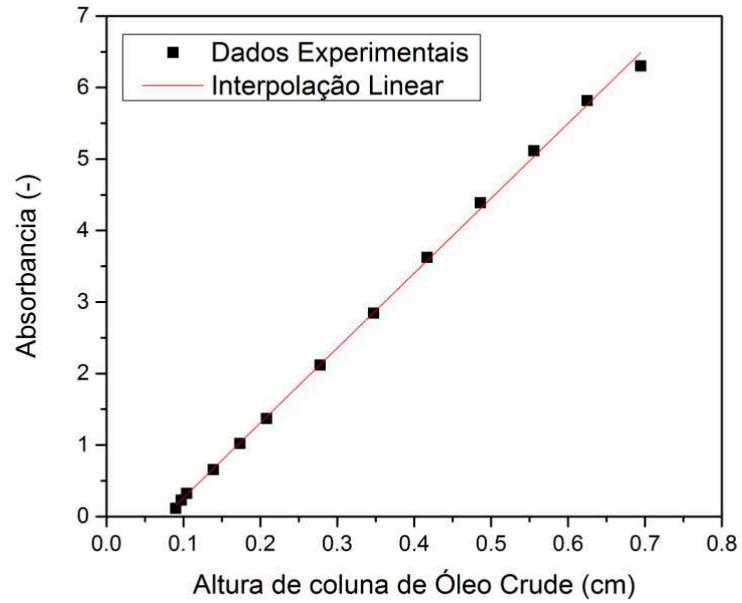
Fonte: Autor.

Figura 47 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de água com feixe de luz em 850 nm.



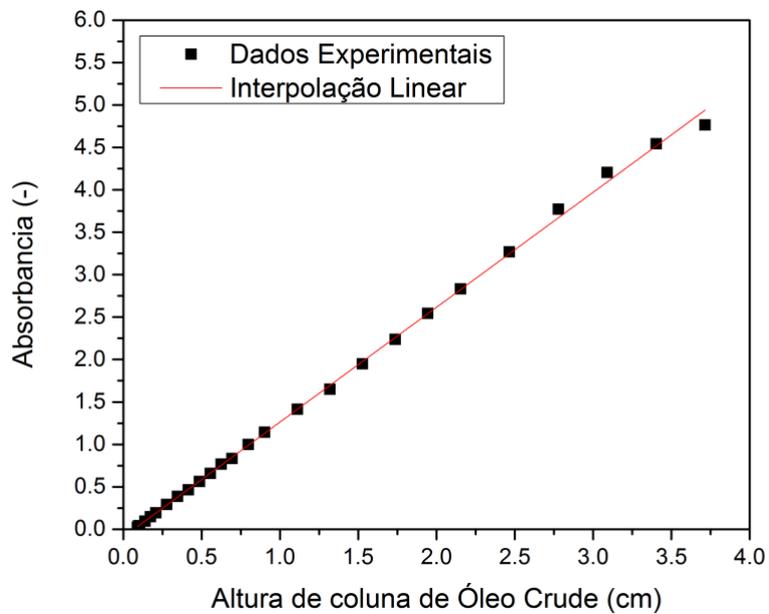
Fonte: Autor.

Figura 48 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo *crude* com feixe de luz em 850 nm.



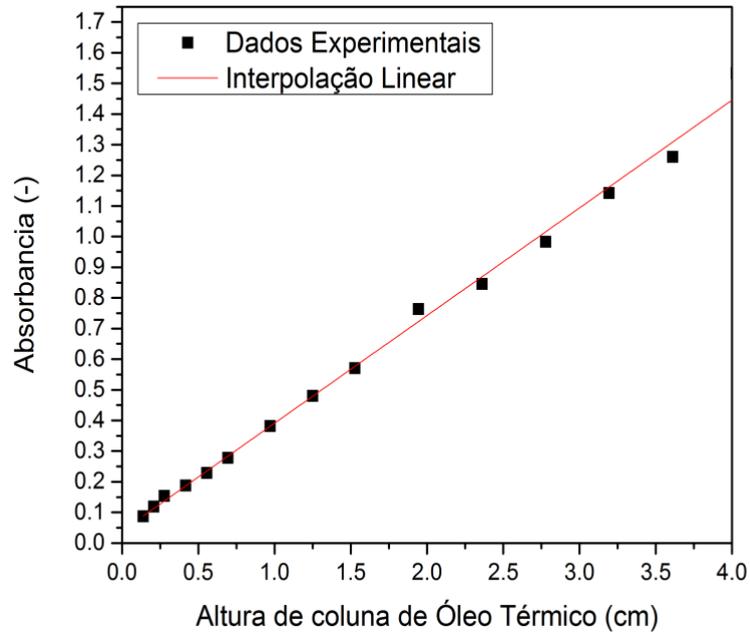
Fonte: Autor.

Figura 49 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo *crude* com feixe de luz em 1490 nm.



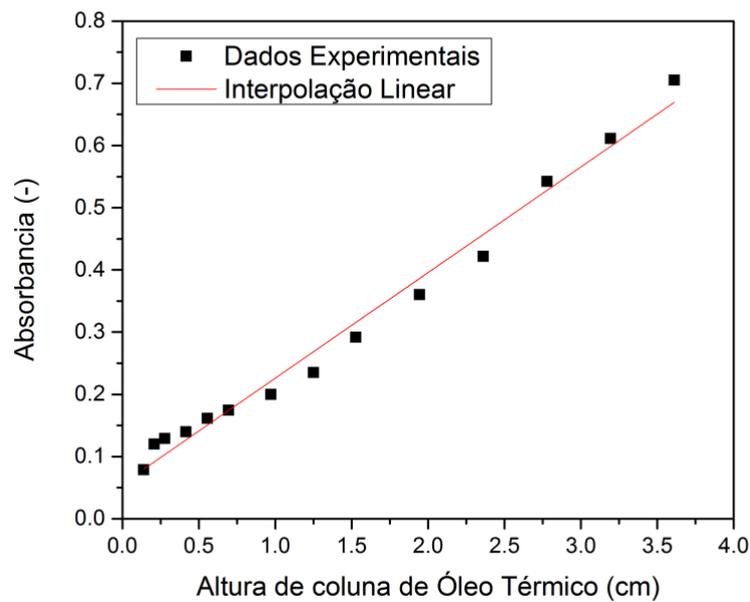
Fonte: Autor.

Figura 50 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo térmico com feixe de luz em 1490 nm.



Fonte: Autor.

Figura 51 – Curva experimental de absorvância em função da altura de coluna de óleo térmico com feixe de luz em 850 nm.



Fonte: Autor.

