

SISTEMA A SENSOR ELETRO-RESISTIVO PARA ESTUDOS DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Johnny Regis Emerenciano

“PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA”

Aprovado por:

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.
(Orientador)

Prof. José Carlos de Oliveira, D.Sc.

Cesar Cosenza de Carvalho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2012

Emerenciano, Johnny Regis.

Sistema a Sensor Eletro-resistivo para Estudos de Escoamentos Bifásicos.

(Rio de Janeiro) 2012.

x, 94 p. 29,7 cm (DEE/POLI/UFRJ, Engenharia Elétrica, 2012).

Projeto Final - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

1. Fenômenos de Transporte I. DEE/POLI/UFRJ II. Título (série)

Dedicatória

Dedico não só este trabalho, mas toda a minha vida, a Deus, que me tirou do cativeiro e me conduziu a sua maravilhosa luz. A esse mesmo Deus, que mudou a minha sorte, me livrou do que a vida havia preparado para mim. Preparou-me algo novo, que está apenas começando.

Dedico também a minha mãe. Não apenas por ser minha progenitora, mas por ser a melhor pessoa que eu conheço nesse mundo. Sinônimo de amor e de amizade. Exemplo a ser seguido. Que lutou contra um mundo triste e perverso, venceu grandes barreiras e me ensinou a ser alguém. Ela venceu! Mãe, eu te amo muito!

Dedico também a minha avó Maria Regis, que por muitas vezes acordou de madrugada, pegou ônibus e trens lotados e fez faxinas em casas enormes para poder comprar meu leite enquanto criança. Que fazia aqueles maravilhosos bolinhos de arroz, feijão, carne e farinha. Muito obrigado!

Dedico a meu grande pai, Ronaldo Salles, que me ensinou sobre os verdadeiros valores da vida.

Dedico também ao meu grande irmão, Victor Hugo. Você é o melhor irmão do mundo!

Amo muito todos vocês!

Agradecimentos

A Deus por estar sempre comigo, me abençoando e concedendo sua maravilhosa graça, que me fez chegar até aqui.

A toda minha família pelo amparo e em especial aos meus pais e ao meu tio Tinoco, pelos bons conselhos que me nortearam, me ajudando a tomar decisões importantes.

Aos meus amigos de infância Decinho, Daiane, Felipe, Lívia e Cróvi, que desempenharam um papel fundamental na minha vida, sendo os primeiros a me ensinar o significado da amizade.

Aos amigos de Nova Iguaçu Bruno Bodde, Rafael Lorão, Jr. Madruga, Felipe Anne Mauzin e outros, que me proporcionaram os momentos mais engraçados de toda a minha vida.

Ao amigo Maicon, que sempre com suas idéias acabava me colocando em apuros, mas que no final, resultava em boas gargalhadas. Amigo com quem sempre converso e sempre aprendo.

Ao meu amigo Deo, rebelde e transgressor de leis, que nenhum professor gostaria de ter como aluno, que com sua amizade antagônica e seu comportamento inadequado, me provou com muito humor, a existência de vida além das fronteiras dos livros e dos muros da escola.

Aos amigos da faculdade, pelo apoio de uns para com os outros e pelo incentivo a prosseguir, especialmente aos amigos Gustavo Farves, Rafael Freitas, Leandro Nogueira, Lucas Gouveia, Rodrigo Martins, Daniel Moura, José Carlos e Carla Sena.

Aos amigos da IBNA, principalmente ao meu pastor e amigo Naildo Venâncio e à amiga Jéssica Leite, que por muitas vezes riram comigo, mas que também se dedicaram a ouvir meus problemas e com quem eu sempre pude contar.

A todos os amigos que fiz no laboratório de Mecânica da Turbulência, José Luiz Zotin, que apesar de esquecer de colocar o meu nome em seu projeto final merece ser lembrado; Ricardo, que deixa saudades do coffee-break; Daniel Rodrigues, nosso assessor de assuntos aleatórios; Vitor, fanfarrão sempre; Soraya, patricinha como ninguém; De Lucca, vida louca; Rafael Lisboa, que trabalhou comigo no aprimoramento dos sensores eletro-resistivos; Claudia; Bernardo; Laert; Natália; Lucas; Henrique; Gabriel e muitos outros, que ajudaram em muito na minha formação e com quem dividi muitos momentos de felicidade.

Ao amigo Dr. Mário Guttemberg, que por muitas vezes em nossas conversas informais, me orientava no sentido de me fazer encontrar na vida profissional, dirimindo as diversas dúvidas e anseios existentes em minha cabeça de principiante.

Ao meu professor, orientador e amigo Dr. José Luiz Neto por todo o conhecimento adquirido e por todo o apoio e amizade.

Ao professor e chefe do Laboratório de Mecânica da Turbulência Atila P. S. Freire por permitir o uso dos equipamentos do laboratório e pelo conhecimento transmitido.

Aos amigos Dr. Juliana B. R. Loureiro e Sandro S. Rezende pelos anos de amizade e por tudo que tive a oportunidade de aprender com eles.

Aos meus professores, em especial ao Marcos Moreira e ao Rolim, pelos quais tenho sincera amizade.

Ao meu chefe Valter Y. Aibe por todo o incentivo e crédito e também a toda equipe da DINAM.

Aos laboratórios Greentech e Laboratório de Instrumentação e Fotônica da COPPE/UFRJ, que contribuíram com a realização deste trabalho.

Às instituições CNPq e FAPERJ pelas bolsas concedidas ao longo dessa pesquisa.

À minha namorada e futura esposa Amanda Siqueira, sem a qual eu não seria nada. Ela sempre me conforta e me consola, nunca se queixa ou interfere, não pergunta nada e apóia tudo, e escreve os meus agradecimentos.

Johnny Regis Emerenciano.

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem, ou que seus planos nunca vão dar certo, ou que você nunca vai ser alguém. Se você quiser alguém em quem confiar, confie em si mesmo. Quem acredita sempre alcança.”

(Renato Russo e Flávio Venturini)

“Pode-se vencer pela inteligência, pela habilidade ou pela força, mas nunca sem trabalho.”

(A. Destoef)

“Se ouvires a voz do Senhor, virão sobre ti e te alcançarão todas as bênçãos. O Senhor determinará que a bênção esteja nos teus celeiros e em tudo o que colocares a mão; e te abençoará na terra que te dá o Senhor, teu Deus. O Senhor te abrirá o seu bom tesouro, o céu, para dar chuva à tua terra no seu tempo e para abençoar toda obra das tuas mãos.”

(Dt. 28.2,8,12)

“Pedi, e dar-se-vos-á; buscai e achareis; batei, e abrir-se-vos-á. Pois todo o que pede recebe; o que busca encontra; e, a quem bate, abrir-se-lhe-á. Ou qual dentre vós é o homem que, se porventura o filho lhe pedir pão, lhe dará pedra? Ou, se lhe pedir um peixe, lhe dará uma cobra? Ora, se vós, que sois maus, sabeis dar boas dádivas aos vossos filhos, quanto mais vosso Pai, que está nos céus.”

(Mt. 7.7-11)

Resumo do Projeto Final apresentado ao DEE/POLI/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

SISTEMA A SENSOR ELETRO-RESISTIVO PARA ESTUDOS DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Johnny Regis Emerenciano

Fevereiro de 2012

Orientador: José Luiz da Silva Neto.

Departamento: Engenharia Elétrica.

A visualização e monitoração de escoamentos multifásicos são de grande valia tanto de um ponto de vista técnico/prático para o controle de processos, como de um ponto de vista científico/teórico para entendimento de fenômenos físicos envolvidos.

A correta modelagem de escoamentos é uma tarefa bastante complexa. A representação matemática destes fenômenos exige, em particular, a quantificação de diversas grandezas físicas que retratem o comportamento das fases presentes no escoamento e que descrevam a interação entre elas.

O presente trabalho pretendeu abordar uma técnica experimental capaz de quantificar algumas dessas grandezas envolvidas na descrição de escoamentos multifásicos, a técnica de sensores resistivos, que utiliza como princípio de funcionamento a diferença de condutividade elétrica existente entre fluidos.

A ênfase aqui se coloca no desenvolvimento de um instrumento de medição dedicado a escoamentos multifásicos, com o domínio completo dos ciclos de construção e de operação. Portanto, as etapas deste trabalho compreendem a especificação de material, o projeto e a construção de sensores com múltiplos canais e geometrias, o projeto e a construção de circuitos de instrumentação eletrônica e digital e a confecção de um programa de aquisição e tratamento de dados.

Ainda neste, as diversas geometrias de sensores são estudadas através de comparações dos resultados com outras técnicas experimentais de medição e apresentamos uma análise para implementação da geometria de malha de eletrodos.

Abstract of the thesis submitted to DEE/POLI/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrician Engineer.

ELECTRO-RESISTIVE BASED SYSTEM FOR TWO PHASE FLOW STUDIES

Johnny Regis Emerenciano.

February, 2012

Supervisor: José Luiz da Silva Neto.

Department: Electrical Engineering.

The visualization and monitoring of multiphase flows are really important, as a technical/practical point of view for process control, so as a scientific/theoretical point of view to understand all the physics phenomena involved.

The right modeling of flows is a really tough task. The mathematical representation of these phenomena requires, particularly, the quantification of several physics variables that describe the behavior of phases in the flow and that describe their interaction.

This research intended to explain an experimental technique able to quantify some of these variables involved in multiphase flow description, the resistive sensors technique, which uses as operation fundamental the difference between electrical conductivity in fluids.

The emphasis here is to develop an instrument dedicated to measure multiphase flows, with complete domain of the construction and operation cycles.

Therefore, the stages of this work include the material specification, design and construction of sensors with multiple channels and geometries, the design and construction of electronic and digital instrumentation circuits and creating an acquisition and processing data program.

Even in this, the several sensor geometries are tested by comparing results with other experimental measure techniques and an analysis for implementation of the mesh electrodes geometry is presented.

Conteúdo

1 – Introdução.....	11
1.1 – Motivação.....	11
1.2 – Objetivos.....	12
2 – Técnicas de Medição em Escoamentos.....	13
2.1 – Padrões de Escoamentos Bifásicos em Tubulações.....	13
2.2 – Técnicas de Medição mais Conhecidas.....	17
2.2.1 – Descrição de algumas das Técnicas Experimentais Disponíveis no Laboratório de Mecânica da Turbulência e na DINAM / INMETRO.....	18
2.2.1.1 – VIP (Velocimetria por Imagem de Partículas).....	19
2.2.1.2 – VLD (Velocimetria por Laser Doppler).....	24
2.2.1.3 – Anemometria Térmica (Fio/Filme Quente).....	26
2.2.1.4 – Shadow Sizer (Método de Dimensão da Sombra por Videometria de Alta Velocidade).....	31
2.2.1.5 – Sensor Óptico (Foto-emissão e detecção).....	35
2.3 – Quantificação das Variáveis de Interesse.....	37
3 – Sistema de Medição de Fases Utilizando Sensor Eletro-resistivo.....	38
3.1 – Princípio de Funcionamento.....	38
3.2 – A Origem da Técnica.....	39
3.3 – Aparato Experimental.....	39
3.4 – O Sistema de Medição.....	40
3.4.1 – O Circuito Analógico Eletro-resistivo.....	40
3.4.1.1 – Projeto da PCI (Placa de Circuito Impresso).....	43
3.4.2 – Circuito Digital.....	46
3.4.2.1 – LabView	47
3.4.3 – Análise dos Resultados.....	53
3.4.3.1 – Resultados no Simulink	53
3.4.3.2 – Resultados no Labview	55
3.5 – Construção do Sensor.....	62
3.5.1 – Retorno do Sensor.....	64
3.5.2 – Posicionamento do Sensor.....	65
3.6 – Problemas com os Sensores Resistivos.....	65

<u>3.6.1</u> – Problemas com os Sensores Resistivos de 1 Canal.....	66
<u>3.6.2</u> – Problemas com os Sensores Resistivos de 2 Canais.....	67
3.7 – Análise de Incerteza.....	69
<u>3.7.1</u> – Sincronização entre os Dados do Programa e a Câmera.....	71
<u>3.7.2</u> –Obtenção das Imagens	72
<u>3.7.3</u> – Resultados Obtidos	75
4 – Conclusão.....	80
5 – Propostas Futuras.....	81
6 – Referências Bibliográficas.....	84
7 – Referências da Internet.....	87

1 – Introdução

1.1 – Motivação

Escoamentos multifásicos (quando existe deslocamento simultâneo de fluidos imiscíveis, ou seja, que se apresentam em mais de uma fase e não necessariamente em mais de um estado físico da matéria), como o escoamento bifásico ar-água da figura 1, ocorrem a todo instante em diversas atividades industriais, como na indústria química (reatores, torres de fracionamento, condensadores, caldeiras, colunas de destilação e absorção e trocadores de calor); na indústria de geração de energia (reatores térmicos, refervedores, geradores de calor etc.) e na indústria de petróleo (produção, transporte e processamento de hidrocarbonetos).

Esses escoamentos envolvem diversos parâmetros e fenômenos físicos que necessitam ser quantificados e controlados, a fim de se alcançar projetos econômicos de processos e garantir a eficiência e segurança operacional dos equipamentos.

Desta forma, é muito importante que investigações experimentais sejam feitas nesses escoamentos, para que assim, não só entendamos melhor os fenômenos envolvidos, mas também para que tenhamos uma base sólida e confiável de dados experimentais que auxiliará, por exemplo, no desenvolvimento de modelos teóricos satisfatórios e também na validação de predições realizadas por simulações de fluidodinâmica computacional (CFD).



Figura 1. Escoamento Bifásico Ar-Água em Tubulação Vertical.

1.2 – Objetivos

Dada a importância da investigação experimental dos escoamentos multifásicos, diversas técnicas de medição são necessárias na monitoração e controle de processos industriais, para que entendamos de forma mais completa possível esses escoamentos e para que trabalhem em condições adequadas para os equipamentos envolvidos.

Diversas técnicas experimentais foram propostas no passado e têm sido utilizadas para investigar escoamentos bifásicos, bem como novas técnicas vêm surgindo e facilitando o estudo e conhecimento desses escoamentos. Podemos citar como exemplo as sondas condutivas, capacitivas e indutivas, videometria de alta velocidade e técnicas complexas como a tomografia por raios-x e raios-gama.

Neste estudo teórico e experimental, utilizou-se a técnica conhecida como sensor de condutividade elétrica para visualizar e caracterizar um escoamento bifásico ocorrendo em uma tubulação.

Primeiramente, este trabalho ilustra alguns dos diversos parâmetros relevantes existentes em escoamentos, mais especificamente para um escoamento bifásico ar-água em regime pistonado [1], e apresenta algumas das técnicas de medição mais conhecidas. A seguir, revisa o princípio de funcionamento da técnica de extração de parâmetros do escoamento através da condutividade elétrica das fases envolvidas (*sensor eletro-resistivo*) e apresenta as evoluções feitas na técnica e os problemas existentes com a mesma.

A seguir identificamos algumas possíveis geometrias de sensores que podem ser utilizadas e realizamos uma análise de incerteza. Algumas considerações são feitas a respeito da melhor geometria a ser utilizada.

Neste, também apresentamos a técnica **wire-mesh** (malha de eletrodos), detalhando alguns dos materiais utilizados, todo **hardware** e **software** envolvido, características gerais etc.. Em seguida detalhamos uma metodologia para extração de alguns dos parâmetros de interesse do escoamento através desta técnica.

2 – Técnicas de Medição em Escoamentos

2.1 – Padrões de Escoamentos Bifásicos em Tubulações

Conforme apresentado anteriormente, a caracterização experimental de escoamentos é de grande interesse industrial, científico e tecnológico.

Muitas são as variáveis a serem analisadas para uma completa e correta descrição de um escoamento e de seu modelo matemático [2], no entanto nenhuma das técnicas conhecidas atualmente tem uma aplicação universal, e seu uso é restrito a algumas condições específicas do escoamento em questão. As figuras 2 e 3 ilustram alguns dos possíveis regimes de escoamento.

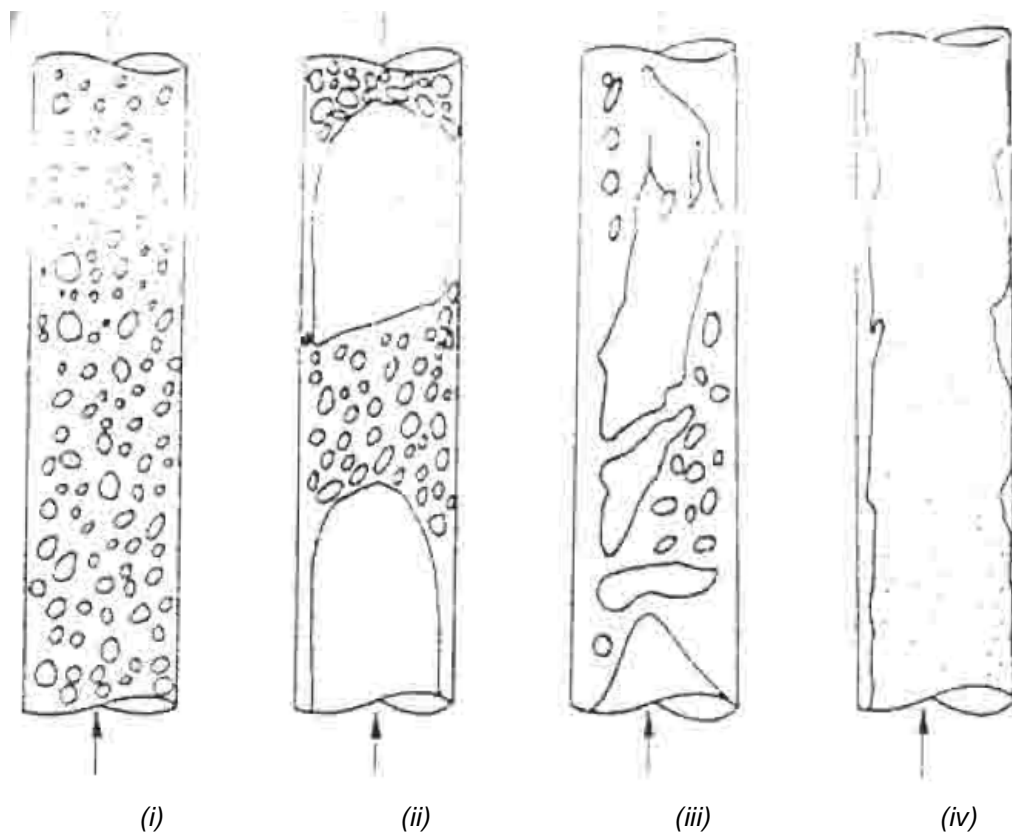


Figura 2. Classificação dos Regimes de Escoamento (Taitel et al., 1980).
i) bolhas, ii) pistonado, iii) intermitente e iv) anular.

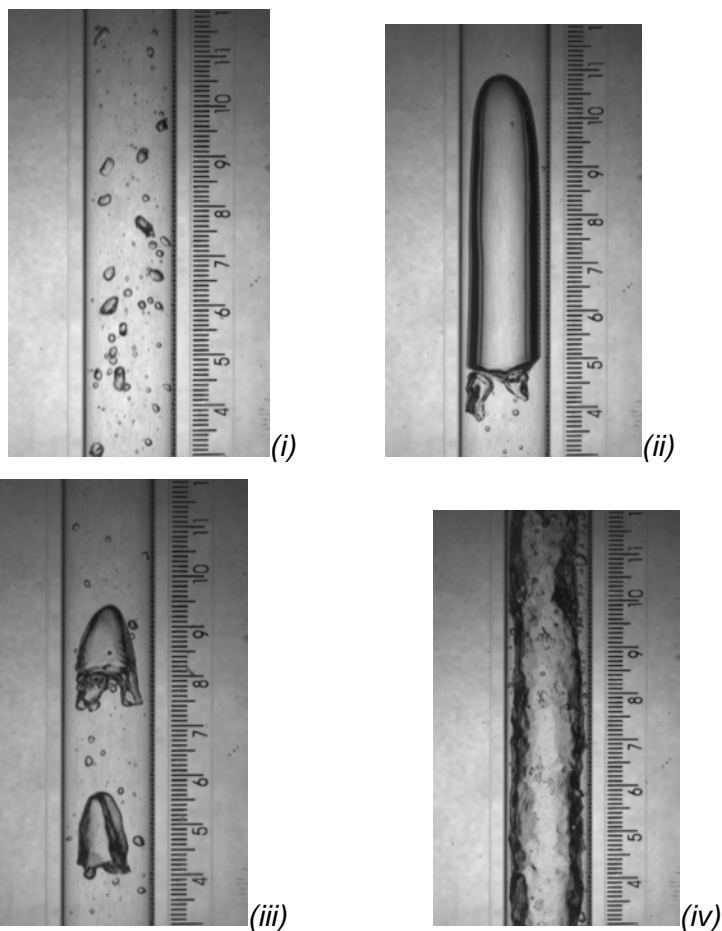


Figura 3. Regimes de Escoamento.
 i) bolhas, ii) e iii) pistonado, iv) anular.

i) Bolhas (**Bubble flow**): A fase gasosa se encontra dispersa na fase líquida em forma de bolhas dispersas, sendo a fase líquida contínua. Ocorre para baixas velocidades superficiais de gás.

ii) Pistonado (**Slug flow**): Este regime, também conhecido como regime de golfadas, é tipicamente simétrico em relação à linha central da tubulação. Ao se aumentar a velocidade da fase gasosa, as pequenas bolhas têm a tendência a se aglomerar, formando uma nova bolha em formato de projétil, de diâmetro próximo ao da tubulação. Essas bolhas são conhecidas na literatura como bolhas de Taylor. Entre as bolhas de Taylor e a parede da tubulação uma fina camada de líquido escoava para baixo.

iii) Intermitente (**Churn Flow**): Se assemelha ao regime Pistonado, porém mais caótico. As velocidades de gás e líquido são maiores neste caso do que no Pistonado, e a quebra das bolhas do que seria um escoamento em regime Pistonado, conduz a um padrão instável e

desordenado. Neste padrão existe um movimento oscilatório de líquido para cima e para baixo

iv) Anular (**Annular Flow**): É caracterizado por uma fase contínua de gás escoando ao longo da tubulação, carregando gotículas de líquido e um filme de líquido escoando ao redor com bolhas dispersas neste. Esse padrão de escoamento ocorre com altas concentrações e velocidades de gás.

O regime de escoamento depende de diversos fatores. Para uma simples ilustração, observar os padrões de escoamento variando de acordo com as vazões de líquido e gás de acordo com o mapa de escoamento da figura 4.

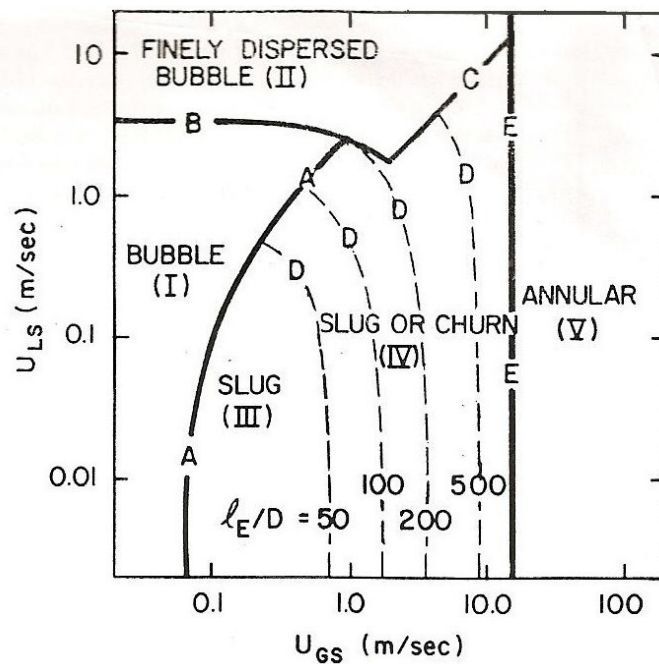


Figura 4. Mapa de Padrão de Escoamento para Tubos Verticais com 5cm de Diâmetro Interno, Escoamento Bifásico Ar-Água, 25°C, 1 MPa (Taitel et al., 1980).

Para entendimento da complexidade que é descrever adequadamente um escoamento, analisando apenas o caso isolado e bem definido de escoamento bifásico ar-água em regime pistonado, supondo escoamento vertical em equilíbrio isotérmico e a baixas pressões; escoamento axi-simétrico, unidimensional e em regime permanente, temos **17 variáveis** necessárias para a completa descrição do modelo matemático proposto por Fernandes, Semiat e Dukler (1983) [3], conforme pode-se observar na figura 5.

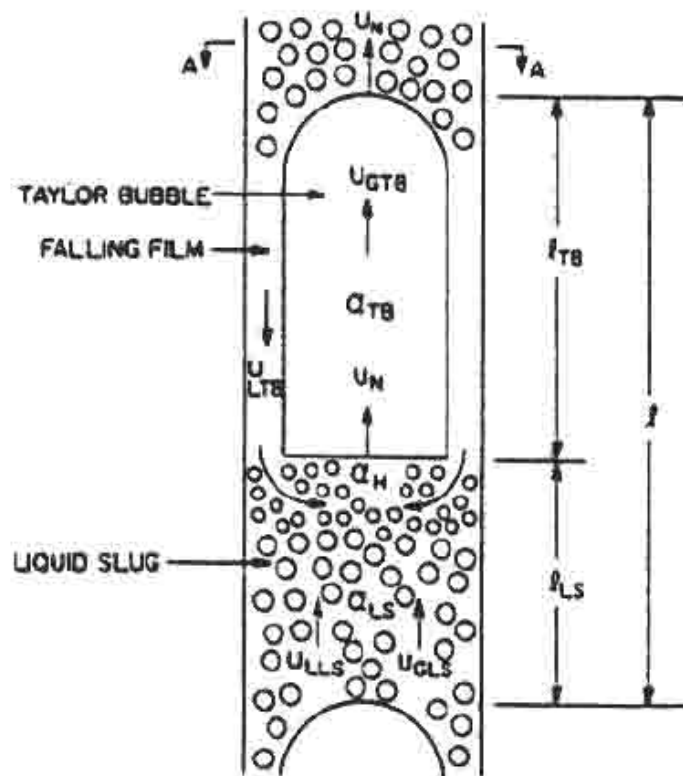


Figura 5. Representação de Escoamento Bifásico ar-água em Regime Pistonado e das Variáveis Envolvidas (Fernandes et al., 1983).

