

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**ABEL MACHADO COUTINHO FILHO  
GUILHERME YUDI SUNAGA  
JOELTON DEONEI GOTZ**

**APLICAÇÃO DE SENSORES DE IMPEDÂNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE  
VAZÃO EM ESCOAMENTO BIFÁSICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA  
2017**

ABEL MACHADO COUTINHO FILHO  
GUILHERME YUDI SUNAGA  
JOELTON DEONEI GOTZ

**APLICAÇÃO DE SENSORES DE IMPEDÂNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE  
VAZÃO EM ESCOAMENTO BIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Marco José da Silva, Dr.

Coorientador: Alúcio do Nascimento Wrasse, Me.

CURITIBA

2017

Abel Machado Coutinho Filho  
Guilherme Yudi Sunaga  
Joelton Deonei Gotz

## Aplicação de sensores de impedância para determinação de vazão em escoamento bifásico

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

Curitiba, 16 de Fevereiro de 2017.

---

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia De Controle e Automação do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

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

---

Aluísio do Nascimento Wrasse, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Co-orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Aluísio do Nascimento Wrasse, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Daniel Rodrigues Pipa, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eduardo Nunes dos Santos, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

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

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação.

## RESUMO

COUTINHO FILHO, Abel Machado; SUNAGA, Guilherme Yudi; GOTZ, Deonei Joelton. Aplicação de Sensores de Impedância Para Determinação de Vazão em Escoamento Bifásico. 2017. 77 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba 2017.

Diante das perspectivas referentes ao descobrimento do Pré-Sal no Brasil, há um crescimento da demanda por tecnologias avançadas de instrumentação utilizadas na indústria petrolífera. Neste contexto, novas tecnologias de sensores têm sido desenvolvidas e disponibilizadas através de projetos de pesquisa, tendo como objetivo determinar com maior precisão e em tempo real parâmetros de monitoramento referentes à produção e ao transporte do petróleo. O presente trabalho propõe o estudo e aplicações do sensor *wire-mesh*, em conjunto com um tubo de Venturi, em escoamentos bifásicos, com o objetivo de estimar parâmetros individuais das fases do escoamento como fração de vazio, velocidade e vazão. Serão abordados experimentos utilizando técnicas tais como a correlação cruzada, a qual por meio de dois sensores *wire-mesh* dispostos na tubulação e espaçados entre si, busca-se avaliar a velocidade do gás. Tendo em vista as limitações dessa técnica diante de alguns tipos de escoamento, recorre-se ao uso do tubo de Venturi como alternativa para a continuidade da investigação proposta neste estudo. Além disso, quatro modelos baseados na equação clássica para o cálculo da vazão de escoamentos através de dispositivos deprimogênios são apresentados para o cálculo da vazão dos escoamentos bifásicos, nas condições testadas. Através de um circuito experimental, foram obtidos dados de velocidades superficiais das fases em cenários variados de um escoamento horizontal, levando em consideração o seu mapa de fluxo e desta forma viabilizando a determinação do sensor com a melhor resposta. A principal contribuição deste trabalho é, portanto, denotar os principais pontos positivos e negativos de cada dispositivo de medição de vazão avaliado e, assim, fundamentar o uso de cada um deles em cenários particulares no âmbito de escoamentos bifásicos. Como possível substituto do sensor *wire-mesh*, foi também preliminarmente testado um sensor em haste e sua eletrônica de operação, sendo este mais simples e menos intrusivo.

**Palavras-chave:** Sensor *wire-mesh*; Escoamento multifásico; Tubo de Venturi; Velocidade superficial; Mapa de fluxo.

## ABSTRACT

COUTINHO FILHO, Abel Machado; SUNAGA, Guilherme Yudi; GOTZ, Deonei Joelton. Application of Impedance Sensors for Determination of the Flow Rate in Two-Phase Flow Regime. 2017. 77 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba 2017.

By the discovery of Pre-Salt oil reserves in Brazil, a growing demand for advanced instrumentation found place. For instance, new sensor technology in flow rate measurement has been developed and made available through research projects, aiming to determine with greater accuracy to monitor in real time parameters related to the production and transportation of gas-oil mixtures. This work proposes the study and application of the wire-mesh sensor in conjunction with a Venturi tube applied in two-phase flows, in order to estimate individual parameters of the phases flow such as void fraction, velocity and flow rate. Data from two consecutive wire-mesh sensors installed in a pipe and cross-correlation techniques is used to estimate gas flow velocity. Since the limitations of this technique on some types of flow, we resort to the use of Venturi as an alternative for further investigation. In addition, four models from literature for the classical relationship between pressure drop and flow rate through constrictions have been implemented for the estimation of the two-phase flow rates and tested. Through an experimental flow loop, data of the superficial velocities of the phases were obtained in various scenarios of a horizontal flow, taking into account their flow map and thereby enabling the determination of the sensor with the best response. The main contribution of this study is therefore to point out the main positive and negative aspects of each flow rate measurement device tested, and thus base the use of each of them in particular conditions under two-phase flow. As a possible substitute for the wire-mesh sensor, a rod sensor and its operating electronics were also preliminarily constructed and tested, which is simpler and less intrusive than the mesh sensor.

**Keywords:** *Wire-mesh* sensor; Multiphase flow; Venturi tube; Superficial speed; Flux Map.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Padrões de escoamento vertical ascendente gás-líquido. ....	15
Figura 2 - Padrões de escoamento horizontal bifásico.....	16
Figura 3 - Mapa de fluxo de Taitel e Dukler para escoamento em tubulação horizontal em um duto de 2,5 cm de diâmetro, a 25°C e 100 kPa. ....	18
Figura 4 - Modelo simplificado de um sensor capacitivo .....	19
Figura 5 - Sonda condutiva do tipo agulha.....	20
Figura 6 - Representação esquemática do sensor <i>wire-mesh</i> .....	23
Figura 7 - Imagem de dois sensores <i>wire-mesh</i> em perspectiva acoplados por um duto .....	24
Figura 8 - Esquema de medida da eletrônica do sensor <i>wire-mesh</i> .....	25
Figura 9 - Aquisições pelo sensor <i>wire-mesh</i> em escoamento vertical .....	26
Figura 10 - Histórico da amostra em função do tempo da fração de vazio com velocidade de escoamento líquida ( $J_l = 0.15$ m/s).....	29
Figura 11 - Esquema de escoamento num duto redutor de seção circular. <i>S.C.</i> : superfície de controle. <i>V.C.</i> : volume de controle. $\vec{n}$ - Vetor unitário normal à superfície.....	31
Figura 12 - Fluxo em regime permanente, Venturi. ....	32
Figura 13 - Circuito Experimental de escoamentos bifásicos do LACIT.....	42
Figura 14 - Tubo de Venturi, vista em corte lateral.....	43
Figura 15 - Modelagem tridimensional do Tubo de Venturi.....	44
Figura 16 - Tubo de Venturi do LASII.....	44
Figura 17 - Detalhamento técnico de medidas do Tubo de Venturi, dividido em três regiões. ....	45
Figura 18 - Detalhamento de partes A, B e C do Tubo de Venturi. ....	45
Figura 19 - Mapa de fluxo para a bancada experimental referente a escoamentos bifásicos horizontais.....	47
Figura 20 - Séries temporais do ponto H15.....	47
Figura 21 - Gráfico $J_G$ Estimado x $J_G$ Medido. Reta tracejada ( $Y = 1.2X$ ) – Desvio de mais 20% do $J_G$ medido em relação ao estimado. Reta contínua – Valores sem desvio. Reta tracejada ( $Y = 0.8X$ ) – Desvio de menos 20% do $J_G$ medido em relação ao estimado. ....	49