A medida que os experimentos foram sendo executados, foi identificado que em alguns casos, devido aos fenômenos de dissipação energética da luz provenientes dos fatores de desalinhamento, refração, reflexão e absorção, uma queda muito brusca de energia ocorria. Quando uma mínima camada de fluido aparece entre o emissor e o receptor, uma interface ar-líquido é gerada e a potência recebida pelo fotodiodo sofre dissipação por refração luminosa, sendo que após a inserção dessa interface, a medida que o mesmo fluido continua sendo inserido no recipiente aumentando a altura de coluna de líquido, o comportamento do sistema segue a lei de *Beer-Lambert*, uma vez que nenhuma nova interface foi inserida. Isso pode ser visto principalmente no início da curva mostrada na Figura 46, onde o comportamento inicial não respeita a condição de linearidade imposta pela lei de *Beer-Lambert*. Isso ocorre pois nos pontos iniciais, a potência que chegou ao fotodiodo sofreu uma queda brusca devido aos fatores externos, não permitindo uma análise simplesmente de absorção dentro desse intervalo. Porém, após um determinado tamanho da coluna de água, a curva se apresenta de uma forma linear como esperado. Outro impacto dessas quedas bruscas de potência pode ser visto nos demais gráficos, onde a reta não se inicia exatamente no ponto zero do eixo cartesiano, o que seria esperado em um caso ideal.

Analisando os resultados experimentais demonstrados na Figura 46 e Figura 47, é possível perceber que a absorção da água para o comprimento de onda de 1490 nm foi muito maior do que para 850 nm. Isso era o esperado, uma vez que o comprimento de onda de 1490 nm está na região de maior absorção luminosa pela água, como mostrado na Figura 27. Analisando a Figura 48, observamos que a absorção do óleo *crude* no comprimento de onda de 850 nm é muito alto, uma vez que com aproximadamente 0,7 cm (7 mm) de altura de coluna de óleo *crude* toda a potência emitida foi absorvida. Já no caso da Figura 49, apesar da absorbância do óleo *crude* para 1490 nm ser muito menor do que para 850 nm, comparando os resultados aos testes com água, o óleo *crude* também apresentou uma alta absorção para 1490 nm. Como não foi possível identificar o tipo exato de óleo *crude* usado nos testes, pode ser que o comprimento de onda de 850 nm não seja o mais adequado para este caso. Para ter uma análise mais profunda sobre qual a melhor frequência a ser utilizada, seria necessário realizar outros testes com *lasers* capazes de emitir em diferentes comprimentos de onda além dos utilizados.

Utilizando os dados experimentais que apresentaram comportamento próximo ao esperado segundo a lei de *Beer-Lambert*, um método de interpolação linear foi aplicado nos pontos em que os dados experimentais se apresentaram de forma próxima ao linear. Ao aplicar a interpolação, o *software* calcula a inclinação da reta com a incerteza associada, o que corresponde aos valores das constantes K_{liq} para cada uma das condições de teste adotadas. O Quadro 3 apresenta todos os valores das constantes calculadas a partir da interpolação linear realizada sobre os dados experimentais.

Quadro 3 – Constantes K_{liq} calculadas a partir da interpolação linear dos dados experimentais.

Constante K_{liq}	Curva de Referência	Inclinação da Reta	Incerteza Associada
$K_{\text{água},1490}$	Figura 46	0,73480	$\pm 0,01056$
$K_{\text{água},850}$	Figura 47	0,03351	$\pm 0,00121$
$K_{\text{crude},850}$	Figura 48	10,47334	$\pm 0,09785$
$K_{\text{crude},1490}$	Figura 49	1,35427	$\pm 0,00889$
$K_{\text{término},1490}$	Figura 50	0,35144	$\pm 0,00632$
$K_{\text{término},850}$	Figura 51	0,16988	$\pm 0,00589$

Fonte: Autor.

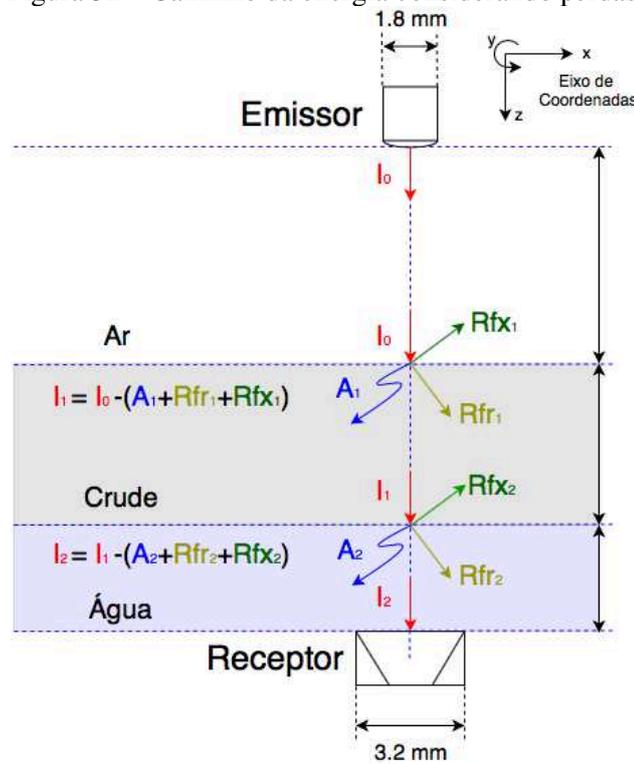
Com essas constantes, se a estrutura de teste tivesse condições de garantir exclusivamente fenômenos de absorção luminosa, sem problemas com alinhamento, refração e reflexão, sabendo as potências emitidas e recebidas nos dois comprimentos de onda utilizado, seria possível prever qual a altura de coluna de cada fluido utilizado, e consequentemente, através da relação presente na Equação (17), determinar a fração de fase de cada uma das três substâncias (água, óleo e ar).

4.3.3 Caminho de energia e perdas de potência luminosa

Para compreender melhor o que acontece com a energia luminosa durante os testes utilizando a estrutura atual de alinhamento, a Figura 52 foi feita para ilustrar o caminho da energia à medida que a luz passa pelos fluídos e quais as formas com que esta é dissipada até chegar ao receptor. Assumindo que entre o emissor e receptor existem uma camada de água, óleo *crude* e ar no sentido do receptor para o emissor, pode ser considerado que as perdas de energia ocorrem nas duas interfaces existentes. Como o ar não absorve a luz para os comprimentos de onda utilizados, a intensidade luminosa inicial I_0 se mantém constante até chegar na interface ar-*crude*. Ao encontrar esta primeira interface, parte da energia é dissipada em forma de reflexão, Rf_{x_1} . Outra parcela da energia é refratada, sendo que uma parte desta

não chega mais até o receptor no final do percurso, Rfr_1 . Ao atravessar a camada de óleo *crude*, mais um pouco da energia se dissipa devido a absorção, A_1 , sendo que a intensidade luminosa que chega até a interface *crude*-água, I_1 , é igual a intensidade I_0 subtraída das três quantidades dissipadas. Da mesma forma, quando a luz chega até a segunda interface, sofre com o fenômeno de reflexão, Rfx_2 , refração, Rfr_2 , e absorção A_2 . Como consequência, a intensidade identificada pelo fotodiodo corresponde a intensidade I_2 , calculada de forma análoga a I_1 .