As variáveis de interesse envolvidas são definidas conforme abaixo:

Frações de Vazio (percentagem de ar na totalidade de fluido):

1. α_{SU} : Fração de vazio do **slug** unitário
2. α_{TB} : Fração de vazio da bolha de Taylor
3. α_{LS} : Fração de vazio da região líquida
4. α_H : Fração de vazio na esteira da bolha de Taylor

Vazões:

5. $\int A$: Vazão de gás entranhada no topo da bolha de Taylor proveniente da região líquida
6. $\int B$: Vazão de gás entranhada na esteira da bolha de Taylor proveniente da região líquida
7. $\int C$: Vazão de total gás cedida da região líquida para a bolha de Taylor

8. \int LTB : Vazão volumétrica do filme de líquido

Comprimentos Característicos:

9. δ_L : Espessura média do filme de líquido

10. δ_C : Distância entre a interface da bolha de Taylor com o filme de líquido e o ponto $y(UN)$

11. β : Razão entre o comprimento da bolha de Taylor e o comprimento da célula unitária ($\beta=ITB/l$)

Velocidades:

12. UGTB : Velocidade de subida do gás na bolha de Taylor

13. UGLS : Velocidade do gás na região de líquido

14. ULLS : Velocidade do líquido na região de líquido

15. ULTB : Velocidade do filme de líquido ao redor da bolha de Taylor

16. UN : Velocidade de translação da bolha de Taylor

17. U^* : Velocidade de atrito

2.2 – Técnicas de Medição mais Conhecidas

Conforme explicado anteriormente, muitas são as variáveis a serem analisadas em um escoamento e nenhuma das técnicas conhecidas pode nos fornecer todas as variáveis, nem pode ser utilizada em todas as condições de escoamento. Desta forma precisamos conhecer algumas técnicas que se completem na busca de uma descrição satisfatória para o escoamento a ser analisado.

Atualmente são conhecidas uma gama enorme de técnicas. Podemos citar como exemplos as sondas condutivas, indutivas e capacitivas; velocimetria por imagem de partículas, velocimetria por **laser Doppler**, anemometria térmica por fios e filmes quentes, **Shadow Sizer** (método de dimensão da sombra utilizando videometria de alta velocidade); sensores de ultra-som; tubos de **Pitot** (ver figura 7); **wire-mesh** (malha de eletrodos); rotâmetros de área variável, conforme ilustrado na figura 8; transdutores de pressão e vazão eletromagnéticos (ver figura 6); foto-emissão e detecção e muitas outras.



Figura 6. Medidor de Vazão Siemens.



Figura 7. Tubo de Pitot.



Figura 8. Rotâmetro de Água OMEL Modelo N.

2.2.1 – Descrição de algumas das Técnicas Experimentais Disponíveis no Laboratório de Mecânica da Turbulência [27] e na DINAM/INMETRO [28]

As técnicas de medição disponíveis são técnicas sofisticadas, que utilizam diferentes princípios de medição. Elas nos permitem determinar diversas variáveis de interesse em

uma grande variedade de padrões de escoamento, sendo de grande interesse industrial, científico e tecnológico.

2.2.1.1 – VIP (Velocimetria por Imagem de Partículas)

Esta técnica de medição é mais conhecida no meio científico como PIV (**Particle Image Velocimetry**) [4] e [5]. É uma técnica de medição não intrusiva onde seu princípio de funcionamento é bem básico, consistindo na medição do campo de velocidades do escoamento através da correlação cruzada de imagens sequenciais de um conjunto de partículas suspensas no mesmo (ver figura 9).

Apesar do simples princípio de funcionamento, cuidados devem ser tomados ao se fazer uso da técnica. É importante trabalharmos com partículas traçadoras não corrosivas, não tóxicas e inertes. Estas devem ser pequenas o suficiente para que o escoamento seja bem desenhado, porém suficientemente grandes para que sejam capazes de espalhar a luz necessária à detecção pela câmera. Além disso, cuidados devem ser tomados com relação à concentração e distribuição das partículas no escoamento a ser estudado.

Como fonte de luz utiliza-se um emissor de raio **laser**, como o **laser** Nd:YAG. Pequenos pulsos de luz são gerados, normalmente a duração destes é de 5 a 10 ns e para facilitar a sincronia com a câmera que captura as imagens com as partículas iluminadas pelo laser, frequências entre 15 e 30 Hz são utilizadas. A câmera deve ser instalada perpendicularmente aos planos de **laser**.

Conhecendo o deslocamento das partículas através das imagens obtidas e sabendo o tempo entre duas imagens subseqüentes, fica fácil determinar a velocidade das partículas e conseqüentemente a velocidade do fluido, desde que consideremos que a inércia da partícula é baixa o suficiente para acompanhar o escoamento.

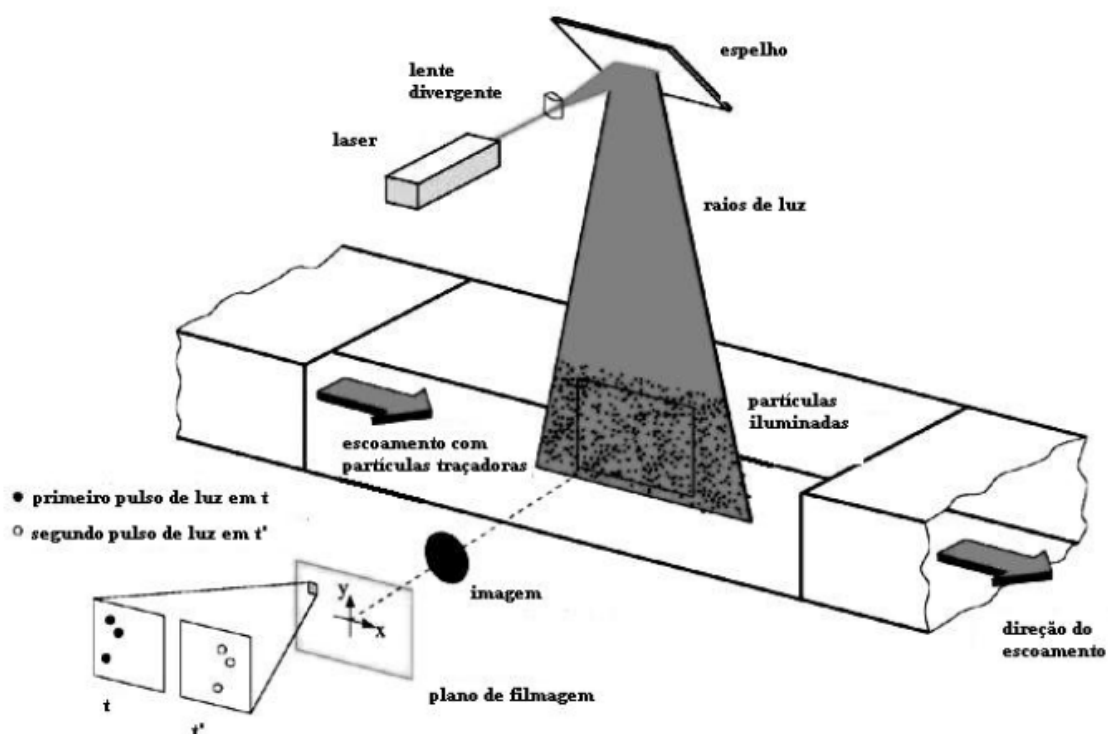


Figura 9. Ilustração esquemática do Sistema VIP em um Túnel de Vento (Figura extraída do Manual do Programa **Flow Manager**).

Este sistema, apesar de representado na figura 9 para análise em um escoamento com apenas uma fase (ar), também pode ser utilizado em escoamentos multifásicos, como pode ser observado na representação esquemática na figura 10, onde é verificado a velocidade bidimensional de partículas em um escoamento gás/líquido em uma tubulação.

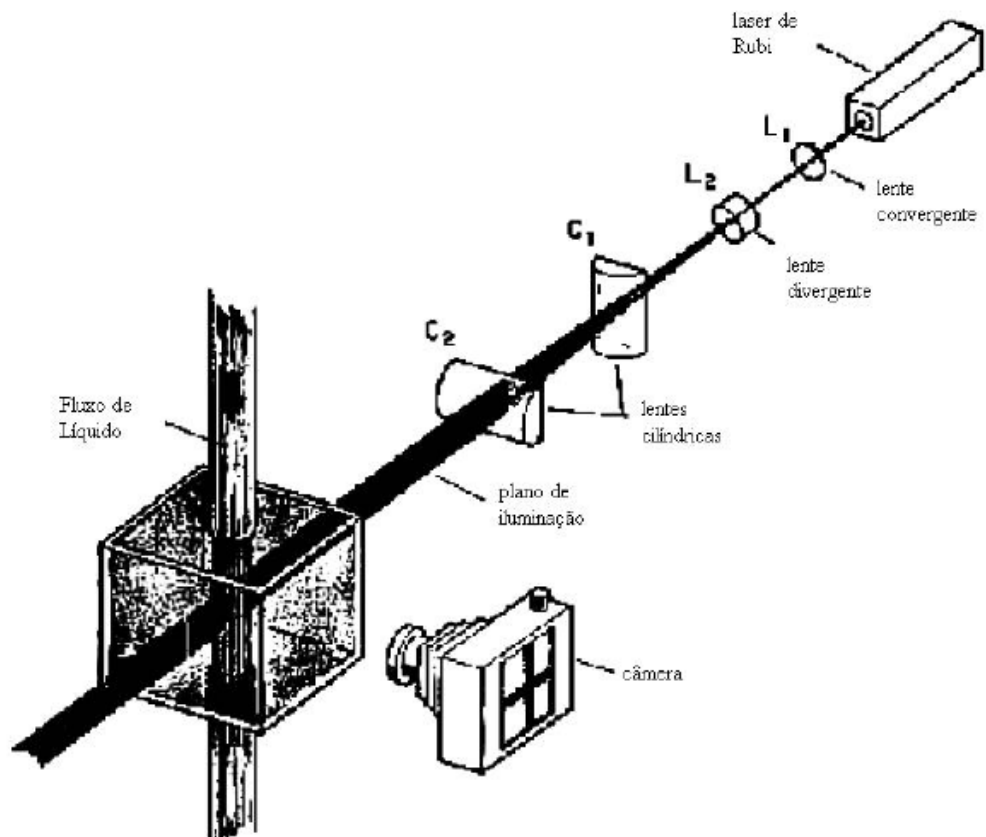


Figura 10. Sistema VIP antigo, aplicado em escoamento multifásico (Silva, 2007) [6].

A premissa para que utilizemos esta técnica é que os meios permitam a passagem do **laser** em seu interior e que a câmera seja capaz de capturar a reflexão das partículas. Geralmente os meios utilizados nos experimentos são ar e água, e a única diferença na implementação da técnica é o tipo de partícula traçadora que se deve utilizar. Esta deve ter massa específica o mais próximo possível do meio que se quer medir. Na água geralmente utiliza-se rodamina, enquanto no ar se pode utilizar um gerador de fumaça comum (**Chauvet Hurricane 1700**), que utiliza um fluido (ROSCO) a base de alcoóis polifuncionais, essência, corante e água deionizada para gerar a fumaça.

Para que tenhamos um campo de velocidades tridimensional, basta a adição de um novo plano de **laser**, perpendicular ao primeiro e de uma nova câmera (ver figura 11).

Nas figuras 12, 13 e 14 podemos observar imagens fornecidas por câmera de alta velocidade e resolução, imagens fornecidas pelo sistema VIP e o campo vetorial de velocidades obtido pelo sistema VIP, respectivamente.

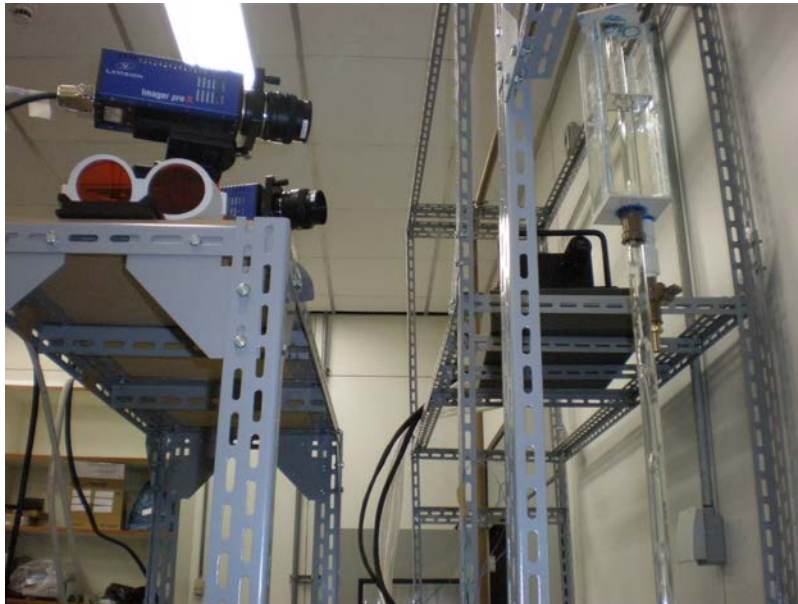


Figura 11. Sistema VIP aplicado em escoamento multifásico, montado na DINAM.

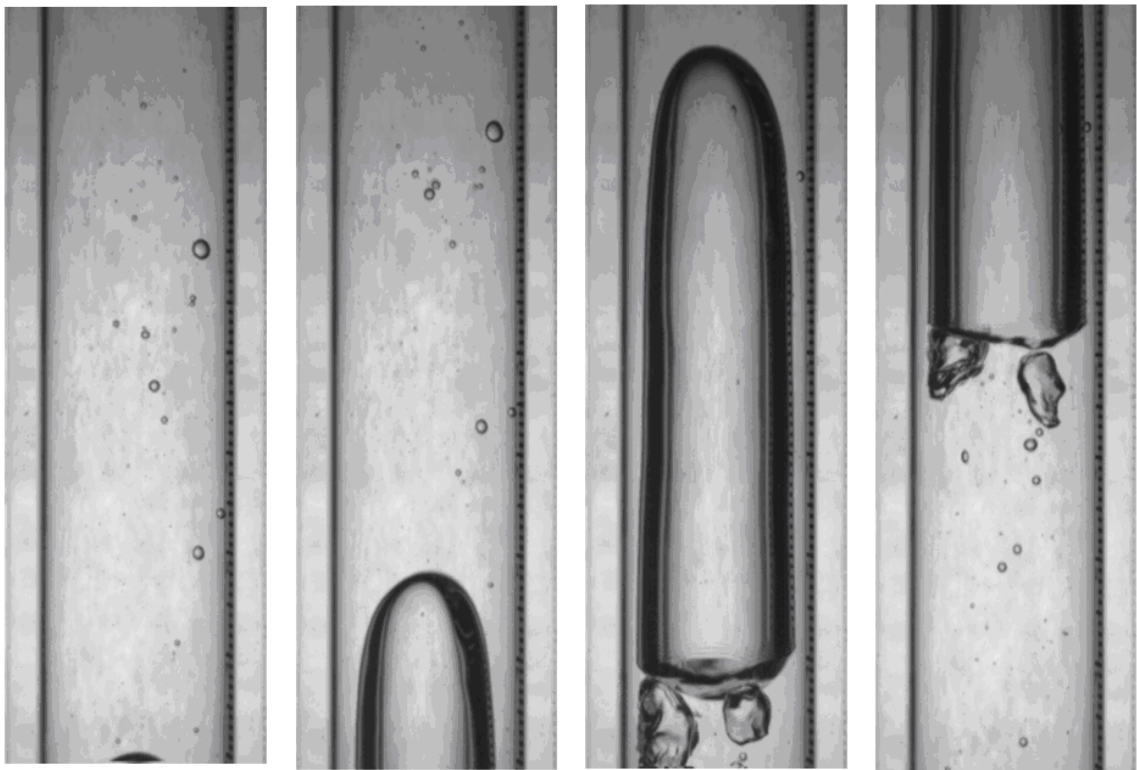


Figura 12. Sequência temporal de ascensão de uma bolha de Taylor em uma tubulação vertical (Paz, 2009).

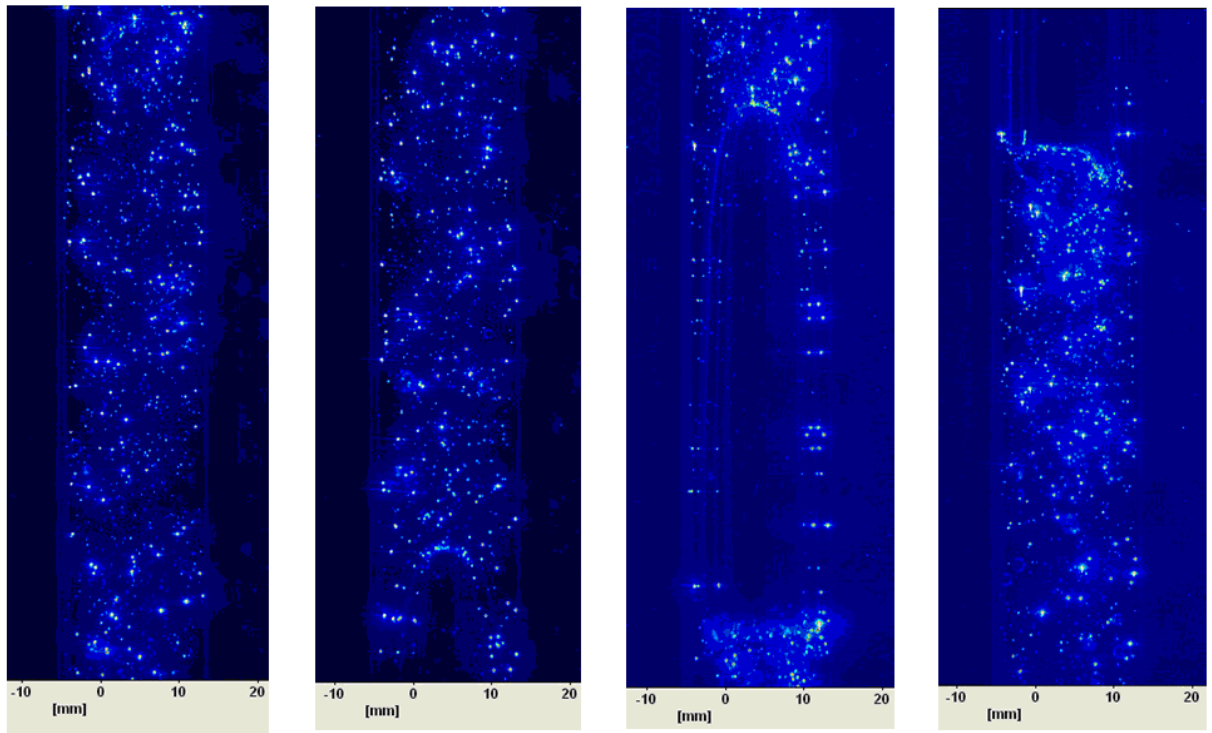


Figura 13. Imagens adquiridas da ascensão de uma bolha de Taylor em uma tubulação vertical através do sistema VIP (Paz, 2009).

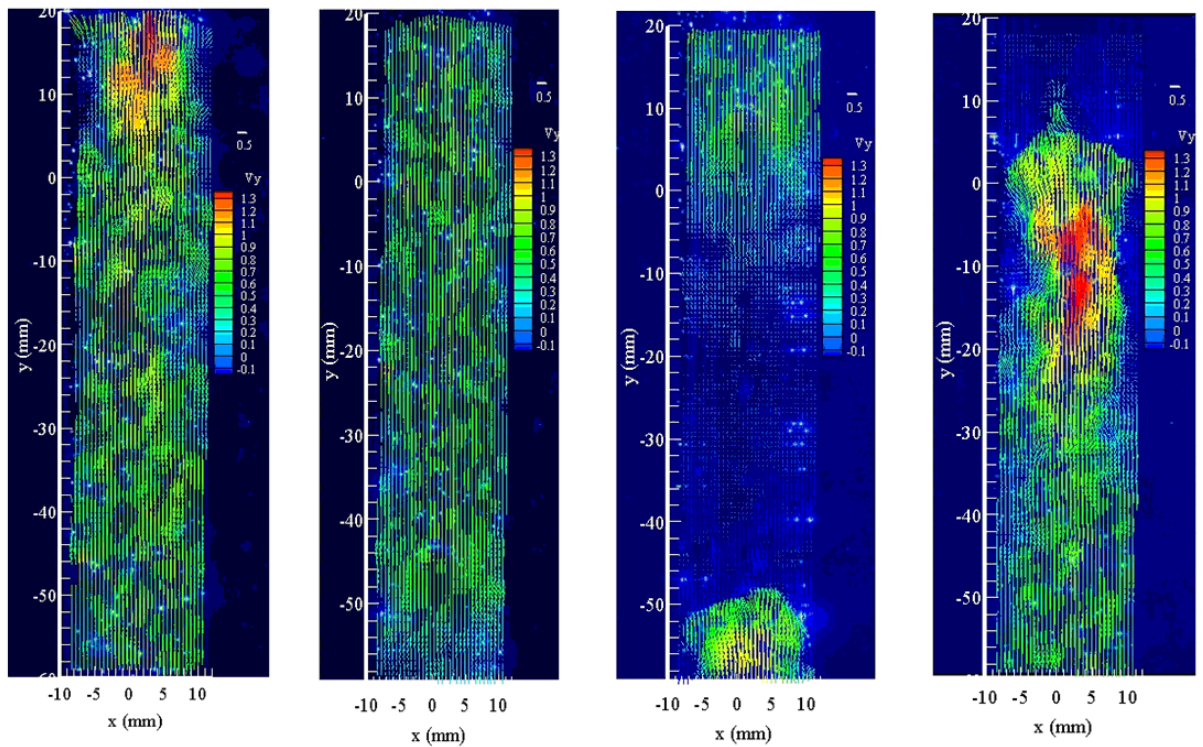


Figura 14. Campos vetoriais de velocidades instantâneas obtidos através do sistema VIP (Paz, 2009).

Dentre as vantagens na utilização desta técnica, podemos citar o fato de ser uma medição não intrusiva e, portanto, não interfere no escoamento e também o fato da medição ser feita simultaneamente em diversos pontos do escoamento. Em contra-partida é necessário acesso visual ao escoamento e, devido à frequência de aquisição ser entre 15 e 30 Hz, não podemos analisar escoamentos que ocorram em frequências superiores a 30Hz.

2.2.1.2 – VLD (Velocimetria por *Laser Doppler*) [5]

Esta técnica utiliza o efeito **Doppler** como princípio para se medir a velocidade em um ponto específico do escoamento.

O efeito **Doppler** ocorre quando o receptor, ou o emissor, de uma onda eletromagnética está em movimento, resultando em uma variação na frequência e no comprimento de onda com relação à onda emitida originalmente.

Os principais componentes em um sistema de medição típico em VLD podem ser observados na figura 15, e são:

- Fonte de **laser**;
- Transmissores ópticos;
- Fotodetector;
- Processador e analisador de sinais.

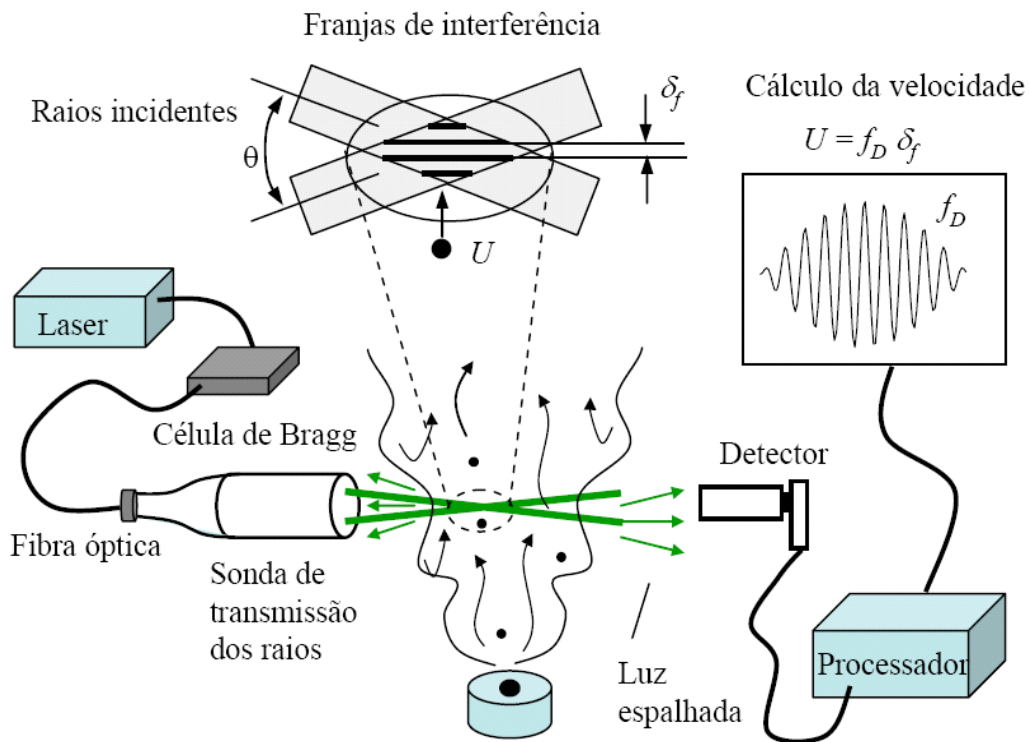


Figura 15. Esquema de Funcionamento de um Sistema VLD (Turbulência, 2006) [7].

Esta técnica de medição consiste em se gerar dois feixes de luz com frequência fixa (luz coerente) e iluminar partículas distribuídas no escoamento. Assim como na VIP, estas partículas devem ser pequenas o suficiente para acompanharem o fluido, grandes o bastante para refletirem a luz incidente e devem ter massa específica o mais próximo possível do meio em que estamos medindo.

Quando os dois feixes de luz se cruzam formam franjas de interferência, cuja configuração é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas. A distância entre essas franjas é dada em função do ângulo com que os feixes se cruzam e do comprimento de onda do laser, conforme equação 1:

$$\delta_f = \lambda / 2\text{sen}(\theta/2) \quad (\text{Equação 1})$$

Quando as partículas passam pelas franjas, perpendicularmente a elas, criam um efeito **Doppler** na frequência do feixe e que é diretamente proporcional a sua velocidade, de acordo com a equação 2.

$$f_D = U / \delta_f \quad (\text{Equação 2})$$

Com a definição de três planos ortogonais de medição pode-se obter as três componentes de velocidade do fluido.

