



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

EZEQUIEL MOLINA SCHNORR

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO E FRAÇÃO DE VAZIO  
EM DUTOS UTILIZANDO *LASERS***

Joinville

2022

Ezequiel Molina Schnorr

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO E FRAÇÃO DE VAZIO EM DUTOS  
UTILIZANDO *LASERS***

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Joinville

2022

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

Schnorr, Ezequiel Molina  
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO E FRAÇÃO DE VAZIO EM  
DUTOS UTILIZANDO LASERS / Ezequiel Molina Schnorr ;  
orientador, Anderson Wedderhoff Spengler, 2022.  
118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2. Medidores  
Multifásicos. 3. Técnica de Absorção Luminosa. 4.  
Infravermelho Próximo (NIR). 5. Instrumentação eletrônica. I.  
Wedderhoff Spengler, Anderson . II. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Sistemas Eletrônicos. III. Título.

Ezequiel Molina Schnorr

**Sistema de Medição de Escoamento e Fração de Vazio em Dutos Utilizando Lasers**

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

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Flávio José de Oliveira Moraes, Dr.  
Faculdade de Ciências e Engenharias/UNESP

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

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

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.  
Orientador

Joinville, 2022.

Este trabalho é dedicado à minha família querida, que me apoiou em cada etapa do caminho e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para conclusão desta etapa.

## **AGRADECIMENTOS**

Antigamente, eu pensava que esta conquista seria somente minha, fruto do meu esforço e dedicação, porém ao percorrer o caminho pude constatar o meu erro, esta conquista foi fruto de dedicação e esforço de muitas pessoas, por isso seria injusto não citar. Começando pela família, onde laços que nos unem se fortificam nas adversidades e fornecem a força necessária para enfrentar, de cabeça erguida, qualquer problema. Tiago, Samuel, Tainá, Bruna, Mãe e Pai, o meu sincero obrigado e parabéns, pois essa conquista também é de vocês. Camila e Samuel, muito obrigado por me ajudarem nas correções e dicas para realizar a escrita. Tiago, a ajuda na melhor formatação da apresentação fez, com toda certeza, engrandecer o trabalho.

Um agradecimento especial a Tainá e Rodrigo, que deram todo o suporte necessário na mudança de minha cidade natal para Joinville, para que iniciasse meu caminho pelo mestrado. Eu e a Bruna ficamos na casa deles durante os meses iniciais, inclusive nos meses mais fortes de pandemia, onde tudo era desconhecido e novo, com o suporte de vocês conseguimos percorrer o caminho, muito obrigado, vocês são demais.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Anderson Spengler, sem ele este trabalho não existiria. Agradeço imensamente por ter aceito me orientar e indicar o tema para o trabalho, que foi prontamente aceito. Agradeço toda a ajuda e dedicação ao trabalho, dicas e conselhos necessários. Não poderia deixar de agradecer aos professores do laboratório T2F, Jorge e Kleber, por toda a contribuição para o desenvolvimento do projeto, suas contribuições impactaram grandemente no trabalho desenvolvido. Não poderia deixar de agradecer aos amigos e colega pesquisadores de laboratório T2F, a troca de conhecimentos foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

A busca constante por melhora na eficiência e nas formas de realizar as medições necessárias para detecção dos produtos derivados do petróleo extraídos de poços faz dos medidores multifásicos um produto de grande importância para a indústria. Estes podem ser utilizados diretamente nas tubulações, de forma não intrusiva e coletando dados em tempo real. Técnicas não invasivas vêm sendo empregadas para aquisições de dados, visando constantemente o aperfeiçoamento da precisão dos equipamentos e redução de custos de produção. É neste contexto que este trabalho se insere, com o objetivo de desenvolver um sistema de medição de escoamento e fração de vazão utilizando *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Com a técnica de absorção luminosa, é possível determinar a relação existente entre o feixe emitido pelo *laser* e o feixe recebido após passar pelo escoamento. Utilizando quatro comprimentos de onda, sendo dois deles que melhor se relacionam com água (1490nm e 1310nm) e dois que melhor se relacionam com óleo *crude* (980nm e 850nm). Testes com líquido estático foram realizados, para caracterizar o funcionamento do sistema e encontrar a constante de inclinação da reta, que é importante para a obtenção dos valores de fração de vazão. Foram emulados dois regimes de escoamento diferentes na bancada de testes de escoamento dinâmico, o estratificado ondulante e o pistonado, com um escoamento bifásico composto por água e ar e utilizando os *lasers* com comprimento de onda de 1310nm e 980nm. Os resultados encontrados para a ocupação de água nos testes com fluido dinâmico, foram comparados com os valores obtidos pelo Tomógrafo por Capacitância Elétrica (ECT). Os experimentos apresentados mostram que o comprimento de onda de 1310nm obteve sucesso em identificar o regime de escoamento que percorre a tubulação, além disso, possui resultados, para a ocupação do duto, similares aos encontrados pelo tomógrafo. Aperfeiçoamentos são necessários para que em trabalhos futuros o sistema consiga ser utilizado para medição de água, óleo e ar em testes multifásicos dinâmicos.

**Palavras-chave:** Medidores Multifásicos. Técnica de Absorção Luminosa. Infravermelho Próximo (NIR). Instrumentação eletrônica.

## ABSTRACT

The constantly seek for improvement of the efficiency and the ways of performance the necessary measurements to detect of petroleum derivated products extraced from the wells makes from multiphase meters an fundamental tool for the industry. Those can be used directly in the pipe in a non-intrusive way, collecting data in real time. Non-invasive techniques have been employed for data aquisition, aiming the precision improvement of equipments and reduction of pruction costs. In this context this work is inserted, with the objective of developing a flow measure and void fraction system using *laser (Light Amplification by Stimulated Emission os Radiation)*. With the luminous absorption technique it is possible to determine the relation between the beam emitted from the laser and the one received after it pass trought the flow. Using four length waves, being two of them those which is better reated with watter (1490nm e 1310nm) and the other two better related with crude oil (980nm e 850nm). Experiments with static liquid had been run to carактерize the behavior of the system and find the line slope constant, wich is important to obtain the value of the void fraction. Two different flow regimes were emulated in the dinamic flow bench, the wavy stratified and the slug, with a biphasic flow made of water and air using the 1310nm and 980 nm length wave lasers. The founded results for water ocupation in the dinamic flow experiments were compared with the value obtained for the Eletrical Capacitance Tomography (ECT). The experiments presented showed that the 1310nm wave length had success in indentify the flow regime wich run trough the pipe, beyond that, it has showed results for pipe ocupation similar to the one founded for the tomograph. Improvements are needed so the in future works the system could be able to measure water, oil and air in dinamic multiphasics experiments

**Key-words:** Multiphase Meters. Light Absorption Techniques. Near Infrared (NIR). Eletronic Instrumentation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de um escoamento borbulhante em duto vertical. ....	19
Figura 2: Representação de um escoamento pistonado em dutos verticais. ....	20
Figura 3: Representação de um escoamento de agitação em dutos verticais. ....	21
Figura 4: Representação de escoamento anular em dutos verticais. ....	21
Figura 5: Representação do escoamento pistonado em dutos horizontais. ....	22
Figura 6: Representação do escoamento anular em dutos horizontais. ....	23
Figura 7: Representação de um escoamento de bolhas dispersas em dutos horizontais. ....	23
Figura 8: a) Representação do escoamento estratificado em dutos horizontais, b) Representação do escoamento estratificado ondulante em dutos horizontais. ....	24
Figura 9: Exemplo de sistema de medição monofásico. ....	25
Figura 10: Exemplo de aplicação de medidores multifásicos. ....	26
Figura 11: Relação existente entre absorção e diferentes comprimentos de onda infravermelho. ....	28
Figura 12: Deslocamento do feixe do <i>laser</i> considerando os índices de refração. ....	30
Figura 13: Experimento realizado para detecção do regime de escoamento. ....	31
Figura 14: Funcionamento do interferômetro desenvolvido por Michelson. ....	32
Figura 15: Representação de um tomógrafo capacitivo. ....	35
Figura 16: Esquemático <i>laser</i> LDI-1310-DFB-10G. ....	37
Figura 17: Esquemático <i>Laser</i> LDI 980nm. ....	38
Figura 18: Placa utilizada para realizar o controle do laser; em destaque os principais componentes do sistema. ....	39
Figura 19: Fluxograma do funcionamento da placa de controle. ....	40
Figura 20: Mensagem enviada pelo conversor AD. ....	40
Figura 21: Fluxograma do firmware desenvolvido para o microcontrolador. ....	42
Figura 22: Diagrama da máquina de estados desenvolvida no LabView. ....	43
Figura 23: Tela frontal do programa no LabView desenvolvido. ....	45
Figura 24: Fluxograma demonstrando as etapas dos testes estáticos e testes dinâmicos. ....	46
Figura 25: Medidor de potência óptica King-60s. ....	47

Figura 26: Ilustração de como foi realizado os testes em bancada tanto para óleo como para água. Ao lado esquerdo da figura (a) está sem nenhum líquido no recipiente, no lado direito (b) com líquido no recipiente. ....	48
Figura 27: Cartão utilizado para detectar o feixe. ....	49
Figura 28: Resultados obtidos para os testes com água.....	53
Figura 29: Teste realizado com óleo.....	54
Figura 30: Resultado gráfico dos experimentos com líquido estático.....	57
Figura 31: Imagem 3D da bancada experimental utilizada. ....	63
Figura 32: Representação do sistema de medição ECT. ....	65
Figura 33: Seção de testes desenvolvida, em destaque o acoplamento do colimador e fotodiodo.....	66
Figura 34: Variação de angulação de 45°. ....	67
Figura 35: Representação da seção de testes com angulação em 0° e com <i>laser</i> 1310nm. ....	71
Figura 36: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação. 0°.....	72
Figura 37: Representação da seção de testes com angulação em 45° e com <i>laser</i> 1310nm. ....	73
Figura 38: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação 45°.....	74
Figura 39: Seção de testes com angulação em 90° e com <i>laser</i> 1310nm. ....	75
Figura 40: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação 90°.....	76
Figura 41: Seção de testes com angulação em 135° e com <i>laser</i> 1310nm. ....	77
Figura 42: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação 135°.....	77
Figura 43: Seção de testes com angulação em 180° e com <i>laser</i> 1310nm. ....	78
Figura 44: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação 180°.....	79
Figura 45: Resultado teste com <i>laser</i> 1310 com as barras de erros encontrados nas medições. ....	80
Figura 46: Comparação dos resultados entre <i>laser</i> e tomógrafo, para o escoamento pistonado. ....	81
Figura 47: Resultado absorbância escoamento estratificado ondulante em angulação 0°.....	82
Figura 48: Resultado absorbância escoamento estratificado ondulante em angulação 180°....	83
Figura 49: Comparação dos resultados entre <i>laser</i> e tomógrafo, para o escoamento estratificado. ....	84
Figura 50: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 0°.....	85

Figura 51: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 45°.....	86
Figura 52: Resultado absorbância, escoamento pistonado e ângulo 90°.....	87
Figura 53: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 135°.....	88
Figura 54: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 180°.....	89
Figura 55: Comparação entre tomógrafo e <i>laser</i> , escoamento pistonado laser 980.....	90
Figura 56: Gráfico de comparação entre os dados de <i>laser</i> e tomógrafo, demonstrando a diferença entre os dois resultados.....	92
Figura 57: Gráfico de comparação entre os dados de <i>laser</i> e tomógrafo, demonstrando a diferença entre os dois resultados.....	94
Figura 58: Esquemático elétrico da placa de controle.....	103
Figura 59: Estado de inicialização.....	104
Figura 60: Estado de Leitura.....	105
Figura 61: Estado de conversão.....	105
Figura 62: Estado de SalvaDados.....	106
Figura 63: Estado de Finalização.....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constantes de inclinação da reta encontradas a partir dos testes e as respectivas incertezas.....	55
Tabela 2: Constantes de inclinação da reta e as respectivas incertezas.....	58
Tabela 3: Valores de constante de compensação da altura para cada <i>laser</i> , o desvio padrão e o erro absoluto nas medições.....	59
Tabela 4: Comparação dos valores de ocupação de água (%) obtidos nos testes, para os picos e baixos.....	91
Tabela 5: Comparação dos valores de ocupação de água (%) obtidos nos testes, para os picos e baixos.....	93

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO .....	15
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	15
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO .....	17
2.1.1 <i>ESCOAMENTO EM DUTOS VERTICAIS</i> .....	19
2.1.1.1 ESCOAMENTO BORBULHANTE ( <i>BUBBLY FLOW</i> ).....	19
2.1.1.2 ESCOAMENTO PISTONADO ( <i>SLUG FLOW</i> ) .....	19
2.1.1.3 ESCOAMENTO DE AGITAÇÃO ( <i>CHURN FLOW</i> ) .....	20
2.1.1.4 ESCOAMENTO ANULAR ( <i>ANNULAR FLOW</i> ).....	21
2.1.2 <i>ESCOAMENTO EM DUTOS HORIZONTAIS</i> .....	22
2.1.2.1 ESCOAMENTO PISTONADO ( <i>SLUG FLOW</i> ) .....	22
2.1.2.2 ESCOAMENTO ANULAR ( <i>ANNULAR FLOW</i> ).....	22
2.1.2.3 ESCOAMENTO DE BOLHAS DISPERSAS ( <i>DISPERSED BUBBLE FLOW</i> ).....	23
2.1.2.4 ESCOAMENTO ESTRATIFICADO ( <i>STRATIFIED FLOW</i> ).....	23
2.2 MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.....	24
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO TOMOGRÁFICA.....	26
2.3.1 <i>MÉTODO DE ABSORÇÃO</i> .....	27
2.3.2 <i>MÉTODO INTERFEROMÉTRICO</i> .....	31
2.3.3 <i>TÉCNICA INFRAVERMELHA E RESSONÂNCIA MAGNÉTICA</i> .....	33
2.3.4 <i>TOMOGRAFIA POR CAPACITÂNCIA ELÉTRICA</i> .....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1 PLACA DE CONTROLE DO SINAL.....	37
3.2 <i>FIRMWARE</i> .....	41
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS NO LABVIEW.....	42
3.4 METODOLOGIA DE TESTES .....	45

<b>4. TESTES ESTÁTICOS</b> .....	47
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS TESTES ESTÁTICOS.....	47
4.2. RESULTADOS DOS TESTES ESTÁTICOS .....	51
4.2.1 <i>RESULTADOS DOS TESTES ESTÁTICOS COM MEDIDOR ÓPTICO</i>	
<i>KING-60S</i> .....	53
4.2.2 <i>RESULTADOS TESTES ESTÁTICOS COM MEDIDOR DA PLACA</i> .....	56
4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	58
<b>5. TESTES DINÂMICOS</b> .....	62
5.1 MATERIAIS E MÉTODOS TESTES DINÂMICOS.....	62
5.2. RESULTADOS TESTES DINÂMICOS.....	68
5.2.1 <i>RESULTADOS LASER 1310nm</i> .....	70
5.2.2 <i>RESULTADOS LASER 980nm</i> .....	84
5.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS FLUÍDO DINÂMICO .....	91
<b>6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	97
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	98
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	100
<b>APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DA PLACA DE CONTROLE DO</b>	
<b><i>LASER</i> E FOTODIODO.</b> .....	103
<b>APÊNDICE B – MÁQUINA DE ESTADOS IMPLEMENTADA NO PROGRAMA</b>	
<b>LABVIEW</b> .....	104
<b>APÊNDICE C – FIRMWARE DESENVOLVIDO PARA O MICROCONTROLADOR</b>	
<b>TM4C123GH6PM</b> .....	107

## 1. INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico é um fenômeno de difícil previsão, cálculo e medição com exatidão, os regimes de escoamento multifásico variam conforme as mudanças de taxa de escoamento, as propriedades do fluido, condições operacionais e geometria dos tubos (YAO; TAKEI, 2017). Abordagens convencionais de medição de escoamento multifásico, utilizam a separação da mistura em componentes individuais. Cada fluido é medido separadamente utilizando medidores de escoamento monofásicos (ISMAIL et al., 2005).

Novas técnicas estão sendo estudadas e aprimoradas para medição de escoamento multifásico sem a separação da mistura. A tomografia é uma das abordagens utilizadas para medir escoamento. Consiste em um conjunto de técnicas, que utiliza sensores alocados ao redor da tubulação para captação dos valores, fornecendo medições de diversos parâmetros dos fluidos em análise (BECK, 2012). Segundo Falcone et al. (2001), os sistemas de medição multifásicos têm adquirido destaque na indústria. Esses medidores auxiliam a reduzir a quantidade de componentes utilizados nas linhas de captação de fluidos, além de fornecer informações em tempo real sobre os parâmetros dos componentes do escoamento sem a necessidade de separadores de mistura.

Falcone et al. (2001) observa que os medidores multifásicos podem ser até três vezes mais econômicos em comparação a medidores de escoamento monofásicos, quando empregados para mensurar mais de um escoamento em um mesmo ambiente, caso de poços de petróleo, é necessário medir os componentes de gás, óleo e água que estão misturados. Neste cenário, para realizar as medições com medidores monofásicos é necessário acrescentar um sistema de separação de líquidos, o que torna o custo de produção mais elevado. O autor destaca, que por mais que os medidores multifásicos sejam consideravelmente mais baratos que os monofásicos, o seu custo ainda é grande e possuem um erro mínimo entre 5% e 10%.

A aplicação de tomógrafos em escoamento multifásico pode oferecer diversos benefícios no controle de processos, como a coleta de dados de forma não intrusiva, redução de custos e obtenção de dados em tempo real. Existem diversas técnicas para sistemas de tomografia, como: óptico, ultrassônico, radiação e micro-ondas (ISMAIL et al., 2005). Tomógrafos ópticos de absorção com *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission os*

*Radiation*), fornecem medições não intrusivas de concentrações a partir de medições de intensidade da luz transmitida, que é relacionada através da lei de Beer-Lambert, com a intensidade de luz quando passa pelo escoamento a ser mensurado. Utilizando um arranjo com *lasers* de diferentes comprimentos de onda é possível realizar medições de aspectos, como: concentração, velocidade, temperatura e pressão dos escoamentos em análise (KASYUTICH; MARTIN, 2010).

O grupo de pesquisa T2F (*Thermal Fluid Flow Group*), da Universidade Federal de Santa Catarina, desenvolve projetos relacionados a escoamentos multifásicos, especificamente relacionados ao petróleo. Os trabalhos desenvolvidos por Costa (2020), Leite (2020) e Ostrufka (2019), são exemplos de projetos que foram realizados pelo grupo. A pesquisa desenvolvida neste trabalho está inserida em uma linha de pesquisa do grupo T2F, que foi iniciado pelo trabalho de Ostrufka (2019). O autor implementou um sistema de medição com *laser* para medição de diferentes substâncias (água e alguns tipos de óleo). A linha de pesquisa possui como objetivo final o desenvolvimento de um tomógrafo óptico.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema preliminar de medição de escoamento e fração a vácuo em dutos, utilizando *lasers*.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Montar e avaliar as placas de controle para os *lasers* com comprimento de 1310nm e 980nm;
- Integrar aos testes os comprimentos de onda utilizados no trabalho de Ostrufka (2019);
- Realizar experimentos com o sistema de medição óptico com líquidos estáticos, caracterizando o perfil de absorção de cada elemento utilizado;
- Validar o sistema a partir dos testes realizados;

- Desenvolver a seção de testes para integrar o *laser* a bancada de escoamento bifásico;
- Realizar a medição de ocupação de líquido dinâmico em ângulos diferentes no duto de testes;
- Validar o sistema com experimentos na bancada de testes com escoamento bifásico;
- Realizar um comparativo entre os dois sistemas de medição de ocupação de duto, utilizado nos testes.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo irá apresentar a fundamentação teórica utilizada para embasar o trabalho desenvolvido, abordando os aspectos de medição de escoamento multifásico e técnicas de medição tomográfica. Primeiramente será abordado o conceito de escoamento multifásico e seus diferentes tipos de regime de escoamento. Depois será feita uma explicação sobre o conceito de medidores multifásicos e suas diferenças em relação a medidores monofásicos. E por fim, será abordado o conceito sobre técnicas de medição tomográficas abordando algumas das principais técnicas.

### 2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

O escoamento multifásico pode ser definido como o escoamento simultâneo de uma mistura com duas ou mais fases. Uma fase refere-se ao estado sólido, líquido ou gasoso da matéria, ou seja, o escoamento multifásico é definido como uma mistura de fases, como gases (bolhas) em um líquido, ou líquido (gotículas) em gases. O escoamento multifásico pode ser caracterizado por fases dispersas, consistindo em elementos discretos, que não estão conectados entre si; escoamento laminares, em que o fluido se desloca em camadas ou lâminas com grande influência das forças viscosas e com velocidade constante; ou ainda, escoamento turbulento, em que as partículas fluídas se misturam ao longo do deslocamento, devido ao comportamento aleatório no campo das velocidades. (CROWE, 2006).

Do ponto de vista prático, uma das principais dificuldades, quando se utiliza escoamento multifásico, é que as taxas e processos de transferência de massa, quantidade de movimento e energia podem ser sensíveis à distribuição geométrica ou topologia dos componentes dentro do escoamento. Por exemplo, a geometria pode afetar fortemente a troca de energia entre as fases. Além disso, o escoamento dentro de cada fase ou componente vai depender da distribuição geométrica (BRENNEN, 2005).

Os escoamentos multifásicos podem ser classificados em diferentes regimes de escoamento, que dependem de algumas características como: velocidade superficial de cada fase, orientação e geometria das tubulações e propriedade dos fluidos. Os regimes vão variar,

também, conforme o duto, ou seja, dutos com orientação vertical terão diferentes tipos de regimes de escoamento que dutos horizontais (CROWE, 2006).

A velocidade é um dos parâmetros mais importantes quando se analisa a dinâmica dos fluidos. Visto que, diversos fenômenos relacionados ao escoamento podem ser identificados a partir do estudo da velocidade (ISMAIL et al., 2005). Segundo Dinardo, Fabbiano e Vacca (2016), para escoamentos laminares em dutos circulares, a velocidade média pode ser obtida a partir da equação abaixo:

$$V_l = \frac{1}{4 * \mu} * \frac{\Delta\rho}{\Delta x} R^2 \quad (1)$$

considerando  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $\frac{\Delta\rho}{\Delta x}$  é o gradiente de pressão,  $R$  é o raio do tubo e  $V_l$  é a velocidade média do escoamento laminar.

Segundo Crowe (2006), para o cálculo da velocidade média em escoamentos turbulentos, considera-se uma aproximação de 3/4 do raio  $R$ . Obtém-se uma equação que é dependente da velocidade laminar média  $V_l$  e de  $\eta$ , que é uma constante experimental que é relacionada ao número de Reynolds. Essa constante foi determinada no trabalho desenvolvido por Dinardo, Fabbiano e Vacca (2016). A equação da velocidade média em escoamentos turbulentos ( $V_t$ ), pode ser vista abaixo:

$$V_t = \frac{2 * \eta^2}{(\eta + 1) * (2\eta + 1)} * V_l \quad (2)$$

Quando um escoamento multifásico é constituído de uma fase gasosa e duas fases líquidas, é possível analisar como escoamento bifásicos. As velocidades das fases líquidas tendem a se assemelhar, o que acarreta em apenas uma fase líquida, sendo assim, o sistema bifásico vai ser composto de uma fase gasosa e uma fase líquida. Em poços de petróleo, é analisado o comportamento de um escoamento bifásico, sendo uma fase composta por gás e outra fase líquida composta por água e óleo *crude* (ISMAIL et al., 2005).

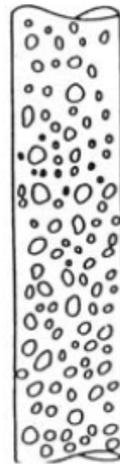
### 2.1.1 ESCOAMENTO EM DUTOS VERTICAIS

Avaliando a variação da velocidade superficial das fases nos dutos verticais é possível descrever os principais regimes de escoamento encontrados, são eles: escoamento borbulhante (*bubbly flow*), escoamento pistonado (*slug flow*), escoamento de agitação (*churn flow*) e o escoamento anular (*annular flow*). Uma explicação sobre como se forma cada um deles pode ser vista a seguir.

#### 2.1.1.1 ESCOAMENTO BORBULHANTE (*BUBBLY FLOW*)

No escoamento borbulhante a velocidade do líquido é superior à do gás, ocasionando a dispersão do gás em bolhas que variam de forma e tamanho, geralmente esféricas e muito menores que o diâmetro do duto, como pode ser visto na imagem abaixo:

Figura 1: Representação de um escoamento borbulhante em duto vertical.



Fonte: Adaptado de Crowe (2006)

#### 2.1.1.2 ESCOAMENTO PISTONADO (*SLUG FLOW*)

Quando a quantidade de gás aumenta nos dutos, isso faz com que bolhas tendam a se aglutinar formando bolha de grandes dimensões. Essas bolhas viajam a uma fração

substancial da velocidade do gás, ocorrendo de forma intermitente. Com a separação de grandes bolhas por espaços de líquidos, acontecem grandes flutuações na pressão e na vazão do líquido. A representação do escoamento pode ser observada na imagem a seguir:

Figura 2: Representação de um escoamento pistonado em dutos verticais.

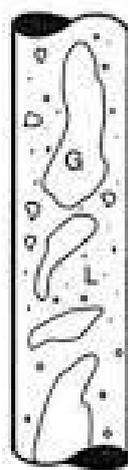


Fonte: Adaptado de Crowe (2006)

### 2.1.1.3 ESCOAMENTO DE AGITAÇÃO (*CHURN FLOW*)

Esse escoamento é resultante de um aumento da velocidade de gás no escoamento pistonado, fazendo com que o sistema se torne instável, essa instabilidade gera uma quebra das bolhas existentes. Devido às propriedades caóticas do escoamento, ele é um dos regimes com modelagem menos compreendida. A representação do escoamento de agitação pode ser vista na imagem a seguir:

Figura 3: Representação de um escoamento de agitação em dutos verticais.

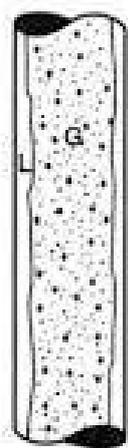


Fonte: Adaptado de Crowe (2006)

#### 2.1.1.4 ESCOAMENTO ANULAR (*ANNULAR FLOW*)

No escoamento anular, a velocidade gás é muito alta. O líquido se concentra nas extremidades do duto formando um anel anular, enquanto o gás flui de forma contínua no centro. Neste modelo de escoamento, gotículas de água podem ser arrastadas no centro juntamente do gás, como demonstra a imagem da Figura 4.

Figura 4: Representação de escoamento anular em dutos verticais.



Fonte: Adaptado de Crowe (2006)

## 2.1.2 ESCOAMENTO EM DUTOS HORIZONTAIS

Em dutos horizontais os principais regimes de escoamento encontrados são: escoamento estratificado (*stratified flow*), escoamento de pistonado (*slug flow*), escoamento anular (*annular flow*), escoamento de bolhas dispersas (*dispersed bubble*). Uma explicação sobre cada um deles pode ser vista a seguir.

### 2.1.2.1 ESCOAMENTO PISTONADO (*SLUG FLOW*)

Quando a velocidade do líquido é um pouco menor que a velocidade de gás, surge o escoamento pistonado. É um escoamento mais lento caracterizado pela sequência intermitente de bolhas maiores fluindo através do líquido. As bolhas, geralmente, localizam-se na superfície superior do duto, como pode ser observado na imagem a seguir:

Figura 5: Representação do escoamento pistonado em dutos horizontais.



Fonte: Adaptado de Murtha (2017)

### 2.1.2.2 ESCOAMENTO ANULAR (*ANNULAR FLOW*)

O escoamento anular ocorrer quando as velocidades das duas fases, líquida e gás, são grandes. O gás flui como uma fase contínua no centro do duto, essa alta velocidade do gás no centro do tubo pode causar ondulações na interface e gotículas de líquido podem ser arrastadas no escoamento de gás central. Este é um regime particularmente estável, sendo desejável em projetos. A representação pode ser vista na imagem abaixo:

Figura 6: Representação do escoamento anular em dutos horizontais.



Fonte: Adaptado de Murtha (2017)

#### 2.1.2.3 ESCOAMENTO DE BOLHAS DISPERSAS (*DISPERSED BUBBLE FLOW*)

O regime de escoamento de bolhas é caracterizado pela velocidade superficial do líquido ser muito maior do que a do gás. Devido à flutuação, as bolhas ficam dispersas no líquido tendo uma concentração maior na parte superior do duto, como pode ser visto na imagem abaixo:

Figura 7: Representação de um escoamento de bolhas dispersas em dutos horizontais.

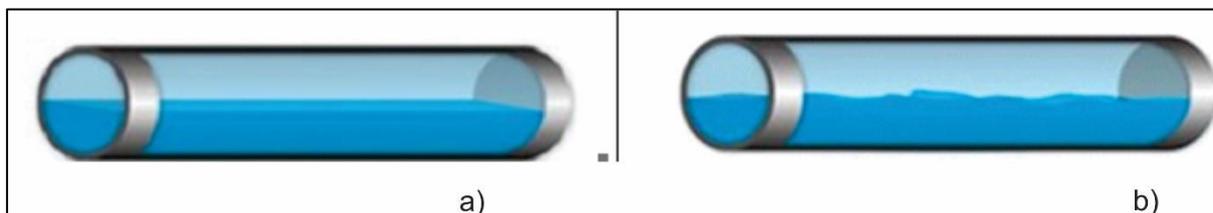


Fonte: Adaptado de Murtha (2017)

#### 2.1.2.4 ESCOAMENTO ESTRATIFICADO (*STRATIFIED FLOW*)

O regime de escoamento estratificado é caracterizado pelas baixas velocidades de gás e líquido. O líquido concentrado na parte de baixo e gás na parte de cima. A força gravitacional desempenha um papel importante, com o elemento de menor densidade (gás) se concentrando sempre acima do fluido com maior densidade. O aumento da velocidade do gás, possibilita que ondas possam se formar, gerando uma variação do escoamento chamada de estratificado ondulante (*Stratified wavy*). Na imagem abaixo é possível observar a representação dos escoamentos:

Figura 8: a) Representação do escoamento estratificado em dutos horizontais, b) Representação do escoamento estratificado ondulante em dutos horizontais.



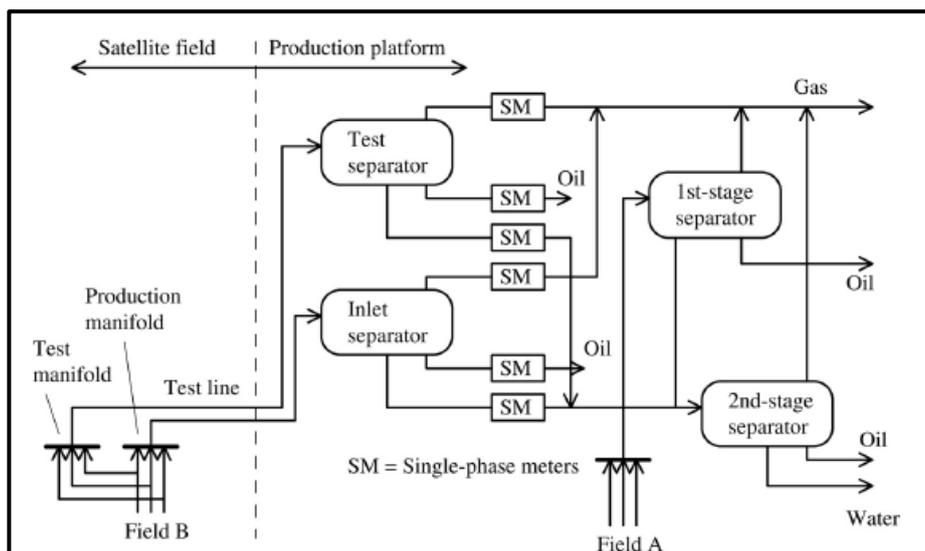
Fonte: Adaptado de Murtha (2017)

## 2.2 MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

A medição dos fluidos produzidos em poços de petróleo, com precisão, é de extrema importância para uma exploração eficiente e com redução de custos. Os poços de petróleo produzem uma complexa mistura de gás, óleo, água e outros componentes como areia. Realizar a medição do escoamento multifásico torna-se um processo complexo.

Nesse sentido, nas abordagens convencionais para realização de medições multifásicas, é realizado a separação da mistura em componentes individuais. Após, é feito a medição de cada componente individualmente através de medidores de escoamento monofásico, porém esse processo possui algumas desvantagens, como: grande volume físico, alto custo de instalação e demanda maior por manutenção dos equipamentos. No processo de separação das fases, é necessário acrescentar separadores nas linhas de produção, estes separadores utilizam produtos químicos para auxiliar na estabilização dos fluidos, o que adiciona um custo maior para se ter uma separação eficiente dos líquidos (RAJAN et al., 1993). A Figura 9 exemplifica este processo, demonstrando a aplicação de medidores de escoamento monofásico na coleta de dados em poços de petróleo.