Figura 52 – Caminho da energia considerando perdas.



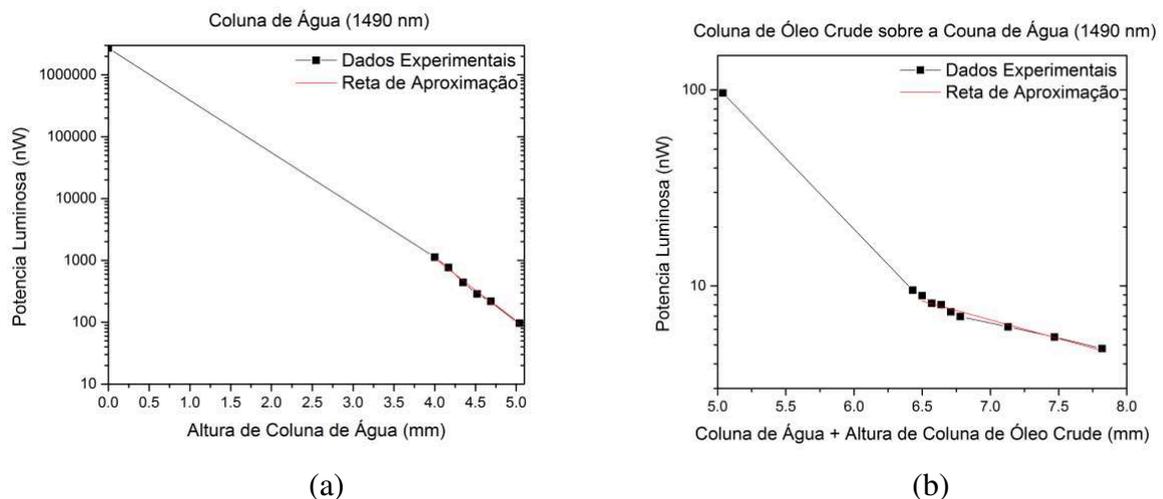
Fonte: Autor.

A partir do entendimento da Figura 52, foram realizados dois testes envolvendo água, óleo *crude* e ar, sendo um teste utilizando o *laser* com comprimento de onda de 1490 nm e outro com o *laser* de 850 nm, como mostra na Figura 53 e Figura 54.

Em ambos os testes, quatro momentos principais podem ser classificadas de acordo com o comportamento da perda de potência luminosa a medida que a altura de líquido aumenta. Primeiro, uma camada inicial de água é introduzida ao sistema de modo a obter uma coluna de líquido uniforme ao longo de toda a área interna do recipiente de acrílico. Nesta

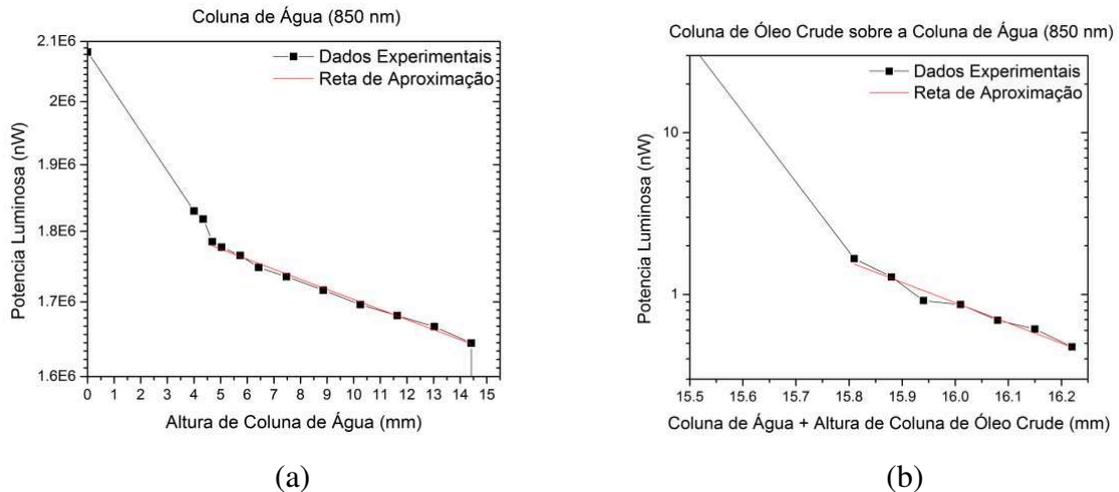
etapa, é possível notar uma queda brusca de potência luminosa devido aos vários fatores de dissipação. O segundo momento é quando mais água é colocada gradualmente no sistema. Neste momento, um decaimento de potência que segue um perfil de acordo com o esperado pela lei de *Beer-Lambert* é observado. Em seguida, o terceiro momento ocorre quando a introdução de uma camada inicial de óleo *crude* é introduzida ao sistema, que novamente, apresenta uma queda brusca de potência a partir do valor obtido com a coluna de água. Aqui, uma nova interface entre meios de propagação da luz é criada, o que faz com que os fenômenos de reflexão e refração ocorram mais uma vez. Por fim, o quarto momento ocorre de forma semelhante ao segundo, onde mais óleo *crude* vai sendo gradativamente introduzido ao sistema. Novamente, é possível notar um comportamento próximo ao descrito pela lei de *Beer-Lambert*. A Figura 53 – (a) e Figura 53 – (b) mostram os resultados obtidos para o teste com comprimento de onda de 1490 nm, sendo que a Figura 53 – (a) engloba a queda de potência luminosa nos momentos em que apenas água é colocada no sistema, enquanto a Figura 53 – (b) engloba a queda de potência luminosa nos momentos em que óleo *crude* vai sendo colocado sobre a camada já existente de água. A Figura 54 – (a) e Figura 54 – (b) são organizadas da mesma forma, porém, com os dados do teste utilizando o comprimento de onda de 850 nm.

Figura 53 – Queda de potência luminosa para água, óleo *crude* e ar em 1490 nm.



Fonte: Autor.

Figura 54 – Queda de potência luminosa para água, óleo *crude* e ar em 850 nm.



Fonte: Autor.

Devido as forças capilares que não deixam o fluido se espalhar uniformemente em todo o fundo da caixa de acrílico quando o volume é muito pequeno, foi colocado uma quantidade mínima de água de modo a fazer com que toda a área da base do recipiente ficasse totalmente preenchida pelo líquido, o que correspondeu a uma altura de aproximadamente 4 mm de água.

O gráfico mostrado na Figura 53 – (a) mostra como a potência luminosa captada pelo fotodiodo diminuiu de um valor próximo a 2,7 mW para aproximadamente 1,13 uW no momento que a primeira camada de 4 mm de água foi colocada na caixa de acrílico. Neste primeiro momento, a dissipação da energia que ocorre engloba os fenômenos de absorção, reflexão e refração, uma vez que uma interface entre dois meios de propagação é introduzida.

