

Projeto de graduação

PROCESSAMENTO DE IMAGENS PARA A  
OBTENÇÃO DE DADOS EM ESCOAMENTO  
BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO

Puc -Rio

Aluno: Carlos Eduardo Rodrigues Correia

Orientadores: Igor de Paula Braga e Luis Fernando Alzuguir Azevedo

# Resumo

Este trabalho foi desenvolvido durante os cinco anos de iniciação científica que fiz no laboratório de engenharia de fluidos. Durante esse tempo trabalhei em projetos que vieram a ser transformar em teses de mestrado e trabalhos científicos publicados em revistas indexadas. Neles se incluem a tese de mestrado de Paula Stofer Cordeiro de Farias, a tese de doutorado de Javier Barusco e a tese de mestrado de Wallace Rosa Laurindo de Oliveira. Sendo assim, o presente documento apresenta uma descrição das contribuições fornecidas àqueles trabalhos.

No trabalho buscou-se em estudar dois regimes de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais, sendo eles o anular e o de bolhas alongadas. Para obter dados sobre esses escoamentos realizaram-se experimentos utilizando a técnica PLIF ( *Planar Laser Induced Fluorescence* ). A técnica consiste em dissolver um corante fluorescente na fase líquida do escoamento. O corante tem a propriedade de, ao ser excitado com uma luz de um determinado comprimento de onda, ser capaz de emitir luz em um comprimento de onda diferente. Assim, ao se iluminar o escoamento com um plano laser, o corante reage destacando a fase líquida da fase gasosa. Um filtro óptico foi utilizado para bloquear a luz da fonte de iluminação, permitindo a passagem somente da luz do corante. As imagens obtidas foram coletadas com câmeras de alta velocidade e posteriormente processadas. Para a visualização do escoamento, duas configurações foram utilizadas nesse trabalho. Uma longitudinal, onde somente uma câmera foi usada e outra estereoscópica onde duas câmeras foram empregadas para visualização da seção transversal do tubo. Para a medição de parâmetros da interface do escoamento, tais como fração de vazio, velocidade de propagação de ondas, frequência das perturbações dentre outras, foi necessário realizar uma calibração das imagens obtidas. Essa calibração foi realizada para se obter a relação

pixel por mm da imagem longitudinal e oferecer dados que permitissem realizar uma correção da distorção das imagens na configuração estereoscópica. Algoritmos de pré-processamento foram desenvolvidos para melhorar a eficiência na detecção das interfaces entre os fluidos e corrigir as distorções ópticas. Para correção das distorções ópticas foram implementados e utilizados dois métodos numéricos distintos. Por fim o processamento das imagens permitiu que fossem obtidos dados quantitativos acerca da espessura de filme tanto no caso longitudinal como estereoscópico, da velocidade das ondas, dentre outros. Com esses dados foi possível extrair uma série de informações estatísticas acerca do comportamento da interface do escoamento bifásico nos regimes investigados. Os dados obtidos apresentaram também excelente correlação com aqueles observados na literatura e que foram obtidos através de outros métodos de medição.

Palavra chave = PLIF , Bifásico , Processamento de Imagem, Mínimos Quadrados, Espessura de Filme, Estereoscopia

## Sumário

1-Introdução.....	1
2-Metodologia.....	5
3-Técnica PLIF.....	7
4-Fotografia.....	10
4.1-Imagem Digital.....	10
4.2-Sensor da Câmera.....	11
4.3-Lente.....	11
4.5-Distância.....	12
4.6-Abertura do Diafragma.....	13
4.7-Visualização em Ângulo.....	14
5-Montagem Experimental.....	16
5.1- Seção de teste com tubo de diâmetro interno de 15,8mm.....	16
5.1.1-Alimentação.....	17
5.1.2-Medição de Vazão.....	18
5.1.3-Misturador.....	18
5.1.4-Tanque Separador.....	18
5.1.5-Tubulação.....	19
5.2-Seção de teste com tubo de diâmetro interno de 50,8mm.....	20
5.2.1-Alimentação.....	20
5.2.2-Medição de Vazão.....	21
5.1.3 -Sistema de Separação.....	21
5.1.5 -Tubulação.....	22
5.3-Seção de Visualização.....	22
5.3.1-Caixa de Visualização.....	22
5.3.2-Corante.....	25
5.3.3-Laser.....	25
5.3.4-Câmeras.....	26
5.3.5-Sincronizador.....	26
5.3.6-Filtro.....	26
5.3.7-Montagem Longitudinal.....	26
5.3.8-Montagem Estereoscópica.....	28
6-Calibração.....	29
6.1-Calibração Longitudinal.....	29
6.2-Calibração Estereoscópica.....	30
7-Processamento digital de imagens.....	33
7.1-Imagens Longitudinais.....	33
7.1.1-Equalização do Histograma.....	33
7.1.2-Normalização.....	35
7.1.3-Binarização.....	36
7.1.4-Espessura de filme.....	37
7.1.5-Velocidade das ondas.....	39
7.2-Imagens Estereoscópicas.....	40
7.2.1-Correção de distorção: Modelo RANSAC.....	41
7.2.2-Correção de distorção: Modelo de Mínimos Quadrados.....	43

7.2.3-Junção das Imagens.....	47
7.2.4-Contraste.....	48
7.2.5-Aplicação da Máscara.....	48
7.2.6-Espessura de Filme.....	49
8-Resultados.....	52
8.1-Longitudinal Anular.....	52
8.2-Estéreo Anular.....	53
8.3-Estéreo Bolha Alongada.....	55
9-Conclusão.....	58

## Índice de Figura

Figura 1.1 – Padrões de escoamento bifásico.....	2
Figura 1.2 – Mapa de escoamento bifásico.....	4
Figura 3.1 – Vista esquemática da técnica PLIF.....	7
Figura 3.2 – Imagem longitudinal do escoamento anular.....	8
Figura 3.3 – Visão esquemática da seção estereoscópica.....	9
Figura 4.1-Objeto, lente e imagem.....	12
Figura 4.2 – Grade quadricular vista em ângulo.....	14
Figura 5.1-Visão isométrica da seção de 15,8mm.....	17
Figura 5.2 – Visão longitudinal da seção de 15,8mm.....	17
Figura 5.3 – Tanque Separador.....	19
Figura 5.4 – Visualização isométrica da seção de 50,8mm.....	20
Figura 5.5 – Sistema de separação do ar e da água.....	21
Figura 5.6 – Caixa de Visualização Retangular.....	22
Figura 5.7 – Caixa de Visualização Hexagonal.....	23
Figura 5.8 – Caixa de Visualização Final.....	24
Figura 5.9 – Demonstração da luz emitida pelo corante dada uma luz de excitação.....	25
Figura 5.10 – Montagem Longitudinal.....	27
Figura 5.11 – Visualização Estereoscópica simplificada.....	28
Figura 6.1 – Grade de calibração do alvo.....	29
Figura 6.2 – Alinhamento do calibrador com o plano de laser.....	30
Figura 6.3 – Calibrador Estéreo seção de 15,8 mm.....	31
Figura 6.4 – Calibrador alinhado com o plano de laser.....	31
Figura 6.5 – Imagens do calibrador capturadas pela câmera da esquerda e da direita respectivamente.....	32
Figura 7.1 – Imagem original e seu histograma.....	33
Figura 7.2 – Sigmoides para a equalização de histograma.....	34
Figura 7.3 – Imagem com o histograma equalizado.....	35
Figura 7.4 – Imagem equalizada e normalizada.....	36
Figura 7.5 – Imagem Binarizada.....	37
Figura 7.6 – Esquemático da medição da espessura de filme em um escoamento anular.....	38
Figura 7.7 – Imagem demarcadas na medição da espessura de filme de um escoamento anular.....	39
Figura 7.8 – Imagem com os pontos selecionados pelo usuário.....	41
Figura 7.9 – Imagem do calibrador capturado pela câmera da esquerda e da direita depois de corrigida a distorção.....	43
Figura 7.10 – Grade visualizada em ângulo pela câmera e depois de corrigida a distorção.....	44
Figura 7.11 – Imagem distorcida de um calibrador e imagem corrigida a distorção.....	45
Figura 7.12 – Gráfico do erro dos polinômios de 2, 3 e 4 grau respectivamente.....	46
Figura 7.13 – Filtro aplicado na imagem da esquerda e da direita para a junção destas.....	47
Figura 7.14 – União das imagens da câmera da esquerda e da direita.....	48
Figura 7.15 – Imagem do tubo preenchido com água.....	49
Figura 7.16 – Máscara do tubo.....	49
Figura 7.17 – Esquemático da visualização transversal do escoamento anular.....	50
Figura 8.1 – Espessura de filme em escoamento anular. (Velocidade superficial do gás= 20 m/s , Velocidade superficial do líquido= 0.056 m/s, seção de 15,8 mm).....	52

Figura 8.2 – Gráfico da velocidade de onda.....	53
Figura 8.3 – Imagens das etapas de processamento.....	54
Figura 8.4 – Comparação entre as densidades de espectro do longitudinal e do estéreo.....	55
Figura 8.5 – Imagem estereoscópica de uma bolha alongada.....	56
Figura 8.6 – Imagem binarizada e com máscara de uma bolha alongada.....	57

## Índice de Equações

Equação 1 – Lei de Snell .....	12
Equação 2 – Magnificação .....	13
Equação 3 – Normalização da intensidade do pixel .....	35
Equação 4 – Mínimos Quadrados para correção do tamanho do pixel .....	44
Equação 5 – Polinômio do tamanho do pixel .....	44
Equação 6 – Definições para medição da espessura de filme ao redor do tubo.....	51



# 1-Introdução

Escoamentos bifásicos gás-liquido são frequentemente encontrados na natureza em processos como a chuva ou bolhas de gás submersas em água. Na indústria, as aplicações onde escoamentos bifásicos são mais comumente encontrados são a petrolífera, a química, a de geração térmica de energia, a de refrigeração, além de várias outras. O conhecimento das propriedades relacionadas ao escoamento bifásico é de extrema importância para aumentar a eficiência em trocadores de calor além da redução de desgaste em tubulações.

Diferentes condições de operações do escoamento bifásico em uma tubulação, tais como velocidade dos fluidos, temperatura, a geometria da tubulação, as propriedades do fluido, dentre outras podem levar a diferentes configurações de escoamento (geometria entre as interfaces). Em tubos horizontais a gravidade passa a ser um fator que leva a assimetria do escoamento. Na figura 1.1 pode ser visto os diferentes tipos de padrões observados em tubos horizontais (Taitel & Dukler, 1976).

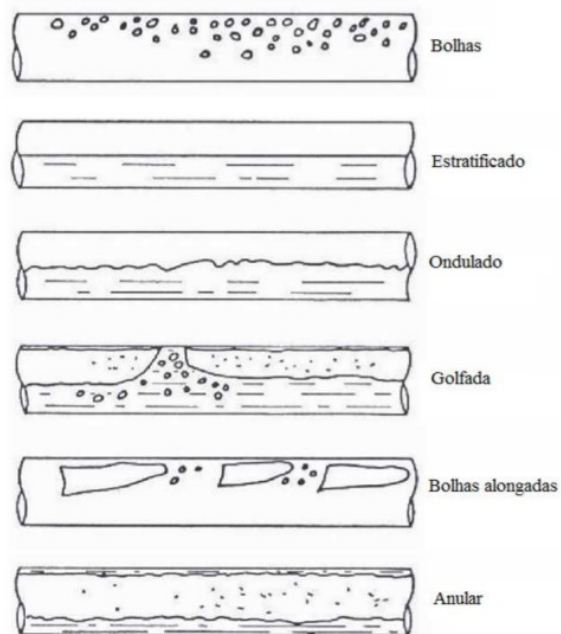


Figura 1.1 – Padrões de escoamento bifásico

**Padrão de Bolhas** - Este padrão ocorre para alta velocidade da fase líquida, mas com baixa ou média velocidade na fase gasosa. Nele ocorre que o tubo é basicamente preenchido com o líquido enquanto pequenas bolhas de gás percorrem dentro dele.

**Padrão Estratificado** – Este padrão ocorre para velocidade de gás e líquido relativamente baixo. Ele é caracterizado pela fase líquida escoar na parte de baixo do duto enquanto a fase gasosa escoar pela parte superior.

**Padrão Ondulado** – O aumento da velocidade do gás no escoamento estratificado leva a formação de ondulação na interface entre gás e líquido.

**Padrão de Bolhas Alongadas** – Neste tipo de padrão a fase gasosa e fase líquida se

intercalam através da formação de grandes bolhas gás e pistões de líquido. A bolha apresenta um formato de perfil de uma bala levemente deslocada para a parte superior do tubo devido ao efeito da gravidade , enquanto que na parte inferior se forma um filme líquido.

Padrão de Golfada – Similar ao de Bolhas Alongadas, no entanto a intermitência do escoamento passa a ser mais frequente e as bolhas passam a ter um formato mais irregular. Nesse regime as golfadas de líquido apresentam bolhas dispersas que promovem a transferência de gás de uma bolha alongada para outra através.

Padrão Anular – Esse padrão ocorre quando o gás escoar a uma velocidade alta. Nessa situação o gás percorre o centro do tubo enquanto que o líquido forma um filme na parede da tubulação. O filme líquido é maior na parte inferior devido à gravidade do que na parte superior. Existem várias teorias sobre a formação do filme, sabe-se que todas elas têm um efeito sobre sua formação. A principal é a que ocorre um bombeamento do líquido da parte inferior para a parte superior. Uma segunda explicação é o arrancamento de gotículas do líquido do filme inferior e a dispersão ao redor da parede do tubo(Russel & Lamb,1965).

No mapa abaixo é demonstrado os padrão de escoamento de acordo a vazão de gás e líquido para uma seção horizontal .

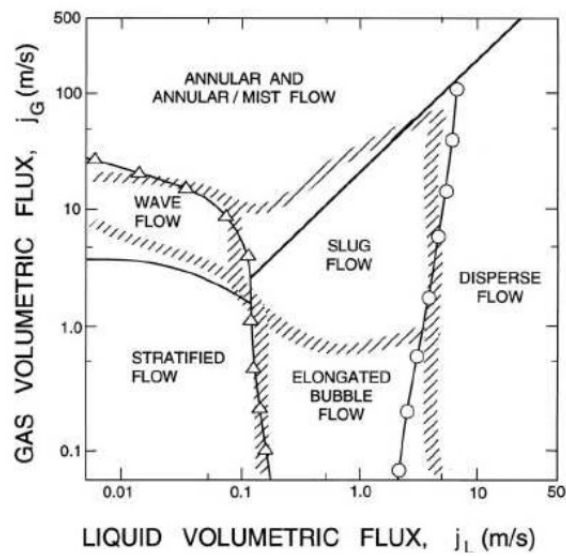


Figura 1.2 – Mapa de escoamento bifásico

No presente trabalho pretende-se investigar alguns desses regimes de escoamento. O objetivo é desenvolver técnicas não intrusivas que permitam investigar as propriedades desses escoamentos sem que o instrumento de medição altere o comportamento. A metodologia empregada bem como os equipamentos utilizados são descritos nas seções seguintes.