Figura 9: Exemplo de sistema de medição monofásico.

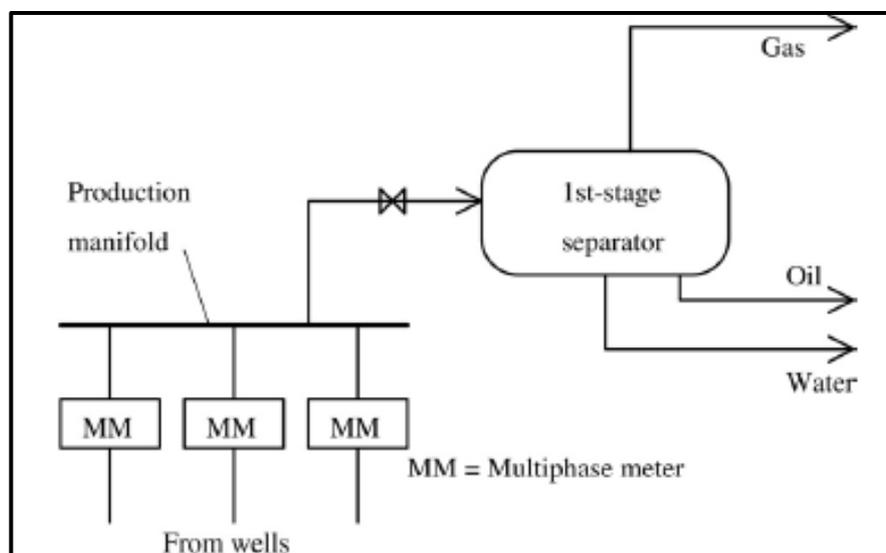


Fonte: Adaptado de Ismail e colaboradores (2005).

Na década de 1990, esforços consideráveis foram feitos para desenvolver e aprimorar medidores multifásicos, no entanto, em sua maioria, apresentavam algumas limitações, como a dependência do regime de escoamento e faixas de precisão que variam entre 5% a 10%. Para melhorar essa técnica de coleta de dados, várias formas de medição de escoamento multifásico em tempo real foram estudadas, visando minimizar o tempo de coleta dos dados e melhorar sua precisão. Porém, a maior parte das soluções comerciais desenvolvidas para essa finalidade e que atuam em tempo real, não apresentam a robustez necessária para efetuar medições corretamente nas devidas condições de ambiente (LORENTZEN et al., 2010).

Os medidores multifásicos são capazes de realizar a medição dos diferentes componentes existentes no processo em tempo real sem a necessidade da separação das fases, geralmente a medição é realizada através de técnicas de medição tomográfica. A utilização de medição direta, com sensores não intrusivos, auxilia na redução dos custos de produção e no controle do processo. Com a coleta de dados em tempo real é possível fazer uma reconstrução das medições de distribuição de concentração de cada fase e identificar os diferentes padrões de escoamento existentes (ISMAIL et al., 2005). Na Figura 10, é possível observar um exemplo de aplicação de um sistema de medição multifásico, pode-se identificar a considerável redução de componentes empregados na linha de produção em relação a medidores monofásicos o que demonstra a economia considerável.

Figura 10: Exemplo de aplicação de medidores multifásicos.



Fonte: Adaptado de Ismail e colaboradores (2005)

### 2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO TOMOGRÁFICA

As técnicas tomográficas permitem a medição de campos tridimensionais de concentração, temperatura e velocidade dos objetos, sem influenciar no processo físico. Com um determinado número de sensores distribuídos em um objeto a ser mensurado, é possível determinar, com alta taxa de precisão, a velocidade, temperatura e concentração dos objetos em análise, podendo ser fluidos em repouso ou escoamentos constantes (MAYINGER, 1994).

Segundo Ismail e colaboradores (2005), o conceito de tomografia refere-se a toda gama de técnicas não invasivas de obtenção de parâmetros em duas ou mais dimensões. É um estudo relativamente novo, datado dos anos 1980. Os parâmetros obtidos, a partir dos dados coletados, fornecem informações importantes sobre o processo, que podem ser usados para: monitoramento, verificação matemática e obtenção do controle inteligente do processo. Alguns dos sistemas tomográficos conhecidos são: ultrassônicos, radiação, ressonância magnética nuclear e óptica.

Radiações de diferentes naturezas, comprimento de onda e energia são adequadas para medições tomográficas. A intensidade e a fase da radiação são afetadas por diferentes propriedades físicas, tal qual: o coeficiente de absorção ou índice de refração do fluido em

análise. Essas propriedades físicas são chamadas de parâmetros de campo, estes carregam informações sobre a variação da propriedade física investigada. Essas variações físicas são originalmente causadas pelas variações de temperatura, densidade e velocidade que estão em análise (MAYINGER, 1994).

Utilizando um número suficiente de sensores é possível obter diversos valores médios de projeção de ângulos, registrados simultaneamente. O valor das propriedades de campo pode ser recuperado das projeções dos valores médios encontrados (MAYINGER, 1994). De acordo com os parâmetros de campo de interesse e a natureza da radiação que está sendo usada, existem diferentes tipos de técnicas que utilizam diferentes tipos de sensores para mensurar o valor a ser encontrado. As técnicas mais conhecidas de medição e irradiação são: método de absorção, técnicas interferométricas, infravermelho e tomografia de ressonância magnética. Algumas dessas serão explicadas nos próximos tópicos.

### 2.3.1 MÉTODO DE ABSORÇÃO

No método de absorção é mensurado a atenuação da intensidade da radiação que atravessa um fluido ou sólido que está em estudo. Neste caso o parâmetro de campo correspondente é o coeficiente de absorção variável, onde cada material possui um coeficiente específico (MAYINGER, 1994). Utilizando a lei de Beer-Lambert, é possível expressar de forma matemática, a relação existente entre a absorção luminosa, a intensidade da radiação emitida e a intensidade da radiação que é recebida após passar pelo fluido ou sólido, como pode ser visto na equação demonstrada abaixo:

$$Ab = \left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3)$$

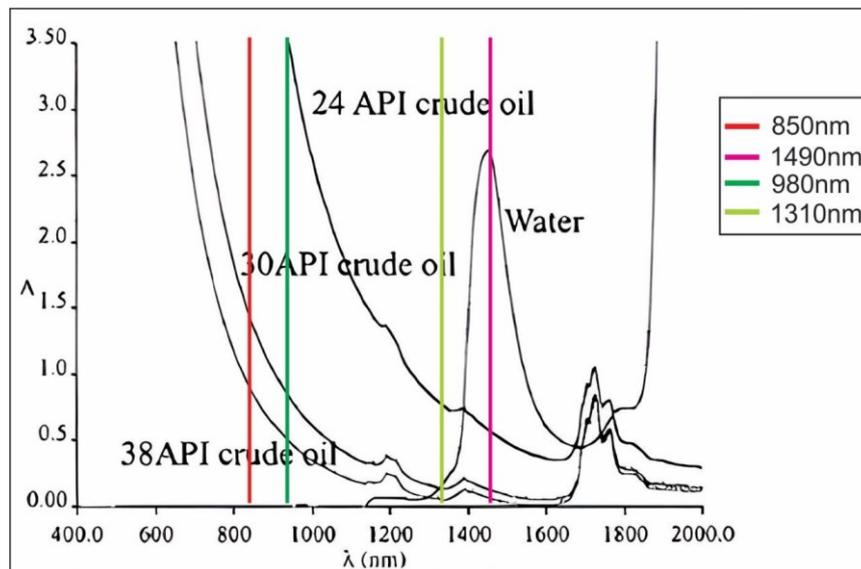
Onde  $Ab$  é a absorção e  $I_0$  é a intensidade emitida e  $I$  é a intensidade após passar pelo fluido. Ainda segundo a lei de Beer-Lambert, a absorção é linearmente proporcional ao produto da absorvidade molar do meio ( $\epsilon$ ), ao caminho percorrido pela radiação ( $l$ ) e a concentração molar da substância ( $Cd$ ). Logo a equação da absorção pode ser escrita dessa forma

$$Abs = \left( \frac{I}{I_0} \right) = \epsilon C d l \quad (4)$$

O coeficiente de absorção é, além de uma função das propriedades físicas da substância no volume investigado, também uma função do comprimento de onda da radiação. Por este motivo, ondas monocromáticas podem ser usadas nas medidas, para encontrar os valores de absorção. As ondas se relacionam com a propriedade física do objeto investigado (ZHAO et al., 2004).

Segundo Carey e colaboradores (2000), a transmissão de luz de uma fonte com um determinado comprimento de onda através de uma espécie química desconhecida pode fornecer meios para identificação completa ou parcial da substância. Uma vez que a espécie tenha um coeficiente de absorção identificável dentro da faixa do comprimento de onda da fonte. Zhao e colaboradores (2004) relacionam o espectro de absorção de substâncias, como água e alguns tipos de óleos, aos comprimentos de onda infravermelho. Isso se deve as ligações químicas dentro das moléculas de água e componentes do óleo, ou petróleo bruto, que se relacionam com os comprimentos de onda. A imagem abaixo (Figura 11), demonstra a relação existente entre a absorção e o comprimento de onda, sendo o eixo y o valor de absorção e o eixo x o valor do comprimento de onda.

Figura 11: Relação existente entre absorção e diferentes comprimentos de onda infravermelho.



Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2004).

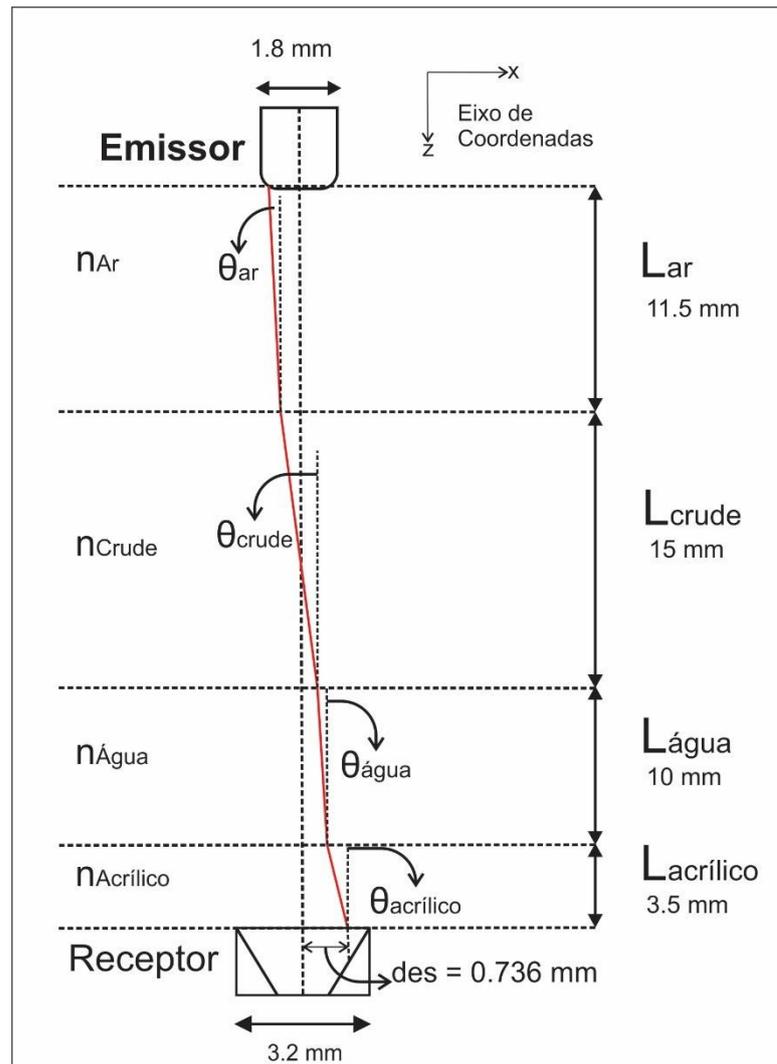
A imagem demonstra que tanto a água como os diferentes tipos de óleo têm seu pico de absorção com diferentes comprimentos de onda infravermelho. Com a relação é possível determinar a identificação do material e outras características, se o mesmo estiver dentro do espectro de absorção do comprimento de onda emitido.

No método de absorção, outros fenômenos têm que ser considerados e que afetam a intensidade do feixe luminoso. Quando o feixe troca de um meio de propagação transparente para um outro meio, geralmente parte da luz é refletida na interface entre os dois meios e parte entra no segundo meio. O fenômeno de refração, que é quando a luz é desviada de sua trajetória, geralmente ocorre porque a velocidade da luz varia com o meio em que incide. Neste sentido, o índice de refração é definido como a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio em que esta incidindo (MILJKOVIĆ; BIRD; DIEM, 2012). A Lei de Snell relaciona os ângulos ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) de incidência e os índices de refração de cada meio ( $\eta_1$  e  $\eta_2$ ).

$$\eta_1 * \sin \theta_1 = \eta_2 * \sin \theta_2 \quad (5)$$

Um estudo realizado por Ostrufka (2019), analisou a sensibilidade do alinhamento óptico, incluindo os efeitos de refração que acontecem quando se muda o meio de propagação da luz. O autor considerou como caminhos de propagação os meios: água, óleo *crude*, ar e a espessura do recipiente acrílico. Foi utilizado valores de diâmetro de 1.8mm para o *laser* e diâmetro de 3.2mm para receptor, que foram os valores reais dos componentes utilizados no trabalho do autor. Mensurando o deslocamento do feixe ao longo do caminho percorrido até o receptor luminoso. Utilizando a Lei de Snell apresentada na Equação (4), sabendo os índices de refração dos materiais envolvidos, é possível obter os ângulos de deslocamento do feixe do *laser*, e com isso encontrar o deslocamento em relação ao receptor. O sistema considerou o alinhamento ideal, entre emissor e receptor. Com os valores de índice de refração foi possível determinar os ângulos em cada etapa ( $\theta_{ar}$ ,  $\theta_{água}$ ,  $\theta_{óleo_{crude}}$ ,  $\theta_{Acrílico}$ ) do caminho, utilizando cálculos trigonométricos, determinou-se o deslocamento total em relação ao ponto central do receptor, como é demonstrado:

Figura 12: Deslocamento do feixe do *laser* considerando os índices de refração.

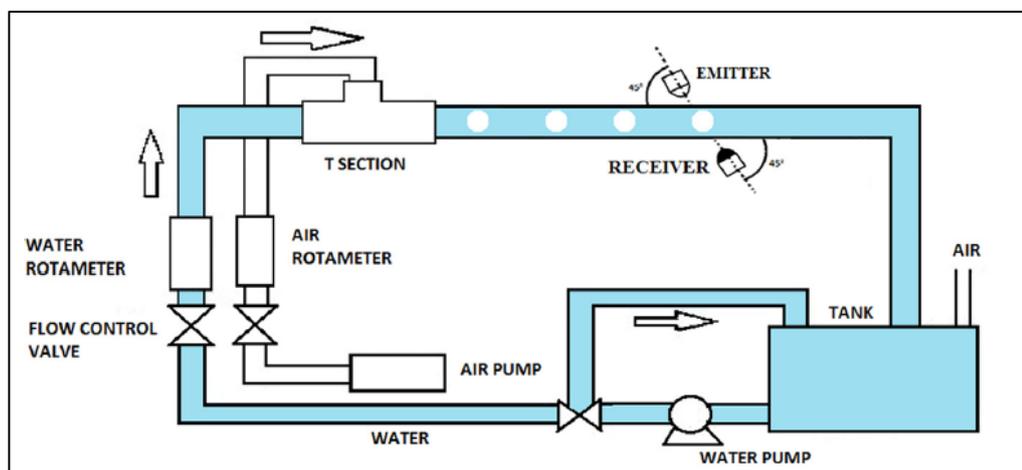


Fonte: Adaptado de Ostrufka (2019)

Arunkumar e colaboradores (2016) utilizaram o método de absorção para identificar o regime de escoamento que estava sendo emulado. Os autores utilizaram um sensor infravermelho, que é alocado em um tubo de vidro onde o escoamento percorre. Os experimentos foram realizados e os resultados comparados com imagens obtidas por uma máquina fotográfica de alta precisão. É utilizado o princípio de absorção quando o feixe encontra um caminho menos denso. Com escoamento com maior quantidade de ar do que fluido, o feixe passa sendo menos absorvido durante seu percurso até o receptor óptico. Quando o regime de escoamento conter um meio mais denso o feixe será mais absorvido, a

intensidade recebida no receptor será menor. A imagem que ilustra o experimento pode ser vista abaixo:

Figura 13: Experimento realizado para detecção do regime de escoamento.



Fonte: Adaptado de Arunkumar et al. (2016)

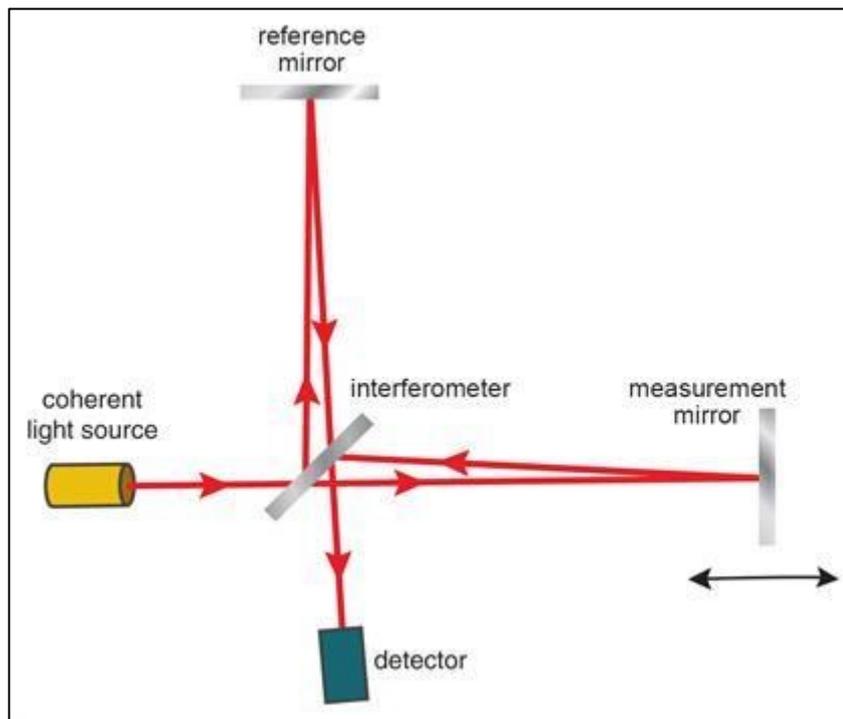
Segundo os autores o objetivo do trabalho foi alcançado, conseguindo detectar os diferentes regimes de água e ar que foram testados. Foi destacado também que os resultados foram comparados com a câmera de alta precisão, o que auxiliou a corroborar o bom funcionamento do experimento (ARUNKUMAR et al., 2016).

### 2.3.2 MÉTODO INTERFEROMÉTRICO

O primeiro interferômetro foi desenvolvido por Albert Abraham Michelson em 1887, foi utilizado um sistema de espelhos refletores e espelhos semitransparentes, divisores do feixe, para combinar feixes de luz separados que provem de uma mesma fonte. O princípio de funcionamento do interferômetro de Michelson, se baseia em um feixe proveniente de uma fonte de luz coerente que pode ser dividido em dois feixes idênticos, cada um destes feixes vai percorrer um caminho diferente, sendo recombinados logo antes de ser detectado no receptor. Com a diferença das distâncias que cada feixe percorreu, cria-se uma diferença de fase entre eles, ou seja, as ondas, que inicialmente eram idênticas, agora possuem uma diferença de fase

o que acaba acarretando em um padrão de interferência entre elas e isso pode ser identificado no receptor. Essa diferença de fase pode ser usada para detectar uma alteração física no comprimento do caminho que o feixe percorreu ou uma alteração no índice de refração do meio percorrido (BUNCH; HELLEMANS, 2004). A imagem abaixo ilustra o funcionamento do interferômetro desenvolvido por Michelson.

Figura 14: Funcionamento do interferômetro desenvolvido por Michelson.



Fonte: Adaptado de Bunch e Hellemans (2004).

Em um interferômetro convencional, a luz proveniente de uma fonte é dividida e recombinada para produzir um interferograma que, por sua vez, pode ser processado para derivar a diferença da fase óptica entre a luz interferente, podendo ser utilizado para determinar o comprimento do caminho óptico relativo em cada ponto no interferograma. Se a luz, quando for recombinada, tiver a mesma frequência óptica, é produzido um padrão de intensidade estático e invariante no tempo (PATEL et al., 2014). Ao ser registrado as projeções da função de campo no volume de medição e a mudança da intensidade da onda, a mudança relativa de sua fase em comparação com uma onda de referência também pode ser

medida. A mudança da fase corresponde à mudança média do parâmetro de campo ao longo do caminho de irradiação (MAYINGER, 1994).

Os interferômetros são usados para medir comprimentos e formas de componentes com precisão nanométrica. São os instrumentos de medição de comprimento com a maior precisão existentes, a maior parte utiliza luz ou outra forma de onda eletromagnética (PATEL et al. 2014). Segundo Mayinger (1994), a vantagem do método interferométrico em relação ao método de absorção é que os valores de projeção medidos são iguais à alteração média da função do campo, já na técnica de absorção a projeção medida é desproporcional à mudança de variação dos parâmetros de campo. É destacado ainda pelo autor que, mesmo tendo essa vantagem, as técnicas de medição interferométrica são geralmente mais complexas de serem executadas, devido à quantidade de componentes necessários para serem implementados e os ajustes que precisam ser realizados para que se tenha uma medição precisa e uniforme.

O método interferométrico é utilizado em diversas aplicações, como por exemplo, no trabalho desenvolvido por Ristic (2007), onde foi utilizado um interferômetro semelhante ao desenvolvido por Mach-Zehnder, com dois feixes de luz, que são separados por quatro placas. Este método é utilizado para medições quantitativas de densidade em grandes túneis de vento. Conforme o autor é útil conhecer a densidade de escoamento em túneis de vento, podendo ser feito por meio da comparação da alteração de fase de um feixe que passa por uma seção perturbada de um campo em teste com um feixe não perturbado. Porém esse tipo de aplicação requer um alto grau de precisão mecânica e complexidade de construção, o que acarreta em um instrumento de alto custo, e o valor cresce com o tamanho do projeto.

### 2.3.3 TÉCNICA INFRAVERMELHA E RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Na técnica infravermelha, a radiação mensurada é emitida pelo volume investigado e não por uma fonte externa, ao contrário das técnicas demonstradas anteriormente. Com esta técnica é possível medir os campos de temperatura emitidos a partir da análise da radiação infravermelha emitida pelos objetos. As intensidades de radiação emitidas são medidas em diferentes direções, de forma a fazer uma construção tridimensional dos campos de temperatura do volume em análise (MAYINGER, 1994).

A tomografia de ressonância magnética é usada, principalmente, em aplicações médicas. Investigando as distribuições de densidade, composição e estrutura do material em análise, sem a necessidade de submeter o objeto a qualquer tipo de radiação ionizante. Esta técnica funciona por meio do núcleo interno que é envolvido por um forte campo magnético estático. Quando este campo sofre perturbações de um campo magnético mais fraco, gera como resposta, um sinal eletromagnético com a frequência característica do campo magnético do núcleo, com isso é possível determinar a estrutura da molécula analisada (MAYINGER, 1994).

Um exemplo de aplicação, fora da área médica, é um trabalho proposto por Lakshmanan e colaboradores (2017); eles utilizaram a ressonância magnética para determinar a porcentagem de água contida em um escoamento multifásico contendo água e óleo. Os autores destacam que nos experimentos foi possível obter as imagens uni e bidimensionais da distribuição de água ao longo da seção transversal do tubo, nos testes realizados com escoamento contínuo foi alcançada uma precisão de 70,5% na determinação dos cortes de água existentes nas tubulações.

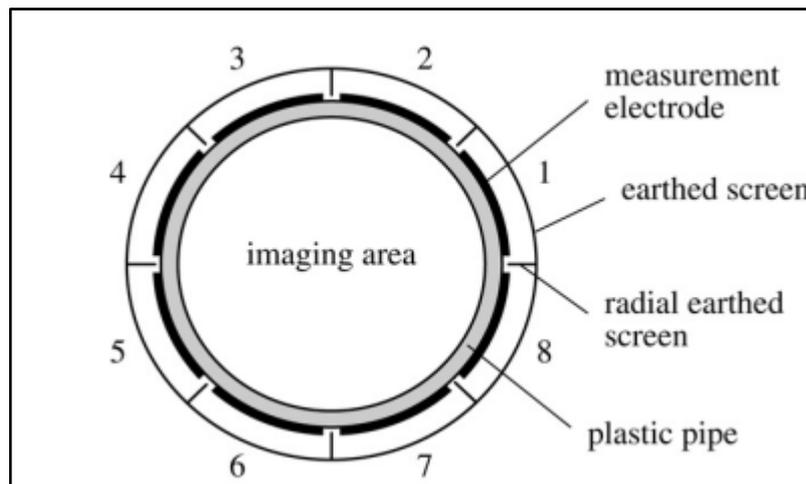
### 2.3.4 TOMOGRAFIA POR CAPACITÂNCIA ELÉTRICA

A técnica tomográfica por capacitância elétrica (ECT) é baseada na medição das mudanças na capacitância que são causadas pela alteração na distribuição do material dielétrico. As medições de capacitância são obtidas através de eletrodos, são usados de 8 a 12 geralmente, que ficam alocados ao redor de um recipiente em que será feita a análise. A distribuição transversal da permissividade é reconstruída através de algoritmos matemáticos dos valores das medições de capacitância (ISMAIL et al., 2005).

Segundo Yang (2010), a ECT é uma técnica amadurecida e difundida dentro da indústria. Embora existam muitas semelhanças entre a técnica e os scanners de raios-X, utilizados em hospitais, ambos fornecem informações sobre a distribuição transversal de materiais. O princípio de funcionamento da ECT é medir a capacitância entre pares de eletrodos e o funcionamento dos scanners de raios-X é medir a atenuação da intensidade do raios-X descrita pela lei de Beer-Lambert. O autor complementa que as variações na capacitância entre os eletrodos, geradas pela mudança na concentração do material ou na

distribuição dielétrica dos materiais, serve para gerar uma imagem transversal da distribuição de permissividade dentro do tubo na região em que os eletrodos estão alocados. A Figura 15 demonstra o ECT onde oito eletrodos alocados em torno de uma seção tubular de teste.

Figura 15: Representação de um tomógrafo capacitivo.



Fonte: Adaptado de Ismail et al (2005)

Um sistema ECT típico inclui três partes: um sensor capacitivo, uma caixa de aquisição de dados e um computador para processamento dos dados e reconstrução de imagem. O tomógrafo baseado em capacitância possui vantagens sobre outros aplicados na indústria, como: ausência de radiação, rápida velocidade na geração das imagens, é um sistema não intrusivo e não invasivo, possui robustez, resistente a altas temperaturas e altas pressões e possui um baixo custo (ISMAIL et al., 2005).

Um estudo realizado por Wenbiao e colaboradores (2014), apresenta uma gama de aplicações da técnica ETC em medições de partículas atreladas a escoamentos multifásicos. O regime de escoamento pode ser monitorado e a distribuição de sólidos pode ser medida usando as imagens reconstruídas obtidas pela ETC. Os autores ainda concluem que a velocidade da partícula e o perfil da velocidade em uma seção transversal podem ser estimados pela correlação cruzada dos sinais de concentração.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos utilizados para desenvolver o trabalho. Primeiramente, são descritos os recursos materiais comuns aos testes estáticos e testes dinâmicos, a pesquisa e a justificativa para a escolha desses materiais. Nos próximos capítulos serão apresentados os materiais específicos que foram utilizados para cada modelo de teste, a metodologia e resultados obtidos.

Para realizar a medição da fração de fase de cada material que está percorrendo o tubo, o método de absorção foi escolhido para ser implementado. Demonstrou-se por meio do método de absorção óptica, utilizando os comprimentos de onda que melhor se relacionam com determinado tipo de material, que é possível obter diversos parâmetros e informações sobre os objetos em análise. Utilizando *laser*, é possível obter a variação entre a intensidade emitida e a intensidade recebida após passar pelo objeto em análise. A lei de Beer-Lambert relaciona essa variação da luminosidade absorvida pelo material com a quantidade de material existente no caminho luminoso, como foi demonstrado na Equação (4).

Como o objeto deste trabalho é focar em escoamento multifásico contendo óleo, água e ar, representando um cenário de captação em poços de petróleo, a Figura 11 apresenta comprimentos de onda que melhor se relacionam com estes materiais. A partir disso, foram utilizadas quatro placas de circuito eletrônico. Elas são responsáveis por fazer o controle do sinal do *laser* emissor e condicionar o sinal recebido no fotodiodo, para assim, identificar a quantidade de cada material que percorre a tubulação. Duas dessas placas foram desenvolvidas no trabalho de Ostrufka (2019), uma placa contendo o *laser* com comprimento de onda de 1490nm, que é mais absorvido pela água, e outra com o *laser* de comprimento de onda de 850nm, que mais é absorvido pelo óleo. Neste trabalho, foram montadas e ajustadas outras duas placas, uma contendo um *laser* com comprimento de onda de 1310nm, que fica em um limite anterior ao pico de absorção da água e uma placa contendo um *laser* de comprimento de onda de 980nm, que fica em um limite posterior ao pico de absorção do óleo.

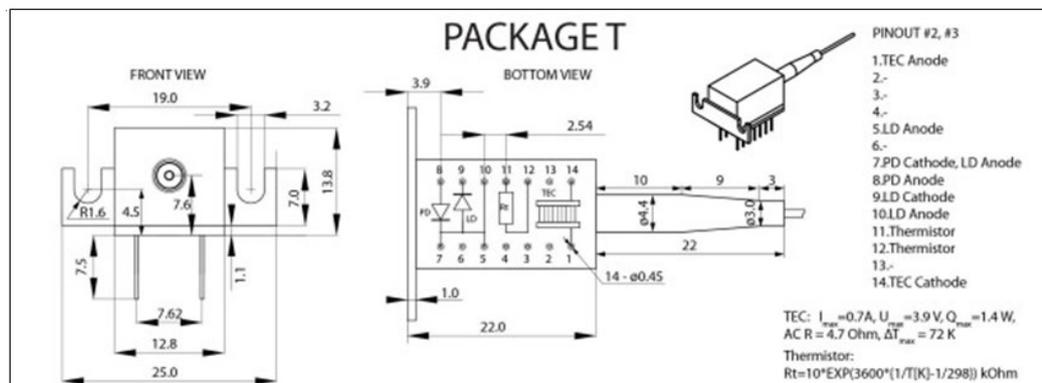
Como a fração de fase é a porcentagem de cada substância em relação à altura da coluna de líquido percorrendo a tubulação, a soma das três frações de fase (água, óleo e ar) do escoamento resulta em uma relação unitária, conseqüentemente através da obtenção de duas

dessas frações é possível obter a terceira. A placa de circuito que servirá de controle do sinal e para envio dos valores obtidos pelo fotodiodo será explicada mais detalhadamente a seguir.

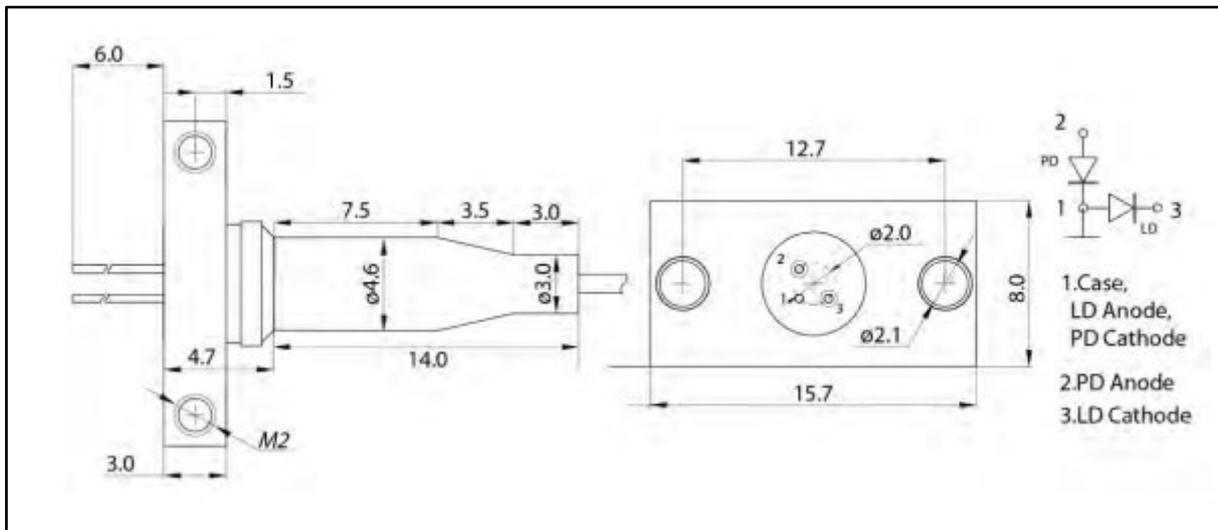
### 3.1 PLACA DE CONTROLE DO SINAL

A placa responsável pelo controle do sinal possui alguns componentes essenciais para o sistema, além de conter o *laser* para emitir o sinal luminoso, também contém o fotodiodo para receber o sinal luminoso que irá passar pelo líquido e possui espaço para serem montados mais fotodiodos, caso seja necessário. Os *lasers* utilizados são o LDI-1310-DFB-10G desenvolvido pela LASERCOM (Figura 16). Este *laser* possui comprimento de onda de 1310nm e potência de saída de até 15mW. A outra placa possui o *laser* LDI-980-FP-20 desenvolvido pela LASERCOM (Figura 17). Este *laser* possui comprimento de onda de 980nm e potência de saída de até 20 mW. Estes *lasers* têm fotodiodos internos que servem para determinar a potência e estabilidade do feixe que está sendo emitido, também possuem um termistor para realizar medições de temperatura interna do *laser* e uma função de controle desta temperatura. O fotodiodo alocado na placa é o desenvolvido pela Marktech Optoelectronics, modelo MTPD1346D que tem faixa de medição de comprimento de onda de 600nm até 1750nm. Todos os componentes ópticos utilizados possuem uma interface em fibra óptica com conectores do tipo FC (APC) na extremidade, além disso foi utilizado colimadores para ajudar no foco do feixe luminoso emitido pelo *laser*.

