

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA  
ÊNFASE EM ELETROTÉCNICA/AUTOMAÇÃO

DIOGO TEIXEIRA MACHADO  
FELIPE CAINÃ COSTA LIMA HILDEBRANDO  
LEONARDO LIPINSKI

**SISTEMA MULTICANAL DE SENSORES RESISTIVOS PARA  
MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

DIOGO TEIXEIRA MACHADO  
FELIPE CAINÃ COSTA LIMA HILDEBRANDO  
LEONARDO LIPINSKI

**SISTEMA MULTICANAL DE SENSORES RESISTIVOS PARA  
MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica Ênfases em Eletrotécnica e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

CURITIBA

2013

DIOGO TEIXEIRA MACHADO  
FELIPE CAINÃ COSTA LIMA HILDEBRANDO  
LEONARDO LIPINSKI

## **Sistema Multicanal de Sensores Resistivos para Medição de Escoamentos Bifásicos**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro, do curso de Engenharia Elétrica ênfases em Eletrotécnica e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de Setembro de 2013

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica ênfase em Eletrotécnica

---

Prof. Amauri Amorin Assef, Msc.  
Coordenador dos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### **ORIENTAÇÃO**

---

Marco José da Silva, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Marco José da Silva, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Amauri Amorin Assef, Msc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os amigos que nos apoiaram durante o curso e principalmente no desenvolvimento deste trabalho. Eduardo Nunes dos Santos, Thiago Vandruscolo, Nikolas Libert, Reinaldo Justiniano, Eduardo Drosczaka, Fernando Castilho e Victor Enrique Llantoy Parra, Professor Dr. Marco José da Silva, pela orientação, apoio e suporte técnico-científico necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

A nossas famílias, namoradas e amigos que nos apoiaram ao longo desses 5,6,7 ou quase 8 anos de sofrimento, renúncia, noites sem dormir, angústias e souberam tolerar nossas explosões de stress e raiva, mesmo tendo pouco a ver com tal.

Ao programa PRH10 e a PETROBRAS pelo financiamento deste projeto.

A todas as pessoas direta ou indiretamente envolvidas com a educação, que incansavelmente tentaram impor barreiras à conclusão deste curso, em especial para quem tem como necessidade e não como opção conciliar trabalho e estudo, CONSEGUIMOS!

## RESUMO

Machado, Diogo Teixeira; Hildebrando, Felipe Cainã; Lipinski, Leonardo. Sistema Multicanal de Sensores Resistivos para Medição de Escoamentos Bifásicos. 2013. 64f.

Escoamentos bifásicos são encontrados em diversos setores da indústria, como por exemplo, em operações de exploração e produção de petróleo, usinas nucleares, reatores químicos, entre outros. O monitoramento e determinação de parâmetros de interesse do escoamento são de grande importância, pois muitas vezes tais escoamentos estão envolvidos em questões de eficiência e segurança das instalações onde ocorrem. São foco deste trabalho os escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido, pois estes são os mais comuns em atividades de produção de petróleo e gás. Diversas técnicas experimentais podem ser empregadas para o monitoramento de escoamentos. Neste trabalho é apresentado o projeto e construção de um sistema multicanal de sensores resistivos para monitoramento do escoamento gás-líquido. O sistema sensor baseia-se na medição da condutividade elétrica de fluídos. Este sistema é de relativo baixo custo, alta resolução temporal e minimamente invasivo. O sistema foi projetado para instalação em uma planta de testes com tubulação de diâmetro interno de 26 mm. O sistema é composto de até 16 sensores resistivos a dois fios, um hardware microcontrolado para geração e medição de sinais e um software para aquisição e apresentação dos dados adquiridos através do sensor. A partir de testes em condições estáticas foi obtida a curva de ajuste para cada um dos sensores resistivos. O sistema desenvolvido foi avaliado comparativamente com uma câmera de alta velocidade (técnica de referência) apresentando resultados satisfatórios. Desta forma, o sistema pode ser empregado em estudos sistemáticos de escoamentos bifásicos gás-líquido.

**Palavras-chave:** Escoamento bifásico, sensor resistivo, fração de vazio, sistema multicanal.

## ABSTRACT

Machado, Diogo Teixeira; Hildebrando, Felipe Cainã; Lipinski, Leonardo. Multichannel Resistive Sensors System for Measurement of Two Phase Flows. 2013. 64p.

Two-phase flows are commonly found in many industry branches, such as in oil and gas production, nuclear power plants and chemical reactors. The monitoring of such flows is very important since they are often involved in efficiency and safety issues of plants and processes. The focus of this work is in gas liquid two-phase flows, as they are the most common type in the oil and gas production activities. Different measuring techniques are available to experimentally investigate two-phase flows. In this work, the design and construction of a two-wire resistive sensor system is presented. The sensor system is based on electrical conductivity measurements which means that it is possible to discriminate the two phases within a flow since they present different electrical properties. The resistive sensor system is of relatively low cost, high time resolution and minimally invasive. It was projected to be installed in a test facility with 26 mm inner diameter. The system comprises of up to 16 two-wire resistive sensors, a microcontrolled hardware for signal generation and acquisition, and a software for data processing and visualization. Based on static reference measurements adjustment curves for each resistive sensor was obtained. The developed system was comparatively evaluated against high-speed camera measurements, showing satisfactory results. Hence, the system may be well deployed in experimental studies of two-phase flows.

**Keywords:** Two phase flow, resistive sensor, void fraction, multichannel system.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Representação de fração de vazio para um escoamento estratificado. ....   | 14 |
| Figura 2 - Padrões de escoamento (a) gás-líquido vertical e (b) gás-líquido horizontal<br>(adaptado de DA SILVA, 2008) ..... | 15 |
| Figura 3 - Célula unitária (DOS SANTOS, 2011) .....  | 17 |
| Figura 4 - Padrões de escoamento intermitentes: a) Bolhas alongadas e b) Golfadas.<br>(Adaptado de GHAJAR, 2005). .....      | 18 |
| Figura 5 - Célula Simples .....  | 19 |
| Figura 6 - Equivalente RC em paralelo de um fluido.....  | 23 |
| Figura 7 - Detalhes da sonda resistiva a dois fios (ZABARAS; DUCKLER, 1986). .....   | 24 |
| Figura 8 - Gráfico da altura de líquido pela condutância (ZABARAS; DUCKLER, 1986).....                                       | 25 |
| Figura 9 – Detalhe dos planos transmissores e receptores e os pontos de cruzamentos. ....                                    | 27 |
| Figura 10 - Reconstrução da bolha de Taylor através da união dos frames (Amaral, 2011). ..                                   | 28 |
| Figura 11 - Representação esquemática do sistema. ....   | 29 |
| Figura 12 - a) Projeto da placa de circuito impresso b) Placa de circuito impresso montada<br>com os eletrodos.....          | 31 |
| Figura 13 - Arranjo de dois sensores resistivos espaçados de 5cm para medição indireta da<br>velocidade do escoamento.....   | 32 |
| Figura 14 – Diagrama esquemático do sistema desenvolvido.....  | 33 |
| Figura 15 - Buffer utilizado na excitação do sensor resistivo. ....  | 34 |
| Figura 16 - Amplificador de transimpedância utilizado na conversão corrente-tensão do sensor<br>resistivo .....              | 35 |
| Figura 17 - <i>Hardware</i> completo desenvolvido para 16 canais de sensores. ....   | 35 |
| Figura 18 - Fluxograma do <i>firmware</i> embarcado no microcontrolador PIC 12F675.....                                      | 37 |
| Figura 19 - Sinais de sincronismo, controle e trigger desejados. ....  | 38 |
| Figura 20 - Imagem da placa NI USB-6211 .....  | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21 - Fluxograma de funcionamento do aplicativo.....   | 40 |
| Figura 22 - Painel Frontal criado em LabVIEW para monitoração de medições do circuito. .                   | 41 |
| Figura 23 – Detalhe do diagrama de blocos do cálculo da média de tubo cheio de líquido para um sensor..... | 42 |
| Figura 24 – Detalhe do diagrama de blocos desenvolvido no LabVIEW para o cálculo da altura de líquido..... | 43 |
| Figura 25 - Projeto da placa de circuito impresso desenvolvida. ....                                       | 44 |
| Figura 26 - A) Face superior da placa de circuito impresso; B) Face inferior. ....                         | 45 |
| Figura 27 - Pulso de controle (canal 1) e pulso de <i>trigger</i> (canal 2). ....                          | 46 |
| Figura 28 - Forma de onda de excitação (canal 1) e sinal de <i>trigger</i> (canal 2).....                  | 46 |
| Figura 29 - Forma de onda de excitação (canal 1) e recepção (canal 2). ....                                | 47 |
| Figura 30 - Arranjo montado para obtenção da curva de ajuste. ....   | 48 |
| Figura 31 - Curvas de ajuste coincidentes do sensor 1 .....  | 50 |
| Figura 32 - Curvas de ajuste coincidentes do sensor 2.....   | 50 |
| Figura 33 - Curvas de ajuste para os valores médios das 10 medições .....                                  | 51 |
| Figura 34 - Representação esquemática da planta em estudo (PARRA, 2013). ....                              | 53 |
| Figura 35 – Planta experimental com 4 pares de sensores resistivos instalados. ....                        | 53 |
| Figura 36 - Fração de vazio e linha de corte de um par de sensores (PARRA, 2013). ....                     | 54 |
| Figura 37 - Esquema de ligação da câmera de alta resolução (PARRA, 2013). ....                             | 55 |
| Figura 38 - Imagem captada com a câmera de alta resolução .....  | 55 |
| Figura 39 - Comparativo de velocidade entre Câmera e Sensor resistivo.....                                 | 55 |



## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>10</b> |
| 1.1      | MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....                              | 10        |
| 1.2      | PROBLEMAS E PREMISAS .....                                   | 11        |
| 1.3      | OBJETIVOS E METODOLOGIA .....                                | 11        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                            | <b>13</b> |
| 2.1      | ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO.....                         | 13        |
| 2.2      | REGIME INTERMITENTE .....                                    | 17        |
| 2.3      | IMPEDÂNCIA EM FLUÍDOS .....                                  | 19        |
| 2.4      | TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE FASE.....                   | 20        |
| 2.4.1    | TOMOGRAFIA EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS.....                     | 21        |
| 2.4.2    | TÉCNICAS DE MEDIÇÃO POR IMPEDÂNCIA.....                      | 22        |
| 2.4.2.1  | SONDAS RESISTIVAS .....                                      | 23        |
| 2.4.2.2  | SENSOR WIRE MESH .....                                       | 26        |
| 2.4.3    | VIDEOMETRIA.....   | 27        |
| <b>3</b> | <b>DESENVOLVIMENTO.....</b>                                  | <b>29</b> |
| 3.1      | DESCRIÇÃO DO SISTEMA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....      | 29        |
| 3.1.1    | SENSOR RESISTIVO.....  | 30        |
| 3.1.2    | CIRCUITO ELETRÔNICO .....                                    | 32        |
| 3.1.3    | FIRMWARE.....  | 36        |
| 3.2      | APLICATIVO EM LABVIEW .....                                  | 38        |
| 3.2.1    | AQUISIÇÃO DE SINAIS .....                                    | 41        |
| 3.2.2    | CÁLCULO DA MÉDIA DA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA TUBO CHEIO ..... | 41        |
| 3.2.3    | CÁLCULO DA ALTURA DE LÍQUIDO .....                           | 42        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                      | <b>44</b> |
| 4.1      | CONSTRUÇÃO DA ELETRÔNICA .....                               | 44        |
| 4.2      | VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO.....                            | 45        |
| 4.3      | OBTENÇÃO DA CURVA DE AJUSTE .....                            | 47        |
| 4.4      | RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO SENSOR .....                     | 52        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                       | <b>57</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                     | <b>58</b> |
| <b>7</b> | <b>APÊNDICES .....</b>                                       | <b>61</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Por escoamento multifásico denota-se o fluxo simultâneo de duas ou mais substâncias imiscíveis e fisicamente distintas, podendo ser amplamente encontrado em diversas aplicações de engenharia, por exemplo, na geração de energia, na engenharia química e na extração e processamento de petróleo (DA SILVA, 2008). Bastante comuns, os escoamentos multifásicos do tipo gás-líquido são provavelmente a mais importante forma de escoamento multifásico sendo encontrada largamente em aplicações industriais (FALCONE; HEWITT; ALIMONT, 2009).

Em determinados processos, é de grande importância mensurar a fração gás-líquido, por muitas vezes este parâmetro é determinante para a operação segura e eficiente das instalações.

Anualmente são investidos mais de 25 milhões de dólares no mercado de tecnologia de sensores, tendo a área de sensores para escoamento uma representatividade de 21%. Dentro do segmento de sensoriamento de escoamento multifásico, os setores petroquímico e químico representam 15% do investimento (FROST; SULLIVAN, 2008).

Tradicionalmente na indústria as medições de fração de fase são feitas separando as fases e medindo a saída dos fluidos separados utilizando-se técnicas de medição de escoamentos monofásicos (FALCONE; HEWITT; ALIMONT, 2009). Uma forma de se efetuar medições dos escoamentos bifásicos sem necessidade de separação dos fluidos é através de sensores de impedância no qual o mensurando causa uma variação nas características elétricas. Estes sensores são amplamente utilizados na indústria devido a sua simplicidade, baixo custo de fabricação e robustez (PALLÀS-ARENY; WEBSTER, 2001). No caso de escoamentos multifásicos, as fases constituintes do escoamento devem possuir diferentes propriedades elétricas.

O foco de estudo deste trabalho será em torno dos escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido, onde serão utilizados sensores resistivos para sua monitoração.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Analisando o escoamento bifásico tomando, por exemplo, uma tubulação de extração de petróleo, observa-se a presença de gás e óleo escoando simultaneamente na tubulação. São de grande importância à caracterização dos padrões de escoamento e a detecção de alguns parâmetros, como por exemplo, da fração óleo/gás que passa nestes dutos.

A técnica a ser empregada neste trabalho é baseada nas medições de resistência elétrica, esta apresenta baixo custo, alta resolução temporal e pode ser empregada em qualquer intervalo de fração de vazão (YANG et al.; 2003). Seu funcionamento parte do princípio que as fases da mistura apresentam diferentes condutividades e/ou permissividades elétricas (LIBERT; DA SILVA; LIPINSKI, 2011).

A resistência elétrica de um escoamento multifásico varia de acordo com a concentração e a distribuição de suas fases, o uso de um sistema de medição baseado em resistência elétrica dos fluidos tem o potencial para medição instantânea, podendo-se fazer o monitoramento e controle em tempo real de processos e aparelhos onde os escoamentos ocorrem.

Nos últimos anos, o progresso da capacidade de processamento computacional tem fomentado o desenvolvimento e aplicações de simulação e aplicação de códigos computacionais para análise de escoamentos, conhecidos como dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*). Para validação dos resultados de CFD uma questão importante são resultados obtidos experimentalmente com escoamentos bifásicos (DA SILVA, 2008). É também neste contexto que o desenvolvimento de técnicas de medição especializadas faz-se necessário.

## 1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA

De acordo com a necessidade já apresentada anteriormente, este trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de sensores resistivos multicanal para a caracterização de escoamentos bifásicos. Para isso, devem ser realizadas as seguintes tarefas:

- Um *hardware*, composto por um circuito eletrônico que proverá os sinais de excitação bem como sinais de *trigger* e de sincronismo além de receber os sinais de resposta dos sensores e fazer a comunicação com uma interface USB;
- Um aplicativo em LabVIEW para a aquisição e tratamento dos dados;
- Sensores resistivos invasivos a dois fios que irão compor uma rede de sensores distribuídos.
- Testes de repetitividade do sistema, análise dos dados obtidos experimentalmente com escoamento bifásicos gás-líquido.

A divisão do trabalho segue a seguinte sequência: no capítulo 2 (fundamentação teórica), será feita uma apresentação do objeto de estudo, escoamentos bifásicos, bem como uma revisão bibliográfica das técnicas medição de escoamentos. O capítulo 3 (desenvolvimento), tratará das metodologias da etapa experimental, composto por um resumo do trabalho desenvolvido pela equipe. O capítulo 4 (resultados), detalhará a aplicação do sistema montado e apresentará a exposição dos resultados obtidos. Finalmente, o capítulo 5 (conclusão), para a análise e interpretação dos resultados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO

Escoamentos multifásicos são caracterizados pelo escoamento simultâneo de diferentes fases provenientes de duas ou mais substâncias imiscíveis e fisicamente distintas (DA SILVA, 2008). Para objeto de estudo deste trabalho serão analisados apenas escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido, esta escolha se deu por estes serem os mais comuns em operações de exploração e produção de petróleo. Os principais parâmetros que serão relevantes para este estudo são listados a seguir.

- Fração de Vazio ( $\alpha_G$ )

É determinada pela razão entre a área transversal ocupada pelo escoamento de gás ( $A_{gás}$ ) e a área transversal da tubulação ocupada pelas duas fases ( $A_{total}$ ):

$$\alpha_G = \frac{A_{gás}}{A_{total}} \quad (2.1)$$

$$A_{total} = A_{gás} + A_{líquido} \quad (2.2)$$

- Fração de Líquido ( $\alpha_L$ )

Se obtém a fração de líquido de forma análoga, considerando agora a área transversal ocupada pelo líquido ( $A_{líquido}$ ):

$$\alpha_L = \frac{A_{líquido}}{A_{total}} \quad (2.3)$$

Sendo que a soma das duas frações deve ser igual a um, (Equação 1.4), como mostra a Figura 1.

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad (2.4)$$

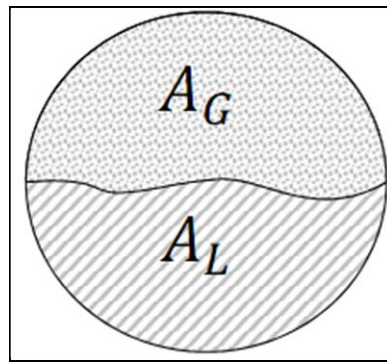


Figura 1 - Representação de fração de vazio para um escoamento estratificado.