## 2-Metodologia

Esse trabalho trata dos padrões de escoamentos anular, golfada e bolhas alongadas. Para realizar esse estudo foram projetadas duas seções de testes, uma com tubulação de diâmetro interno 15,8 mm e outra com diâmetro de 50,8 mm. Essas seções serão descritas no capítulo 5.

A técnica experimental utilizada para a medição das características das interfaces do escoamento foi a de Fluorescência Induzida por Plano de Laser, mais conhecida pelo acrônimo em inglês PLIF( *Planar Laser Indused Fluorescence*). A técnica PLIF será discutida no capítulo 3. Essa é uma técnica puramente óptica, e sendo assim tem a vantagem de não ser intrusiva como as técnicas de sonda por impedância e a de malha de sonda. Além disso ela possui alta resolução espacial e permite a realização de medições detalhadas em uma região do escoamento. Se comparada a outras técnicas ópticas tal como a PST(*Pulsed Shadow Tecnhique*), o PLIF permite obter a espessura de filme líquido com menor incerteza de medição.

A técnica PLIF foi utilizada neste trabalho em duas formas diferentes, sendo elas a longitudinal e a estereoscópica. No caso longitudinal foram adquiridos dados sobre a altura de líquido ao longo de um determinado comprimento da tubulação. Já na configuração estereoscópica foram adquiridos dados da seção transversal do escoamento. As medições do escoamento foram feitas utilizando-se câmeras de alta velocidade para capturar a luz emitida pelo corante fluorescente. No caso estereoscópico, foram necessárias duas câmeras orientadas em ângulo em relação ao escoamento que fosse possível reconstruir a seção transversal da seção. No entanto, nesse caso as imagens vistas em ângulos apresentaram distorções. O capítulo 4 trata da aquisição das imagens e

das distorções da visão em ângulo.

Para determinar a relação de pixel por milímetros das imagens adquiridas foi necessário a realização de uma calibração. Além disso, na visualização estereoscópica se torna necessário uma calibração para corrigir as distorções de visualização em ângulo. O capítulo 6 descreve o processo de calibração.

Um pré-processamento das imagens foi realizado para corrigir a iluminação não uniforme e melhorar o contraste. Ele consistiu em realizar a equalização do histograma dos tons de cinza, normalização das intensidades de iluminação e a binarização das imagens. Além disso nas imagens estereoscópicas foi realizado a correção da distorção da visão em ângulo por duas maneiras diferentes, por RANSAC e por mínimos quadrados. Depois de corrigidos as imagens das duas câmeras foram unidas, formando assim a imagem transversal do escoamento.

O processamento das imagens longitudinais consistiu em determinar a espessura de filme das imagens binarizadas. Através da medição da espessura de filme em dois pontos da imagem e da correlação entre esse ponto em outras imagens é possível determinar a velocidade das ondas do escoamento. Na imagem transversal o processamento consistiu em obter a espessura de filme ao redor do tubo. O pré-processamento e o processamento são descritos no capítulo 7.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia de Fluidos da Puc-Rio, onde minha contribuição se baseou no projeto e construção da seção, além do desenvolvimento da técnica e na elaboração de rotinas de processamento de dados.

### 3-Técnica PLIF

A técnica PLIF é uma técnica muito usada em escoamento multifásico para determinar a separação entre as interfaces (Rodriguez & Shedd, 2004). Ela consiste em dissolver na fase líquida do escoamento um corante fluorescente, que ao ser iluminado por um plano de luz de determinada frequência emite luz em outra frequência. Depois disso utilizasse câmeras para capturar imagens da seção iluminada. Geralmente, utiliza-se um laser para fornecer a iluminação já que sua luz é menos difusa e possui intensidade suficiente para excitar o corante, no entanto hoje em dia já é possível utilizar iluminação com Leds de alta potência. Para melhorar as fotografias obtidas utiliza-se um filtro para separar a iluminação no comprimento de onda do Laser da iluminação do comprimento de onda emitido pelo corante. Como o escoamento trabalhado varia rapidamente no tempo se vê a necessidade de se utilizar Laser rápidos e câmeras de alta frequência para o registro das imagens. Na figura 3.1 se tem a exemplificação da montagem de PLIF.

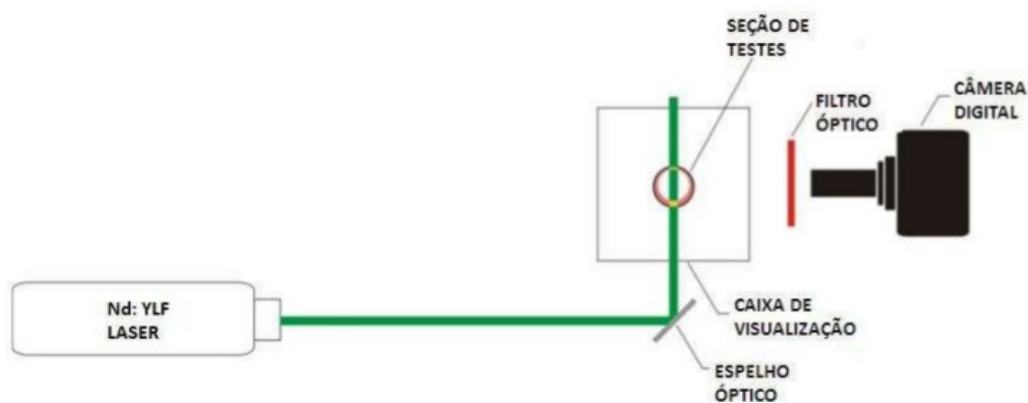


Figura 3.1 – Vista esquemática da técnica PLIF

A imagem formada do escoamento apresenta então o líquido como região clara e o gás como região escura. A figura 3.2 mostra uma imagem longitudinal do escoamento.

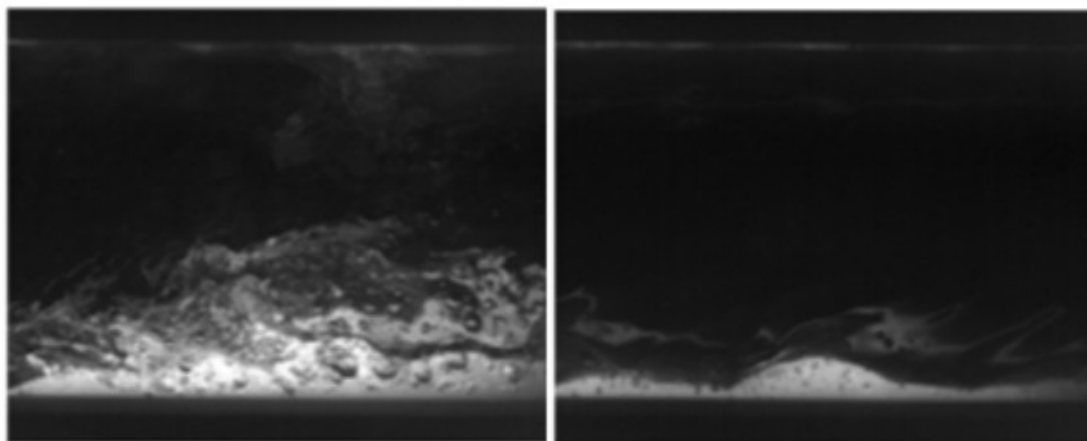


Figura 3.2 – Imagem longitudinal do escoamento anular

Um problema desta técnica é o fato de que a mudança de interface pode bloquear a visualização. Isso acontece se houver uma mudança na interface em um plano localizado entre a região de visualização e a câmera. Nesse caso, a luz emitida pelo corante acaba sendo refletida devido a variação do índice de refração e do ângulo de incidência da luz. Logo a câmera pode não ser capaz de captar toda a luz emitida pelo corante na região de visualização, o que pode levar a medidas incorretas na medição da interface. Assim se dentro do tubo ocorrer da fase gasosa ficar na frente da parte líquida, como em uma ondulação antecedente ao plano laser, ocorrerá que a câmera enxergará como gás (regiões escura da imagem) o que na verdade deveria ser líquido (regiões clara da imagem). No entanto, como os dados obtidos em outros trabalhos com essa técnica concordam com trabalhos que utilizam sondas condutivas, aceitou-se utilizar esta técnica pois ela tem a



vantagem de ser não intrusiva e ser capaz de fazer medições em áreas ao invés de pontos.

A versão estereoscópica da técnica consiste em iluminar com o plano de laser a seção transversal do escoamento. Utilizando-se então duas câmeras a 45°, uma direita e outra a esquerda obtém-se imagens da seção. Através do processamento das imagens é então possível obter a seção transversal da seção. Na figura a seguir pode ser visto a visão estereoscópica.



Figura 3.3 – Visão esquemática da seção estereoscópica.

## 4-Fotografia

Nesta seção será explicado o funcionamento de câmeras digitais, o que é uma imagem computacionalmente falando, o processo de formação desta. Além disso trataremos das distorções provocadas pela visualização em ângulo da visão estereoscópica.

### 4.1-Imagem Digital

Uma imagem digital é uma matriz , sendo que cada elemento recebe o nome de pixel. Se a imagem é preto e branco a intensidade do pixel é definido por um número, caso a imagem seja colorida, o pixel passa a ser definido por três número, cada um representando uma cor diferente. A representação mais comum para os pixel coloridos é a RGB, que corresponde as cores vermelho, verde e azul.

O número que representa a intensidade de cada pixel é um número binário, sendo que geralmente variam de 0 a 255. No entanto fotos com número máximo maior podem ser usadas caso se deseje obter melhor qualidade de tons.

## 4.2-Sensor da Câmera

O sensor da câmera é, basicamente, uma placa composta de vários pequenos sensores dispostos em forma de matriz. Sendo que é por eles que se formam a matriz de pixel da imagem. Caso a imagem seja colorida, 4 sensores da matriz são usados para fazer um pixel, sendo cada um dele possui um filtro que diz qual cor cada sensor recebe. No filtro de Bayer (o mais comum), são utilizados um sensor para o vermelho, um sensor para o azul e dois sensores para o verde. Isso se deve ao fato do olho humano possuir maior sensibilidade a cor verde que a outras cores.

Existem dois tipos de sensores que podem ser usados em uma câmera, o CCD(*charge-coupled device*) e o CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*). O CCD apresenta melhor sensibilidade, no entanto o CMOS apresenta maior velocidade no registro das fotos. Maior parte das câmeras de hoje em dia apresentam sensor CMOS , já que ele possuem menor custo de fabricação.

## 4.3-Lente

As lentes são usadas para formar a imagem de um objeto sobre o sensor da câmera. Através delas é determinado o tamanho da imagem que será formado.

As lentes geralmente são construídas com materiais de índice de refração superior ao do ar, o que provoca a mudança nas direções dos feixes de luz incidentes sobre ela. Utilizando-se de um formato de lente convexo é possível focar os feixes de luz em um plano localizado do outro lado da lente. Na figura 4.1 pode-se visualizar os feixes atravessando uma lente.

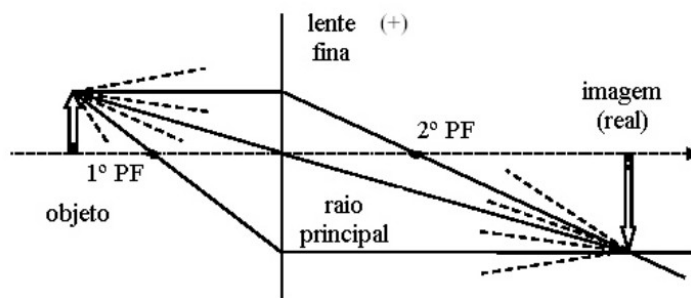


Figura 4.1-Objeto, lente e imagem

Na verdade, lentes fotográficas são formadas por conjuntos de lentes, que juntas dão maior flexibilidade ao visualizar o objeto. No entanto para efeito de cálculos assumiremos como uma única lente.

## 4.5-Distância

A distância normal entre objeto e a lente é chamada de distância objeto “O” e a distância entre a lente e a imagem é chamada de distância imagem “I”. A distância onde os feixes paralelos ao eixo da lente se concentram ao passarem pela lente é determinada distância focal “f”. A equação abaixo é a equação de uma lente.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{O} + \frac{1}{I} \quad (1)$$

Como a função para a lente segue relações trigonométricas, a proporção entre a distância

imagem e a distância objeto é mesma relação entre a altura do ponto da imagem a altura do ponto objeto. A esta relação é dada o nome de magnificação como demonstrada pela equação abaixo.

$$M = \frac{I}{O} \quad (2)$$

Idealmente o sensor da câmera deve ficar na distância da formação da imagem, no entanto, como a matriz de sensores é discreta pode-se obter a formação de uma imagem em uma pequena faixa de distâncias. Dentro dessa faixa a imagem observada na câmera é dita como “focada”. Já fora dessa região ocorre um espalhamento de luz em sensores adjacente e a imagem é dita “fora de foco”. Quanto maior for a distância focal da lente menor será o espalhamento de luz devido ao afastamento da posição ideal, no entanto maior terá que ser a distância objeto e a distância lente, para se possa obter uma imagem com o mesmo tamanho. A utilização de lente com distância focal maior pode, também, levar a perda de iluminação, já que o raio físico da lente e a distância objeto são limitadores do ângulo da luz recebida pela lente.

## 4.6-Abertura do Diafragma

As lentes fotográficas profissionais possuem também um diafragma com abertura ajustável. Esse sistema controla os ângulos dos feixes de luz do objeto que chegam ao sensor da câmera e consequentemente alteram a intensidade de luz que chega ao sensor. O controle do diafragma permite alterar as distâncias onde pode observar imagens focada no plano do sensor.

## 4.7-Visualização em Ângulo

Quando se visualiza um objeto que possui distância variável em relação a lente, a sua imagem passa a ter distorções. Essas distorções são de três tipos, sendo eles projeção, magnificação e foco.

Na distorção por projeção tem-se que o sensor da câmera só captura o que é normal a si, ou seja ao se visualizar um plano inclinado o sensor só vai capturar a projeção do plano inclinado no plano do sensor. No caso do plano da visão estereoscópica a  $45^\circ$  se tem-se que a largura da imagem é comprimida a seno de  $45^\circ$  da original.