Figura 16: Esquemático *laser* LDI-1310-DFB-10G.



Fonte: LaserCom-LDI1310 (2019)

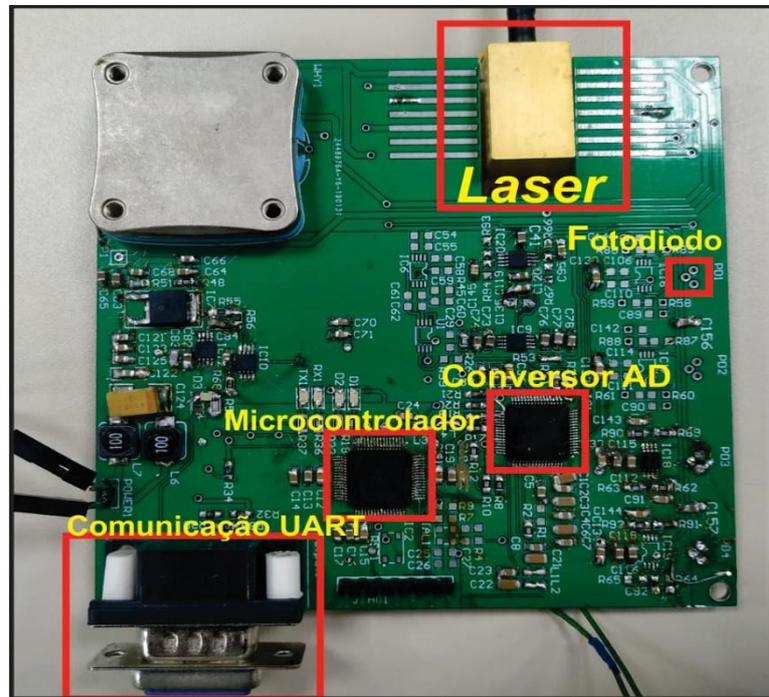
Figura 17: Esquemático *Laser LDI 980nm*.

Fonte: LaserCom-LDI 980nm (2019)

A placa possui um conversor analógico/digital (AD), responsável por receber o sinal analógico do fotodiodo e digitalizar para ser enviado ao microcontrolador. O conversor AD escolhido foi o desenvolvido pela Texas Instruments o ADS131E08, que é um conversor sigma-delta, estes componentes possuem alta resolução, devido aos benefícios da sobreamostragem e a conformação de ruído (*noise shaping*) (PARK, 1993). Este conversor possui oito canais de entrada de sinais analógicos e faixa de tensão de alimentação de 3V a 5V, além de possuir uma interface SPI para comunicação e ganhos programáveis.

O microcontrolador escolhido foi o TM4C123GH6PM, desenvolvido pela Texas Instruments, que possui um processador ARM Cortex M4 de 32 bits, algumas características deste microcontrolador é que ele possui oito interfaces de comunicação UART e quatro módulos de comunicação SPI. Além disso, tem uma memória *FLASH* de 256 KB e uma velocidade de *clock* de até 80 MHz. Na figura a seguir, é representada a placa utilizada para realizar o controle do *laser*, para receber o sinal do fotodiodo e tratar este sinal para ser enviado para o computador. Alguns dos principais componentes do sistema são destacados na imagem:

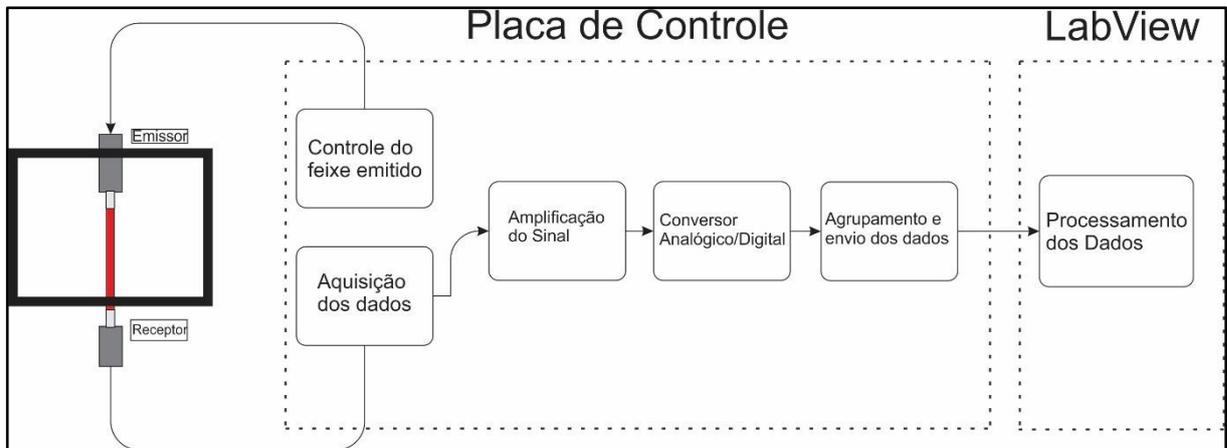
Figura 18: Placa utilizada para realizar o controle do laser; em destaque os principais componentes do sistema.



Fonte: Autor

A placa foi desenvolvida para funcionar da seguinte maneira: é realizado o condicionamento do sinal do laser com uma fonte de corrente controlada, para que se emita um feixe contínuo. Após, o feixe emitido pelo *laser* passar pelo meio estudado e chegar ao fotodiodo, o sinal é amplificado por um amplificador de transimpedância antes de ser enviado a um dos canais do conversor AD, o sinal digitalizado e enviado ao microcontrolador através do protocolo SPI. O esquemático elétrico completo da placa de controle encontra-se no **Anexo A**. No fluxograma da Figura 19, é demonstrado o funcionamento da placa de controle.

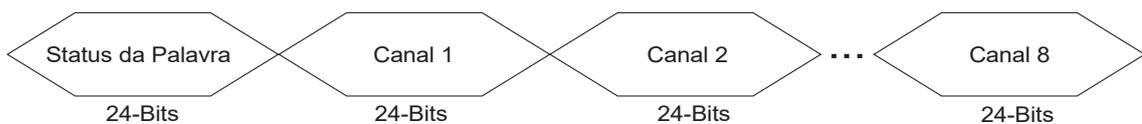
Figura 19: Fluxograma do funcionamento da placa de controle.



Fonte: Autor

O conversor envia uma mensagem de 216 bits, sendo os primeiros 24 bits responsáveis por indicar o status das conversões, apresentando se teve algum erro no sinal analógico ou algum erro na conversão. O restante da mensagem é relativa aos canais de conversão: são 8 canais com 24 bits de dados cada, ou 3 Bytes, com uma resolução de 1000 amostras por segundo. O modelo da mensagem enviada pelo conversor é visto abaixo:

Figura 20: Mensagem enviada pelo conversor AD.



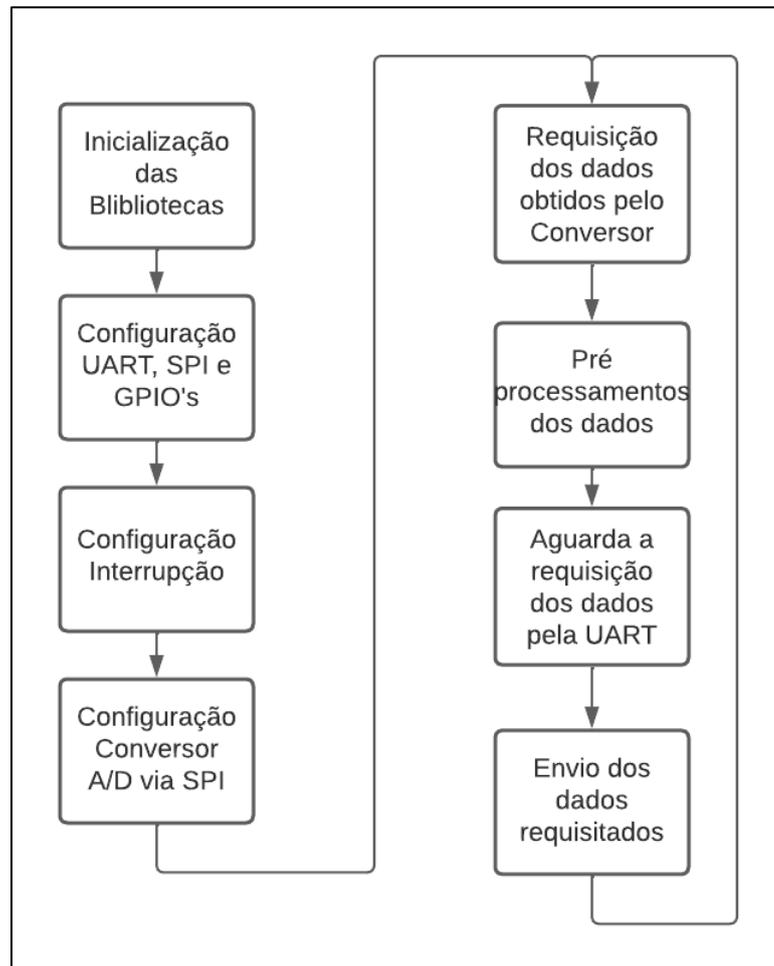
Fonte: Adaptado de ADS131E08 (2017)

### 3.2 FIRMWARE

O *firmware* desenvolvido para o microcontrolador, inicia com as configurações das variáveis utilizadas. É habilitado a comunicação SPI e a comunicação UART, além de configurar os GPIO's e a interrupção. Por meio da comunicação SPI é ajustado os parâmetros do Conversor AD, desenvolvendo as configurações de funcionamento, como: resolução e tamanho da mensagem, habilitação do canal que será utilizado e configuração do amplificador de entrada do conversor. A mensagem com os dados enviados pelo conversor é recebida no microcontrolador, que está configurado para fazer um pré- processamento destes dados, fazendo a média de 40 amostras recebidas. Como se está utilizando apenas dois canais do conversor, um canal que recebe o sinal proveniente do fotodiodo (canal 6) e outro canal recebe o sinal do fotodiodo, existente internamente no *laser* (canal 1), o microcontrolador prepara somente os dados destes dois canais para sejam enviados ao computador.

A requisição do envio dos dados para o computador é feita através do programa LabView, que é um *software* de engenharia criado especificamente para aplicações de teste, medição e controle. Através do LabView é enviado um sinal para o microcontrolador, por meio do protocolo de comunicação UART, o microcontrolador recebe o sinal e envia os dados dos canais. O microcontrolador envia 7 bytes para o computador: 1 byte para indicar se a mensagem foi enviada corretamente, 3 bytes do canal 1 e 3 bytes do canal 6. O algoritmo completo desenvolvido para o *firmware* encontra-se no **Anexo C**. A imagem abaixo apresenta um fluxograma do algoritmo desenvolvido para o microcontrolador.

Figura 21: Fluxograma do firmware desenvolvido para o microcontrolador.

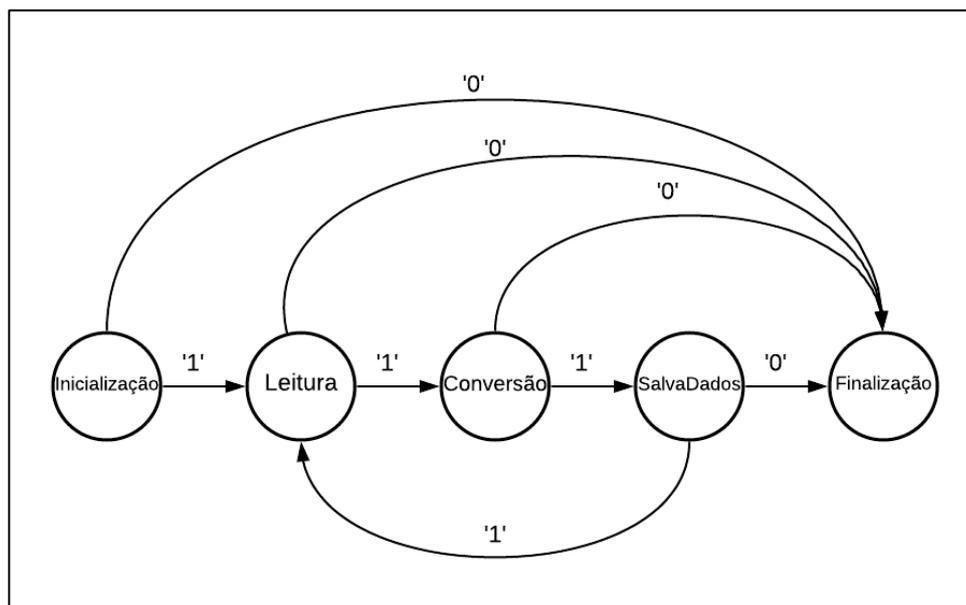


Fonte: Autor

### 3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS NO LABVIEW

O sistema foi projetado para que quando o LabView requisiute os dados, via protocolo de comunicação UART para o microcontrolador, este retorne com os dados coletados. Uma máquina de estados foi desenvolvida no LabView para realizar o processo. O diagrama da máquina de estados implementado no programa é demonstrado na Figura 22 e as imagens de cada estado encontram-se no **Anexo B**.

Figura 22: Diagrama da máquina de estados desenvolvida no LabView.



Fonte: Autor

Cada estado do programa desenvolvido no LabView é explicado abaixo:

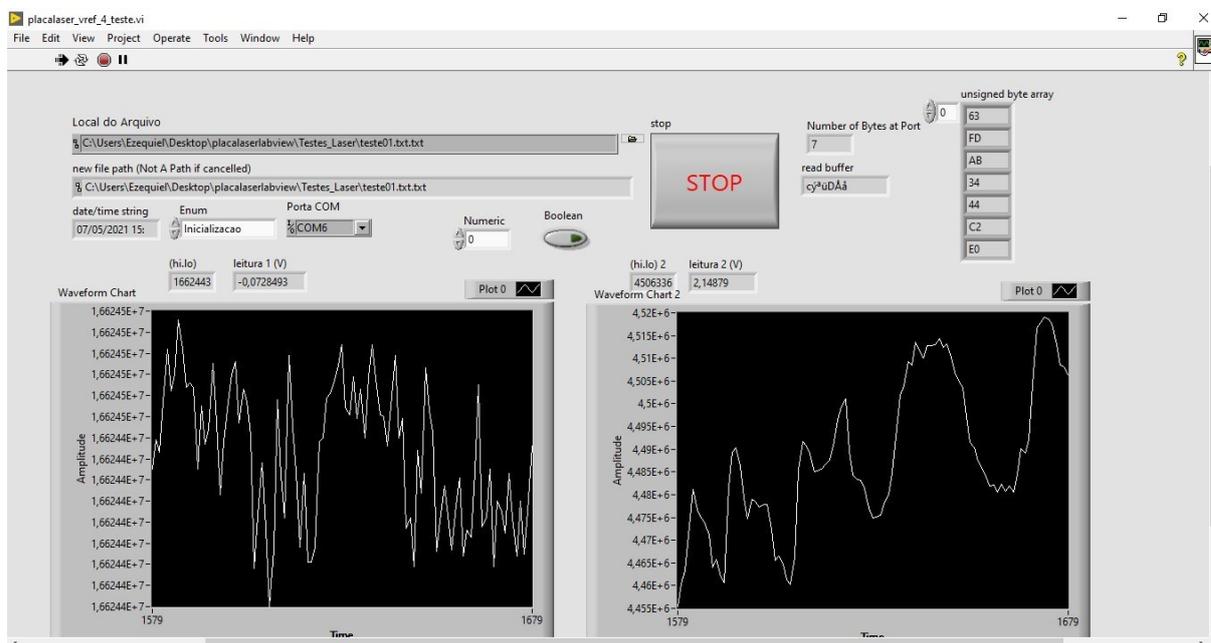
- **Inicialização:** é realizada a abertura de comunicação com o dispositivo que se encontra conectado à porta serial, também neste estado é realizada a configuração da taxa de transmissão (*Baud Rate*) e o número de bits que será recebido.
- **Leitura:** neste estado é realizada a requisição de envio de dado para o microcontrolador conectado à porta do computador, ou seja, o LabView envia um sinal para o microcontrolador para que este envie os dados. Neste estado é implementado um acumulador para garantir que todos os bytes enviados sejam agregados. Como foi configurado para o microcontrolador enviar 7 bytes, o acumulador aguarda até que todos os bytes enviados sejam recebidos, após, a palavra recebida é lida, se o primeiro byte corresponder ao valor puro enviado pelo microcontrolador, há a transição para o próximo estado.
- **Conversão:** a palavra recebida é separada nos dados do canal 1 (3 bytes) e nos do canal 6 (3 bytes), os valores são convertidos de hexadecimal para decimal e é realizada uma operação de multiplicação pelo valor:  $4,76837215E - 7$ , obtido no *datasheet* do conversor (ADS13108, 2017). Com a conversão, obtém-se um valor de

tensão que é utilizado para fazer a análise. Se não houver erros neste estado é passado para o próximo estado.

- **SalvaDados:** para gravar os dados convertidos em um arquivo `.txt` pré-determinado. Os dados convertidos são concatenados com o tempo de execução do programa e gravados no arquivo, seguindo o fluxo o programa retorna para o estado de `'Leitura'` para, novamente, solicitar o envio de dados para o microcontrolador.
- **Finalização:** este estado é acionado quando o operador deseja encerrar a transmissão e aperta o botão `stop` ou quando algum erro é encontrado em alguma das etapas/estados anteriores. Neste estado, é encerrada apropriadamente a transmissão com o microcontrolador, liberando a porta `'COM'` para outro propósito.

No painel frontal do LabView (Figura 23), pode ser observada as configurações utilizadas para o funcionamento do programa, contendo os gráficos em tempo real do sinal que está sendo captado, o número de bytes que está chegando pela porta, para que seja feito uma conferência caso ocorra uma diminuição no número que está sendo recebido. Também é mostrada a palavra inteira recebida, para que se possa observar se está tudo transcorrendo sem erros. Além disso, é possível configurar o arquivo de bloco de notas a ser criado e a porta de comunicação selecionada.

Figura 23: Tela frontal do programa no LabView desenvolvido.

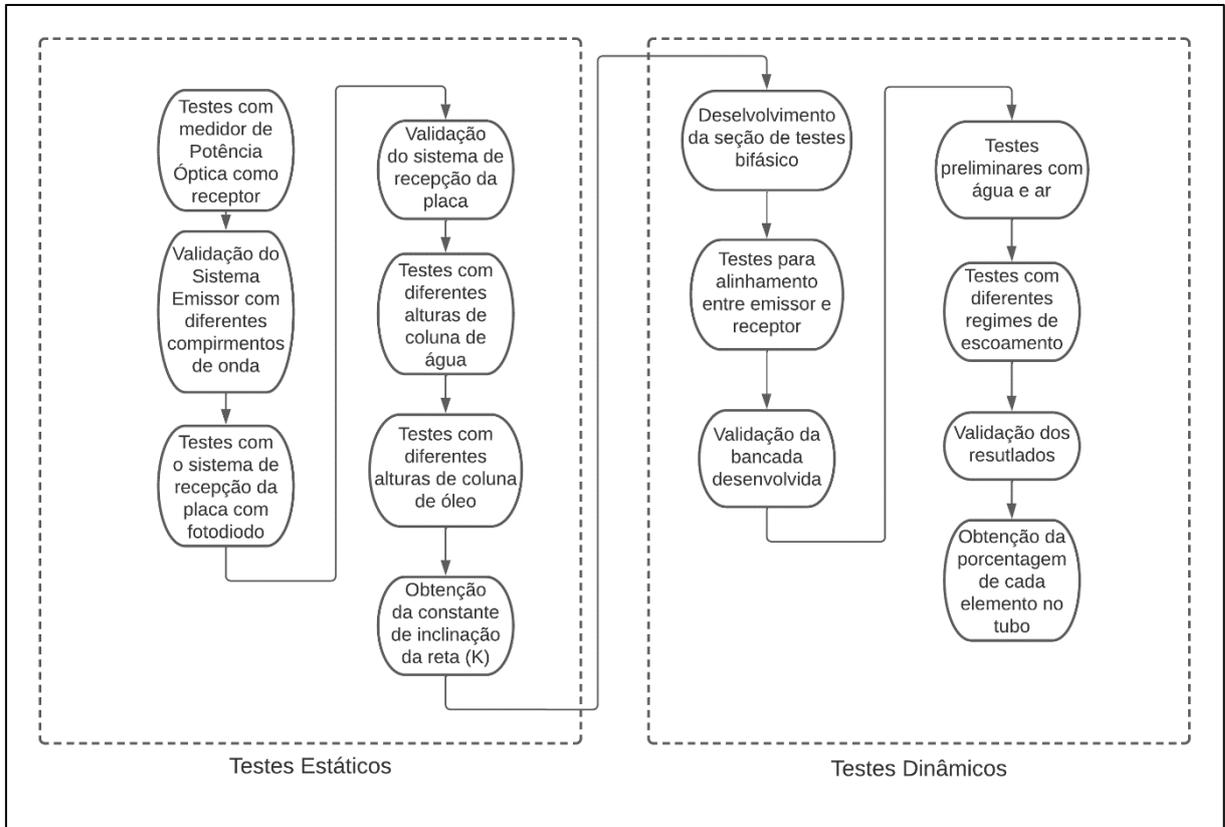


Fonte: Autor

### 3.4 METODOLOGIA DE TESTES

Os testes desenvolvidos com o sistema, foram divididos em duas etapas: a primeira, constitui os realizados com líquido estático, esses experimentos foram efetuados devido à necessidade de se gerar a constante de inclinação da reta em função da altura de líquido e da absorção do *laser*. Os testes estáticos foram utilizados para comprovar a efetivação do sistema como um todo e fazer os ajustes que por ventura fossem necessários. A segunda etapa constitui os testes com líquido dinâmico, esses foram realizados em bancada de escoamento bifásico, líquido e gás. A partir destes testes dinâmicos, foi possível determinar o desempenho do sistema para detectar a quantidade de cada elemento que percorre o tubo em condições mais próximas à operação. Os testes dinâmicos dependem dos resultados obtidos nos testes estáticos. Nesse sentido, foi desenvolvido um fluxograma (Figura 24) que demonstra o caminho que será percorrido em cada etapa e como o teste dinâmico é dependente do teste estático.

Figura 24: Fluxograma demonstrando as etapas dos testes estáticos e testes dinâmicos.



Fonte: Autor

No capítulo 4 será apresentado os materiais específicos utilizados nos testes estáticos, a metodologia e os resultados obtidos durante os experimentos. No capítulo 5 será apresentado os materiais que foram utilizados nos testes dinâmicos, a metodologia e os resultados obtidos.

## 4. TESTES ESTÁTICOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais específicos utilizados para desenvolver os testes com líquido estáticos.

### 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS TESTES ESTÁTICOS

Para realizar os testes, primeiro foi utilizado um sistema alternativo para medição dos dados de intensidade do *laser* que passavam pelo líquido em análise. O equipamento escolhido foi o medidor de potência óptica King-60s fabricado pela empresa Joinwit (Figura 25), o equipamento possui um fotodiodo acoplado para coletar a entrada de luz, com diâmetro de 3,2 mm. Permitindo medições de intensidade de até 10 mW, é pré configurado para receber comprimentos de onda de: 850nm, 980nm, 1300nm, 1310nm, 1490nm, 1550nm e 1625nm e possui um erro de medição de mais ou menos 0,1%. A figura abaixo demonstra o equipamento.

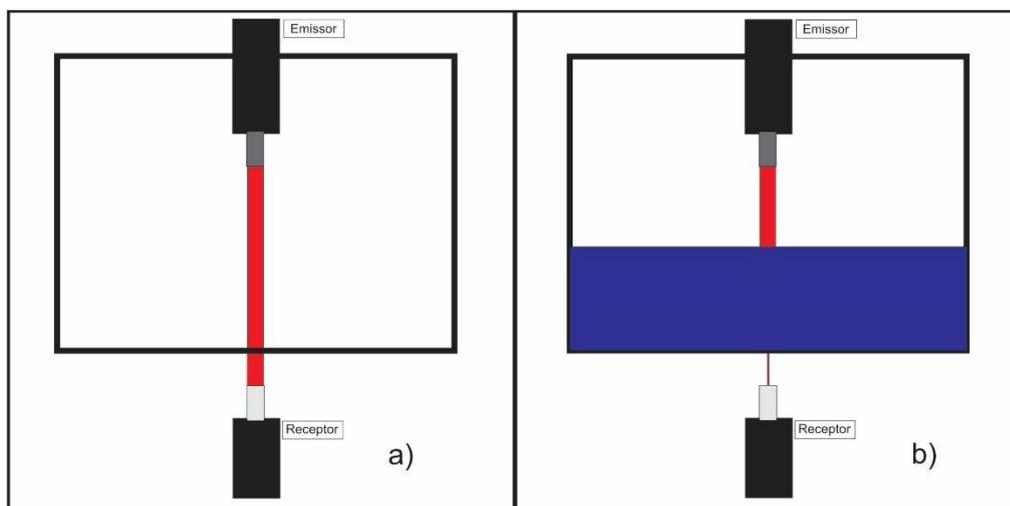
Figura 25: Medidor de potência óptica King-60s.



Fonte: Autor

Os primeiros testes estáticos foram efetuados com este equipamento para leitura do sinal, foi montada uma bancada de testes estáticos para analisar o comportamento da intensidade do feixe do *laser* quando este era submetido às diferentes alturas de líquidos (água e óleo). Estes testes foram realizados para obter uma comparação entre os resultados encontrados pelo Ostrufka (2019), com os comprimentos de onda de 1490nm e 850nm, e os comprimentos de onda de 1310nm e 980nm. Os testes foram realizados com os mesmos parâmetros utilizados pelo autor, uma altura máxima de líquido no recipiente de 2”, que é o diâmetro da tubulação existente na bancada de escoamento bifásico utilizada para os experimentos com fluido dinâmico.

Figura 26: Ilustração de como foi realizado os testes em bancada tanto para óleo como para água. Ao lado esquerdo da figura (a) está sem nenhum líquido no recipiente, no lado direito (b) com líquido no recipiente.



Fonte: Autor.

Para a base de testes foi utilizado um recipiente acrílico transparente com dimensões: 100x150 mm e 120 mm de altura onde é alocado os líquidos (Figura 26) e um cartão sensível ao *laser* (Figura 27), desenvolvido pela ThorLabs. Através dele é possível observar o feixe, que não pode ser observado a olho nu, facilitando o ajuste fino do sinal emissor no fotodiodo receptor existente no equipamento.

Figura 27: Cartão utilizado para detectar o feixe.



Fonte: Autor

Em um segundo momento, os testes desenvolvidos com o medidor de potência óptica foram refeitos, com a placa de medição óptica. Realizando o processamento dos resultados no LabView, esses resultados foram usados para gerar a constante de inclinação que são usadas posteriormente nos testes dinâmicos.

Para se obter a constante de inclinação da reta ( $K$ ), uma série de rearranjos matemáticos foram realizados, que permitiram obter a equação da constante em função da absorvância luminosa. A partir da equação (4), é possível considerar como meios de propagação as camadas de: ar, óleo e água; que são os componentes utilizados nos testes. A absorvância total do sistema é igual à soma das absorvâncias de cada substância, como demonstrado na equação abaixo:

$$A_{b_t} = A_{b_a} + A_{b_{ar}} + A_{b_{ol}} \quad (6)$$

onde  $A_{b_t}$  é a absorvância total do sistema e  $A_{b_a} + A_{b_{ar}} + A_{b_{ol}}$  são, respectivamente, a absorvância da água, ar e óleo.

Como está sendo considerados apenas dois comprimentos de onda para os testes (1310nm e 980nm) a  $A_{b_{ar}}$  pode ser desconsiderada, pois o ar não absorve a energia luminosa

nestas duas frequências. A partir disso, a absorvância pode ser determinada, utilizando o equacionamento demonstrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{l} & \frac{1}{l} & \frac{1}{l} \\ \epsilon_{a,1310} Cd_{a,1310} & \epsilon_{ol,1310} Cd_{ol,1310} & 0 \\ \epsilon_{a,980} Cd_{a,980} & \epsilon_{ol,980} Cd_{ol,980} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ag} \\ a_{ole} \\ a_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\log\left(\frac{I}{I_0}\right)_{1310nm} \\ -\log\left(\frac{I}{I_0}\right)_{980nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Os valores de  $(\epsilon_{a,1310} Cd_{a,1310})$  podem ser substituídos pela constante  $(K_{ag,1310})$ ,  $(\epsilon_{ol,1310} Cd_{ol,1310})$  pode ser substituído por  $(K_{ole,1310})$ ,  $(\epsilon_{a,980} Cd_{a,980})$  podem ser substituído  $(K_{ag,980})$  e  $(\epsilon_{ol,980} Cd_{ol,980})$  pode ser substituído por  $(K_{ole,980})$ . As alturas dos líquidos  $a_{ag}$   $a_{ole}$   $a_{ar}$ , sendo respectivamente as alturas da coluna de água, óleo e ar.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{l} & \frac{1}{l} & \frac{1}{l} \\ K_{ag,1310} & K_{ole,1310} & 0 \\ K_{ag,980} & K_{ole,980} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ag} \\ a_{ole} \\ a_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ Ab_{1310nm} \\ Ab_{980nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{a_{ag} + a_{ole} + a_{ar}}{l}\right) \\ K_{ag,1310} * a_{ag} + K_{ole,1310} * a_{ole} \\ K_{ag,980} * a_{ag} + K_{ole,980} * a_{ole} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ Ab_{1310nm} \\ Ab_{980nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A constante K pode ser determinada através de testes individuais de cada fluido para determinar a relação da absorvância luminosa a partir de diferentes alturas de colunas de fluido. Essa relação tende a ser linear, as constantes K são equivalentes aos valores de inclinação da reta para cada caso. Desenvolvendo esse sistema de equações, com os valores obtidos nos testes laboratoriais, é possível determinar a quantidade de cada fase que está percorrendo o tubo no sistema multifásico.

Para calcular o erro existente nos experimentos realizadas com a placa de medição, foi utilizado o Teorema Fundamental do Erro (CUNHA; CASTRO, 2010), que tem a equação dada por:

$$\Delta F(I, I_o) = \frac{\partial F(I, I_o)}{\partial I} * e_I + \frac{\partial F(I, I_o)}{\partial I_o} * e_{I_o} \quad (10)$$

Onde  $\Delta F(I, I_o)$  é o erro absoluto da função de absorvância,  $\frac{\partial F(I, I_o)}{\partial I}$  é a derivada parcial da função F em relação a intensidade recebida (I) após o feixe passar pelo fluido,  $e_I$  é o erro absoluto existente na variável (I),  $\frac{\partial F(I, I_o)}{\partial I_o}$  é a derivada parcial da função F em relação a intensidade emitida pelo *laser* e  $e_{I_o}$  é o erro absoluto existente na variável  $I_o$ . A função F é a equação da absorvância apresentada na Equação (3). Resolvendo a Equação (10) em relação à Equação (3), tem-se que o erro absoluto para a função da absorvância:

$$\Delta F(I, I_o) = \frac{e_I}{I} - \frac{e_{I_o}}{I_o} \quad (11)$$

O *datasheet* do conversor AD fornece o erro na conversão, que é de 1,53E-5 Volts para mais e para menos (ADS131E08, 2017). Este valor foi considerado como erro absoluto das variáveis  $e_I$  e  $e_{I_o}$ , considerando que as duas medições passam pelo processo de digitalização. Com os valores de intensidade obtidos nos testes e o erro do conversor, é encontrado o erro absoluto de cada medição. Nos gráficos gerados dos testes estáticos, foi considerado o erro de medição, do conversor AD, encontrado em cada medição, para obter as constantes de inclinação da reta.