As principais características desta técnica são:

- Medição não-intrusiva, portanto, assim como VIP não perturba o escoamento. Em contra-partida requer acesso visual, fluido transparente e adição de partículas;
- Não requer calibração, pois a resposta é linear à velocidade do fluido, independentemente das variações das condições do ambiente, já que o método é baseado na estabilidade das ondas eletromagnéticas;
- Fornece a direção e o sentido das três componentes de velocidade;
- Alta resolução espacial, dependendo apenas do tamanho do volume de controle (micrométrico);
- Alta resolução temporal (tempo de resposta do processador de sinais muito curto), dependendo do tamanho e concentração das partículas em suspensão.

2.2.1.3 – Anemometria Térmica (Fio/Filme Quente)

O princípio de funcionamento da anemometria térmica [7] por fio ou filme quente é baseado na transferência de calor por convecção entre o elemento sensor aquecido e o fluido escoando ao seu redor. Na figura 17 temos alguns modelos de sensores.

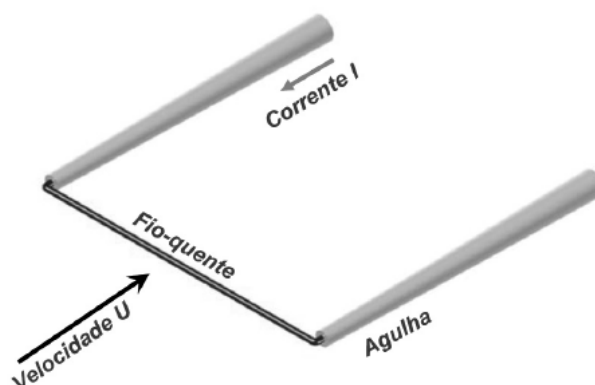


Figura 16. Representação de um Fio-Quente Operando [7].

O aparato experimental é composto basicamente pelo elemento sensor (fio aquecido, por exemplo), representado na figura 16; um circuito de controle onde o fio/filme quente ocupa um dos braços de uma ponte **Wheatstone** (ver figuras 19 e 20) e um sistema de aquisição de dados, que pode ser composto por uma placa de aquisição de sinais e um computador por exemplo.

O fio utilizado como elemento sensor é de platina ou tungstênio, com diâmetro de 4 a 10 μ m (10 vezes menor que um fio de cabelo) e comprimento de 1mm. Suas dimensões diminutas (observar figura 18) se devem ao fato do interesse em se perturbar o menos possível o escoamento.



Figura 17. Anemômetros Térmicos por Fio-quente (Livro Freire et al)[7].

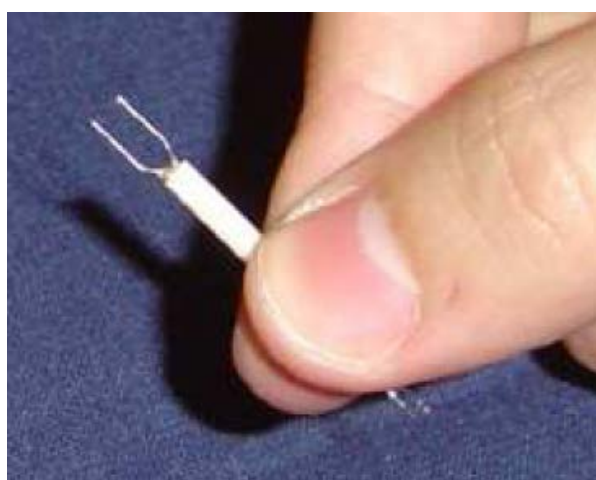


Figura 18. Suporte de Fio-quente [7].

A temperatura do fio é mantida a aproximadamente 250°C (no caso do anemômetro à temperatura constante). O filamento do sensor é aquecido pela corrente elétrica que passa por ele, por efeito **Joule**. Isso acontece porque o fio possui um coeficiente térmico de resistividade (α_0), o que significa que quando a temperatura do filamento varia o mesmo acontece com a sua resistência elétrica.

Conforme a velocidade do fluido escoando aumenta ou diminui, as trocas de calor entre o elemento sensor e o escoamento se alteram e conseqüentemente a resistência do braço da ponte com o elemento sensor também, logo o circuito retro-alimentado condiciona a energia fornecida à ponte para que esta seja reequilibrada. Esta energia fornecida ao circuito é monitorada e armazenada na memória de um computador.

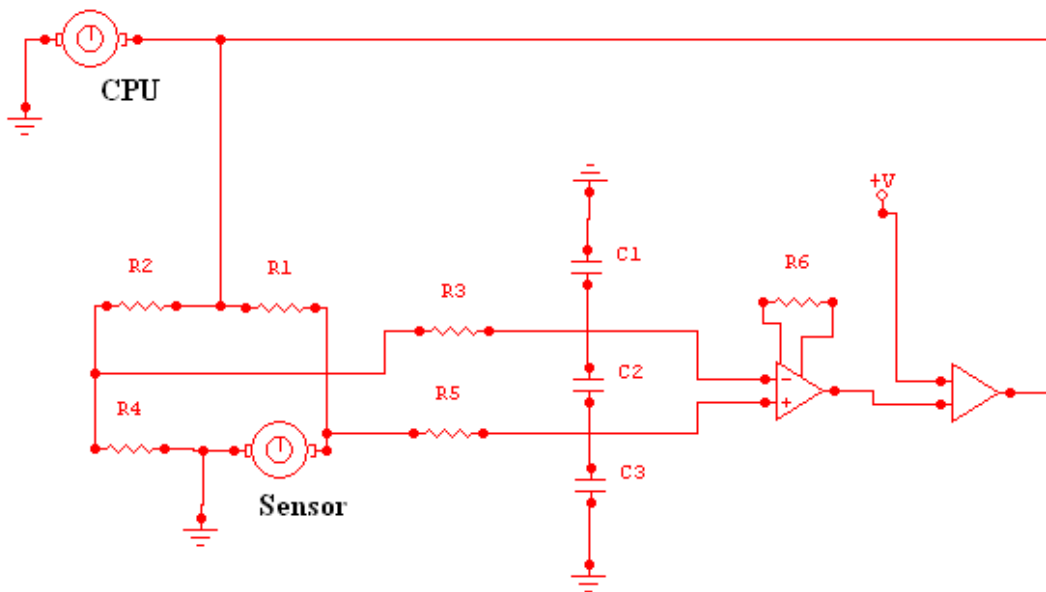


Figura 19. Circuito Utilizado em Anemometria por Temperatura Constante.

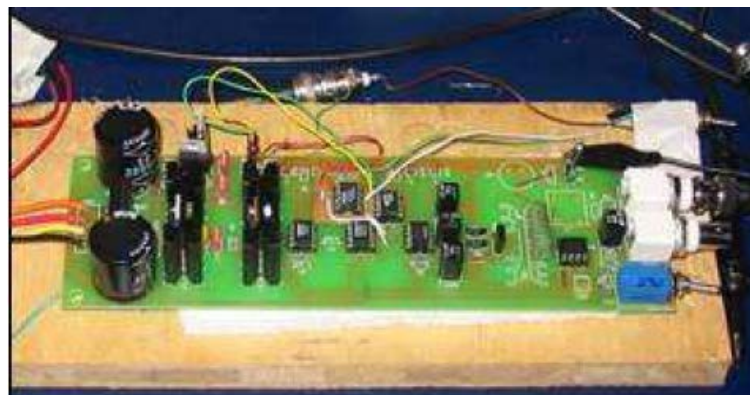


Figura 20. PCU Utilizada em Ponte CTA (**Constant Temperature Anemometer**).

Os dados gerados são armazenados no computador e uma calibração deve ser feita, associando os valores de tensão colhidos com as velocidades encontradas para o fluido, que podem ser obtidas através de um medidor de calibração, como um simples tubo de Pitot, que pode ser observado na figura 21. A figura 22 ilustra o túnel de vento onde testes de calibração foram realizados.



Figura 21. Calibração de Fio-Quente com Tubo de Pitot.

Existe uma lei de calibração que relaciona a energia (V) fornecida à ponte para manter a temperatura do fio constante e a velocidade (u) do fluido. Esta lei é conhecida como Lei de King e está expressa na equação 3.

$$V^2 = A + B.u^n \quad (\text{Equação 3})$$

(Lei de King)

Após calibrado o elemento termo-sensível, com o tubo de Pitot mencionado acima, por exemplo, as constantes “A”, “B” e “n” se tornam conhecidas. “n” geralmente varia entre 0,45 e 0,5. A partir de agora conhecemos a velocidade do escoamento através dos valores de “V” obtidos.

É importante que a temperatura do fluido não se altere com o tempo, para que a energia fornecida à ponte seja somente em função da velocidade do escoamento.

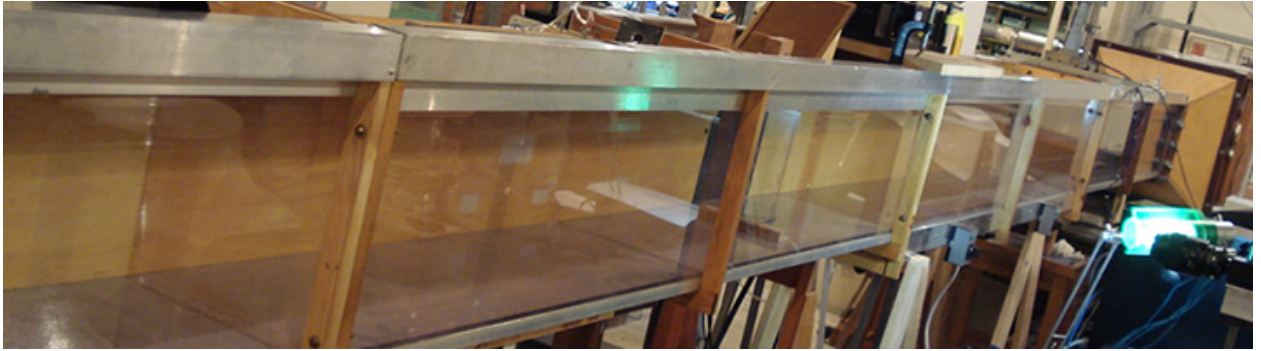


Figura 22. Túnel de Vento de (0,3m x 0,3m x 8,0m) utilizado nos testes com Fio-Quente.

Também é possível conhecermos a direção do fluido. Para isto, basta utilizarmos sensores com mais de um canal, onde elementos sensores estejam defasados em ângulo, conforme o sensor da figura 23. Desta forma, ângulo de incidência do escoamento com os sensores será diferente e, portanto, as trocas de calor também. Analisando os dados armazenados para cada canal podemos nos aproximar da direção do escoamento.

Caso a velocidade e a direção do escoamento sejam mantidas, podemos também inferir a variação de temperatura do escoamento, também analisando as alterações no fornecimento de energia à ponte.

Portanto, esta técnica nos permite verificar a velocidade, direção e temperatura de um escoamento (em um ponto) que passe pelo elemento sensível.

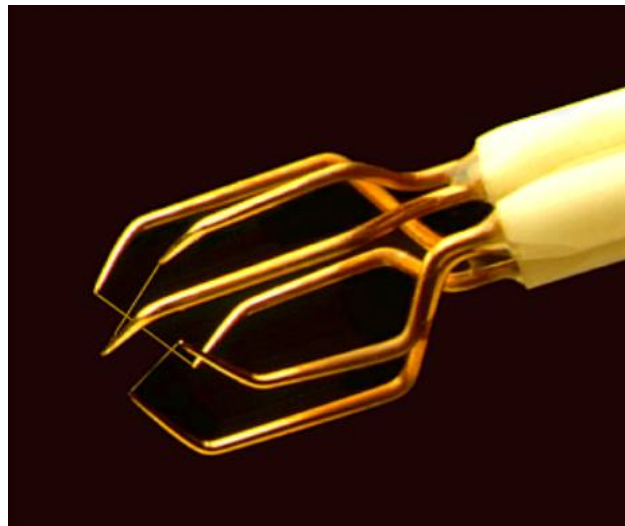


Figura 23. Sonda com 3 Canais de Fio-Quente [7].

É importante que a cada nova medição as condições de temperatura do meio e conseqüentemente do escoamento não se alterem, caso contrário a cada nova medição uma nova calibração deve ser realizada. Também é crucial que o sensor esteja na mesma posição de quando foi calibrado.

Esta técnica de medição possui muito baixo custo de fabricação e é capaz de captar pequenas variações de velocidade com alta frequência de resposta (50 kHz), em contrapartida é uma técnica intrusiva, portanto interfere no escoamento e o sensor fica sujeito ao desgaste e à ruptura. Outro problema está na impossibilidade de investigar zonas de recirculação devido a falta de sensibilidade direcional do fio.

2.2.1.4 – **Shadow Sizer (Método de Dimensão da Sombra por Videometria de Alta Velocidade)**

O Shadow Sizer é uma técnica de medição óptica que utiliza uma câmera de alta resolução e velocidade (figura 24) e uma fonte de luz difusa (figura 25) para obter imagens do escoamento, e a partir destas imagens fornece resultados como diâmetro e velocidade de bolhas.



Figura 24. Câmera NanoSense Mk III, 2080 **Frames** por Segundo a 1.3 Mega Pixel.



Figura 25. Fonte de Luz **Motion LED**.

O princípio de funcionamento é bem simples. Em um escoamento bifásico ar-água ou óleo-água, por exemplo, as bolhas de ar ou gotículas de óleo, são iluminadas pela fonte

de luz e as sombras geradas por sua passagem são registradas por intermédio da câmera digital.

Com o auxílio de um algoritmo de análise e processamento de imagens (**software Flow Manager da Dantec Dynamics**), pode-se delinear o contorno desses corpos individualmente, baseado na escala de cinza da imagem e no contraste entre o objeto e o fundo da imagem, conforme observado na figura 26:

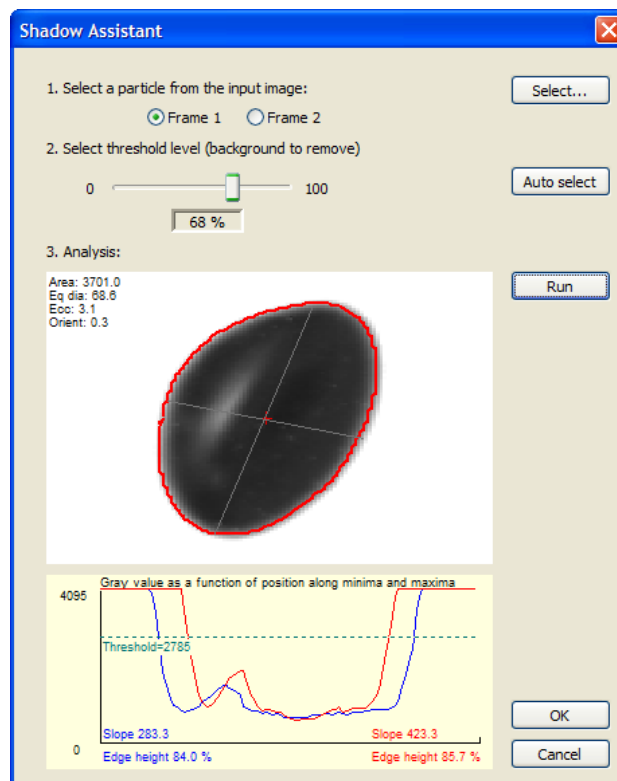


Figura 26. Avaliação da escala de cinza de um objeto identificado (figura extraída do **software Flow Manager da Dantec Dynamics**).

O programa também é capaz de determinar se o corpo detectado está dentro ou fora de foco, uma vez que somente objetos com contornos bem definidos e dentro do foco são considerados para o pós-processamento. Quando há uma grande densidade de bolhas no escoamento, o programa separa objetos sobrepostos através de técnicas específicas.

Nas figuras 27 e 28 podemos observar imagens de bolhas obtidas pela câmera.

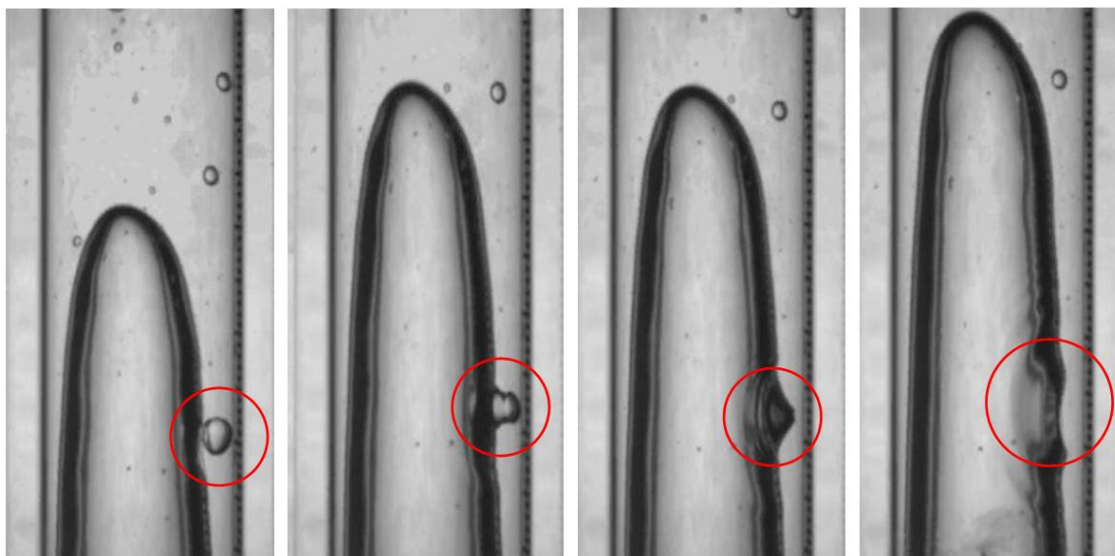


Figura 27. Evolução da coalescência de uma bolha dispersa no filme líquido descendente com uma bolha de Taylor.(Paz, 2009).

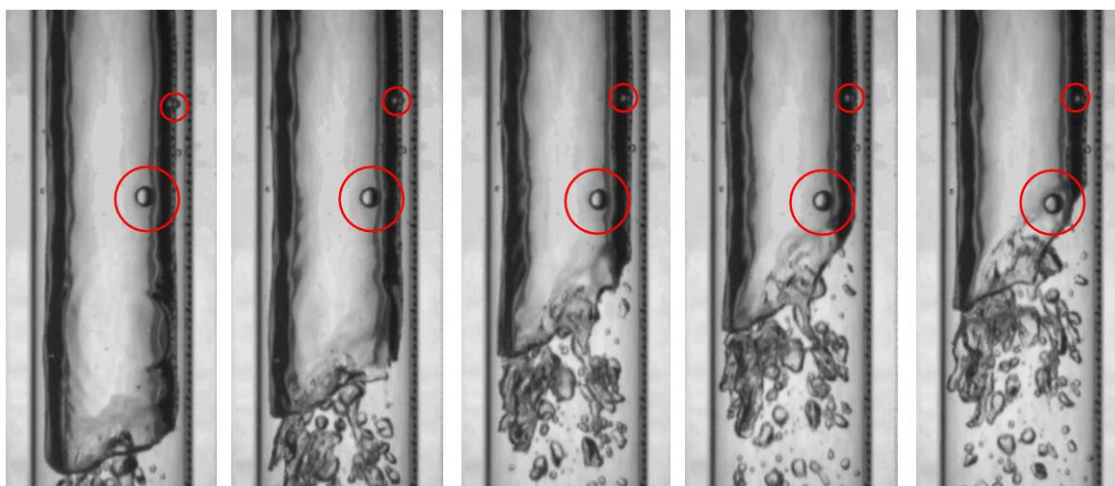


Figura 28. Evolução da passagem de uma bolha de Taylor ascendente enquanto as bolhas dispersas ao seu redor estão em repouso.(Paz, 2009).

Desta forma, é possível determinar as propriedades das bolhas/gotículas, como dimensão, área, orientação, fator de forma, perímetro, diâmetro equivalente, posição etc..

Se compararmos dois frames consecutivos capturados pela câmera, podemos inclusive determinar a velocidade e a deformação de bolhas/gotículas no escoamento estudado. As figuras 29 e 30 nos mostram alguns vetores velocidade para bolhas.

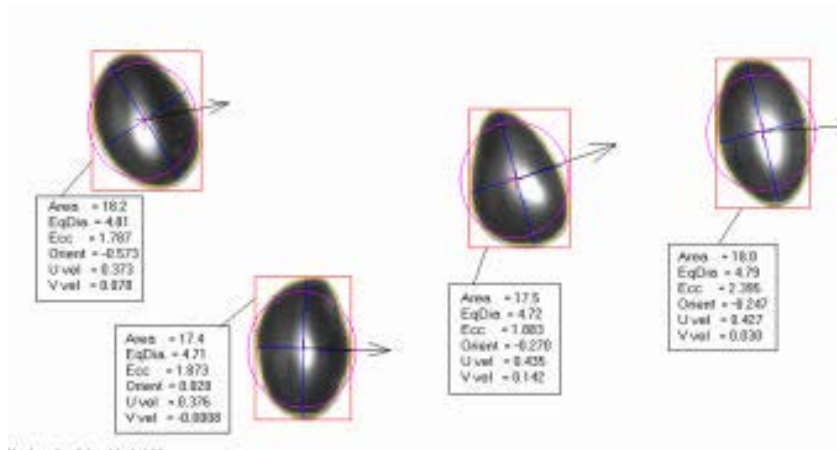


Figura 29. Algumas das Propriedades Mensuradas por **Shadow Sizer**.

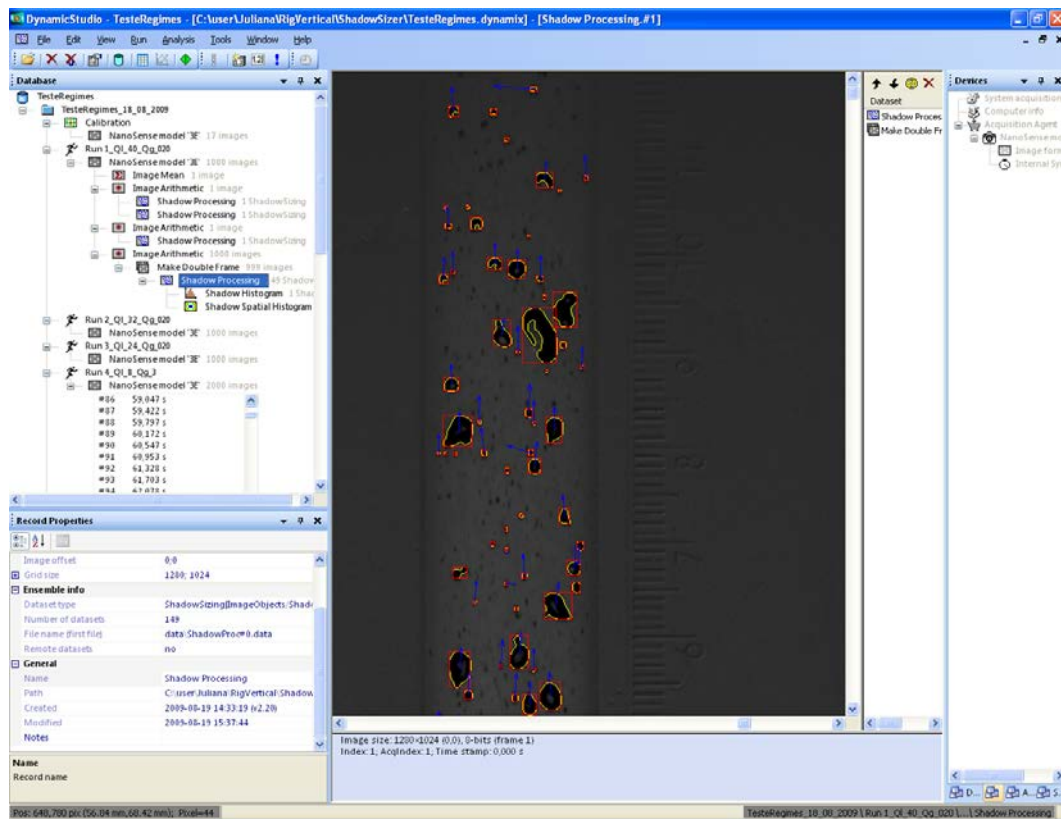


Figura 30. Interface do programa computacional **FlowManager** da Dantec na aquisição de uma imagem.

Os objetos (bolhas/gotículas) a serem medidos através desta técnica devem estar posicionados entre a fonte de luz difusa e a câmera digital, além de ser necessário o uso de um difusor entre o objeto iluminado e o **Led**, como se pode observar pelas figuras 31 e 32.

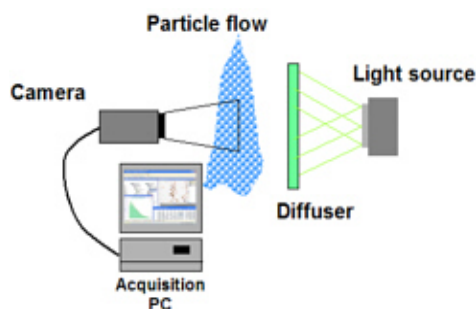


Figura 31. Componentes básicos da técnica de **Shadow Sizer** (Dantec Dynamics).

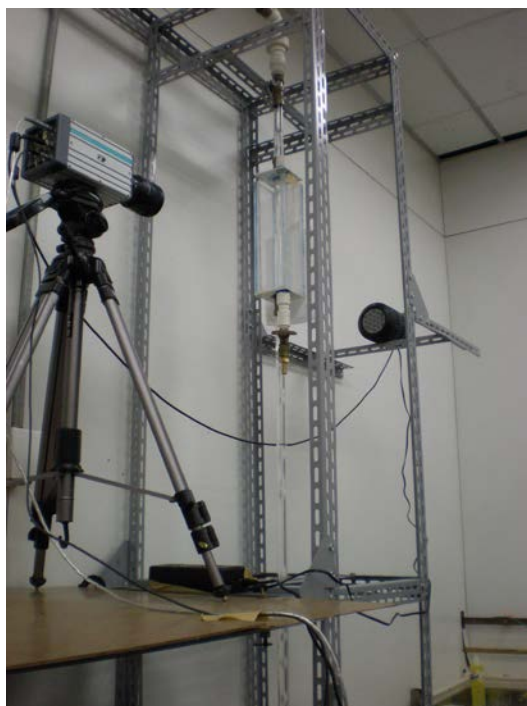


Figura 32. **Shadow Sizer** Operando na DINAM/INMETRO em escoamento Multifásico.