Na distorção por magnificação se tem que ao aumentar a distância entre o objeto e a lente, o tamanho da imagem se reduz. Assim um plano inclinado passa a ser visualizado com tamanho diferente de acordo com a distância deste a lente. Na figura a seguir temos a imagem de um grade de espaçamento regular em ângulo, apresentando as duas primeira distorções.

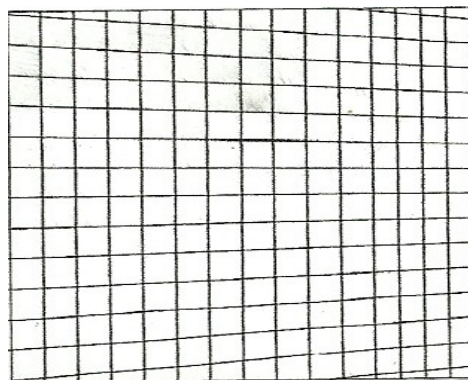


Figura 4.2 – Grade quadricular vista em ângulo

Observe que a linha horizontal encontrasse inclinada, isso se deve a variação da magnificação, fazendo que a parte da direita da imagem contenha mais quadrados do que a parte da esquerda, apesar dos quadrados serem fisicamente do mesmo tamanho.

Para resolver essa duas distorções é necessário a realização de uma calibração e de ser efetuado a recuperação das imagens através de um processamento digital destas.

A terceira distorção ocorre devido ao fato que ao se aumentar a distância entre o objeto e a lente a distância da imagem também varia. Portanto a imagem passa a se formar parcialmente fora do sensor da câmera. Logo não se encontra totalmente focada.

Para reduzir esse problema poderíamos aumentar as distâncias focais, do objeto e da imagem, isso levaria ao aumento do campo de profundidade da imagem(zona onde a imagem encontrasse razoavelmente focada), mas levaria a redução da intensidade luminosa que chega a câmera. Também poderíamos diminuir a abertura, mas perderíamos ainda mais iluminação.

Então para reduzir o problema utilizamos a regra de Scheimplug(Raffel). Ela diz que ao estabelecermos um ângulo entre o sensor da câmera e a lente, de forma que o plano do de visualização, o plano da lente e o plano do sensor se cruzem ao mesmo tempo obtemos a menor perda de foco possível.

## 5-Montagem Experimental

Inicialmente projetou-se uma seção de testes composta por um tubo circular com diâmetro interno de 15,8 mm para o desenvolvimento e implementação das técnicas de PLIF aplicadas a medição de escoamento bifásico. Depois de verificada a viabilidade da técnica foi projetada uma seção de ensaios com uma tubulação de 50,8mm de diâmetro interno. E por fim a necessidade de aprimoramento da técnica, além da necessidade de eliminar fontes de ruídos do escoamento levaram a mais um aprimoramento da seção de testes.

A estrutura da seção foi montada com perfis Bosch de 45x45mm. Isso conferiu uma maior flexibilidade na montagem, uma redução no tempo de construção e uma maior precisão no alinhamento dos tubos. Esses fatores são importantes em uma montagem de seção que deverá ser utilizada para vários experimentos.

### 5.1- Seção de teste com tubo de diâmetro interno de 15,8mm

A figura 5.1 e 5.2 apresentam uma visão isométrica e longitudinal da seção de teste. As setas azuis indicam os circuitos de escoamento de líquido enquanto que as setas verdes representam o circuito da fase gasosa no escoamento.



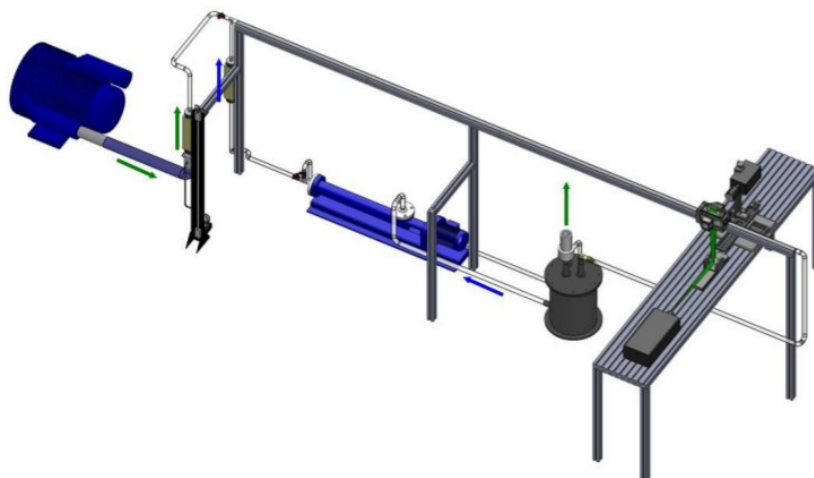


Figura 5.1-Visão isométrica da seção de 15,8mm

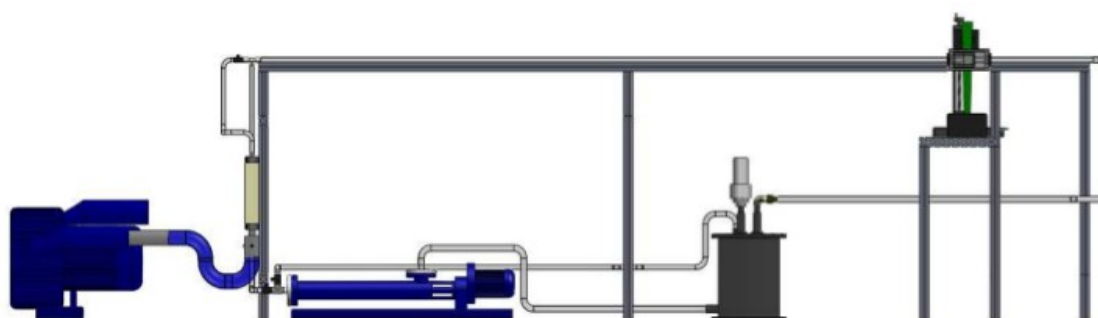


Figura 5.2 – Visão longitudinal da seção de 15,8mm

### 5.1.1-Alimentação

Uma bomba de cavidade progressiva era utilizada para fornecer o escoamento líquido para a seção. A bomba possuía 0,5cv de potência, pressão máxima de  $6,0\text{kgf/cm}^2$  e vazão máxima de  $5,5\text{m}^3/\text{s}$ . A bomba era controlada por um inversor de frequência da WEG.

O ar era fornecido por um compressor com potência de 23,2 cv, pressão máxima de 4600mm de mercúrio e vazão máxima de 10m<sup>3</sup>/min. O compressor também era controlado por um inverso de frequência da WEG.

#### 5.1.2-Medição de Vazão

Dois rotâmetros eram utilizados para medir a vazão dos fluidos. O rotâmetro da CONAUT, com escala entre 0,21 a 2 L/min era utilizado para medir a vazão da água e rotâmetro da OMEL com escala de 50 m<sup>3</sup> /min para medir a vazão do ar.

#### 5.1.3-Misturador

Um cano de PVC de ¾” em formato de “T” era utilizado na entrada da tubulação para promover a mistura da fase líquida com a fase gasosa.

#### 5.1.4-Tanque Separador

Um tanque de aço inox de 50L foi utilizado para separar o ar da água e armazenar a água para ser reutilizada. No meio do tanque existe uma placa separadora. Esta possui a função impedir que gotas de líquido entranhadas na fase gasosa escapem ao se eliminar o ar. A figura 5.3 demonstra o tanque utilizado.

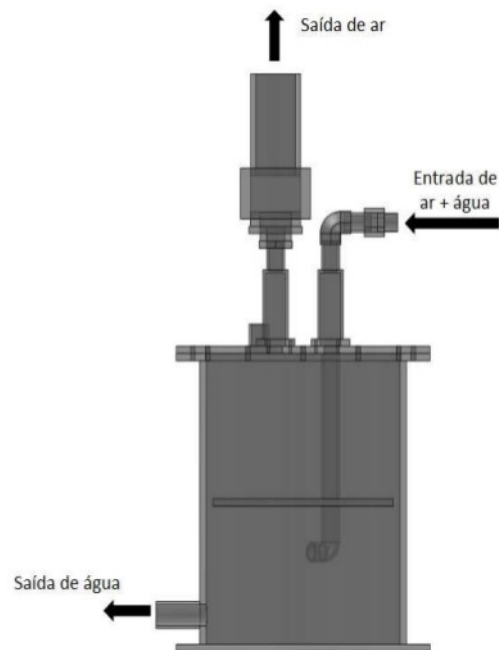


Figura 5.3 – Tanque Separador

#### 5.1.5-Tubulação

O tubo utilizado nesta seção de teste possuía 15,8 mm de diâmetro interno , 4,03 m de comprimento ou 255 diâmetros e era feito de FEP(*Fluorinated Ethylene Propylene*). Este material possui a propriedade de ter o índice de refração próximo ao da água, assim não existe difração entre a luz que percorre dentro da fase líquida e o tubo.(Hewitt et al., 1990)

## 5.2-Seção de teste com tubo de diâmetro interno de 50,8mm

A figura 5.4 apresenta a seção com diâmetro interno de 50,8mm.



Figura 5.4 – Visualização isométrica da seção de 50,8mm

### 5.2.1-Alimentação

Para bombear a água foi usada uma bomba de cavidade progressiva com potência de 1cv, pressão máxima de 6,0Kgf/cm<sup>2</sup> e vazão máxima de 12m<sup>3</sup>/h. A bomba era controlada por inversor de frequência da WEG.

Para o escoamento de ar foi usado o mesmo sistema compressor e inversor da seção de 15,8mm.

### 5.2.2-Medição de Vazão

Para medir a vazão do escoamento se utilizava duas turbinas da marca Contech. Uma para a água, com faixa de operação de 0,67 à 6,8 m<sup>3</sup>/h e outra para o ar com 85 a 850 m<sup>3</sup>/h.

### 5.1.3 -Sistema de Separação

Dois tanques eram utilizados nesta seção. O primeiro de 100L tinha como objetivo separar a água e o ar. O segundo tanque com capacidade de 150L era usado para armazenar água. Uma bomba centrífuga de 0,75cv era utilizada para retirar a água do primeiro tanque e abastecer o segundo. O ar do primeiro tanque também ia para o segundo tanque, afim de evitar a eliminação de líquido com o ar. Na figura 5.5 pode ser visto o sistema de separação das fases e armazenamento da água.

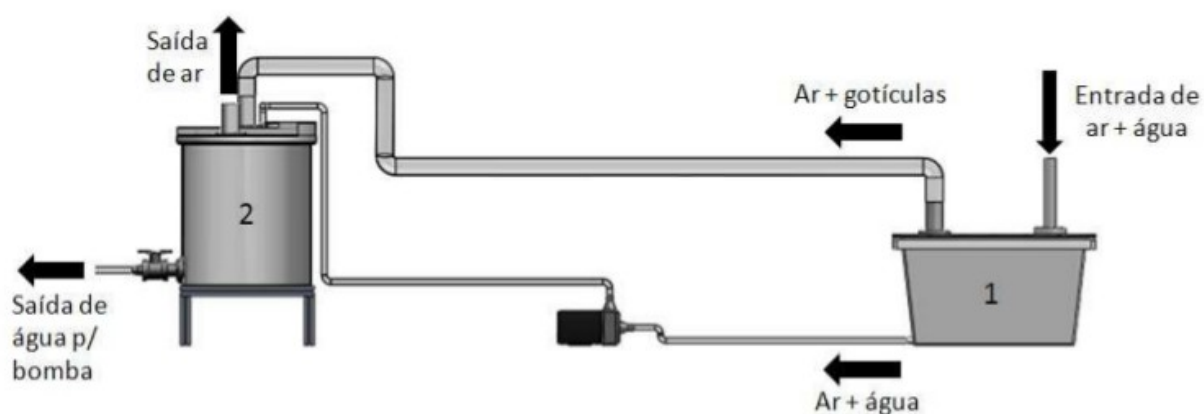


Figura 5.5 – Sistema de separação do ar e da água

### 5.1.5 -Tubulação

O tubo usado nesta seção possui 2” ou 50,8 mm de diâmetro interno, 11 metros de comprimento ou 217 diâmetros e também era feito de FEP.

## 5.3-Seção de Visualização

### 5.3.1-Caixa de Visualização

A caixa de visualização para seção de 15,8mm foi projetada de forma retangular. Janelas de visualização foram adicionadas do lado direito e esquerdo permitindo assim a visualização estereoscópica do escoamento. Ao preencher a caixa com água eliminávamos a reflexão entre o ar e o tubo de FEP. Janelas de vidro foram adicionadas na parte superior e inferior desta, evitando assim que a caixa seja danificada com o feixe de laser.

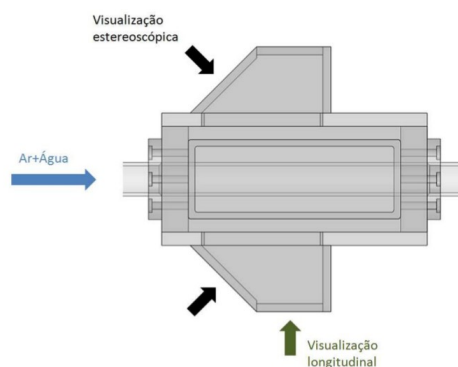


Figura 5.6 – Caixa de Visualização Retangular

Por outro lado, a caixa de visualização para a seção de 50,8mm apresenta formato hexagonal, o que permite que o arranjo estereoscópico seja montado contra ou a favor da direção do escoamento. Ela também possui janelas de vidro na parte inferior e superior. Na figura 5.7 pode ser visto a caixa de visualização de 50,8mm.