Figura 22 - Tubo de Venturi da planta experimental do LACIT, UTFPR Curitiba. ....	50
Figura 23 - Tubo de Venturi e sensores <i>wire-mesh</i> , planta experimental LACIT - UTFPR Curitiba. ....	51
Figura 24 - Topologia de Howland Modificado. ....	59
Figura 25 - Simulação de circuito Howland Modificado no software Proteus. ....	60
Figura 26 - Gráfico comparativo entre valores de tensão medidos e simulados. ....	61
Figura 27 - Topologia Howland Modificado com valores alterados de resistência. ...	61
Figura 28 - Gráfico comparativo entre valores de tensão medidos e simulados. ....	62
Figura 29 - Tubo de cobre fabricado para utilização como prova do circuito de Howland Modificado. ....	63
Figura 30 - Desenho Técnico em vista frontal, do tubo experimental para o sensor de Howland Modificado. ....	63
Figura 31 - Gráfico contendo as medições realizadas com o sensor de impedância.....	64
Figura 32 - Gráfico de Froude e modelo de velocidade Drift. ....	73
Figura 33 - Topologia Howland básico. ....	74
Figura 34 - Relação entre a Tensão de saída e de entrada. ....	75
Figura 35 - Corrente de saída e respectivo valor rms. ....	76
Figura 36 - Layout da placa PCB com os componentes alocados. ....	77
Figura 37 - Layout PCB, circuito de Howland Modificado. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das constantes determinadas por Zhang et al. (2005) para os padrões borbulhado, pistonado, ondulado e anular de um escoamento horizontal.....	40
Tabela 2 - Dados de velocidades superficiais do gás obtidos a partir da técnica de Correlação cruzada, e as velocidades superficiais do gás do mapa de fluxo da planta. ....	48
Tabela 3 - Dados de referência e fração de vazio.....	52
Tabela 4 - Resultados obtidos com o emprego do uso do tubo de Venturi em conjunto com o sensor capacitivo <i>wire-mesh</i> para obtenção das velocidades das fases.....	57
Tabela 5 - Valores práticos circuito de Howland melhorado. ....	64
Tabela 6 - Dados experimentais do tubo de Venturi. ....	70
Tabela 7 - Dados Experimentais do tubo de Venturi, continuação.....	70
Tabela 8 - Escorregamento e título do gás para cada amostra de dados coletada...	71
Tabela 9 - Número de Reynolds para cada amostra coletada. ....	71
Tabela 10 - Massas específicas corrigidas para cada amostra coletada. ....	72
Tabela 11 - Fator de correção e vazão mássica. ....	72
Tabela 12 - Valores da velocidade de referencia da mistura e da velocidade média do gás, oriunda da correlação cruzada com os sensores <i>wire-mesh</i> .....	73

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
2.1 ESCOAMENTOS BIFÁSICOS .....	13
2.1.1 Definições .....	13
2.1.2 Padrões de escoamentos .....	14
2.1.3 Padrões em tubos horizontais.....	16
2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO DE SISTEMAS MULTIFÁSICOS.....	18
2.2.1 Sondas de impedância elétrica.....	18
2.2.1.1 Sensores Capacitivos .....	19
2.2.1.2 Sensores resistivos.....	20
2.2.2 Tomografia aplicada a escoamentos multifásicos .....	21
2.2.2.1 Tomografia elétrica .....	21
2.2.2.2 Tomografia ótica e por ultrassom.....	21
2.2.3 Sensor <i>wire-mesh</i> .....	22
2.2.3.1 Princípio de funcionamento sensor <i>wire-mesh</i> .....	22
2.2.3.2 Processamento e análise dos dados .....	26
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DAS VELOCIDADES DAS FASES.....	28
2.3.1 Correlação Cruzada .....	28
2.3.2 Tubo de Venturi.....	29
2.3.2.1 Lei da Continuidade .....	30
2.3.2.2 Lei de Bernoulli .....	32
2.4 MODELOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO BIFÁSICA POR PRESSÃO DIFERENCIAL.....	33
2.4.1 Modelo Homogêneo.....	36
2.4.2 Chisholm (1967).....	37
2.4.3 Zhang et al. (1992).....	39
2.4.4 Correlação de Zhang et al.(2005) .....	39
<b>3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>41</b>
3.1 PLANTA EXPERIMENTAL .....	41

3.2 DIMENSIONAMENTO DO TUBO VENTURI.....	42
<b>4 MÉTODOS E RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
4.1 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS DAS FASES ATRAVÉS DA CORRELAÇÃO CRUZADA .....	46
4.2 METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES E VELOCIDADES SUPERFICIAIS DAS FASES .....	50
4.2.1 Análise dos Dados Coletados .....	52
4.2.2 Metodologia de Determinação das Velocidades Superficiais.....	54
4.3 PROPOSTA DE SENSOR EM HASTE E ELETRONICA PARA OPERAR O SENSOR .....	58
4.3.1 Princípio de funcionamento da fonte de corrente de Howland.....	59
4.3.2 Simulação e Resultados .....	60
4.3.3 Sensor Experimental.....	62
4.3.4 Experimento.....	63
<b>5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE I - DADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE II - CIRCUITO DE HOWLAND CLÁSSICO .....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de um país é a sua capacidade de prover logística e energia para o desenvolvimento de sua produção, com segurança, condições competitivas e ambientalmente sustentáveis (TOLMASQUIM, 2012). Neste cenário, com o descobrimento do Pré-Sal, o Brasil tem perspectivas de se tornar um dos grandes exportadores de petróleo e derivados do mundo. O potencial avaliado revela que possuímos uma das maiores reservas petrolíferas do planeta, possibilitando assim a obtenção da conquista da autossuficiência em relação ao mineral e à sua exportação (Petrobras Magazine, 2016).

No entanto, a exploração do petróleo torna-se limitada se não houver responsabilidade e técnicas precisas para sua extração. É neste contexto que a instrumentação se torna uma importante ferramenta para o monitoramento e o controle da extração do petróleo de forma sustentável e segura (DA SILVA et al., 2008).

Numa tubulação de petróleo o fluxo presente é multifásico, ou seja, há a presença de duas ou mais substâncias fisicamente distintas e imiscíveis, as quais podem ser de mesmo estado físico, como água e óleo, ou de estados físicos diferentes como óleo e gás (FALCONE et al., 2009). Em muitas situações, as condições de eficiência e segurança dos equipamentos e processos, são influenciadas por este tipo de escoamento. Portanto, extrair características e parâmetros a partir de observações e medições experimentais é de grande importância, pois permitem o entendimento dos fenômenos correlatos os quais influenciam no desempenho dos processos envolvidos.

Dentre as variáveis a serem medidas na caracterização de escoamentos bifásicos visando a otimização da produção, citam-se a fração e a velocidade das fases. Normalmente as medidas de vazão são feitas a partir da separação das fases presentes na tubulação, para que então medidores monofásicos, como o tubo de Venturi para líquidos e turbinas para gases, meçam a vazão individual de cada fase. A desvantagem no uso de separadores de fases é a limitação quanto ao tipo de escoamento (não é aplicável em todo tipo de padrão de escoamento), o alto custo

(comparado com medidas feitas sem separação das fases) e grande espaço físico ocupado pelo separador (tipicamente os separadores pesam 15 000 quilos quando vazios). Por esse motivo as pesquisas atualmente têm como desafio o desenvolvimento de técnicas de medida de vazão multifásica atendendo os requisitos de precisão necessários (THORN et al., 2013).

Neste trabalho será estudada a aplicação de duas técnicas de medição de velocidade e vazão multifásica. Em um primeiro momento será avaliada a aplicação da técnica de correlação cruzada nos dados de um sensor *wire-mesh* para medida da velocidade do gás em escoamentos ar-água. Posteriormente será utilizado um medidor de pressão diferencial (tubo de Venturi) e um sensor de fração de vazio para que, a partir da fusão dos dados de ambos os sensores, possa se obter a vazão multifásica. Dentre os diversos tipos de sensores disponíveis para análise de escoamentos multifásicos, o sensor *wire-mesh* destaca-se por sua boa resolução temporal e espacial e, portanto, será usado em ambas as técnicas citadas anteriormente. Desta forma surge como motivação principal do trabalho o estudo dos dados do tubo de Venturi juntamente com o sensor *wire-mesh* para medição de velocidade das fases em escoamentos multifásicos. Como proposta de sensor menos intrusivo, será apresentado um circuito simples para operação de um sensor em haste com carretel aterrado.