- Velocidade Superficial

É um importante parâmetro para o estudo de escoamentos bifásicos gás-líquido, sendo determinado pela razão entre a vazão volumétrica do escoamento e a área da seção transversal da tubulação. Para isso admite-se que só há escoamento de uma das fases pela tubulação.

$$j_G = \frac{Q_{gás}}{A_{total}} \quad (2.5)$$

$$j_L = \frac{Q_{líquido}}{A_{total}} \quad (2.6)$$

$$Q_{total} = Q_{gás} + Q_{líquido} \quad (2.7)$$

Sendo  $j_G$  a velocidade superficial do gás,  $j_L$  a velocidade superficial do líquido,  $Q_{gás}$  a vazão volumétrica de gás,  $Q_{líquido}$  a vazão volumétrica de líquido e  $Q_{total}$  igual a vazão volumétrica total.

- Velocidade da Mistura

Determina-se a velocidade da mistura  $j$  pela soma das velocidades superficiais das fases, ou pela razão entre o fluxo total e a área da seção transversal da tubulação, conforme apresentado nas equações 2.8 e 2.9

$$j = \frac{Q_{total}}{A_{total}} \quad (2.8)$$

$$j = j_G + j_L \quad (2.9)$$

Na indústria estes escoamentos são normalmente encontrados confinados em tubulações. Dentro destas, as fases podem apresentar diferentes distribuições espaciais denominadas padrões de escoamento que dependem principalmente da geometria e inclinação do duto, das propriedades mecânicas dos fluidos, da temperatura e pressão do sistema, da relação de vazão de cada uma das fases e do tipo de fluxo.

Os padrões de escoamento mais conhecidos em escoamentos gás-líquido estão ilustrados na Figura 2.

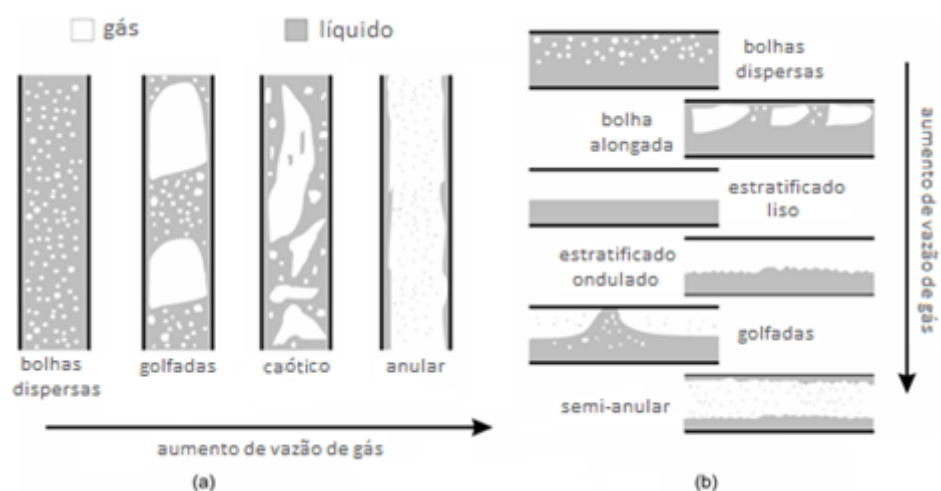


Figura 2 - Padrões de escoamento (a) gás-líquido vertical e (b) gás-líquido horizontal (adaptado de DA SILVA, 2008)

Para os escoamentos verticais têm-se os seguintes padrões:

- Escoamento em bolhas (*Bubble Flow*): É composto por várias bolhas de gás dispersas dentro da fase contínua de líquido;
- Escoamento em golfadas (*Slug Flow*): Surge com o aumento da quantidade de gás no escoamento. Desta forma ocorrem mais colisões entre as bolhas que podem formar grandes bolhas chamadas de bolhas de Taylor, contendo boa fração do gás

e sendo quase do tamanho da tubulação, são frequentemente seguidas de bolhas menores;

- Escoamento caótico (*Churn Flow*): Com uma quantidade de gás maior ainda as bolhas de Taylor se quebram em um padrão instável no qual há um movimento oscilatório de líquido na tubulação;
- Escoamento anular (*Annular Flow*): Este padrão surge quando a fração gasosa da mistura é muito elevada, neste caso o gás flui continuamente pelo centro da tubulação e a parte líquida flui em um filme líquido anular escoando pelas paredes da tubulação e também pode ser carregada ao longo da parte central da tubulação na forma de pequenas gotículas.

Os escoamentos horizontais se comportam de maneira similar aos horizontais, porém sofrem o efeito da gravidade o que faz com que a parte gasosa tenda a escoar pelo topo da tubulação. Para os escoamentos horizontais identificam-se os seguintes padrões:

- Escoamento em bolhas (*Bubble Flow*): Similarmente ao caso identificado anteriormente é composto por várias bolhas de gás dispersas dentro da fase contínua de líquido, porém neste caso as bolhas tendem a se acumular na parte superior da tubulação;
- Escoamento bolha alongada (*Plug Flow*): Similar ao escoamento em golfadas surge quando, devido ao aumento da taxa de vazão do gás, as bolhas formam bolhas maiores em formato de balas escoando pela parte superior da tubulação;
- Escoamento estratificado (*Stratified Flow*): Por conta da ação da gravidade a fração de líquido escoar na parte inferior da tubulação, este tipo de escoamento ocorre quando a vazão relativa das fases é baixa, ocorrendo à separação destas. Pode ser subdividido em estratificado com interface lisa e com interface ondulada (DOS SANTOS, 2011);
- Escoamento em ondas (*Wavy Flow*): É basicamente um escoamento estratificado com maior presença de ondas na superfície do líquido, devido ao aumento do fluxo de gás;
- Escoamento em golfadas (*Slug Flow*): O escoamento de gás se dá em grandes



bolhas e a parcela de água é mais agitada, tendo mais presença de ondas as quais tocam o topo da tubulação;

- Escoamento anular (*Annular Flow*): Assim como no caso vertical, este padrão surge quando a fração gasosa da mistura é muito elevada. Neste caso, o gás flui continuamente pelo centro da tubulação e a parte líquida flui em um filme líquido anular escoando pelas paredes da tubulação e também pode ser carregada ao longo da parte central na forma de pequenas gotículas. Como existe a ação da gravidade, identifica-se um filme de líquido mais espesso na parte inferior do duto.

Estes padrões influenciam diretamente na perda de carga e troca de calor de um dado processo, assim, a caracterização do escoamento multifásico é de grande importância, pois fornece informações relevantes sobre as condições operacionais do processo, as quais podem ser utilizadas em técnicas de controle avançado.

## 2.2 REGIME INTERMITENTE

Regime intermitente compreendem os padrões de escoamento horizontais do tipo golfadas e de bolha alongada, apresentados anteriormente. São caracterizados pela presença de bolhas de Taylor, isto é, grandes bolhas que concentram boa parte da fração de gás do escoamento. Neste padrão é definida a célula unitária que é composta por uma bolha e um pistão de líquido como representado na Figura 3.

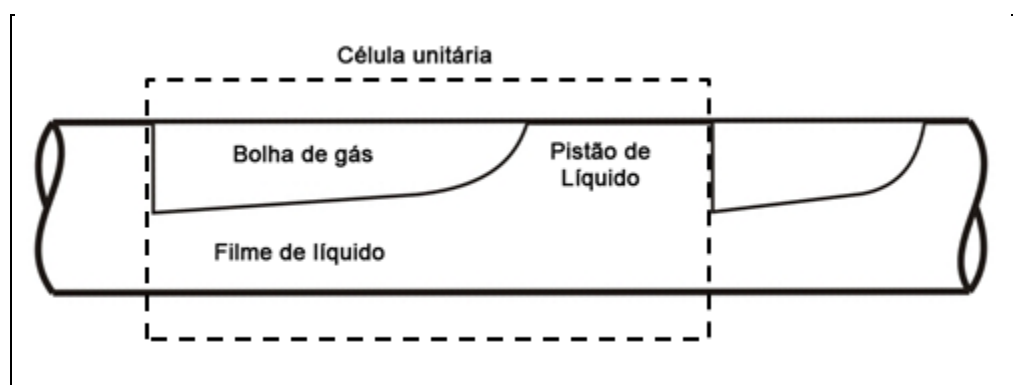
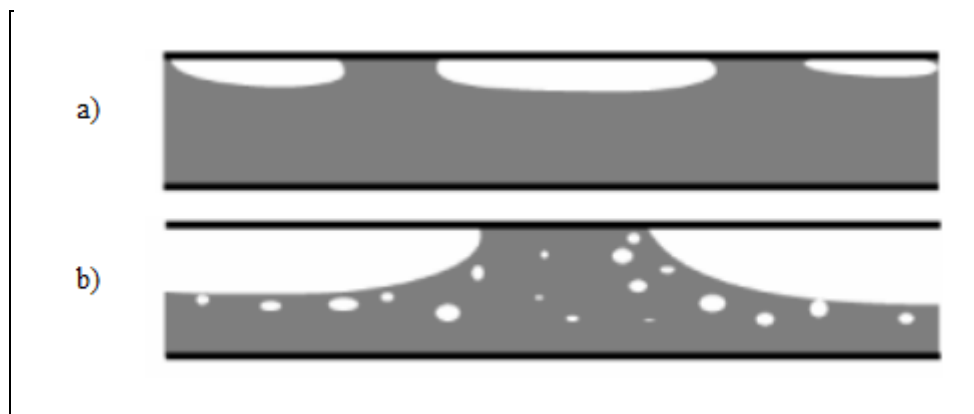


Figura 3 - Célula unitária (DOS SANTOS, 2011)

Nesta célula unitária as bolhas escoam ao longo do tubo junto com um pistão de líquido, podendo ou não conter bolhas de gás (DOS SANTOS, 2011).

Observando-se os parâmetros de velocidades pode-se identificar que o padrão de bolha alongada ocorre em velocidades baixas de gás ( $j_G < 1\text{m/s}$ ) enquanto o padrão em golfadas é visualizado em velocidades de gás altas ( $j_G > 1\text{m/s}$ ) (GHAJAR, 2005). A Figura 4 ilustra ambos os casos.



**Figura 4 - Padrões de escoamento intermitentes: a) Bolhas alongadas e b) Golfadas. (Adaptado de GHAJAR, 2005).**

Alguns parâmetros do regime intermitente são listados, como por exemplo, a fração de vazio média, a fração de líquido no pistão, a velocidade de translação da bolha, a frequência de bolhas, o comprimento médio da bolha alongada, a velocidade do pistão de líquido, entre outros.

Para este trabalho serão de interesse os parâmetros de fração de vazio e velocidade da bolha alongada.

### 2.3 IMPEDÂNCIA EM FLUÍDOS

Devido à natureza do sensor é importante o conhecimento da impedância do fluido em análise. Em circuitos elétricos a impedância elétrica se refere a oposição que um circuito elétrico impõe a passagem de corrente quando submetido a uma tensão. Seu valor é obtido pela lei de Ohm e é dado pela relação entre tensão e corrente, como apresentado na equação 2.10.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.10)$$

Onde  $V$  é a tensão,  $I$  a corrente e  $Z$  a impedância,  $V$ ,  $I$  e  $Z$  são valores complexos.

A impedância é um número complexo, tendo uma parte real referente a resistência elétrica e uma parte imaginária referente a reatância. Em alguns casos se faz mais conveniente o uso da inversa da impedância  $Z$ , a admitância  $Y$ .

Para obtenção da impedância de um fluido se faz uso de uma célula de medição. A célula mais simples é composta por dois eletrodos planos idênticos como mostrado na Figura 5 (DA SILVA, 2008).

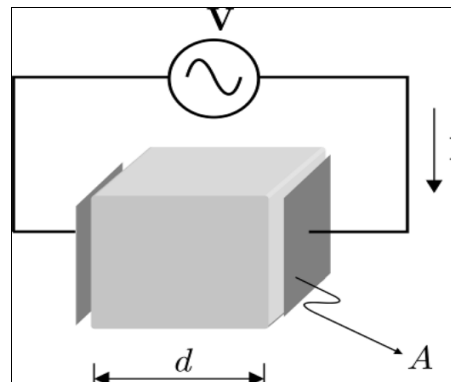


Figura 5 - Célula Simples

A relação entre as propriedades elétricas da substância entre as placas com a admitância da célula medida se dá por:

$$Y = j\omega K_g \epsilon_0 \epsilon^* \quad (2.11)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular,  $K_g$  é uma constante geométrica,  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo que tem o valor de 8,85 pF/m e  $\epsilon^*$  é a permissividade relativa complexa.

Para o caso em estudo a frequência de medição é limitada a algumas dezenas de MHz, desta forma é possível tratar a permissividade relativa complexa do fluido como um equivalente de baixa frequência dado pela equação 2.11 (DA SILVA, 2008).

$$\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (2.12)$$

Na qual  $\epsilon$  é a constante dielétrica do fluido e  $\sigma$  sua condutividade.

O fator geométrico  $K_g$  reflete a razão entre a área da seção transversal do fluido amostrado e a distância entre os eletrodos, para a célula simples da Figura 3 pode ser aproximado por:

$$K_g = \frac{l^2}{d} = \frac{A}{d} \quad (2.13)$$

Sendo que A é a área das placas quadradas de lado l e d é a distância entre estas. Desta forma tem-se a impedância do fluido ao realizar a inversa desta admitância obtida.

## 2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE FASE

Em decorrência da necessidade de estudar experimentalmente escoamentos bifásicos, foram sendo desenvolvidas várias técnicas e métodos para medição. Na produção de petróleo, a medição de escoamentos bifásicos normalmente requer separadores grandiosos e de alto custo, por esse motivo a busca por métodos mais eficientes e de custos reduzidos incentiva a pesquisa nesta área.

Atualmente, a maior parte dessas técnicas só é capaz de detalhar escoamentos bifásicos. Para cada objetivo, existe uma técnica específica que pode ser utilizada. Tais técnicas podem ser classificadas de acordo com parâmetros como resolução espacial e temporal, materiais que podem ser utilizados e se o equipamento é intrusivo ou não. Mas não há uma técnica que seja universalmente aplicada e que possa ser utilizada para todos os tipos

de medições, pois algumas delas apresentam desvantagens consideráveis, podendo falhar em algumas situações.

#### 2.4.1 TOMOGRAFIA EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

A maior vantagem desse tipo de medição é o fato de possuir uma característica pouco invasiva, o que permite uma visualização espacial das fases sem interferir no fluxo dos fluídos. Há a possibilidade de obter imagens de secções transversais através de diferentes princípios físicos, como raios X, raios gama, impedância elétrica, entre outros.

Tomografias por raio X e raio gama vêm sendo amplamente utilizados em diversas áreas. Esta é uma técnica não invasiva que apresenta alta resolução espacial, mas em sua maioria tem baixa resolução temporal devido à movimentação mecânica das partes do tomógrafo ao redor da tubulação.

Soluções para reconstrução rápida de imagens por raios X, ou *fast X-ray imaging*, ou ainda *ultra-fast X-ray imaging*, utilizam o meio eletrônico ao invés do mecânico, alcançando taxas de 2000 quadros por segundo (*frames per second - fps*) (HORI, 1998) até 7000 quadros por segundo (HAMPEL et al., 2008). Algumas outras técnicas não conseguem realizar tais medidas em tubulações metálicas, onde a utilização de raios X e gama tem vantagem, no entanto, essas soluções ainda são comparativamente complexas e de custos extremamente elevados.

O imageamento por ressonância magnética (Magnetic Resonant Imaging - MRI), também é amplamente utilizada na área biomédica. Essa técnica baseia-se no fenômeno de ressonância magnética do núcleo de hidrogênio em conjunto com frequências de rádio e pulsos magnéticos (MANTLE; SEDERMAN, 2003). Quando aplicada no estudo de escoamentos de água no estado líquido, essa técnica apresenta um excelente contraste. A principal desvantagem deste método é devido à necessidade de que as tubulações sejam construídas de materiais não magnéticos e não condutores para permitir a realização das medições. Além disso, também apresenta outras desvantagens como baixa frequência de aquisição de imagens e elevado custo de equipamentos.

A tomografia elétrica é dividida em tomografia por resistência elétrica (*Electric Resistance Tomography* - ERT) e tomografia por capacitância elétrica (*Electric Capacitance Tomography* - ECT) (CAO et al., 2007).

Em EIT, vários eletrodos são dispostos igualmente espaçados em torno de um tubo. A técnica ECT é amplamente utilizada para detecção de fração de vazio em misturas gás-líquido com líquidos não condutores. Os sensores localizam-se na parte externa da tubulação, onde os sinais de excitação gerados e medidos utilizam a diferença de potencial. A variação de capacitância medida pelos eletrodos é proporcional à fração de gás e líquido dentro da tubulação.

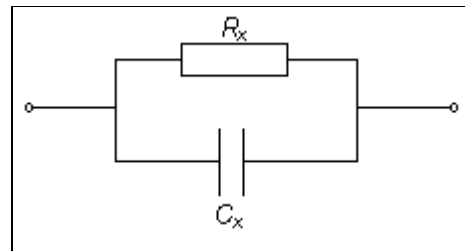
No ERT, os sensores penetram na tubulação, porém são considerados não intrusivos devido ao seu baixo grau de intrusão. Normalmente são aplicados na medição da concentração de fase em escoamentos bifásicos gás-líquido, onde a diferença de condutividade entre as fases é conhecida. O sinal resultante passa por um algoritmo de reconstrução e gera imagens que serão analisadas posteriormente. A principal desvantagem dos sistemas de tomografia por impedância elétrica é a baixa resolução espacial. As vantagens da técnica estão na elevada resolução temporal, nos baixos custos de aplicação e na simplicidade de operação. A resolução espacial da tomografia por impedância elétrica é baixa, porém sua resolução temporal é alta e tem um baixo custo de aplicação.