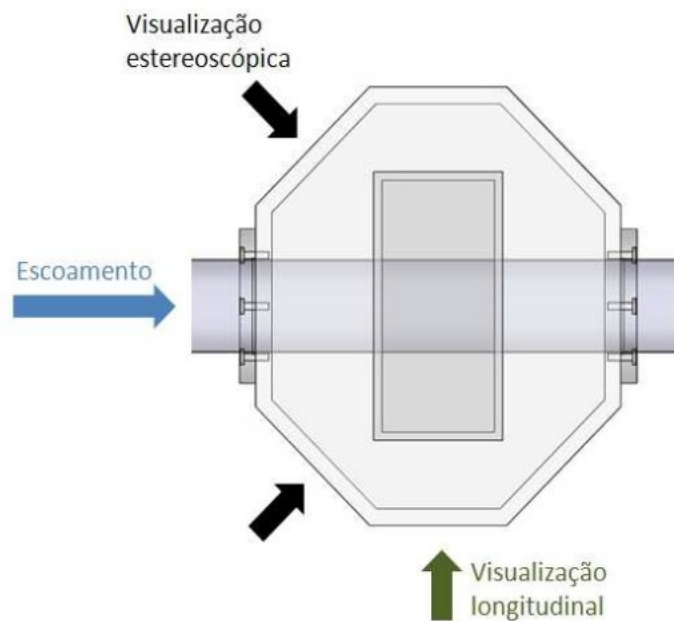


Figura 5.7 – Caixa de Visualização Hexagonal

Por fim uma nova caixa de visualização foi projetada e construída com base nos protótipos anteriores. A ideia com essa caixa era de criar um dispositivo que permitisse a visualização em diversos arranjos, sem ser necessário a construção de uma caixa para cada configuração. Desse modo esperasse que seja possível iluminar o escoamento em 8 posições diferentes para permitir que a iluminação possa vir de 8 posições diferentes, permitindo assim melhorar a uniformização da iluminação. Além disso, a caixa permite a visualização em 16 posições. Outra adaptação utilizada no projeto da caixa foi a de flange intercambiáveis para a montagem da tubulação da bancada de

testes. Esses flanges têm a função de conectar a caixa na seção de testes e fazem a vedação da caixa com a parte externa da tubulação para que a caixa possa ser preenchida com líquido. Com o uso de flanges intercambiáveis a caixa pode ser acoplada em diferentes bancadas com tubulação de diferentes diâmetros. Para isso é necessário somente a construção de um novo flange com as dimensões adequadas. Esse dispositivo tem um custo muito menor do que uma caixa de visualização e pode ser confeccionado rapidamente. Na figura 5.8 pode ser visto o desenho da nova caixa de visualizações.

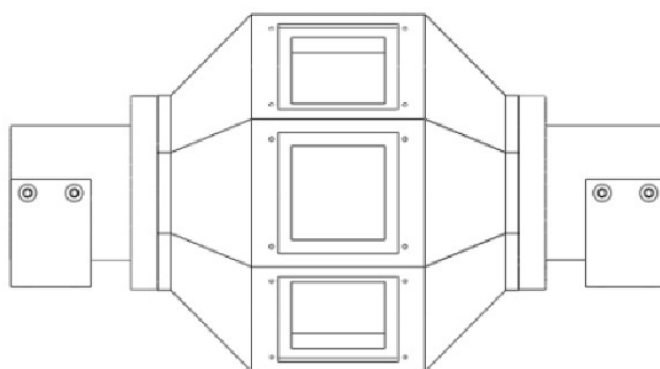


Figura 5.8 – Caixa de Visualização Final



### 5.3.2-Corante

O corante fluorescente utilizado é a *Rhodamine 610 Chloride*. Esse corante ao ser excitado com uma luz de comprimento de onda na faixa dos 527nm (luz verde), fluoresce na faixa dos 610nm (luz vermelha). A figura a seguir ilustra as bandas de comprimento de onda de uma excitação com a emissão do corante.

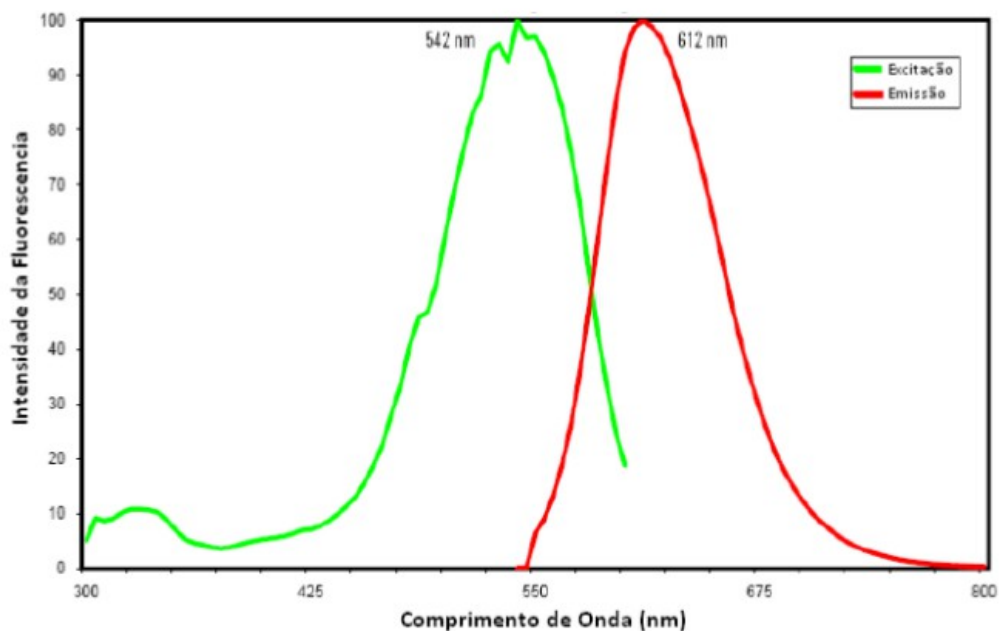


Figura 5.9 – Demonstração da luz emitida pelo corante dada uma luz de excitação

### 5.3.3-Laser

Um laser Nd:YLF de dupla cavidade e alta taxa de repetição foi utilizado para iluminar a seção, e consequentemente excitar o corante. O comprimento de onda do laser é de 527nm com duração de 5ns.

#### 5.3.4-Câmeras

A câmera utilizada para a captura de imagens do escoamento foi uma Motion PRO x3. O sensor desse equipamento é baseado na tecnologia CMOS. A resolução máxima é de 1280x1024 pixels. O equipamento possui memória interna de 8GB. O tamanho da memória e o fator de amostragem limitam o tempo de medição. O software de aquisição de imagem é o fornecido pela empresa da câmera.

#### 5.3.5-Sincronizador

Um sincronizador de sinais TSI modelo 610035 foi utilizado para o controle do disparo do laser e da captura de imagens da câmera. O sincronizador era configurado através do software INSIGHT 3G.

#### 5.3.6-Filtro

Um filtro óptico com corte na faixa dos 550nm foi usado para impedir que a luz do laser chegasse a câmera, só permitindo assim a luz da fluorescência do corante.

#### 5.3.7-Montagem Longitudinal

Os testes iniciais foram feitos com uma configuração adequada para a visualização do escoamento na direção longitudinal. Nesse arranjo o plano de iluminação foi posicionado no centro da tubulação, de modo a cobrir uma região ao longo da direção do escoamento. A figura 5.10,

ilustra essa montagem. Para a geração do plano de iluminação utilizou-se uma cilíndrica e uma lente esférica para diminuir a espessura do plano de laser na região de visualização. Por fim utilizou-se um espelho de alta potência inclinado com um ângulo de  $45^\circ$ , fazendo assim com que o plano atravessasse a seção longitudinalmente.

Posteriormente montou-se a câmera em uma mesa de coordenadas, de forma a visualizar o escoamento na região do tubo iluminado pelo plano de luz. Um filtro óptico foi posicionado na janela de visualização da caixa, em frente da câmera para reduzir a intensidade de luz no comprimento de onda do laser e priorizar a luz emitida pelo corante.

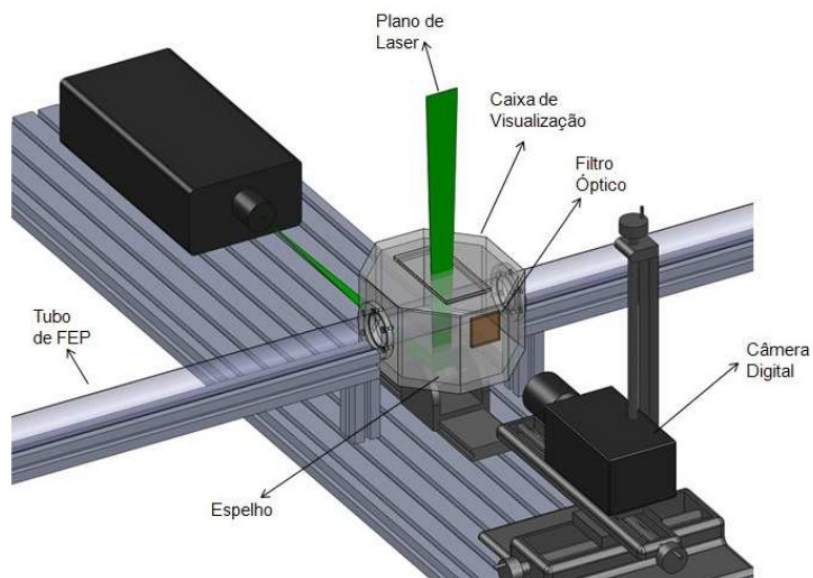


Figura 5.10 – Montagem Longitudinal

### 5.3.8-Montagem Estereoscópica

Na montagem estereoscópica viu-se a necessidade de se iluminar tubulação na parte superior e inferior ao mesmo tempo, para se obter uma iluminação mais uniforme do escoamento. Com isso houve a necessidade de se dividir o feixe do laser para formação de dois planos de luz. Para dividir o feixe foi utilizado um beam splitter de 45° de inclinação com um fator de divisão de aproximadamente 50 por 50%. No feixe horizontal posicionou-se então as lentes esférica, cilíndrica e o espelho afim de criar o plano transversal inferior. No feixe vertical, dois espelhos foram usados afim de posicionar o feixe para a parte superior da seção. Então uma lente esférica e outra cilíndrica foram usadas para criar o plano de laser.

Duas câmeras foram posicionadas a 45° da seção, uma a direita e outra a esquerda. Uma mesa de perfis Bosh foi montada para dar fácil manuseio a esta. Filtros ópticos foram montando nas janelas da caixa de visualização. A figura 5.11 demonstra de forma simplificada a montagem estereoscópica.

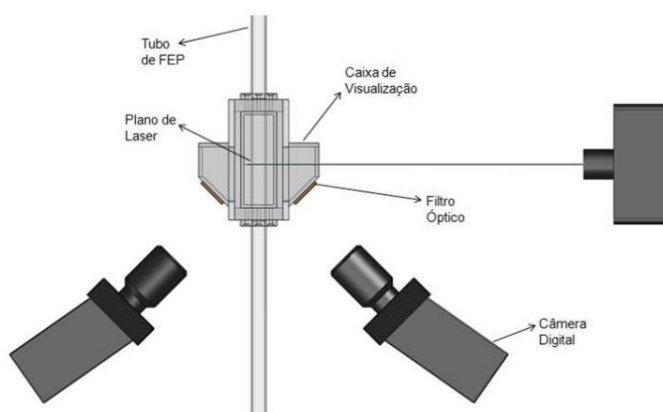


Figura 5.11 – Visualização Estereoscópica simplificada

## 6-Calibração

### 6.1-Calibração Longitudinal

O objetivo com a aquisição e o processamento das imagens é a obtenção de dados quantitativos acerca das alturas de líquido na tubulação. Para transformar os dados das imagens, de unidade de pixels, para valores em dimensões físicas é necessário realizar uma calibração. Para determinar a relação pixel/mm de uma imagem construiu-se um alvo de calibração, onde a face longitudinal possuía uma malha padrão quadriculada de espaçamento de  $1\text{mm}^2$ . A figura 6.1 demonstra a face de calibração do alvo.

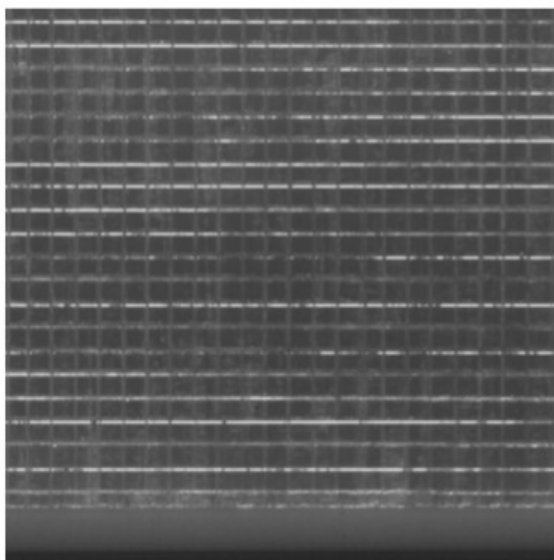


Figura 6.1 – Grade de calibração do alvo

O processo de calibração consiste em de inserir um calibrador na tubulação até que ele fique posicionado na região de visualização pelas câmeras. Esse calibrador deve, também ficar alinhado com o plano de iluminação. A figura 6.2 ilustra o processo de alinhamento.

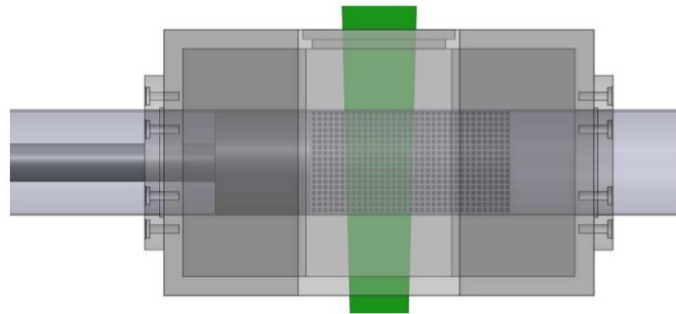


Figura 6.2 – Alinhamento do calibrador com o plano de laser

Depois ao se adquirir uma imagem com a câmera, utilizou-se o programa ImagemJ para determinar o número de pixel de um determinado espaçamento. Esse software é gratuito e pode ser facilmente obtido na internet. Sabendo-se o espaçamento em pixels dos marcadores do calibrador e conhecendo-se o valor físico desse espaçamento pode-se facilmente determinar a relação de conversão de pixels para mm.

## 6.2-Calibração Estereoscópica

Além da necessidade de determinar a relação pixel/mm, no caso estereoscópico há também a necessidade de se corrigir distorções da visualização. O alvo de calibração utilizado nesse caso é circular e possui a face marcada com pontos espalhados uniformemente conforme ilustrado na figura a seguir.