#### 4.2. RESULTADOS DOS TESTES ESTÁTICOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos nos experimentos sendo, primeiramente, apresentado os resultados obtidos nos testes estáticos e os valores da constante de inclinação da reta encontrados para cada caso. A seção de testes estáticos foi dívida entre

resultados obtidos com o medidor óptico King 60s e os obtidos com a placa de aquisição do sinal desenvolvida.

Os testes foram realizados em bancada de forma estática com água e com óleo. Medições foram feitas quando se acrescentava o líquido no recipiente acrílico, utilizando um passo de 20 ml de água em cada inserção e um passo de 10 ml de óleo. A cada um dos passos é feito um acompanhamento da potência recebida após o feixe passar pelo líquido, esse feixe é alocado na entrada do receptor óptico para captação do valor de potência. Esses valores de intensidade foram utilizados na Equação (2) para encontrar a absorvância, gerando o gráfico em relação de altura da coluna de líquido para encontrar a inclinação da reta.

Sabendo as dimensões do recipiente acrílico utilizado, foi feito um cálculo matemático do volume para encontrar a altura calculada da coluna de líquido, baseada no volume que era acrescentado em cada passo. Para água, o volume é a soma de líquido inserido durante os passos, tendo realizado 39 passos. Para o óleo foi acrescentado menos líquido em cada passo (10ml). Menos passos de inserção de óleo, foram necessários para que o feixe do *laser* fosse totalmente absorvido. A equação utilizada pode ser vista abaixo:

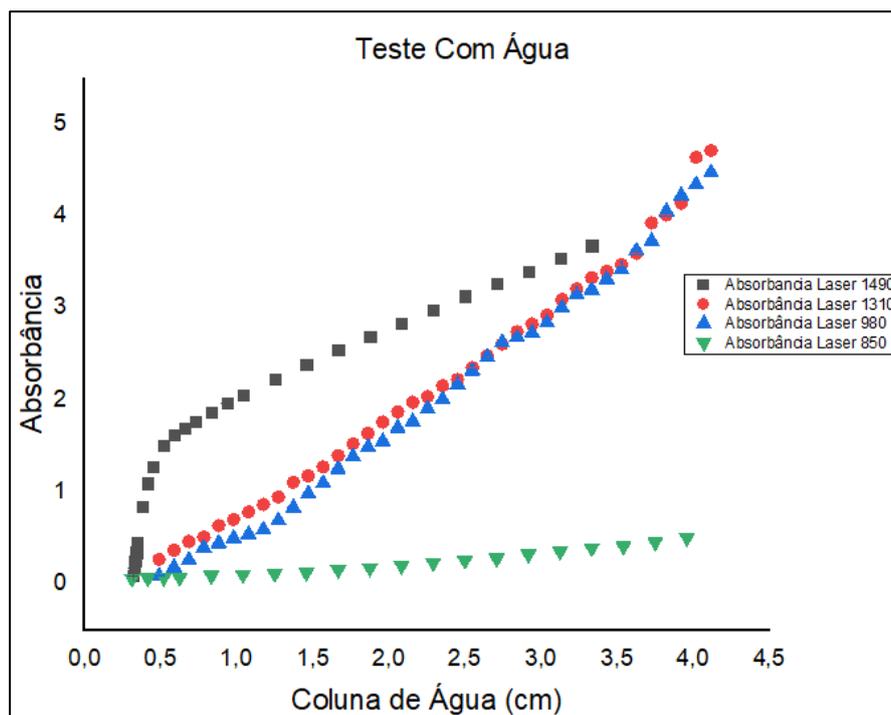
$$Alt_{liq} = \left( \frac{Vol_{passo}}{L_{reciente} * C_{reciente}} \right) \quad (12)$$

A variável  $Alt_{liq}$  representa a altura da coluna de líquido no ponto,  $Vol_{passo}$  o volume de líquido inserido no recipiente no passo e  $L_{reciente} C_{reciente}$  são respectivamente a largura e comprimento do recipiente acrílico utilizado. Esses dados de altura de líquido calculado são importantes, pois com eles será possível comparar os dados de altura calculada com a altura encontrada através dos testes. Analisando a diferença entre elas será possível gerar um fator de erro entre a altura real e altura da coluna encontrada através dos testes, isso será usado como uma constante que será acrescentada nos dados de altura encontrados nos testes dinâmicos, posteriormente realizados.

#### 4.2.1 RESULTADOS DOS TESTES ESTÁTICOS COM MEDIDOR ÓPTICO KING-60S

Para os testes que realizados utilizando como receptor o equipamento de medição óptica King-60s foi montada uma bancada com emissor alocado acima do recipiente e o receptor abaixo. O feixe do emissor foi alinhado com o receptor e a partir disso acrescentou-se o líquido. Nestes testes, foram acrescentados os resultados obtidos no trabalho de Ostrufka (2019), que realizou experimentos com água para os comprimentos de onda de 1490nm e 850nm, utilizando como receptor o medidor de potência óptico. Na Figura 28 é demonstrado os gráficos encontrados para os testes realizados com água, os resultados foram acrescidos do erro absoluto do aparelho de medição que é de 0,001% para mais ou para menos, porém devido a escala não aparecem.

Figura 28: Resultados obtidos para os testes com água.

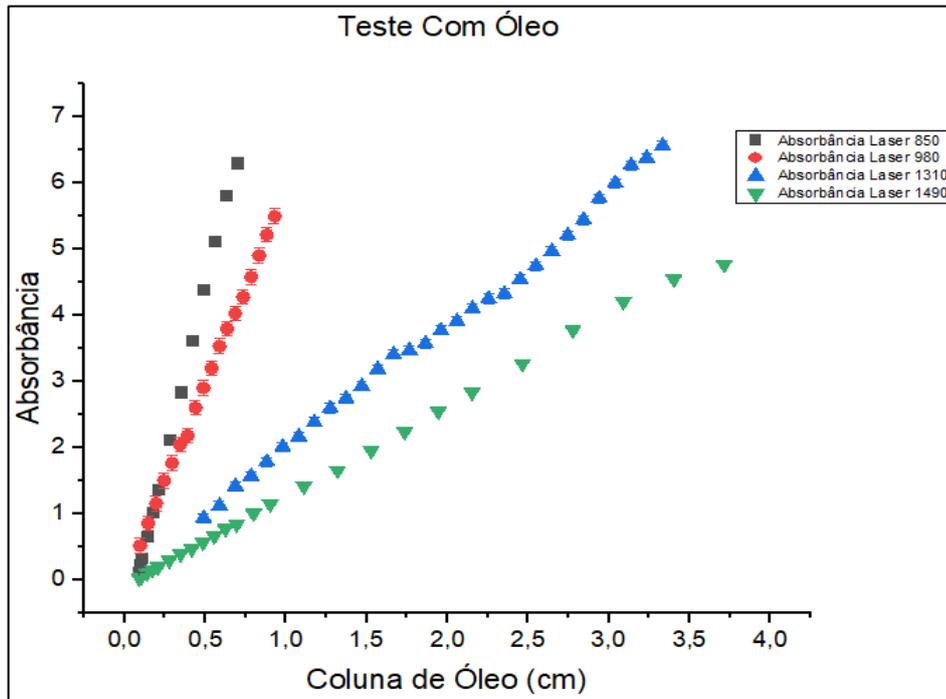


Fonte: Autor

No gráfico da figura 29, é demonstrado os resultados obtidos para os testes com óleo, utilizando o sistema de medição óptico King-60s. Nestes experimentos acrescentou-se os resultados

obtidos por Ostrufka (2019) para os comprimentos de onda de 1490nm e 850nm, acrescentando os erros provenientes do aparelho de medição.

Figura 29: Teste realizado com óleo.



Fonte: Autor

De posse dos resultados obtidos das intensidades do feixe do *laser* após passar pelo líquido, determinou-se a constante K, plotando o gráfico de absorbância em relação à altura do líquido. A partir disso, utilizou-se a interpolação linear, para identificar a inclinação da reta. Na Tabela 1 são apresentadas as constantes de inclinação da reta encontradas nos testes, com água e com óleo, utilizando os comprimentos de onda de 980nm, 1310nm e os resultados obtidos por Ostrufka (2019) para cada caso.

Tabela 1: Constantes de inclinação da reta encontradas a partir dos testes e as respectivas incertezas.

	K (inclinação da reta)	Incerteza
$K_{ag_{850}}$	0,13	$\pm 0,01$
$K_{ag_{980}}$	1,25	$\pm 0,02$
$K_{ag_{1310}}$	1,17	$\pm 0,02$
$K_{ag_{1490}}$	0,76	$\pm 0,01$
$K_{ole_{850}}$	10,48	$\pm 0,09$
$K_{ole_{980}}$	5,90	$\pm 0,04$
$K_{ole_{1310}}$	1,93	$\pm 0,02$
$K_{ole_{1490}}$	1,35	$\pm 0,01$

Fonte: Autor

Organizando o sistema de Equações (9), é possível tirar duas equações relacionando a absorção com a constante de inclinação e a altura de cada líquido utilizado no experimento. A partir dessas equações (Equação (13) e Equação (14)) é possível determinar a altura de cada fase existente no sistema. As equações equivalentes de absorção são demonstradas abaixo:

$$Abs_{1310} = K_{ag_{1310}} * a_{ag} + K_{ole_{1310}} * a_{ole} \quad (13)$$

$$Abs_{980} = K_{ag_{980}} * a_{ag} + K_{ole_{980}} * a_{ole} \quad (14)$$

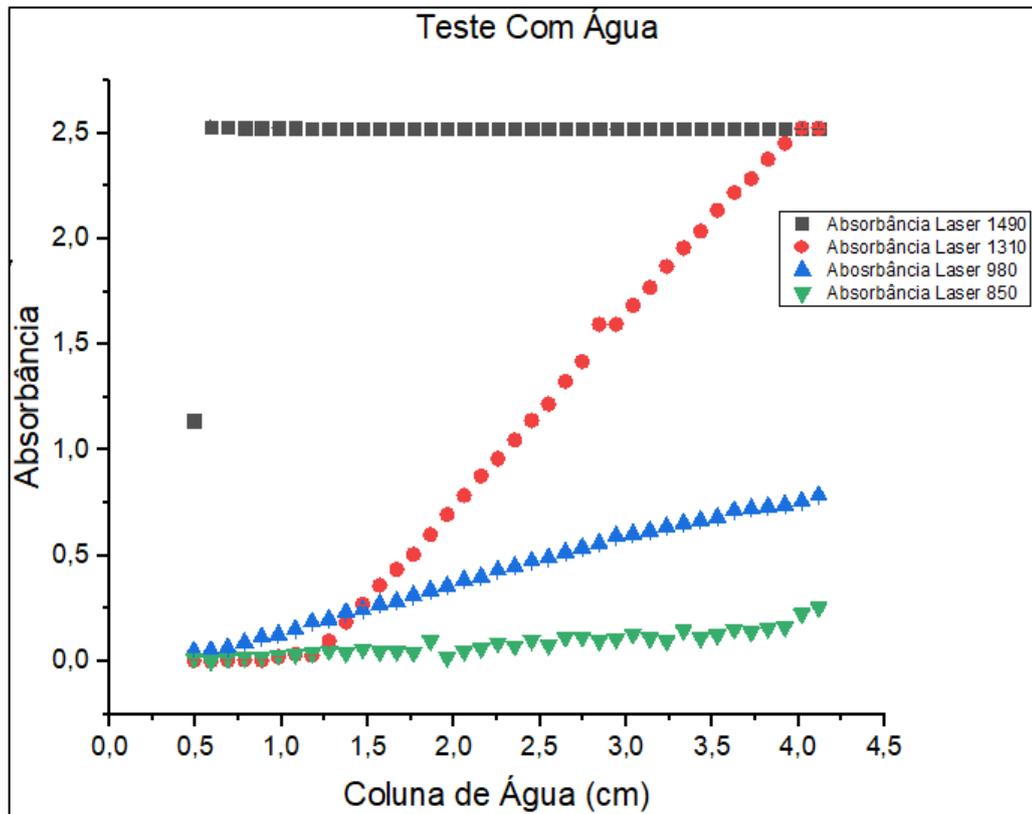
#### 4.2.2 RESULTADOS TESTES ESTÁTICOS COM MEDIDOR DA PLACA

Os testes com líquidos foram refeitos, seguindo os mesmos passos anteriores, porém agora utilizando, para receber o feixe do *laser*, o fotodiodo projetado para a placa e recebendo os dados no computador. Os dados são convertidos em valores de tensão no LabView, utilizados para encontrar os valores de absorbância, seguindo a Equação (3), e gerar o gráfico para identificar a constante de inclinação da reta ( $k$ ). Os resultados obtidos são utilizados, posteriormente, para encontrar os valores de altura de líquido nos testes dinâmicos.

Para realização dos testes foi projetada uma bancada de experimentos que se pudesse utilizar o emissor (*laser*) logo acima do recipiente acrílico e o receptor (fotodiodo) logo abaixo do recipiente, utilizado o computador para receber o sinal e processar os dados.

Estes testes seguiram o mesmo procedimento anterior, porém foi testado somente para água. Devido às questões abordadas anteriormente, em relação aos problemas em se utilizar óleo *crude* na bancada de testes dinâmicos, e também em relação ao tempo limitado de trabalho, optou-se realizar os testes somente com água a partir desta etapa. O LabView faz a requisição dos dados para o microcontrolador continuamente e recebe, em média, 85 amostras por segundo. A partir desse momento, foram incluídos os *lasers* utilizados no trabalho de Ostrufka (2019), recebendo o sinal na placa de medição. Foram encontradas as constantes de inclinação da reta para cada caso e os resultados são demonstrados na Figura 30.

Figura 30: Resultado gráfico dos experimentos com líquido estático.



Fonte: Autor

Utilizando a ferramenta de interpolação linear nos gráficos de absorção em função da altura da coluna de água, pode-se obter a constante de inclinação da reta (Tabela 2). Como demonstrado nas Equações (13) e (14), com a constante K e os valores de absorção é possível determinar a altura de cada fase existente no sistema. A Equação (9) pode ser facilmente adaptada para se encontrar as alturas em relação aos comprimentos de onda de 1490nm e 850nm, como pode ser visto nas Equações (15) (16) (17). Com a constante K e os valores de absorção é possível determinar a altura de cada fase existente no sistema em relação a cada *laser*.

$$\begin{bmatrix} \left( \frac{a_{ag} + a_{ole} + a_{ar}}{l} \right) \\ K_{ag_{1490}} * a_{ag} + K_{ole_{1490}} * a_{ole} \\ K_{ag_{850}} * a_{ag} + K_{ole_{850}} * a_{ole} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ Ab_{1490nm} \\ Ab_{850nm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Abs_{1490} = K_{ag_{1490}} * a_{ag} + K_{ole_{1490}} * a_{ole} \quad (16)$$

$$Abs_{850} = K_{ag_{850}} * a_{ag} + K_{ole_{850}} * a_{ole} \quad (17)$$

Tabela 2: Constantes de inclinação da reta e as respectivas incertezas.

	K (inclinação da reta)	Incerteza
$K_{ag_{850}}$	0,042	± 0,004
$K_{ag_{980}}$	0,213	± 0,002
$K_{ag_{1310}}$	0,899	± 0,005
$K_{ag_{1490}}$	-	-

Fonte: Autor

#### 4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com os valores da constante de inclinação da reta (K) e absorvância, encontraram-se os valores de altura de cada líquido, a partir das Equações 13, 14, 16 e 17. Este cálculo foi realizado com o intuito de identificar a diferença entre os valores de altura da coluna de líquido encontrados nos testes e os valores de altura real, encontrados através do cálculo do volume. Com essa diferença gera-se uma constante, que é a média destes valores de altura em cada ponto. Essa média é utilizada nos resultados dos testes dinâmicos, como um fator de compensação nos valores de altura de líquido encontrados. Em cada passo foi realizado a diferença entre elas e foi feito a média do valor desta diferença. Esse valor da média é a constante utilizada para compensação das alturas de líquido em cada *laser* nos testes

dinâmicos. Com o valor desta diferença de alturas é possível determinar o erro absoluto nas medições. A equação utilizada para encontrar as alturas e a tabela com os valores da constante de compensação da altura (A) é demonstrado abaixo:

$$a = \frac{Abs}{K} \quad (18)$$

Essa equação é um rearranjo geral das equações 13, 14, 16 e 17, a constante de inclinação da reta (K), a absorbância (Abs) e altura (a) da coluna de líquido. Foi aplicada para cada *laser* nos testes realizados. Abaixo são demonstrados os valores da constante de compensação da altura (A) encontrada para cada caso e o respectivo desvio padrão encontrado nas medições.

Tabela 3: Valores de constante de compensação da altura para cada *laser*, o desvio padrão e o erro absoluto nas medições.

	A (cm)	Desvio Padrão
<i>Laser</i> 1490 <sub>água</sub>	-	-
<i>Laser</i> 1310 <sub>água</sub>	1,11	0,20
<i>Laser</i> 980 <sub>água</sub>	0,31	0,07
<i>Laser</i> 850 <sub>água</sub>	0,67	0,34

Fonte: Autor

Os testes foram realizados para todos os comprimentos de onda e mantendo os mesmos padrões de execução. Os resultados encontrados para o *laser* de 1490nm, demonstraram que com mínima altura de coluna de água o feixe já foi completamente absorvido, como demonstrado no capítulo 2.3.1. No trabalho realizado por Zhao et al. (2004) foi relacionado os comprimentos de onda do espectro infravermelho a substâncias como água e óleo, demonstrando que o comprimento de onda de 1490nm se encontra no pico de absorção da água. Como o *laser* foi logo absorvido, não pode-se gerar uma constante de inclinação da

reta (Figura 31). Com o primeiro passo de inserção de água no recipiente, o feixe já se encontrava completamente absorvido, demonstrando que este comprimento de onda é muito bom para detectar a presença, porém não a quantidade de água.

Em relação aos testes realizados com o comprimento de onda de 1310nm, o feixe se encontra no limite anteriores ao pico de absorção da água. Os resultados demonstraram que o feixe foi completamente absorvido com 4 cm de altura de coluna de água no recipiente. Por mais que ele esteja perto do pico de absorção da água, foi possível obter uma altura maior de líquido no recipiente, em relação ao teste realizado com o comprimento de onda de 1490nm, até o feixe ser completamente absorvido. A constante da diferença de altura encontrada para esse caso, demonstra uma diferença média de 1,11cm de água entre a altura de líquido encontrada através dos testes e da altura real encontrada através do volume de água. O desvio padrão encontrado revela uma pequena dispersão das amostras em relação à média, demonstrando que o valor de diferença se manteve praticamente constante ao longo dos testes. Com as diferenças de alturas, pode-se encontrar o erro absoluto nas medições, com os valores de altura real e a altura encontrada nos testes.

O *laser* 980nm tem o seu espectro de absorção relacionado ao óleo, estando localizado no limite posterior ao pico onde o comprimento de onda é absorvido pelo líquido, isso faz com que ele não seja bem absorvido pela água, no gráfico da Figura 31 é demonstrado que, ao chegar aos 4 cm de altura da coluna de água, a absorção está em 0,8, que é um valor inferior em relação a absorção obtida nos testes com os *lasers* de 1310nm e 1490nm, que é 2,5 no valor máximo. O *laser* apresentou o menor valor de constante de altura dentre todos os testes que foram realizados, os resultados de altura da coluna de líquido encontrados neste experimento estão próximos dos resultados da altura encontrados a partir do volume de água, representando um potencial deste comprimento de onda quando submetido a água. Além disso, apresentou a menor dispersão das amostras da diferença de altura em relação à média, mostrando uma consistência nos resultados ao longo das inserções de líquido que eram realizadas no recipiente.

O teste realizado com o *laser* de 850nm apresentou um resultado bastante disperso, como demonstrado no gráfico da Figura 31, o feixe obteve o valor máximo de absorção em 0,25 em relação à altura máxima de água, passando praticamente sem sofrer absorção ao longo da altura da coluna de água existente no recipiente. No trabalho de Zhao e

colaboradores (2004) é demonstrado no gráfico que o comprimento de onda de 850nm está no pico de absorção do óleo, os resultados obtidos convergem com o que foi demonstrado no trabalho dos autores, embora a constante de altura encontrado esteja menor que os encontrados para o *laser* de 1310nm, a dispersão das amostras em relação à média é maior que a encontrada nos outros testes com os *lasers*.

No próximo capítulo será descrito os experimentos realizados na bancada de escoamento bifásico, demonstrando a implementação da seção de testes, o desenvolvimento e resultados obtidos. Os valores obtidos neste capítulo, contribuem para o seguimento dos próximos testes, com os valores da constante de inclinação da reta e os valores da constante de compensação de altura. Para cada caso é possível encontrar os resultados nos testes de bancada bifásica.

## 5. TESTES DINÂMICOS

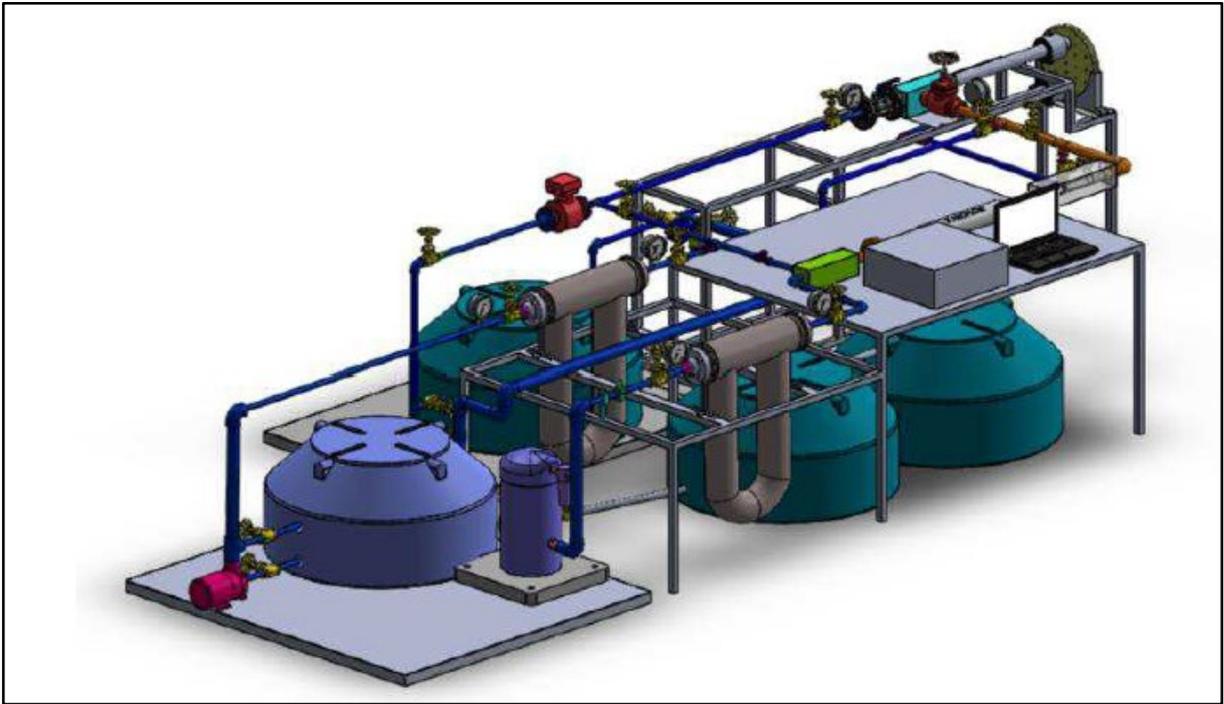
Neste capítulo serão apresentados os materiais específicos utilizados para desenvolver os testes com líquido dinâmico. Os resultados obtidos nos testes estáticos, demonstrados no capítulo anterior, são utilizados para encontrar os valores de fração a vazio existente na tubulação.

### 5.1 MATERIAIS E MÉTODOS TESTES DINÂMICOS

Para realizar os testes dinâmicos, uma seção de testes foi desenvolvida. A seção foi anexada na bancada experimental de escoamento existente no laboratório T2F do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A bancada experimental foi desenvolvida em trabalhos anteriores, a princípio, para possibilitar a geração de diferentes escoamentos de até três fases distintas, sendo uma fase gasosa e duas fases líquidas. Para fase gasosa, o ar é utilizado, devido à facilidade de ser manipulado e porque os gases extraídos durante a perfuração de poços são altamente inflamáveis e de difícil obtenção.

A bancada experimental existente no laboratório, foi idealizada, inicialmente, para ser usada com duas fases líquidas (água e óleo *crude*), porém modificações deveriam ser realizadas para que se pudesse usar o óleo. Ocorre que o óleo é extremamente inflamável e volátil, o que acarretaria em modificações preventivas que possibilitariam operar a bancada com a segurança necessária, tanto para os equipamentos, quanto para as pessoas que fossem operar e realizar os testes. Outro problema ao se trabalhar com óleo é a dificuldade em realizar a limpeza dos equipamentos, o procedimento demanda tempo e a bancada experimental é compartilhada com outros pesquisadores que realizam seus experimentos. Devido a estes motivos os testes foram realizados somente com uma fase líquida (água). Uma outra bancada experimental, que comporta testes com óleo *crude*, está em fase final de preparo, porém até a execução dos testes ela ainda não estava disponível para uso. Essa bancada terá a segurança necessária para realizar os experimentos, facilidade para realizar a limpeza e higienização dos equipamentos, bem como, comportar o escoamento com duas fases líquidas e fase gasosa. Uma imagem em 3D (Figura 31) foi gerada em um *software* CAD para demonstrar alguns aspectos da bancada utilizada nos testes.

Figura 31: Imagem 3D da bancada experimental utilizada.



Fonte: Autor

Como demonstrado anteriormente, a bancada inicialmente tinha sido pensada para ser utilizada com água e óleo, porém devido os problemas encontrados para a utilização de óleo impossibilitaram seu uso. Por este motivo é visto na imagem os tambores de armazenamento de líquido, quer seriam usados para água e óleo, contudo armazenam somente água.

A bancada possui uma série de equipamentos que vão permitir gerar escoamentos bifásicos, o líquido é armazenado em tanques que possuem bombas hidráulicas para ajudar a fluir do tanque para a tubulação, possuindo três ramais, dois deles para escoamento de líquido e outro para escoamento de ar comprimido. Na saída do ramal usado para líquido e o ar comprimido, existem medidores do tipo *Coriolis*, da marca Emerson, que podem ser utilizados para medir a vazão, a densidade, a temperatura e outras grandezas que sejam necessárias. Existe um ponto na bancada onde as duas fases (gasosa e líquida) se encontram, esse ponto é chamado de misturador de fase, que é onde ocorre a mistura das duas fases. A seção de testes, em que são realizados os experimentos, foi montada após essa etapa de mistura, continuando o andamento da bancada o escoamento retorna ao tanque de

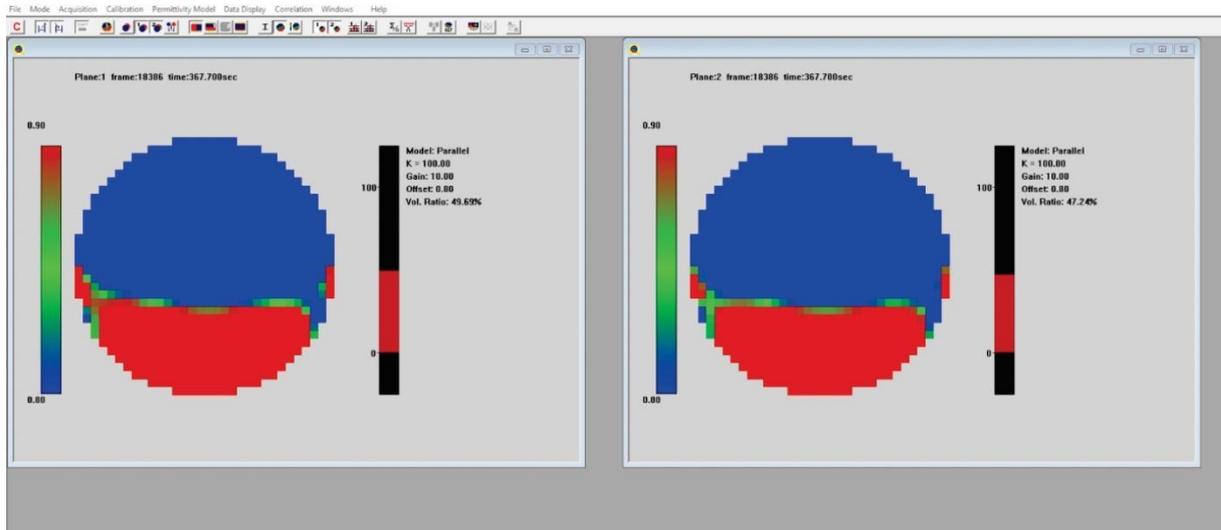
armazenamento. Para observar e coletar os resultados dos parâmetros da bancada multifásica o *software* LabView é utilizado, assim é possível analisar e armazenar os valores obtidos.

A bancada multifásica ainda conta com um Tomógrafo de Capacitância Elétrica (ECT), modelo PTL300E, que tem como papel detectar a quantidade existente de cada fase que percorre a tubulação. Este modelo de tomógrafo permite medição de sistema em dois planos e é controlado por computador para captura e visualização de dados de capacitância em um ou dois planos. A partir do software ECT32v2 de controle é possível converter os dados de capacitância em arquivos de imagem que demonstram a quantidade de cada substância que percorre a tubulação, os valores obtidos no tomógrafo são usados para comparação com os resultados obtidos com a seção de testes com o *laser*.

Como demonstrado na seção 2.3.4, o ECT funciona com eletrodos alocados ao longo de um cilindro. Identificando a diferença do dielétrico de cada material que percorre o tubo, conseguindo determinar a proporção de concentração de cada substância. O modelo de ECT usado destina-se, principalmente, ao uso com misturas de dois materiais, com constantes dielétricas diferentes. Contém em seu plano de 2 a 12 eletrodos e também eletrodos de proteção. A mudança de capacitância medida entre quaisquer dois eletrodos causada por um objeto com uma dada permissividade irá variar dependendo da localização do objeto, quando os eletrodos estão alocados em uma seção transversal circular quanto mais próximo das paredes o material em análise estiver, mais sensível serão os resultados.

A Figura 32 apresenta um exemplo do processamento dos dados na tela do *software* ECT32. A área em vermelho representa o líquido (água) e a área em azul representa o gás que percorre a tubulação. A cor entre as duas áreas indica onde as fases se encontram.

Figura 32: Representação do sistema de medição ECT.



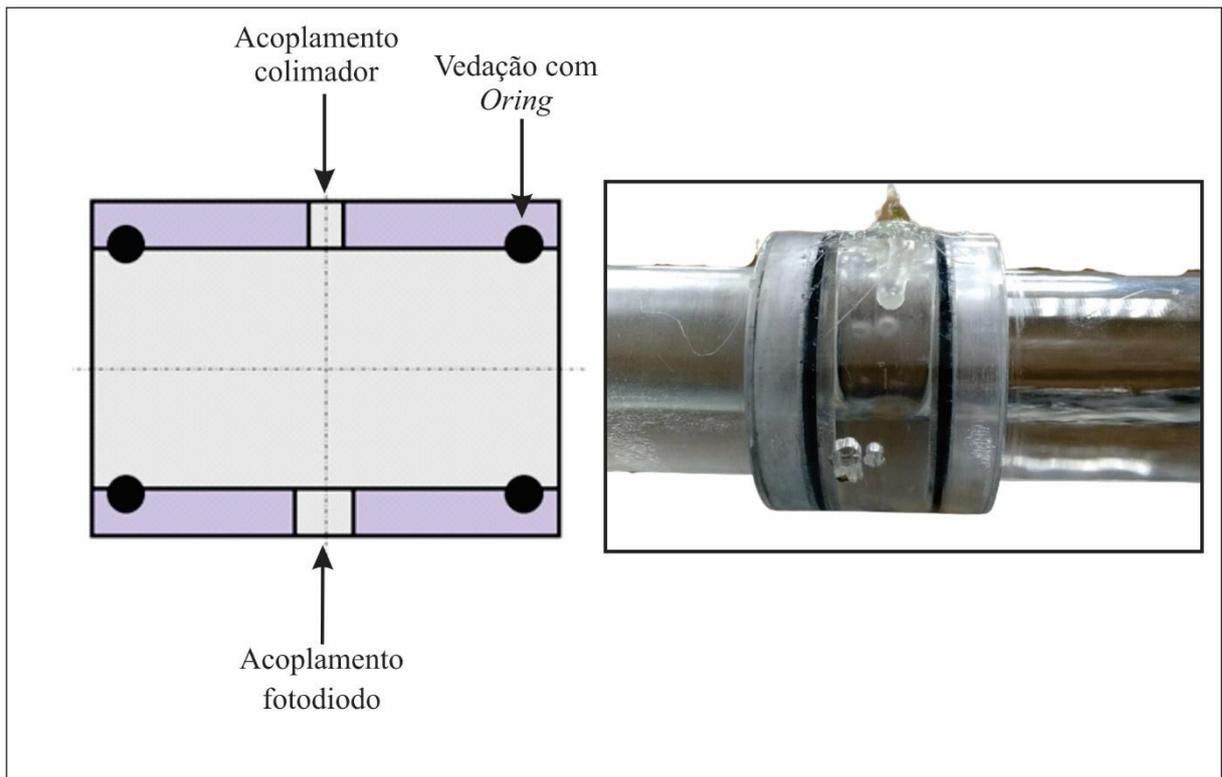
Fonte: Autor.