## 1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo uma investigação referente à aplicação do sensor *wire-mesh* e do tubo de Venturi, na análise de escoamentos multifásicos, com o objetivo de combinar informações de fração de fase (obtidos com o sensor *wire-mesh*) com os dados de velocidade de mistura multifásica (obtidos através de medidores de diferencial de pressão, p.ex. tubo de Venturi). Após a obtenção dos dados de ambos os sensores, através de experimentos em uma planta piloto no Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT), será desenvolvido um *script* em *software* MATLAB para o processamento dos dados e a validação do sistema. Metodologias experimentais serão abordadas em cenário com escoamento horizontal ar-água, buscando afirmar a eficiência dos sensores frente à determinação da velocidade das fases presentes na planta em um comparativo com valores teóricos como referência. Na última etapa será desenvolvido um sensor de topologia fonte de corrente para

medição da resistência elétrica de um fluido condutor, visando desenvolver uma nova técnica de caracterização de fluidos em escoamentos, que gere menores perturbações na distribuição espacial das fases.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho, com abordagem de conceitos e características referentes aos escoamentos multifásicos, como o comportamento e distribuição espacial das fases. Ainda, serão discutidas técnicas de caracterização de escoamentos desenvolvidas em trabalhos anteriores, assim como a descrição de conceitos importantes dos principais dispositivos experimentalmente explorados tais como o sensor de corrente de Howland, sensor *wire-mesh* e do tubo de Venturi.

### 2.1 ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

#### 2.1.1 Definições

Escoamentos bifásicos se caracterizam por apresentar duas substâncias imiscíveis que se deslocam simultaneamente ao longo de uma tubulação. O escoamento gás-líquido, por exemplo, é comum nos processos industriais tais como plantas de produção e transporte de óleo e gás, e ainda se contextualiza para fins de testes e monitoramento de poços de petróleo, configurando-se como importante fator a ser estudado. A abordagem deste trabalho terá como alvo os escoamentos do tipo gás-líquido. A seguir serão apresentados alguns conceitos fundamentais relativos a esta temática.

- Fração de vazio

A Fração de Vazio ( $\alpha_g$ ) é dada pela razão entre a área ocupada pelo gás ( $A_g$ ) e a área total ( $A_t$ ) da seção transversal do duto conforme observado na equação 2.1.

$$\alpha_g = \frac{A_g}{A_t} \quad (2.1)$$

Considerando como de valor unitário a área total da seção transversal do duto, é possível encontrar a fração de líquido ( $\alpha_l$ ) a partir da fração de gás utilizando a equação 2.2.

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (2.2)$$

- Velocidade superficial

Velocidade superficial é definida como a velocidade da fase caso esta estivesse escoando sozinha na tubulação e de modo constante. A velocidade superficial sendo representada por  $J$ (m/s) é dada pela razão entre a vazão volumétrica  $Q$  e a área total da seção transversal  $A_t$  da tubulação. A equação 2.3 mostra a velocidade superficial para o gás e a equação 2.4 para o líquido.

$$J_{gas} = \frac{Q_{gas}}{A_t} \quad (2.3)$$

$$J_{liq} = \frac{Q_{liq}}{A_t} \quad (2.4)$$

- Velocidade da mistura

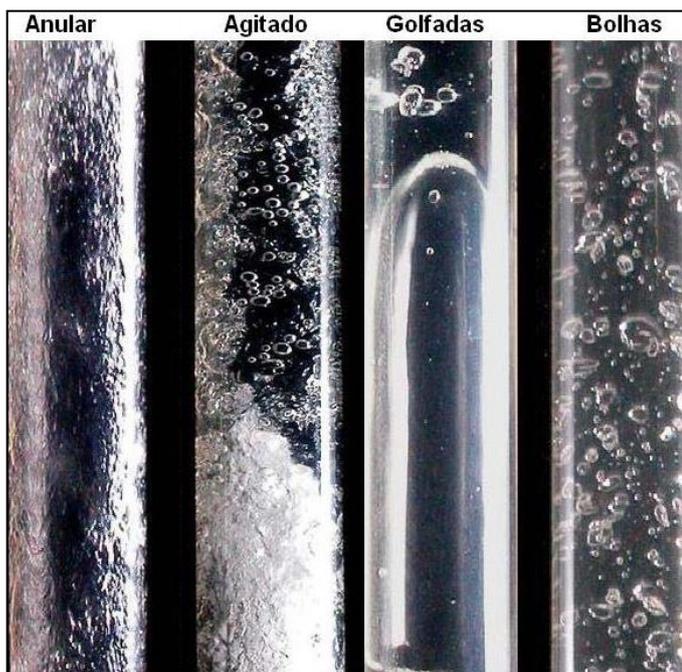
A Velocidade da mistura  $J_t$  é dada pela soma da velocidade superficial das fases presentes no escoamento.

$$J_t = J_{gas} + J_{liq} \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Padrões de escoamentos

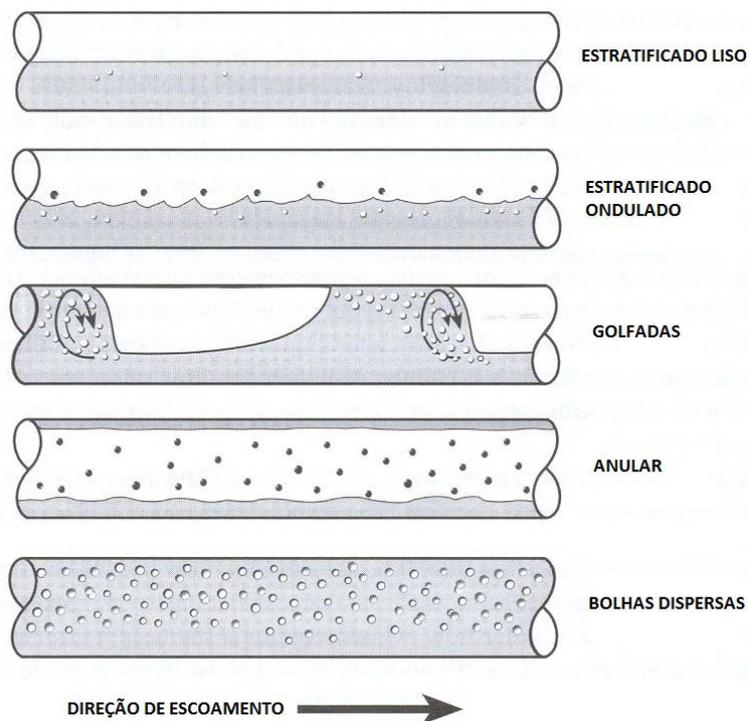
Como importante parcela do embasamento teórico deste trabalho, será necessário o estudo dos padrões de escoamento bifásico gás-líquido. Tratando-se de um escoamento simultâneo entre um líquido e um gás em uma tubulação, as fases se distribuem em determinadas configurações, ou seja, ocorre uma distribuição espacial das fases na mistura bifásica. O conhecimento prévio destes padrões é fundamental, visto que diferentes distribuições das fases interferem diretamente na resposta dos sensores utilizados na caracterização de escoamentos. Conhecendo os padrões de escoamento é possível interpretar corretamente as respostas do sensor *wire-mesh*, assim como as do tubo de Venturi.

A formação de um ou outro padrão de escoamento é dada por alguns fatores que interferem diretamente na distribuição das fases em uma tubulação. Dentre estes fatores destacam-se as propriedades físicas das fases, velocidade de cada fase, a geometria e à inclinação do tubo. Este capítulo apresentará os padrões de escoamento aos casos mais comuns, os quais estão presentes em tubulações horizontais, contextualizando a etapa experimental deste trabalho.