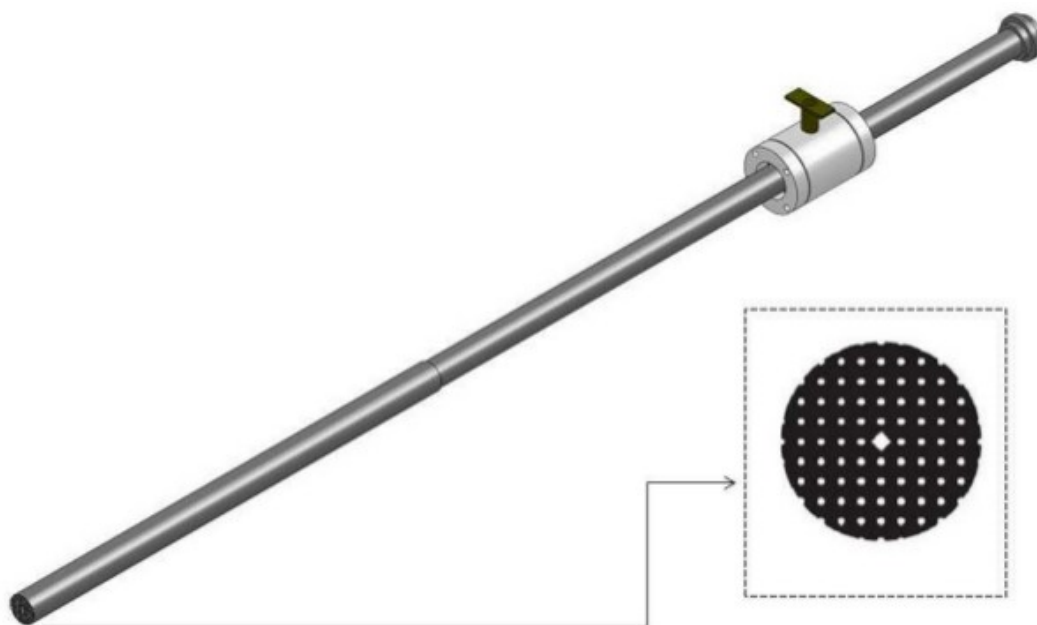


Figura 6.3 – Calibrador Estéreo seção de 15,8 mm

O processo de calibração consiste em inserir o alvo de calibração até que sua face circular coincida com plano transversal do laser. A figura 6.4 exemplifica o alinhamento da face do calibrador com o laser.

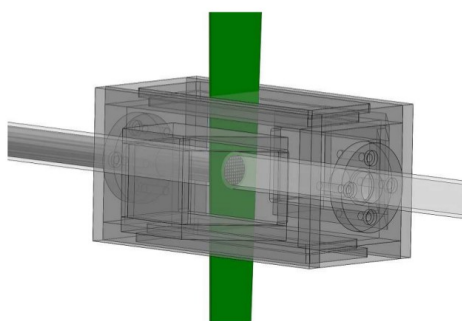


Figura 6.4 – Calibrador alinhado com o plano de laser.

Depois de capturar imagens do calibrador com as duas câmeras. As imagens então devem ser processadas para a reparação da distorção das imagens vista em ângulo. Para esse processamento foram desenvolvidas, no âmbito deste trabalho, algumas rotinas em linguagem Matlab. Essas rotinas serão descritas na próxima seção do trabalho. Na figura 6.5 pode ser visto as imagens capturadas pelas câmeras.

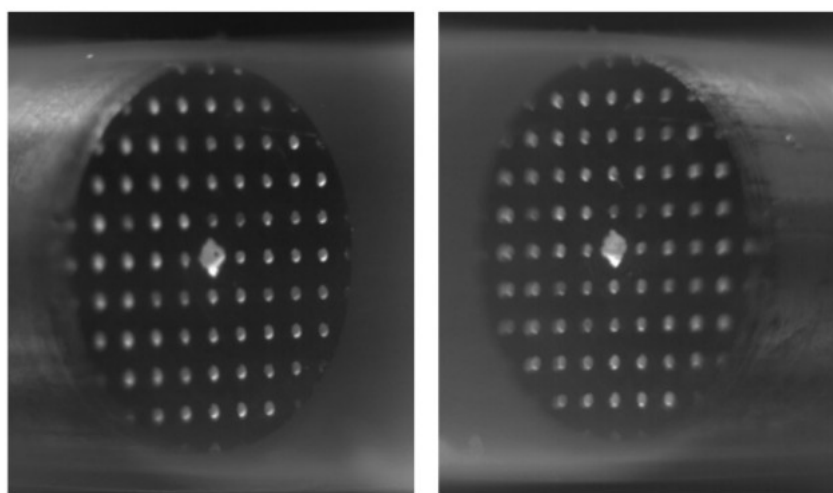


Figura 6.5 – Imagens do calibrador capturadas pela câmera da esquerda e da direita respectivamente



## 7-Processamento digital de imagens

### 7.1-Imagens Longitudinais

#### 7.1.1-Equalização do Histograma

Antes de obter os dados sobre a posição da interface gás-líquido é necessário fazer algumas correções das intensidades de iluminação das imagens obtidas. A primeira correção a ser feita é a equalização do histograma de nível de cinza da imagem, já que esta não apresenta iluminação uniforme. Isso é necessário devido ao fato de que o plano de laser ser mais intenso no centro que nas bordas. Na figura 7.1 pode ser visto uma imagem do escoamento e seu histograma.

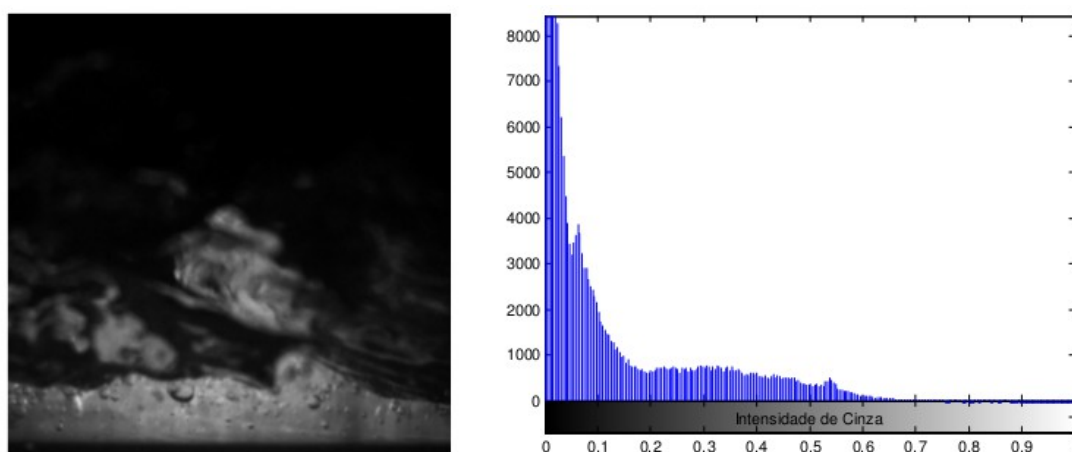


Figura 7.1 – Imagem original e seu histograma

Para equalizar o histograma deve aplicar uma conversão sigmoidal sobre a intensidade dos pixels. Esta função promove a redistribuição das intensidades de cinza da imagem afim de haver melhor distribuição na largura da faixa de intensidade e melhorar o contraste. Na figura 7.2 pode ser visto exemplos de funções sigmoides usado na equalização.

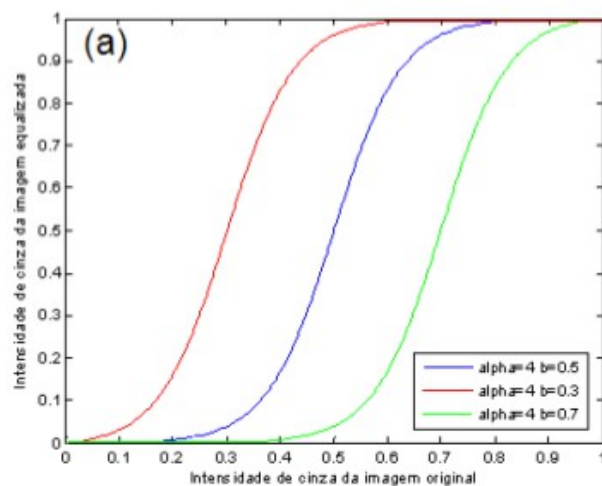


Figura 7.2 – Sigmoides para a equalização de histograma

Onde o alpha determina a inclinação da sigmoide e b determina o centro desta. Na figura 7.3 pode ser visto a imagem equalizada e seu histograma.

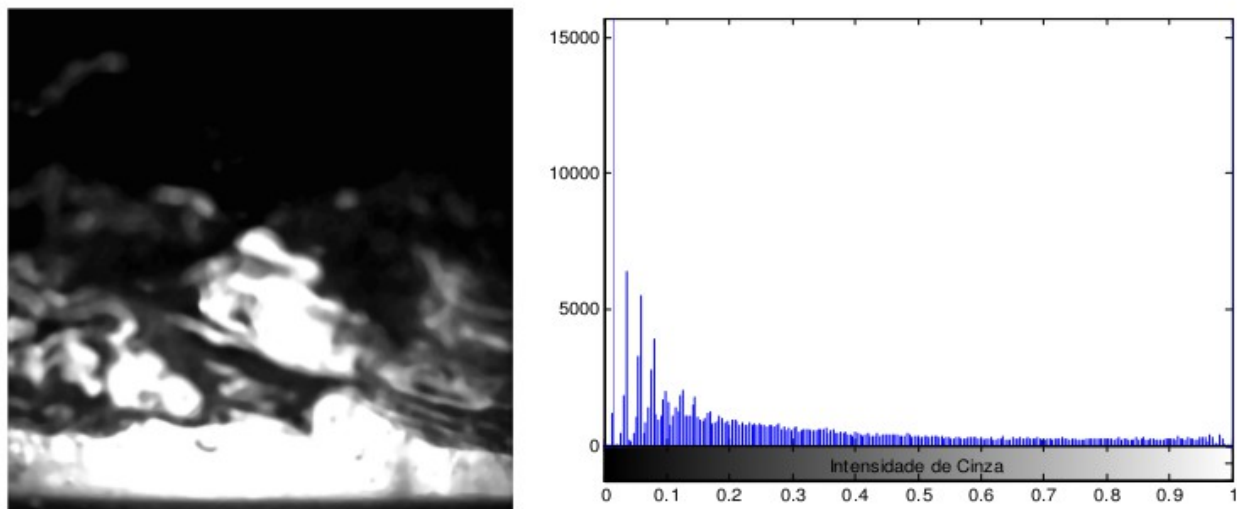


Figura 7.3 – Imagem com o histograma equalizado

### 7.1.2-Normalização

Pode-se verificar no histograma da figura 7.3 que há uma concentração de pixels com intensidade próxima de 0 (mais escuro) enquanto que poucos pixels com intensidade próxima de 255(mais claro). Logo, distribuição de intensidade de iluminação da imagem não engloba todos os níveis de intensidade possíveis.

Assim ao se normalizar a intensidade de cada coluna aumenta-se a faixa variação de tons da imagem, além de diminuir problemas por causados por iluminação não uniforme. Os pixels de cada coluna da imagem foram normalizada de acordo com a fórmula a seguir.

$$I_{norm} = \frac{255(I_y - I_{min})}{I_{max} - I_{min}} \quad (3)$$

Onde  $I_{\text{norm}}$  é o valor normalizado da intensidade do pixel,  $I_y$  é valor do pixel que se está normalizando,  $I_{\text{max}}$  é o valor de intensidade máximo na coluna onde está  $I_y$  e  $I_{\text{min}}$  é o valor de intensidade mínimo da coluna.

Na figura 7.4 pode ser visto uma imagem do escoamento equalizada e normalizada, além do seu histograma.

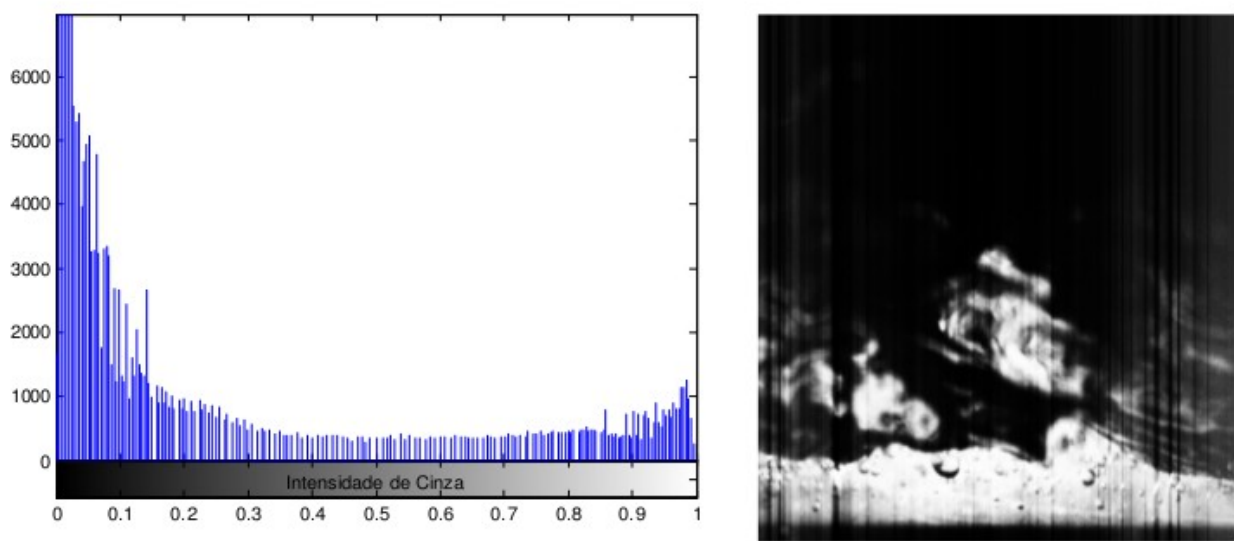


Figura 7.4 – Imagem equalizada e normalizada

### 7.1.3-Binarização

A binarização consiste em separar os pixels em dois grupos os com valor acima do threshold transformados em 255(branco) e os abaixo transformados em 0(preto). Assim a imagem binarizada fica como demonstrada na figura a seguir. Na figura as regiões brancas correspondem a fase líquida e as regiões escuras a fase gasosa.

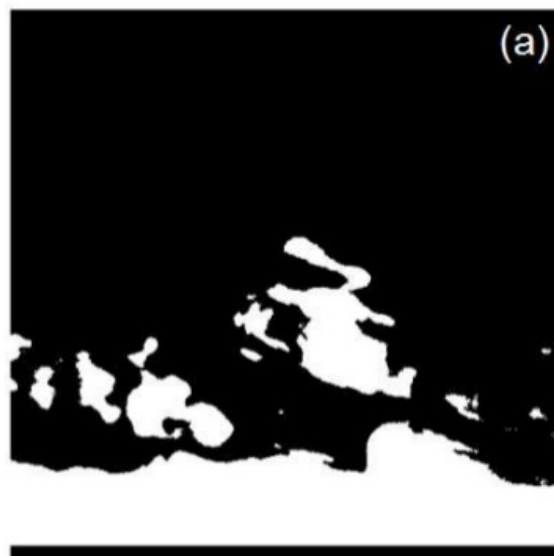


Figura 7.5 – Imagem Binarizada

O valor do threshold é determinado através da média dos valores ótimos obtidos a partir da análise de uma série de imagens coletadas em ensaios preliminares. Com essa análise chegou-se a um único threshold que se mostrou adequado para todas as imagens analisadas.