A seção de testes desenvolvida para o *laser* foi colocada logo após o tomógrafo na bancada. Ela foi desenvolvida com o objetivo de realizar o alinhamento entre emissor e receptor luminoso. Utilizando um tubo acrílico com um diâmetro interno que se adequasse com a tubulação existente na bancada e com uma espessura de parede onde pudesse ser alocado tanto o emissor quanto o receptor. Levando em conta problemas para realizar alinhamento e as perdas no sinal acarretadas pela espessura da parede acrílica, foi realizado furos passantes no tubo, para avaliar a absorbância sem a interferência do acrílico no feixe do *laser* deixando-o em contato direto com os materiais em análise.

A seção faz a emenda entre dois tubos acrílicos com diâmetro de duas polegadas (2"). É utilizado um *oring* de cada lado da seção para auxiliar na vedação da tubulação em cada encaixe. O alinhamento entre emissor e receptor foi feito com a ajuda do cartão para visualização do feixe luminoso (Figura 27), após essa etapa de alinhamento foram obtidos os valores no programa LabView para identificar se o alinhamento estava correto. Os componentes foram fixados permanentemente com cola especial para materiais acrílicos, em seus respectivos lugares, fazendo com que o alinhamento se mantivesse mesmo com trepidações ocasionado pelo escoamento do líquido na bancada. A Figura 33 demonstra a seção de testes desenvolvida, destacando os espaços para alocação do colimador emissor e do

receptor fotodiodo, além de demonstrar onde foram alocados os *orings* para vedação das junções com as duas partes da tubulação da bancada do laboratório.

Figura 33: Seção de testes desenvolvida, em destaque o acoplamento do colimador e fotodiodo.

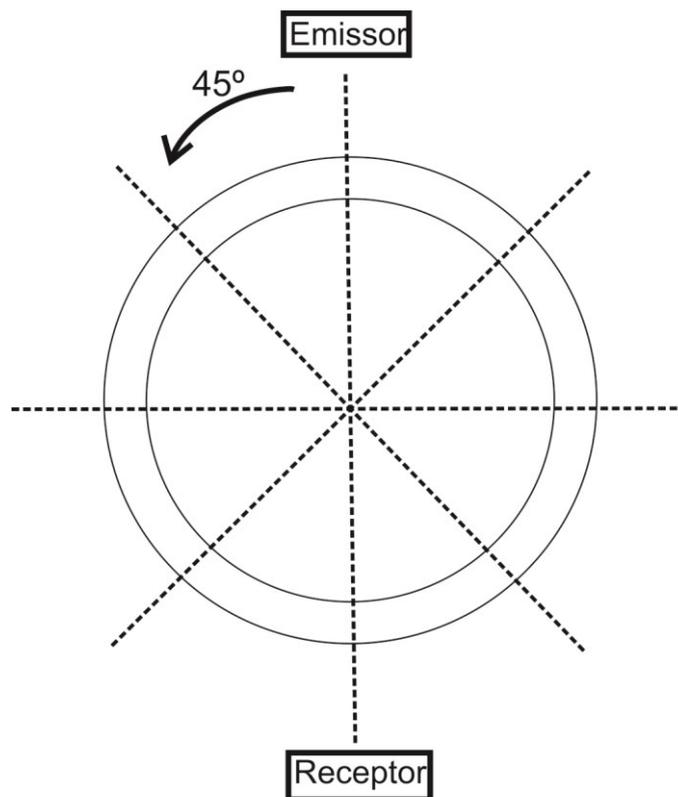


Fonte: Autor.

A seção de testes desenvolvida permitiu realizar experimentos em diferentes angulações para observar a resposta do sistema aos diferentes regimes de escoamento na bancada. Os testes foram realizados emulando dois tipos diferentes de regimes de escoamento na bancada, o pistonado e o estratificado ondulante, além disso, a seção de testes possibilitou testar os quatro comprimentos de onda envolvidos no trabalho: 850nm, 980nm, 1310nm e 1490nm. As angulações testadas seguiram o padrão de espaçamento de 45°, ou seja, emissor e receptor foram fixados em lados opostos e a seção de testes é rotacionada em 45° cada vez que fosse necessário realizar testes em outras posições, sendo elas em 0°, 45°, 90°, 135° e

180°, levando em conta o referencial de emissor como ponto 0°. A Figura 34 exemplifica essas variações de angulação utilizada para realizar os testes.

Figura 34: Variação de angulação de 45°.



Fonte: Autor

A bancada de testes foi configurada para emular dois regimes de escoamento diferentes, o pistonado e o estratificado ondulante, esses dois testes foram realizados em cada angulação descrita anteriormente. Coletando os valores de vazão de água e ar, para que se pudesse repetir na bancada os mesmos valores em cada teste. A bomba de água pode ser configurada com exatidão para reproduzir a mesma vazão, contudo a vazão de ar era feita através de um registro manual, não sendo precisa, o que acarretou em proporções de água e ar com pequenas diferenças em cada teste. Além disso, cada teste foi repetido três vezes para se determinar a repetitividade dos valores obtidos.

No fluxograma apresentado na Figura 24 foi demonstrado que primeiro é necessário executar os testes estáticos para determinar o comportamento do sistema com os materiais a serem analisados e encontrar a constante de inclinação da reta (K) em cada comprimento de onda. Nos testes estáticos, foi utilizado a constante (K) para encontrar os valores de altura de cada líquido, esses valores foram comparados com os valores de altura calculados através da equação de volume do recipiente acrílico. Adicionalmente ao cálculo, foi efetuado a média da diferença dos resultados para realizar a calibração da altura encontrada nos testes posteriores. Nos testes dinâmicos, foram coletados os resultados da diferença de intensidade do *laser*, com esses valores foi calculada a absorvância luminosa, rearranjando a Equação (8), pode-se encontrar a altura de cada substância percorrida no tubo em função da absorvância luminosa e da constante de inclinação da reta (K). Com a altura determinada, calculou-se a fração de água e ar no tubo.

Para fins de comparação com os dados obtidos pelo tomógrafo, foi utilizado o teste realizado com angulação em 0°, sendo comparados os dois para observar a proximidade entre os resultados obtidos. Com a absorvância e a constante de inclinação da reta, foi encontrada a altura. Essa altura foi acrescida do fator de ajuste de altura, e com esses valores e a dimensão do tubo foi calculada a porcentagem de líquido existente.

Nesta seção foi apresentada a metodologia usada nos testes, além dos materiais que compuseram os experimentos, nas próximas seções serão apresentados os resultados obtidos e a discussão sobre os mesmos.

## 5.2. RESULTADOS TESTES DINÂMICOS

Os testes foram realizados na bancada bifásica do laboratório T2F da UFSC, a parte líquida, água, e o gás, ar. Como descrito anteriormente, a bancada possui inversores de frequência que são responsáveis por auxiliar a impulsionar a água pelos dutos, além disso, possui um ramal de ar comprimido responsável por proporcionar ar pelos dutos. As duas fases se encontram em um misturador, onde é feita a mistura da água e ar. Para comparação dos resultados, o tomógrafo ECT foi utilizado. Através dele foram obtidos os valores da porcentagem de líquido existente dentro do tubo. O equipamento estava calibrado para que fosse detectada a água com precisão. O processo consiste em preencher totalmente o tubo,

onde os eletrodos capacitivos estão alocados, com água e fazer um processo de calibração indicado no *software* do equipamento, os padrões gerados são anexados nas próximas leituras, melhorando a precisão do equipamento na identificação do líquido.

Os regimes de escoamento possuem diferenças, que dependem de algumas características, como: velocidade superficial de cada fase, orientação e geometria das tubulações e propriedade dos fluidos. Os regimes vão variar, também, conforme o duto, ou seja, dutos com orientação vertical terão diferentes tipos de regimes de escoamento que dutos horizontais. No capítulo 2.1 são apresentados alguns dos regimes de escoamento encontrados nas duas orientações. Antes de realizar os testes com *laser* na bancada, foi feito alguns experimentos para observar os tipos de regime de escoamento que poderiam ser obtidos e que poderiam ser usados nos testes com o *laser* posteriormente. O inversor de frequência era ajustado em um valor fixo e o ar era liberado pouco a pouco com a válvula manual. Com esses testes obtiveram-se duas configurações de regime de escoamento diferentes que foram usadas ao longo dos testes realizados com *laser*, o estratificado ondulante e o pistonado.

Como demonstrado nos testes estáticos, o *laser* de comprimento de onda de 1490nm, com uma fina camada de água já foi totalmente absorvido, isso fez com que não se prosseguisse na utilização deste comprimento de onda nos testes na bancada de escoamento. Outro ponto a ser destacado é a pequena absorção sofrida pelo feixe de 850nm. Além disso, a grande dispersão dos resultados obtidos em relação à média, fizeram com que também não se utilizasse esse comprimento de onda para os testes dinâmicos. Os comprimentos de onda de 1310nm e 980nm foram os utilizados para os testes na bancada, os valores da constante de inclinação da reta encontrados anteriormente e fatores de ajuste da altura, são utilizados, juntamente com os valores de absorvância encontrados nos testes da bancada bifásica, para se obter os gráficos de porcentagem de ocupação água existente na tubulação no ponto onde a seção de testes está alocada.

Os *lasers* foram submetidos aos dois regimes de escoamento, seguindo o padrão de recebimento dos dados no LabView. Em paralelo, foram coletados os valores de porcentagem de ocupação de líquido no tomógrafo, esses resultados são importantes para que se possa fazer um comparativo entre os dois sistemas de medição. Os dados foram coletados e armazenados em uma tabela para que se pudessem fazer os cálculos necessários utilizando os valores

obtidos nos testes estáticos. Os gráficos dos resultados serão primeiro apresentados em relação ao *laser* de 1310nm, e depois o de 980nm. Serão apresentados os gráficos de absorvância do feixe luminoso ao longo do tempo e os gráficos dos resultados encontrados para a porcentagem de líquido existente a partir desses valores de absorvância encontrado.

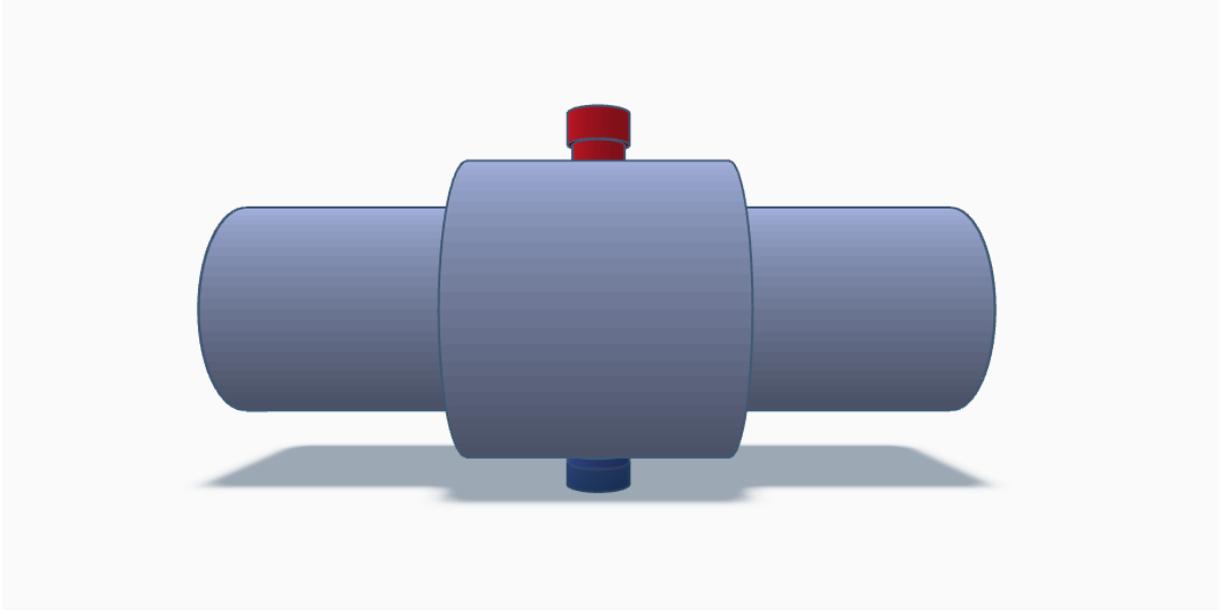
### 5.2.1 RESULTADOS *LASER* 1310nm

Os testes realizados com o *laser* de comprimento de onda de 1310nm seguiram os padrões indicados anteriormente. Primeiro serão apresentados os resultados coletados para o escoamento pistonado, em todas as angulações indicadas anteriormente, após serão apresentados os resultados para o escoamento estratificado ondulante. O escoamento pistonado é caracterizado por grandes bolhas separadas por espaços com líquido, isso acontece de forma padronizada e intermitente.

O primeiro teste foi realizado com angulação em 0°, isto é, com o emissor a cima e o receptor embaixo. Os dados foram coletados, captando em média 86 amostras por segundo, essas amostras foram armazenadas em arquivo de texto (.txt) para manipulações posteriores. Na impossibilidade de se retirar o colimador emissor e o receptor da seção de testes, visto que, eles foram colados para melhor fixação e alinhamento. Antes de cada experimento era retirado todo o líquido da bancada para que se pudesse realizar a coleta dos valores máximos. Neste momento o receptor estava recebendo o sinal sem a absorção da água, esses valores são importantes para que se possa encontrar a absorvância luminosa.

A seção de testes está posicionada depois do tomógrafo na bancada, por isso é esperado um pequeno atraso na leitura dos sinais do *laser* em relação ao tomógrafo. Primeiro serão apresentados os gráficos de absorvância para cada angulação, após será demonstrado uma comparação entre os valores encontrados para porcentagem de água, existente na tubulação, pelo *laser* e tomógrafo. A comparação feita somente para a angulação 0°. A Figura 35 mostra uma representação da seção de testes utilizada nos testes e sua angulação no momento em que era realizado o teste.

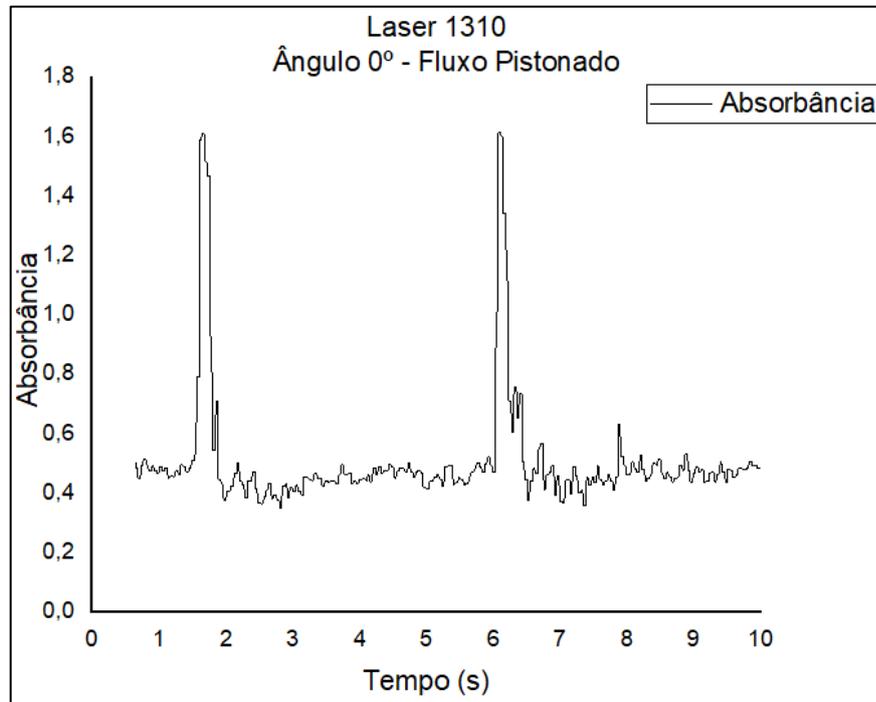
Figura 35: Representação da seção de testes com angulação em  $0^\circ$  e com *laser* 1310nm.



Fonte: Autor

No gráfico é demonstrada uma pequena amostra dos dados coletados para demonstrar o erro encontrado nas medições. Esses valores de erro foram carregados desde os testes estáticos e considerados no momento de calcular a porcentagem de ocupação de água que continha na tubulação. Na Figura 36, são mostrados os resultados obtidos para absorbância no teste realizado com ângulo de  $0^\circ$  e o comprimento de onda de 1310nm.

Figura 36: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação. 0°.



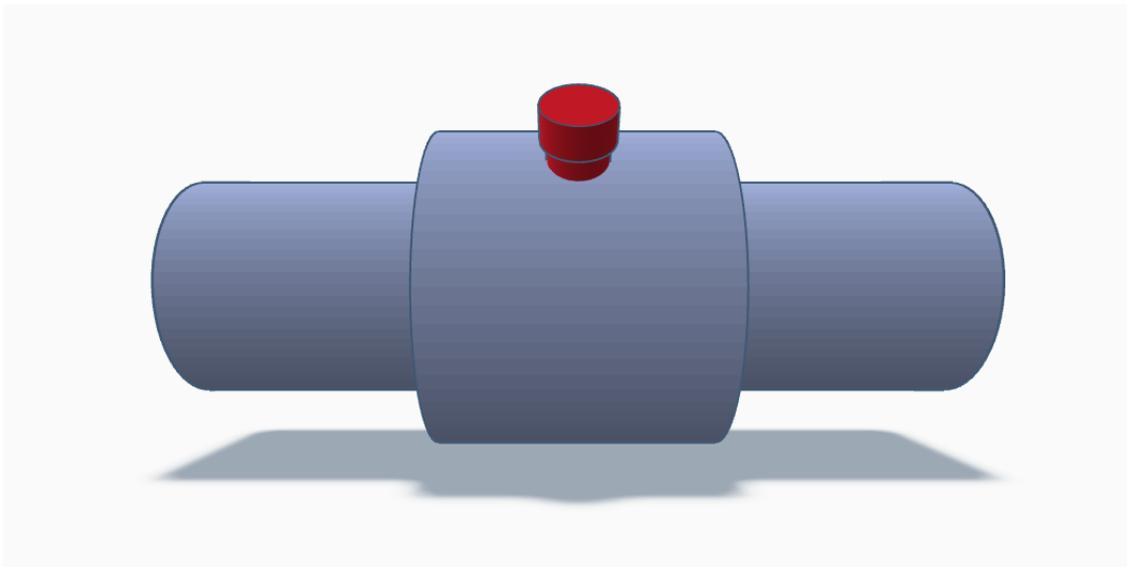
Fonte: Autor

Como é demonstrado no gráfico, o resultado do teste alternou entre picos, o sinal absorvido, tendo o seu pico por volta de 1,6, e momentos onde o sistema se mantém em média de 0,5. Isso vem de encontro ao que foi descrito sobre o escoamento pistonado na seção 2.1.2, em que o escoamento é intercalado por bolhas de gás, que no caso de testes é o ar, e líquido, água. Podem-se identificar pelo gráfico, os períodos onde o tubo está preenchido com a água, sendo indicado pelos picos de absorção. Este comprimento de onda é mais próximo do pico de absorção da água, e ela preenche totalmente o tubo de testes, o feixe do *laser* é completamente absorvido. Já nos períodos com bolha, o feixe mantém um valor praticamente constante, isso se deve ao fato de que, embora uma grande bolha ocupe o tubo, ainda existe água percorrendo a tubulação, juntamente com a bolha. Essa superfície de água, que se encontra nas extremidades inferiores da tubulação, acaba atenuando o sinal emitido pelo *laser*, causando uma pequena absorção no sinal, como é demonstrado no gráfico. O fato de ter a bolha de ar não afeta a atenuação do sinal, porque este comprimento de onda não sofre

atenuação pelo ar, passando pela bolha sem interferências, somente quando encontra a película de água é que o feixe passa a sofrer a atenuação.

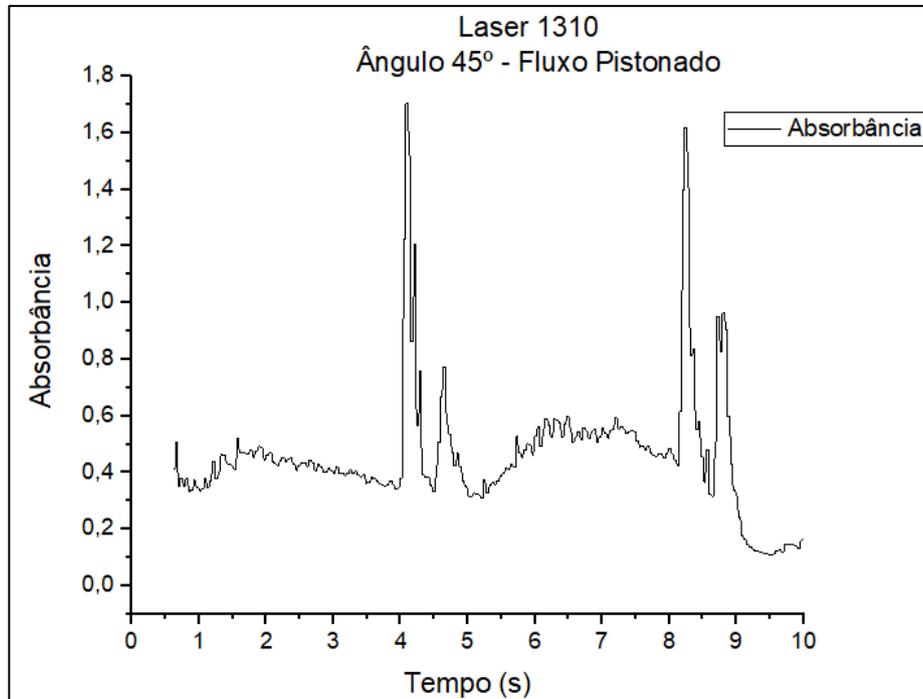
O próximo experimento foi realizado girando a seção de testes em  $45^\circ$  e realizando a coleta de forma semelhante ao realizado anteriormente. Antes de realizar o experimento a bancada foi esvaziada e os sinais máximos do feixe foram coletados novamente, para que se pudesse obter o novo valor em relação ao que foi observado anteriormente, pois nessa rotação mecânica poderia ocorrer algum desalinhamento entre emissor e receptor. Por isso, é realizada a calibração do valor máximo antes de cada teste. A Figura 37 mostra a seção de testes com inclinação do emissor em  $45^\circ$ , a Figura 38 demonstra o resultado da absorbância obtido em relação ao tempo no teste com escoamento pistonado.

Figura 37: Representação da seção de testes com angulação em  $45^\circ$  e com *laser* 1310nm.



Fonte: Autor

Figura 38: Resultado absorvância escoamento pistonado em angulação 45°.



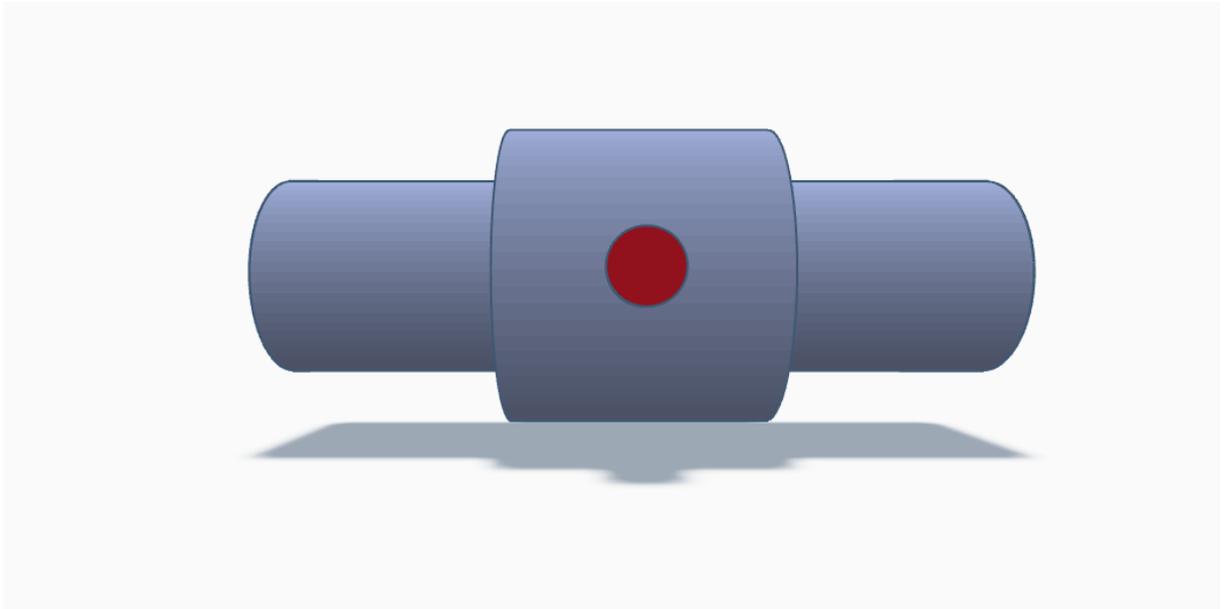
Fonte: Autor

Observando o comportamento do gráfico, se manteve o padrão encontrado no teste anterior, alternando entre os picos com água ocupando até o valor máximo do *laser* e períodos com bolha, fazendo com que o valor da absorção caia drasticamente em relação aos valores de pico. Os picos de absorção não necessariamente representam que o tubo estará preenchido completamente com água, no caso deste teste, visto que o *laser* está inclinado em 45° em relação ao ponto de origem. O pico de absorção neste teste, representa que o caminho percorrido pelo feixe, até o receptor, está completamente ocupado com água. Representando irregularidades presente nas bolhas de ar, com uma película maior de água percorrendo, faz com que a absorção nesses pontos seja maior.

No próximo experimento, a seção de testes foi inclinada em mais 45° em relação ao ponto anterior, ficando em 90° em relação da posição inicial dos testes. Os testes seguiram o mesmo padrão realizado anteriormente, na Figura 39 é demonstrado a representação do

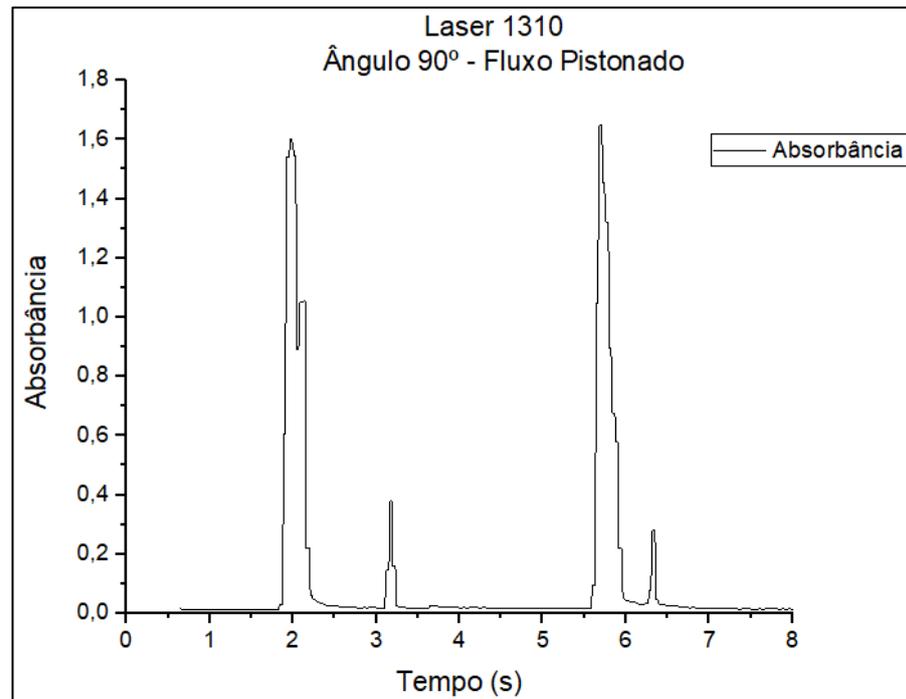
posicionamento da seção de testes para a execução dos experimentos e na Figura 40 é mostrado o gráfico da absorbância resultante.

Figura 39: Seção de testes com angulação em  $90^\circ$  e com *laser* 1310nm.



Fonte: Autor

Figura 40: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação 90°.

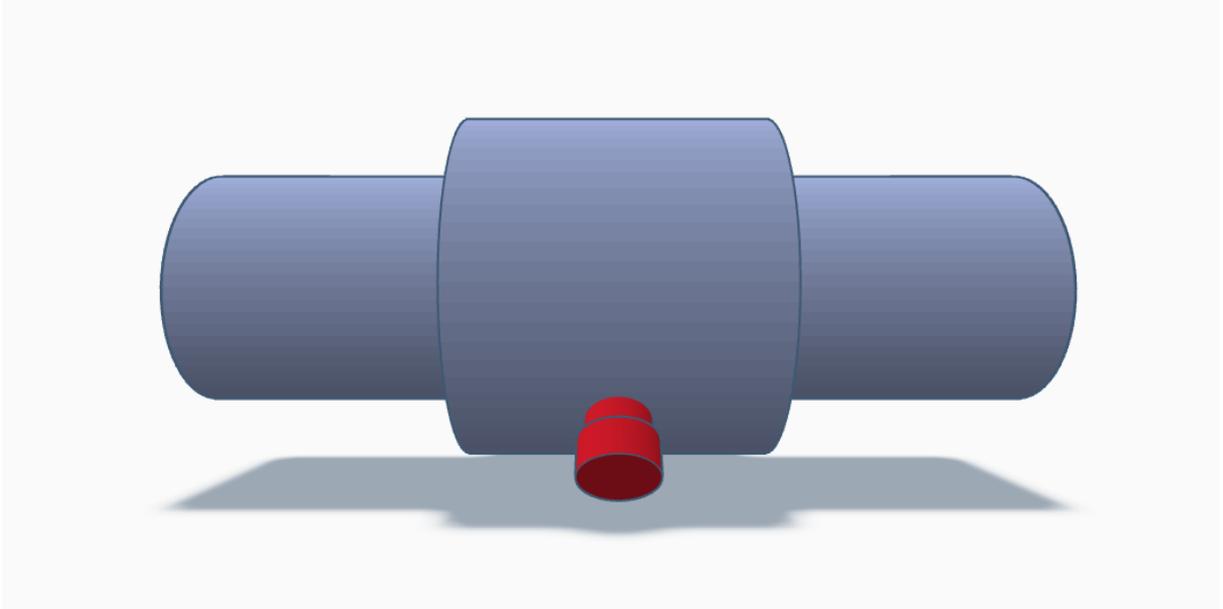


Fonte: Autor

Os valores obtidos demonstraram o prosseguimento do padrão dos resultados anteriormente encontrados. Os picos, onde o caminho percorrido pelo feixe está completamente cheio de água. Porém os caminhos com bolha estão sem nenhuma absorção luminosa, isso ocorreu porque agora o *laser* e o receptor estão alocados em uma posição onde a película de água, que percorre o escoamento junto com as bolhas, não atravessa o caminho luminoso. Há casos, como demonstrado logo após os picos de absorção, onde a água que ocupa toda a tubulação naquele ponto, ainda se ajusta a bolha de ar que está vindo, porém momentos depois o sinal já estabiliza sem água até o próximo pico ocorrer.

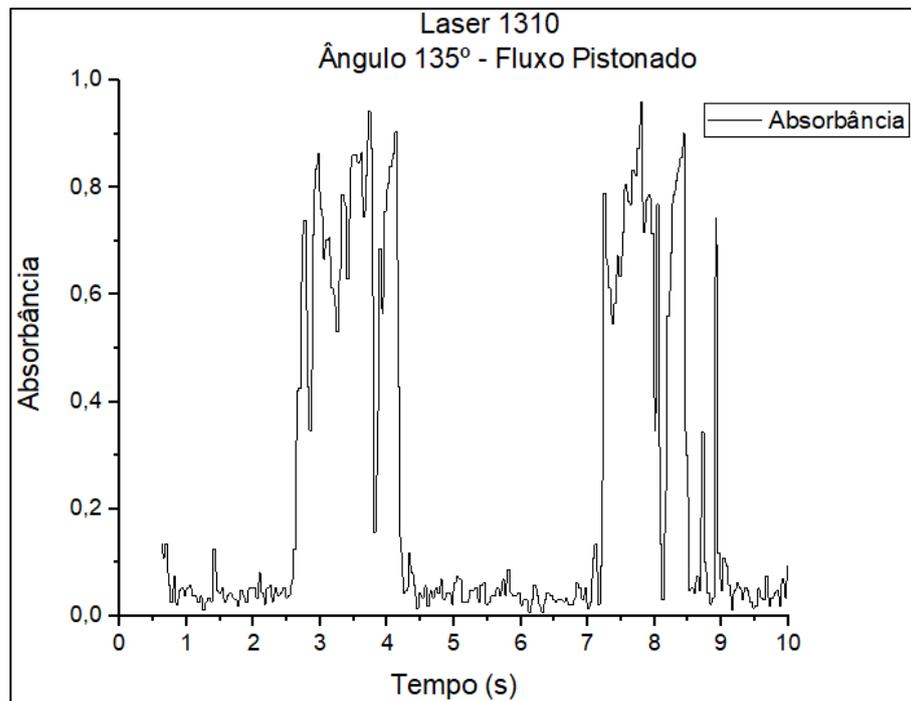
O próximo experimento foi realizado, girando a seção de testes em mais 45°, resultando em uma inclinação de 135° em relação ao ponto inicial, a Figura 41 mostra a posição da seção de teste para a realização do experimento e a Figura 42 mostra o respectivo resultado da absorbância encontrada.