O ultrassom também pode ser aplicada na investigação de escoamentos bifásicos (HOYLE, 1996). O sistema de captação detecta mudanças na resposta acústica entre as interfaces das fases líquida e gasosa com transdutores dispostos ao redor do duto. Pode-se citar Yang, M.(1999) para a descrição do modo de reflexão e transmissão e Rahiman(2006) e Supardan(2007) para o método de transmissão. A resolução temporal para a tecnologia por ultrassom é moderada e pode ser utilizada em tubulações opacas, porém essa técnica é aplicada apenas para escoamentos com baixa fração de vazio, pois a onda mecânica é espalhada nas interfaces e os detectores não recebem sinal suficiente.

#### 2.4.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO POR IMPEDÂNCIA

Sensores de medição de fração de vazio baseado em princípios elétricos vêm sendo largamente desenvolvidos nas últimas décadas. As técnicas de medidas de impedância elétrica são baseadas no princípio de que as fases líquidas e gasosas de um escoamento apresentam

condutividades e/ou permissividades elétricas diferentes. Ou seja, as fases do fluido na seção de medida do duto podem ser representadas através de sua capacitância e condutância elétrica. Além disso, o fluido de um escoamento na faixa de frequência de até algumas dezenas de Mega-hertz pode ser modelado eletricamente através do circuito paralelo de um resistor com um capacitor (DA SILVA, 2008), conforme mostrado na Figura 6.



**Figura 6 - Equivalente RC em paralelo de um fluido.**

Para a determinação da impedância devem ser avaliados dois parâmetros, que podem ser a magnitude e fase ou a parte real e imaginária de uma tensão ou corrente. Na prática isso pode ser realizado aplicando-se estímulos elétricos em um eletrodo e observando sua resposta em outro eletrodo receptor. Observa-se que a impedância é dependente da frequência, assim, a determinação da impedância pode também ser realizada obtendo-se o valor de duas amplitudes de um sinal aplicado em frequências diferentes (DA SILVA, 2008).

Para escoamentos onde só haja duas fases, uma condutora de eletricidade e outra não condutora, a medida de impedância não se faz necessária, pois apenas a medida de resistência já é suficiente para diferir as frações de fase. A medida de resistência pode ser vista como uma forma simplificada da medida de impedância, onde só a parte resistiva do fluido é mensurada.

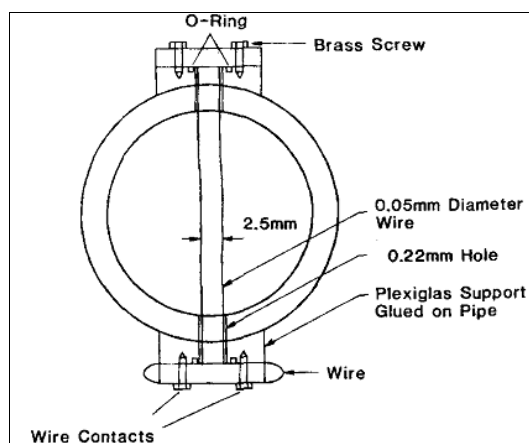
Há vários métodos para medições de escoamentos baseados em impedância, a seguir estão alguns exemplos comuns de serem visto em aplicações industriais.

#### 2.4.2.1 SONDAS RESISTIVAS

A sonda resistiva a dois fios pode ser potencialmente utilizada em aplicações bifásicas onde há um alto contraste de condutividade entre as fases e onde o meio contínuo não é um

isolante elétrico. Tais aplicações incluem medição da taxa de óleo em escoamentos óleo-água, medição de escoamentos de sólidos em fluidos de perfuração. Existem aplicações adicionais em processamento de alimentos e indústria química. (LUCAS; ALBUSAIDI, 1999).

Um exemplo típico de sonda resistiva para medição de espessura do filme de líquido é representado pela Figura 7.



**Figura 7 - Detalhes da sonda resistiva a dois fios (ZABARAS; DUCKLER, 1986).**

Estes sensores penetram na tubulação, mas apresentam baixo grau de intrusão e são utilizados geralmente para mapeamento de distribuições de concentração. Os eletrodos são excitados com corrente alternada, enquanto os outros sensores captam o sinal, dessa forma pode-se analisar o valor recebido no outro sensor, sendo possível interpretar os valores de corrente ou tensão recebidos.

Inicialmente desenvolvida e testada por Brown et al.(1978). Durante suas pesquisas e testes, encontraram dificuldades como as sondas utilizadas no início saturavam para medições de espessuras de filme de líquido acima dos valores determinados pela distância entre os dois eletrodos, sendo resolvido ao deixar de utilizar baixas frequências no sinal de excitação da sonda. Outro obstáculo encontrado foi que ao medir um fluido que sofresse algum tipo de ondulação, ao diminuir a altura de líquido, um fina camada deste poderia aderir à sonda, podendo assim induzir as medidas com certo grau de erro. Para este, foi encontrado a solução de utilizar fios muito finos, com menos de 0,1mm de diâmetro, diminuindo significativamente a quantidade de líquido que irá aderir à sonda.

Através da formulação da impedância do fluido entre os dois fio, Brown et al. (1978) chegam a uma fórmula simplificada para o cálculo da condutância do fio na forma:



$$G_E = \frac{\pi \gamma h}{\ln \frac{d}{r}} \quad (2.14)$$

Onde  $G_E$  é a condutância do líquido,  $\gamma$  é a condutividade do líquido,  $h$  é a dimensão finita do fluido,  $d$  é a distância entre os fios e  $r$  é o raio dos fios.

Em testes de calibração à 500kHz pode-se comprovar esta fórmula, como mostrado na Figura 8 a seguir.

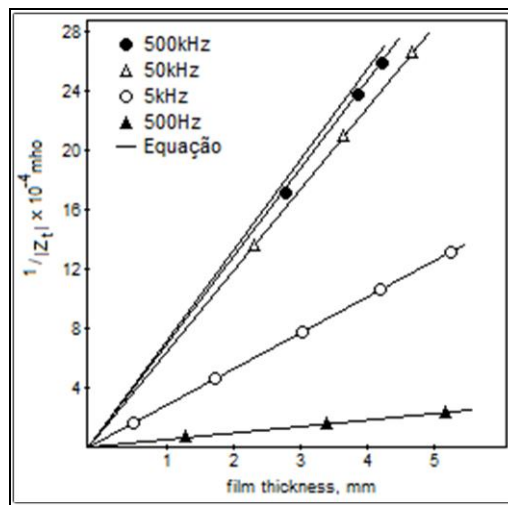


Figura 8 - Gráfico da altura de líquido pela condutância (ZABARAS; DUKLER, 1986).

Porém foi pelo trabalho realizado por Zabarás e Dukler, em 1986, que este sensor ficou mais conhecido. Cada sonda é constituída por duas linhas paralelas de platina 13% de ródio em fios de 0,05 milímetros de diâmetro, espaçados de 2,5 milímetros entre si. A medida que a espessura da película de líquido varia, a condutividade entre os fios também varia, e essas alterações são traduzidas em valores proporcionais de tensão. Como mostrado na Figura 8, existe uma faixa de frequência sobre a qual existe uma relação linear entre a espessura da película de líquido e da condutividade. A fim de garantir a precisão, esta relação foi obtida através de calibração, a configuração da secção de medição horizontal, bloqueando as extremidades, criando uma série de níveis de líquidos cujas alturas foram determinados com precisão (ZARABAS; DUCKLER, 1986).

Além de medir a distribuição de cada fase no escoamento, outro objetivo é a obtenção da velocidade da mistura. Este valor é possível de ser obtido utilizando-se um par de sensores

espaçados de uma distância previamente conhecida, considera-se o fato de que o sinal observado no primeiro sensor será visto no sensor seguinte determinado tempo depois, sabendo-se estes parâmetros se obtém a velocidade através da equação do movimento uniforme.

$$V = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (2.15)$$

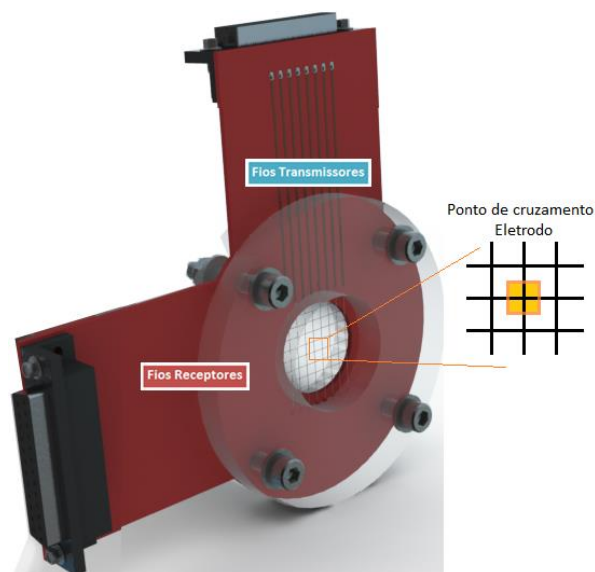
Considerando-se que  $\Delta t$  é um valor de tempo medido e  $\Delta d$  é a distância entre os sensores previamente conhecida.

#### 2.4.2.2 SENSOR WIRE MESH

O sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos, como também é conhecido, consiste de um sensor intrusivo utilizado para fazer o mapeamento das fases de uma seção transversal do escoamento.

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

Este sensor é constituído por dois planos de fios esticados (fios de aço inoxidável) que formam um eletrodo em cada um dos cruzamentos. Esses fios possuem 0,125 mm de diâmetro que se estendem em uma seção perpendicular à direção do fluxo que escoar na tubulação. Um desses planos é transmissor e o outro é receptor, eles são montados com um ângulo de 90° e são separados por uma distância axial de 1,5 mm, formando uma grade de eletrodos, como mostrado na Figura 9.



**Figura 9 – Detalhe dos planos transmissores e receptores e os pontos de cruzamentos.**

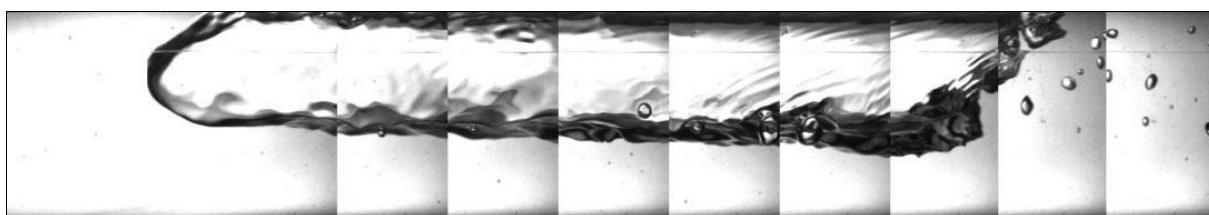
Com a passagem do fluido através do sensor, a capacitância existente na região entre os filamentos varia conforme a permissividade elétrica do material, ou fase, ali posicionada.

O principal parâmetro avaliado é chamado fração de vazio, uma medida relativa à quantidade de gás presente em uma seção do escoamento. Sua determinação é imprescindível no estudo de escoamentos, pois suas variações são significativas nas taxas de transferência de massa, quantidade de movimento entre as fases, densidade e viscosidade da mistura, velocidade relativa entre fases, entre outros.

### 2.4.3 VIDEOMETRIA

A câmera de alta velocidade é um dispositivo capaz de realizar aquisições de imagens em alta taxa de repetição. Esta técnica permite a investigação em pequena escala e validação de alguns parâmetros de interesse no estudo de escoamentos bifásicos. Mas tal técnica não pode ser utilizada em muitos campos de aplicações, pois assim como as demais técnicas de medição ópticas, necessita de condições adequadas para o correto funcionamento. No entanto, as características não invasivas, avanços na tecnologia de instrumentação e algoritmos de processamento de sinal levaram a um grande em uso deste método para estudos experimentais.

Com base nos resultados de segmentação de imagens podem-se medir as curvas de médias, e desvios-padrão para as distribuições de velocidade do escoamento, o comprimento, volume e as frequências de célula unitária (MAYOR, 2008). A partir das imagens obtidas, podem-se aplicar diversos tipos de processamento de imagens. Uma das técnicas, desenvolvida por Amaral et al. (2011) é utilizada neste trabalho para a comparação dos dados. Utiliza-se o processamento de imagens com base em algoritmos de segmentação watershed para encontrar-se a borda da bolha, permitindo determinar as coordenadas espaciais do objeto. A velocidade da bolha pode ser encontrada calculando-se a diferença das coordenadas das bolhas entre dois frames. Depois de tirar as fotos da seção de teste de imagens, a sequência de imagens é submetida a um processo de reconstrução. Utiliza-se o parâmetro de velocidade para unir os frames resultando em uma imagem da bolha de Taylor, mostrado na Figura 10.



**Figura 10 - Reconstrução da bolha de Taylor através da união dos frames (AMARAL, 2011).**

Além da capacidade de reconstruir os frames, o algoritmo de Amaral et al. (2011) permite extrair alguns parâmetros de interesse no estudo do escoamento bifásico. Para isso, é necessário um pré-processamento das imagens adquiridas a fim de extrair a posição da bolha. A técnica utilizada é baseada em morfologia matemática, que diz respeito ao ramo de processamento não-linear de imagens que se concentra na estrutura geométrica da imagem.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O sistema é composto por um conjunto de oito pares de sensores resistivos, os quais são conectados ao circuito eletrônico que gera os sinais de excitação que seguem para os eletrodos de excitação, bem como faz a aquisição de um sinal de resposta dos eletrodos de recepção. A partir deste circuito eletrônico os sinais são pré-tratados e enviados para uma placa de aquisição de dados, responsável pela conversão analógica-digital que se comunica via porta USB com um computador para possibilitar a interface com o usuário.

O conjunto é representado na Figura 11.

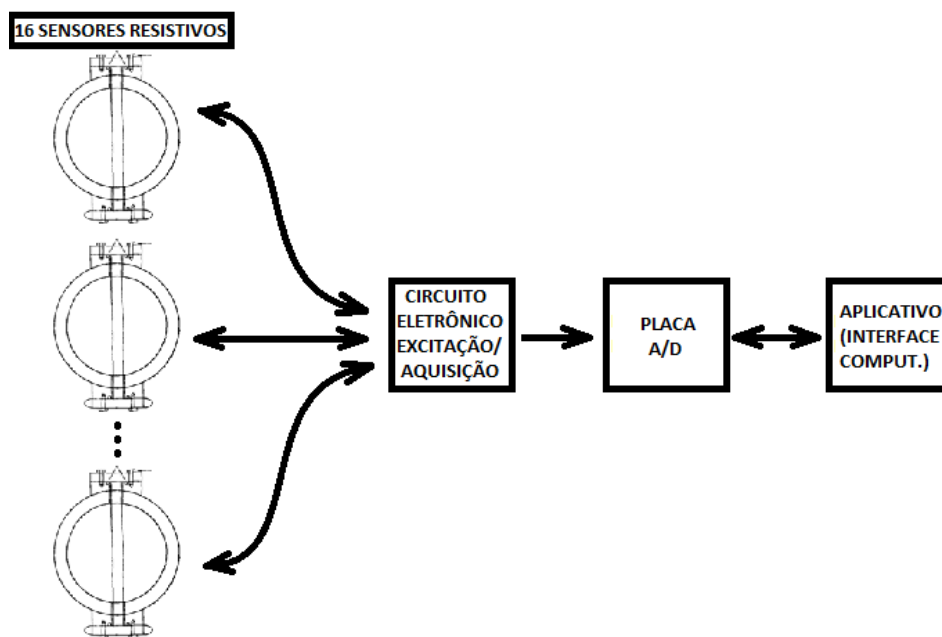


Figura 11 - Representação esquemática do sistema.

Cada uma destas partes será descrita com mais detalhes a seguir.

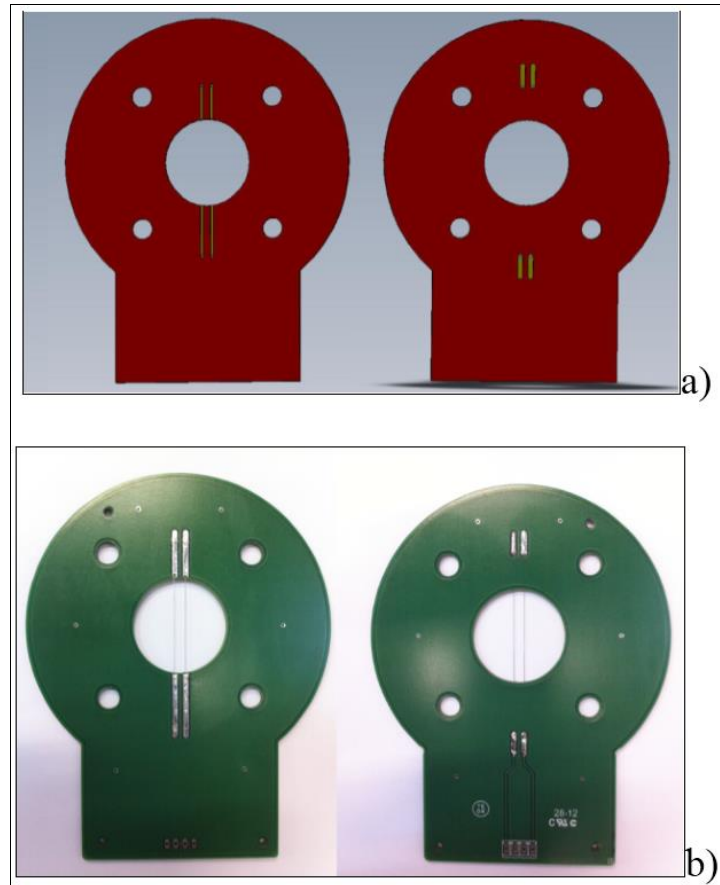
### 3.1.1 SENSOR RESISTIVO

Os sensores resistivos são peças fundamentais do conjunto e têm como finalidade adquirir os valores de tensão que estão relacionados com a concentração de líquido e de gás na tubulação, para isso eles são compostos de dois fios metálicos feitos de aço inox com espessura de 100 $\mu$ m, sendo um deles o eletrodo de excitação e o outro o eletrodo de recepção, responsável pelo sinal de resposta proporcional à altura do filme de líquido para o circuito eletrônico. Esta técnica de medição baseia-se nos conceitos de corrente de condução em fluidos não isolantes.