#### 7.1.4-Espessura de filme

O objetivo com a implementação da técnica é a obtenção de dados sobre a espessura de filme líquido do escoamento. A espessura de filme foi obtida através da medição da altura de uma coluna branca em uma determinada posição longitudinal da imagem binarizada. Como a medição pontual apresentou grandes variações optou-se por fazer a medição em uma coluna com três pixels ao invés de utilizar-se um pixel. Assim o valor da medição é na verdade uma média da altura dessa

faixa. A figura 7.6 mostra um desenho esquemático do procedimento de medição da espessura de filme.

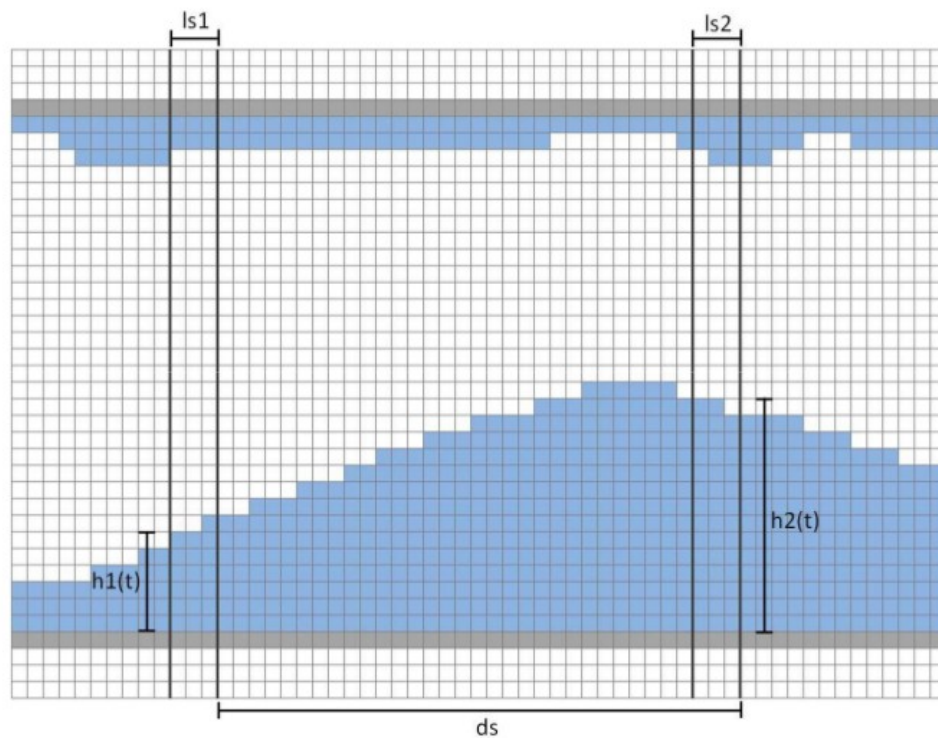


Figura 7.6 – Esquemático da medição da espessura de filme em um escoamento anular

Na figura 7.6 podem ser vistos dois sensores medindo a espessura de filme em uma imagem esquematizada do filme líquido em pixels. As alturas do filme medidas em cada posição são indicadas na figura como  $h1$  e  $h2$ , enquanto que a largura da faixa dos sensores são  $ls1$  e  $ls2$ . O afastamento entre os dois sensores é de  $ds$ .

As duas imagens abaixo mostram a medida da espessura de filme dos dois sensores sobreposta a imagem do escoamento. As alturas medidas pelos sensores estão indicadas por asteriscos. Pode-se perceber que procedimento é capaz de identificar com precisão a interface.

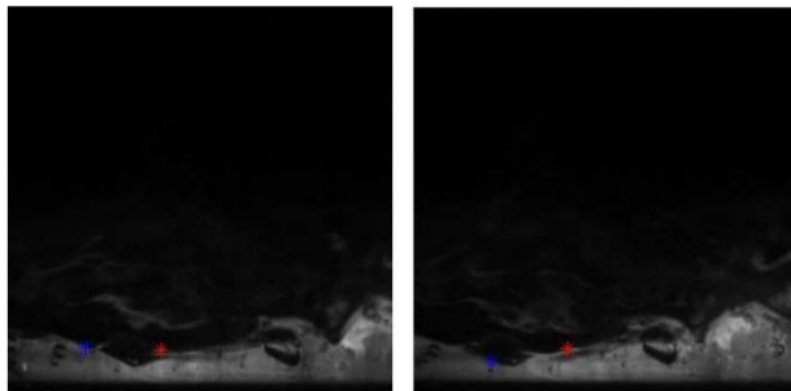


Figura 7.7 – Imagem demarcadas na medição da espessura de filme de um escoamento anular

Para evitar que bolhas não interrompessem a medição usou-se um processo do MATLAB para preencher espaços em vazio dentro de áreas em branco. Mas mesmo assim a medição da espessura só terminava se os próximos três pixels fossem 0, evitando assim bolhas perto da superfície.

#### 7.1.5-Velocidade das ondas

Através da medição da espessura de filme em dois pontos diferentes da imagem era possível determinar a velocidade das ondas do escoamento. Para isso é necessário fazer a correlação cruzada entre o sinal da primeira medição com o sinal da segunda medição defasado temporalmente. A correlação só casara quando a mesma onda estiver passando na segunda posição. Logo ao determinar o número de quadros necessários para o sinal casar com o espaçamento entre as

medições se tem a velocidade da onda.

Como o valor máximo da correlação ocorre, em geral, em poucos quadros depois da primeira medição se têm a necessidade de fazer uma interpolação dos resultados para que seja possível estimar o tempo de defasamento com uma precisão melhor do que a resolução temporal.

## 7.2-Imagens Estereoscópicas

A primeira etapa do pré-processamento das imagens estereoscópicas consiste em corrigir as distorções causadas pela visualização em ângulo. Para isso dois modelos foram propostos , o RANSAC (Random Sample Consensus) (Farias & Azevedo,2010)e o de mínimos quadrados.

Em ambos os modelos tem-se como objetivo gerar um polinômio de correção da imagem para cada câmera deforma a corrigir as distorções. Para criar esse polinômio utilizou-se os pontos do calibrador observados em uma imagem.

Os pontos do calibrador, na imagem, foram identificado manualmente através de uma rotina em MATLAB, aonde o usuário deveria clicar nos pontos. Na figura abaixo pode ser visto uma imagem dos pontos selecionados pelo usuário.



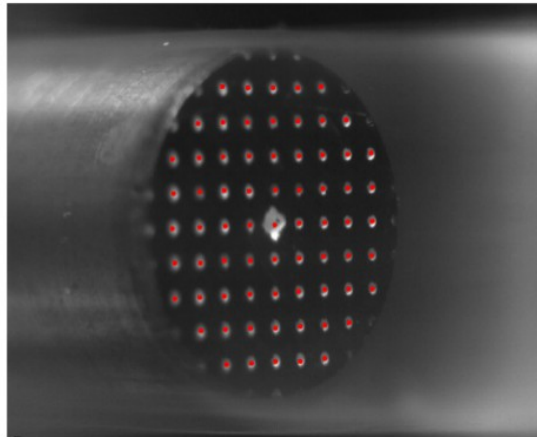


Figura 7.8 – Imagem com os pontos seleccionados pelo usuário.

Além disso é estimado um calibrador virtual a partir da relação entre os pontos do calibrador real. Os pontos do calibrador virtual são a posição esperada dos pontos da imagem depois de corrigidas.

### 7.2.1-Correção de distorção: Modelo RANSAC

O modelo RANSAC é um método iterativo de estimar um modelo através de dados observados. É um algoritmo não determinístico proposto por Fischler & Bolles(1981). O modelo consiste em assumir que o ponto observado podem ser inliers, explicados pelo modelo e outliers, classificados como ruído ou incorretamente medidos.

Para facilitar a descrição o modelo RANSAC será dividido em 8 etapas.

a) Seleção aleatória de alguns dos pontos observado do calibrador.

- b) Considerando hipoteticamente esses pontos como inliers. Ajuste de um polinômio através de transformação linear direta usando estes pontos.
- c) Teste dos demais pontos contra o polinômio. Classificação dos pontos como inliers caso o polinômio sirva para eles ou outliers caso o modelo os classifique como ruído.
- d) É reestimado o polinômio para todos os inliers.
- e) É determinado o erro entre o polinômio ajustado e os pontos do calibrador virtual.
- f) É determinado os pontos onde o erro é maior.
- g) O processo de (b) a (f) é repetido usando esses pontos de maior erro.
- h) Esse processo é repetido até encontrar um polinômio com pouco erro e poucos outliers.

Na figura a seguir pode ser vista a imagem do calibrador ao se realizar a correção da distorção.

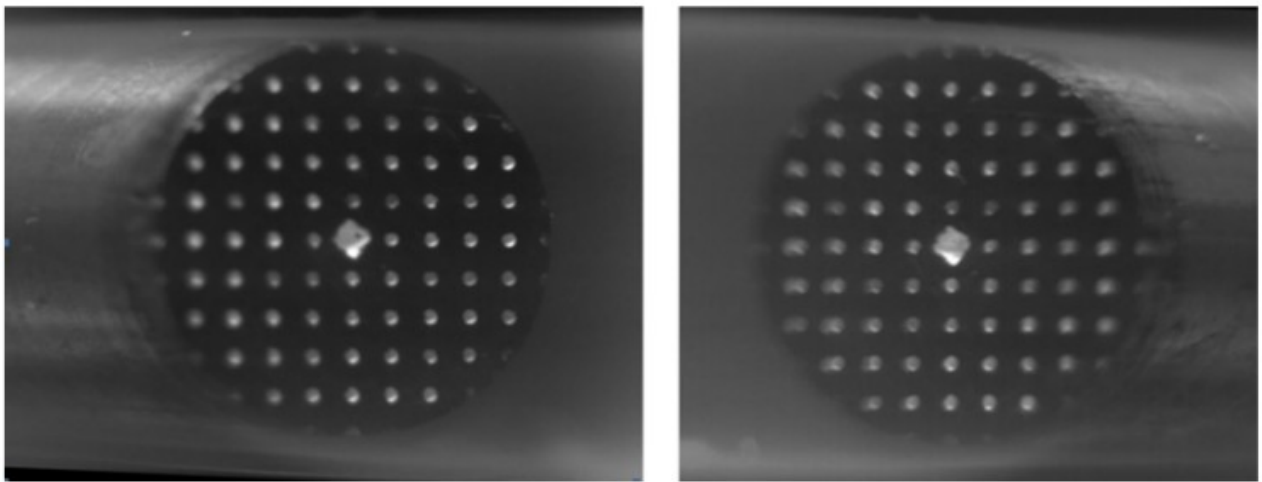


Figura 7.9 – Imagem do calibrador capturado pela câmera da esquerda e da direita depois de corrigida a distorção

### 7.2.2-Correção de distorção: Modelo de Mínimos Quadrados

Neste modelo gerou-se dois polinômios por câmera, um para corrigir a distorção na largura e outro para a distorção na altura.

A ideia por trás deste polinômio é que o espaço ocupado por cada pixel deveria ser redimensionado a fim de corrigir a distorção. Assim o polinômio neste caso é o redimensionamento de cada ponto da malha da imagem(Raffel,2007).

A expressão de mínimos quadrados usadas para estimar o polinômio que redimensiona cada pixel está descrita a seguir.

$$\frac{d \sum_{x=1}^n \left( d_x - \sum_{y=1}^m P_{x,y} \right)^2}{d \alpha_k} = 0 \quad (4)$$

A onde n é o número de pontos,  $d_x$  é a distância em pixel no calibrador virtual para o ponto x, m é o número de pixels na imagem do calibrador até o ponto x, P é o polinômio que calcula a distorção no pixel e  $\alpha_k$  é o coeficiente de ordem k do polinômio.

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 y + \alpha_2 y^2 \dots \alpha_k y^k \quad (5)$$

Assim temos k mais 1 coeficiente para serem determinada por k mais equações. Na figura 6.10 podemos ver uma grade visto em ângulo e a mesma grade corrigida a distorção.

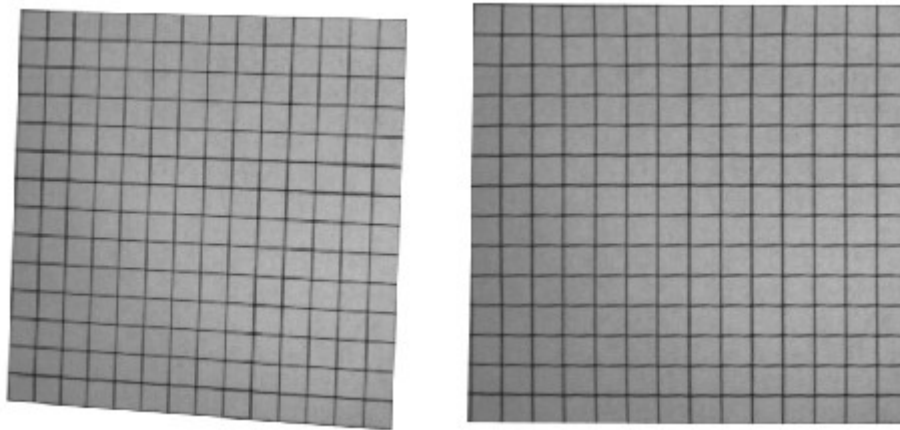


Figura 7.10 – Grade visualizada em ângulo pela câmera e depois de corrigida a distorção

Depois de realizado um teste preliminar com um calibrador do tipo grade , foi realizado outra calibração com as imagens de um calibrador visto pelas duas câmeras como pode ser visto na figura 7.11.

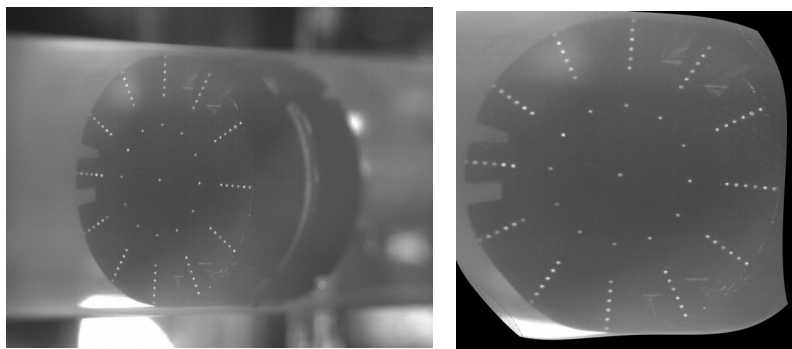


Figura 7.11 – Imagem distorcida de um calibrador e imagem corrigida a distorção

Foi então feita uma análise do erro que a imagem do calibrador corrigida a distorção possui de acordo com o seu grau. Os gráficos mostram o erro percentual do ajuste observados com polinômio de diferentes graus.