Figura 41: Seção de testes com angulação em  $135^\circ$  e com *laser* 1310nm.



Fonte: Autor

Figura 42: Resultado absorbância escoamento pistonado em angulação  $135^\circ$ .

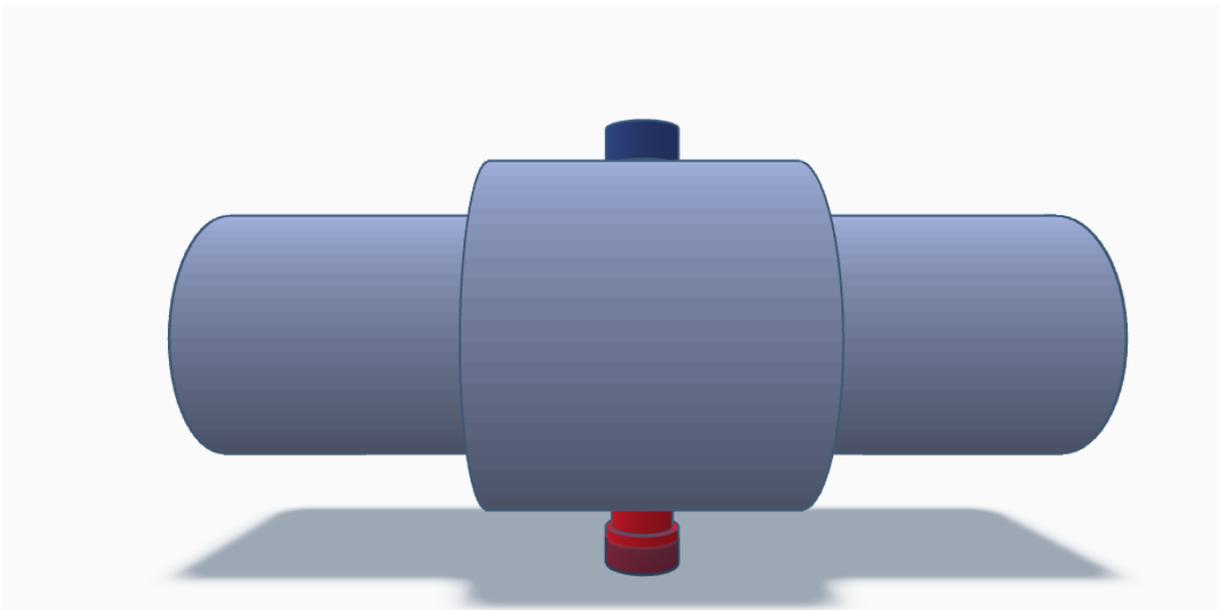


Fonte: Autor

Os resultados encontrados para absorvância com a seção de testes em  $135^\circ$  apresentaram diferenças em relação aos outros testes realizados. Como pode ser visto, os valores de absorvância têm seu pico por volta de 1, valor bem abaixo do encontrado nos testes anteriores. A principal causa disso é o *laser* sendo emitido diretamente do meio água e, nesta angulação, o feixe sofreu uma maior atenuação da refração na troca do meio, causando essa alteração nos valores recebidos. Este foi o primeiro teste realizado em que o *laser* está coberto com a água, nessa etapa a película de água que flui junto com as bolhas já encontra permanentemente o caminho percorrido pelo feixe luminoso.

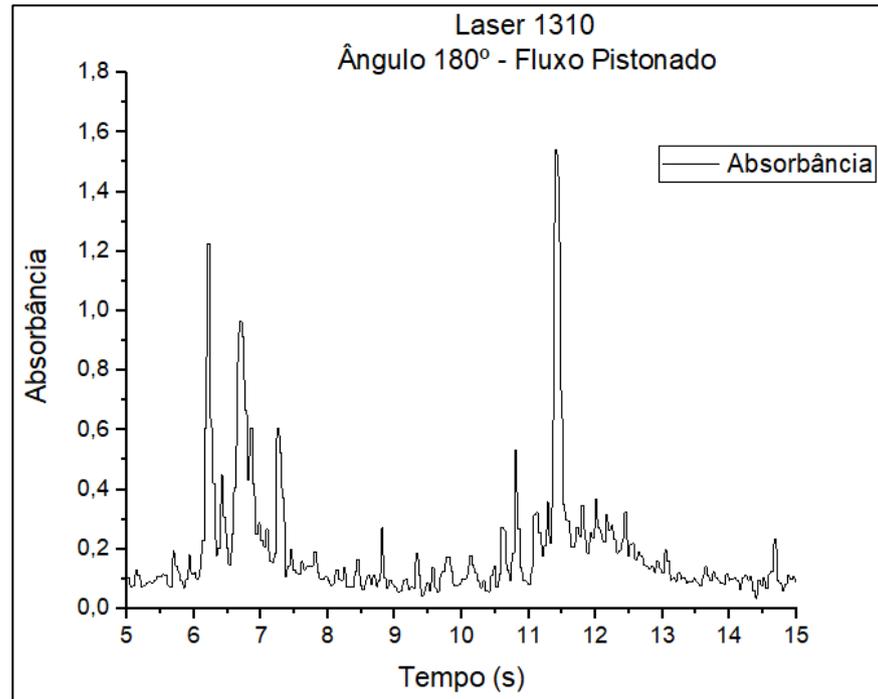
O último experimento realizado com o escoamento pistonado na bancada e o *laser* 1310 foi com a seção de testes em  $180^\circ$  em relação ao ponto inicial, com o emissor no ponto inferior e o receptor estando acima. A Figura 43 demonstra a seção e a posição em relação à inclinação, a Figura 44 apresenta o respectivo resultado da absorvância para o teste realizado.

Figura 43: Seção de testes com angulação em  $180^\circ$  e com laser 1310nm.



Fonte: Autor

Figura 44: Resultado absorvância escoamento pistonado em angulação 180°.

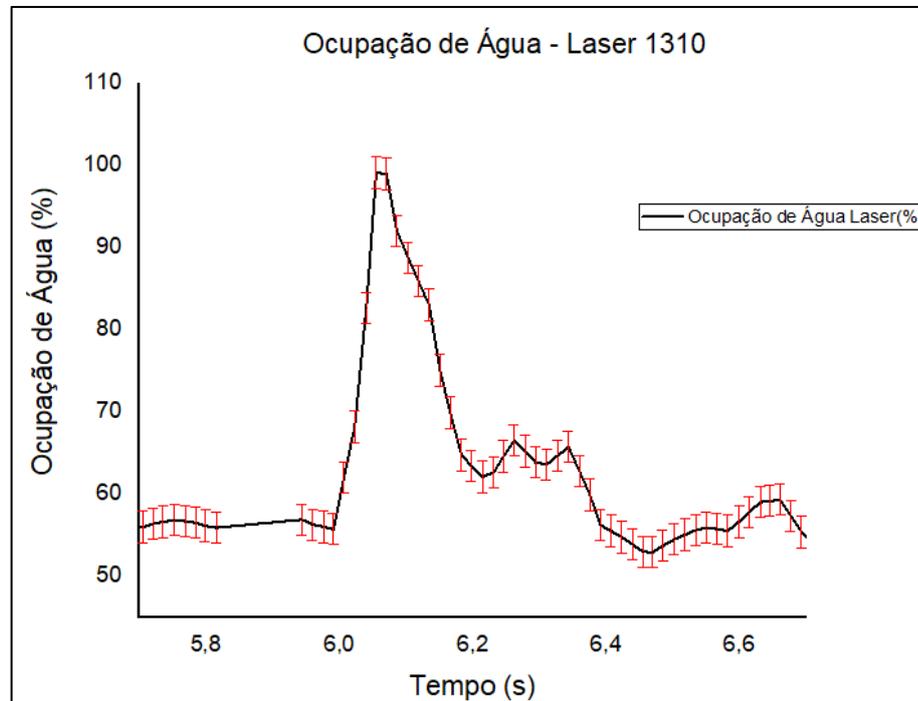


Fonte: Autor

Os resultados encontrados apresentam um padrão semelhante dos encontrados anteriormente. Contudo, o *laser* apresenta uma absorção menor para os resultados anteriores, demonstrando que ocorre uma perda maior no sinal quando o *laser* está em contato direto com a água. A refração está afetando o sistema, o que ocasiona a perda no sinal que é recebido, e os testes demonstram que essa perda é maior quando o feixe é emitido diretamente da água.

Na Figura 45 é mostrado o gráfico de porcentagem de ocupação de água resultante da coleta dos dados no teste com ângulo 0° e o comprimento de onda 1310nm, indicando as barras de erro que foram obtidos e carregados dos experimentos e resultados anteriores. Os demais gráficos não serão mostrados com as barras de erros, para evitar que o resultado fique poluído, porém os valores de erros foram considerados para as discussões dos resultados e demais conclusões.

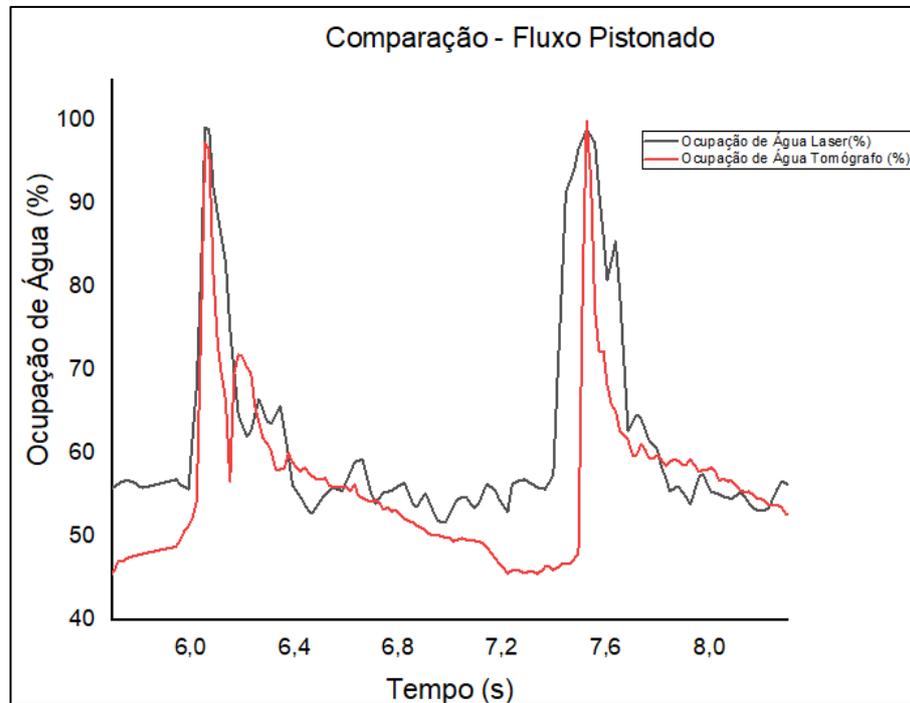
Figura 45: Resultado teste com *laser* 1310 com as barras de erros encontrados nas medições.



Fonte: Autor

Com esses dados obtidos, o teste realizado para o ângulo  $0^\circ$  foi utilizado para que se pudesse realizar a comparação entre os sistemas de medição, *laser* e tomógrafo. De posse dos valores de absorvância encontrados no teste e dos valores da constante de inclinação da reta dos testes estáticos, foi encontrado a altura do líquido em relação ao caminho percorrido pelo feixe do *laser*, que é igual ao diâmetro do tubo. Esse valor de altura foi ajustado com o fator de ajuste de altura encontrado nos testes estáticos, e de posse dos valores de altura de líquido e da dimensão do tubo, foi encontrado a porcentagem de água existente no tubo no ponto do teste. Esses valores de porcentagem foram utilizados para comparar com os valores de porcentagem dados pelo tomógrafo. O resultado desta comparação é apresentado na Figura 46.

Figura 46: Comparação dos resultados entre *laser* e tomógrafo, para o escoamento pistonado.



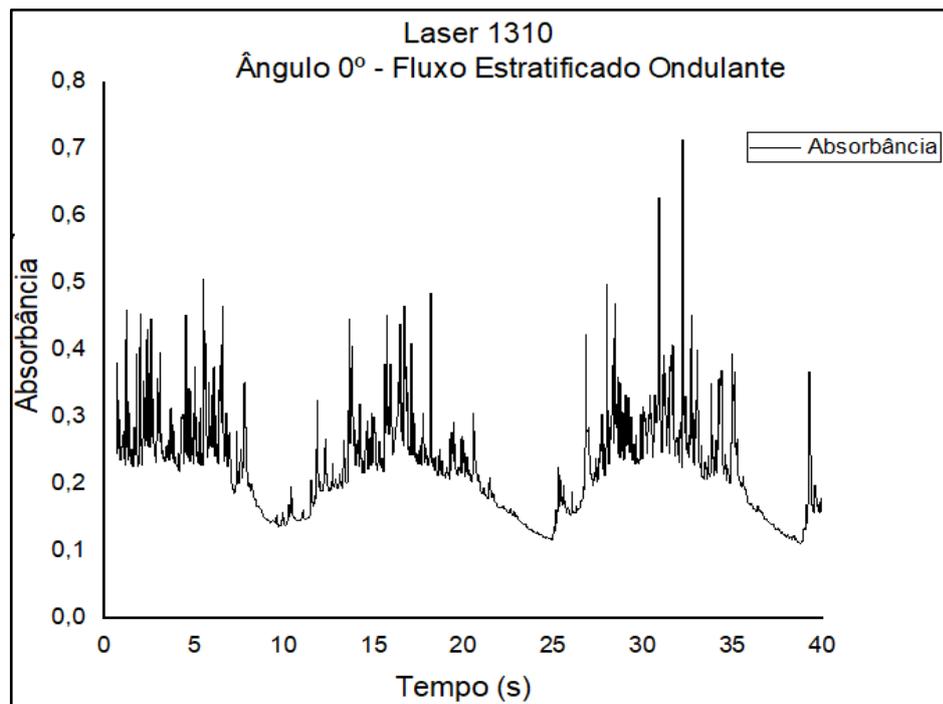
Fonte: Autor

Os resultados apresentam similaridade entre os valores obtidos para porcentagem de ocupação de água, como dito anteriormente, é visto um atraso de uma medição para outra, devido a posição dos medidores na bancada de testes, o formato do decaimento dos valores do tomógrafo é devido a construção física e capacitiva do equipamento. Foi feita uma análise quantitativa dos valores de pico, para que se pudesse determinar a diferença de mediação entre os dois sistemas. Foi feito a subtração entre os valores de pico encontrados no tomógrafo e no *laser* para cada pico. Calculando a média da diferença entre os picos comparados, os resultados encontrados para essa comparação dos valores são mostrados na Tabela 4, na seção 5.3. O mesmo processo foi realizado para os valores em baixa, quando o tubo é percorrido pela bolha de ar, o resultado dessa comparação é apresentado na mesma tabela.

Os próximos experimentos foram realizados em escoamento estratificado ondulante na bancada, este escoamento é caracterizado pela presença de ondulações na água. Os testes seguiram os mesmos padrões de realização utilizados no escoamento pistonado, só com a

diferença do tempo de captação dos resultados, agora estão sendo captados dados por 40 segundos. A Figura 47 apresenta o resultado obtido para absorvância para o teste realizado com a angulação em  $0^\circ$ .

Figura 47: Resultado absorvância escoamento estratificado ondulante em angulação  $0^\circ$ .



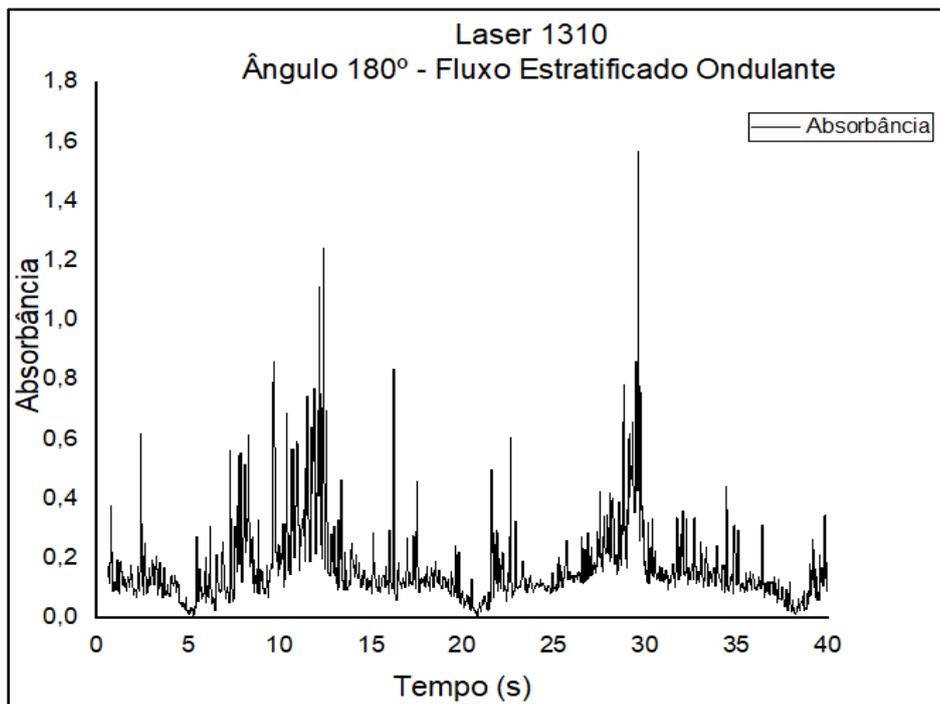
Fonte: Autor

Os resultados apresentados demonstram uma padronização no regime de escoamento, identificando, praticamente três ondulações completas na água durante a execução dos testes, além disso é possível observar que quanto mais o sinal é absorvido, ou seja, vai aumentando a onda, vários picos aparecem. Foi observado durante os experimentos que oscilações estavam causando esses picos. Quanto mais a onda aumentava, mais agitado ficava a superfície da água, isso se deve a velocidade do ar que contribuiu para a formação das ondas neste regime de escoamento, e estas variações causam efeitos de difração e reflexão do feixe.

Experimentos foram realizados com a angulação de  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , porém os resultados foram influenciados por fenômenos de difração e reflexão, e serão aprofundados nos trabalhos futuros. O teste foi realizado seguindo o mesmo procedimento anteriormente

demonstrado. O próximo teste foi feito com ângulo de  $180^\circ$  com o emissor abaixo e o receptor acima, a Figura 48 apresenta os resultados encontrados para absorbância.

Figura 48: Resultado absorbância escoamento estratificado ondulante em angulação  $180^\circ$ .

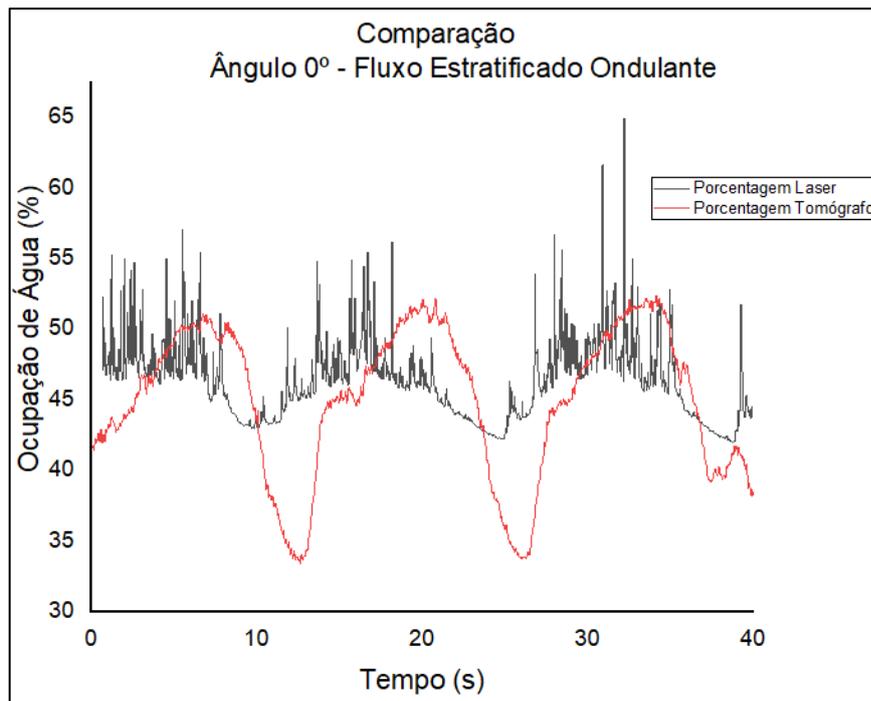


Fonte: Autor

Os resultados encontrados demonstram que esse ângulo sofre com a atenuação do sinal comparado aos resultados demonstrados na Figura 48. Neste teste o emissor encontra-se submerso na água comparado ao outro experimento, onde o emissor encontra-se fora da água. Este ainda apresenta um problema maior com as oscilações superficiais que geram os picos de absorção lidos pelo receptor. Para fins de comparação com os dados obtidos pelo tomógrafo, foi utilizado o teste realizado com angulação em  $0^\circ$ , sendo comparados os dois para observar a proximidade entre os resultados obtidos. Para que se pudesse comparar a porcentagem de líquido existente dentro do tubo, seguiu-se o mesmo padrão realizado anteriormente no escoamento pistonado. Com a absorbância e a constante de inclinação da reta, foi encontrada a altura. Essa altura foi acrescida do fator de ajuste de altura, e com esses valores e a

dimensão do tubo foi encontrado a percentagem de líquido existente. Na Figura 549 é apresentado os gráficos de comparação entre os resultados obtidos pelo tomógrafo e *laser*.

Figura 49: Comparação dos resultados entre *laser* e tomógrafo, para o escoamento estratificado.



Fonte: Autor

Os gráficos de comparação entre os dois resultados demonstram a similaridade entre os dois resultados, podendo se identificar o padrão do escoamento estratificado ondulado com três ondas distintas. O sinal *laser* é influenciado por fenômenos superficiais da interface gás/líquido que serão aprofundados nos trabalhos futuros, por este motivo uma análise quantitativa entre os dois sistemas não será realizada.

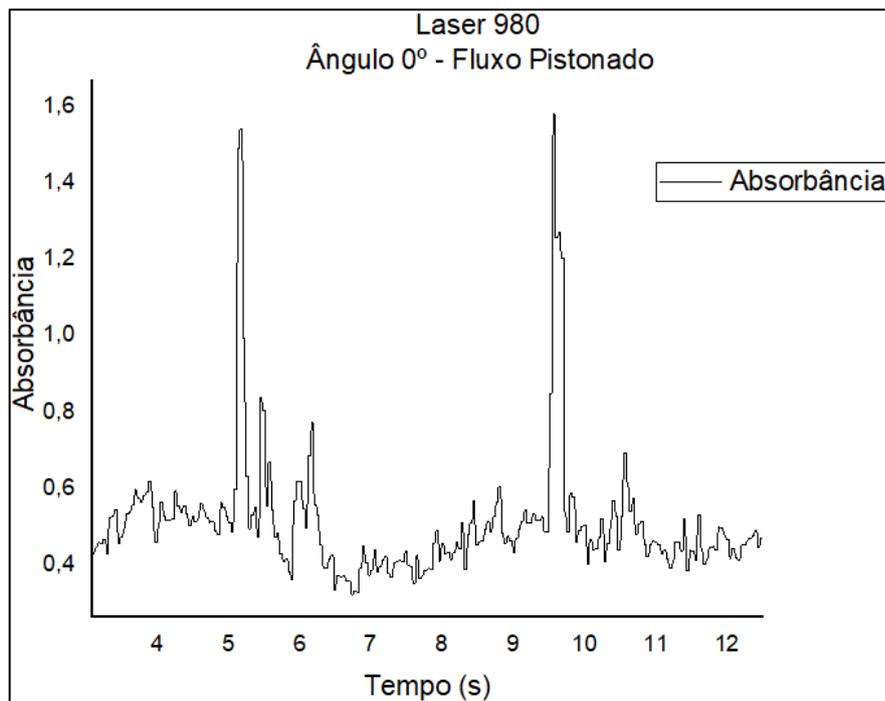
### 5.2.2 RESULTADOS *LASER* 980nm

Os testes realizados com *laser* de 1310nm foram repetidos para o *laser* de 980nm, seguindo os mesmos procedimentos destacados anteriormente. Foram utilizado os padrões de angulação para mover a seção de testes ao redor do tubo, primeiro sendo apresentados os

resultados obtidos para o escoamento pistonado e posteriormente os resultados encontrados para o escoamento estratificado ondulante. Após demonstrar os resultados da absorbância para cada caso, será apresentado um comparativo entre os resultados de porcentagem de água existente no tubo dos valores obtidos no tomógrafo e no *laser*.

A bancada foi esvaziada para que se pudessem coletar os valores máximos, com isso podendo ser calibrado a absorbância, para que se pudesse obter um valor preciso. Foi emulado o escoamento pistonado na bancada de testes, a Figura 50 apresenta os valores de absorbância obtidos para o experimento realizado.

Figura 50: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 0°.

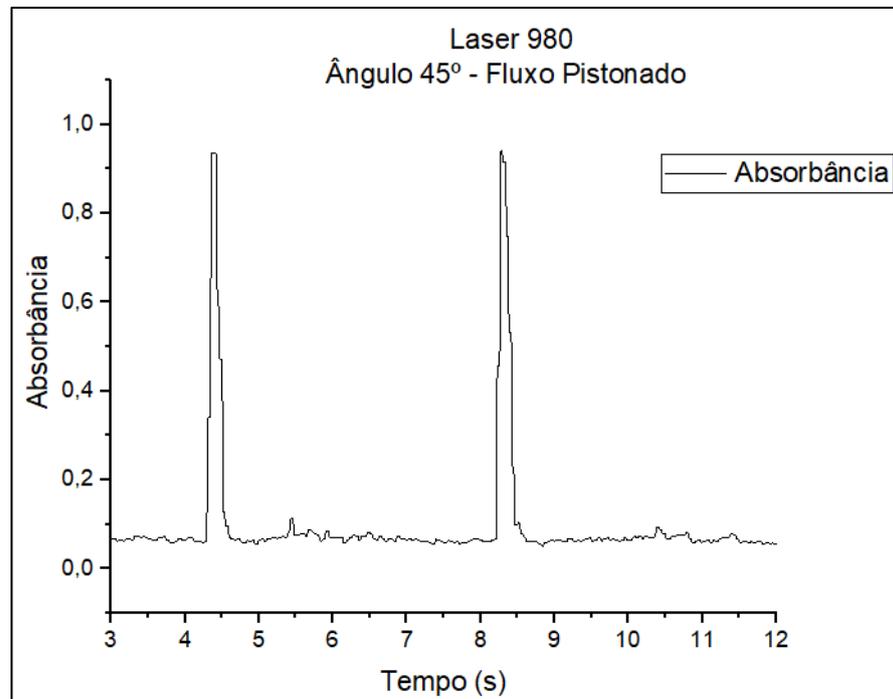


Fonte: Autor

É possível observar, nos resultados obtidos, padrões semelhantes aos encontrados nos testes realizados com o *laser* de 1310nm. Como o escoamento pistonado alterna entre períodos com ocupação completa de água e bolhas de gás, é identificado pelos picos de absorbância os períodos com água e nos demais momentos os períodos com bolha de ar. Destaca-se uma oscilação maior no sinal em relação ao mesmo teste realizado com o *laser* de

1310nm. O próximo experimento a seção de testes foi inclinado em 45° em relação ao ponto inicial a Figura 51 apresenta o resultado obtido para absorbância.

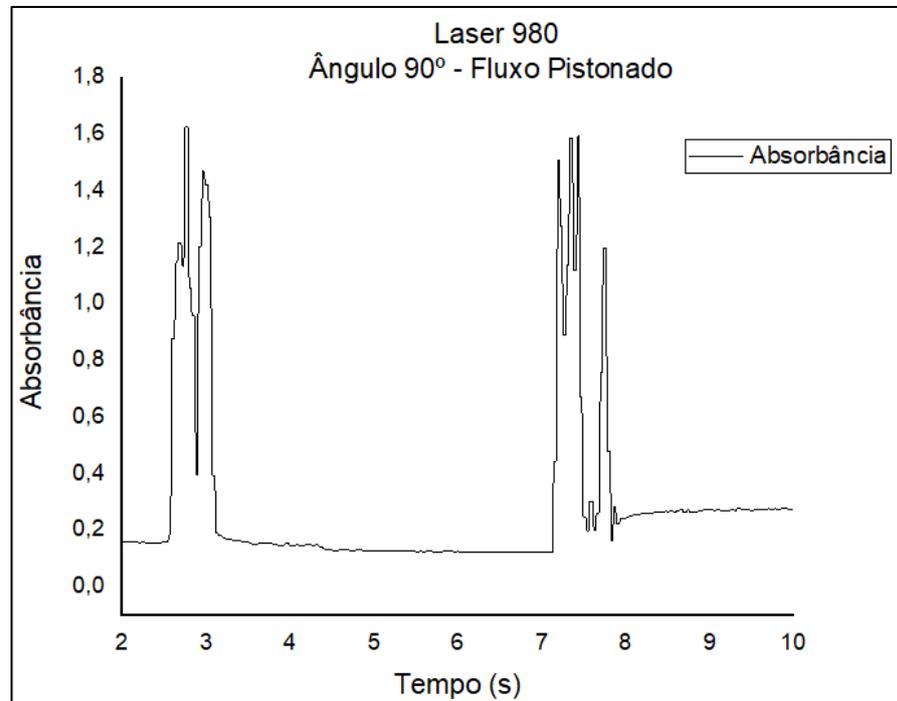
Figura 51: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 45°.



Fonte: Autor

O teste apresentou resultados diferentes em relação aos valores de absorbância, é possível observar que o resultado, quando não apresenta os picos, está bem abaixo do obtido para o teste com 0°. São identificados os picos de absorção característicos deste regime de escoamento, porém os valores obtidos quando as bolhas de ar percorrem o ponto de medição, apresentam inconformidades em relação ao mesmo teste realizado para o *laser* de 1310nm. O experimento seguinte é realizado com a inclinação de 90°, a Figura 52 apresenta o gráfico da absorbância encontrados para esse teste.

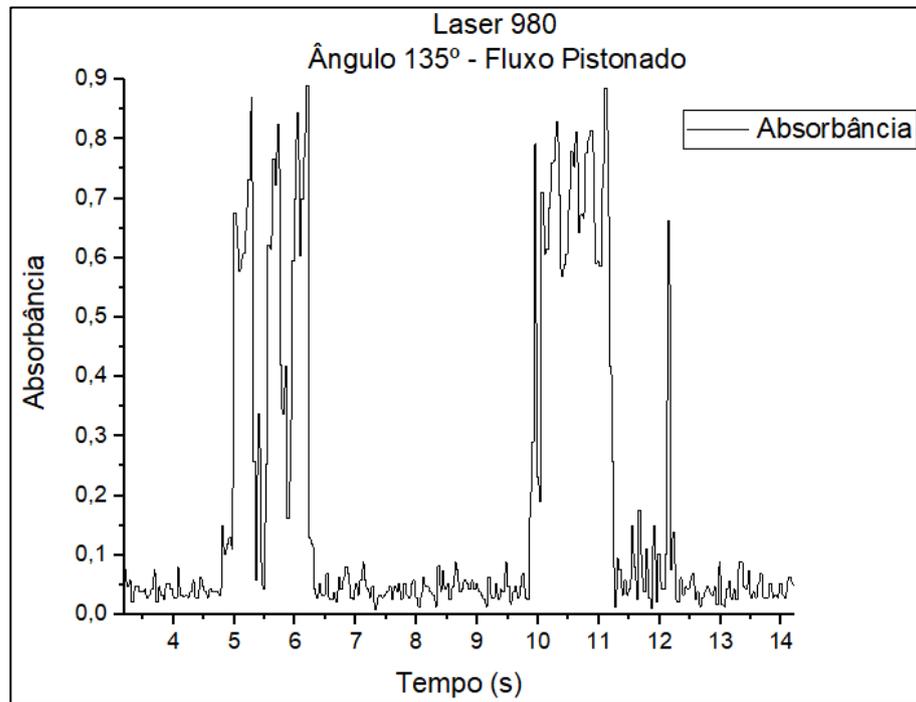
Figura 52: Resultado absorbância, escoamento pistonado e ângulo 90°.