O eletrodo responsável pela excitação é alimentado por um sinal quadrado de 5Vpp com uma frequência de 1,75kHz. Tal frequência foi escolhida para que dessa forma a placa de aquisição de dados fosse capaz de amostrar os 16 canais sem que a sua capacidade de amostragem (250 mil amostras por segundo) fosse ultrapassada e por consequência, houvesse perda de informação durante a digitalização do sinal amostrado.

Esta tensão de excitação é conduzida através do fluido passante na tubulação para o outro fio. Desta forma a tensão medida neste eletrodo varia de acordo com a quantidade de líquido na tubulação visto que existe um contraste de condutividade entre a fase líquida e a fase gasosa do escoamento. Para evitar a eletrólise dos fios de aço é importante garantir que o sinal de excitação simétrico tenha média temporal igual à zero, pois médias de tensão diferentes de zero causam corrosão do sensor em contato com o meio.

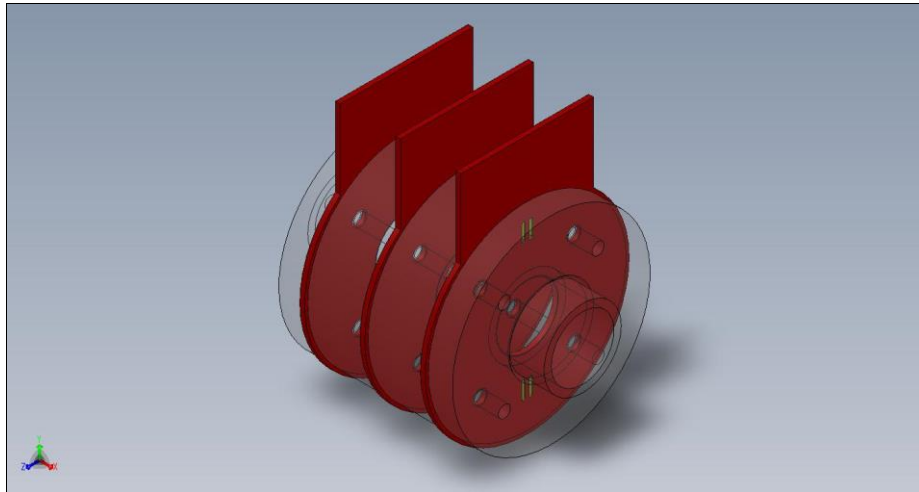
O desenvolvimento destes sensores foi planejado visando sua montagem em uma tubulação de diâmetro externo de 32mm e diâmetro interno de 26mm. O projeto e o protótipo desenvolvido estão representados na Figura 12.



**Figura 12 - a) Projeto da placa de circuito impresso b) Placa de circuito impresso montada com os eletrodos.**

Estes protótipos foram desenvolvidos em uma placa de circuito impresso de fibra de vidro, com 2 mm de espessura.

Para possibilitar a medição da velocidade da mistura foi montado o arranjo de sensores demonstrado na Figura 13, composto pelas placas de sensores, flanges de acrílico e *o-rings* para prover a vedação necessária. Este arranjo contém dois sensores espaçados em 5cm, desta forma é possível obter valores de velocidade a partir da medição do tempo de trânsito de uma bolha de um sensor para outro (eq. 2.15).



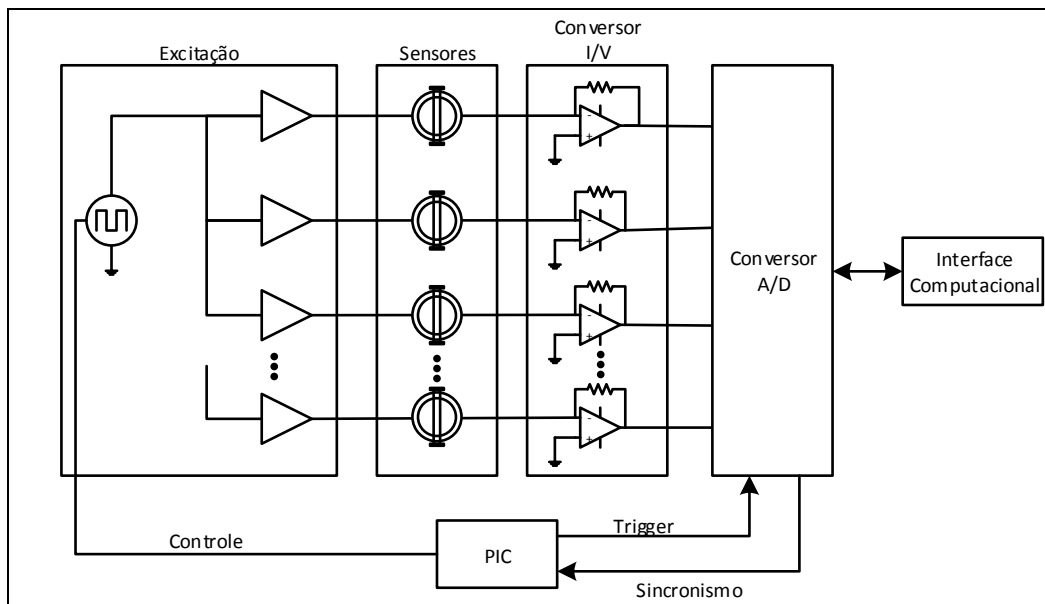
**Figura 13 - Arranjo de dois sensores resistivos espaçados de 5cm para medição indireta da velocidade do escoamento.**

Pode-se observar ainda na Figura 13 a existência de uma terceira placa de sensores no arranjo, que é localizada no centro da montagem e não é utilizada como um sensor. Os dois eletrodos dela são ligados ao aterramento funcional do sistema, composto por quatro hastes *copperweld* de 2,4 metros de profundidade, espaçadas a cada 2,4 metros lineares, a fim de eliminar possíveis interferências externas. Um tipo de interferência que poderia surgir sem a presença desta terceira placa e do aterramento é o efeito *cross talk*, o qual ocorre quando a excitação aplicada em um dos sensores acaba induzindo uma corrente no outro sensor, alterando os valores medidos, e por consequência aumentando a incerteza de medição do sistema.

### 3.1.2 CIRCUITO ELETRÔNICO

Para gerar o sinal de excitação, receber os sinais analógicos dos sensores e realizar a comunicação com a placa de aquisição USB foi desenvolvido um circuito eletrônico dedicado. A Figura 14 mostra o diagrama esquemático do sistema desenvolvido onde pode-se observar as conexões entre os blocos constituintes.





**Figura 14 – Diagrama esquemático do sistema desenvolvido.**

O circuito é composto de um microcontrolador (PIC 12F675), uma chave analógica (DG419DY), amplificadores operacionais (TL 084) e reguladores de tensão (LM 336Z25), além de elementos de conexão entre os sensores, bem como com a placa de aquisição de dados da National Instruments.

O microcontrolador tem basicamente três funções, estas são:

- Receber o sinal de sincronismo proveniente da interface USB;
- Enviar o sinal de *Trigger* para indicar o início da conversão A/D;
- Gerar os pulsos de controle para a chave analógica, responsável pela conversão CC/CA da *hardware*;

O Sinal de sincronismo, é conectado a uma entrada do microcontrolador, tem a função de garantir que o sinal de excitação seja gerado apenas quando o usuário iniciar o programa para a aquisição de dados. Para isso, uma porta de saída da placa de aquisição de dados é conectada via *flat cable* ao pino GPI5 do microcontrolador, e um teste condicional deste pino é feito na lógica programada no mesmo, que será detalhado no tópico 3.2.

O Sinal de *trigger* é uma saída do microcontrolador (pino GPI2), e é conectada à placa de aquisição de dados pelo mesmo cabo *flat*. Este sinal, por sua vez, tem a função de gerar uma habilitação para o aplicativo desenvolvido em LabVIEW, que faz um teste de detecção

de borda de subida (a ser melhor detalhado no item 3.3) para a leitura e posterior conversão analógico/digital.

Tal medida é tomada a fim de garantir que a conversão não seja efetuada, por exemplo, na passagem por zero do sinal de excitação, ou em pontos aonde seja detectada um efeito transitório da mudança de polaridade do sinal de excitação.

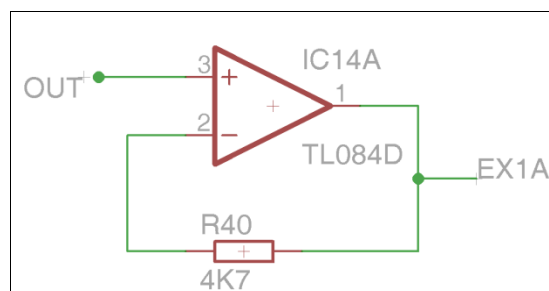
Os pulsos de controle são gerados pelo pino GPI4 do microcontrolador, e tem como função mandar para o pino “IN” da chave analógica, o sinal responsável pela mudança de estado da chave, que controla a geração dos semi ciclos positivos e negativos do sinal de excitação.

A chave analógica utilizada (DG419DY) possui internamente uma chave do tipo *center point*, e pode ser controlada pelo pino “IN”. O Lado normalmente fechado da chave é ligado à tensão já regulada  $-2,5V$ , e o ponto normalmente aberto conectado a tensão já regulada  $+2,5V$ . Com o pulso de controle “IN” em nível lógico 1, a chave muda de posição, fazendo desta forma, o surgimento de um sinal simétrico com 5 volts pico-a-pico no pino central, com frequência e razão cíclica idêntica ao pulso de controle.

Os reguladores ajustam a tensão de alimentação da eletrônica para um valor de  $2,5V$  e  $-2,5V$ , estas por sua vez seguem para as chaves analógicas. As chaves são acionadas pelo microcontrolador gerando um sinal quadrado simétrico de  $5V_{pp}$  com frequência de  $1,75kHz$ .

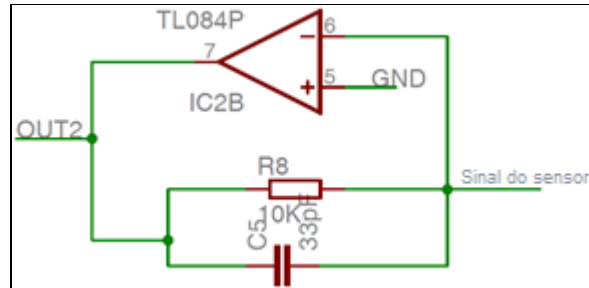
Os amplificadores operacionais têm duas funções: são utilizados como *buffers* na saída dos sinais de excitação, a fim de gerar uma impedância elevada entre o eletrodo de excitação e a porta de saída da chave analógica.

A Figura 15 representa o modelo de *buffer* utilizado.



**Figura 15 - Buffer utilizado na excitação do sensor resistivo.**

O outro par de amplificadores é responsável por fazer a conversão da corrente de condução em uma tensão proporcional, e recebe o nome de amplificador de transimpedância, conforme representado na Figura 16.

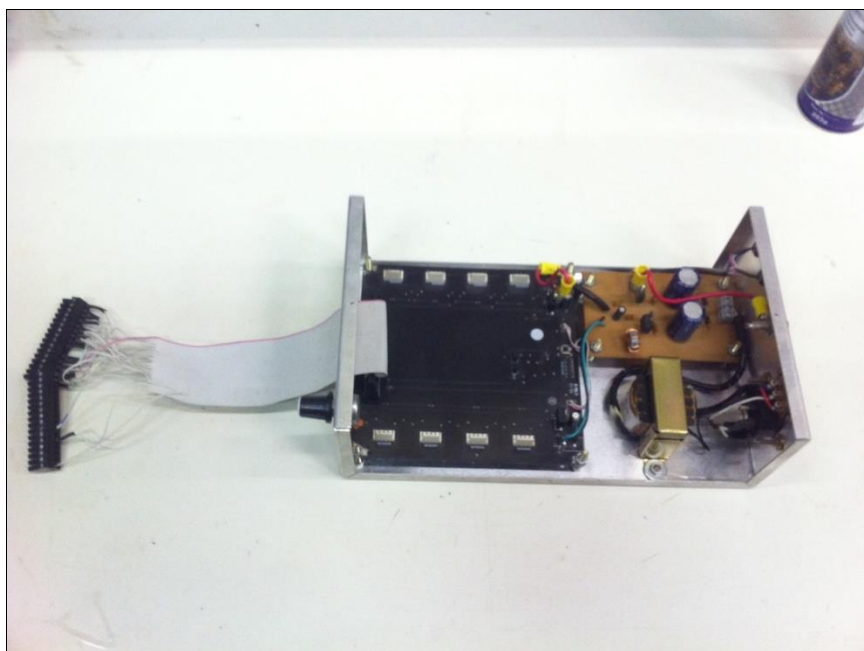


**Figura 16 - Amplificador de transimpedância utilizado na conversão corrente-tensão do sensor resistivo**

O valor obtido na saída deste amplificador é enviado para uma das entradas analógicas da placa que será ligada a interface USB, para conversão analógica-digital, e pré-processamento dos dados obtidos.

Dezesseis estágios de excitação e recepção foram reproduzidos nessa versão da eletrônica, a fim de garantir o objetivo de um sistema capaz de medir até dezesseis canais.

A Figura 17 apresenta o protótipo desenvolvido para dezesseis canais (oito sensores duplos).



**Figura 17 - Hardware completo desenvolvido para 16 canais de sensores.**

### 3.1.3 FIRMWARE

O *Firmware* desenvolvido para o microcontrolador PIC consiste em executar pequenas tarefas para garantir o sincronismo entre a geração do sinal de excitação dos eletrodos e a inicialização do aplicativo em LabVIEW, bem como pulsos de *trigger* para habilitar a aquisição das entradas analógicas da placa USB, além de ser responsável pela geração dos pulsos de controle da chave analógica.

Após as inicializações (Habilitação dos resistores de *pull up* internos, desabilitação de todas as interrupções, desabilitação de todos os comparadores, definição dos pinos como entradas e saídas digitais e desabilitação dos conversores analógico-digitais internos), o código consiste na geração de pulsos de controle e *trigger*, condicionais a uma entrada, proveniente da placa de aquisição de dados.

A Figura 18 representa o fluxograma e a sequência lógica do *firmware*.

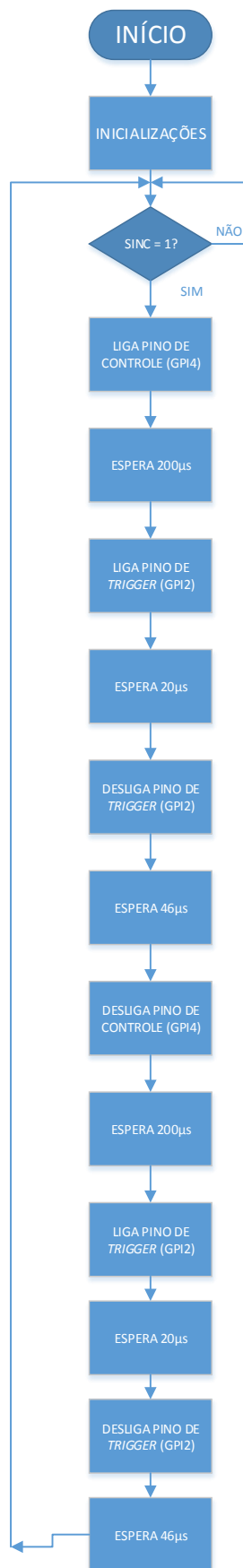


Figura 18 - Fluxograma do *firmware* embarcado no microcontrolador PIC 12F675.

O microcontrolador PIC 12F675 fica aguardando um pulso de sincronismo da placa de aquisição de dados para iniciar a geração dos pulsos que controlam a chave analógica responsável pela criação do sinal de excitação (controle), bem como gerar os pulsos que sincronizam a conversão analógico-digital da placa de aquisição de dados (*trigger*).

A sequência de pulsos gerados e recebidos pelo microcontrolador que compreendem a lógica do *firmware* desenvolvido está representada na Figura 19.

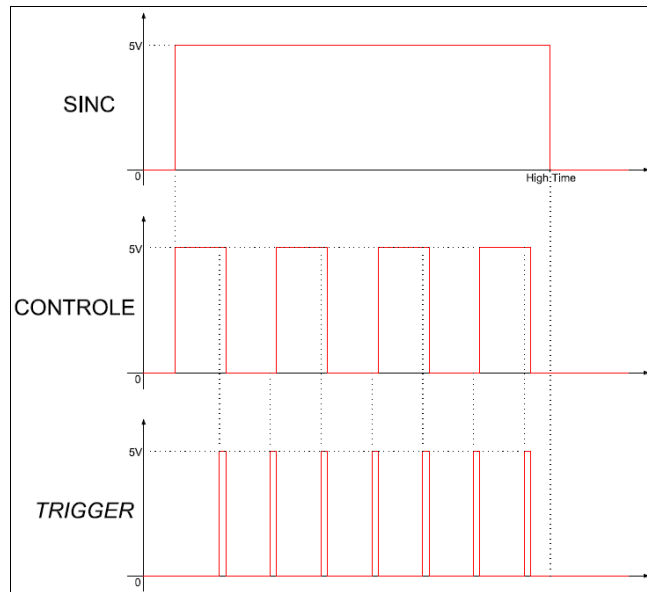


Figura 19 - Sinais de sincronismo, controle e trigger desejados.