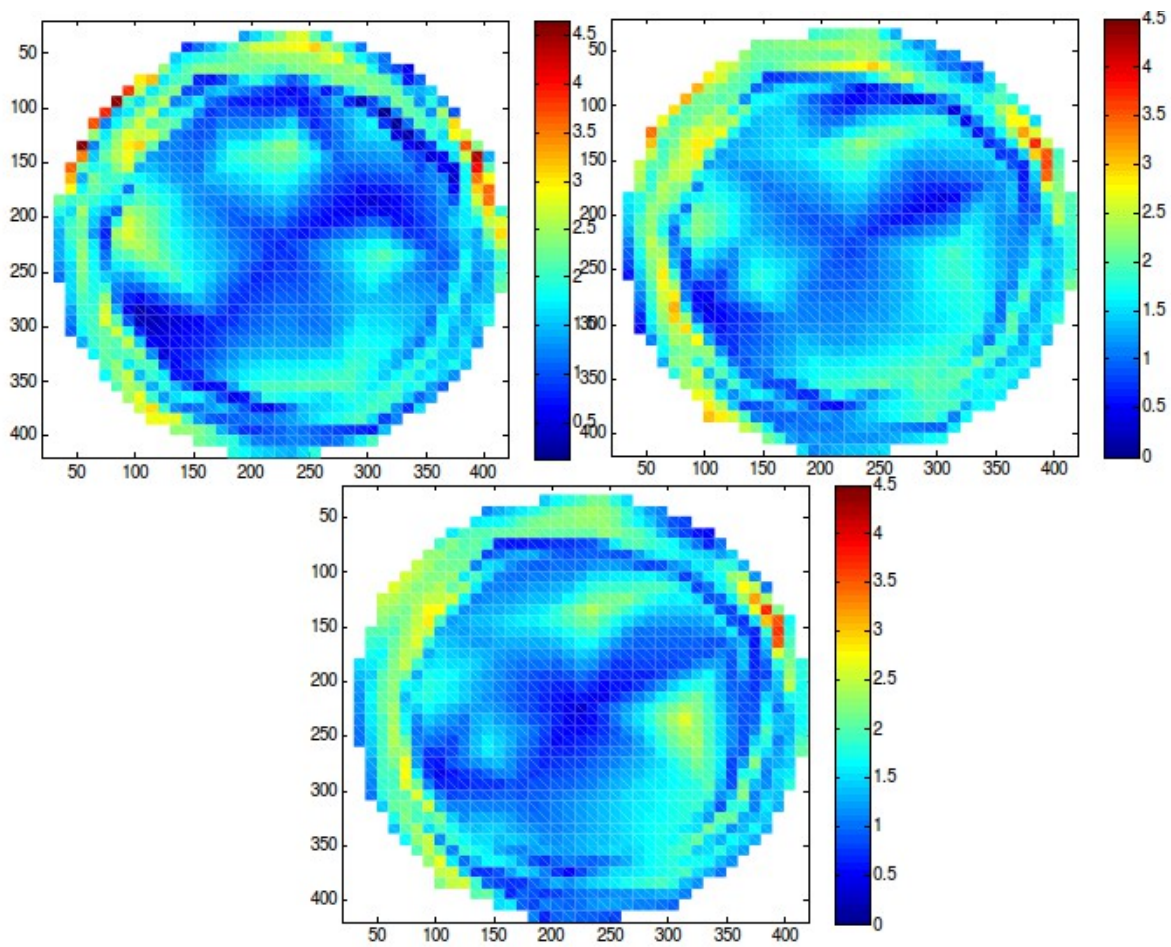


Figura 7.12 – Gráfico do erro dos polinômios de 2, 3 e 4 grau respectivamente

Na figura pode ser visto que o erro diminui com o aumento do grau do polinômio. No entanto, graus elevados de polinômio elevam a sensibilidade a ruídos como um erro na seleção dos pontos. Além disso o erro se concentra na região mais externas da imagem devido a extrapolação do polinômio. Um bom compromisso foi encontrado para polinômios de segunda e terceira ordens.

### 7.2.3-Junção das Imagens

Depois de corrigida a distorção as imagens de cada câmera devem ser unidas afim de se reconstruir a seção transversal. Para que as imagens da câmera da direita e da esquerda fossem unidas aplicou-se um filtro em cada lado. O gráfico a seguir descreve o filtro aplicado em cada lado.

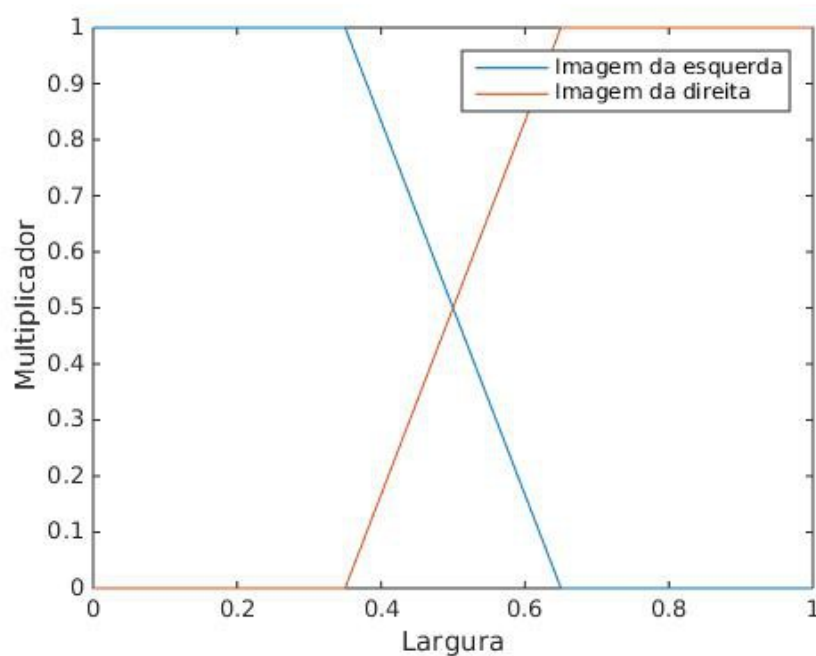


Figura 7.13 – Filtro aplicado na imagem da esquerda e da direita para a junção destas

Ao aplicar o filtro cada imagem tem uma faixa que é aceita por completo, uma faixa que é aceita percentualmente e outra parte que é ignorada. Depois de aplicada o filtro em cada imagem as duas são somadas como demonstrada na figura abaixo.

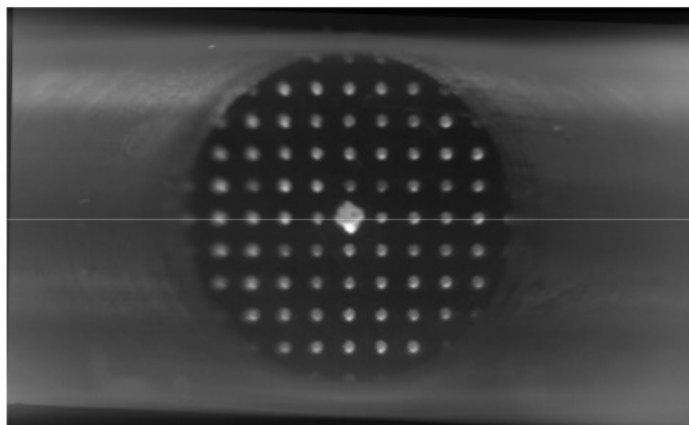


Figura 7.14 – União das imagens da câmera da esquerda e da direita

#### 7.2.4-Contraste

Assim como nas imagens longitudinais, se viu necessário a utilização da equalização do histograma e a normalização desta afim de tornar a iluminação mais uniforme e aumentar o contraste entre a fase líquida e gasosa da imagem.

#### 7.2.5-Aplicação da Máscara

Em algumas situações, ocorre difusão da luz emitida pela fluorescência do corante pela tubulação. A figura 7.15 mostra uma imagem transversal do tubo cheio. Aonde este efeito de difusão da luz emitida pelo corante acontece. Isso evidenciou a necessidade de aplicação de uma máscara nas imagens para descartar dados fora da tubulação. Através do conhecimento do diâmetro interno



da tubulação e da relação pixel por mm foi possível criar essa máscara.

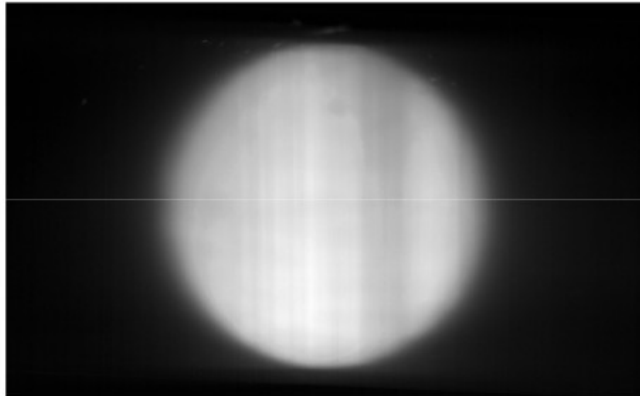


Figura 7.15 – Imagem do tubo preenchido com água

A máscara aplicada para retirar o efeito de difusão da luz emitida pela fluorescência do corante pode ser vista na figura 7.16.

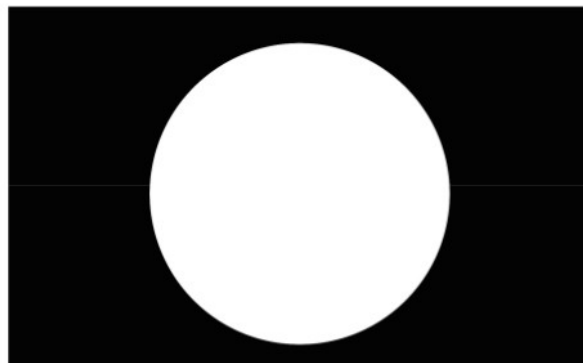


Figura 7.16 – Máscara do tubo

Onde a região preta é zero e a região branca é 1, assim aplicação da máscara consiste em multiplicar a máscara pela imagem do escoamento.

#### 7.2.6-Espessura de Filme

A medição da espessura de filme na parte inferior do tubo é igual à medição de espessura de filme no longitudinal. No entanto, para medir a espessura do filme em outras posições radiais do tubo foi necessário que este percorra através de pixels, ou seja, unidade quantizada da imagem em ângulo.

Inicialmente para resolver este problema rotacionava a imagem nos ângulos que se queria medir. Isso acarretava em um grande custo computacional devido ao grande número de imagens. Na figura 7.17 pode ser visto um esquemático da medição.

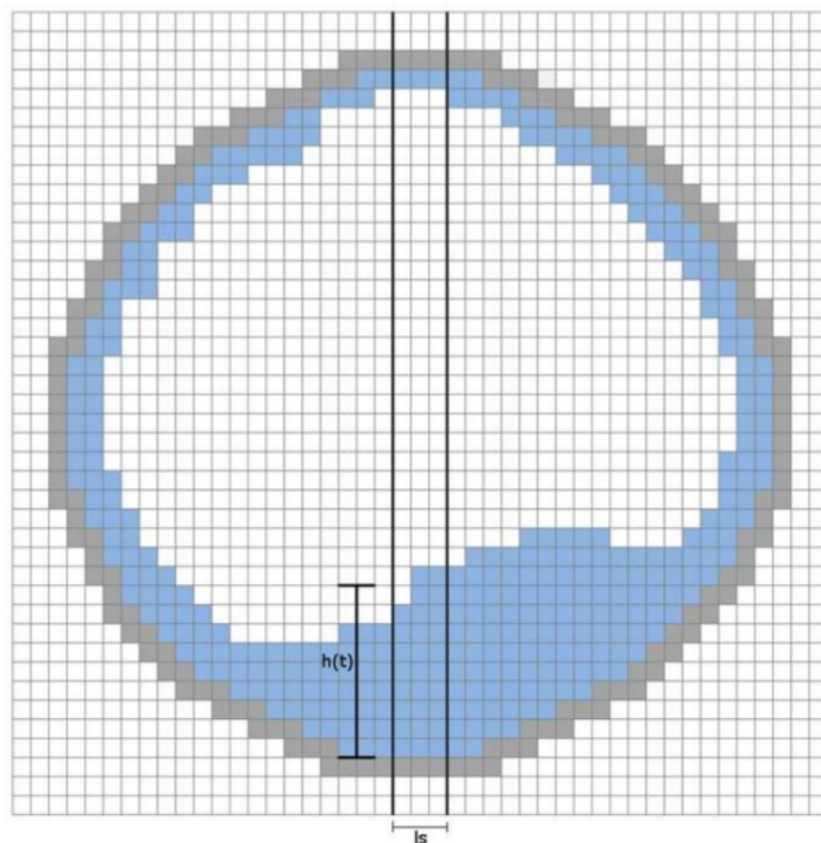


Figura 7.17 – Esquemático da visualização transversal do escoamento anular.

Porém notou-se o mais eficiente seria trabalhar com um eixo de coordenadas polares ao invés de um sistema cartesiano. Assim, sabendo-se a localização do centro da tubulação pode-se facilmente estimar a altura de líquido através do mesmo critério utilizado para o caso longitudinal. A diferença seria somente o sistema de coordenadas. No caso estereoscópico a medida da altura da interface foi feita ao longo do raio do tubo. Assim a fórmula se obter o valor da espessura é:

$$\begin{aligned} H, x \text{ e } y \text{ são inteiros} \\ x = (H \operatorname{seno}(\theta)) \quad (6) \\ y = (H \operatorname{cosseno}(\theta)) \end{aligned}$$

Para diferentes valores de H foi analisada se a imagem correspondia a fase líquida ou gasosa. A localização onde a mudança de fase ocorria, no caso da imagem os pixels brancos se tornavam negros, correspondiam a interface.

## 8-Resultados

### 8.1-Longitudinal Anular

Uma série temporal da variação da espessura de filme, medida na configuração longitudinal para o escoamento anular pode ser visto no gráfico abaixo.