2.2.1.5 – Sensor Óptico (Foto-emissão e detecção)

Esta técnica, também de princípio de funcionamento muito simples, consiste em se atravessar um laser no sentido perpendicular ao do escoamento e monitorar a quantidade de energia luminosa que chega do outro lado de uma tubulação, por exemplo. O feixe de luz atravessará o escoamento, podendo encontrar ao longo do caminho ar e/ou água (no caso de um escoamento bifásico com estes elementos). A energia luminosa que chegará no fotodetector dependerá das proporções de ar e água que o **laser** encontre.

Para se mensurar a quantidade de energia luminosa detectada podemos fazer uso de um simples fotodetector, como o OSD15-E da **Centronic** (figura 33).

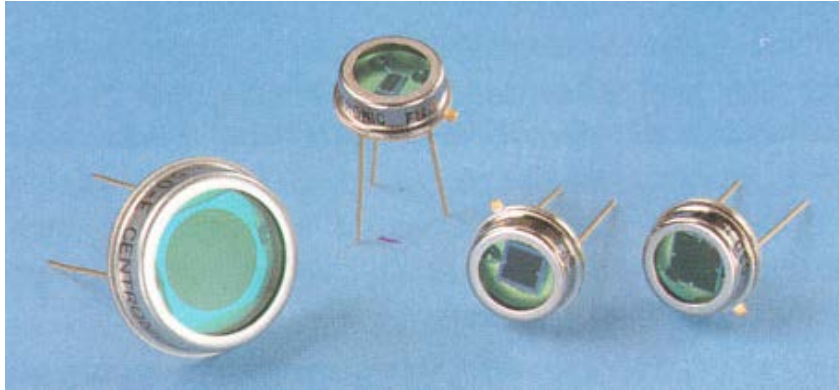


Figura 33. Fotodetector OSD15-E (*Datasheet* do Fabricante).

No caso específico do escoamento pistonado descrito em 2.1 é possível definir, por exemplo, a velocidade de subida da bolha, bastando para isso o uso de dois conjuntos de sensores defasados em posição vertical (figura 34). Desta forma, conhecendo o instante em que cada sensor detecta o início da passagem da bolha e conhecendo também a distância entre os sensores, portanto a razão entre essa distância e a diferença dos tempos de início de detecção dos sensores nos fornece a velocidade de subida da bolha de Taylor.

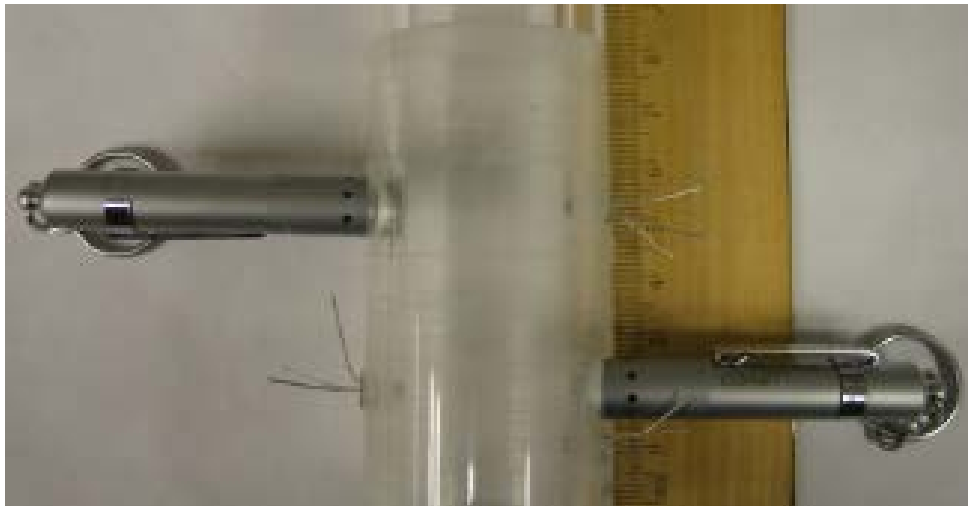


Figura 34. Medição com Sensor Óptico em Escoamento Bifásico Ar-Água (SGP-TR-181, 2009) [8].

2.3 – Quantificação das Variáveis de Interesse

Segundo o trabalho de Paz, 2009 [26], com as técnicas experimentais utilizadas no Laboratório de Mecânica da Turbulência, somos capazes de quantificar todas as 17 variáveis do modelo matemático que descreve o regime de escoamento citado em 2.1.

As técnicas que podem ser utilizadas para aquisição de cada dado em particular são informadas a seguir:

Frações de Vazio:

1. α_{SU} : **Shadow Sizer**, Sensor Óptico, Eletro-resistivo
2. α_{TB} : **Shadow Sizer**, Sensor Óptico, Eletro-resistivo
3. α_{LS} : **Shadow Sizer**, Eletro-resistivo
4. α_H : **Shadow Sizer**, Eletro-resistivo

Vazões:

5. $\int A$: **Shadow Sizer**
6. $\int B$: **Shadow Sizer**
7. $\int C$: **Shadow Sizer**
8. $\int LTB$: VIP, VLD

Comprimentos Característicos:

9. δ_L : **Shadow Sizer**, VLD
10. δ_C : VIP, VLD
11. β : **Shadow Sizer**, Sensor Óptico, Eletro-resistivo

Velocidades:

12. $UGTB$: VIP, VLD
13. $UGLS$: **Shadow Sizer**, Eletro-resistivo
14. $ULLS$: VIP, VLD
15. $ULTB$: VIP, VLD
16. UN : **Shadow Sizer**, Sensor Óptico, Eletro-resistivo, VIP
17. U^* : VIP, VLD

A partir dos dados listados, podemos verificar a importância de se estudar e aprimorar a técnica eletro-resistiva.

3 – Sistema de Medição de Fases Utilizando Sensor Eletro-resistivo

3.1 – Princípio de Funcionamento

A operação dos sensores eletro-resistivos é baseada na diferença da condutividade elétrica entre os fluidos presentes no escoamento.

Ao longo de todo o projeto com os sensores eletro-resistivos, os fluidos utilizados foram uma fase líquida (água) e uma fase gasosa (ar), conforme figura 35. A água apresenta uma resistividade elétrica na ordem de mil vezes a resistividade elétrica do ar, portanto, se torna simples a medição desses escoamentos utilizando a técnica em questão.

São sensores de fácil construção, capazes de fornecer medidas muito precisas e com o auxílio computacional a análise dos dados obtidos é bastante rápida e simplificada, permitindo análises mais complexas.

Vale ressaltar que, com os sensores eletro-resistivos, pode-se medir a proporção das fases em um duto, independente das características ópticas, apenas necessitando que os fluidos tenham condutividade elétrica distintas. Por outro lado, é uma técnica intrusiva, portanto influencia no escoamento.



Figura 35. Sensor eletro-resistivo em escoamento bifásico ar-água.

3.2 – A Origem da Técnica

Sensores eletro-resistivos, contruídos a partir de pequenas agulhas, foram introduzidos na literatura através de Neal [9] e Nassos [10], ambos em 1963. O objetivo deles era determinar a fração de vazio local em escoamentos bifásicos de nitrogênio e mercúrio. Entretanto, o trabalho de Serizawa (1975) [11] para escoamento de bolhas, foi o mais importante para o estabelecimento da técnica de medição [11] e [12].

Atualmente, os sensores eletro-resistivos são amplamente empregados em medições em escoamentos, contando com centenas de publicações.

3.3 – Aparato Experimental

Todo aparato experimental (figura 39) utilizado consiste basicamente em tubos de acrílico de diâmetros variados e com água em seu interior, parada ou em recirculação utilizando bombas; bombas de ar para injeção da segunda fase (bolhas) ou seringa insulina/tuberculina, usada para criação de bolhas de Taylor no escoamento; o sensor em si; um circuito analógico e um computador contendo uma placa de aquisição de dados. Uma câmera foi utilizada para comparação dos resultados obtidos com a imagem do escoamento.

Todo o aparato experimental utilizado se encontrava nas dependências da DINAM (Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos), no INMETRO e no Laboratório de Mecânica da Turbulência, na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro).

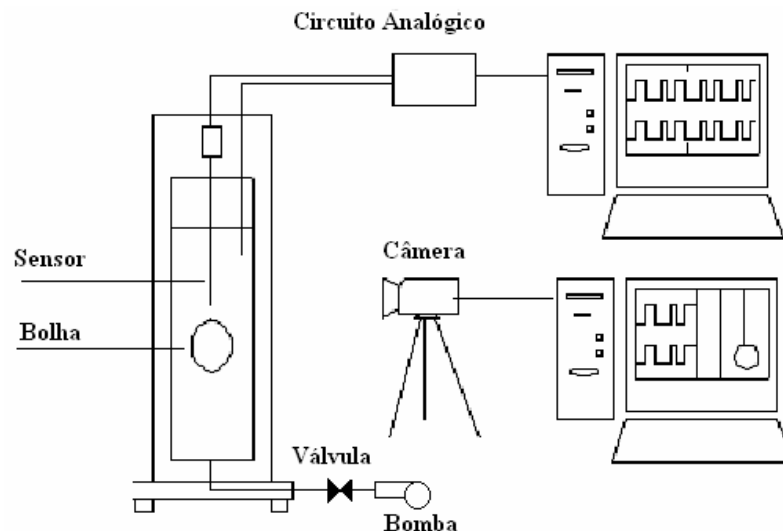


Figura 36. Aparato Experimental do Sistema de Medição.

Uma das seções de teste utilizadas com o sensor são apresentadas nas Figs. 37 e 38. Também se observa a câmera utilizada para comparar as imagens com os resultados obtidos com o sistema de medição. O **LED** serve para sincronizar a câmera com o circuito.

A lâmpada com um difrator melhora a qualidade da imagem adquirida pela câmera.



Figuras 37. Estrutura do tubo de vidro.



Figura 38. Destaque para o sensor e o led.

3.4 – O Sistema de Medição [13]

O sistema de medição é composto de três partes: o circuito analógico - parte que contém o sensor; a placa de aquisição de dados; e o modelo construído em **Simulink / LabView**; sendo que os dois últimos podem ser substituídos por um microprocessador para que trabalhem em maiores frequências.

3.4.1 – O Circuito Analógico Eletro-resistivo

O circuito analógico utilizado é apresentado na Fig. 39, onde “Sensor” é a resistência observada pelo sensor eletro-resistivo.

Nota-se que o circuito é de simples construção, não requisitando muitos componentes.

O circuito analógico possui o sensor eletro-resistivo conectado através de uma ponte de **Wheatstone**, e um amplificador de instrumentação, responsável em amplificar e condicionar o sinal para uma placa de aquisição de dados.

Optou-se pela configuração em ponte por sua capacidade em rejeitar modo comum, reduzindo ruídos acoplados ao sinal (60 Hz da rede, por exemplo).

Quando uma bolha de ar passa através do sensor, esta causa uma variação significativa da resistência em relação àquela definida pela água. Isto implica em uma variação na corrente elétrica do circuito. Após a passagem da bolha pela sonda, a corrente elétrica retorna ao seu valor anterior, pois a resistência do meio retornou ao seu valor inicial. Esta variação da resistência provoca uma variação proporcional da tensão que chega ao amplificador.

CIRCUITO PARA O SENSOR ELETTRORESISTIVO

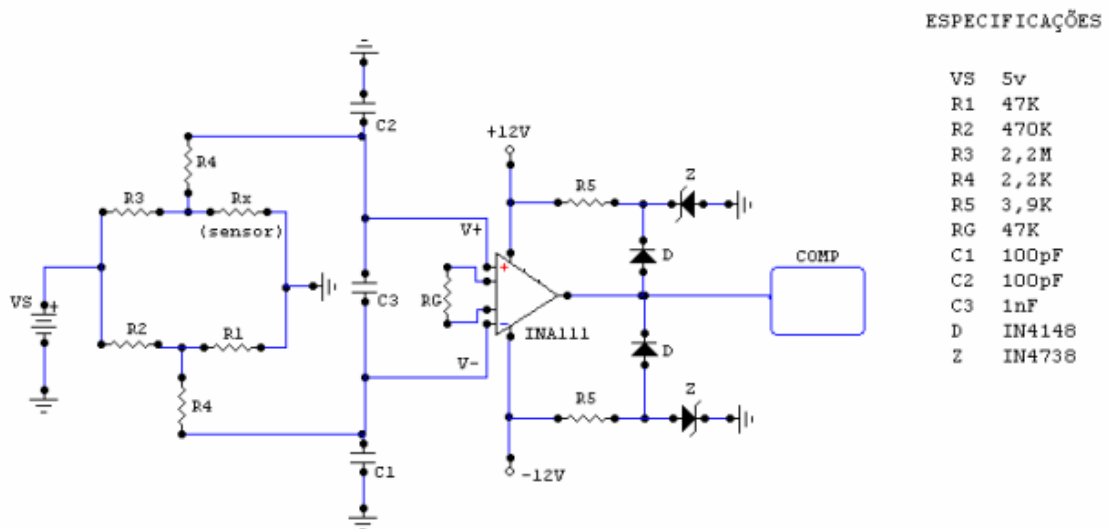


Figura 39. Circuito analógico do sistema de medição.

A configuração em ponte é o circuito mais comum utilizado para determinar o valor de uma resistência desconhecida. Como o amplificador apresenta uma alta impedância de entrada, pode-se desprezar suas correntes de entrada, e conseqüentemente a queda de tensão no resistor de ligação R4, assim temos a equação 4.

$$V_- = \frac{V_S}{R_1 + R_2} * R_1 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde V- é a tensão na entrada negativa do amplificador, R1 corresponde ao resistor de 47kΩ e R2 corresponde ao resistor de 470kΩ. Como a corrente que passa por esta parte do circuito não passa pela resistência do meio "Sensor", V- é independente da resistividade do fluido e suas variações.

Analisando pela outra entrada do amplificador temos a equação 5.

$$V_+ = \frac{V_s}{R_3 + R_x} * R_x \quad (\text{Equação 5})$$

Onde V+ é a entrada positiva do amplificador, R3 corresponde ao resistor de 2,2M e Rx corresponde a resistência observada pelo sensor eletro-resistivo.

Em ambos os casos VS é a tensão da fonte de alimentação do circuito, com valor de 5V.

Podemos observar através da segunda equação, que a tensão diferencial aplicada ao amplificador é dependente da resistência Rx.

Após esse estágio o sinal passa por um filtro passa-baixa (C1, C2 e C3), essa configuração é recomendada pelo próprio fabricante do amplificador e fornece a equação 6 como função de transferência.

$$f_{-3db} = \frac{1}{4\pi R_4 \left(C_3 + \frac{C_1}{2} \right)} \quad (\text{Equação 6})$$

Essa configuração é importante para garantir a filtragem caso exista um pequeno desbalanço entre as capacitâncias dos capacitores C1 e C2 que devem ser de mesmo valor.

A equação do ganho de tensão do amplificador é a equação 7.

$$G = 1 + \frac{50K}{R_G} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde Rg corresponde ao resistor de 47KΩ, neste caso o fator de multiplicação é de aproximadamente 2,1.

O circuito após o amplificador tem o objetivo de garantir que a tensão adquirida pelo computador não ultrapasse os limites da placa de aquisição (+/- 10V), definindo o limite máximo de tensão do sinal para 8,9V (8,2V do Zener mais 0,7V do diodo), a equação 8 apresenta o cálculo para a determinação do resistor R5 .

$$R_5 = \frac{V - V_z}{I_z} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde, V_z é a tensão do diodo Zener (8,2V), I_z é a corrente mínima do diodo Zener (1mA) e V é a tensão de alimentação aplicada ao resistor (+/- 12V).

O circuito foi inicialmente montado em **protoboard** para teste (figura 40). Após a verificação da eficiência do circuito, foi projetada uma placa de circuito impresso (PCI). O software **Eagle** foi utilizado e a empresa GIGA Ltda foi a responsável pela confecção das PCI's.

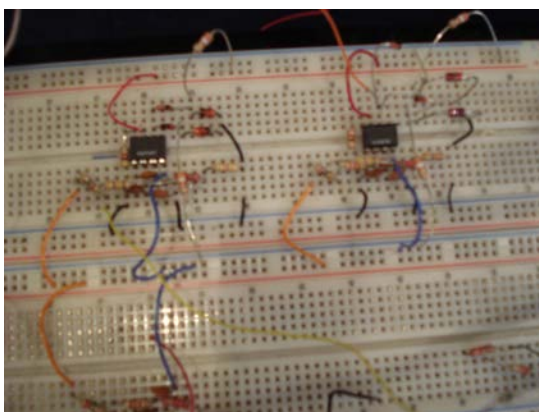


Figura 40. Circuito analógico do sistema de medição montado em protoboard.

3.4.1.1 – Projeto da PCI

O processo de projeto da PCI, utilizando apenas o manual do usuário, se dá de forma muito simples no software Eagle, por isso este software foi escolhido.

O procedimento se dá em 6 passos:

1. Adicionar as bibliotecas que serão utilizadas no projeto;
2. Criação do esquemático (figura 41):

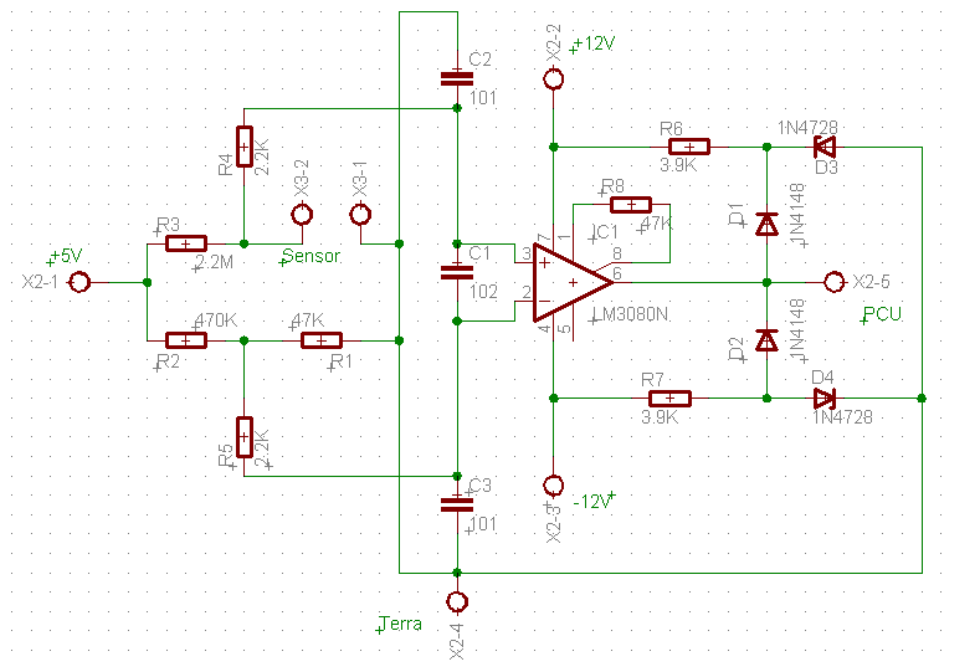


Figura 41. Esquemático do Circuito Eletro-resistivo, criado em Eagle.

3. Transição do ambiente de projeto (figura 42):

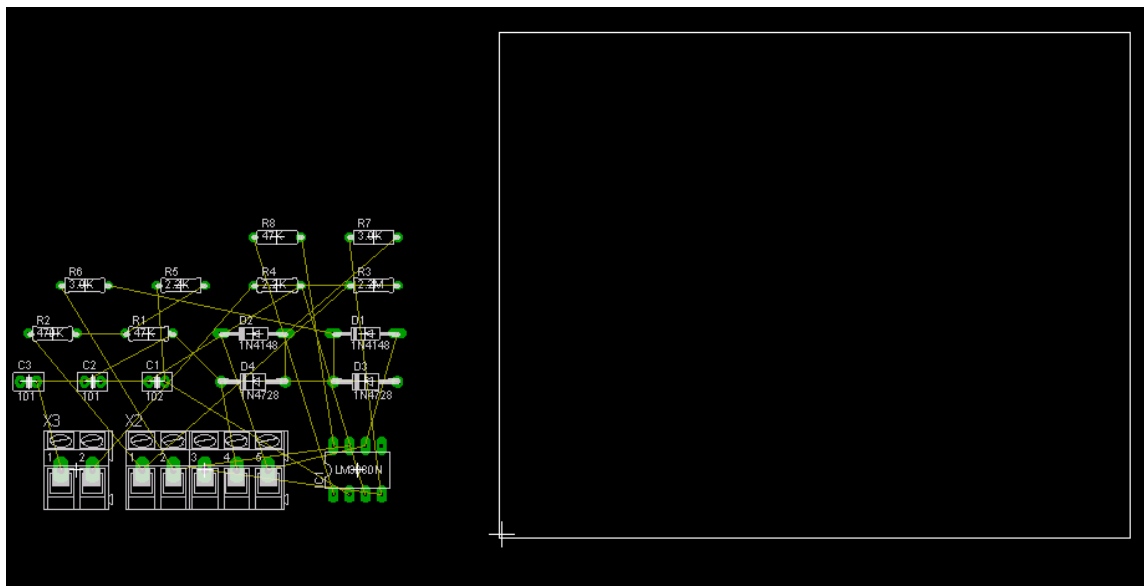


Figura 42. Ambiente de projeto da PCI, em Eagle.

4. Posicionamento dos elementos na placa (figura 43):

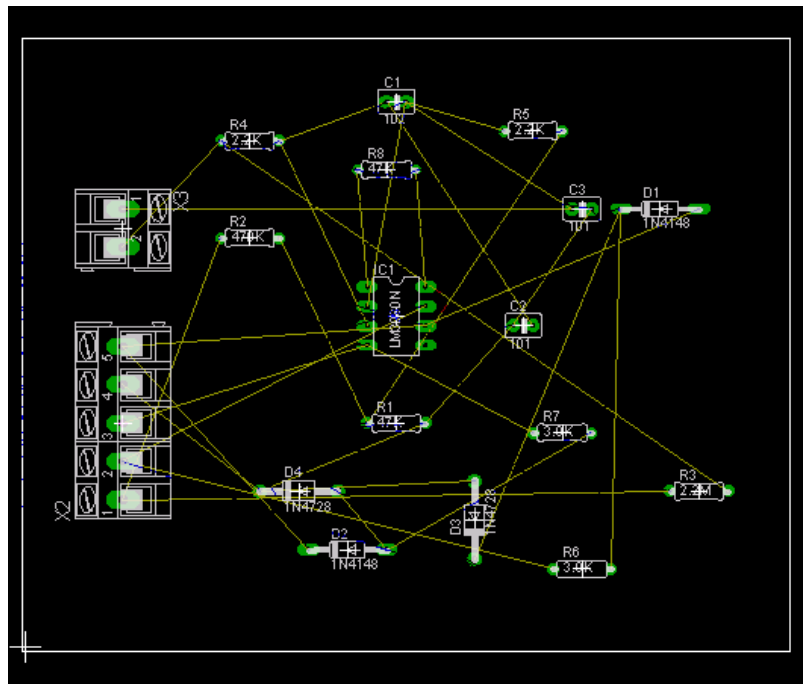


Figura 43. Elementos alocados na PCI, em Eagle.

5. Definição da largura de trilhas e diâmetro de furos;

6. Definição automática do caminho das trilhas (*Ratsnest/Auto*) (figura 44):

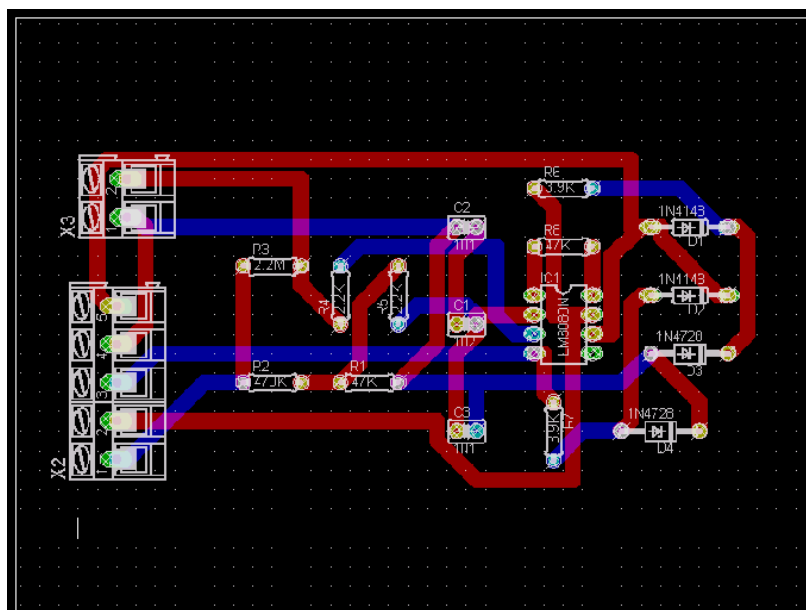


Figura 44. Projeto inicial da PCI, em Eagle.

Após projetada a placa enviamos para a empresa responsável por sua confecção (GIGA Eletrônica Ltda.), obtendo a placa da figura 45.

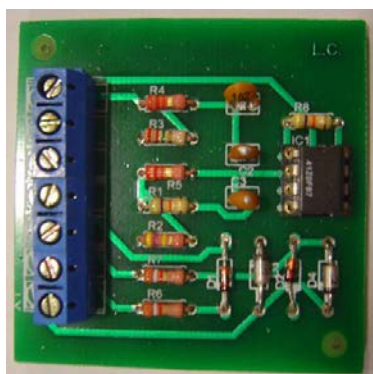


Figura 45. PCI Projetada e Desenvolvida.

3.4.2 – Circuito Digital

A Fig. 46 apresenta o circuito digital desenvolvido em ambiente **MATLAB/Simulink**.