### 3.2 APLICATIVO EM LABVIEW

O *software* utilizado para a implementação da interface com o usuário foi o LabVIEW, uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas Operacionais Windows, Linux e Solaris. Os principais campos de aplicação do LabVIEW são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. A interface com o usuário é feita pelo painel frontal e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo a seu desempenho é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível. Uma grande vantagem em relação às linguagens baseadas em texto é a facilidade com

que se criam componentes que se executam paralelamente. Mas também há como desvantagem que para pequenas mudanças podem ocasionar profundas reestruturações do programa, uma vez que sempre que se insere um novo bloco é necessário voltar a conectar e os símbolos para restabelecer o funcionamento.

Para que possa haver interação do *hardware* com o *software* é necessária a utilização de uma placa específica da National Instruments. Foi utilizada a placa “NI USB-6211”, conforme Figura 20, que possui 16 entradas analógicas, 2 saídas analógicas, 4 entradas digitais e 4 saídas digitais. Sua conexão com o computador é feita via porta USB e com o *hardware* por seus *inputs* e *outputs*.

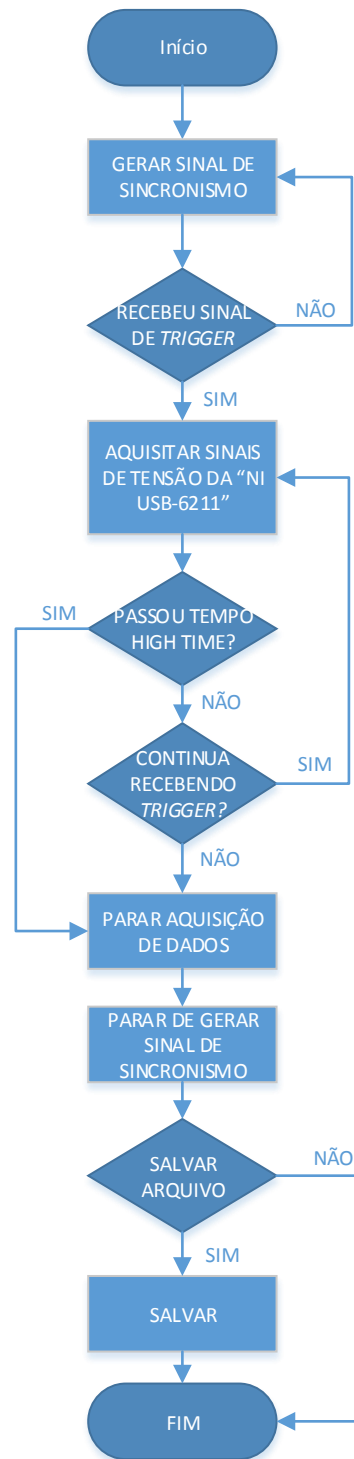


**Figura 20 - Imagem da placa NI USB-6211**

O aplicativo foi desenvolvido a partir da necessidade de uma interface para interação com o usuário. Nesta ferramenta é possível configurar parâmetros como tempo de aquisição, cálculo de média ou cálculo dos valores de altura de filme de líquido, assim sendo possível uma análise dos sinais adquiridos.

A escolha do *software* LabVIEW foi feita visando a maior viabilidade de programação e facilidade de contato com a ferramenta. A partir do momento em que foi preciso uma configuração de parâmetros pré-definidos pelo usuário, foi idealizado a programação de um aplicativo. Para finalizar o aplicativo, implementação do código e testes, trazendo novas funcionalidades e mais confiabilidade à ferramenta. A construção da interface foi baseada no

protótipo do *hardware* desenvolvido. A Figura 21 apresenta o fluxograma de funcionamento do aplicativo.



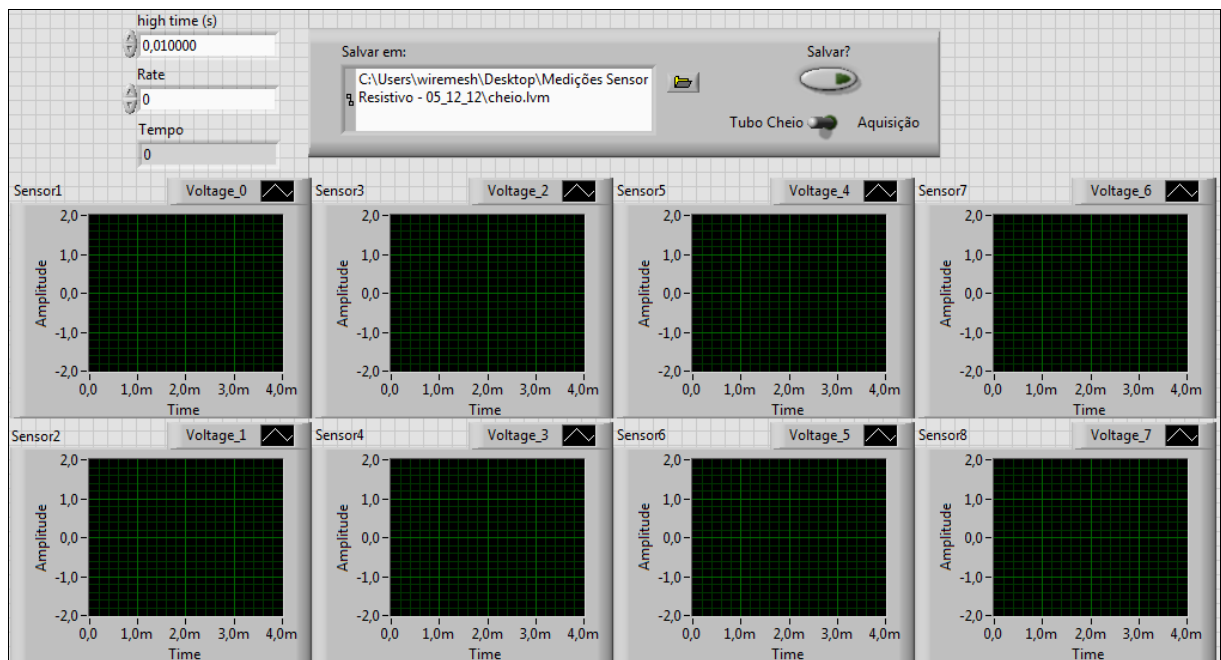
**Figura 21 - Fluxograma de funcionamento do aplicativo.**



### 3.2.1 AQUISIÇÃO DE SINAIS

Inicialmente é realizada aquisição, em tempo real, dos sinais recebidos pela placa de aquisição “NI USB-6211”. Através desta placa, é possível ler os dados recebidos no computador e tratá-los da forma adequada. Nesta etapa, os dados são apenas lidos, podendo escolher o tempo de aquisição necessário, e armazenados em uma planilha que será utilizada nas próximas etapas do *software*.

Na Figura 22, pode-se ver o “*Front Painel*” do *software*. Nele é possível alterar o tempo de aquisição no campo “*high time*”, se a aquisição irá ser salva, o caminho no qual irá ser salvo o arquivo gerado e se irá ser feita a aquisição de tubo cheio ou uma aquisição para cálculo de altura de líquido. Também é possível acompanhar um gráfico Amplitude vs Tempo, em tempo real, dos valores de tensão aquisitados.



**Figura 22 - Painel Frontal criado em LabVIEW para monitoração de medições do circuito.**

### 3.2.2 CÁLCULO DA MÉDIA DA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA TUBO CHEIO

Após a etapa de aquisição de dados, é necessário fazer o tratamento desses dados para que seja possível chegar ao valor final. Para isso, precisa-se ter um valor médio para a

aquisição de tensão com o tubo cheio de líquido. Para chegar à um resultado mais exato, faz-se a medição real da tensão em tubo cheio e tratam-se os dados a partir de um diagrama de blocos. A Figura 23 mostra em detalhe o cálculo feito para um sensor.

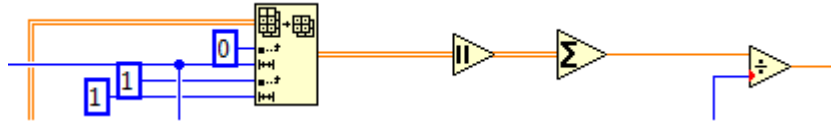


Figura 23 – Detalhe do diagrama de blocos do cálculo da média de tubo cheio de líquido para um sensor.

Ele utiliza os dados aquisitados na primeira parte do aplicativo e então o divide por sensor. Feito isso, é realizado o somatório dos módulos das tensões aquisitadas e em seguida dividido pelo número de amostras aquisitadas, obtendo assim a média dos módulos das tensões. Ou seja, o cálculo realizado é representado pela fórmula 3.1.

$$V_H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V(i)| \quad (3.1)$$

Onde  $V_H$  é a média da tensão para tubo cheio de líquido e  $N$  é a quantidade de valores aquisitados.

Após esta etapa, grava-se um arquivo com estes valores das médias, que irá ser utilizado na etapa de cálculo de altura de líquido.

### 3.2.3 CÁLCULO DA ALTURA DE LÍQUIDO

Esta é a última etapa do aplicativo desenvolvido em LabVIEW. Esta etapa não é executada em tempo real, sendo executada apenas após as medições dos escoamentos que se deseja analisar. O diagrama de blocos apresentado na Figura 24 mostra a programação feita para um sensor em detalhe.

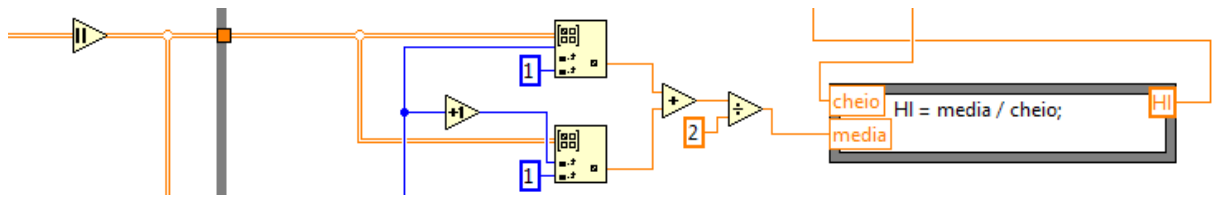


Figura 24 – Detalhe do diagrama de blocos desenvolvido no LabVIEW para o cálculo da altura de líquido.

Para serem feitos os cálculos da altura de líquido de cada sensor separadamente, o aplicativo separa os resultados de cada sensor para no final juntar todos esses valores e salvá-los em apenas um arquivo. Após esta separação, é feita a média dos valores absolutos do semiciclo positivo com o semiciclo negativo, obtendo assim um valor médio de tensão de um ciclo completo da aquisição dos dados. Para chegar ao valor final de altura de líquido ( $h_l$ ), é necessário que o valor médio de tensão seja dividido pelo valor médio de tensão obtido no item 3.3.1.2 (Cálculo da média da aquisição de dados para tubo cheio), ou seja, o valor de  $h_l$  é dado pela fórmula 3.2.

$$h_l = \frac{|V^+| + |V^-|}{V_H} \quad (3.2)$$

Sendo  $V^+$  a tensão do semiciclo positivo,  $V^-$  a tensão do semiciclo negativo e  $V_H$  a tensão média da aquisição para tubo cheio.

Este cálculo é feito para todos os valores de tensões medidos, e depois de finalizados os cálculos, é gerado um arquivo com os valores de altura de líquido, chegando assim ao objetivo final do aplicativo desenvolvido.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CONSTRUÇÃO DA ELETRÔNICA

Após a definição do circuito eletrônico e testes preliminares com protótipos, foi efetuada a construção de uma placa de circuito impresso na empresa CIRCUIBRAS. A placa foi construída em fibra de vidro, com espessura de 1mm e máscara de solda preta. Foi efetuada a montagem da mesma com os componentes adquiridos na empresa FARNEL. O Roteamento da placa levou em consideração a utilização da maioria dos componentes com tecnologia SMD (*Surface Mount Device*), a fim de garantir que a placa tivesse menores dimensões se comparadas com a utilização de componentes convencionais.

Todos os cuidados referentes à compatibilidade eletromagnética foram tomados durante o desenvolvimento da placa de circuito impresso, como por exemplo, plano de terra no *layer* de sinal da placa, blindagem de todos os terminais e cabos, alocação de componentes e possíveis fontes de interferência distantes dos amplificadores de transimpedância, e um *layer* dedicado apenas às alimentações.

A Figura 25 representa o projeto da placa de circuito impresso.

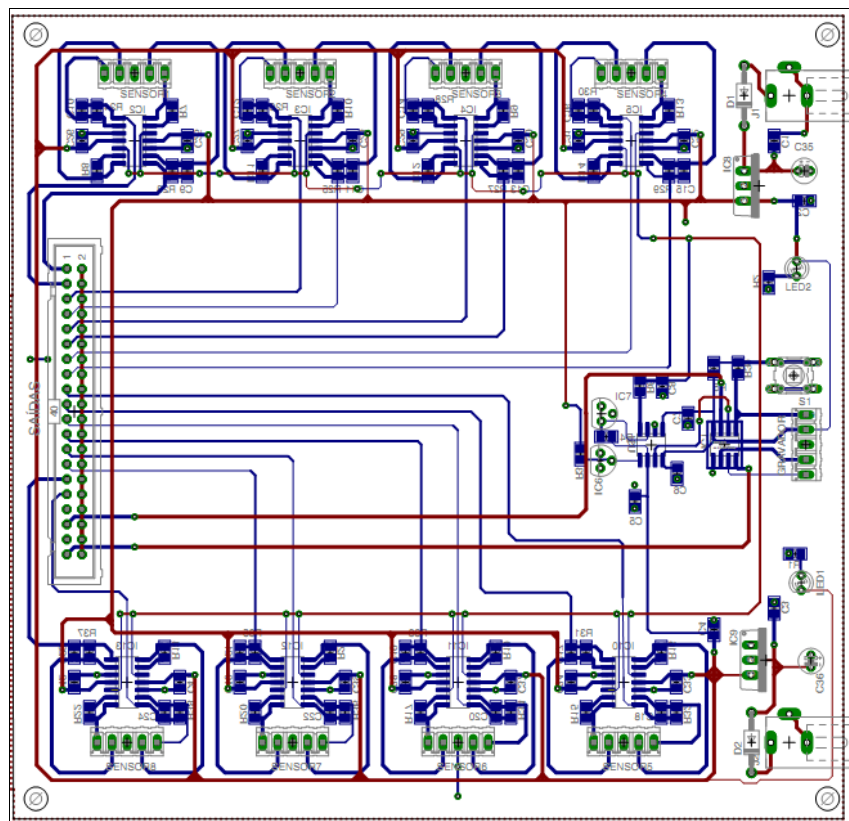
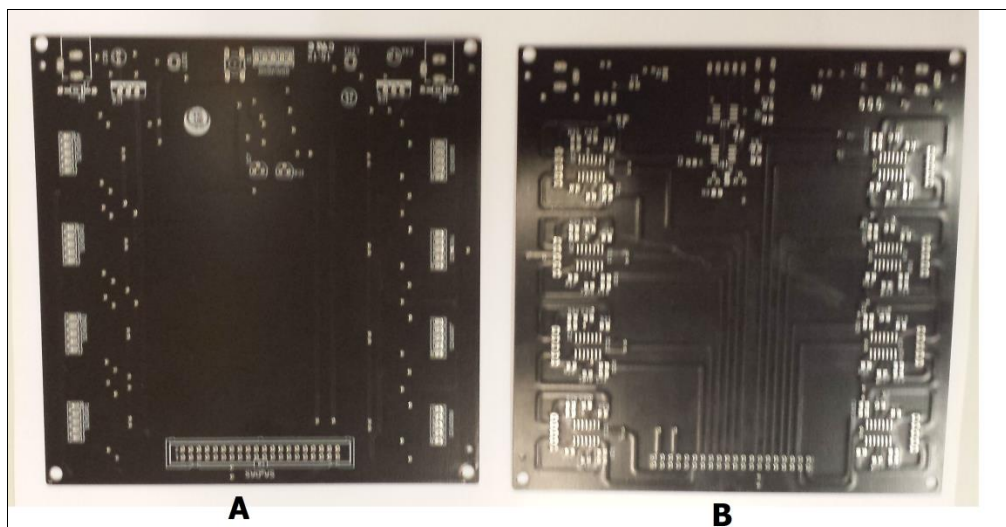


Figura 25 - Projeto da placa de circuito impresso desenvolvida.

A Figura 26 representa a placa fabricada, em A, face superior aonde foram roteadas as trilhas de alimentação, bem como conexões com os cabos dos sensores e cabo *flat* para interligação à placa USB, e em B, face inferior, aonde foram roteados todos os componentes eletrônicos responsáveis pelo funcionamento do sistema, estes, todos em tecnologia SMD.



**Figura 26 - A) Face superior da placa de circuito impresso; B) Face inferior.**

#### 4.2 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO.

Após adquiridos todos os componentes necessários para a construção da placa, e concluída a sua montagem, foram efetuados testes preliminares antes dos procedimentos de calibração e aquisição de dados com a planta em escoamento.

A primeira etapa de verificação consistiu em, após a gravação do *firmware*, efetuar a aquisição das formas de onda, para verificar parâmetros como frequência do sinal de controle, posição do pulso de sincronismo, bem como interação do pino sincronismo (teste condicional) em relação à geração dos sinais de controle e *trigger*.

As figuras 27 e 28 representam as formas de onda adquiridas com o circuito eletrônico em funcionamento.