A partir desta primeira camada, foi sendo colocado gradualmente pequenas quantidades de água até chegar em uma altura de 5 mm de água. Como esse processo não gerou mais uma interface além da que já existia, apenas fez com que a altura de coluna de água aumentasse, os fenômenos de reflexão e refração se mantiveram praticamente os mesmos. Por isso, como pode ser visto, a queda de potência neste intervalo ocorreu de forma linear quando observamos os valores em um eixo vertical em escala logarítmica, estando de acordo com o esperado pela lei de *Beer-Lambert*.

Em seguida, como mostra o gráfico da Figura 53 – (b), uma camada de aproximadamente 1,5 mm de óleo *crude* é colocada sobre a camada já existente de água. Neste momento, novamente uma queda brusca na potência detectada pelo fotodiodo pode ser

observada, caindo de um valor de pouco menos de 100 nW para 10 nW. Novamente, este é o momento em que uma nova interface de meios de propagação da luz aparece, e isso faz que a queda de potência não seja causada apenas por efeitos de absorção, mas sim de absorção, reflexão e refração simultaneamente. Novamente, a medida que mais óleo *crude* vai sendo colocado, a queda de potência passa a cair linearmente (lembrando que o eixo y está em escala logarítmica).

O segundo teste foi realizado da mesma forma que o primeiro, porém, utilizando o *laser* com comprimento de onda de 850 nm. Como pode ser observado, a queda de potência inicial ao colocar a camada de 4 mm de água é muito mais intensa para 1490 nm (de 2,7 mW para 1,13 nW) do que para 850 nm (de 2,08 mW para 1,83 mW). A queda de potência também é muito maior com a introdução da primeira camada de óleo *crude* para o comprimento de onda de 850 nm (de 1,64 mW para 1,66 nW) do que para 1490 nm (de 96,54 nW para 9,5 nW).

Além da maior absorbância nessas combinações de líquido e comprimento de onda, um fator que pode influenciar de forma significativa é a influência do comprimento de onda utilizado no índice de refração de cada líquido. Quanto menor o comprimento de onda (maior frequência), maior é a quantidade de energia existente em um feixe de luz. Isso faz com que ao se propagar em um meio, dependendo do comprimento de onda, o feixe mais ou menos energético distorça de forma proporcional a distribuição eletrônica das moléculas do meio, alterando assim o índice de refração do mesmo. Um clássico exemplo que ilustra a mudança de índice de refração de acordo com a frequência é quando um feixe de luz branca é incidido em um prisma que separa a luz nas suas componentes de frequência (cores), onde os raios de luz de cada cor podem ser vistos com diferentes ângulos de refração. Portanto, apesar da impossibilidade de quantificar esse fenômeno, essa variação da intensidade em que a potência luminosa cai quando as interfaces são introduzidas de acordo com o comprimento de onda utilizado pode favorecer para refrações ainda mais intensas, fazendo então com que o sistema perca bruscamente grandes quantidades de energia, como visto nos resultados apresentados.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidos sistemas de medição de massa específica, velocidade de escoamento e fração de fase. Devido as limitações de recursos de laboratório, alguns sistemas foram testados em condições simplificadas de escoamento ou com uma quantidade reduzida de fases ao mesmo tempo. Mesmo assim, os resultados obtidos puderam mostrar que as tecnologias propostas têm o potencial de atenderem o propósito de aferição de vazões mássicas a partir do uso conjunto dos três sistemas propostos.

Para o sistema de medição de massa específica foram realizados testes com água e ar na bancada experimental multifásica, sendo que as estimativas de massa específica apresentaram resultados com erros e incertezas aceitáveis. Como sugestão para trabalhos futuros, assim como em relação aos testes para os outros sistemas de medição, quando a utilização do óleo *crude* na bancada multifásica for viável, a partir das medidas de segurança e procedimentos de limpeza que devem ser providenciados, mais testes para determinar a massa específica do óleo *crude* no escoamento também podem ser realizados. Além disso, seria interessante se os medidores de temperatura e pressão utilizados fossem substituídos por sensores de temperatura RTD e sensores de pressão menores para que isso pudesse ser utilizado não somente na bancada experimental do laboratório.

Para o sistema de medição de velocidade de escoamento foi desenvolvida uma placa eletrônica que permite a aquisição e processamento dos sinais lidos por sensores de pressão diferencial conectados a um tubo de Venturi modificado conectado na bancada experimental. Foram realizados testes monofásicos com escoamento de água, assim como testes com escoamentos de água e ar, variando a vazão mássica de cada fase em diferentes configurações de teste. A partir disso, foi possível levantar os perfis de queda de pressão para cada caso. Como o termo relacionado aos efeitos viscosos existente no sistema linear de equações proposto para identificação das velocidades de cada fase em um escoamento líquido-gás passando pelo Venturi ainda não foi modelado, considerando que este é um tema complexo de pesquisa na área de dinâmica dos fluídos, não foi possível utilizar o algoritmo proposto para obter valores de velocidade sem um erro considerável. Por este motivo, como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante que quando este problema for solucionado os dados de

pressão medidos pelo sistema fosse aplicado ao algoritmo para que a estimativa das velocidades fosse realizada.

Para o sistema de medição de fração de fase uma placa de circuito eletrônico também foi desenvolvida para que se fosse possível utilizar um *laser* e um fotodiodo que compõem o sistema óptico para detecção de absorção no infravermelho. Com este sistema foi possível realizar testes de coluna estática de óleo *crude*, água e ar, além de também ter sido utilizado um óleo térmico para efeitos de comparação. Esses testes tiveram o objetivo de analisar como a absorbância em casa caso varia a medida que mais ou menos substância é colocada no caminho percorrido pela luz entre o emissor e o receptor. Como essa variação se comporta de forma linear segundo a lei de *Beer-Lambert*, foi possível encontrar a inclinação das retas que compõem constantes presentes no sistema linear construído para estimar as frações de fase de cada substância em testes multifásicos. Ao longo do desenvolvimento, foi constatado que a estrutura de alinhamento utilizada durante os testes apresentou diversas limitações que prejudicaram a obtenção de resultados melhores em relação ao comportamento do sistema em relação a absorção luminosa. Devido ao colimador utilizado, imprecisão de alinhamento e outros fatores, fenômenos de refração e reflexão predominaram em alguns casos de teste. Sendo assim, como recomendação para trabalhos futuros, primeiramente, seria muito interessante que equipamentos precisos e específicos para alinhamento óptico fossem adquiridos, uma vez que mínimos desalinhamentos impactam consideravelmente na quantidade de energia que chega até o receptor luminoso. Além disso, um colimador com uma distância focal muito maior do que a distância utilizada entre o emissor e receptor durante os testes faria com que os ângulos de incidência dos raios durante este percurso fossem praticamente 90° em relação a área das interfaces de meios de propagação. Isso faria com que os efeitos de refração fossem fortemente minimizados. Outra sugestão interessante, uma vez que as anteriores forem providenciadas, seria a utilização de mais sensores com diferentes comprimentos de onda, com o objetivo de verificar qual a melhor configuração de teste para os fluidos utilizados. Também seria importante, futuramente, criar uma estrutura capaz de submeter o sistema a testes em escoamentos dinâmicos, para verificar o comportamento do sistema em diferentes regimes de escoamento. Isso provavelmente seria possível através da utilização de vários *lasers* e fotodiodos acoplados em conjunto de modo a permitir a realização de uma tomografia óptica através da absorção infravermelho.