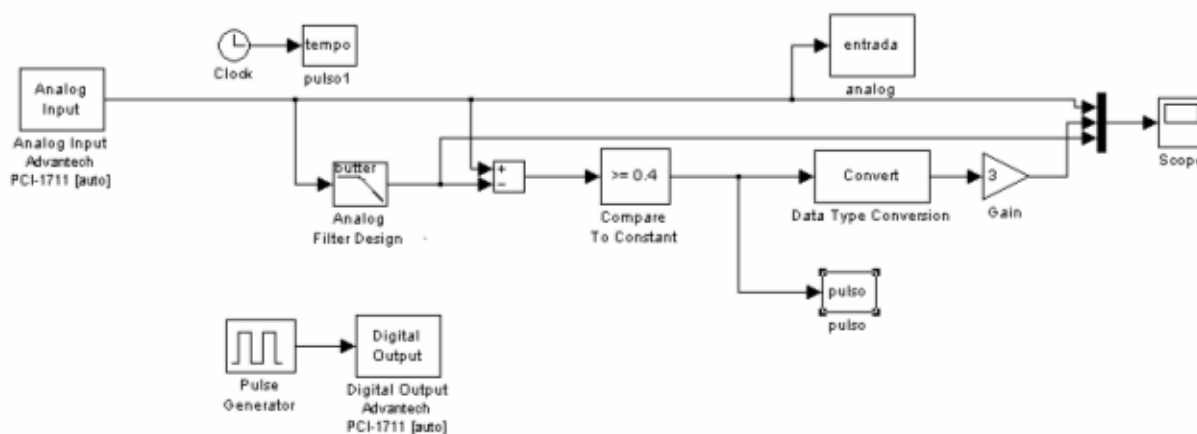


Figura 46. Circuito digital desenvolvido no **MATLAB/Simulink**.

O **software** recebe os dados adquiridos e convertidos pela placa de aquisição (**advantech** PCI-1711, ilustrada na figura 47) e através do algoritmo implementado faz a análise desses dados para determinar o estado atual do sensor: se está imerso na água ou no ar.



Figura 47. Placa de Aquisição de dados PCI-1711 da **Advantech**.

O modelo construído em **Simulink / LabView** foi desenvolvido para se adaptar a variações da resistividade do fluido principal, isto é, caso a resistividade do fluido se altere ao longo da medição, seja por impurezas ou mesmo pela presença de bolhas, o sistema irá usar esse novo valor da resistência como referência padrão e irá determinar a passagem da bolha comparando com esse novo valor. Com isso, também é possível usar o mesmo sistema em fluidos diferentes minimizando a necessidade de ajustes dos parâmetros internos do modelo. A taxa de amostragem utilizada foi de 1ms em tempo real.

A vantagem dessa abordagem é a simplificação do circuito físico que, nesse caso, é responsável apenas pela aquisição do sinal. Desta forma, diminui-se possíveis ruídos presentes no sinal proveniente do sensor, fornecendo uma saída de melhor qualidade. Realizando parte das operações em software obtém-se um sistema mais versátil possibilitando análises mais elaboradas.

A placa de aquisição de dados (**Advantech PCI-1711**) possui canais de entrada analógica com resolução de 12 **bits** e frequência máxima de amostragem de 100KHz. Para explorar este limite da placa, utilizamos o **LabView** no lugar do **Simulink**.

3.4.2.1 – **LabView** [14]

Esta seção objetiva explicar os blocos do **LabVIEW** que foram utilizados e a função de cada um desses blocos no sistema de aquisição de dados implementado.

Primeiramente os **drivers** da placa de aquisição para o **LabVIEW** deverão estar instalados e configurados no MAX. Este procedimento de configuração do MAX é fundamental para que a placa de aquisição possa operar. Mais detalhes sobre a configuração do MAX podem ser encontrados no manual do **LabView**, especificado na bibliografia.

A aquisição de dados é feita através do bloco **DAQ Assistant** que será inserido no menu de diagrama de blocos, conforme ilustrado pela Figura 48. Os passos a seguir

descrevem os procedimentos para a configuração e utilização da placa de aquisição de dados.

Para inserir este bloco no **LabVIEW**, basta selecioná-lo e arrastá-lo para o arquivo do diagrama de blocos novo que será utilizado na montagem.

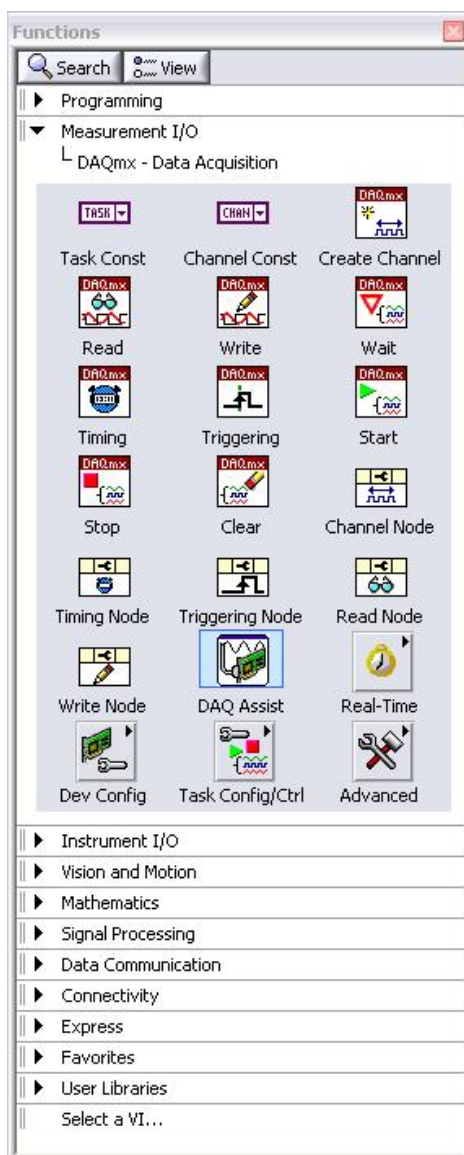


Figura 48. Inserção do bloco **DAQ Assistant** para a aquisição de dados.

Após inserir o bloco **DAQ Assistant** é necessário configurá-lo para que o mesmo possa ser utilizado. A Figura 49 apresenta a janela que aparece inicialmente para a configuração da placa de aquisição de dados, que foi definida para uma aquisição de tensão.

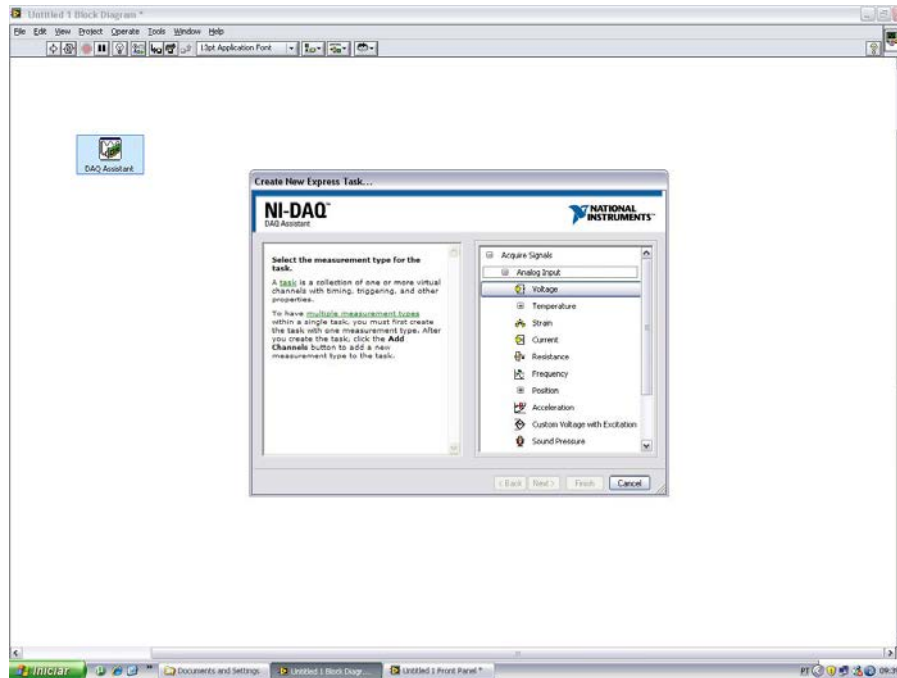


Figura 49. Janela do LabVIEW para a configuração da aquisição de dados.

A Figura 50 apresenta a janela do LabVIEW para a escolha dos canais que serão utilizados pela placa de aquisição. No caso deste trabalho foram usados os canais ai0 e ai1, mas esta definição somente foi feita na etapa seguinte.

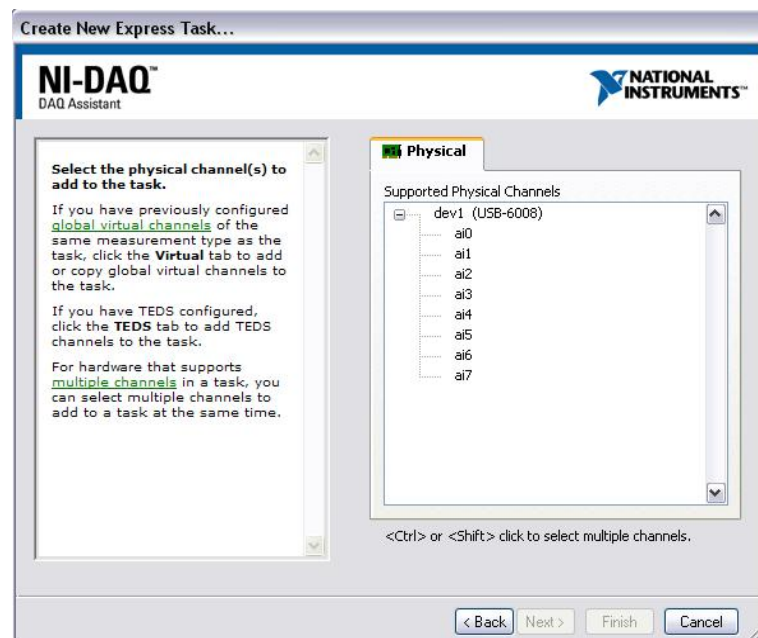


Figura 50. Escolha dos canais a serem usados pela placa de aquisição.

Após definir ai0 como canal de entrada analógica, aparecerá a janela apresentada na Figura 51. Nesta janela é possível realizar configurações como: ajustar a faixa de valores a serem medidos (**range**), inserir fatores de escala, escolher a taxa de amostragem, incluir novos canais a serem lidos, arbitrar se a entrada irá operar em modo comum ou diferencial, definir o número de amostras que será aquisitado etc..

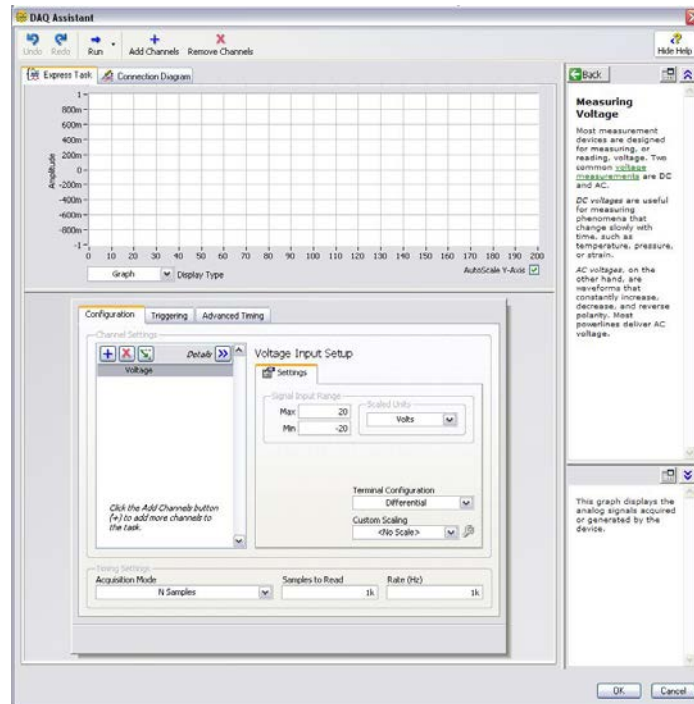


Figura 51. Configuração da placa de aquisição.

Na palheta **connection diagram** é possível verificar como deve se feita a conexão dos fios na borneira da placa de aquisição para a entrada utilizada, como mostra a Figura 52.

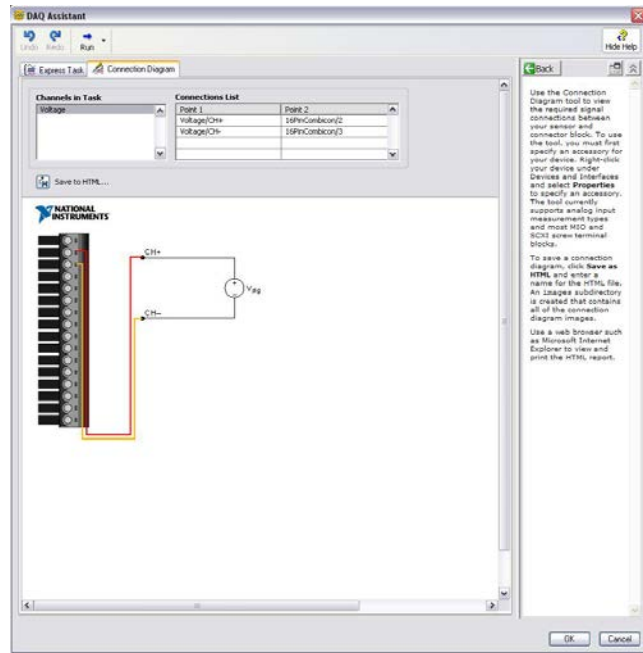

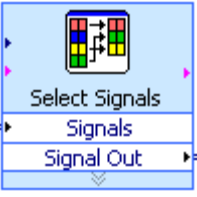
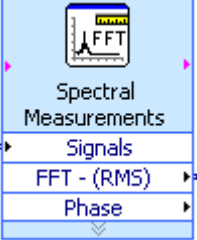



Figura 52. Ilustração no **LabVIEW** da conexão elétrica do canal utilizado.

A tabela 1 apresenta um resumo de todos os blocos do **LabVIEW** que foram utilizados neste trabalho.

COMPONENTE	NOME	FUNÇÃO
 <p>DAQ Assistant data</p>	DAQ Assistant	Realiza a aquisição dos dados para o programa.
 <p>Select Signals Signals Signal Out</p>	Select Signals	Realiza a seleção de sinais entre os dados aquisitados (equivalente ao DEMUX).
 <p>Spectral Measurements Signals FFT - (RMS) Phase</p>	Spectral Mesuraments	Decompõe o sinal na série de Fourier e realiza sua decomposição espectral.
	Butterworth Filter	Filtro definido para 2ª ordem com frequência de corte de

		20 Hz.
	Absolute Value	Fornece o módulo do sinal de entrada.
	Subtract	Realiza a subtração entre dois valores.
	Divide	Realiza a divisão entre dois valores
	Greater or Equal	Realiza a comparação (maior ou igual) entre dois sinais e fornece uma resposta booleana.
	Convert from Dynamic Data	Converte um sinal em um array.
	Wave form Graph	Mostra os sinais na tela
	Write to Spreadsheet File	Exporta os dados para um arquivo
	Harmonic Distortion Analyzer	Decompõe o sinal na série de Fourier e indica a frequência fundamental e THD

Tabela 1. Blocos do **LabVIEW** que foram utilizados.

Uma vez que os sinais foram lidos e selecionados, o primeiro tratamento é garantir que os sinais são positivos (pois a resistência é inerentemente positiva), posteriormente, os sinais são transformados em **array** para poderem ser filtrados. O filtro ameniza os ruídos dos sinais, fornecendo um sinal que será comparado com o sinal não filtrado.

Testes no Laboratório de Mecânica da Turbulência (COPPE/UFRJ) [27] determinaram que quando a diferença entre o sinal não filtrado e o sinal filtrado é maior que 0,4V há um forte indício da passagem de uma bolha pelo sensor, esta operação é realizada pelo bloco de diferenças e pelo bloco comparador (maior ou igual).

A saída deste bloco é um sinal booleano, configurado como 0, quando a saída é menor que 0,4V (não há passagem de bolha), ou 1 quando a saída é maior que 0,4V (há a passagem de bolha).

Finalmente realizando a diferença entre os sinais booleanos dos sensores pode-se determinar a diferença de tempo entre a passagem da bolha nos sinais, e sabendo sua distância (0,8 mm neste caso) determinamos sua velocidade.

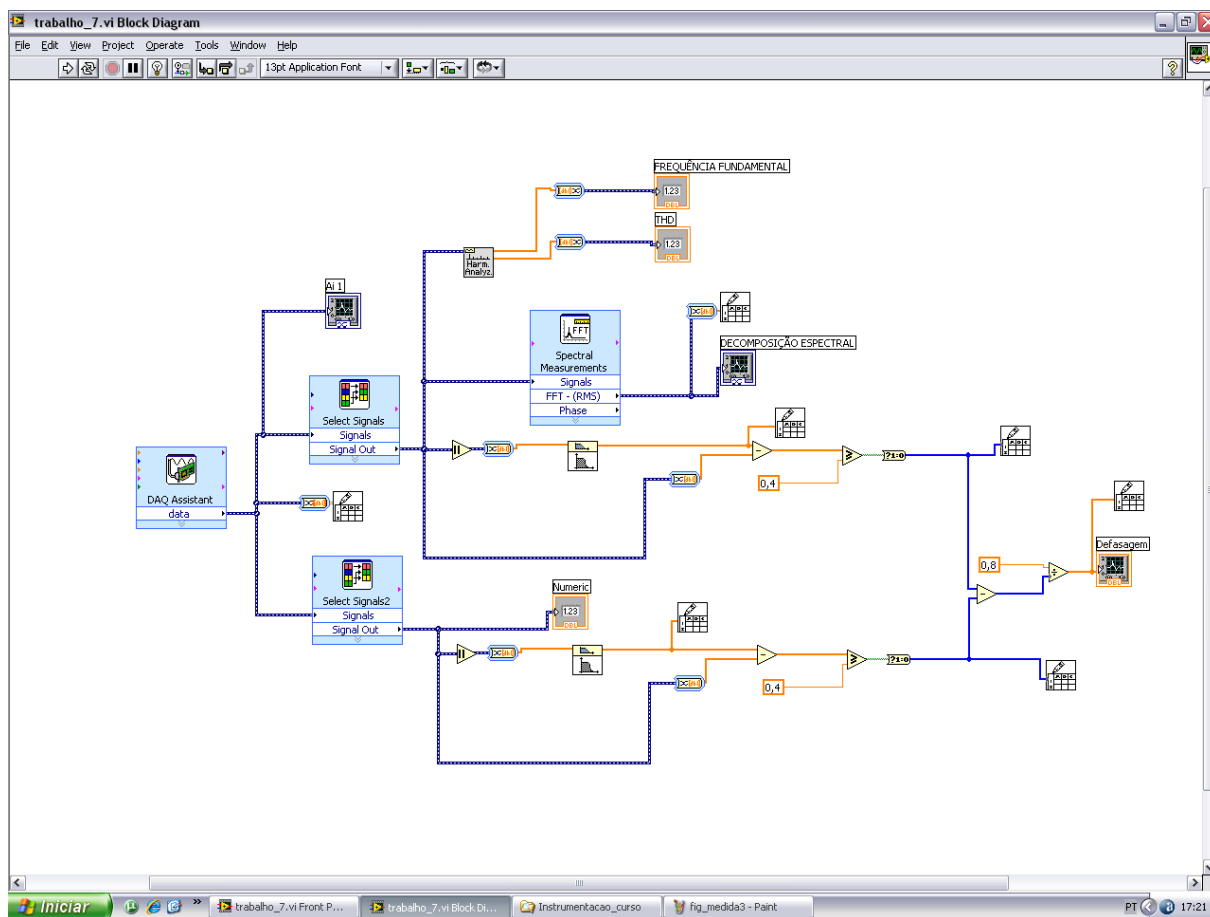


Figura 53. Diagrama de bloco no **LabVIEW** da conexão elétrica do circuito implementado.

3.4.3 – Análise dos Resultados

3.4.3.1 – Resultados no Simulink

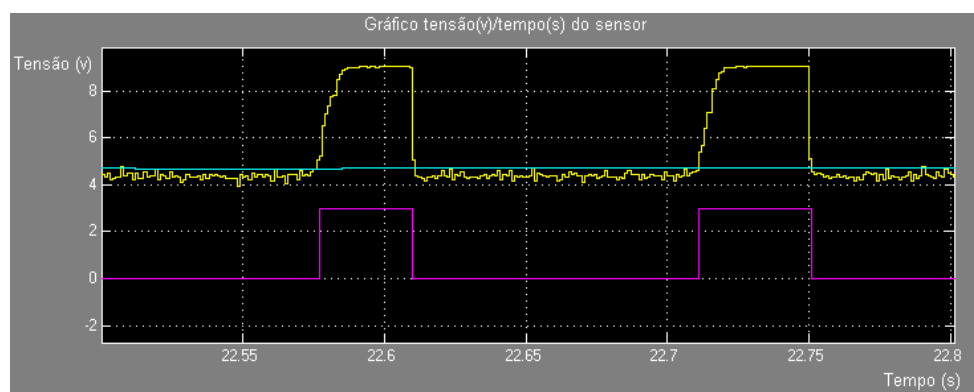
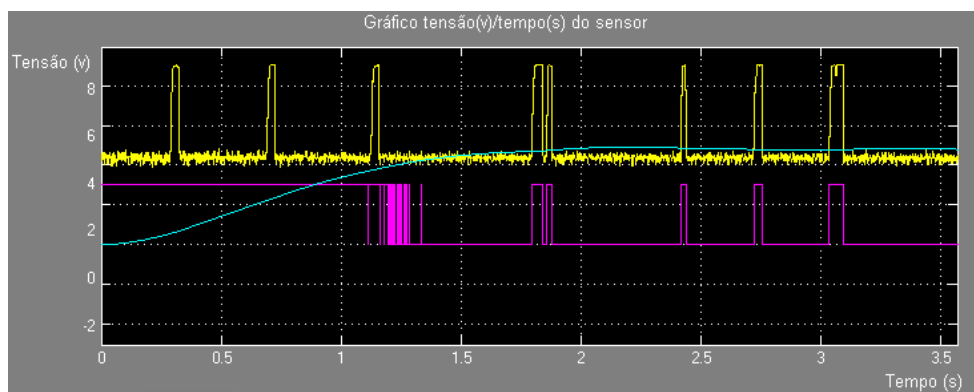
O modelo construído no **Simulink** apresenta três gráficos: sinal proveniente do circuito analógico, resultado direto da variação de corrente do circuito devido às mudanças da resistividade do meio; o sinal do filtro, este deve ser lento o bastante para que seu valor não se altere de forma significativa com as mudanças de fase do sistema, mas deve se adaptar rapidamente a mudanças da resistividade do fluido; e o gráfico da detecção da

passagem da bolha através do sensor, o tempo de exposição do sensor a esta nova fase é o tempo em que a forma de onda se encontra em nível alto.

A Fig. 54 apresenta os gráficos resultantes da análise digital, podemos observar o tempo de ajuste do filtro, em torno de 1,5 segundos, a partir desse momento o sistema começa a detectar corretamente a mudança de fase do sistema.

Também está destacado o gráfico referente a duas mudanças de fase detectadas pelo sensor, nota-se que existe uma curva de subida, isso se deve ao tempo em que o sensor está secando dentro da bolha de ar. Após a passagem da bolha o sinal decresce quase instantaneamente, pois o sensor está novamente imerso na água.

O sinal obtido do sistema de medição eletro-resistivo apresenta uma forma de onda próxima a uma onda quadrada, a curva de ascensão dessa onda ocorre devido ao tempo que a ponta do sensor demora para secar dentro da bolha de ar. Este problema e outros serão abordados mais adiante.





(c)

Figura 54. Gráfico do circuito digital (a), destaque para a detecção de uma mudança de fase (bolha) (b) e legenda (c).

Este tipo de sensoriamento tem a vantagem de poder ser aplicado em outros fluidos que possuam mais de uma fase, se essas fases apresentarem resistências elétricas diferentes e consideráveis. O sistema irá se adaptar a nova resistividade natural do meio e detectará a passagem da outra fase.

3.4.3.2 – Resultados no *Labview*

i) Bolha simples (sem turbulência)

Utilizando apenas uma bolha, gerada a partir de uma seringa, foram obtidos os dados em dois sensores (Figura 55) defasados verticalmente. Conhecendo a distância entre os sensores e a diferença de tempo entre a captação de bolha pelo primeiro e pelo segundo sensor, determinamos facilmente a velocidade da bolha.

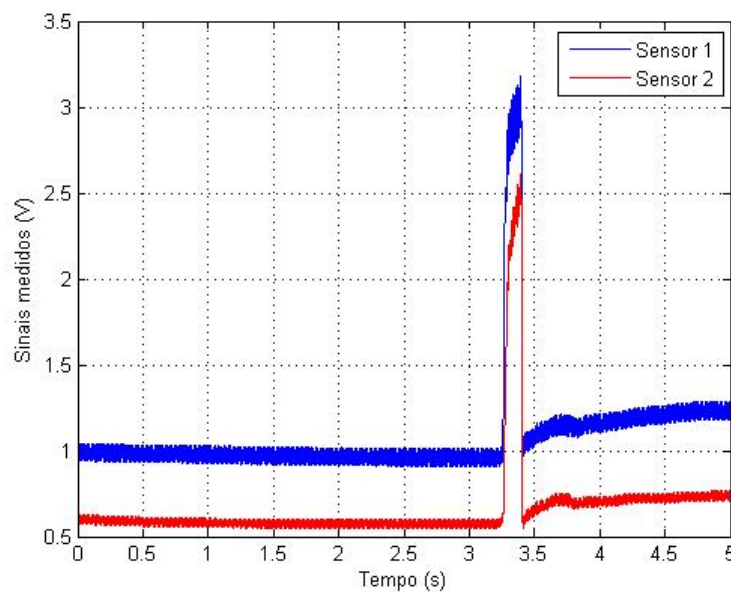


Figura 55. Sinais lidos pela passagem de uma única bolha.

Tais dados foram filtrados para diminuir os ruídos inerentes à medição (Figura 56) e posteriormente foram convertidos em sinais lógicos (Figuras 57 e 58).

Os sinais lógicos serão utilizados no cálculo da velocidade sendo importantes apenas seus momentos de transição de estado, e não suas amplitudes.