**Figura 1 - Padrões de escoamento vertical ascendente gás-líquido.**  
**Fonte: Adaptado de Barreto (2011).**

Os escoamentos horizontais, ilustrados na figura 2, são classificados como estratificado liso (*stratified flow*), estratificado ondulado (*wave flow*), golfadas (*slug*), anular (*annular flow*) e bolhas dispersas (*dispersed flow*).



**Figura 2 - Padrões de escoamento horizontal bifásico**  
**Fonte: Adaptado de Shoham (2006).**

### 2.1.3 Padrões em tubos horizontais

Os padrões em tubos horizontais mais comumente encontrados na literatura são:

- Estratificado liso (*stratified flow*): Escoamento caracterizado pela estratificação das fases líquida e gasosa. O gás é disposto na metade superior da tubulação e o líquido na inferior, estando separados por uma interface laminar não perturbada. A velocidade de ambas as fases é baixa.
- Estratificado ondulado (*wave flow*): Quando há um aumento da velocidade do gás em relação à do líquido, ocorre a formação de ondas sobre a interface de separação das fases. A amplitude destas ondas é dependente da velocidade relativa entre gás e o líquido.
- Golfadas (*slug*): Este padrão evidencia uma alternância entre gás e líquido durante o escoamento. Com adicionais aumentos da velocidade do gás, as ondas sobre a interface crescem em amplitude atingindo a superfície superior

do duto, ocorrendo a formação de bolhas gasosas alongadas assim como a de bolhas menores imersas na fase líquida.

- Anular (*annular flow*): A vazão de gás é alta suficiente para a formação de um padrão em que a fase gasosa escoava completamente envolvida por um filme de líquido com espessura maior na parte inferior do duto devido à gravidade. Observa-se ainda a presença de gotículas de líquido dispersas na região gasosa, devido à formação de ondas de baixa amplitude na interface entre as fases.
- Bolhas dispersas (*dispersed flow*): Caracteriza-se por bolhas gasosas dispersas no líquido, com maior concentração observada na metade superior da tubulação devido à força de empuxo atuante nas bolhas ser superior ao da gravidade. A fase líquida escoava como uma fase contínua.

Conforme as informações apresentadas torna-se necessária uma investigação prévia de alguns fatores para a identificação do padrão de escoamento, como a velocidade superficial do gás e do líquido, a geometria da tubulação e o sentido e direção do escoamento. Conhecendo estas características de uma planta bifásica e correlacionando-as com os dados experimentais, é possível a geração de um mapa de fluxo específico para a planta. Dentre os vários mapas de fluxos desenvolvidos em trabalhos anteriores, destaca-se o mapa de TAITEL et al. (1980) para escoamentos horizontais, conforme mostrado na figura 3.

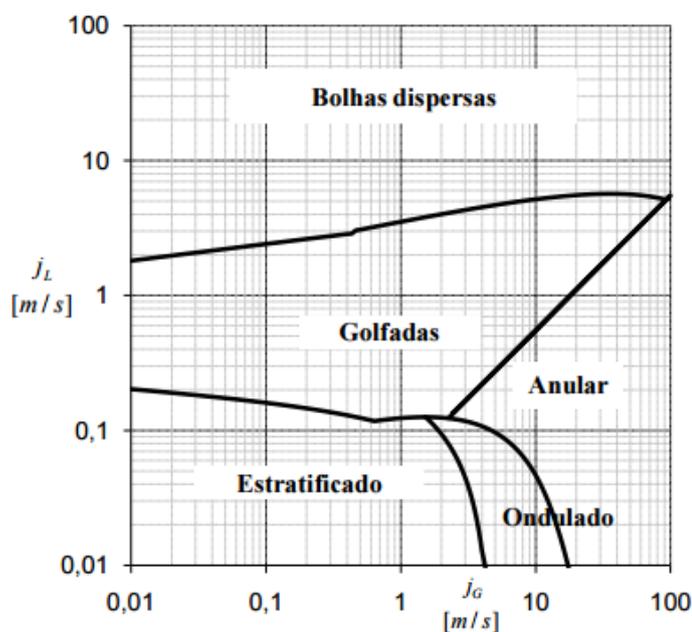


Figura 3 - Mapa de fluxo de Taitel e Dukler para escoamento em tubulação horizontal em um duto de 2,5 cm de diâmetro, a 25°C e 100 kPa. Fonte: Ofuchi (2011).

## 2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO DE SISTEMAS MULTIFÁSICOS

Nesta seção serão revisadas algumas técnicas de medição de escoamentos bifásicos. As técnicas estudadas a seguir não podem ser aplicadas de forma generalizada, pois são desenvolvidas especificamente para determinadas condições de pressão, temperatura, diâmetro, material e propriedades física dos fluidos.

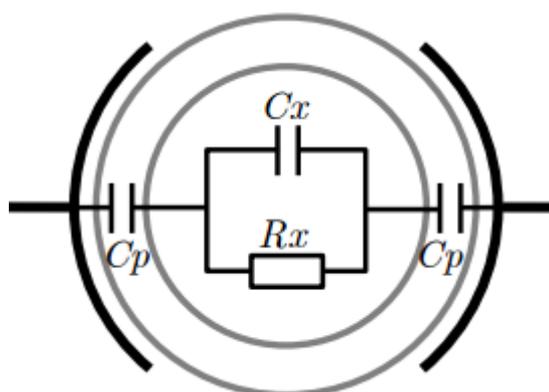
### 2.2.1 Sondas de impedância elétrica

Esta técnica de medição é diretamente relacionada com as diferenças nas características elétricas (permissividade e condutividade elétrica) das fases em análise na tubulação. Estas sondas são classificadas como capacitivas quando forem baseadas na permissividade elétrica e resistivas quando a condutância elétrica é mensurada.

### 2.2.1.1 Sensores Capacitivos

Como relatado anteriormente, sensores capacitivos trabalham em função da diferença de permissividade elétrica das substâncias. O funcionamento é baseado no princípio da emissão (eletrodo emissor) e recepção (eletrodo receptor) de um sinal elétrico senoidal. Basicamente o sensor trabalha de forma que o sinal elétrico emitido pelo emissor chegue até o receptor e, conforme a permissividade do fluido, esse sinal determina o tipo do fluido estudado. Portanto, pode se concluir que a capacitância neste caso depende diretamente da permissividade elétrica do fluido em questão (SANTOS, 2014).

Nos sensores capacitivos é necessária a aplicação de uma blindagem eficaz para evitar capacitâncias parasitas, mantendo dessa forma o sinal sem a presença de ruídos. Vários modelos do circuito elétrico equivalente de sensores capacitivos foram propostos, como, por exemplo, o sensor mostrado na Figura 4. Ele é um modelo simplificado da impedância entre dois eletrodos com seu circuito equivalente que considera a capacitância da parede do tubo  $C_p$ , a capacitância e a resistência equivalentes do fluido, como  $C_x$  e  $R_x$  respectivamente. Quando o sensor emitir um sinal com alta frequência ou o fluido for isolante, a resistência  $R_x$  pode ser desconsiderada, e a capacitância do sensor será equivalente à capacitância do fluido  $C_x$  em série com  $C_p$ . Entretanto, em baixas frequências o capacitor  $C_x$  pode ser desconsiderado, pois em corrente contínua ele se comportará como um circuito aberto. Portanto, em frequências baixas pode-se utilizá-lo para determinar a resistência  $R_x$  dos fluidos (LIBERT, 2013).