Por fim, quando todos os sistemas forem testados individualmente com os aperfeiçoamentos sugeridos, seria interessante que os três sistemas de medição fossem

submetidos a um teste de forma simultânea e com um mesmo escoamento multifásico, de modo que o conjunto de medições permita a aferição das vazões mássicas em um escoamento contendo água, óleo *crude* e ar. Isso comprovaria que todo o trabalho desenvolvido tem um grande potencial para a indústria do petróleo, que busca soluções de medição multifásica que possibilitem o controle de produção sem que haja a necessidade de paralisar a produção.

REFERÊNCIAS

- ADOPTIX. **Single Fiber Optical Colimator**. California, 2018. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1GgVGF4IK5YVT19gFmgCpdHs6bq68RoCh/view>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- AL-KHAMIS, M. N.; et al. **Evaluation of PhaseWatcher multiphase flow meter (MPFM) performance in sour environments**. Offshore Technology Conference, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5167-1: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements**. Switzerland, 2003.
- ANGELINI, S.; et al. **Flute: Fluorescent technique for two-phase-flow liquid-fraction measurements**. Chemical Engineering Communications, Taylor & Francis, v. 118, n. 1, p. 237–249, 1992.
- ARUNKUMAR, S.; et al. **Two phase flow regime identification using infrared sensor and volume of fluids method**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, v. 51, p. 49–54, 2016.
- ATTWOOD, D.; KTISTIS, G. **A light scattering study on oil-in-water microemulsions**. International journal of pharmaceutics, Elsevier, v. 52, n. 2, p. 165–171, 1989.
- BERGE, F. E. M.; et al. **Maximizing platform space utilization through the latest in multiphase metering a North Sea pilot**. Offshore Technology Conference, 2011.
- BFMC. **DF-5420 Concentration (Density) Meter**. United Kingdom, 2018. Disponível em: <https://pdf.directindustry.com/pdf/dandong-dongfang-measurement-control-technology/dfmc-in-line-density-concentration-meter-df-5420/124477-542409.html>. Acesso em: 11 abr. 2019.
- BJØRNDAL, E. **Acoustic measurement of liquid density with applications for mass measurement of oil**. The University of Bergen, 2007.
- BORGES, G. R. et al. **Use of near infrared for evaluation of droplet size distribution and water content in water-in-crude oil emulsions in pressurized pipeline**. Fuel, Elsevier, v. 147, p. 43–52, 2015.
- BP. **BP statistical review of world energy**. British Petroleum Company. United Kingdom, 2018.
- BRANDT, M.; TOL, M.; RUDEN, L. **Improving measurement quality and meeting changing operator challenges with the multiphase meter**. Proc. 9th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.
- BRASIL, M. **Balanco energético nacional**. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, DF, 2017.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CAREY, S. J. et al. **Chemical species tomography by near infra-red absorption**. Chemical Engineering Journal, Elsevier, v. 77, n. 1-2, p. 111–118, 2000.

CHIEN, J. et al. **Análise de escoamento água-ar em tubo de Venturi**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

CLEWS, R. **Project finance for the international petroleum industry**. 1. ed. Oxford: Academic Press, 2016.

COUNCIL, N. P. **Hard Truths: Facing the Hard Truths about Energy, a Comprehensive View to 2030 of Global Oil and Natural Gas**. Washington, DC: National Petroleum Council, 2007.

DAHL, E.; MICHELSEN, C. et al. **Handbook of multiphase flow metering**. Revision 2. Norway: *NFOGM & Tekna*, 2005.

DEVOLD, H. **Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production**. 1 ed. United States: Lulu.com, 2013.

DINARDO, G.; FABBIANO, L.; VACCA, G. **How to directly measure the mean flow velocity in square cross-section pipes**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, v. 49, p. 1–7, 2016.

EMERSON MICRO MOTION. **Micro Motion ELITE Coriolis Flow and Density Meters**. United States, 2019. Disponível em: <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-elite-series-coriolis-flow-density-meters-micro-motion-en-66748.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2019.

EMERSON ROSEMOUNT. **Rosemount 2051 Pressure Transmitter**. United States, 2019. Disponível em: <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-rosemount-2051-pressure-products-en-73206.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2019.

ENEH, O. C. **A review on petroleum: Source, uses, processing, products, and the environment**. Journal of Applied Sciences, v. 11, n. 12, p. 2084–91, 2011.

FALCONE, G.; HEWITT, G.; ALIMONTI, C. **Multiphase flow metering: principles and applications**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2009. v. 54.

FOSS, B.; KNUDSEN, B. R.; GRIMSTAD, B. **Petroleum production optimization – a static or dynamic problem?** Computers & Chemical Engineering, Elsevier, v. 114, p. 245–253, 2018.

FRØYSTEIN, T.; KVANDAL, H.; AAKRE, H. **Dual energy gamma tomography system for high pressure multiphase flow**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, v. 16, n. 2-3, p. 99–112, 2005.

FURTADO, A. et al. **Measurement of density using oscillation - type density meters calibration, traceability and uncertainties**. Proceedings of the 14^{ème} Congrès International de

Métrie, 2009.

GAJEWSKI, J. B. **Accuracy of cross correlation velocity measurements in two-phase gas–solid flows**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, v. 30, p. 133–137, 2013.

GEROTHANASSIS, I. P. et al. **Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy: basic principles and phenomena, and their applications to chemistry, biology and medicine**. Chemistry Education Research and Practice, Royal Society of Chemistry, v. 3, n. 2, p. 229–252, 2002.

GYSLING, D. L. **Fluid density measurement in pipes using acoustic pressures**. Washington, DC: Google Patents, 2005. US Patent 6,971,259.

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

HOCHE, S.; HUSSEIN, M.; BECKER, T. **Ultrasound-based density determination via buffer rod techniques: a review**. Journal of Sensors and Sensor Systems, Copernicus GmbH, v. 2, n. 2, p. 103–125, 2013.

HOFFMANN, R.; JOHNSON, G. W. **Measuring phase distribution in high pressure three-phase flow using gamma densitometry**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, v. 22, n. 5, p. 351–359, 2011.

HUANG, Z.; WANG, B.; LI, H. **Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IEEE, v. 52, n. 1, p. 7–12, 2003.

JAFARINEJAD, S. **Petroleum waste treatment and pollution control**. 1. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2016.