Fonte: Autor

Neste teste é possível observar o padrão do escoamento pistonado, com os picos de absorção e os valores em baixa onde a bolha de ar passa pela medição. Quando os valores estão em baixa, estão mantendo um valor constante acima de 0,1, isso demonstra uma pequena diferença no valor máximo medido anteriormente e nos valores que estão sendo recebidos no teste, fazendo com que se tenha essa diferença na medição que deveria ser 0 naquele ponto, visto que, o *laser* só fica em contato com a água quando ocorre a ocupação completa pela água. O próximo teste é feito com a seção de testes em 135°, a Figura 53 apresenta o gráfico do resultado da absorbância.

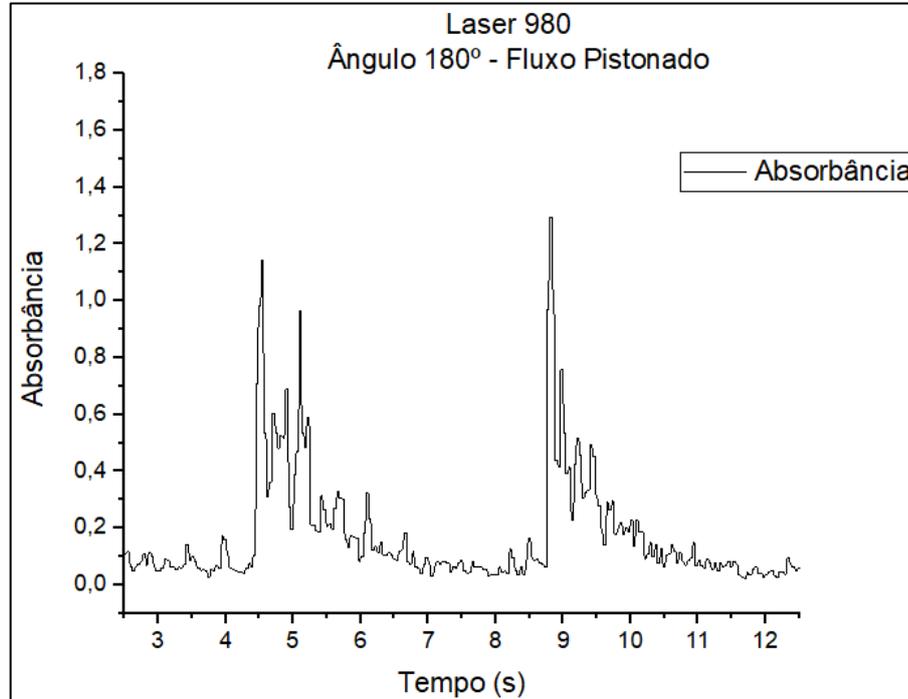
Figura 53: Resultado absorbância escoamento pistonado angulação 135°.



Fonte: Autor

Os resultados encontrados para absorbância, apresentaram características semelhantes as encontradas nos testes realizados com o comprimento de onda de 1310nm, a principal causa disso é o *laser* sendo emitido diretamente do meio água e nesta angulação, o feixe sofreu com a refração na troca do meio, ocasionando essa alteração nos valores recebidos.

Figura 54: Resultado absorvância escoamento pistonado angulação 180°.

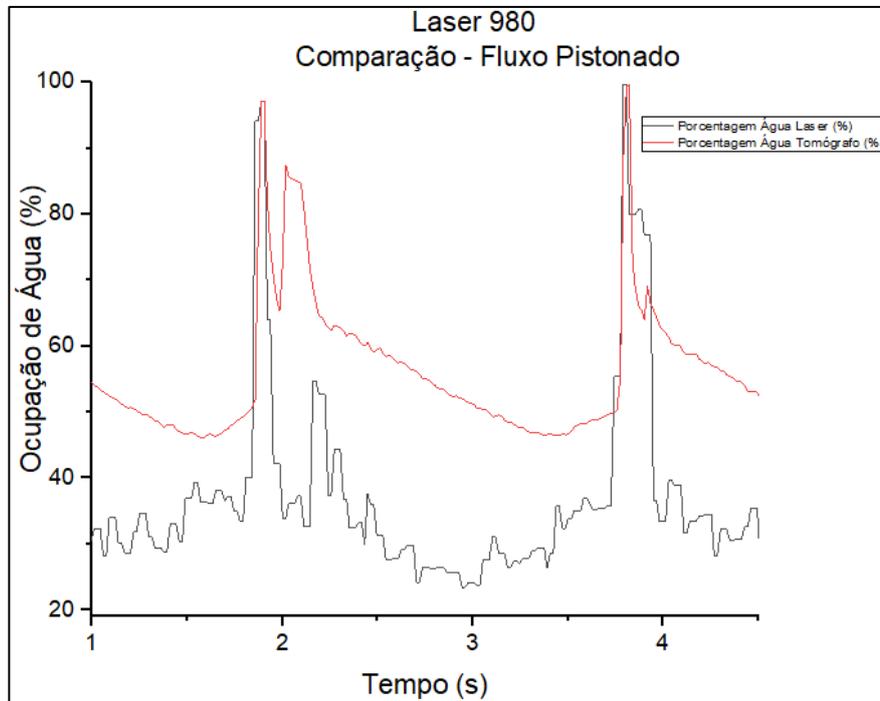


Fonte: Autor

No experimento da Figura 54 a seção de testes foi posicionada em 180° em relação ao ponto inicial, de forma semelhante aos resultados obtidos nos testes com o *laser* 1310nm, os valores obtidos de absorvância são atenuados pelo fato do emissor estar em contato direto com a água.

Para comparar os resultados obtidos com o *laser* de 980nm, foram utilizado os valores de absorvância encontrados no teste com a seção de testes em 0°. Foi encontrada a porcentagem de água existente no tubo, seguindo o procedimento indicado, de posse dos valores de absorvância e dos valores da constante de inclinação da reta, foi encontrado os valores de altura da coluna de água, esses valores da altura foram acrescidos do fator de ajuste da altura, e com as dimensões do tubo foi calculado a porcentagem de ocupação de água. Essa porcentagem foi comparada com os resultados do tomógrafo, o resultado com os gráficos de comparação é apresentado na Figura 55.

Figura 55: Comparação entre tomógrafo e *laser*, escoamento pistonado laser 980.



Fonte: Autor

No gráfico é possível observar que os resultados obtidos para o *laser* e o tomógrafo estão distantes entre si. Percebe-se que para este comprimento de onda, a parte em que há uma menor absorção possui um erro maior, este erro pode ser devido a condições do experimento que provocariam divergências entre a análise estática e dinâmica, como por exemplo uma fina camada de água que absorveria parte da luz emitida. Na seção de discussões dos resultados será apresentada a Tabela 5 contendo os valores da diferença entre os valores de pico e os valores em baixa.

Os próximos testes foram realizados em escoamento estratificado ondulante na bancada, realizando os mesmos padrões de medição indicados anteriormente. Fenômenos superficiais influenciaram os resultados obtidos, o que acabou descaracterizando os gráficos gerados. Por este motivo os resultados não serão apresentados e os fenômenos que influenciaram os experimentos com escoamento estratificado ondulante serão aprofundados nos trabalhos futuros.

### 5.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS FLUÍDO DINÂMICO

Os resultados encontrados demonstram vários aspectos importantes vistos através de uma análise qualitativa, como a identificação do regime de escoamento; diferenças entre os valores medidos entre tomógrafo e *laser*; os efeitos nos testes quando o *laser* está submerso na água; as diferenças entre ângulos testados; e as diferenças de medições entre os dois comprimentos de onda.

A seguir serão destacados alguns aspectos da diferença entre as medições de *laser* e tomógrafo do ponto de vista quantitativo. Analisando dados de ocupação de água no tubo. No escoamento pistonado (Figura 47), utilizando o comprimento de onda de 1310nm, foi comparando os valores de pico da onda, quando a ocupação de água está em seu máximo e os valores quando a onda está em baixa. Na Tabela 4 são apresentados os resultados da comparação do comprimento de onda 1310nm e tomógrafo. Ressalta-se que conforme visto na Figura 46, o erro no cálculo para ocupação da água utilizando o *laser* é de aproximadamente  $\pm 3\%$ , sobre o erro de medida do tomógrafo, o fabricante não disponibiliza um valor, o material técnico disponibilizado indica que esse erro depende de calibração e das propriedades do material, para referência será utilizado o valor de  $\pm 2\%$  indicado no trabalho de Deabes (2009).

Tabela 4: Comparação dos valores de ocupação de água (%) obtidos nos testes, para os picos e baixos.

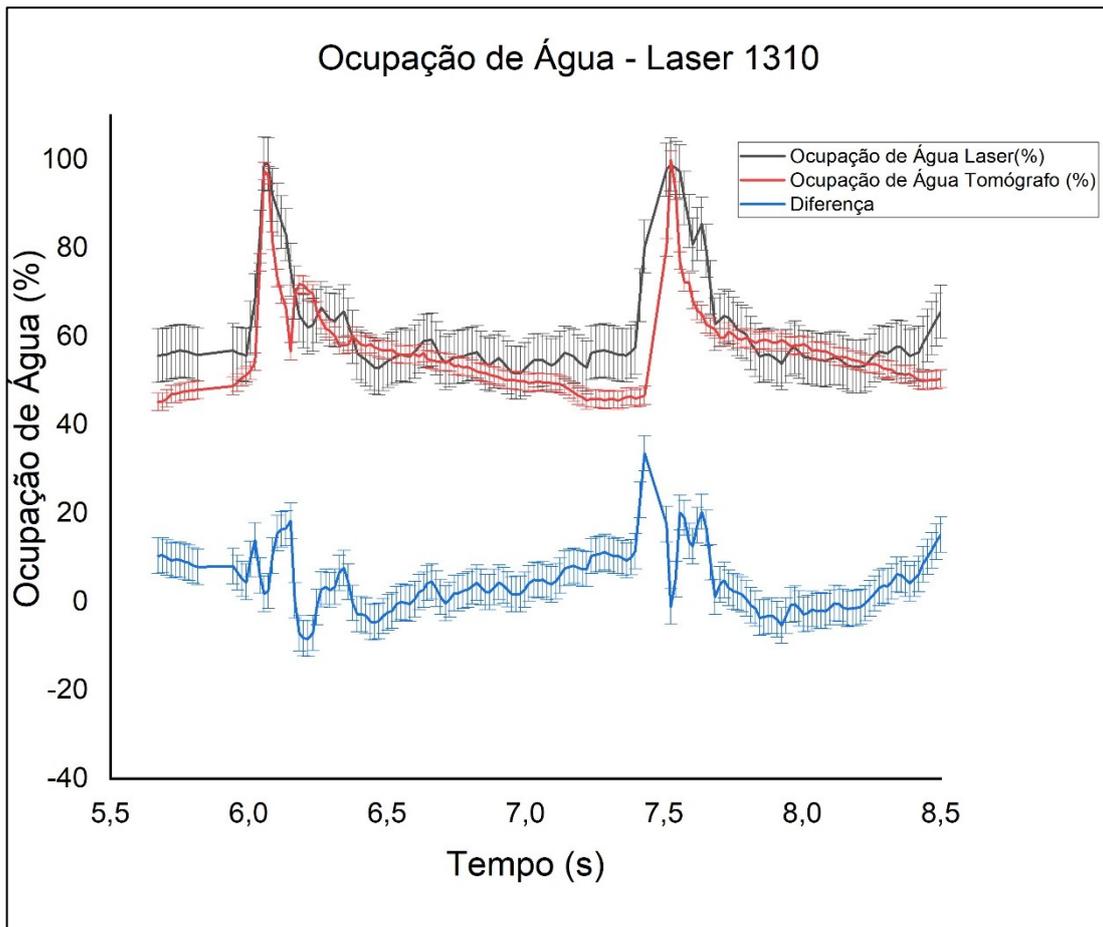
	Tomógrafo (%)	<i>Laser</i> (%)	Diferença (%)	Média (%)	Desvio Padrão
Pico Onda 1	97,2	99	1,8	1,35	0,4
Pico Onda 2	98,3	99,2	0,9		
Baixo Onda 1	45,4	54,5	9,1	10,3	1,7
Baixo Onda 2	44	55,5	11,5		

Fonte: Autor

Com os dados obtidos, gerou-se um gráfico com os valores de ocupação de água (%), indicando o erro em cada medição, através das barras de erro, obtidos no teste realizado com

escoamento pistonado e o comprimento de onda de 1310nm. É demonstrado a onda encontrada para *laser* e para o tomógrafo e o valor de diferença entre as duas para cada ponto. O resultado obtido é demonstrado na figura abaixo:

Figura 56: Gráfico de comparação entre os dados de *laser* e tomógrafo e suas respectivas barras de erro nas medições, demonstrando a diferença entre os dois resultados.



Fonte: Autor

É possível observar na tabela que para os valores de pico existe uma diferença média de 1,35% entre os dois sistemas de medição, representando um valor baixo de diferença. O que não acontece para os resultados em baixa, quando o sistema é percorrido de bolha de ar e a película de água, nota-se que foi encontrado uma diferença média de 10,3% e um desvio padrão mais elevado que o encontrado para as diferenças dos picos, causado provavelmente

por diferenças nas condições iniciais das medidas e também ao erro do fator de ajuste de altura.

É percebido pelo gráfico que a onda representada pelo tomógrafo, tem um decaimento maior em relação ao *laser*, isso se deve ao fato do sistema de medição ECT, que depende dos eletrodos capacitivos que são alocados ao longo do tubo.

O gráfico de comparação demonstra visualmente que a diferença maior existente entre os dois resultados é justamente devida às diferenças nos dois sistemas de medição. O modelo ECT possui esse decaimento mais atenuado o que causa uma diferença maior entre os modelos de medição.

Os testes realizados com o comprimento de onda de 980nm, seguiram os mesmos critérios que os realizados para o 1310nm, observou-se que os gráficos comparativos entre tomógrafo e *laser*, para o escoamento pistonado e o estratificado ondulante, apresentaram grandes diferenças entre os dois sistemas de medição. A Tabela 5 apresenta essa diferença entre os picos e os valores em baixa, respectivamente, para o escoamento pistonado apresentado na Figura 56.

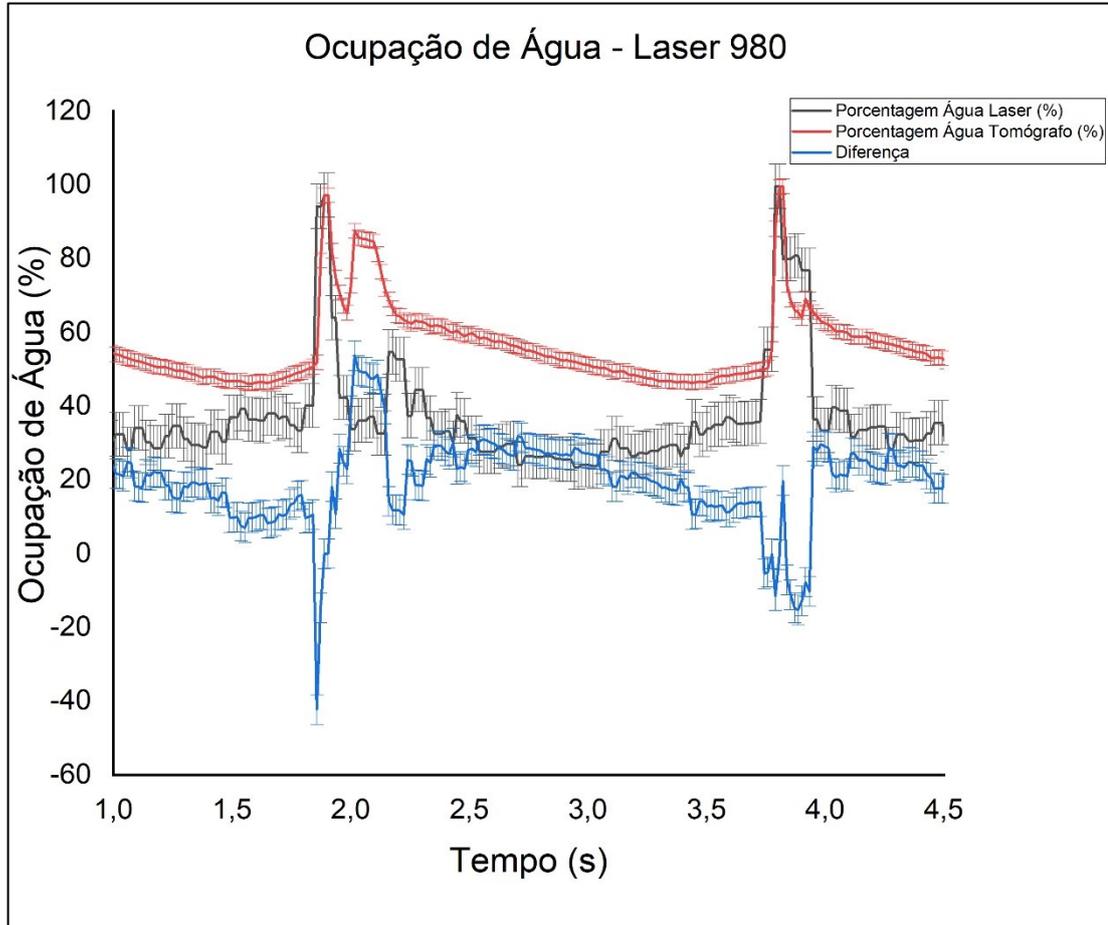
Tabela 5: Comparação dos valores de ocupação de água (%) obtidos nos testes, para os picos e baixos.

	Tomógrafo (%)	<i>Laser</i> (%)	Diferença (%)	Média (%)	Desvio Padrão
Pico Onda 1	97,2	97,3	0,1	0,15	0,07
Pico Onda 2	99,5	99,7	0,2		
Baixo Onda 1	46,7	26,8	19,9	19,65	0,35
Baixo Onda 2	47,9	28,5	19,4		

Fonte: Autor

Com os dados obtidos, gerou-se um gráfico com os valores de ocupação de água (%), indicando os erros de medição obtidos no teste realizado com escoamento pistonado e o comprimento de onda de 980nm. É demonstrado a onda encontrada para *laser* e para o tomógrafo e o valor de diferença entre as duas para cada ponto, demonstrando um comparativo entre os dois sistemas de medição. É demonstrado na figura abaixo:

Figura 57: Gráfico de comparação entre os dados de *laser* e tomógrafo e suas respectivas barras de erro nas medições, demonstrando a diferença entre os dois resultados.



Fonte: Autor

Analisando os valores de porcentagem de ocupação de água para os picos da onda do *laser* e tomógrafo, é possível observar que se obteve uma diferença média de 0,15%, um valor semelhante, considerando os resultados obtidos pelo comprimento de onda 1310nm.

Foi realizada uma análise dos valores quando o tubo estava sendo percorrido pela bolha de ar e uma camada de água. Comparados os valores entre tomógrafo e *laser*, os resultados encontrados mostram um valor médio de 19,65% de diferença, representando um valor maior que o encontrado entre os valores de pico.

O gráfico da Figura 57 representa a diferença encontrada entre os dois sistemas em cada ponto, demonstrando que ocorre uma assimetria entre os valores medidos nos dois

sistemas de medição. Foi realizada uma análise, subtraindo os resultados obtidos no tomógrafo com os do *laser*, permitindo visualizar no gráfico a diferença média entre os dois sistemas, grande parte e principalmente picos de diferença acontecem justamente pelas diferenças entre as técnicas dos dois tipos de sistema, o sistema luminoso reage com maior velocidade à variações, enquanto o tomógrafo é mais lento devido a sua característica capacitiva que é cumulativa.

Os testes realizados com os *lasers*, na bancada de testes bifásicos, apresentaram resultados que corroboram com a pesquisa realizada ao longo da revisão. Quando é identificado que o comprimento de onda de 1310nm é melhor absorvido pela água, notou-se uma precisão maior nos resultados encontrados, em comparação com o tomógrafo, deste *laser* em relação ao comprimento de onda de 980nm. Até mesmo para identificação dos regimes de escoamento, através dos gráficos, os experimentos com o *laser* 980nm sofreram mais com as ondas superficiais existentes. Outro ponto a se destacar, é que o *laser* tem a sua precisão atenuada quando o mesmo se encontra em contato direto com água já em sua emissão inicial. Testes mostraram que quando o *laser* estava coberto pela película de água, os resultados eram imprecisos ou mais atenuados que os resultados encontrados quando o mesmo se encontrava fora da película de água em seu ponto inicial.

Algumas angulações utilizadas nos testes sofreram mais com os efeitos da refração, é o caso do ângulo 135° e 45°, mostrando que se o feixe for emitido perpendicularmente em relação a superfície de contato, o sinal não sofre as mesmas condições pelos efeitos da refração. Os testes com ângulo em 180°, embora estivessem em contato direto com água, apresentaram melhor desempenho que o de 135° que estava em condições semelhantes. Essas observações demonstram que para uma maior eficiência do sistema no seu funcionamento, o *laser* necessita ser posicionado perpendicularmente a superfície e que o líquido não esteja em contato direto com o emissor.

Um outro ponto que se destaca nos resultados, é a possibilidade de se utilizar o sistema para realizar a identificação do regime de escoamento, que está percorrendo a tubulação. A comparação dos resultados do *laser* de 1310nm com o tomógrafo demonstrando que o sistema desenvolvido com o *laser* obteve êxito na identificação do padrão de escoamento que percorre o tubo. Sendo mais preciso para o escoamento pistonado em relação

ao escoamento estratificado ondulante, onde as ondas superficiais afetaram as medições e padronização do escoamento.

.

## 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado apresentou o desenvolvimento, implementação e testes realizados do sistema de medição de escoamento e fração de vazia com sensor óptico baseado em *laser*. A pesquisa se baseou na alteração da intensidade do feixe emitido pelo feixe recebido, após passar pelo meio em análise.

O principal resultado do trabalho advém da análise qualitativa do sistema utilizando o emissor *laser* e o receptor fotodiodo, o sistema comparado ao tomógrafo capacitivo mostrou que possui uma resposta mais rápida e considerando o princípio físico do tomógrafo os resultados de forma qualitativa são comparáveis, precisando de ajustes no modelo para avaliar quantitativamente os resultados.

Para que se tornasse possível realizar a aferição de ocupação, foram montadas, programadas e ajustadas placas de controle para os *lasers* de comprimento de onda de 1310nm e 980nm, que se mostraram adequadas para o sistema avaliado, considerando o tamanho do duto e os líquidos estudados. Além disso, testes foram realizados com medidor de potência óptica incluindo os resultados obtidos no trabalho de Ostrufka (2019). Através dos testes realizados com o medidor de potência óptica obteve-se um comparativo entre os resultados obtidos pelo autor e os com os comprimentos de onda utilizados neste trabalho.

O comprimento de onda de 1490nm foi absorvido logo nas primeiras inserções de água, demonstrando seu bom desempenho em detectar a presença de água, porém não sendo indicado para detectar os diferentes níveis de ocupação deste líquido em dutos. Já no caso do comprimento de onda de 850nm, demonstrou-se que o feixe passou pelo líquido sofrendo pequenas alterações no nível de absorção do sinal, isso foi destacado no material utilizado nas referências do trabalho, em que são indicados os comprimentos de onda que melhor são absorvidos pelos líquidos utilizados.

Testes com líquido estático foram feitos com água e óleo *crude*. Os resultados foram utilizados para encontrar os valores de porcentagem de água nos testes dinâmicos realizados em bancada de testes de escoamento bifásico. Apesar das limitações apresentadas no decorrer da pesquisa, os resultados obtidos e análises principalmente qualitativas demonstram que a tecnologia desenvolvida tem potencial para atender o propósito de identificação de ocupação de líquido em dutos.

Obtiveram-se os parâmetros de constante de inclinação da reta e os fatores de ajuste de altura, determinando os erros e incertezas associados às medições para cada *laser*. A seção de testes utilizada na bancada de escoamento bifásico foi desenvolvida pensando em minimizar os problemas com a perda de sinal pela atenuação da parede acrílica. Foram feitos furos passantes para fixação do emissor e do receptor. Com auxílio de *orings* a seção foi fixada na bancada de forma a não deixar vaziar nenhum líquido.

Com a constante de inclinação da reta, a modelagem matemática realizada e os testes feitos em bancada experimental para escoamento bifásico, pode-se determinar a ocupação de líquido no tubo, no ponto onde a seção de testes foi alocada. Os resultados apresentados demonstram que o sistema foi capaz de identificar o perfil de escoamento que estava percorrendo a tubulação. Quando emulado com escoamento pistonado, tanto o *laser* de 1310nm quanto o de 980nm, obtiveram perfis de onda semelhantes, demonstrando que o sistema pode ser utilizado para detectar o escoamento que percorre a tubulação.

Algumas limitações da técnica foram observadas, os comprimentos intermediários estudados servem adequadamente para a tubulação de 2", para 1310nm quanto o de 980nm a absorção acontece após os 40mm de coluna. Porém para situações reais em tubulações de até 12" outros comprimentos de onda, que não seriam absorvidos em colunas de dezenas de centímetros precisariam ser avaliados. Para um sistema com petróleo e gases oriundos de poços é importante também avaliar alguns outros comprimentos de onda, inclusive na faixa de 2000-4500nm, que são indicados para gases.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Os testes na bancada bifásica mostraram que ajustes são necessários no sistema, um dos trabalhos futuros no seguimento deste projeto, é realizar um estudo aprofundado para o escoamento estratificado ondulante, identificar maneiras de minimizar a influência dos fenômenos nos resultados encontrados. Além disso, é necessário projetar e desenvolver uma seção de testes com uma fina espessura de parede acrílica, permitindo que se tenha um resultado mais preciso quando o sistema for submetido ao escoamento com ondulações. Outro ponto a se destacar, é que por vezes o colimador e o receptor tiveram que ser retirados da

seção de testes e realocados novamente, para que se pudesse corrigir o alinhamento entre os dois. Quando se rotacionava a seção para executar os outros experimentos, no movimento mecânico utilizado, causava-se os desalinhamentos. Para os próximos testes, é necessário pensar em uma seção de testes que já possua os colimadores e receptores para cada ângulo necessário, não sendo preciso realizar nenhum movimento com a seção, evitando que este problema ocorra.

Como destacado ao longo do texto, a ideia inicial do trabalho era utilizar o sistema em uma bancada para óleo, água e ar, porém problemas indicados para manipulação do óleo *crude*, e na adequação da bancada, não permitiram a utilização do óleo nos testes. Uma outra bancada estava sendo preparada para que se pudesse ser realizado testes com óleo *crude*, porém até o final dos testes deste trabalho, ela ainda não estava pronta. Ao término dos ajustes nesta nova bancada, sugere-se repetir os mesmos experimentos realizados neste trabalho, na bancada com óleo, para observar os resultados e obter os parâmetros de porcentagem. Testando o sistema com a fase líquida constituída de água e óleo *crude*.

Foi destacado na revisão bibliográfica as técnicas de medição tomográficas, apresentando a técnica de absorção luminosa. O sistema com *laser* utiliza a absorbância para encontrar os parâmetros a serem medidos, nos testes realizados, foi coletado valores de dois escoamentos diferentes em cinco dimensões diferentes ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$ ), para futuros projetos é necessário desenvolver o algoritmo para fazer a reconstrução da imagem gerada pela coleta dos dados, unindo os valores obtidos nas cinco dimensões, obtendo uma reconstrução completa da imagem do escoamento que percorre a tubulação. Junto a isso, é necessário implementar ferramentas para diminuir as refrações que o feixe do *laser* sofreu nas angulações destacadas na seção 5.3, para que se possa aproveitar os dados obtidos nestes testes para reconstrução.

## REFERÊNCIAS

- ADS131E08. **Texas Instruments**, Nova York, 2017. Disponível em: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131e08.pdf?ts=1656983787313&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS131E08](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131e08.pdf?ts=1656983787313&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS131E08). Acesso em: ago. 2021.
- ARUNKUMAR, S.; ADHAVAN, J.; VENKATESAN, M.; DAS, S.K.; BALAKRISHNAN A. R., **Two phase flow regime identification using infrared sensor and volume of fluids method**. Flow Measurement and Instrumentation, v. 51, 2016, p 49-54.
- BECK, M. S. **Process tomography: principles, techniques and applications: Butterworth-Heinemann**, 2012.
- BUNCH, B. H.; HELLEMANS, A. **The History of Science and Technology: a browser's guide to the great discoveries, inventions, and the people who made them, from the dawn of time to today**. Boston: Houghton Mifflin, 2004, p. 776.
- BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. Pasadena: Cambridge University Press, 2005, p. 410.
- CAREY, S. J. et al. **Chemical species tomography by near infra-red absorption**. Chemical Engineering Journal, Elsevier, v. 77, n. 1-2, 2000, p. 111–118.
- CROWE, C. T. (ed.). **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton: Crc Press, 2006. p. 1128 .
- COSTA, M. G. **Multiphase Flow Measurement Employing Venturi Tube and Ultrasonic (Pulse-Echo and Transmit-Receive Techniques) Meter**. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- CUNHA, F. G. M.; CASTRO, J. K. S. **Cálculo Numérico**. Fortaleza: UAB/IFCE, 2010. Disponível em <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/430185/2/Calculo%20Numerico.pdf>
- DEABES, W.; Abdelrahman. M., **Solution of the forward problem of electric capacitance tomography of conductive materials**. World MultiConference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Jointly 20 Journal of Sensors with the 15th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, pp. 83–89, Orlando, FL, USA, 2009.
- 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.
- FALCONE, G.; HEWITT, G.F.; ALIMONTI, C.; HARRISON, B. **Multiphase flow metering: Current trends and future developments**. In: SPE 71474 Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September–3 October, New Orleans, USA, 2001, p. 1–13.

ISMAIL I., GAMIO J.C., BUKHARI, S.F.A. YANG, W.Q. Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry. **Flow Measurement and Instrumentation**, Vol. 16, Issues 2–3, 2005, p. 145-155.

KASYUTICH, V. L.; MARTIN, P. A. **Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system**. *Applied Physics B*, 102(1), 2010, p. 149–162.

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

LASERCOM-LDI1310. **LDI-1310-FP-1.25G-20/100**. Belarus, 2019. Disponível em: [https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/ldi-1310-fp-1.25g-20100\\_0.pdf](https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/ldi-1310-fp-1.25g-20100_0.pdf). Acesso em: ago. 2021.

LASERCOM-LDI980. **LDS-980-FP-3**. Belarus, 2019. Disponível em: [https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/lds-980-fp-3\\_0.pdf](https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/lds-980-fp-3_0.pdf). Acesso em: ago. 2021

LEITE, J. M.. **Sistema de Medição de Vazões de Líquidos e de Gás a partir de um Tubo de Venturi Modificado**. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

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.

MAYINGER, F. **Optical Measurements: techniques and applications**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994, p. 462.

MILJKOVIĆ, M., BIRD, B., DIEM, M. **Line shape distortion effects in infrared spectroscopy**, *The Royal Society of Chemistry*. V. 137, 2012, p. 3954-3964.

MURTHA, M. **Terminology Explained: What is multiphase flow?**. Disponível em: <https://blogs.dnvgl.com/software/2017/06/terminology-explained-multiphase-flow/>. Acesso em: 12 abr. 2021.

OSTRUFKA, A. L. A.. **Análise de técnicas de medição para determinação de vazão mássica em escoamentos multifásicos**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

PARK, S. **Principles of Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Converters**. Motorola: APR8/D. Rev. 1, 1993.

PATEL, R., ACHAMFUO-YEBOAH, S., LIGHT, R., CLARK, M. **Widefield two laser interferometry**. *Opt. Express*, v 41, 2014. p. 5938.

RAJAN, V. S. V., RIDLEY, R. K., RAFA, K. G. **Multiphase Flow Measurement Techniques—A Review**. ASME. *J. Energy Resour. Technol.* 1993; 115(3): 151–161.

RISTIC, S. **Flow visualization techniques in wind tunnels part 1-non optical methods**, Sci. Tech. Rev. LVII (1), 2007, p. 39–49.

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, 2004, p. 2216–2218.

YAO, J., TAKEI, M. **Application of Process Tomography to Multiphase Flow Measurement in Industrial and Biomedical Fields: A Review**, In: *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 24, 2017, p. 8196-8205.