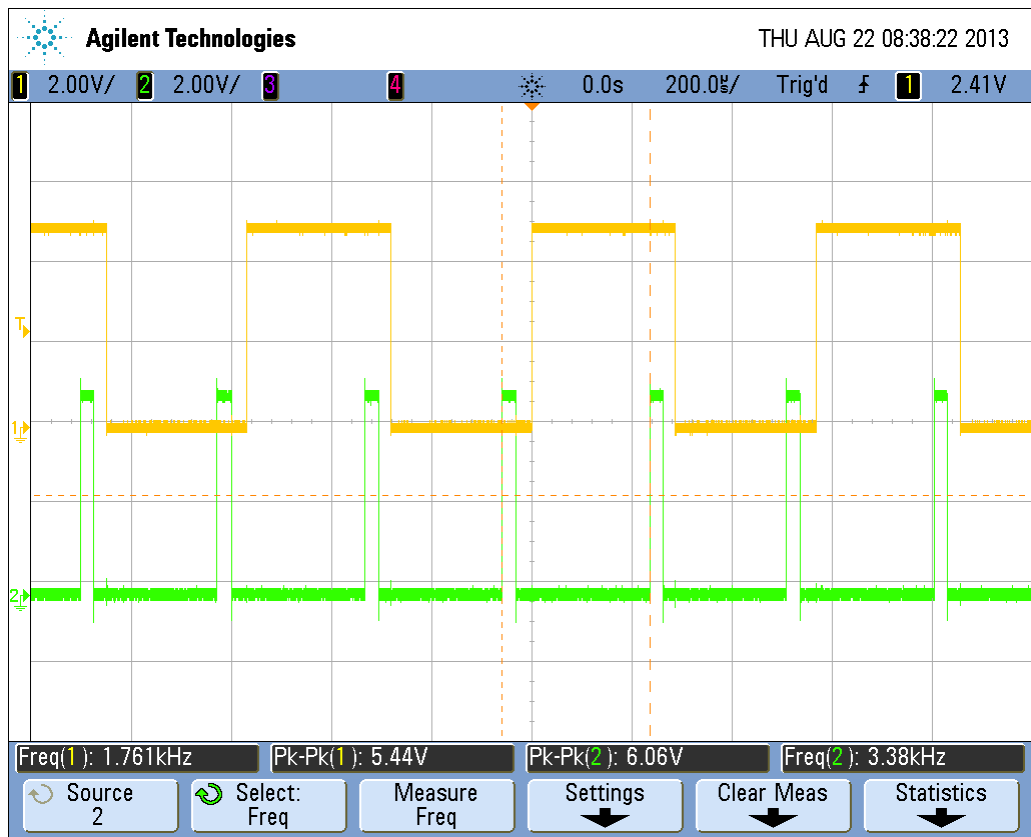


Figura 27 - Pulso de controle (canal 1) e pulso de *trigger* (canal 2).

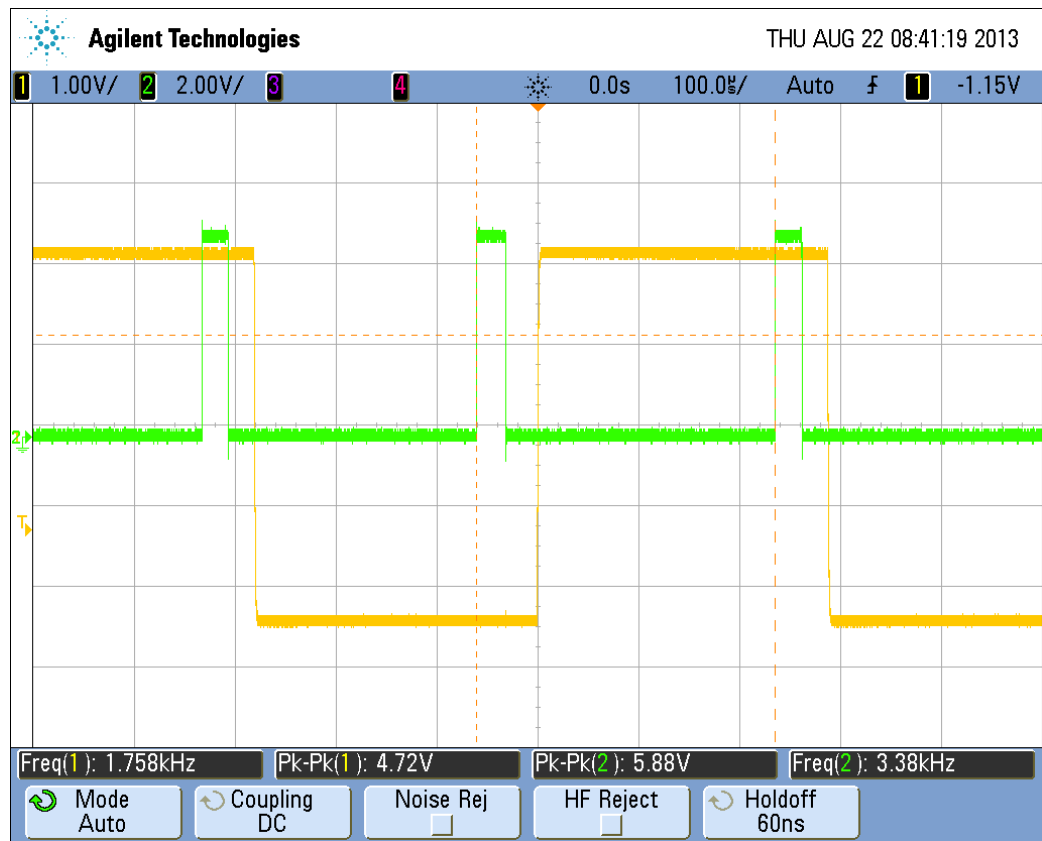
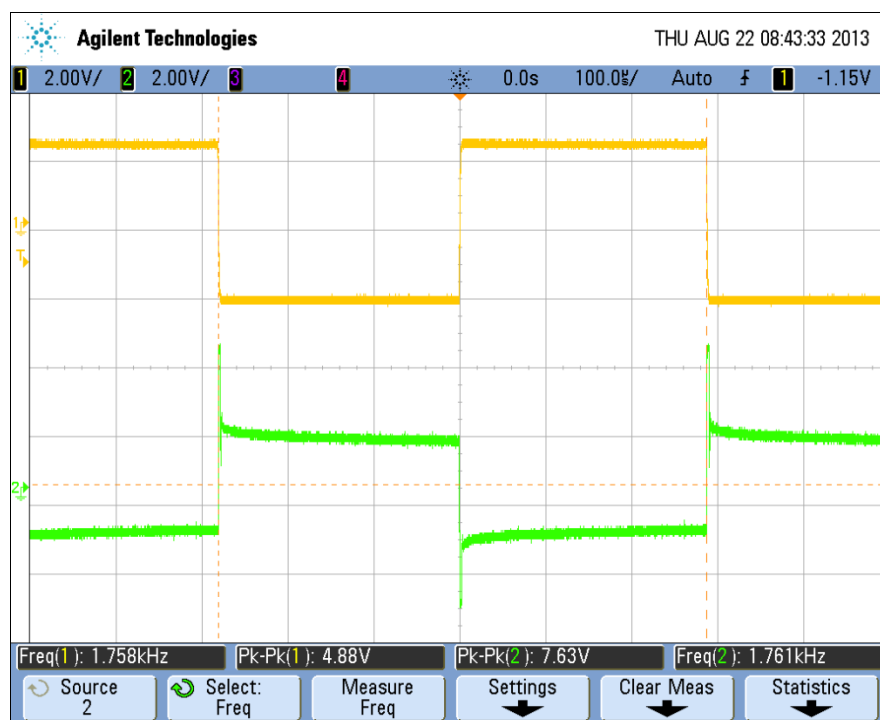


Figura 28 - Forma de onda de excitação (canal 1) e sinal de *trigger* (canal 2)

Depois de verificado o bom funcionamento da etapa micro controlada, foram efetuados testes a fim de verificar o funcionamento do amplificador de transimpedância. Ao se conectar um sensor a eletrônica e inseri-lo em água, foi verificada a tensão de resposta já amplificada, e com isso, levantadas experimentalmente algumas necessidades, como por exemplo, a inserção de um filtro RC após a chave analógica (conversão CC/CA) para que a variação entre semiciclo negativo e positivo não fosse tão acentuada, e dessa forma efeitos transitórios no sinal de resposta fossem menos significativos.

A Figura 29 representa a forma de onda de excitação, bem como o sinal de resposta após o amplificador de transimpedância.



**Figura 29 - Forma de onda de excitação (canal 1) e recepção (canal 2).**

#### 4.3 OBTENÇÃO DA CURVA DE AJUSTE

Como objetivo para este trabalho, esperou-se ter um sistema eletrônico e *software* para utilização na medição de fração de vazio em misturas bifásicas de gás e líquido, bem como medição indireta da velocidade da mistura passante na tubulação.

Para conseguir determinar a correlação entre altura do filme de líquido e tensão proporcional obtida pelo sensor, foram efetuados testes para obter a curva de ajuste que associa os valores de tensão a cada altura do filme de líquido.

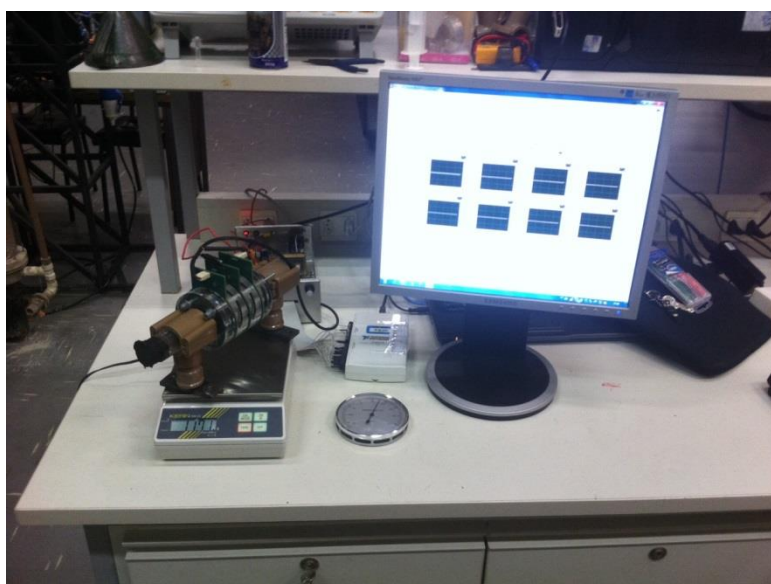
Tal procedimento foi efetuado estaticamente, com um arranjo de 2 sensores resistivos montados em uma seção de tubo de 26mm de diâmetro interno, mesmo diâmetro da planta onde pretende-se efetuar a monitoração. Efetuou-se a medição com a seção cheia de água (fração de vazio = 0) e foram efetuadas medidas gradativas com a redução da concentração de água até obter-se fração de vazio =1.

A Tabela 1 representa as condições ambientais e físicas das variáveis interessantes ao processo durante o procedimento de obtenção da curva de ajuste.

**Tabela 1: Condições físico-químicas durante o processo de obtenção da curva de ajuste.**

| TEMPERATURA AMBIENTE | TEMPERATURA DA ÁGUA | PRESSÃO ATMOSFÉRICA LOCAL |
|----------------------|---------------------|---------------------------|
| 12 [°C]              | 15 [°C]             | 908 [mBAR]                |

O Arranjo de obtenção da curva de ajuste está representado na Figura 30.



**Figura 30 - Arranjo montado para obtenção da curva de ajuste.**

Em cada ponto foram amostrados 30 segundos de medição pelo sistema, e após isso retirada à média de tensão durante o tempo de teste.



Entre o tubo cheio e o tubo completamente vazio, foram efetuadas 13 medidas de tensão média medida pelo sistema, a fim de ser possível observar o comportamento da curva que correlaciona fração de vazio e tensão medida, e traçar uma curva de tendência da fração de vazio *versus* tensão medida.

Para fins de análise da repetitividade do sistema, o procedimento de obtenção da curva de ajuste foi reproduzido dez vezes em dois dias diferentes, as seis primeiras sessões em um dia e as quatro seguintes no dia posterior, sendo efetuadas 13 medidas em cada ensaio.

O procedimento consistiu de encher uma seção de tubo com um par de sensores alocados e com o auxílio de uma seringa, retirar água com decrementos de 10g em cada um dos 13 passos, até se obter o tubo completamente vazio. Para isso, o arranjo foi inserido sobre uma balança de precisão, na qual se monitorava a massa do arranjo antes e depois da extração de líquido.

A partir da massa de água em gramas, do comprimento do tubo já conhecido, os valores de altura do filme de líquido foram encontrados indiretamente com o auxílio das equações 4.1 e 4.2. Considerando a densidade da água como 0,9991026g/cm (WEAST, 1973) é possível obter o volume de água dentro do tubo.

$$V = \frac{m}{d} \quad (4.1)$$

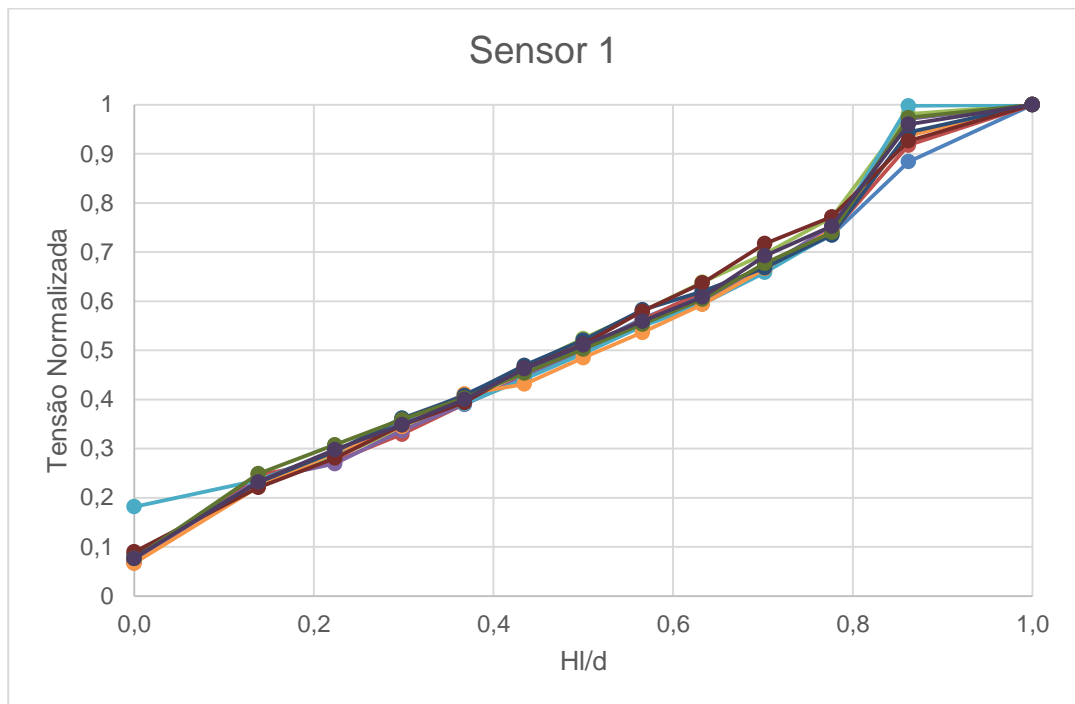
Onde  $V$  é o volume,  $m$  é a massa e  $d$  é a densidade.

A partir deste valor utiliza-se a equação 4.2, obtida através da geometria euclidiana, para através de um método computacional se obter o valor da altura do filme de líquido.

$$V = L(r^2 \cos^{-1}(\frac{r-h}{r}) - (r-h)\sqrt{r^2 - (r-h)^2}) \quad (4.2)$$

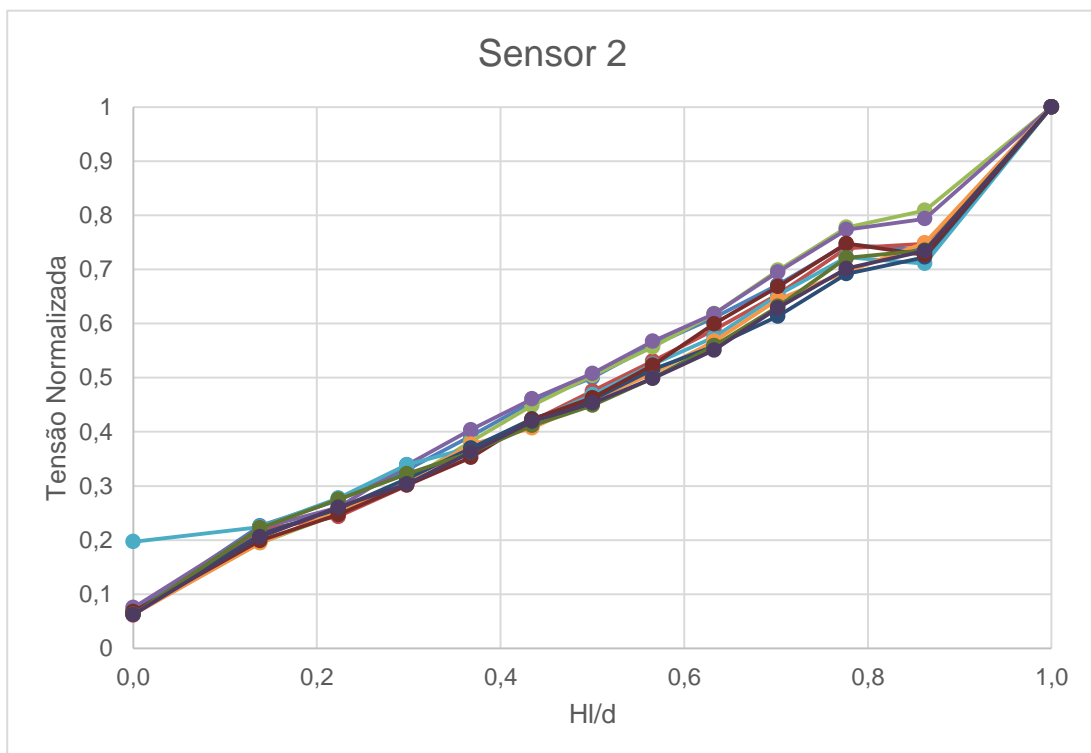
Onde  $L$  é o comprimento do tubo,  $r$  é o respectivo raio e  $h$  é a altura de filme de líquido.