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

KARNANDA, W. et al. **Effect of temperature, pressure, salinity, and surfactant concentration on lift for surfactant flooding optimization**. Arabian Journal of Geosciences, Springer, v. 6, n. 9, p. 3535–3544, 2013.

KAYUKAWA, Y.; HASUMOTO, M.; WATANABE, K. **Rapid density-measurement system with vibrating-tube densimeter**. Review of scientific instruments, AIP, v. 74, n. 9, p. 4134–4139, 2003.

KAZYS, R. et al. **Ultrasonic technique for density measurement of liquids in extreme conditions**. Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, n. 8, p. 19393–19415, 2015.

KIEFER, J. et al. **Infrared spectroscopy of Bilberry extract water-in-oil emulsions: Sensing the water-oil interface**. Biosensors, MDPI, v. 6, n. 1, p. 13–24, 2016.

LAKSHMANAN, S. et al. **Measurement of an oil–water flow using magnetic resonance imaging**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, v. 53, p. 161–171, 2017.

LASERCOM-LDI1490. **LDI-1490-DFB-2.5G-20/80**. Belarus, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1GVbtr24sAl7IpxBioi3iFEnfq5puXtte/view>. Acesso em: 20 ago. 2019.

LASERCOM-LDI850. **LDI-850-FP-20/70**. Belarus, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1GgVGF4IK5YVT19gFmgCpdHs6bq68RoCh/view>. Acesso em: 20 ago. 2019.

LASERCOM-PDI80. **PDI-80-2G-K**. Belarus, 2019. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/0B_RZ2ODFZndJam15MTM4clY0Vlk/view. Acesso em: 20 ago. 2019.

LAWAL, D. U. **Void fraction measurement using electrical impedance techniques**. International Journal of Advances in Engineering & Technology, IAET Publishing Company, v. 7, n. 5, p. 1539, 2014.

LIANG, F. et al. **Study on Venturi nozzle for gas-liquid two-phase flow metering**. Journal of Harbin Institute of Technology, v. 1, p. 022, 2012.

LIEJIN, G. et al. **Online recognition of the multiphase flow regime and study of slug flow in pipeline**. IOP PUBLISHING. Journal of Physics: Conference Series, 2009. v. 147, n. 1, p. 012047.

LINDSAY, I. et al. **Advanced interpretation of Venturi meter measurements in multiphase flow**. Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, 2001.

LORENTZEN, R. J. et al. **Soft multiphase flow metering for accurate production allocation (Russian)**. In: Society of Petroleum Engineers. *SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition*. Moscow, 2010.

MCALISTER, D. R. **Gamma ray attenuation properties of common shielding materials**. PG Research Foundation, University Lane Lisle, IL, v. 60532, 2012.

NAJMEDINI, M.; HABIBI, R. **Multiphase flow meter: A review**. Oil, Gas and Petrochemicals Letters, v. 2, n. 1, 2018.

OBIE, O. **Density measurement of multiphase pipe flows**. 2018. 22a. Tese (Doutorado) — University of Huddersfield, Huddersfield, 2018.

OLIVEIRA, A. D.; RUBIANO, D. R. **Innovation in Brazilian Oil Industry**. 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal de Rio de Janeiro, Economics Institute, 2012.

OLIVEIRA, J. L. G. et al. **Medição de vazão de escoamentos bifásicos utilizando tubo de Venturi ou placa de orifício associados a um sensor de fração de vazio com campo elétrico girante**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

OLIVEIRA, J. L. G. et al. **Mass flow rate measurements in gas–liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor.** *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 33, n. 2, p. 253–260, 2009.

ORJI, A. B.; ODAGME, B. **Application of metering process in oil and gas production in Niger delta fields.** *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, v. 3, n. 5, p. 1-6, 2015.

PAN, Y. et al. **Gas flow rate measurement in low-quality multiphase flows using Venturi and gamma ray.** *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 100, p. 319–327, 2019.

PEIXIANG, H. et al. **A new method of measuring two-phase mass flow rates in a Venturi.** *Multiphase Science and Technology*, Begel House Inc., v. 21, n. 1-2, 2009.

QIN, R.; DUAN, C. **The principle and applications of Bernoulli equation.** IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017. v. 916, n. 1, p. 012038.

RAMOS, R. T. et al. **A local optical probe using fluorescence and reflectance for measurement of volume fractions in multi-phase flows.** *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 12, n. 7, p. 871, 2001.

SCHEAUA, F. D. **Theoretical approaches regarding the Venturi effect.** *Hidraulica*, v. 4, n. 3, p. 69-72, 2016.

SAAD, H. C. et al. **Multiphase flow measurement: Advantages and brazilian regulation.** *Offshore Technology Conference. OTC Brasil*, 2017.

SALGADO, C. M. et al. **Flow regime identification and volume fraction prediction in multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks.** *Progress in Nuclear Energy*, Elsevier, v. 52, n. 6, p. 555–562, 2010.

SANTOS, V. d. C. M. d. et al. **A medição fiscal dos volumes de petróleo: medidores ultrassônicos.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

SARKODIE, K.; FERGUSSON-REES, A.; DIAZ, P. **A review of the application of non-intrusive infrared sensing for gas–liquid flow characterization.** *The Journal of Computational Multiphase Flows*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 10, n. 1, p. 43–56, 2018.

SCHMELZER, J. W.; ZANOTTO, E. D.; FOKIN, V. M. **Pressure dependence of viscosity.** *The Journal of chemical physics*, AIP, v. 122, n. 7, p. 074511, 2005.

SHARIFZADEH, M. et al. **Two-phase flow component fraction measurement using gamma-ray attenuation technique.** *Nuclear Science and Techniques*, Springer, v. 28, n. 6, p. 88, 2017.

SHI, X. et al. **Flow velocity measurement based on ultrasonic cross-correlation technique in oil-water two-phase flow.** *IEEE. Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese*, 2016. p. 4921–4925.

SILVA, L. C. et al. **A simple capacitance sensor for void fraction measurement in gas-liquid two-phase flow**. 2017 International Nuclear Atlantic Conference. Associação Brasileira de Engenharia Nuclear, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, M. D. et al. **Phase fraction distribution measurement of oil–water flow using a capacitance wire-mesh sensor**. Measurement Science and Technology, IOP Publishing, v. 22, n. 10, p. 104020, 2011.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of instrumental analysis**. 7. ed. Boston: Cengage learning, 2017.

SOO, S. L. **Particulates and Continuum-Multiphase Fluid Dynamics: Multiphase Fluid Dynamics**. 1. ed. New York: CRC Press, 1989.

STEFFENS, J. et al. **Application of fluorescence to the study of crude petroleum**. Journal of fluorescence, Springer, v. 21, n. 3, p. 859–864, 2011.

STEPHAN, A. D. **Survey of instrumentation and measurement**. 1. ed. United States: John Wiley & Sons, 2001.