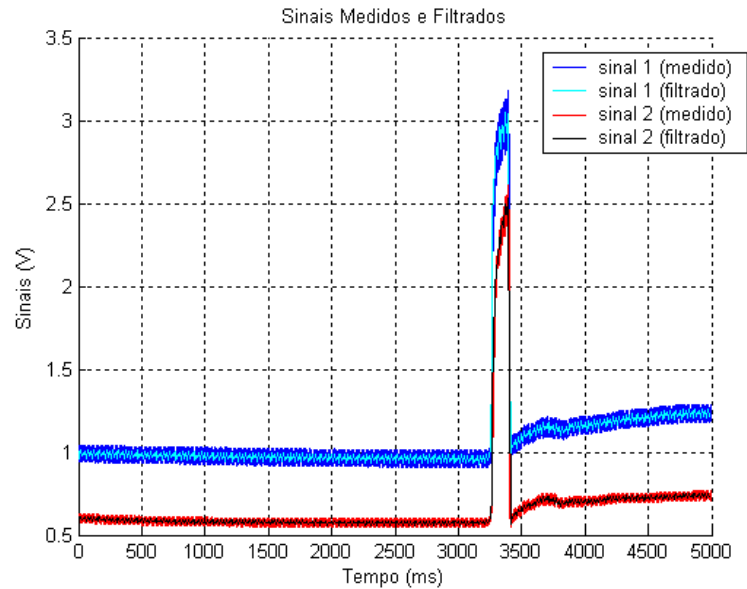


Figura 56. Comparação entre sinais medidos e filtrados.

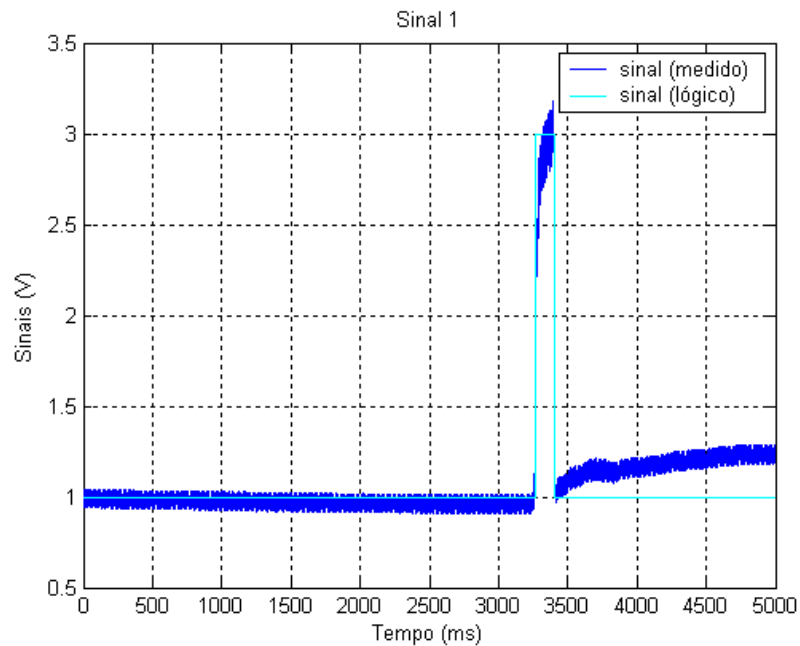


Figura 57. Comparação entre sinal 1 medido e lógico.

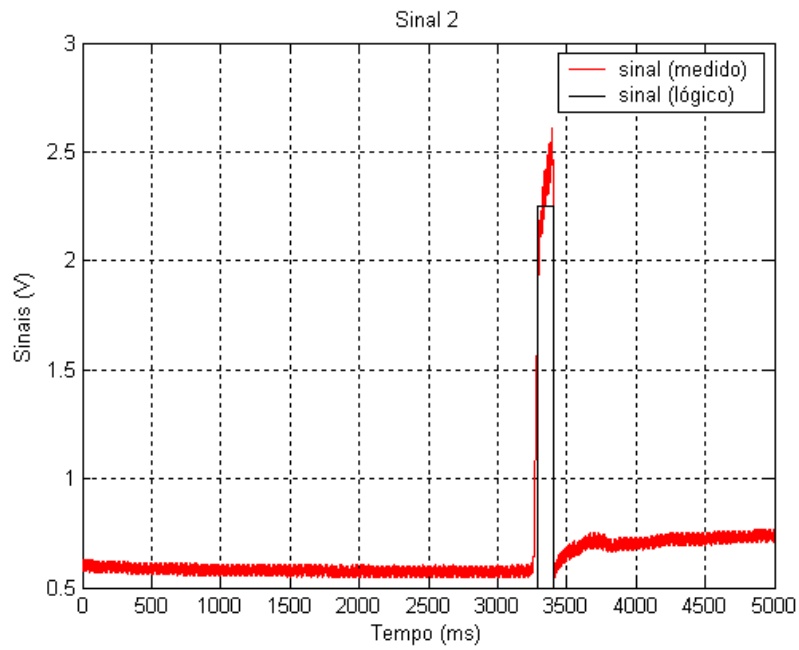


Figura 58. Comparação entre sinal 2 medido e lógico.

Através dos sinais lógicos pode-se determinar a diferença de tempo entre a passagem da bolha em cada um dos sensores (Figura 59), e sabendo que a distância entre os dois sensores é de 0.8mm (neste caso em particular) pode-se calcular a velocidade da bolha.

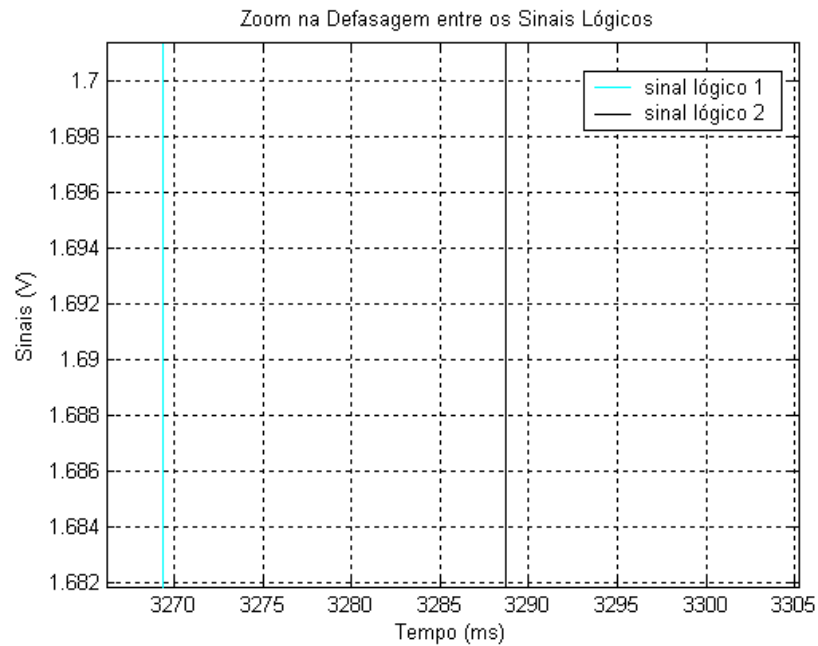


Figura 59. Defasagem entre os sinais lógicos 1 e 2.

Cálculo da velocidade da bolha a través da equação 9:

$$V = \Delta S / \Delta t \quad (\text{Equação 9})$$

$$V = (0.8 \times 10^{-3}) / ((3.288 - 3.268))$$

$$V = 0.040 \text{ m/s}$$

Para estudos futuros, o sinal 1 foi decomposto em seu espectro de frequência (Figuras 60 e 61).

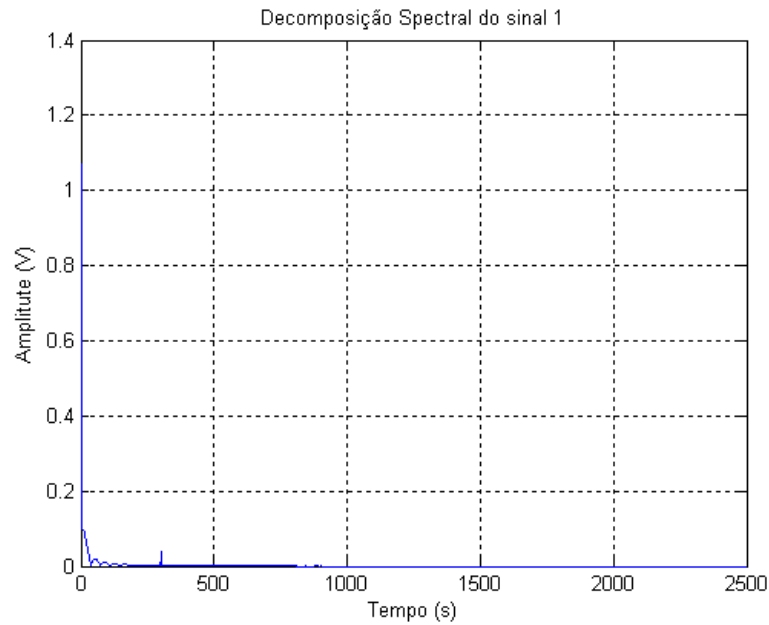


Figura 60. Decomposição espectral do sinal 1.

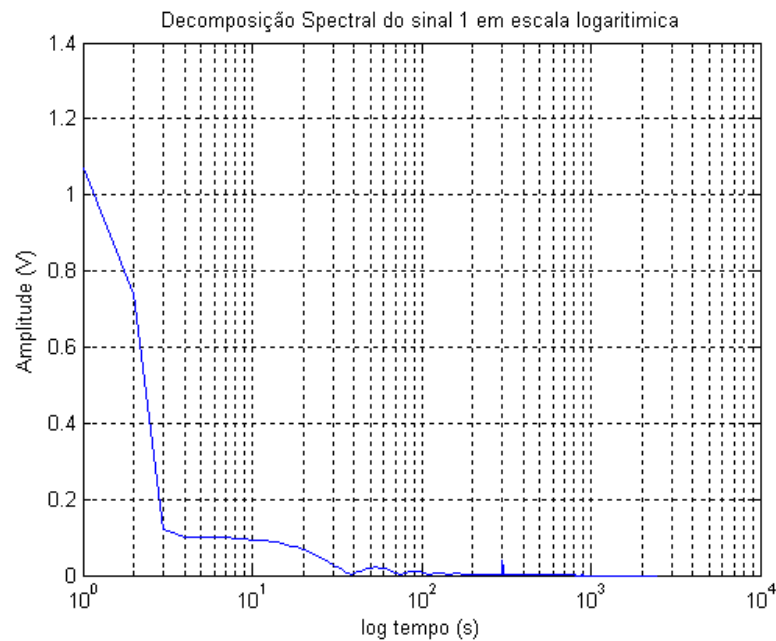


Figura 61. Decomposição espectral do sinal 1 em escala logaritmica.

O **LabView** forneceu a freqüência fundamental e o THD do sinal 1 durante a simulação (Figura 62) fornecendo os seguintes valores:

$$\text{THD}=2,289$$

$$f =0,4777$$

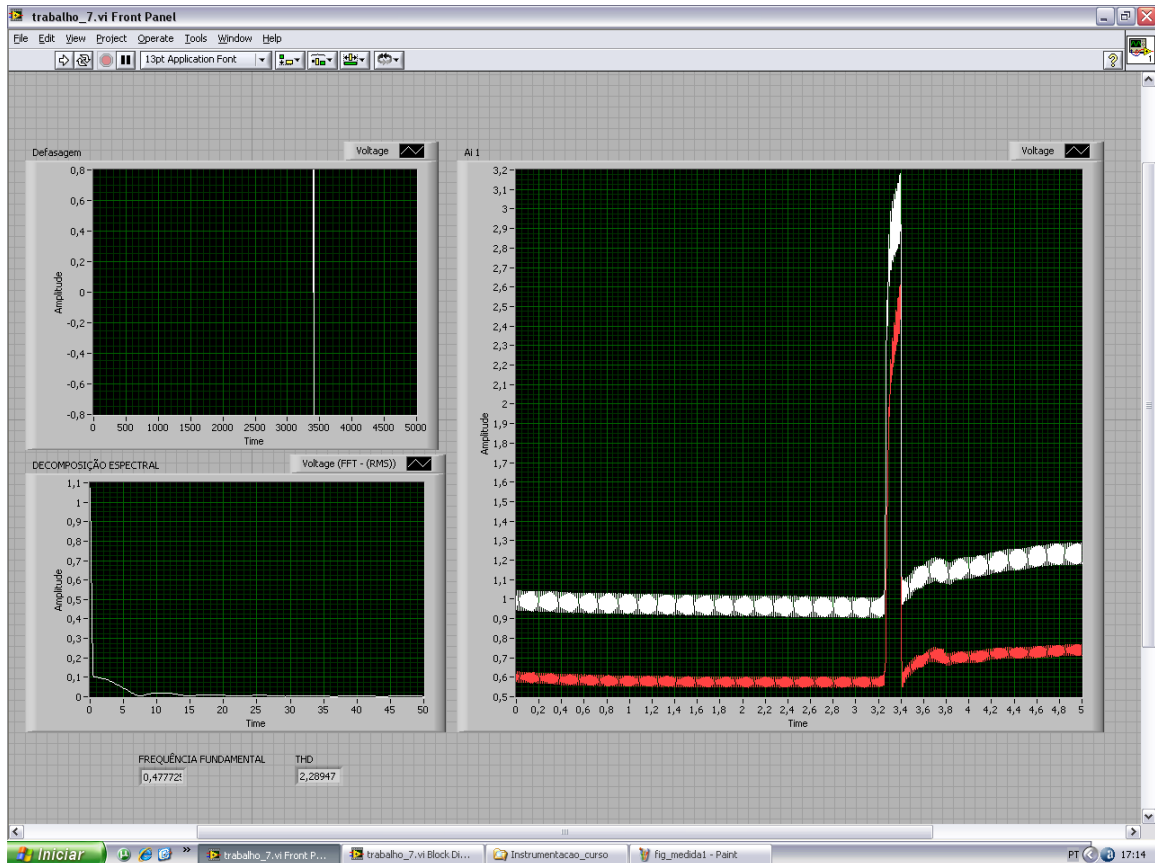


Figura 62. Tela de interface do programa **LabView**.

ii) Bolhas em Regime Turbulento

Nesta segunda etapa repetiram-se os procedimentos adotados no item “i” anterior para diversas bolhas (geradas por um nebulizador), podendo-se considerar o regime como turbulento. A proposta é colher os dados e calcular o THD e fornecer a decomposição spectral dos sinais.

Através dos dados de ambos os sensores obteve-se a Figura 63.

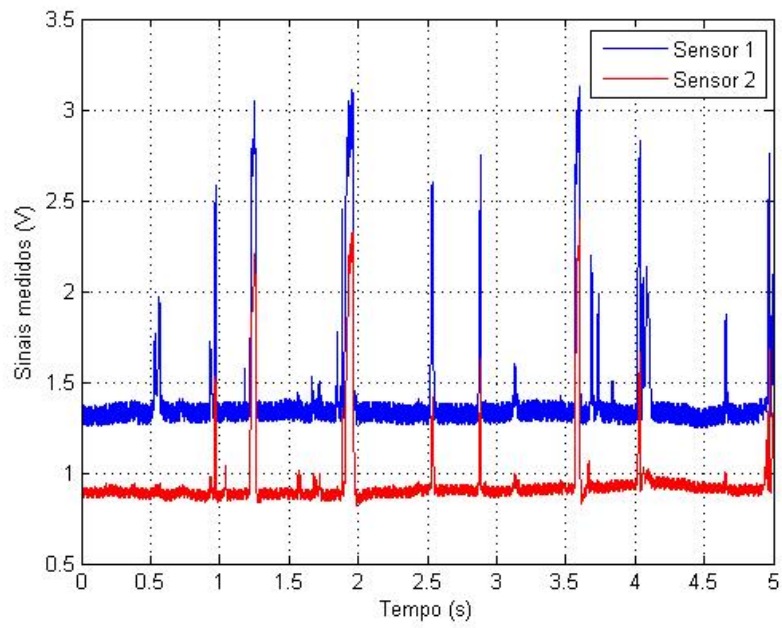


Figura 63. Sinais obtidos na passagem de diversas bolhas (regime turbulento).

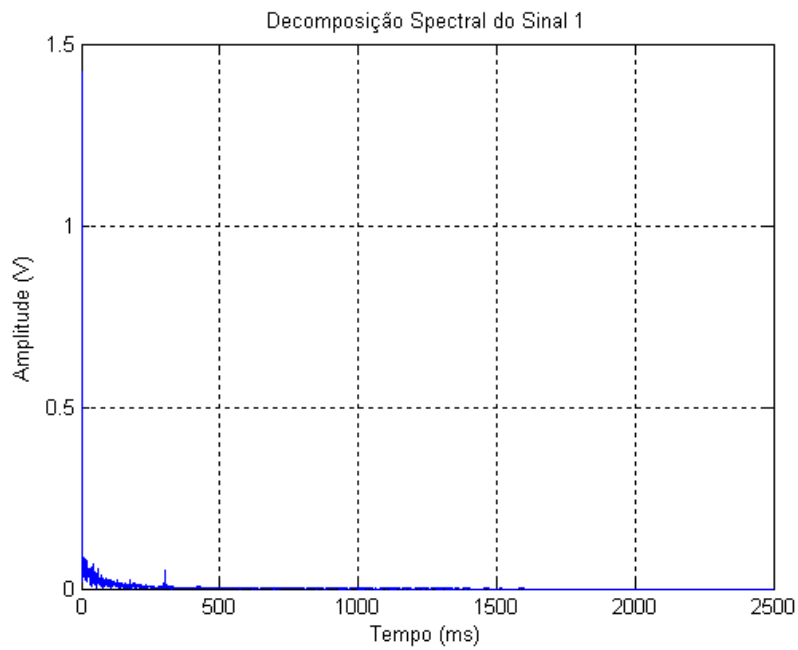


Figura 64. Decomposição espectral do sinal.

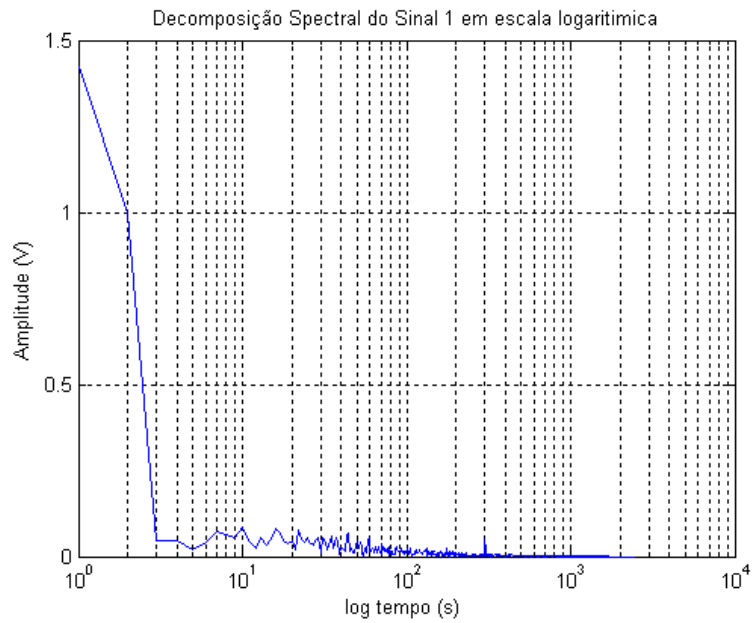


Figura 65. Decomposição espectral do sinal 1 em escala logaritmica.

O **LabView** forneceu a frequência fundamental e o THD do sinal 1 durante a simulação (Figura 66) fornecendo os seguintes valores:

$$\text{THD}=1,73 \quad \text{e} \quad f=1,76$$

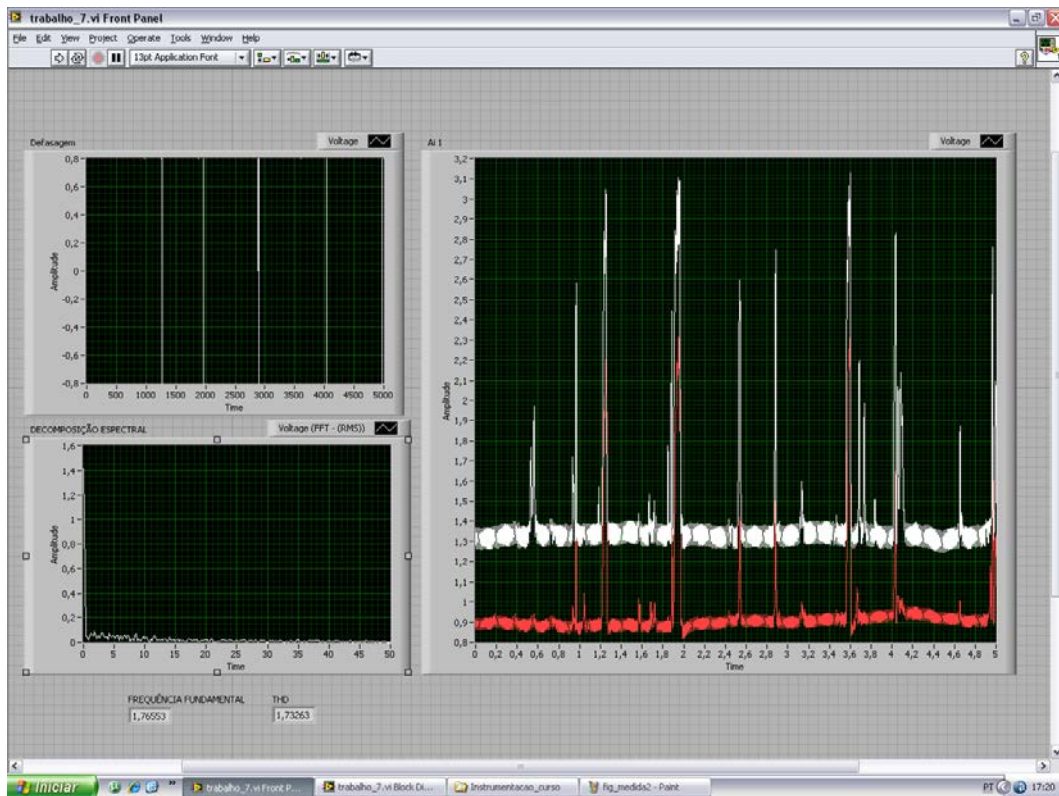


Figura 66. Tela de interface do programa **LabView**.

3.5 – Construção do Sensor

O sensor eletro-resistivo pode ser contruído de diferentes maneiras. Em uma delas, o sensor é composto de agulha de aço inox (agulha de acupuntura, por exemplo) revestida com material isolante e impermeável (Teflon e Resina Epoxi), deixando apenas a ponta exposta, conforme é mostrado no esquema da Fig. 67. Alguns dos sensores criados podem ser observados na figura 68.

É importante mencionar que tanto a agulha quanto o suporte devem possuir dimensões reduzidas para minimizar a sua influência no escoamento.

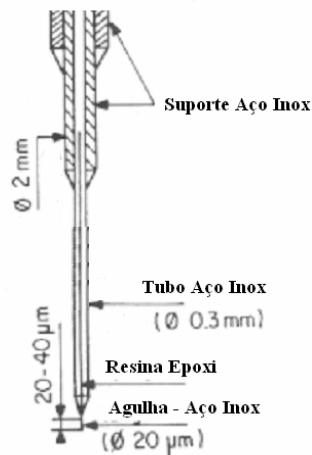


Figura 67. Esquema de construção de sensor.

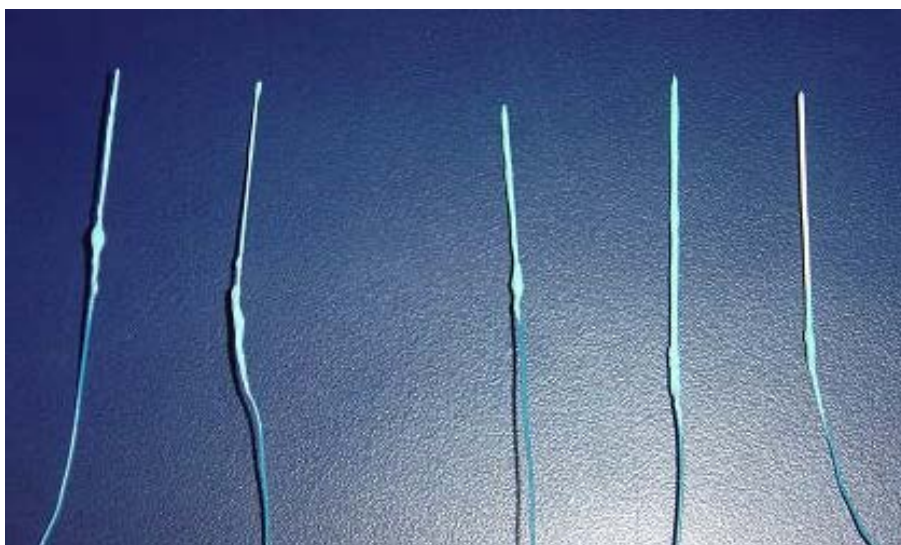


Figura 68. Sensores construídos no Laboratório de Mecânica da Turbulência [27].

Outra opção é utilizar como sensor fios usados como enrolamento de transformadores, que podem ser facilmente encontrados no mercado e já vem devidamente isolados. Para obtermos uma ponta condutora, basta realizarmos um corte em uma das extremidades do fio que o mesmo conduz por sua seção. Na figura 69 apresentamos alguns tipos de agulhas que podem ser utilizadas como sensor.