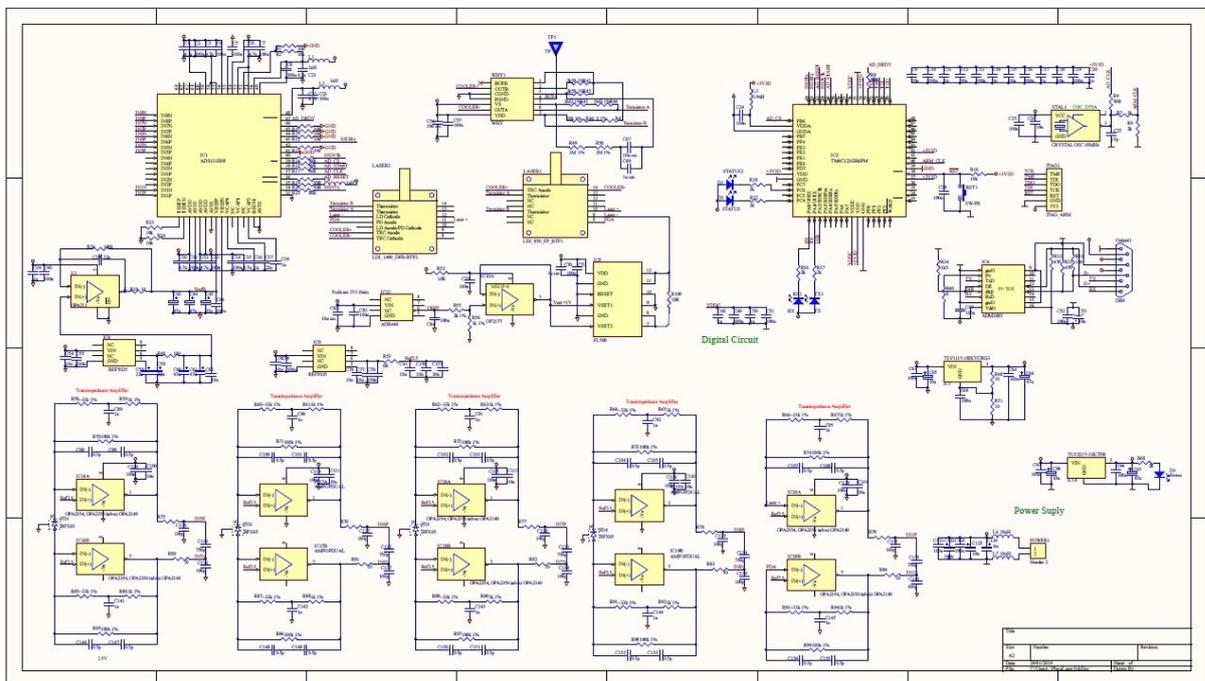
YANG, W. **Design of electrical capacitance tomography sensors**. *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no.4, 2010, p. 042001.

WENBIAO Z., CHAO W., WUQIANG Y., CHI-HWA W. **Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement – A review**. *Advanced Powder Technology*, vol. 25, no 1, 2014, p. 174-188.

## APÊNDICE A – Esquemático elétrico da placa de controle do *laser* e fotodiodo.

A imagem abaixo demonstra o esquemático elétrico desenvolvido para a placa de controle do sinal utilizado para o *laser* e fotodiodo.

Figura 58: Esquemático elétrico da placa de controle.

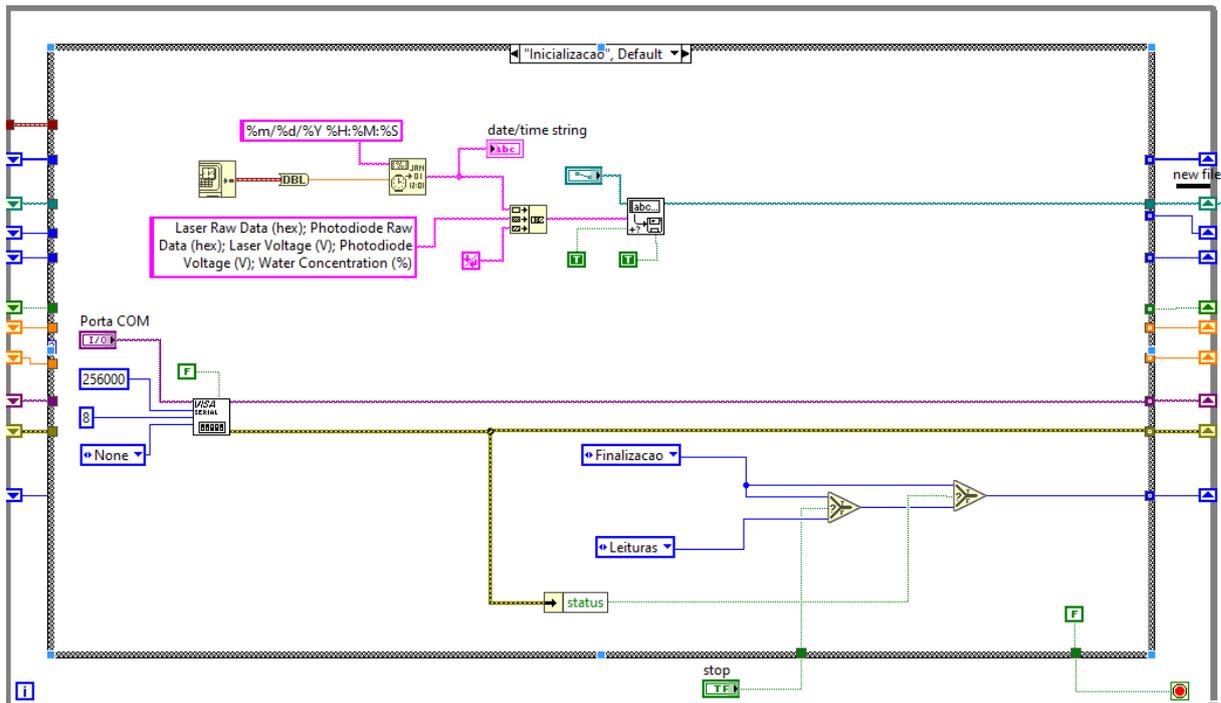


Fonte: Autor

## APÊNDICE B – Máquina de estados implementada no programa LabView

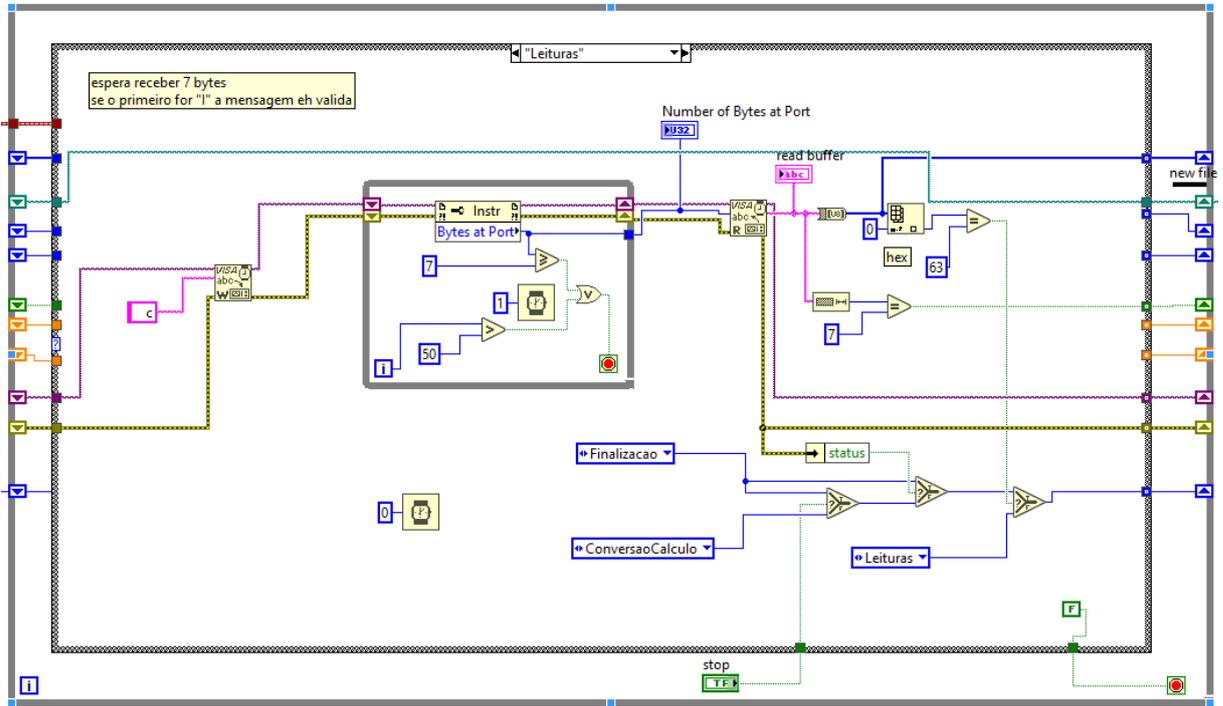
As imagens demonstram os estados implementados no Labview para recebimento e processamento dos dados enviados pela placa de controle.

Figura 59: Estado de inicialização.



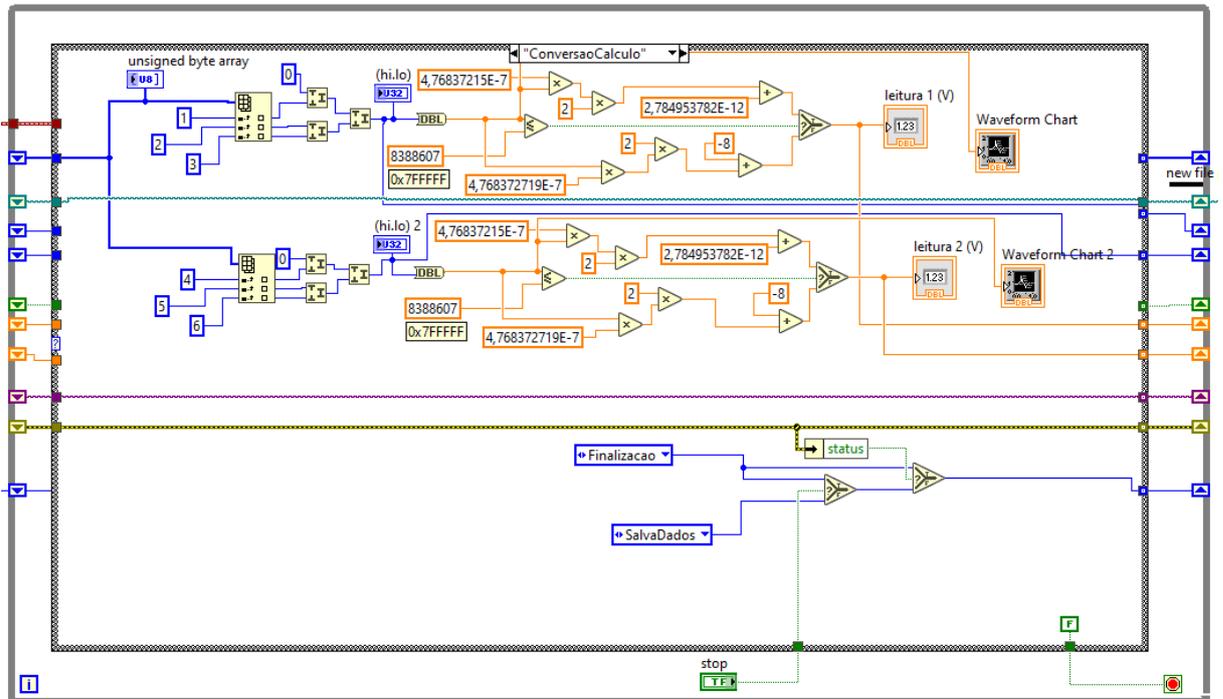
Fonte: Autor

Figura 60: Estado de Leitura.



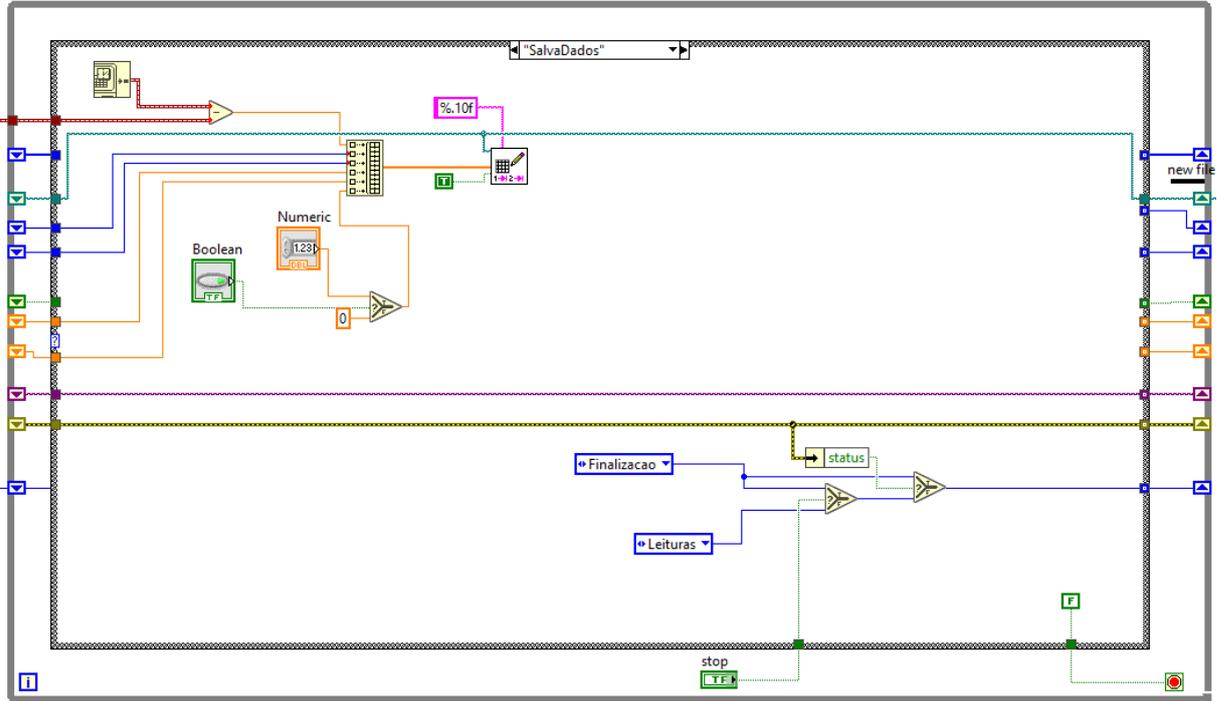
Fonte: Autor

Figura 61: Estado de conversão.



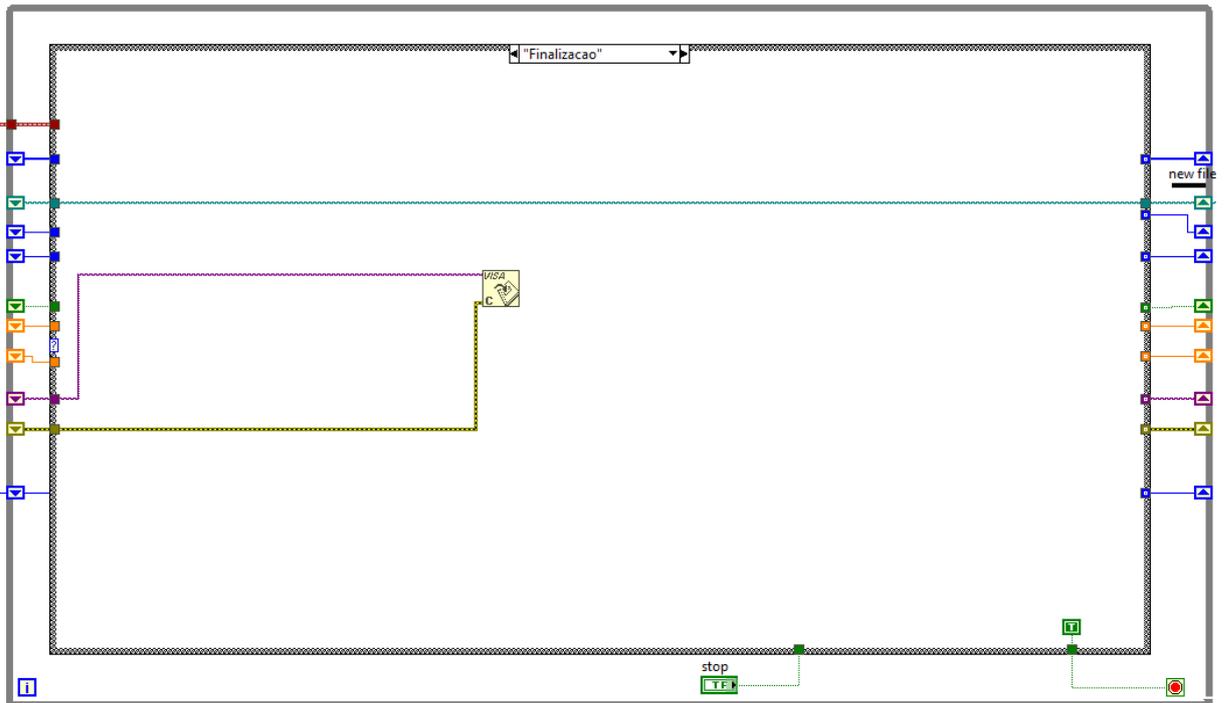
Fonte: Autor

Figura 62: Estado de SalvaDados.



Fonte: Autor

Figura 63: Estado de Finalização.



Fonte: Autor

## APÊNDICE C – Firmware desenvolvido para o microcontrolador TM4C123GH6PM

```

#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>
#include <math.h>
//#include "inc/tm4c123bh6pm.h"
#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_ints.h"
#include "driverlib/ssi.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "driverlib/pin_map.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/uart.h"

// integer types
typedef unsigned char    u8;
typedef signed char      i8;
typedef unsigned short   u16;
typedef signed short     i16;
typedef unsigned long    u32;
typedef signed long      i32;
typedef unsigned long long u64;
typedef signed long long i64;

// union types to help access parts of an integer
// (add others following the same schema as needed)
typedef union {
    u16 u16;
    u8  u8[2];
} u16_8;

// use var.u16 or var.u8[1]=MSB var.u8[0]=LSB;

typedef union {
    u32 u32;
    u16 u16[2];
} u32_16;

typedef union {
    u32 u32;
    u16 u16[2];
    u8  u8[4];
} u32_8;

typedef union {
    i32 i32;
    i16 i16[2];
    i8  i8[4];
} i32_8;

```

```

typedef union {
    i64 i64;
    i32 i32[2];
    i16 i16[4];
    i8 i8[8];
} i64_8;

i32_8 Channel5;
//i32_8 Channel5_acc;
i32_8 Channel5_send;

i32_8 Channel6;
i32_8 Channel6_acc;
i32_8 Channel6_send;

//Variaveis globais
uint32_t Channel5_acc;
uint32_t CH1_byte1_send;
uint32_t CH1_byte2_send;
uint32_t CH1_byte3_send;
uint32_t CH1_byte1;
uint32_t CH1_byte2;
uint32_t CH1_byte3;

uint32_t CH7_byte1;
uint32_t CH7_byte2;
uint32_t CH7_byte3;
uint32_t CH6_byte1;
uint32_t CH6_byte2;
uint32_t CH6_byte3;

uint32_t CH6_byte1_send;
uint32_t CH6_byte2_send;
uint32_t CH6_byte3_send;
uint32_t CH8_byte1;
uint32_t CH8_byte2;
uint32_t CH8_byte3;
uint32_t REG1;
uint32_t REG2;
uint32_t REG3;

uint32_t CH6_value_send;
uint32_t CH1_value_send;

uint32_t CH6_value_temp;
uint32_t CH6_value;
uint32_t CH1_value_temp;
uint32_t CH1_value;

volatile uint32_t count;
uint32_t count_while = 0;
uint32_t var_get = 0;

```

```

int main(void)
{
    count = 0;

    // Configuracao do clock do Tiva
    SysCtlClockSet(SYSCTL_SYSDIV_5 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_OSC_INT |
SYSCTL_XTAL_16MHZ); // 40MHz

    // Configuracao de perifericos (UART0 - comunicacao USB; SSI3 - SPI, GPIOs A,
B, D, E, F)
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_SSI3);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOE);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOB);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOC);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOD);
    //SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF);

    // Configuracao pinos UART0
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_U0RX);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA1_U0TX);
    GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);

    // Configuracao clock UART0
    UARTConfigSetExpClk(UART0_BASE, SysCtlClockGet(), 256000, (UART_CONFIG_WLEN_8 |
UART_CONFIG_STOP_ONE | UART_CONFIG_PAR_NONE));

    // Configuracao pinos SSI3
    GPIOPinConfigure(GPIO_PD0_SSI3CLK);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PD2_SSI3RX);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PD3_SSI3TX);
    GPIOPinTypeSSI(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_2 | GPIO_PIN_3); //
SSI3Clk, SSI3Rx, SSI3Tx

    // Configuracao clock SSI3
    SSIConfigSetExpClk(SSI3_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_1,
SSI_MODE_MASTER, 2500000, 8);
    SSIEnable(SSI3_BASE);

    // Configuracao pinos GPIO
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6); // AD_CS
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_1); // AD_RESET
    GPIOPinTypeGPIOInput(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_6); // AD_DRDY
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_5); // AD_START
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4); // LED 2
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_5); // teste
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_6); // LED 1
    //GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_3);

    // Interrupt Priority
    IntPrioritySet(INT_UART0, 0xE0);
    IntPrioritySet(INT_GPIOD, 0);

```

```

// UART FIFO
UARTFIFOLevelSet(INT_UART0, UART_FIFO_TX7_8, UART_FIFO_RX1_8);

// Interrupcao
IntMasterEnable();

IntEnable(INT_GPIOD);
GPIOIntTypeSet(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_6, GPIO_FALLING_EDGE);
GPIOIntEnable(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_INT_PIN_6);

IntEnable(INT_UART0);
UARTIntEnable(UART0_BASE, UART_INT_RX);
UARTFIFOEnable(INT_UART0);
UARTEnable(UART0_BASE);

// ***** INICIALIZACAO
*****
*

GPIOPinWrite(GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_5, 0x00); // START = 0

//Step 1: Set CLKSEL Pin = 1 and wait for internal oscillator to start up
(internal clock = 2.048MHz)
//GPIOPinWrite(GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_5, 0x00); // START = 0
(inicialmente)
// CLKSEL esta permanentemente em ALTO em Hardware
SysCtlDelay(1000); //wait oscillator startup (20us = 800 tclk)

//Step 2: Set PWDN_barrado = 1 e RESET_barrado = 1, wait at least t_por for
power-on reset
// PWDN_barrado esta permanentemente em ALTO em Hardware
GPIOPinWrite(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_1, 0xFF); // RESET_barrado = 1
(disable)
SysCtlDelay(50000); //wait at least t_por (if VCAP1 >= 1.1V) (t_por =
13107.3 tclk)

//Step 3: Issue Reset pulse, wait for 18 t_clk's
//GPIOPinWrite(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_1, 0x00); // RESET_barrado = 0
//SysCtlDelay(180000); //wait 18 t_clk (do AD)
GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6, 0x00); // CS_barrado = 0 (Active
DOUT)
//SysCtlDelay(180000); //wait 18 t_clk (do AD)

//Step 4: Send SDATAC Command =Stop read data continuous mode
SSIDataPut(SSI3_BASE, 0x11); // SDATAC command
SysCtlDelay(200); //wait 4 t_clk (do AD)

//Step 5: Internal Reference - Set PDB_REFBUF (Power-down reference buffer) =
1 and wait for internal reference
// WREG CONFIG3 C0h (0100 0011 1100 0000 = 43C0h)
// CONFIG3 = This register configures the reference and internal amplifier
operation.

```

```

SSIDataPut(SSI3_BASE,0x43);
SysCtlDelay(125/3);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SysCtlDelay(125/3);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0xE0); // E0 para Vref=4V / C0 para Vref=2.4V
SysCtlDelay(125/3);
SysCtlDelay(20); // wait for internal reference

//Step 6: Write Certain Registers, including input
//DR = Data Rate (resolution + KSPS)
//Set device for DR=f+MOD/32
//WREG CONFIG1 D6h (0100 0001 1101 0110 = 41D6h)
// CONFIG1 = This register configures daisy chain, the clock setting, and
each ADC channel sample rate.
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x41);
SysCtlDelay(125/3);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SysCtlDelay(125/3);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0xD6);
SysCtlDelay(125/3);
SysCtlDelay(20);
//WREG CONFIG2 E0h (0100 0010 1110 0000 = 42E0h)
// CONFIG2 = This register configures the test signal generation; see the
Input Multiplexer section for more details.
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x42);
SysCtlDelay(125/3);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SysCtlDelay(125/3);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0xE0);
SysCtlDelay(125/3);
SysCtlDelay(20);

//Set all channels to input short
//(AVDD + AVSS)/2 for offset or noise measurement
//This register configures the power mode, PGA gain, and multiplexer
settings for the channels; see the Input
//Multiplexer section for details. CHnSET are similar to CH1SET,
corresponding to the respective channels
//WREG CH1SET 01h (0100 0101 0000 0001 = 4501h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x45);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH2SET 01h (0100 0110 0000 0001 = 4601h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x46);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH3SET 01h (0100 0111 0000 0001 = 4701h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x47);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH4SET 01h (0100 1000 0000 0001 = 4801h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x48);

```

```

    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
    SysCtlDelay(20);
    //WREG CH5SET 01h (0100 1001 0000 0001 = 4901h)
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x49);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
    SysCtlDelay(20);
    //WREG CH6SET 01h (0100 1010 0000 0001 = 4A01h)
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x4A);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
    SysCtlDelay(20);
    //WREG CH7SET 01h (0100 1011 0000 0001 = 4B01h)
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x4B);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
    SysCtlDelay(20);
    //WREG CH8SET 01h (0100 1100 0000 0001 = 4C01h)
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x4C);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x01);
    SysCtlDelay(20);
//*****
*****
    // A partir desse passo começa a ser feita a leitura dos dados enviados
//Step 7: Set START = 1
    //Active conversion
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_5, 0xFF); // START = 1

//Step 8: RDATAAC = Start Read Data Continuous Mode
    //Put the device back to RDATAAC
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x10); //RDATAAC command
    SysCtlDelay(20); //wait 4 t_clk (do AD)

//Step 9: Capture Data and check noise
    // Look for DRDY_barrado and issue 24+n x 24 SCLKs
    //while (GPIOPinRead(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_6) == 0x00);
    SysCtlDelay(4000); //wait 4 t_clk (do AD)

//Step 10: Set Test Signals
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x11); // SDATAAC command = Stop read data continuous
mode
    SysCtlDelay(20); //wait 4 t_clk (do AD)

    //WREG CONFIG2 F0h (0100 0010 1111 0000 = 42F0h)
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x42);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0xF0);
    SysCtlDelay(20);

    //Set all channels to test signal
    //WREG CH1SET 05h (0100 0101 0000 0101 = 4505h)
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x45);
    SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);

```

```

SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH2SET 05h (0100 0110 0000 0101 = 4605h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x46);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH3SET 05h (0100 0111 0000 0101 = 4705h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x47);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH4SET 05h (0100 1000 0000 0101 = 4805h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x48);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH5SET 05h (0100 1001 0000 0101 = 4905h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x49);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x10);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH6SET 05h (0100 1010 0000 0101 = 4A05h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x4A);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH7SET 05h (0100 1011 0000 0101 = 4B05h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x4B);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);
//WREG CH8SET 05h (0100 1100 0000 0101 = 4C05h)
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x4C);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x90);
SysCtlDelay(20);

//Put the device back to RDATAAC
SSIDataPut(SSI3_BASE,0x10); //RDATAAC command
SysCtlDelay(20);

//Step 11: Capture data and test signal
// Look for DRDY_barrado and issue 24+n x 24 SCLKs
//while (GPIOPinRead(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_6) == 0);

//Put the device back to RDATAAC
//SSIDataPut(SSI3_BASE,0x11); //SDATAAC command
SysCtlDelay(20);

//GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6, 0xFF); // CS_barrado = 1

//uint8_t ulDataRx;

```

```

//uint32_t clock = SysCtlClockGet();

while (1) {

}

}

void UARTIntHandler(void){

    count_while = count_while + 1;

    GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4, 0xFF);

    // Recebe um caracter especifico na uart
    UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE);

    // ENVIO UART
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, 0x63);

    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, CH1_byte1_send);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, CH1_byte2_send);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, CH1_byte3_send);

    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, Channel15_send.i8[2]);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, Channel15_send.i8[1]);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, Channel15_send.i8[0]);

    // UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, Channel16_send.i8[2]);
    // UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, Channel16_send.i8[1]);
    // UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, Channel16_send.i8[0]);

    // Clear the GPIO Interrupt
    UARTIntClear(UART0_BASE, UART_INT_RX | UART_INT_RT);

    GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_4, 0x00);

}

void DRDYIntHandler(void){

    uint32_t ulDataRx;

    // Variaveis
    //uint32_t inicio = 'I';
    uint32_t ch1_byte1;
    uint32_t ch1_byte2;
    uint32_t ch1_byte3;
    uint32_t ch7_byte1;
    uint32_t ch7_byte2;

```

```

uint32_t ch7_byte3;
uint32_t ch5_byte1;
uint32_t ch5_byte2;
uint32_t ch5_byte3;
uint32_t ch6_byte1;
uint32_t ch6_byte2;
uint32_t ch6_byte3;
uint32_t ch8_byte1;
uint32_t ch8_byte2;
uint32_t ch8_byte3;
uint32_t reg1;
uint32_t reg2;
uint32_t reg3;
//uint32_t fim = 'F';

GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_6, 0xFF);

// Clear the GPIO Interrupt
//GPIOIntClear(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_6);
//SysCtlDelay(500);
GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6, 0x00); // CS_barrado = 0 (enable)

count = count + 1;

// LEITURA SPI

SSIDataPut(SSI3_BASE, 0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE, 0x00);
SSIDataPut(SSI3_BASE, 0x00);
while (SSIBusy(SSI3_BASE)) continue;
SSIDataGet(SSI3_BASE, &reg1);
SSIDataGet(SSI3_BASE, &reg2);
SSIDataGet(SSI3_BASE, &reg3);

SSIDataPut(SSI3_BASE, 0x00);
while (SSIBusy(SSI3_BASE)) continue;
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ch1_byte1); //ch1 byte 1
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ch1_byte2); //ch1 byte 2
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ch1_byte3); //ch1 byte 3
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ulDataRx); //ch2 byte 1
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ulDataRx); //ch2 byte 2
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ulDataRx); //ch2 byte 3
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ulDataRx); //ch3 byte 1
SSIDataGet(SSI3_BASE, &ulDataRx); //ch3 byte 2

SSIDataPut(SSI3_BASE, 0x00);

```

```

SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
while (SSIBusy(SSI3_BASE)) continue;
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ulDataRx); //ch3 byte 3
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ulDataRx); //ch4 byte 1
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ulDataRx); //ch4 byte 2
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ulDataRx); //ch4 byte 3
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch5_byte1); //ch5 byte 1
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch5_byte2); //ch5 byte 2
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch5_byte3); //ch5 byte 3
SSIDDataGet(SSI3_BASE, &ch6_byte1); //ch6 byte 1

SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
SSIDDataPut(SSI3_BASE,0x00);
while (SSIBusy(SSI3_BASE)) continue;
SSIDDataGet(SSI3_BASE, &ch6_byte2); //ch6 byte 2
SSIDDataGet(SSI3_BASE, &ch6_byte3); //ch6 byte 3
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch7_byte1); //ch7 byte 1
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch7_byte2); //ch7 byte 2
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch7_byte3); //ch7 byte 3
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch8_byte1); //ch8 byte 1
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch8_byte2); //ch8 byte 2
SSIDDataGet(SSI3_BASE,&ch8_byte3); //ch8 byte 3

Channel5.i8[2] = ch5_byte1;
Channel5.i8[1] = ch5_byte2;
Channel5.i8[0] = ch5_byte3;

//if (ch5_byte1&0b10000000 == 0b10000000)
// {
//   Channel5.i8[3] = 0xFF;
// }
//else
//   Channel5.i8[3] = 0x00;

//Channel6.i8[2] = ch6_byte1;
//Channel6.i8[1] = ch6_byte2;
//Channel6.i8[0] = ch6_byte3;

//Valores para ser feito a média.
//Channel6_acc.i32 = Channel6_acc.i32 + Channel6.i32;
//Channel5_send.i32 = Channel5.i32;
//Channel5_acc.i32 = Channel5_acc.i32 + Channel5.i32;

```

```
Channel15_acc = Channel15_acc + Channel15.i32;

//Realizando a média de 20 amostras, levando em conta que são enviados 1000,
vão ser enviados para o computador 25 amostras por segundo
if (count >= 40)
{
    //Channel6_send.i32 = Channel6_acc.i32/20;
    Channel15_send.i32 = Channel15_acc/40;

    // Channel6_send.i32 = Channel6.i32;
    // Channel15_send.i32 = Channel15.i32;

    //zerando os valores para serem somados novamente
    //Channel6_acc.i32 = 0;
    Channel15_acc = 0;
    count = 0;
}

// Clear the GPIO Interrupt
GPIOIntClear(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_6);

GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6, 0xFF); // CS_barrado = 1 (disable)

GPIOPinWrite(GPIO_PORTC_BASE, GPIO_PIN_6, 0x00);

}
```