SU, Q.; TAN, C.; DONG, F. **Mechanism modeling for phase fraction measurement with ultrasound attenuation in oil–water two-phase flow**. Measurement Science and Technology, IOP Publishing, v. 28, n. 3, p. 035304, 2017.

SU, Q.; TAN, C.; DONG, F. **Measurement of oil–water two-phase flow phase fraction with ultrasound attenuation**. IEEE Sensors Journal, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1150–1159, 2018.

SUZUKI, M. et al. **Study of the wall effect on particle packing structure using x-ray micro computed tomography**. Advanced Powder Technology, Elsevier, v. 19, n. 2, p. 183–195, 2008.

TAN, C.; DONG, F. **Cross correlation velocity of oil-water two-phase flow by a dual-plane electrical resistance tomography system**. IEEE. Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE, 2010. p. 766–770.

TAN, C.; DONG, F. **Applications of tomography in mineral transportation**. Industrial Tomography, Elsevier, 2015. p. 431–450.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS131E0x 4-, 6-, and 8-Channel, 24-Bit, Simultaneously-Sampling, Delta-Sigma ADC**. United States, 2017. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131e08.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2019.

THORN, R.; JOHANSEN, G. A.; HAMMER, E. A. **Three-phase flow measurement in the offshore oil industry: Is there a place for process tomography?** CITESEER. First World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, April, 1999. p. 14–17.

THORN, R.; JOHANSEN, G. A.; HJERTAKER, B. **Three-phase flow measurement in the**

petroleum industry. Measurement Science and Technology, IOP Publishing, v. 24, n. 1, p. 012003, 2012.

VENDRUSCOLO, T. P. et al. **Development of NIR optical tomography system for the investigation of two-phase flows.** IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014.

VILLELA, M. J. R. **Análise do comportamento da temperatura em sistemas de produção de petróleo: comparação entre completação seca e molhada.** 2004. Dissertação (Mestrado). *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 2004.

ZENG, Q. et al. **A novel oil–water separator design and its performance prediction.** Journal of Petroleum Science and Engineering, Elsevier, v. 145, p. 83–94, 2016.

ZHAI, L. et al. **Cross-correlation velocity measurement of horizontal oil–water two-phase flow by using parallel–wire capacitance probe.** Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier, v. 53, p. 277–289, 2014.

ZHANG, J. **Analysis on the effect of Venturi tube structural parameters on fluid flow.** AIP Advances, AIP Publishing, v. 7, n. 6, p. 065315, 2017.

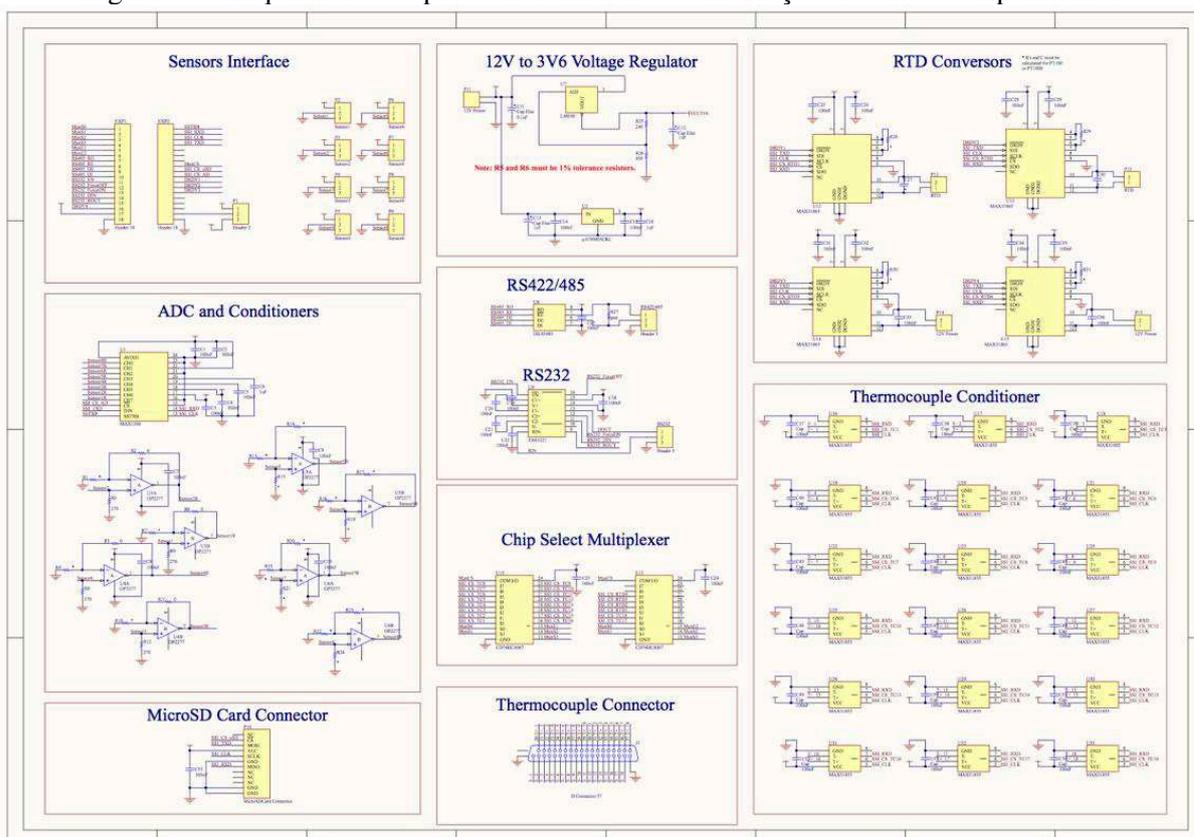
ZHAO, Y. et al. **High-accuracy low-water-content measurement of crude oil based on a near-infrared spectral absorption method.** Optical Engineering, International Society for Optics and Photonics, v. 43, n. 10, p. 2216–2218, 2004.

ZUBER, N.; FINDLAY J. **Average volumetric concentration in two-phase flow systems.** Journal of Heat Transfer, v. 87, 1965.

APÊNDICE A – Esquemático da placa eletrônica de automatização da bancada experimental

A imagem a seguir representa o esquemático eletrônico da placa de automatização da bancada experimental que foi desenvolvido ao longo deste trabalho.

Figura 55 – Esquemático da placa eletrônica de automatização da bancada experimental.