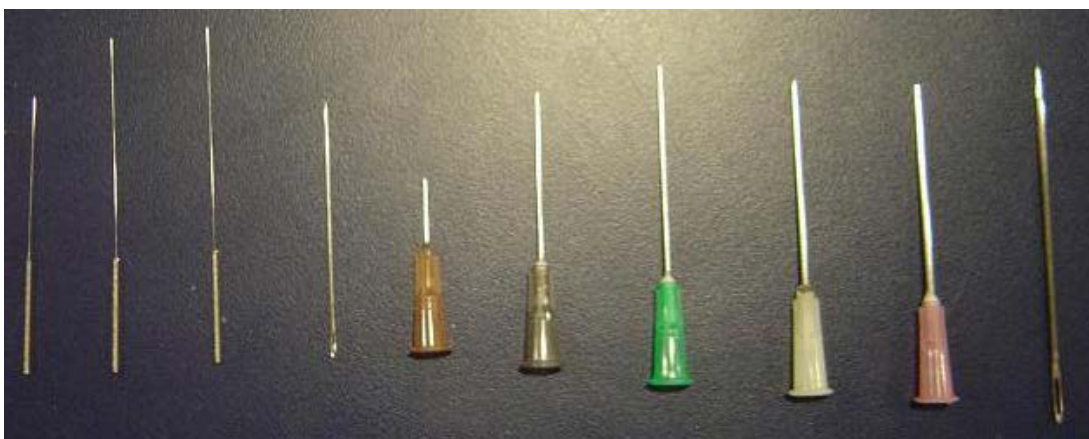


Figura 69. Alguns dos tipos de agulhas que podem ser usados na confecção do sensor eletro-resistivo (acupuntura, injeção, tatuagem, **piercing**, costura etc.).

Para medirmos a velocidade de subida de bolhas, por exemplo, basta alocarmos dois desses sensores, defasados verticalmente, conforme se pode observar na figura 70.

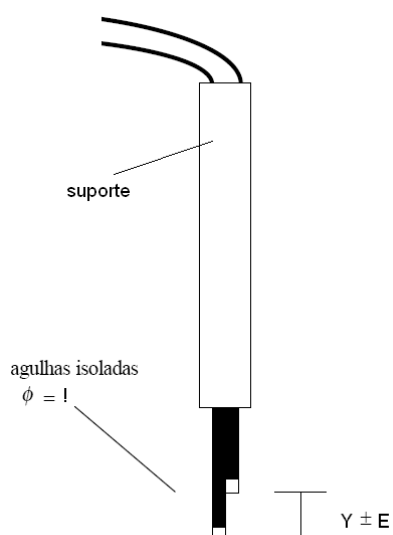


Figura 70. Ilustração de acoplamento de sensores para medição de velocidade.

3.5.1 – Retorno do Sensor

O retorno do circuito do sensor é feito por um fio imerso no tubo de vidro, como pode ser verificado pela Fig.36. Para melhorar a condutividade esse fio foi posteriormente fixado em um anel condutor (figuras 71 e 72) para manter uma constante superfície de contato com o fluido, evitando medidas falsas do sensor. Outra possibilidade é usar como retorno a própria haste metálica usada como suporte para o sensor (figura 73). Desta forma, podemos inclusive fazer medições em um tanque, por exemplo.



Figura 71. Retorno por anel condutor.



Figuras 72 e 73. Retorno por anel condutor (em zoom, à esquerda) e retorno pela haste metálica (à direita).

3.5.2 – Posicionamento do Sensor

Para um adequado posicionamento do sensor, e conseqüentemente estudarmos com precisão diversos pontos em um escoamento, fizemos uso de 3 posicionadores lineares de precisão (Sigma Koki), garantindo posicionamento tridimensional do sensor.



Figura 74. Posicionadores Lineares Sigma Koki.

O programa de controle dos posicionadores utilizados foi desenvolvido em **LabView** e fornecido pela própria Sigma Koki.

Na figura 74 pode-se observar alguns dos posicionadores Sigma Koki.

3.6 – Problemas com os Sensores Resistivos

A característica do sinal **on/off** causada pela passagem de bolhas nos sensores, após tratamento adequado, pode revelar propriedades relevantes da bolha, como o tamanho e a velocidade de bolhas, que têm sido determinados em aplicações científicas e industriais. Além disso, a técnica é de simples funcionamento e baixo custo para implementação de

todo aparato de medição. Porém, infelizmente, existem algumas dificuldades na interpretação do sinal oriundo dos sensores [15] e [16].

Por ser uma técnica intrusiva, temos que estar atentos a alguns problemas existentes na utilização desta técnica de medição, como por exemplo a influência do sensor nas condições do escoamento.

3.6.1 – Problemas com os Sensores Resistivos de 1 Canal

No caso estudado (escoamento bifásico ar-água), o sensor deve ter dimensões pequenas o suficiente para influenciar o mínimo possível nas condições do escoamento (forma das bolhas, trajeto etc..) e ao mesmo tempo deve ser rígido o suficiente para não ser deslocado pela própria força do escoamento.

Na figura 75 ilustro alguns dos problemas existentes.

- 1. Distorção da Bolha :** O sensor deve ser fino, de forma a deformar o menos possível a bolha. A deformação de uma interface quando próxima a um sensor induz um atraso entre a ocorrência e a detecção do evento.
- 2. Deflexão Parcial:** Do mesmo modo que antes, aqui podemos medir erroneamente a bolha, achando que o sensor atingiu sua linha central, quando na verdade a bolha foi defletida e o sensor detectou uma corda ao invés do diâmetro, por exemplo.
- 3. Deflexão Total:** Neste caso, o sensor não detectará a bolha, pois toda ela foi defletida devido ao choque com o sensor.
- 4. Ruptura:** Do mesmo modo, o sensor não detectará a passagem da fase gasosa.

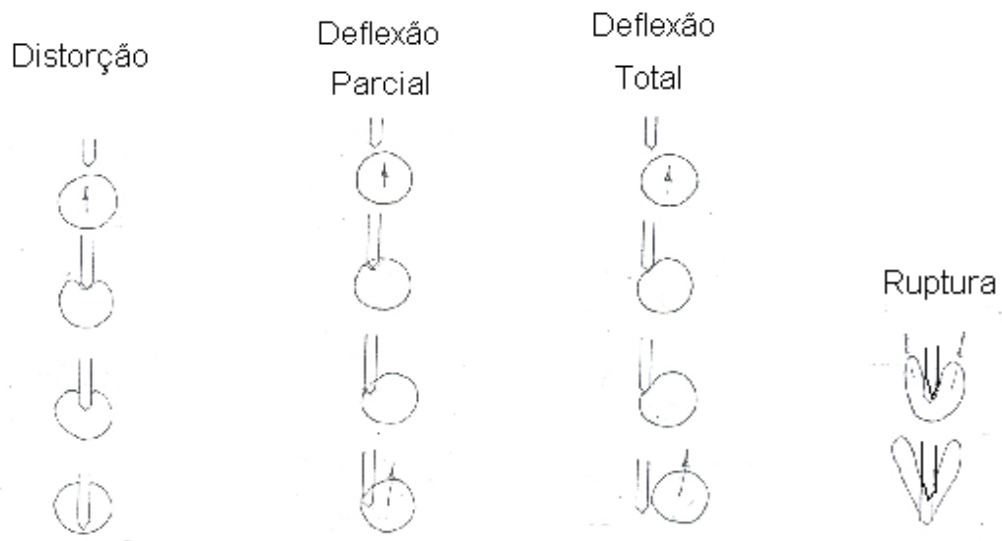


Figura 75. Alguns dos Problemas com Sensores de um Canal.

5. **Filme de Líquido Remanescente** : O sinal obtido do sistema de medição eletro-resistivo apresenta uma forma de onda próxima a uma onda quadrada, a curva de ascensão dessa onda ocorre devido ao tempo que a ponta do sensor demora para secar dentro da bolha de ar. Apenas após a drenagem completa do filme de líquido, uma amplitude completa do sinal é obtida, conforme podemos observar na figura 54b.

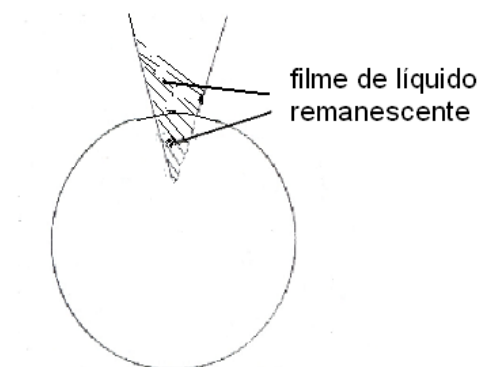


Figura 76. Ilustração do filme de líquido remanescente.

3.6.2 – Problemas com os Sensores Resistivos de 2 Canais

Com os sensores de dois canais também precisamos ter alguns cuidados.

Caso tenhamos um escoamento com bolhas menores do que o diâmetro da tubulação, por exemplo, uma bolha pode tocar a ponta do sensor inferior e antes de que esta alcance o sensor superior, uma outra bolha pode fazê-lo. Desta forma, o cálculo da velocidade nos dará um valor superior ao real. Também pode acontecer do sensor inferior detectar uma bolha, porém esta tomar outra direção e não atingir o sensor superior. Uma bolha pode tocar o segundo sensor e não o primeiro. Esses casos são ilustrados na figura 77.

Uma bolha pode tocar o primeiro sensor e também o segundo, porém após um deslocamento inclinado, resultando num valor incorreto de velocidade vertical. Além disso, mesmo que o deslocamento da bolha seja vertical perfeito, como os sensores estão deslocados também na horizontal, eles detectarão diferentes cordas da bolha, como pode ser visto na figura 78.

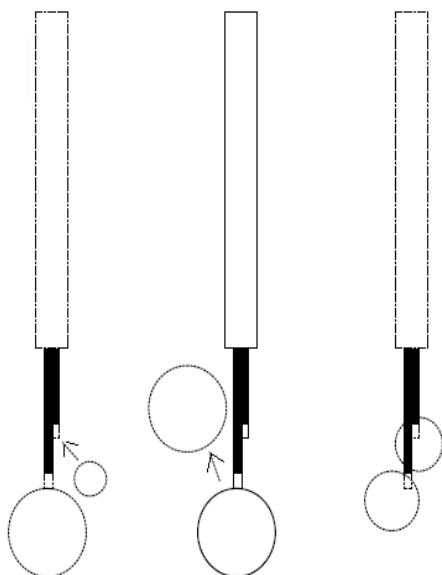


Figura 77. Ilustração de possíveis problemas em medições com sensores de 2 canais.

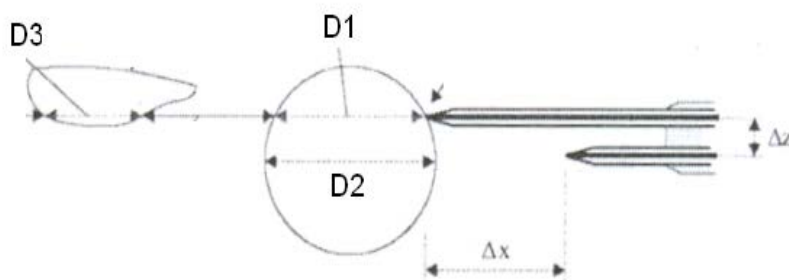


Figura 78. Ilustração de possíveis problemas em medições com sensores de 2 canais.

3.7 – Análise de Incerteza

O objetivo desta seção é diagnosticar quão distante do valor real estão os dados obtidos pelos sensores. Para isto, tomamos como valores reais os obtidos através de uma câmera de alta velocidade e alta resolução (**Shadow Sizer**), juntamente com **software** da Dantec (Ver figura 79).

Neste, eliminamos as situações indesejadas, conforme explicadas no item 3.6, da nossa base de dados. Para isso utilizamos do critério de seleção de Lewis & Davidson [17], que visa excluir da análise estatística bolhas dotadas de velocidade radial significativa.

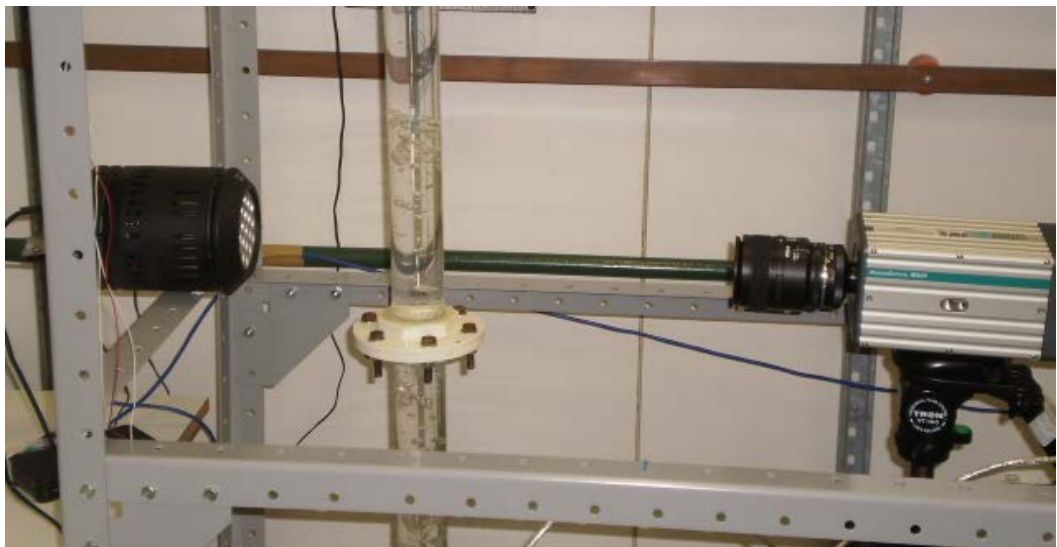


Figura 79. Medição com **Shadow Sizer** e Eletro-resistivo.

Tentou-se reproduzir diversas vezes as condições de escoamento (mesma temperatura, método de injeção de gás, água parada, mesma ponto a ser medido etc.) com diferentes geometrias de sensores, a fim de comparar as mesmas e tentar diagnosticar a melhor geometria a ser empregada em nossa condição.

A seguir as figuras com possíveis geometrias a serem analisadas:

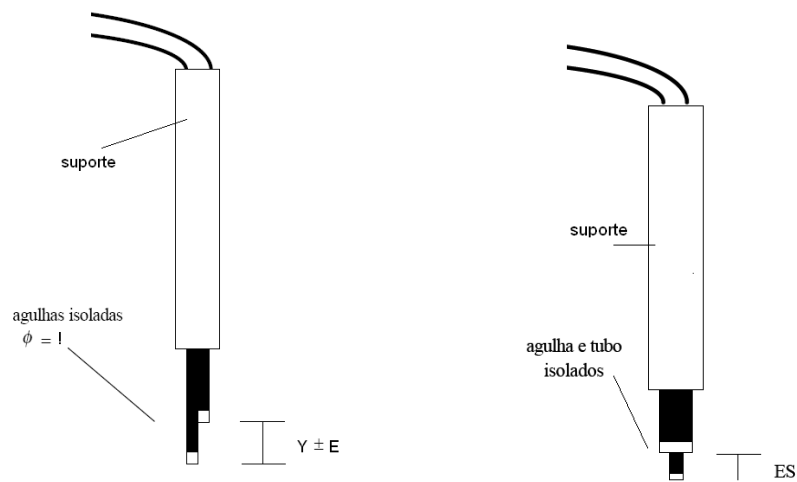


Figura 80. Sensor Paralelo (à esquerda) e Coaxial (à direita).

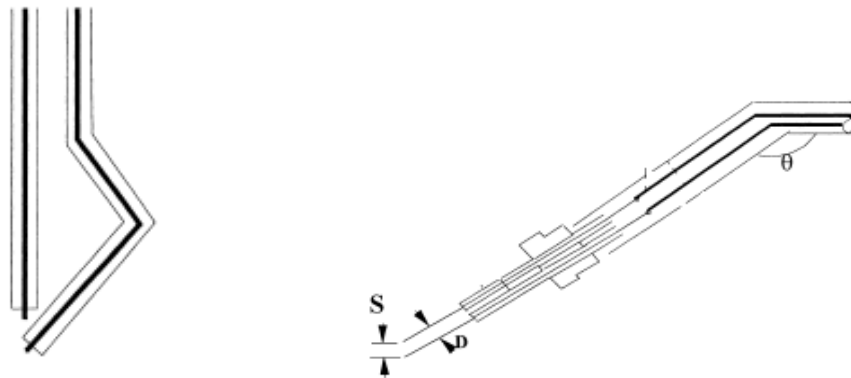


Figura 81. Um sensor na vertical e um inclinado (à esquerda) e dois inclinados (à direita).

Tentamos construir algumas geometrias (Ver figuras 82, 83 e 84), mantendo o comprimento da ponta exposta o mínimo possível, o diâmetro da agulha 0.3mm e o diâmetro de cada sensor 0.7mm. Variamos a geometria utilizada e a distância entre as pontas.

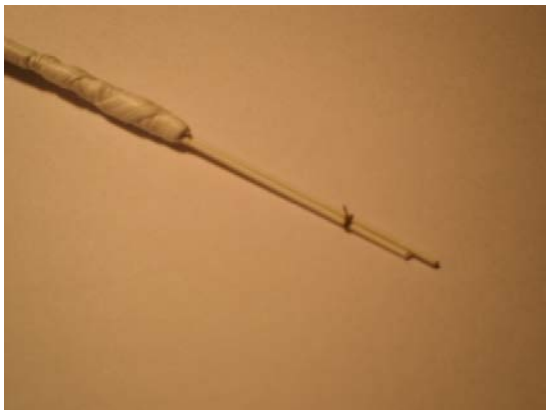


Figura 82. Sensor em paralelo utilizado.

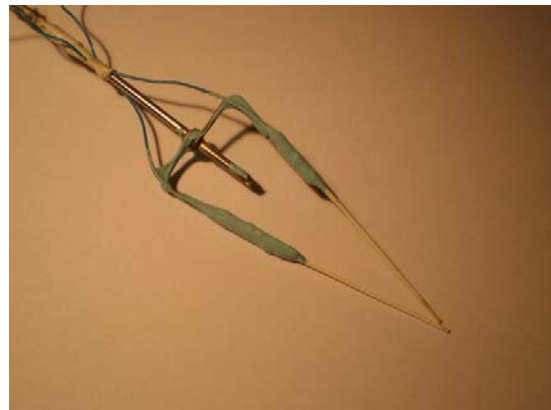


Figura 83. Sensor inclinado utilizado.



Figuras 84. Um sensor vertical e um inclinado dentro da coluna de teste.

3.7.1 – Sincronização entre os Dados do Programa e a Câmera

Conforme citado anteriormente, utilizamos uma câmera de alta velocidade e alta resolução (**Shadow Sizer**) para compararmos com os resultados gerados por nossos sensores. Para sincronizarmos o tempo obtido pelo software associado ao sensor com o tempo do vídeo, utilizamos a princípio um **led** (Ver figura 38).

Pode-se observar o circuito de disparo do **LED** (figura 46), programado para disparo após 2 segundos de operação. Esse tempo é necessário para que o filtro já esteja ajustado, pois a constante de tempo do filtro deve ser lenta para sofrer menos influência das mudanças de fases.

Mais tarde o **led** foi substituído por um contador, também disparado pelo **simulink**. Este tem a mesma finalidade do **led**, além de ser útil na calibração das medidas de velocidade da fase gasosa.

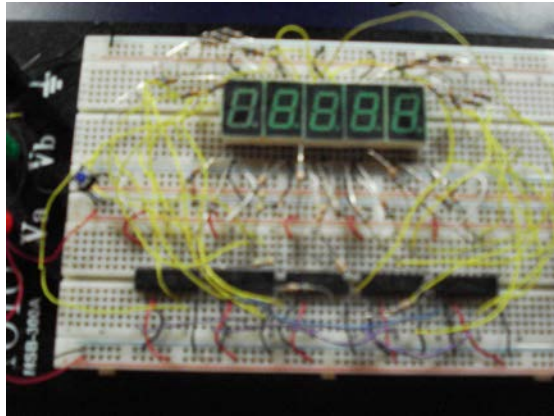


Figura 85. Contador Desenvolvido.

Após testado e aprovado, uma PCI foi projetada (Ver figura 86) seguindo os mesmos passos do item 3.4.1.1., reduzindo falhas por conta de fios não conectados ou mal contato.

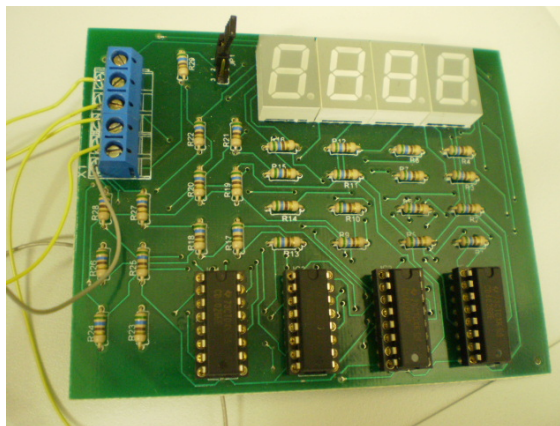


Figura 86. PCI do Contador Desenvolvido.

3.7.2 –Obtenção das Imagens

De forma a garantir uma imagem de qualidade, reduzindo o efeito de **Parallax**, pesquisamos sobre um material com índice de refração próximo ao da água. Esse material é conhecido como FEP (**Fluorinated Ethylene Propylene** - Etil-propileno Fluoretizado) [29], que podem ser visualizados nas figuras 87 e 88.

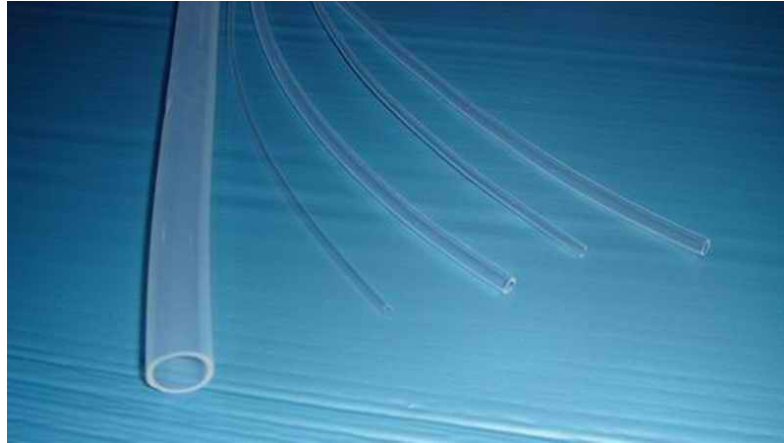


Figura 87. Tubos de FEP.

Para se ter uma idéia da diferença entre se usar FEP ou um tubo comum de PVC (Policloreto de Vinila), observe a figura 88.

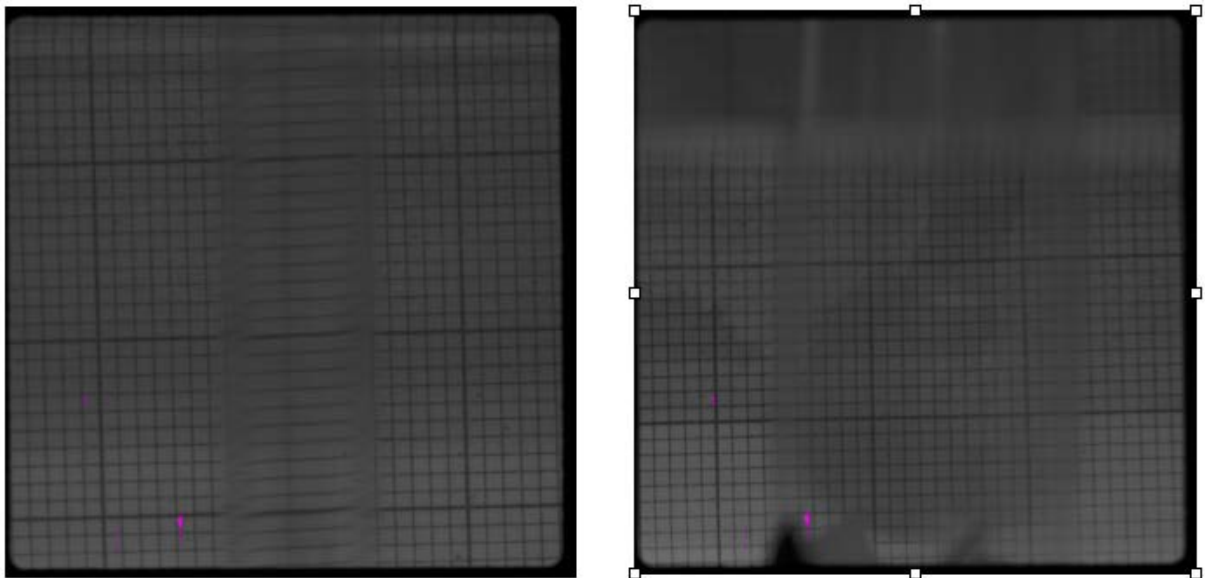


Figura 88. Folha de papel milimetrado atrás de 2 tipos diferentes de tubos, ambos cheios d'água. À esquerda tubo de PVC e à direita tubo de FEP [18].

Infelizmente, não conseguimos obter este material, portanto um erro maior será introduzido em nossa medida.

Além desse problema, como só estamos fazendo uso de uma câmera, podemos ter a impressão que o sensor deveria ter captado uma informação, quando na realidade, a informação foi outra. Para ilustrar esse problema observe a figura 89.

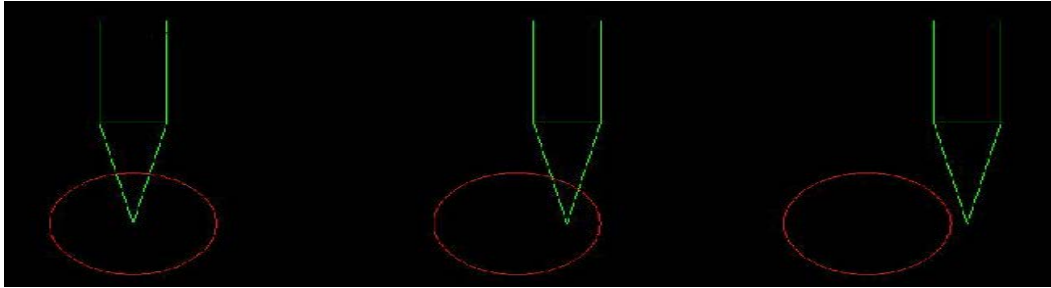


Figura 89. Exemplo de imagem que pode ser detectada pela câmera (à esquerda) e exemplos do que pode ter acontecido na realidade (à direita e no meio).

Para resolver esse problema poderíamos fazer uso de uma câmera auxiliar posicionada a 90 graus da primeira, mas optamos por utilizar bolhas de Taylor e posicionar o sensor no centro da tubulação, assumindo que os sensores detectam a maior corda da bolha. Um papel milimetrado pode ser posto junto à seção de teste para auxiliar no cálculo da velocidade pela câmera, conforme pode ser observado na figura 90; ou então podemos marcar dois pontos de distância conhecida na tubulação e usarmos como referência (ver figura 91).