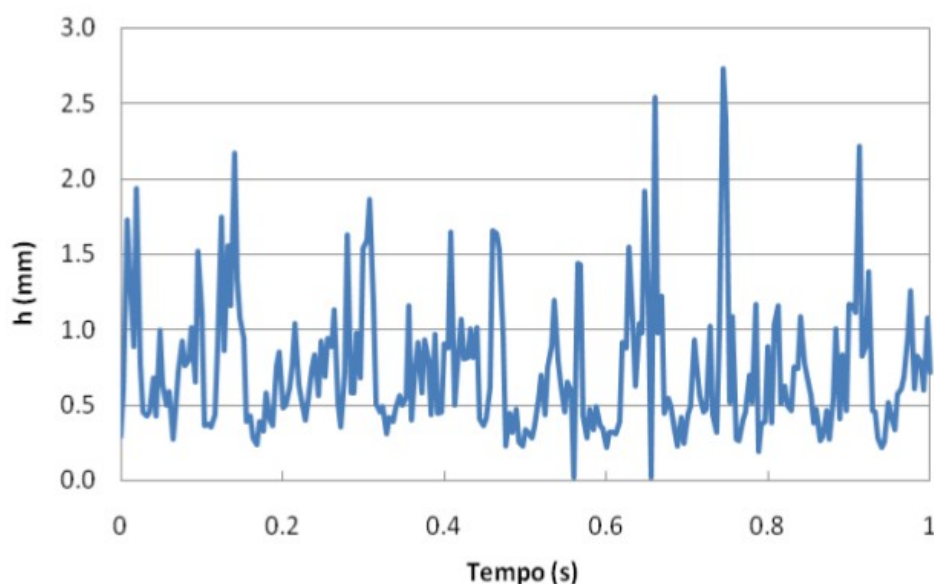


Figura 8.1 – Espessura de filme em escoamento anular. (Velocidade superficial do gás= 20 m/s ,  
Velocidade superficial do líquido= 0.056 m/s, seção de 15,8 mm)

Com base nas séries temporais, foram obtidos o valor médio , o histograma e o espectro no domínio da frequência. Os valores obtidos com essa técnica para diferentes velocidades superficiais

apresentam tendências similares as encontradas na literatura usando outros métodos, por exemplo Jayanti et al.(1990) por sonda elétricas.

No gráfico a seguir pode ser visto a relação entre a velocidade de onda, a velocidade superficial de líquido e a velocidade superficial de gás levemente superior a descrita na literatura ( Paras & Karabelas, 1991)

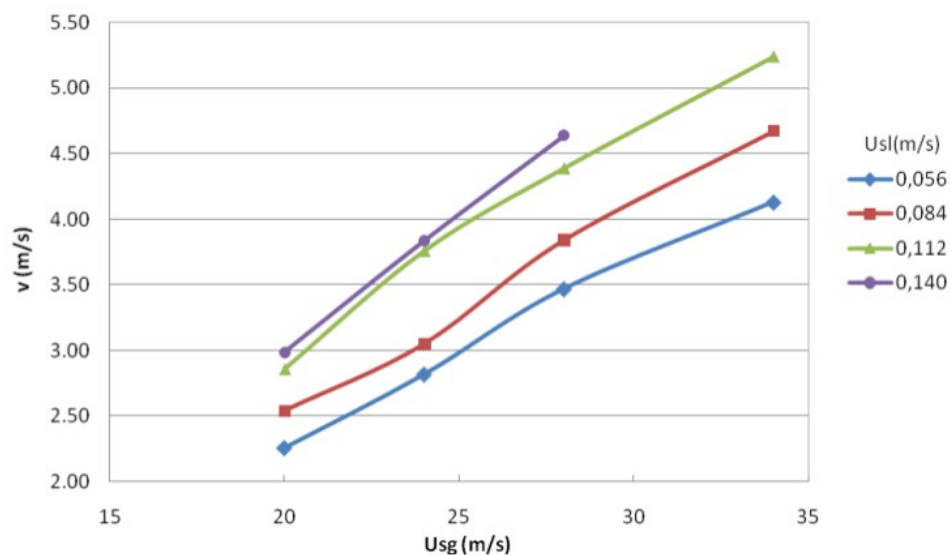


Figura 8.2 – Gráfico da velocidade de onda

## 8.2-Estéreo Anular

O processamento digital das imagens estereoscópica do regime anular podem ser vista na figura 7.3.

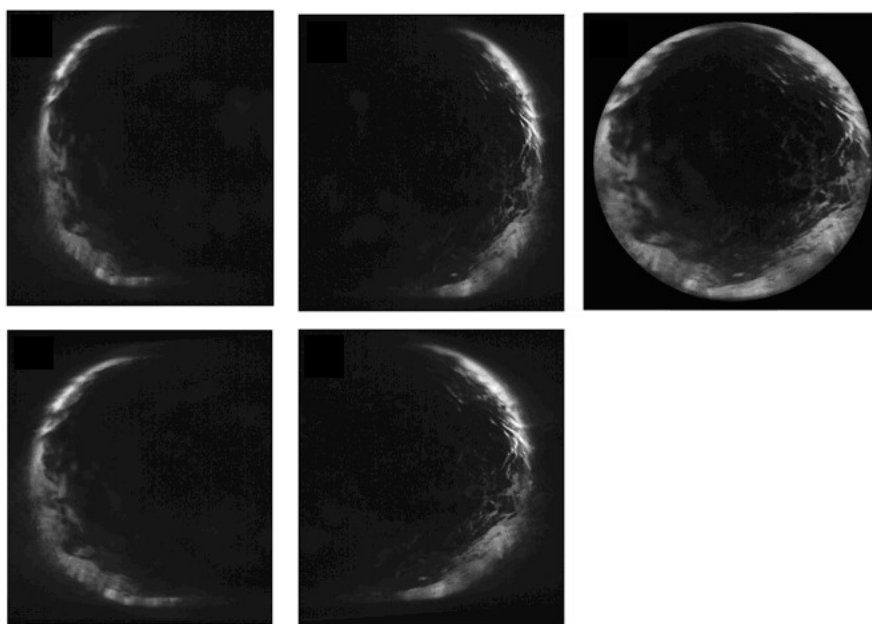


Figura 8.3 – Imagens das etapas de processamento

A figura demonstra as etapas de correção da distorção e da união de uma imagem de escoamento anular.

O valor da densidade do espectro de potência da medição da espessura de filme na parte inferior do tubo, para o caso estereoscópico foi próximo do valor obtido para a medição no longitudinal. O gráfico da figura 8.4 demonstra as duas densidade espectrais comparadas.

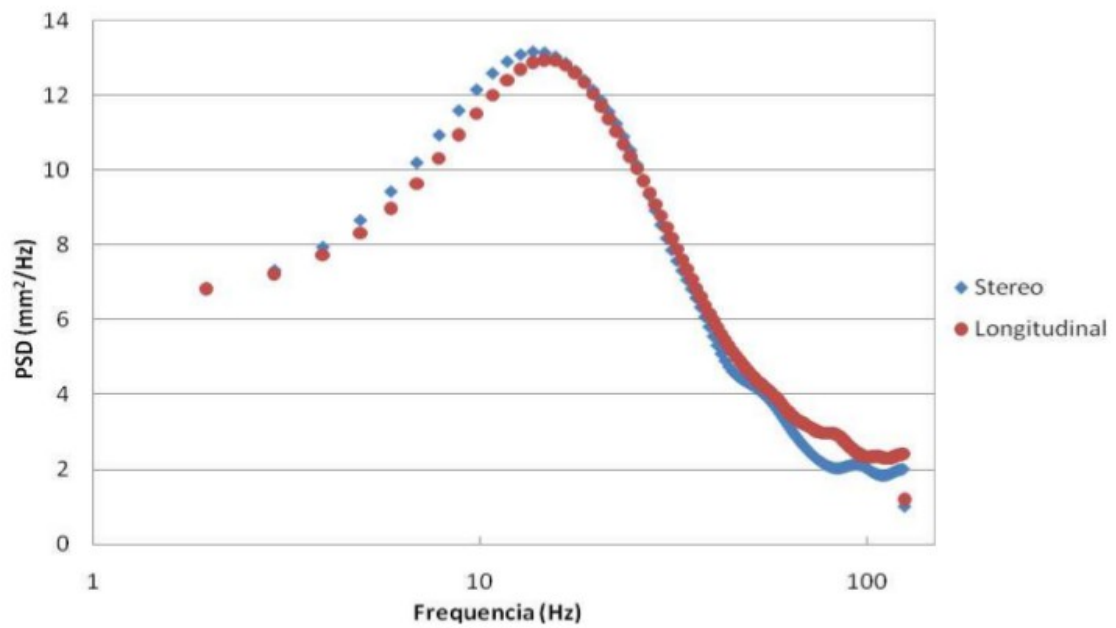


Figura 8.4 – Comparação entre as densidades de espectro do longitudinal e do estéreo.

### 8.3-Estéreo Bolha Alongada

No caso da visualização estereoscópica de uma bolha alongada verificou-se a impossibilidade de realizar o experimento com apenas duas câmeras. A figura 7.5 demonstra o escoamento.



Figura 8.5 – Imagem estereoscópica de uma bolha alongada

Na figura pode observar que a região de junção da imagem da direita possui formato completamente diferente da região de junção da imagem da esquerda.

Isso se deve ao fato de como as câmeras estão posicionadas na direção do escoamento, elas visualizam a sombra da bolha antes do plano de visualização e esta se sobrepõe sobre a imagem estereoscópica. Além disso verificou-se através de imagens binarizadas que a velocidade em que o centro da bolha se alarga é a mesma que a velocidade da bolha. Na figura 7.6 pode ser visto uma imagem binarizada.



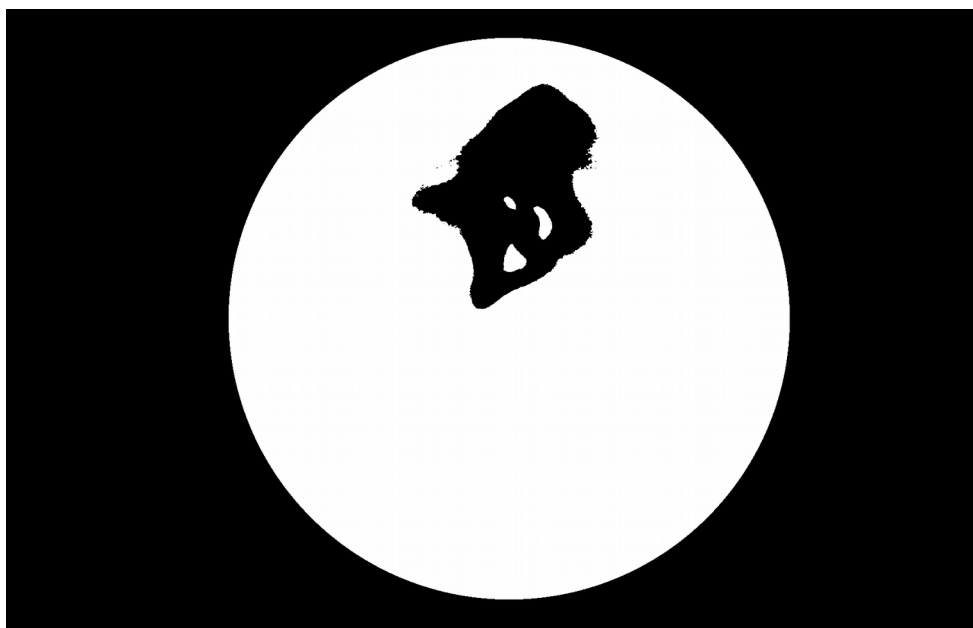


Figura 8.6 – Imagem binarizada e com máscara de uma bolha alongada

Observou-se que para uma correta visualização do nariz da bolha seria necessário fazer a visualização estereoscópica em sentido contrário ao escoamento, de forma que a sombra da bolha não interferisse na visualização. O inconveniente é nessa configuração o mesmo efeito ocorreria para a cauda da bolha. Neste último caso seria mais interessante manter as câmeras na posição original. Assim para visualizar a cauda e o nariz da bolha deveria usar câmeras em ambos os sentidos ao mesmo tempo.

## 9-Conclusão

Na técnica de PLIF longitudinal os resultados apresentam valores próximos dos encontrados na literatura. No entanto as nuvens em cima da fase líquida podem significar um entramento de líquido na fase gasosa ou a existência de gás atrapalhando a onda a se visualizada. O segundo caso leva a espessuras de filme levemente inferiores a obtida por outros tipos de medições além da perda ondulação de alta frequência e pouca intensidade.

As medições com a técnica poderiam ser melhoradas colocando-se a câmera com um ângulo em relação a tubulação, de forma que ela pudesse visualizar o escoamento de baixo para cima. Assim haveria redução na perda de visualização por ondulação, mas isso levaria ao processo de correção de distorção.

Na técnica de PLIF estereoscópica os problemas de visualização tendem a aumentar por causa do caminho que a luz do corante tem que percorrer dentro do tubo. O tamanho das ondas tende a ser diminuído e regiões onde a certa quantidade de líquido como traseira de disturbance wave (ondas maiores do escoamento anular) ou pistões de líquido de bolhas alongadas podem se visto como vazios devido a sombra da fase gasosa.

Para resolver este problema não ha outra solução se não o aumento do número de câmera fazendo a visão estereoscópica. Isso levaria a pelo menos uma das câmeras a conseguir registrar o fato. Além do câmeras a favor e contra o sentido do escoamento melhoram a visão de ondas com

estruturas mais complexas.

A equalização e normalização melhoram a distribuição de luminosidade das imagens além do contraste entre a fase gasosa permitindo assim que acha um único threshold para a binarização de toda a imagem. No entanto iluminar a seção por planos de laser com ângulos variados, não apenas em cima e em baixo, podem fornecer imagens melhores que as tratadas por esses processos.

Tanto o modelo de RANSAC quanto o modelo de mínimos quadrados apresentaram boa correção de distorção da imagem. No entanto, a junção das imagens das duas câmeras poderiam ser feita através do valor máximo dos pixels ao invés do modo utilizado. Isso provocaria maior acerto na faixa central da imagem final.

## 9-Bibliografia

FARIAS, P.S.C. & AZEVEDO, L.F.A., Caracterização do filme de líquido em escoamento anular, horizontal bifásico utilizando métodos ópticos. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

FISCHLER, M. A. & BOLLES, R. C. *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Communactions of the ACM 24: 381-395, 1981*

JAYANTI, S., HEWITT, G.F. & WHITE, S.P. *Time-Dependent Behaviour of The Liquid Film in Horizontal Annular Flow. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 16, 1990.*

MATLAB FOR WINDOWS USER'S GUIDE. The Math Works Inc., 2008.

PARAS, S.V. & KARABELAS, A.J. *Properties of the liquid layer in horizontal annular flow. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 17, 1991.*

RAFFEL M., WILLERT C.E., WERELEY S.T. & KOMENHANS J. *Particle Image Velocimetry – A Pratical Guide. Second Edition Springer Berlin Heidelberg, New York, 2007*

RUSSEL, T.W.F. & LAMB, D.E. *Flow mechanism of two-phase annular flow*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, pp. 237-245, 1965

TAITEL, Y. & DUCKLER, A. E. *A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow*. AIChE Journal. Vol 22, 1976.