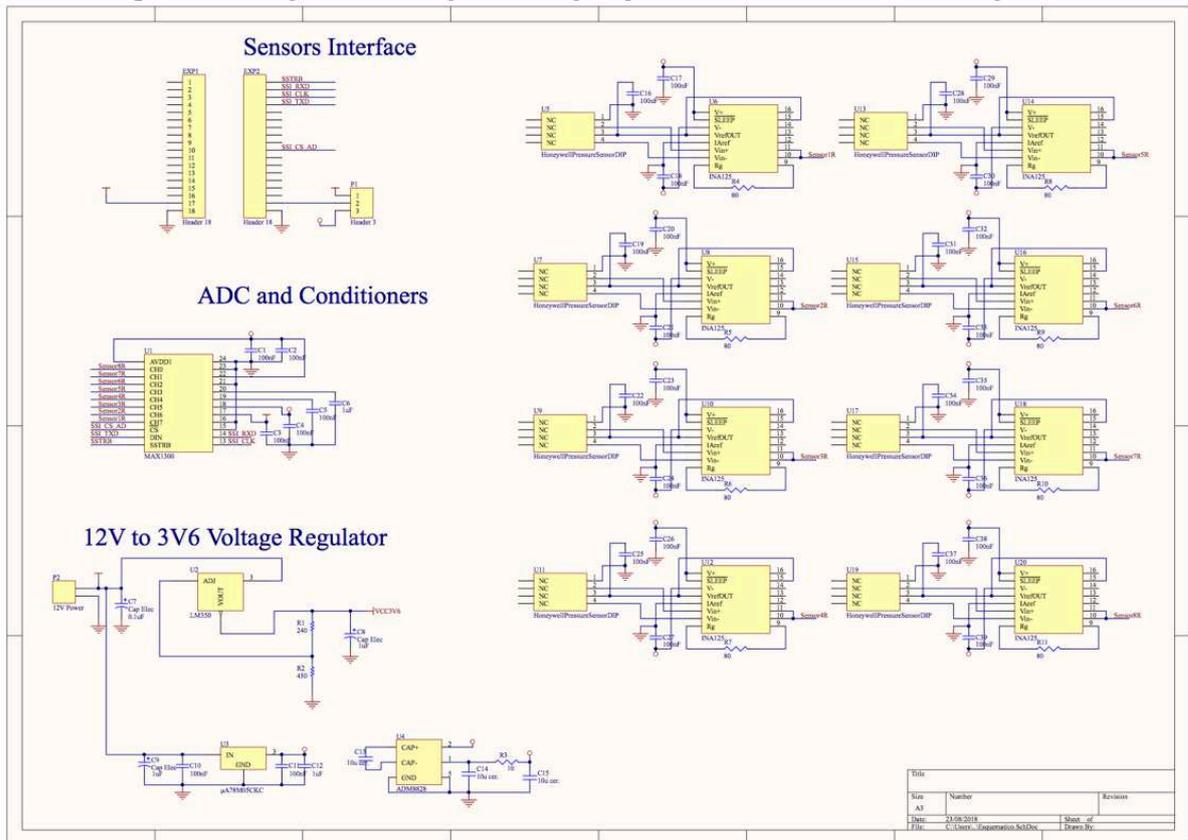


Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Esquemático da placa eletrônica de aquisição de sensores diferenciais de pressão

A imagem a seguir representa o esquemático eletrônico da placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão que foi desenvolvido ao longo deste trabalho.

Figura 56 – Esquemático da placa de aquisição de sensores diferenciais de pressão.

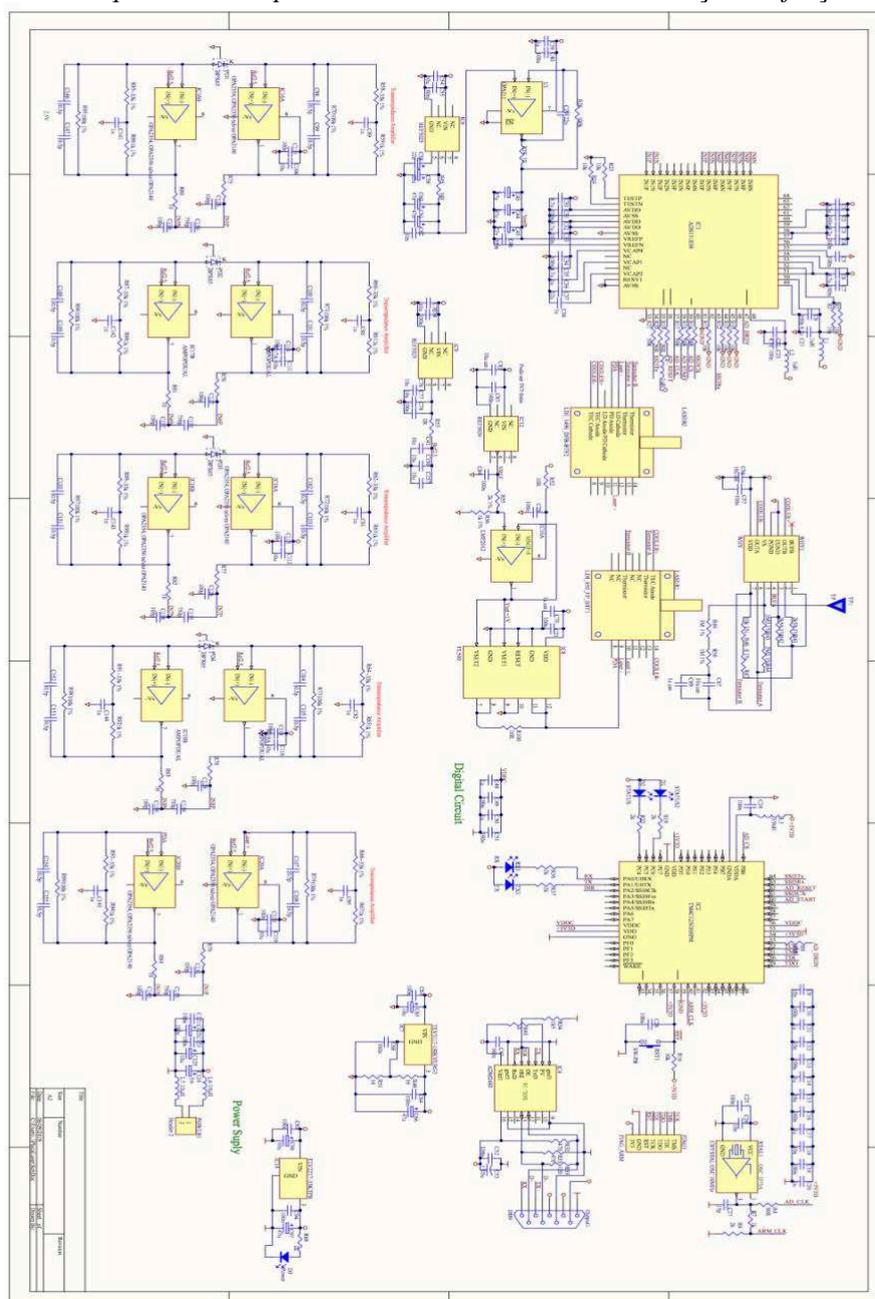


Fonte: Autor.

APÊNDICE C – Esquemático da placa eletrônica do sistema de medição de fração de fase

A imagem a seguir representa o esquemático eletrônico da placa do sistema de medição de fração de fase que foi desenvolvido ao longo deste trabalho.

Figura 57 – Esquemático da placa eletrônica do sistema de medição de fração de fase.



Fonte: Autor.