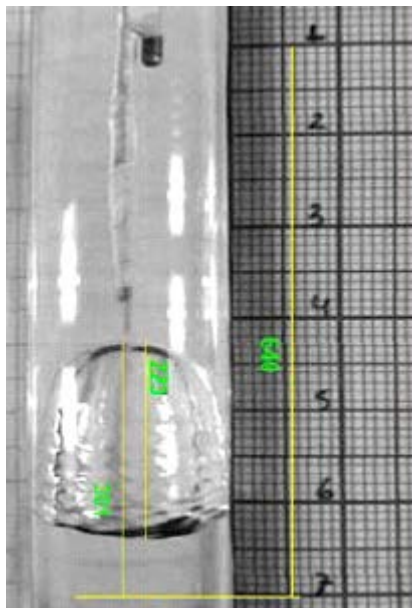


Figura 90. Exemplo de imagem utilizada para o cálculo da velocidade de subida de bolhas de Taylor através da câmera [19].

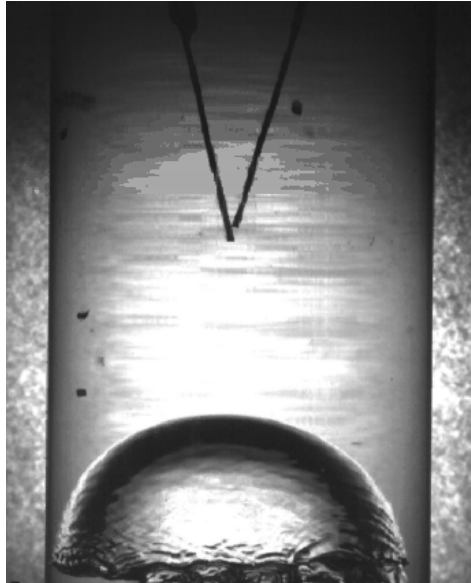


Figura 91. Exemplo de imagem utilizada para o cálculo da velocidade de subida de bolhas de Taylor através da câmera.

3.7.3 – Resultados Obtidos

Os geometrias utilizadas estão especificadas a seguir:

1. Sensor Paralelo (Distância entre pontas de 2mm);
2. Sensor Paralelo (Distância entre pontas de 3,2mm);
3. Sensor Paralelo (Distância entre pontas de 3,9mm);
4. Sensor Duplo-Inclinado (Distância entre pontas de 1,92mm e ângulo entre eles 20 graus aproximadamente);
5. Sensor Vertical/Inclinado (Distância entre pontas de 1,46mm e ângulo entre eles de 10 graus aproximadamente).

• Experimento I

Obtivemos 30 dados para cada geometria utilizada (neste apenas os sensores em paralelo), tanto por vídeo quanto pelo sensor, sendo que neste, as imagens foram analisadas sem a utilização do **software**, somente contando a quantidade de **frames** existentes entre dois pontos de distância conhecida. Como sabemos o tempo entre um **frame** e outro, a tarefa de se calcular a velocidade das bolhas se torna fácil.

Para as 30 amostras, o resultado de velocidade através das imagens foi quase que exatamente o mesmo, para todas as geometrias estudadas, nos fornecendo a velocidade de 0,23m/s.

1. Sensor Paralelo (Distância entre pontas de 2mm):

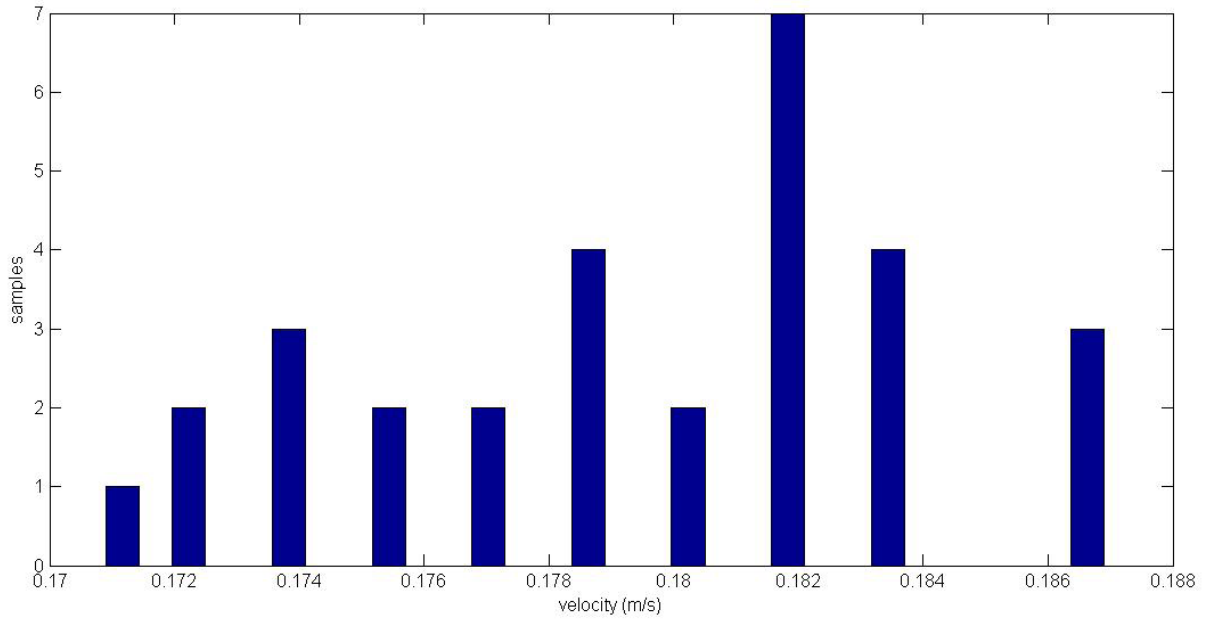


Figura 92. Resultados para o Sensor Eletro-resistivo Paralelo (2mm entre pontas).

2. Sensor Paralelo (Distância entre pontas de 3,2mm):

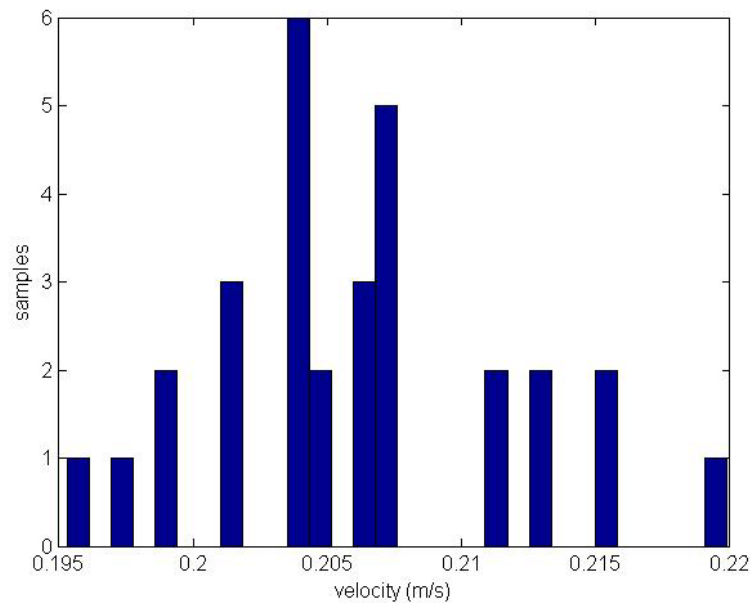


Figura 93. Resultados para o Sensor Eletro-resistivo Paralelo (3,2mm entre pontas).

3. Sensor Paralelo (Distância entre pontas de 3,9mm):

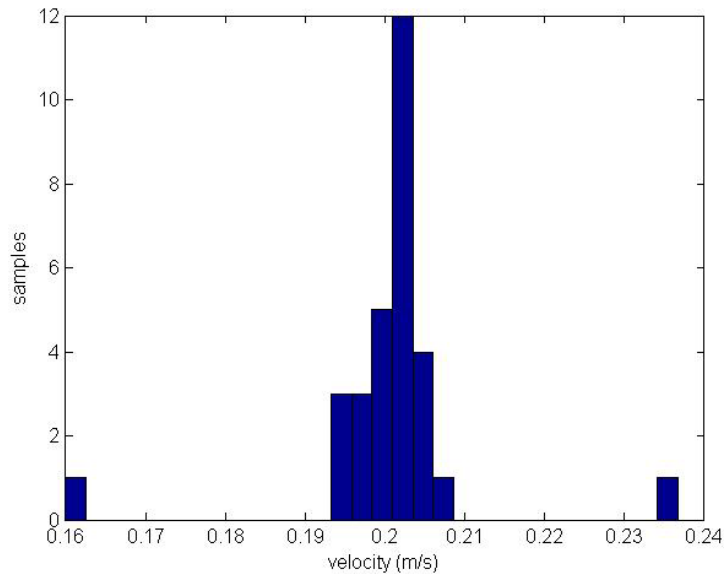


Figura 94. Resultados para o Sensor Eletro-resistivo Paralelo (3,9mm entre pontas).

A tabela 2 nos fornece a média, o desvio padrão e a variância para cada uma das geometrias estudadas no experimento I.

	Média	Desvio Padrão	Variância
D = 2mm	0,18	0,0056	0,000031
D = 3,2mm	0,20	0,0095	0,000090
D= 3,9mm	0,20	0,011	0,000121

Tabela 2. Média, desvio padrão e variância para os resultados obtidos.

• Experimento II

Obtivemos 50 dados para cada geometria utilizada, tanto por vídeo quanto pelo sensor. Neste utilizamos o software para o cálculo das velocidades através das imagens obtidas.

Através do software obtêve-se uma velocidade média de 0,34m/s.

Na tabela 3 temos os resultados para os sensores eletro-resistivos estudados.

Geometria	paralelo			Duplo inclinado	Vertical inclinado
Distância entre as pontas dos sensores (mm)	2.0	3.2	3.9	1.92	1.46
Velocidade média (m/s)	0.29	0.32	0.28	0.25	0.24

Tabela 3. Resultados dos Sensores Eletro-resistivos.

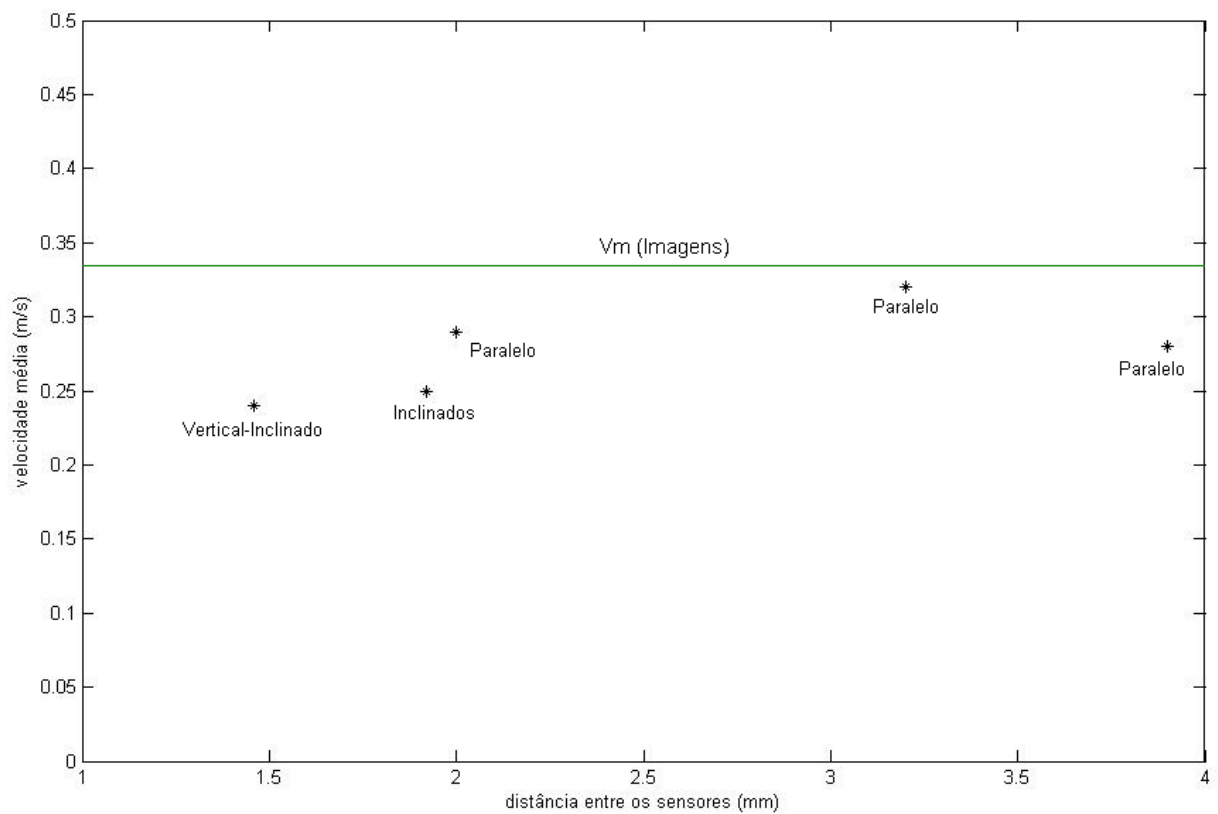


Figura 95. Comparação dos dois resultados.

No experimento 1, os sensores com 3,2 mm e 3,9 mm de distância entre pontas ofereceram melhores resultados, com uma discrepância de aproximadamente – 0,03 m/s do resultado obtido por vídeo, enquanto que o sensor com 2 mm de distância entre pontas apresentou -0,05 m/s de discrepância.

No experimento 2, o sensor que forneceu o melhor resultado foi o Paralelo com 3.2mm de distância entre os sensores individuais, com uma diferença de 0,02 m/s; e os que

nos forneceram resultados menos satisfatórios foram o Vertical/Inclinado e o Duplo Inclinado, com uma diferença de 0,1 e 0,09 m/s respectivamente.

Ainda se faz necessário um estudo mais profundo, com mais amostras e, comparando com resultados provenientes de outras técnicas de medição, como o Shadow Sizer e o Foto-detector.

4 – Conclusão

Diversas são as técnicas de medição em escoamentos de fluidos, com diferentes princípios de medição, porém nenhuma delas é aplicável em todas as situações, nem mesmo nos fornece toda gama de variáveis a se analisar no escoamento.

A técnica dos sensores eletro-resistivos é uma técnica de princípio simples e pode ser implementada com custo reduzido. Esta técnica utiliza princípio condutivo e permite medição do comprimento e da velocidade de bolhas em um escoamento e fração de vazio pontual por exemplo. Pode ser aplicada em fluidos independentemente das características ópticas destes e é de fácil análise e operação. É um sistema versátil, de vasta aplicabilidade. Infelizmente necessita ser inserido no sistema, influenciando no mesmo e sujeitando o sensor ao desgaste.

Para realizar este trabalho, conceitos básicos foram transmitidos, bem como fez-se uso de conhecimentos adquiridos previamente em circuitos lógicos, eletrônica, programação de computadores, ciência dos materiais e mecânica dos fluidos; conceitos básicos que são de suma importância no nosso aprendizado e na vida profissional de qualquer um de nós engenheiros.

5 – Propostas Futuras

Como proposta de trabalho futuro, pode-se dar continuidade a análise da técnica eletro-resistiva, aumentando a quantidade de medições e tratando os resultados estatisticamente, comparando com outras técnicas experimentais (**Shadow Sizer** e Foto-detector) para validação dos dados obtidos e uma análise de incerteza mais completa, quantificando incertezas associadas; analisando os problemas gerais e as possíveis soluções na técnica desses sensores; verificar o desempenho do sensor em outros padrões de escoamento e com outros fluidos (óleo por exemplo), definindo a melhor geometria a ser utilizada em diferentes casos; e criar instalações físicas completas incluindo material dedicado à construção de sensores e equipamentos relacionados.

Em geral, para melhor análise visual dos experimentos, o material FEP pode ser utilizado; e para obtermos um sensor mais fino e mais homogêneo, podemos recobrir a agulha com Quartzo.

A técnica **wire-mesh** (malha de eletrodos) pode ser implementada. Esta técnica permite um detalhamento do escoamento devido a sua boa resolução espacial e temporal. Baseado nos dados brutos, são extraídos parâmetros de interesse do escoamento, como por exemplo, a fração de vazio média e frequência característica de golfadas [20].

O sensor **wire-mesh** é constituído por dois planos de fios (eletrodos) esticados ao longo de uma seção do tubo por onde flui o escoamento (Figs. 96 e 97). Os planos de eletrodos (transmissor e receptor) se cruzam com um ângulo de 90° e estão separados por uma pequena distância, ou seja, eles não se tocam. Em um mesmo plano, os eletrodos são igualmente espaçados ao longo da seção transversal.

São utilizados fios de material condutor, como por exemplo, aço inoxidável, cobre etc.. Fios de tungstênio também podem ser utilizados, pois apesar desse material ter a resistividade elétrica pouco superior a do cobre, por exemplo, é um material com maior dureza e, portanto, podemos utilizar um fio com menor diâmetro para garantir a mesma rigidez, influenciando menos no escoamento.

A eletrônica responsável em operar o sensor faz uma leitura do sinal de tensão para cada caminho de corrente. Cada um dos eletrodos transmissores e receptores sendo ativados seqüencialmente. Ao final, obtêm-se os valores de tensão na saída do nosso circuito para cada um dos pontos de cruzamento. Vale a pena ressaltar que o circuito analógico utilizado para detecção de fase é o mesmo usado no sensoreamento eletro-resistivo (Fig. 98).

A resistência elétrica de todos os cruzamentos entre os eletrodos pode ser medida com uma taxa de repetição que chega na casa dos MHz. Desse modo, esta técnica permite a visualização da distribuição das fases em uma seção transversal de um escoamento bifásico com uma alta resolução temporal.

Para conseguirmos essa frequência de chaveamento e leitura do sinal gerado, um microprocessador pode ser utilizado.

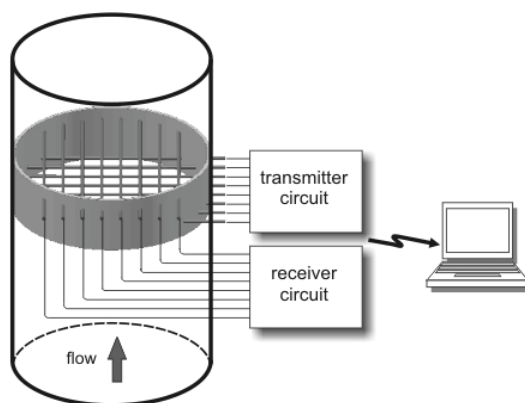


Figura 96. Esquema simplificado do sensor wire-mesh [20].

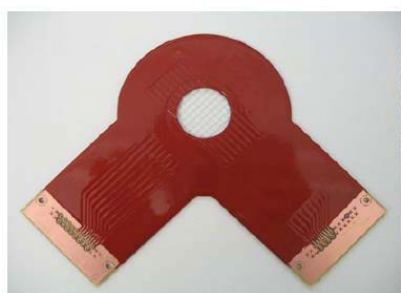


Figura 97. Sensores wire-mesh encontrados na literatura e site de fabricante. [30] e [20].

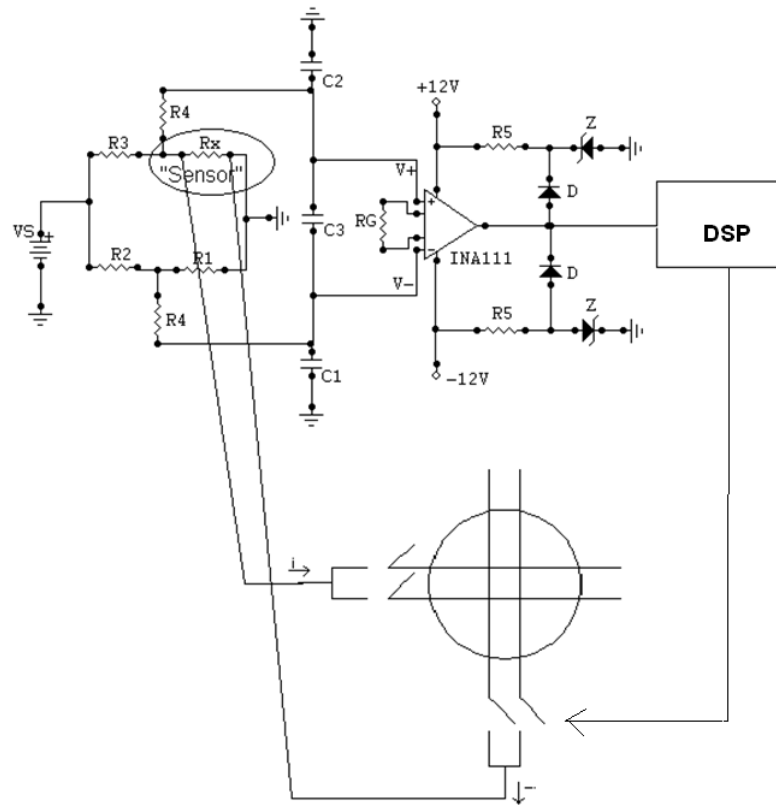


Figura 98. Circuito eletrônico e sensor wire-mesh 2x2 ilustrativo.

6 – Referências Bibliograficas

- [1] Juliana B. R. Loureiro, João Gabriel Siqueira, Atila P. Silva Freire; “Caracterização Experimental de escoamentos Bifásicos Ar-água em Regime Pistonado”. Seminário COPPE/INMETRO, Brasil, 2010.
- [2] TAITEL, Y., BARNEA, D., DUKLER, A.E. “Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes”. AIChE Journal, v. 26, n.3, 1980.
- [3] Fernandes RC, Semiat R, Dukler AE. “Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. PhD Thesis. University of Houston, 1983.
- [4] Flow Manager software and introduction to PIV instrumentation". Dantec Dynamics A/S, Fifth Edition, 2000.
- [5] Duarte, D. G.; “Caracterização Experimental do escoamento em Válvulas Ciclônicas quanto à Formação de Emulsões”. Projeto Final de Curso, PEM/COPPE/UFRJ, Brasil, 2008.

- [6] Silva, M. O.; "Caracterização Experimental de um Escoamento Bifásico Vertical Sujeito aos Efeitos de uma Expansão Abrupta". Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ/Engenharia Mecânica, Brasil, 2007.
- [7] Freire, A. P. S., Ilha, A., Colaço, M. J.; "Turbulência". Coleção Cadernos de Turbulência, Volume 5, Tomo 1, 2006.
- [8] Egill Juliusson. "An Investigation Of Void Fraction And Dispersed-phase Velocity Measurement Techniques", SGP-TR-181, 2006.
- [9] Neal, L. G.; "Local Parameters in Concurrent Mercury-Nitrogen Flow". ANL-6625, 1963.
- [10] Nassos, P. G.; "Development of a electrical Resistivity Probe for Void Fraction Measurements in Air/Water Flow". ANL-6738, 1963.
- [11] Serizawa, A., Kataoka, I., Michiyoshi, I.; "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow - I". Measuring Techniques. Int. J. Multiphase Flow, v. 2, pg. 221-233, 1975.
- [12] Serizawa, A., Kataoka, I., Michiyoshi, I.; "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow- II". Local Properties. Int. J. Multiphase Flow, v. 2, pg. 221-233, 1975.
- [13] Rezende S.S., Silva M.O., Emerenciano J.R., Neto J.L.; "Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Fase Utilizando Sensores Eletro-Resistivos", COBEM, 2007.
- [14] Bruce Mihura: "LavVIEW For Data Acquisition", National Instrumentation Series, Ed. Prentice Hall PTR, 2001.
- [15] Barbosa, J. R. J. ; "O Método dos Sensores Eletro-resistivos aplicado a Pluma de Bolhas". Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ/Engenharia Mecânica, Brasil, 1997.
- [16] Lisbôa R.C.S; "Desenvolvimento de um Programa para Aquisição e Análise de Dados Aplicado à Técnica dos Sensores Eletro-resistivos". Tese de Fim de Curso. Engenharia Mecânica – UFRJ, Brasil, 2009.
- [17] Lewis, D. A., Davidson, J. F.; "Bubble Sizes Produced by Shear and Turbulence in a Bubble Column". Chemical Engineering Science, v. 38, pg 161-168 e pg. 181-187, 1983.

- [18] RODRÍGUEZ, D.J. & SHEDD, T.A. Cross-sectional imaging of the film in horizontal two-phase annular flow. ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, Charlotte, North Carolina, USA, 2004.
- [19] M. O. Silva, F. P. A. Barros, M. V. L. R. Silva, P. L. C. Lage; “Análise de Técnica de Sensores Duplos de Condutividade Para a Obtenção da Velocidade e do Tamanho de Bolhas Usando Filmagem de Alta Velocidade”. ENEMP, 2007.
- [20] M.J. da Silva, L.V.R. Arruda, C.E.F. Amaral, R.E.M. Morales. “Investigação Experimental de Escoamentos Bifásicos Gás-líquido em Tubulações Através da Técnica Wire-mesh”. 2º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos, São Carlos, 2010.
- [21] Chanson H. and Carosi G.: 2007, Turbulent time and length scale measurements in high-velocity flows open channel flows, Springer-Verlag.
- [22] Devia. F. and Fossa M.: 2003, Design and optimization of impedance probes for void fraction measurements, DITEC.
- [23] Le Corre J. M., Hervieu E., Ishii M. and Delhay J. M.: 2003, Benchmarking and improvements of measurement techniques for-local-time averaged two-phase flow parameters, DOI.
- [24] P. Andreussi, A.D. Donfrancesco and M. Messia, An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow. Int. J. of Multiphase Flow 14 (1988), pp. 777–785.
- [25] Yang H. C., Kim D. K. and Kim M. H.: 2003, Void fraction measurement using impedance method, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 14, Issues 4-5, August-October 2003, Pages 151-160
- [26] Paz R.O.; “Caracterização Experimental das Propriedades Dinâmicas de Escoamentos Pistonados em Tubos Verticais”. Dissertação de Mestrado COPPE-UFRJ, 2009.

7- Referências da Internet

[27] <http://www.turbulencia.coppe.ufrj.br/index.php>

[28] <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/fluidos/index.asp>

[29] <http://www.professionalplastics.com/pt/FEPTUBING.html>

[30] <http://www.fzd.de/db/Cms?pNid=1694>