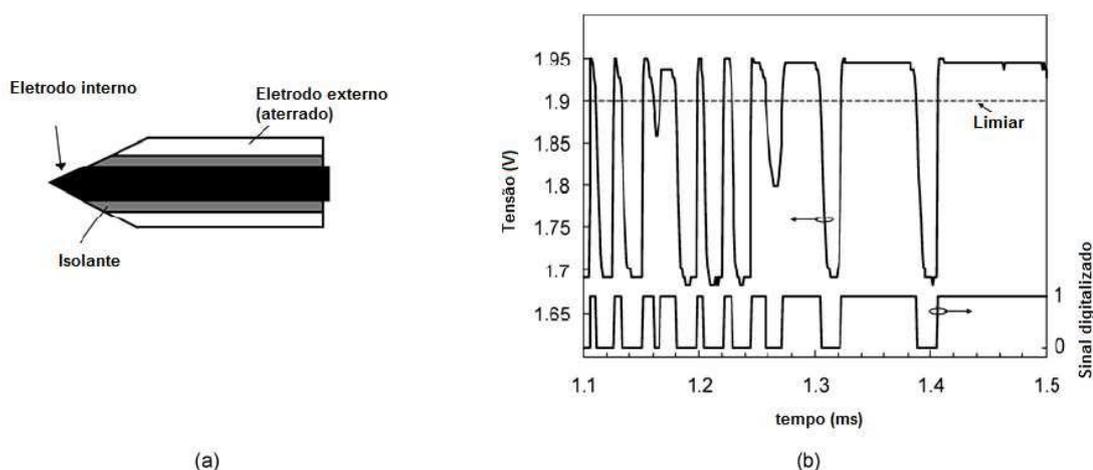
**Figura 4 - Modelo simplificado de um sensor capacitivo**  
Fonte: Adaptado de Libert (2013).

### 2.2.1.2 Sensores resistivos

Sensores resistivos medem a condutância dos fluidos, podendo ser aplicados em escoamentos em que ao menos uma das fases é condutiva (SANTOS, 2014). Quando ambas as fases de um escoamento forem não condutivas ou tenham baixa condutividade, a técnica não consegue diferenciar as fases medidas.

O princípio deste sensor é empregado em sondas tipo agulha, Figura 5 (a), ou também denominadas de sondas condutivas. Estas sondas são capazes de medir a condutividade elétrica das substâncias presentes, tendo como principal vantagem a pequena influência física no escoamento, reduzindo significativamente perturbações na estrutura espacial das fases. Caracterizam-se por atuarem como uma chave elétrica. Um sinal de corrente elétrica alternada ou contínua é enviada de um emissor (eletrodo interno) até um receptor (eletrodo externo), e caso haja uma fase condutora na seção transversal do duto, o sinal de corrente é convertido proporcionalmente a um valor de tensão, Figura 5 (b). Conforme o valor da tensão, as amplitudes do sinal são parametrizadas em valores binários (0 ou 1), a partir de um valor limiar de referencia. Por exemplo, se o valor limiar é de 2 Volts, e a medição tem valor superior a este, então converte-se o sinal para o nível lógico 1, representando a medição pontual da fase presente na tubulação.

Os sensores resistivos são conhecidos pela alta capacidade de aquisição de dados, além do baixo custo se comparado com outros tipos de sensores.



**Figura 5 - Sonda condutiva do tipo agulha**

**a) Vista lateral.**

**b) Tensão e sinal digitalizado adquiridos em um escoamento de padrão bolhas dispersas.**

**Fonte: Adaptado de Da Silva (2008).**

### 2.2.2 Tomografia aplicada a escoamentos multifásicos

Técnica inicialmente desenvolvida para a área médica, a tomografia aplicada migrou posteriormente para atuação em processos industriais, entre os quais incluem a aplicação em escoamentos multifásicos. Neste âmbito pode-se obter uma imagem da seção transversal da tubulação e, de forma qualitativa ou quantitativa, identificar o padrão de escoamento. Além do padrão de escoamento é possível estimar a fração das fases e a velocidade das fases no escoamento. A velocidade pode ser calculada a partir de imagens geradas em dois planos adjacentes ao longo do tubo, com a utilização de algoritmos de correlação cruzada (ISMAIL et al., 2005).

De forma geral, esta técnica consiste na instalação de vários sensores no entorno da tubulação para gerarem dados de vários ângulos de medida. A obtenção de dados em vários ângulos é permitida pela rotação dos sensores ou ao chaveamento eletrônico dos mesmos. Com estes dados é possível representar a imagem da seção transversal do tubo através do uso de algoritmos de reconstrução de imagens (SANTOS, 2014).

#### 2.2.2.1 Tomografia elétrica

Para aplicação e estudo desta técnica, devem-se relacionar as propriedades das fases tais como permissividade e condutividade, pois esta explora as interações entre campos elétricos e as propriedades da substância. Semelhante aos sensores resistivos, a tomografia por resistência elétrica (TRE) mede a condutividade elétrica da matéria, contudo, quando se considera a permissividade da matéria, o processo se denomina tomografia capacitiva (TCE). Para o caso de ambas as propriedades de um escoamento bifásico serem consideradas, ambos os métodos (TER e TCE) são aplicados e a técnica recebe o nome de Tomografia por impedância elétrica (TIE) (MARASHDEH et al., 2007).

#### 2.2.2.2 Tomografia óptica e por ultrassom

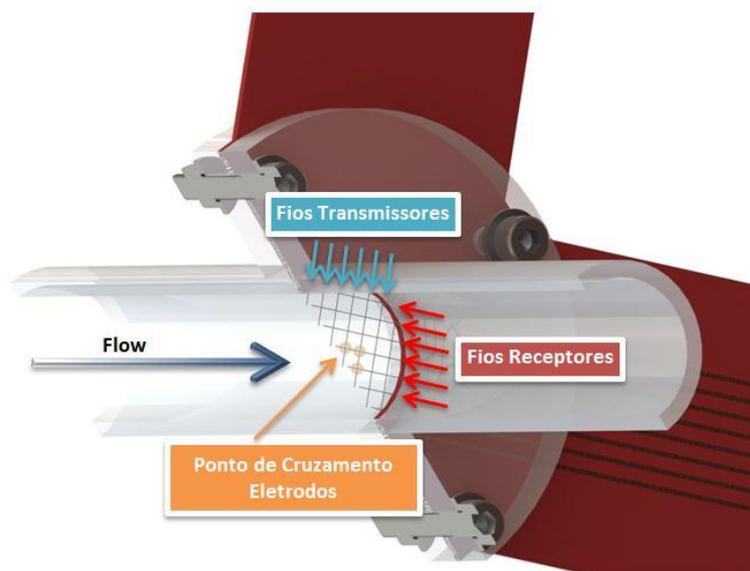
Basicamente a técnica de tomografia óptica fundamenta seu funcionamento na diferença de absorção de luz entre as fases de um escoamento bifásico. Podem ser encontrados problemas quanto à aplicação desta técnica em escoamentos com alta

fração de vazio, como por exemplo, nos escoamentos gás-líquido. Esta limitação é recorrente devido ao tipo de escoamento dificultar a passagem de luz (causando opacidade na tubulação), uma vez que a técnica demanda de tubulações transparentes. A tomografia por ultrassom baseia-se nas diferenças de impedância acústica nas interfaces das fases líquida e gasosa e tem como base dois modos de aplicação, ultrassom pulsado de transmissão e modo de reflexão. A vantagem em relação à técnica óptica é a possibilidade de utilização em dutos opacos, porém esta se restringe em sua utilização, pois apenas é aplicável para pequenas frações de vazio.