As Figuras 31 e 32 representam as curvas de ajuste obtidas experimentalmente do arranjo dos dois sensores resistivos em funcionamento simultaneamente, sendo que a Figura 31 mostra as dez medidas obtidas para o sensor 1 e a Figura 32 apresenta as dez medidas obtidas para o sensor 2.



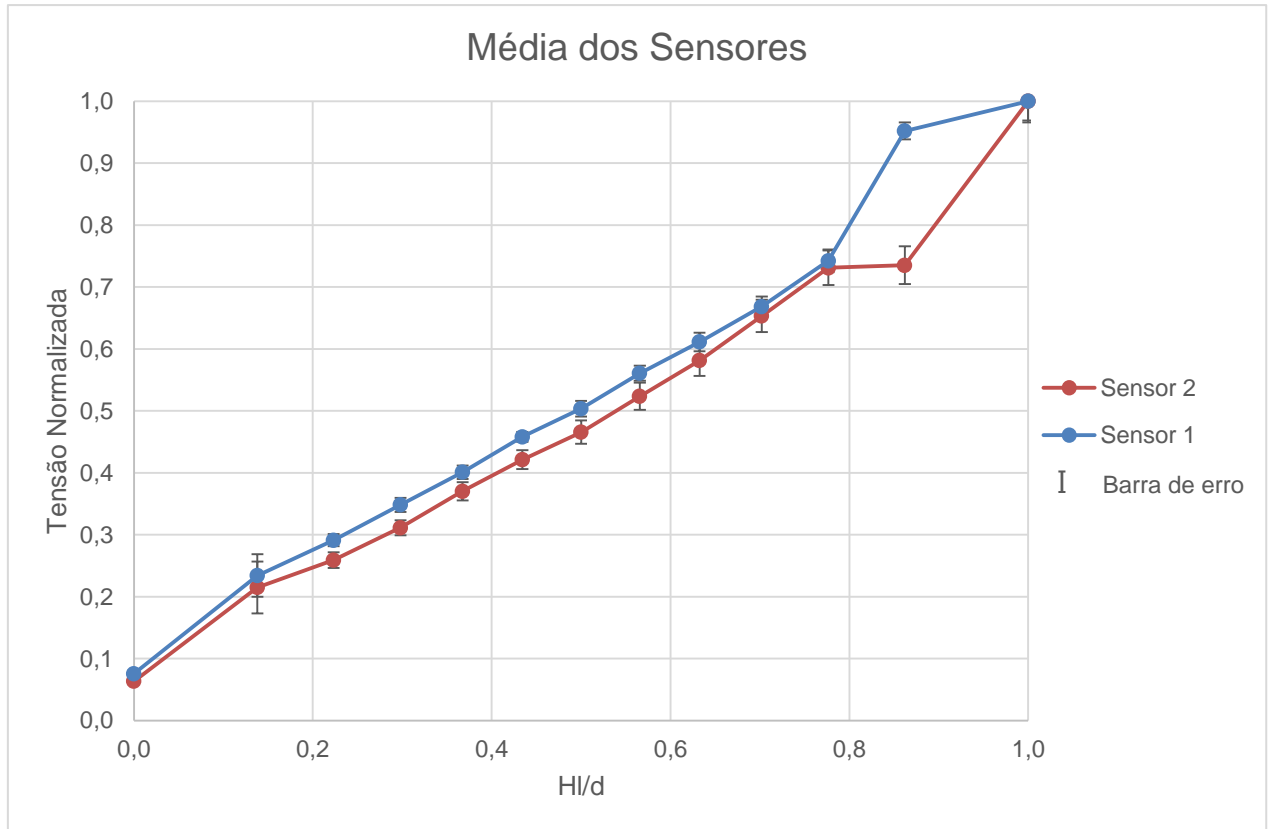
**Figura 31 - Curvas de ajuste coincidentes do sensor 1**

O eixo vertical apresenta os valores de tensão normalizados e o eixo horizontal representa a altura de filme de líquido  $HI$  dividida pelo diâmetro da tubulação.



**Figura 32 - Curvas de ajuste coincidentes do sensor 2**

A Figura 33 apresenta as curvas de ajuste para os valores médios obtidos em cada sensor.



**Figura 33 - Curvas de ajuste para os valores médios das 10 medições**

As barras de erro representadas são referentes ao desvio padrão entre as amostras coletadas para cada sensor. Nota-se que os maiores valores de erro se encontram no segundo e no nono ponto amostrado. No nono ponto o fenômeno pode ser explicado pelo efeito hidrofílico do acrílico, que faz com que a bolha gerada após a primeira retirada de água se desloque não uniformemente pelo tubo, apresentando valores de altura de filme diferentes para o mesmo ponto amostrado em cada uma das medições. No segundo ponto amostrado verifica-se a presença de um erro alto em função do efeito hidrofílico do aço inoxidável dos eletrodos, pois para a mesma altura de filme de líquido o sensor pode interpretar valores maiores em casos onde películas de água estejam alocadas entre os eletrodos.

Observa-se que os pontos medidos não começam em zero, isso se deve ao procedimento utilizado, pois como inicia-se a obtenção das curvas de ajuste com o tubo cheio

de água, ao final do procedimento (tubo vazio) existe ainda um pequeno resíduo de água entre os filamentos do sensor, havendo por este corrente de condução, e por consequência um valor de fração de vazio diferente de zero.

A não reprodutibilidade em alguns pontos das curvas levantadas experimentalmente pode ter sido ocasionada devido a fatores como, por exemplo, desnível da mesa utilizada no procedimento, possíveis pequenos vazamentos e a temperatura da água, fator físico que influencia diretamente a condutividade da fase líquida, o que representa valores de tensão diferentes, mesmo que para o mesmo nível de líquido.

#### 4.4 RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO SENSOR

A partir dos resultados obtidos e da eletrônica em funcionamento, surgiu à necessidade da aplicação do sistema completo para monitoramento de escoamento bifásico gás-líquido do tipo golfadas com leve mudança de direção.

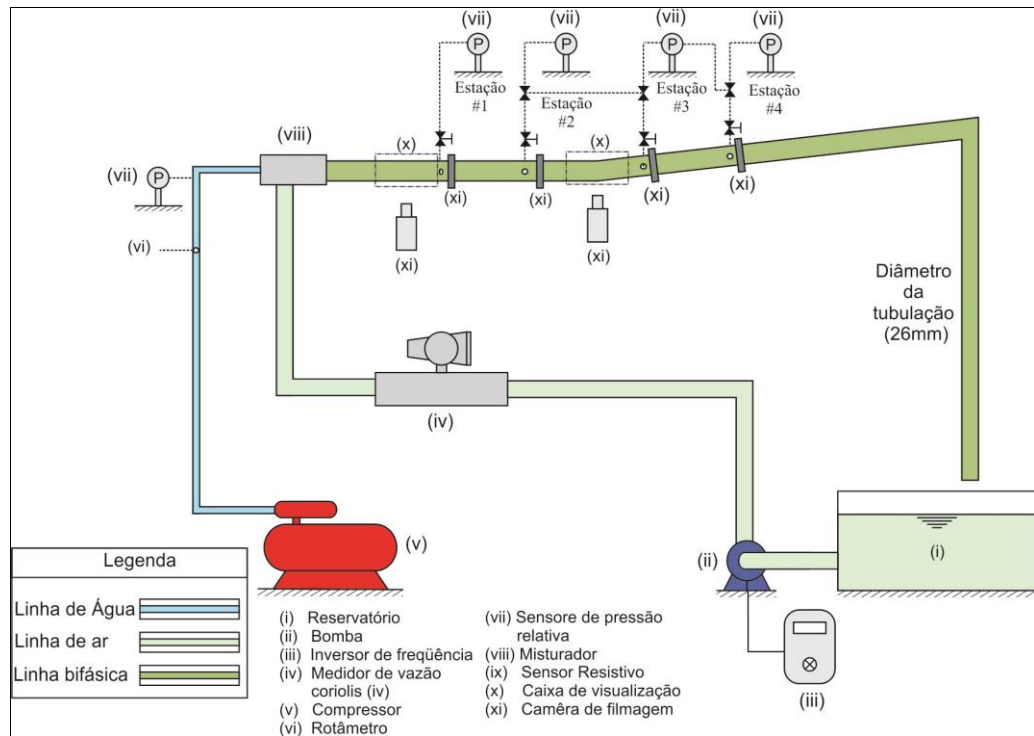
Após a verificação do bom funcionamento e a possibilidade da aplicação do sistema o aluno do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) Víctor Enrique Llantoy Parra efetuou diversas medições com 4 pares de sensores resistivos sobre uma planta de escoamento com mudança de direção, a fim de ter como um comparativo os resultados obtidos via simulação e modelagem computacional e os valores obtidos via processamento computacional dos sinais adquiridos pela eletrônica.

A planta experimental em estudo foi a existente no laboratório de ciências térmicas (LACIT) localizada na sala B-006 da UTFPR campus Curitiba.

A linha foi construída com uma tubulação de acrílico de diâmetro interno de 26mm e diâmetro externo de 32mm. Ao início da linha encontra-se um misturador, responsável por unir o ar comprimido injetado na planta junto à água em vazão, comandada pelo conjunto de uma moto-bomba e um inversor de frequência.

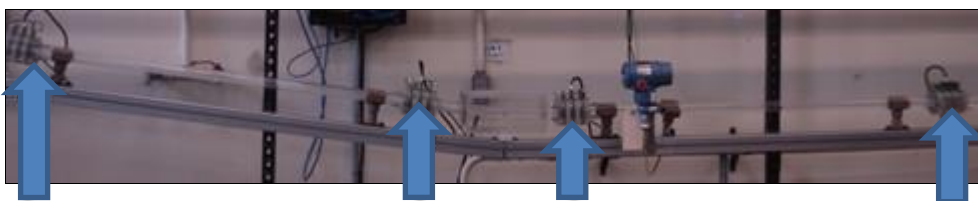
O sistema consiste basicamente em fazer com que a mistura gás-líquido circule pela tubulação entre o misturador e o reservatório, em um *loop*, aonde se deseja monitorar a vazão a partir de instrumentações comerciais instaladas, para fins de comparação e calibração entre os instrumentos desenvolvidos para estas medições.

A Figura 34 representa a planta em análise, bem como pontos aonde os quatro pares de sensores resistivos foram instalados, além de toda a instrumentação necessária para o estudo.



**Figura 34 - Representação esquemática da planta em estudo (PARRA, 2013).**

O escopo de estudo do usuário consistiu em fazer a análise do comportamento do escoamento bifásico no padrão golfadas em linhas com leve mudança de direção, afim de simular processos e condições de produção e extração de petróleo. Para isso, a linha em estudo foi projetada para ter uma inclinação ascendente proposital de  $7^\circ$ . A Figura 35 representa a linha montada com os sensores resistivos instalados.

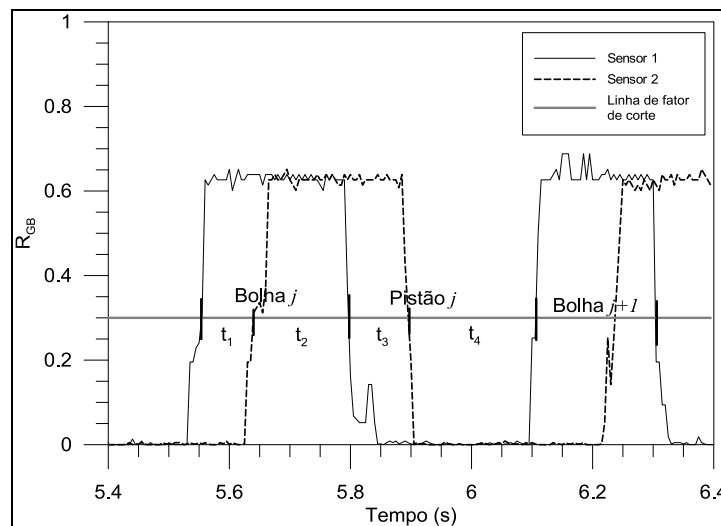


**Figura 35 – Planta experimental com 4 pares de sensores resistivos instalados.**

A partir da curva de ajuste obtida, pode-se obter a fração de vazio instantânea em cada sensor. Com este valor, encontrar indiretamente outros parâmetros do escoamento em estudo, como por exemplo, identificar o pistão de líquido e a bolha alongada.

Para isso, é traçada uma linha chamada de linha de fator de corte, onde todo sinal elétrico superior à linha corresponde ao pistão de líquido, e os pontos abaixo da linha são as bolhas alongadas.

A Figura 36 representa um processamento do sinal obtido com a linha de fator de corte escolhida pelo usuário.



**Figura 36 - Fração de vazio e linha de corte de um par de sensores (PARRA, 2013).**

Este fator de corte (0,3) foi obtido empiricamente pelo usuário referente à comparação entre os resultados obtidos com o sensor resistivo e a câmera de alta resolução utilizada para captação e posterior processamento de imagens.

A partir da Figura 36 é possível observar o intervalo de tempo entre cada pistão ou bolha alongada vista por cada sensor. Esse intervalo de tempo é utilizado para medição indireta da velocidade.

A câmera de alta resolução utilizada no comparativo tem o esquema de ligação representado na Figura 37, e um exemplo de imagem captada é representada na Figura 38.

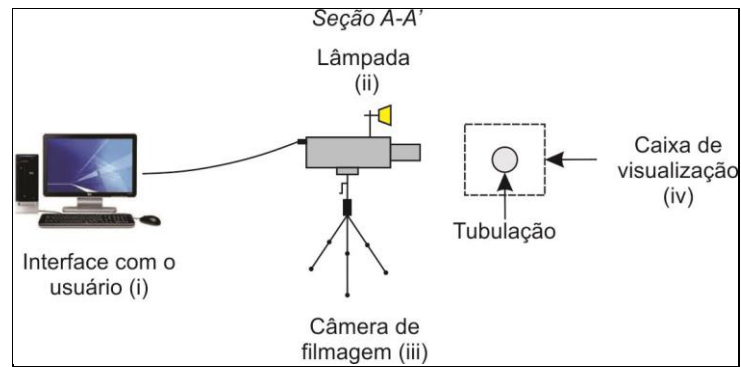


Figura 37 - Esquema de ligação da câmera de alta resolução (PARRA, 2013).

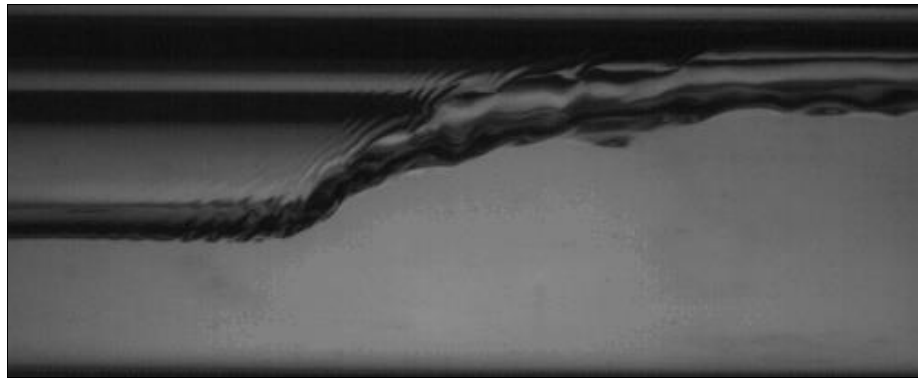


Figura 38 - Imagem captada com a câmera de alta resolução

Extraídos e processados os dados obtidos pelos sensores resistivos, câmera de alta resolução e simulação numérica do escoamento e tubulação em estudo, foram medidos vários pontos de velocidade de translação da bolha. A Figura 39 representa uma curva comparativa entre as velocidades de translação da bolha obtidas pelo sensor resistivo e câmera de alta resolução.

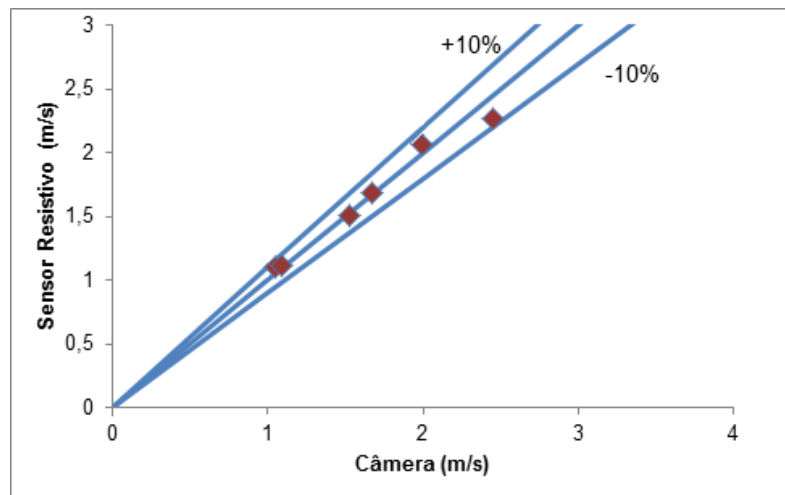


Figura 39 - Comparativo de velocidade entre Câmera e Sensor resistivo.

No gráfico da Figura 39 o eixo das abcissas representa a velocidade obtida pela câmera de alta resolução, e o eixo das ordenadas, a velocidade obtida pelo sensor resistivo. Foram comparados cinco pontos de velocidade em cada um dos métodos experimentais. O objetivo do gráfico é comparar os métodos experimentais entre eles, não fixando um dos métodos como padrão de medição, mas sim validar a resposta obtida pelo sensor resistivo frente a um método já validado e aceito em estudos experimentais.