### 2.2.3 Sensor *wire-mesh*

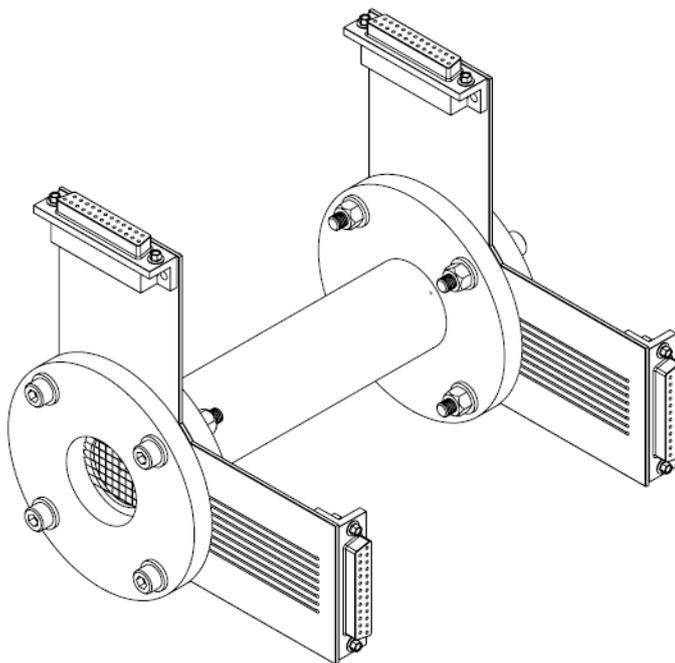
#### 2.2.3.1 Princípio de funcionamento sensor *wire-mesh*

O sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos, é um dispositivo que permite a visualização de escoamentos com alta resolução espacial e temporal. O sensor é constituído por dois planos de fios (plano transmissor e receptor) distribuídos ao longo da seção transversal do tubo, conforme mostra a Figura 6. Os planos de fios ou eletrodos se cruzam em um ângulo de 90° (denominados de pontos de cruzamento) e são separados por uma pequena distância de poucos milímetros, não havendo contato entre as malhas de fios. A eletrônica projetada neste sensor permite realizar varreduras em alta velocidade dos eletrodos, possibilitando determinar a impedância de cada cruzamento. De forma mais detalhada, a medição do sensor *wire-mesh* baseia-se no princípio de excitação multiplexada e leitura paralela. A medida de impedância entre cada cruzamento é realizada por multiplexação do plano emissor, onde cada eletrodo emissor é acionado um por vez e os outros não utilizados no momento da medição são ligados ao potencial de terra.



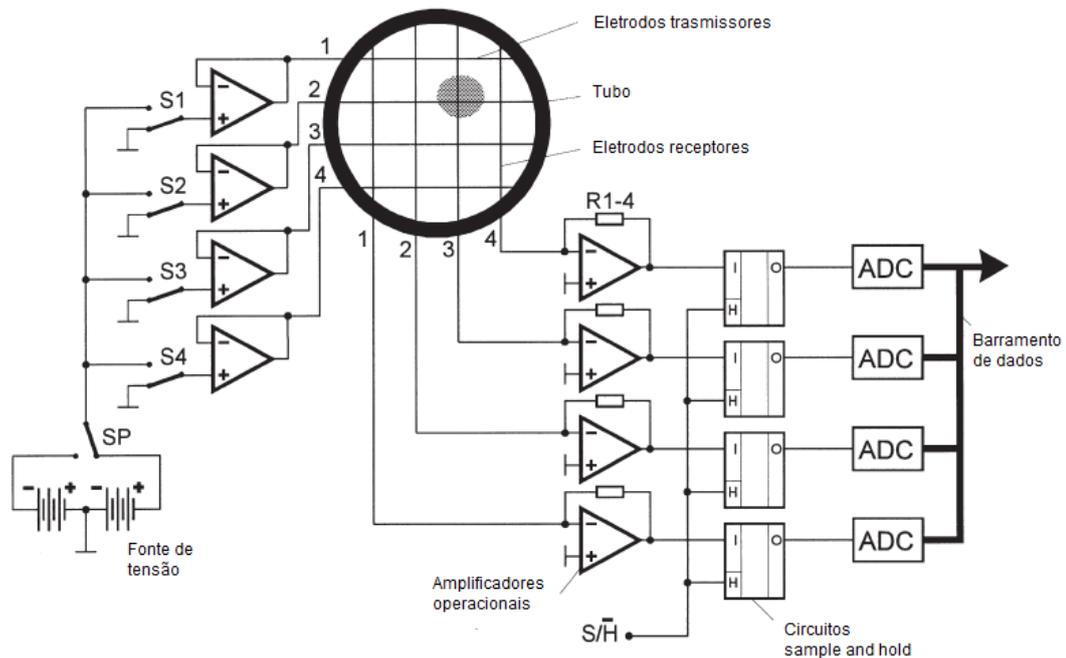
**Figura 6 - Representação esquemática do sensor *wire-mesh***  
Fonte: Adaptado de Santos (2011).

A Figura 7 ilustra em perspectiva o posicionamento de dois sensores em uma tubulação. Desta forma, os transmissores são ativos sequencialmente até que a varredura de toda a malha de eletrodos seja concluída (DA SILVA, 2008). Cada cruzamento se refere a uma sub-região da seção transversal independente da sua vizinhança, ou seja, cada sinal de medida é uma representação da fase do escoamento naquele ponto específico, independentemente da fase nas regiões do entorno. Obtêm-se como resultado final de um processo de medição, os valores de impedância de cada um dos cruzamentos, os quais correspondem à distribuição instantânea das fases de um escoamento multifásico que transpassa as malhas de eletrodos do sensor.



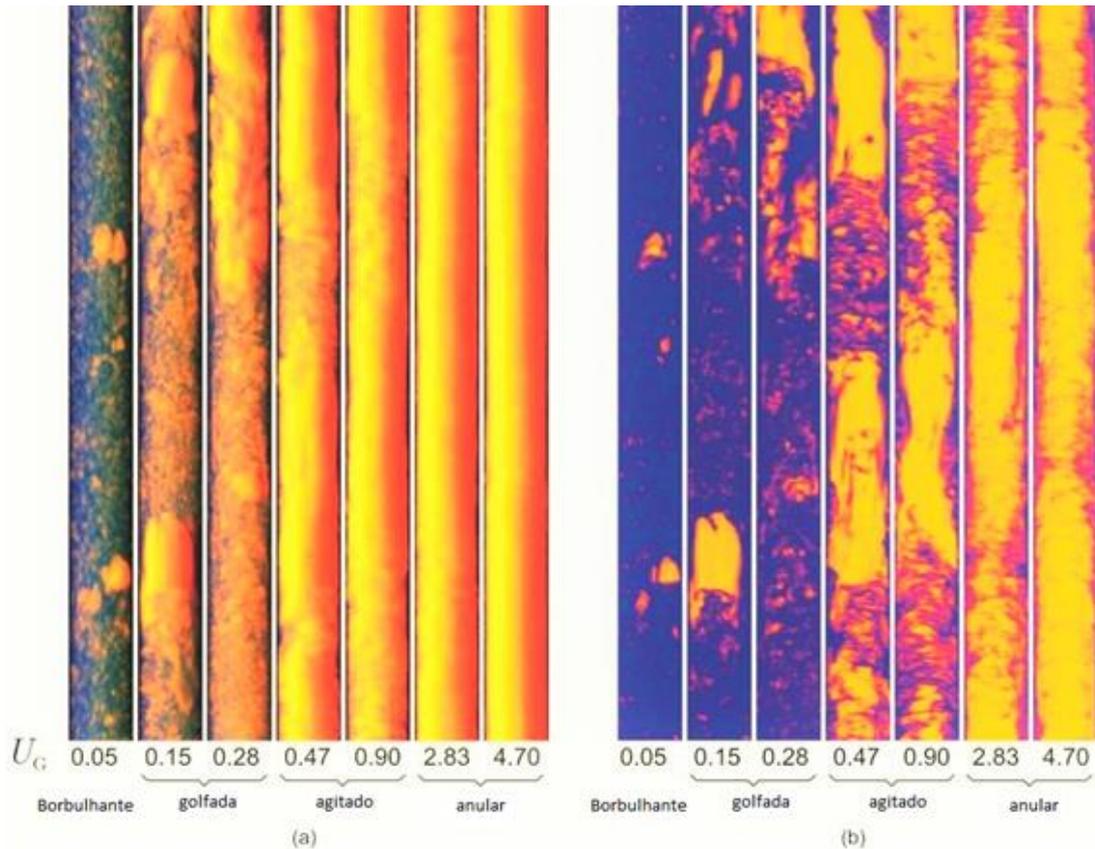
**Figura 7 - Imagem de dois sensores *wire-mesh* em perspectiva acoplados por um duto  
Fonte: Adaptado de Santos (2011).**

O diagrama que representa o circuito eletrônico do sensor *wire-mesh* é representado na Figura 8. O sinal de corrente adquirido na sub-região é convertido em um sinal de tensão pelos amplificadores de transimpedância. Estes sinais de tensão são convertidos em níveis digitais por conversores analógico-digitais, gerando os sinais de saída e possibilitando a leitura e manipulação através de software. A varredura é feita com uma taxa de repetição de 1000 frames por segundo, permitindo a visualização da distribuição das fases em toda a seção transversal com uma resolução temporal e espacial elevada (DA SILVA, 2008). Para melhorar a resolução espacial é necessário aumentar o número de fios, entretanto quanto maior o número de fios maior será a perturbação gerada. Apesar de o uso deste sensor introduzir perturbação ao escoamento, vindo a afetar a estrutura espacial das fases, o *wire-mesh* tem como vantagem o baixo custo se comparado a outras técnicas de aplicações similares (técnicas tomográficas), a viabilidade de uso em vários regimes de escoamento e a robustez em relação às mudanças de temperatura.



**Figura 8 - Esquema de medida da eletrônica do sensor *wire-mesh***  
**Fonte: Wrasse (2015).**

A Figura 9 mostra um conjunto de imagens que ilustram a disposição das fases em um escoamento bifásico, obtidas através do sensor *wire-mesh* em experimentos realizados em Da Silva (2008). Na Figura 9 (a) (projeção lateral) é possível visualizar os diferentes padrões de escoamento verticais ascendentes os quais se alteram de acordo com a velocidade do gás. Entretanto nesta imagem nota-se que com o aumento da velocidade do gás há perda de informações, não sendo possível visualizar as estruturas internas do escoamento. Para contornar este problema, a Figura 9 (b) complementa as informações faltantes mostrando o plano central interno da tubulação.



**Figura 9 - Aquisições pelo sensor *wire-mesh* em escoamento vertical**  
**Em (a) projeção lateral e em (b) corte axial (plano central interno)**  
**Fonte: Adaptado de Da Silva (2008).**

### 2.2.3.2 Processamento e análise dos dados

A fim de discriminar dois fluidos não condutores, tais como exemplo o ar e o óleo de silicone, analisa-se a permissividade de um ponto de cruzamento entre os planos. As saídas de tensão medidas pelo sensor *wire-mesh* são armazenadas em uma matriz tridimensional  $V(i, j, k)$  na memória do computador em que  $i$  e  $j$  são os índices representativos do espaço e  $k$  é o índice temporal. O circuito eletrônico deste sensor gera tensões com uma resposta logarítmica, a qual se assume como previamente conhecida e ajustada para uma resposta linear. Deste modo, as tensões são proporcionais à permissividade elétrica relativa  $\epsilon_r$  de cada ponto de cruzamento que por sua vez é proporcional à fração de vazio, assim temos a equação (2.6) abaixo:

$$V = a \cdot \ln(\epsilon_r) + b \quad (2.6)$$

onde  $a$  e  $b$  presentes na formula são constantes que englobam os parâmetros específicos do sistema eletrônico do sensor. A fim de converter as tensões medidas para valores de permissividade e ainda obter as distribuições de vazão de fase, é efetuado uma rotina de calibração. Inicialmente executa-se a medição da substância com menor permissividade elétrica e armazenam-se os dados em uma matriz  $V_{bp}$ . O procedimento é repetido do mesmo modo para a substância de maior permissividade elétrica, e os valores armazenados na matriz  $V_{ap}$  (Da Silva, 2011). Deste modo, a fração de vazio  $\alpha$  pode ser obtida por,

$$\alpha(i, j, k) = \frac{V_{ap}(i, j) - V(i, j, k)}{V_{ap}(i, j) - V_{bp}(i, j)}. \quad (2.7)$$

Para análise dos dados da fração de vazio  $\alpha(i, j, k)$  técnicas com diferentes níveis de complexidade podem ser usadas. A série temporal é uma forma representativa dos valores médios da fração de vazio da seção com base no tempo, portanto integrando os valores de fração de vazio da seção transversal, as series temporais podem ser obtidas por,

$$\alpha(k) = \sum_i \sum_j a(i, j) \cdot \alpha(i, j, k) \quad (2.8)$$

onde  $a(i, j)$  representa a contribuição de cada ponto de cruzamento  $(i, j)$  para a área de seção transversal total. As series temporais  $\alpha(k)$  podem ser analisadas por um histograma ou pelas suas componentes espectrais.

A técnica de menor complexidade é quando a matriz tridimensional é integrada em suas três componentes, resultando em uma fração de vazio média durante o experimento, de acordo com a equação (2.9). Onde  $N$  é o número total de amostras em um dado instante de tempo do sinal (DA SILVA, 2011).

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \alpha(k) \quad (2.9)$$

## 2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DAS VELOCIDADES DAS FASES

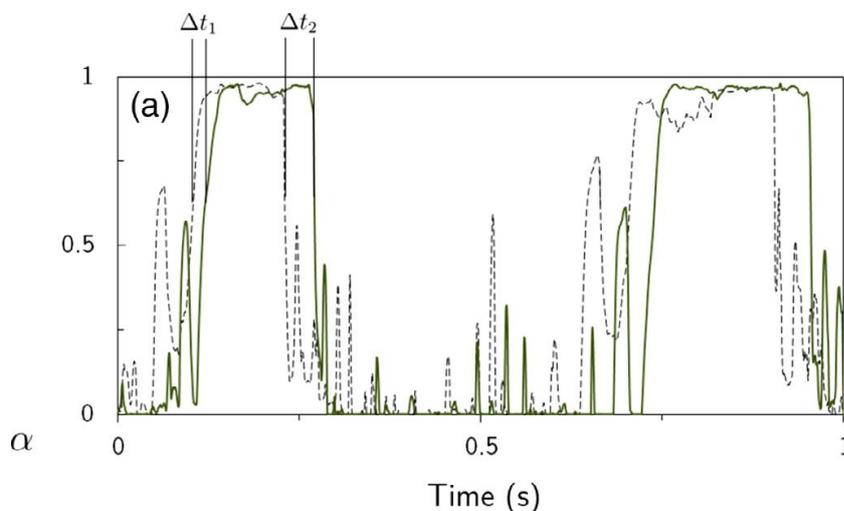
### 2.3.1 Correlação Cruzada

A técnica de correlação cruzada é um processo matemático que possibilita encontrar o grau de similaridade entre dois sinais amostrados. Os sinais deslocados no tempo um em relação ao outro em um período de tempo definido, são correlacionados retornando como resposta da operação, um terceiro sinal de valor maximizado no instante que ambos os sinais comparados apresentam características similares. A correlação entre os sinais em diferentes posições de uma tubulação oferece um tempo de trânsito de uma característica de escoamento. Tais aquisições de sinais podem ser obtidas por via de dois sensores dispostos em planos adjacentes e separados por uma distância conhecida previamente. Matematicamente, a função de correlação cruzada  $R$  é um modelo que descreve conforme explanado, a média (durante um período de tempo,  $T$ ) do produto de dois conjuntos de dados, um no tempo  $t$  e outro conjunto em  $t + \tau$ , conforme apresentado na equação (2.10).

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^t x(t)y(t + \tau) dt \quad (2.10)$$

Dois métodos gerais comumente usados podem citados para o cálculo da correlação cruzada: direto e indireto. O método direto computa a média do produto usando valores de amostragem de dados, enquanto que o método indireto utiliza a transformada de Fourier para obter o resultado.

Shaban et al. (2015) analisou a velocidade superficial de um gás em duas seções de medições com sensores *wire-mesh* dispostos a montante (linha tracejada) e a jusante (linha sólida) do escoamento em condição de baixa velocidade de escoamento líquido. Em caráter ilustrativo é apresentado abaixo uma amostra coletada dos sensores durante um período de 1 segundo.