Para fazer a comparação, é utilizado um par de retas auxiliares que representam uma tolerância percentual de  $\pm 10\%$ , valores diferentes de velocidade em cada um dos métodos são enquadrados dentro desta tolerância. Observa-se valores de dispersão inferiores a 10% em todos os pontos amostrados, o que prova a alta eficiência do sensor desenvolvido.



## 5 CONCLUSÕES

A partir da revisão bibliográfica e levantamento do histórico de desenvolvimento de sensores baseados em impedância elétrica, pode-se concluir que o sensor desenvolvido neste trabalho apresenta um grande potencial de aplicação em sistemas de escoamento bifásico gás-líquido, em especial pelo seu baixo custo e robustez mecânica para linhas de escoamentos pressurizadas.

Levando em consideração as curvas de ajuste obtidas, pode-se concluir que a concentração de líquido em gás (altura do filme de líquido) segue uma linearidade com a tensão de saída do sensor. Tal característica leva a uma maior facilidade na conversão de tensão em altura de filme de líquido, e por consequência menor complexidade de processamento computacional para cálculo de outros parâmetros do escoamento como comprimento médio da bolha, velocidade, entre outros.

Experimentalmente verificou-se que o sensor em questão possui erro inferior a 10% em relação a câmera de alta resolução utilizada, o que representa grandes possibilidades de aplicação do sensor nos campos anteriormente mencionados.

Os cuidados com interferência eletromagnética foram importantes e bem visualizados, levando em consideração que a relação sinal ruído, durante o processo de medição de escoamentos bifásicos se mostrou baixo, não gerando, dessa forma, leituras falsas referentes a altura do filme de líquido.

Para trabalhos futuros sugere-se a implementação de um circuito eletrônico com conversão analógica-digital integrada, junto a um protocolo de rede industrial para comunicação, a fim de aumentar a possibilidade de aplicação do sistema em processos industriais.

## 6 REFERÊNCIAS

AHMED, W.H.; ISMAIL, I.B. Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements. *Recent Patents on Electrical Engineering*, v. 1, n. 1, 2008.

AMARAL, C. E. F. ALVES, R. F. DA SILVA, M. J. et al. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal turbulent two-phase slug flows. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Anais.*, 2011. Denver, USA.

AUBURN INTERNATIONAL INC. Ronald L. Dechene. Vapor liquid fraction determination. US4063153A, 31 ago.1976, 13 dez. 1977.

BROWN, R.C., ANDREUSSI, P., ZANELLI, S. The use of wire probes for the measurement of liquid thickness in annular gas-liquid flows. *Can. J. Chem. Eng.*, 1978.

CAO, Z.; WANG, H. X.; YANG, W Q; YAN, Y.A calculable sensor for electrical impedance tomography. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 140, n. 2, p. 156-161, 2007.

CECCIO, S. L. E GEORGE. A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flow. *Journal Fluids Engineering*, 1996.

CROWE, C. T. *Multiphase Flow Handbook*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U.A Novel Needle Probe Based on High-Speed Complex Permittivity Measurements for Investigation of Dynamic Fluid Flows. *Instrumentation*, v. 56, n. 4, p. 1249-1256, 2007.

DA SILVA M.J. *Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging*. Dresden: Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Dresden, 2008. 170p. Tese (Doutorado).

DOS SANTOS, E. N. *Técnicas para Extração de Parâmetros de Escoamentos Bifásicos em Regime Intermitente Utilizando o Sensor Wire-Mesh*. 2011. 120p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2011.

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

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

FALCONE, G.; HEWITT, G.F.; ALIMONT, C. *Multiphase Flow Metering: Principles And Applications*. Oxford, UK: Elsevier, 2009.

FROST & SULLIVAN. *World Markets for Sensors in the Chemicals and Petrochemicals Industries*. N304 - 42, 2008.

GHAJAR, A. J. Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes: a tutorial. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 27, p. 46-73, 2005. scielo.

JOHANSEN, G. A. Nuclear tomography methods in industry. *Nuclear Physics*, v. 752, 2005.

LLANTOY PARRA, Víctor Enrique, *Escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com leve mudança de direção*, 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LIBERT, N.; DA SILVA, M.J.; LIPINSKI, L. *Capacitive Probe for gas "liquid flow characterization* 2011.

LUCAS, G.P.; ALBUSAIKI, K. An axial scanning system for investigating vertical gas-liquid flows in the slug and bubbly-slug transition regimes. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 9, 1998.

MANTLE, M. D.; SEDERMAN, A. J. Dynamic MRI in chemical process and reaction engineering. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, v. 43, 2003.

MAYOR, T. PINTO, A.; CAMPOS, J. Vertical slug flow in laminar regime in the liquid and turbulent regime in the bubble wake - Comparison with fully turbulent and fully laminar regimes. *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 14, 2008. Elsevier Ltd.

PALLÀS-ARENY, R.; WEBSTER, J.G. *Sensors and Signal Conditioning*. John Wiley & Sons, 2001.

RAHIMAN, M. H. F. RAHIM, R. A.; TAJJUDIN, M. Ultrasonic transmission-mode tomography imaging for liquid/gas two-phase flow. *IEEE Sensors Journal*, v. 6, 2006.

SUPARDAN, M. D. MASUDA, Y. MAEZAWA, A.; UCHIDA, S. The Investigation of gas holdup distribution in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography. *Chemical Engineering Journal*, v. 130, 2007.

WEAST, C. R. *Handbook of Chemistry and Physics*, Boca Raton, FL: CRC Press, Inc., 1974

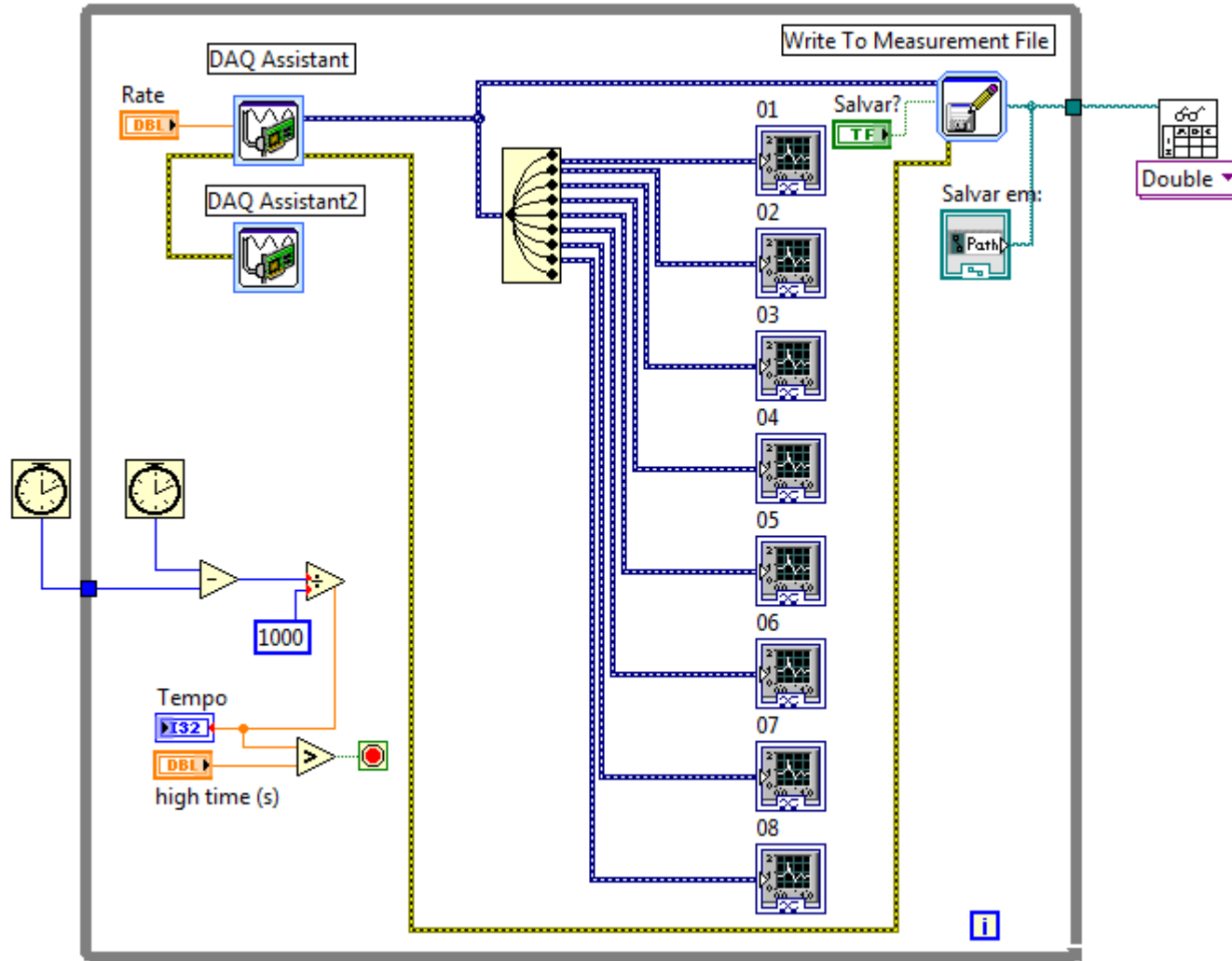
YANG, H.; KIM, D. K.; KIM, M. H. Void fraction measurement using impedance method, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 14, Oct. 2003.

YANG, M. SCHLABERG, H. I. HOYLE, B. S. BECK, M. S.; LENN, C. Real-time ultrasound process tomography for two-phase flow imaging using a reduced number of transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 46, p. 492-501, 1999.

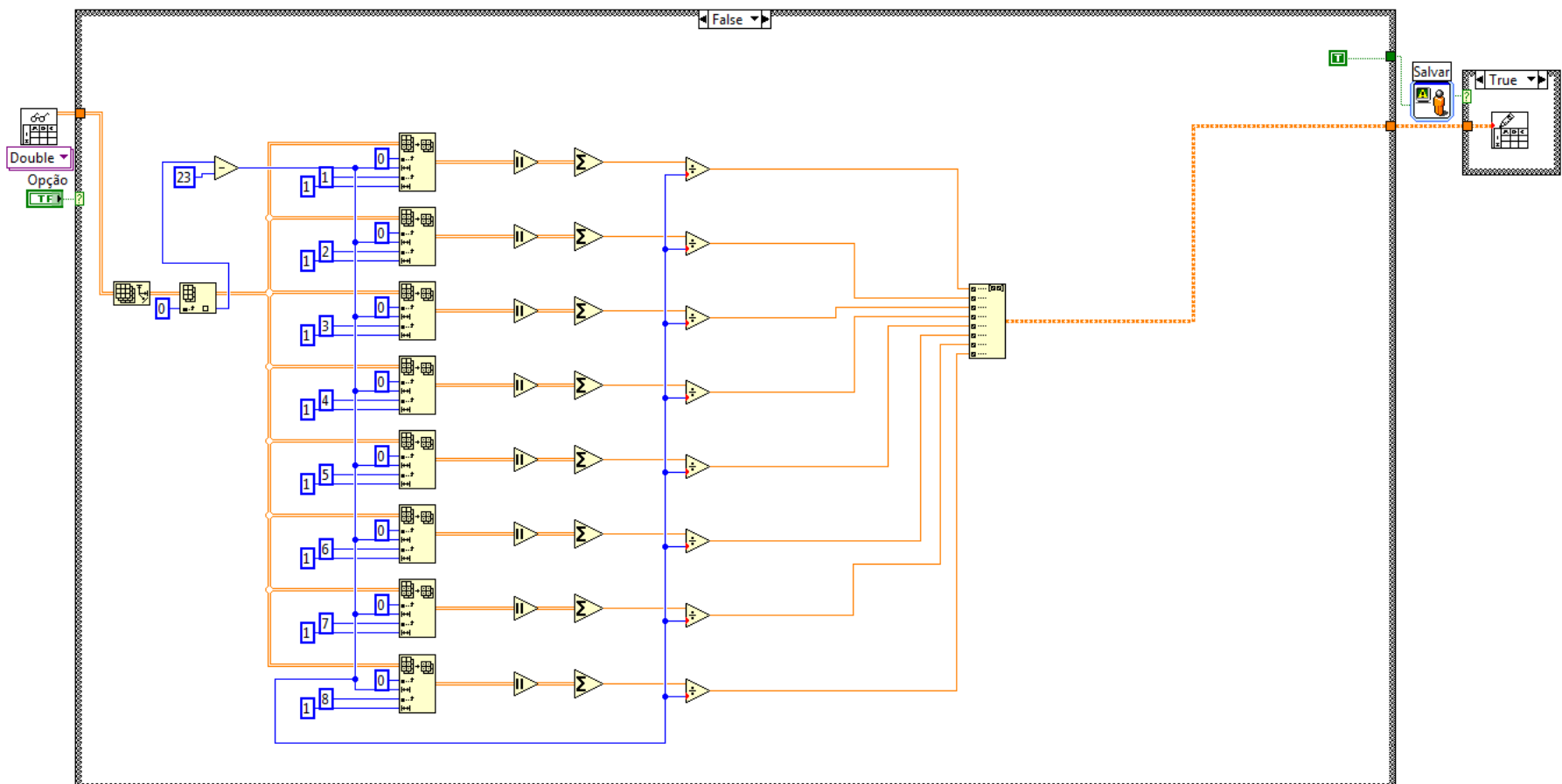
ZABARAS, G.; DUKLER, A. E. *Vertical Upward Cocurrent Gas-Liquid Annular Flow*. University of Houston, 1986.

7 APÊNDICES

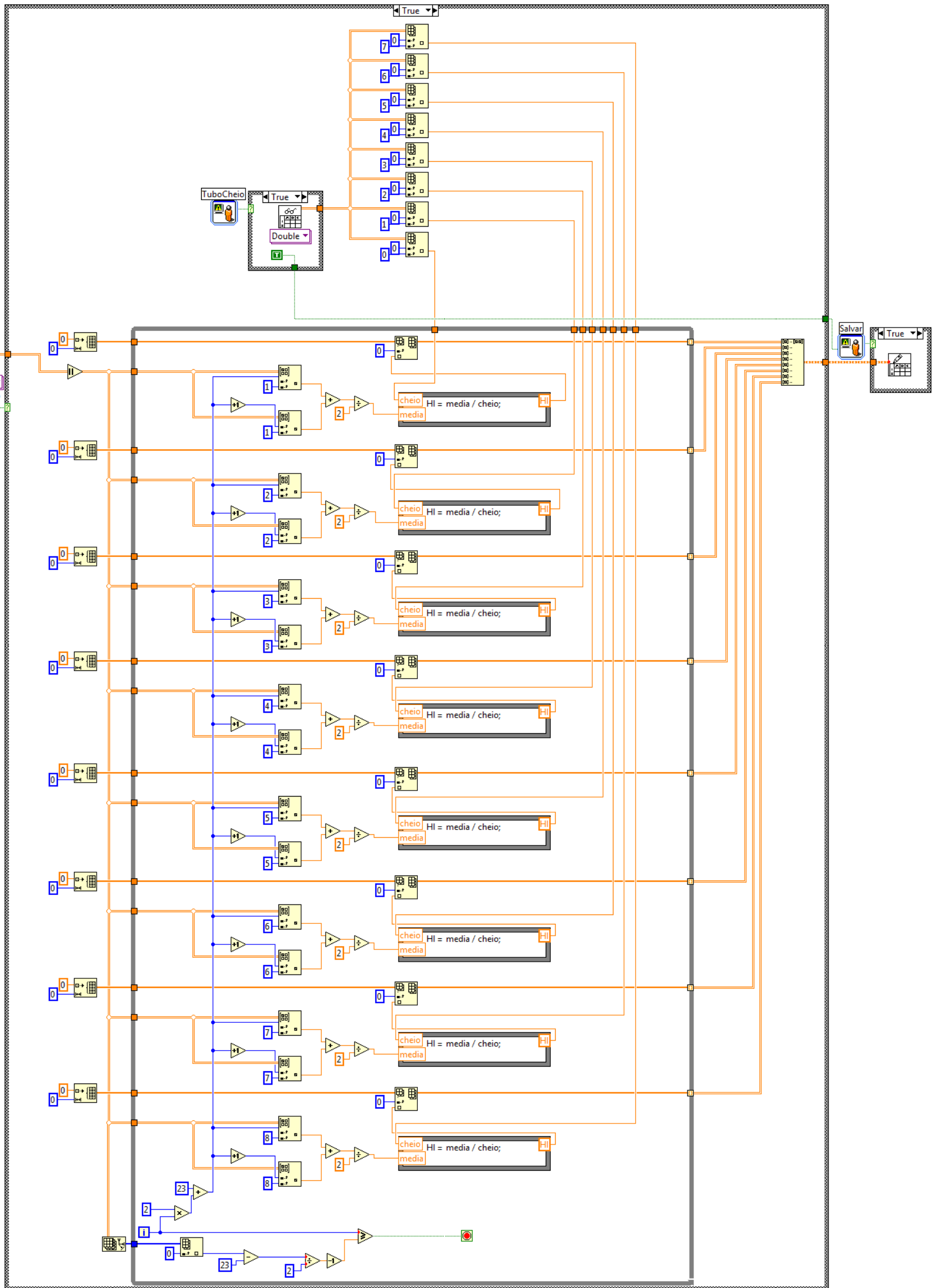
APÊNDICE A – Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido em LabVIEW para aquisição de dados



APÊNDICE B - Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido no LabView para o cálculo da média de tubo cheio de líquido.



APÊNDICE C - Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido em LabView para cálculo da altura de líquido.



APÊNDICE D - Painel Frontal criado em LabVIEW para monitoração de medições do circuito.