**Figura 10 - Histórico da amostra em função do tempo da fração de vazio com velocidade de escoamento líquida ( $J_l = 0.15 \text{ m/s}$ ).  
Fonte: Shaban (2015).**

A técnica de correlação cruzada é um recurso muito utilizado em processos de vazão descritos na literatura. Entretanto possui algumas desvantagens, sendo a principal o fato de exigir grande demanda computacional em termos de processamento e memória, visto que perfaz uma grande quantidade de cálculos de multiplicação e somatórios de diversos pontos em um curto espaço de tempo. Em monitoramentos em tempo real utilizando esta técnica, a demanda de processamento pode vir a inviabilizar seu uso.

### 2.3.2 Tubo de Venturi

O tubo de Venturi é considerado um aparato mecânico usado para a medição da velocidade de escoamento e vazão de fluidos incompressíveis, pela variação da pressão sofrida pelo escoamento ao fluir em uma tubulação com redução da área da seção transversal. Esse efeito pode ser explicado pelo princípio de Bernoulli e através da equação da continuidade de massa (CASSIOLATO et al., 2008).

As vantagens do uso do Venturi nos experimentos residem no fato de causar menor perda de carga permanente, sendo relativamente pouco intrusivo. Os critérios de seleção do tipo de medidor ainda se estendem quanto ao custo de aquisição do dispositivo, e de seu sistema de medição de pressão diferencial. Um equipamento de uso similar tal como as placas de orifício, mesmo sendo dispositivos de custo

acessível, fácil instalação e manutenção, tem como grande desvantagem as perdas de carga que impõe ao escoamento em função da expansão a jusante da placa. O Venturi, se comparado com a placa de orifício, permite medição de vazão 60% superior nas mesmas condições de serviço, porém com uma perda de carga de no máximo 20% do  $\Delta P$  (FISCHER et al., 2007).

As equações para o cálculo da vazão podem ser obtidas genericamente aplicando a equação da conservação de massa (Lei da Continuidade) e a equação da conservação de energia que em sua forma simplificada recebe o nome de Equação de Bernoulli.

### 2.3.2.1 Lei da Continuidade

Um sistema consiste em uma quantidade definida e identificada de matéria. O princípio de conservação da massa estipula que a massa de um sistema permanece constante, ou seja:

$$\frac{dM_{sist}}{dt} = 0 \quad (2.11)$$

Para que a equação acima seja válida teremos que o fluxo de líquido de massa que atravessa uma superfície mais a taxa de variação da massa dentro deste volume seja igual a zero. A Figura 11 nos mostra a aplicação para um duto redutor de seção circular que é o nosso objeto de estudo, o tubo de Venturi (LIVI, 2000).

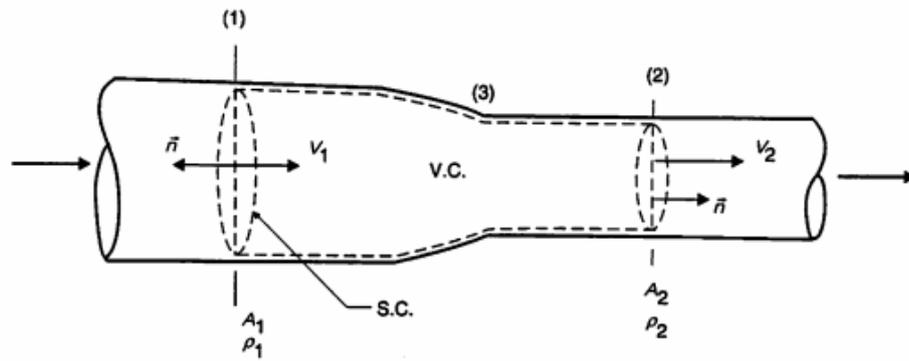


Figura 11 - Esquema de escoamento num duto redutor de seção circular. *S.C.*: superfície de controle. *V.C.*: volume de controle.  $\vec{n}$  - Vetor unitário normal à superfície.  
Fonte: LIVI (2000).

A equação da continuidade na forma integral é dada por:

$$\iiint_{V.C(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S.C(t)} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (2.12)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $t$  é o tempo,  $dV$  é um volume infinitesimal do volume de controle (*V.C.*),  $\vec{V}$  é a velocidade absoluta do fluido,  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal ao elemento infinitesimal de área  $dA$ , parcela da superfície de controle (*S.C.*). Tendo um fluxo em regime permanente na tubulação, assumindo um escoamento incompressível, onde a massa específica também é invariável no tempo, e considerando um duto de parede impermeável, temos:

$$\iint_{S.C(t)} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (2.13)$$

Como a parede do duto é impermeável, não há fluxo de massa através da seção da superfície de controle ( $\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$ ),

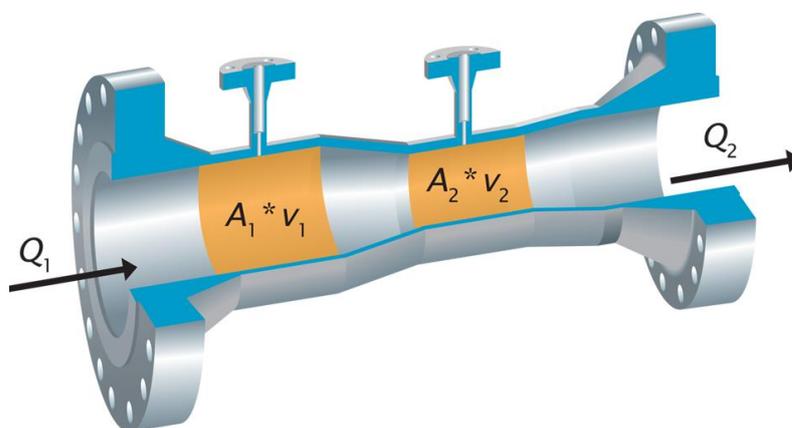
$$\rho \cdot V \cdot A = \text{constante} \quad (2.14)$$

Portanto, podemos deduzir que,

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2 \quad (2.15)$$

Como  $\rho_1$  é incompressível, temos  $\rho_1$  igual a  $\rho_2$  e chega-se reduzida,

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (2.16)$$



**Figura 12 - Fluxo em regime permanente, Venturi.**  
Fonte: SEDIVA (2012).

### 2.3.2.2 Lei de Bernoulli

Lei que fornece a relação fundamental da mecânica dos fluidos relacionando a pressão com a velocidade do fluido e a altura do tubo. O resultado da equação é consequência da conservação da energia aplicada ao fluido. Deduz-se a partir do teorema do trabalho-energia que o trabalho realizado pela resultante das forças que atuam num sistema é igual à variação da energia cinética do sistema (LIVI, 2000).

$$W = \Delta K + \Delta U = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (2.17)$$

Sendo  $W$ , o trabalho realizado sobre o sistema pelas forças de pressão,  $\Delta K$  e  $\Delta E_C$  a variação da energia cinética e  $\Delta U$  e  $\Delta E_p$  a variação da energia potencial.

Supondo um fluido perfeito (ideal), que não possui viscosidade, ele desloca-se sem atritos e, portanto, sem perdas de energia. Considerando-se que a energia total de um sistema dinâmico é constante, temos que:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g \gamma_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g \gamma_2 \quad (2.18)$$

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g \gamma = \text{constante} \quad (2.19)$$

ou seja, a soma da pressão ( $P$ ), da energia cinética por unidade de volume  $\frac{1}{2}\rho V^2$  e da energia potencial por unidade de volume ao longo de uma linha de corrente ou de um filete fluido em um escoamento com as restrições consideradas onde:

$\rho$  - é a densidade específica do fluido.

$\gamma$  - é o peso específico do fluido.

Dividindo a equação 2.18 pelo termo  $\rho g$  e simplificando a equação de Bernoulli para fluidos perfeitos em regime permanente, tem-se:

$$\gamma_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \gamma_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.20)$$

A equação 2.20 é a Equação de Bernoulli sem dissipação de energia mecânica, considerando qualquer seção de escoamento.

## 2.4 MODELOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO BIFÁSICA POR PRESSÃO DIFERENCIAL

Na indústria petrolífera é comum a determinação das vazões das fases em escoamentos entre líquido-gás de maneira separada, mesmo sendo possível de forma

simultânea. A medição simultânea das vazões das fases constituintes de escoamentos bifásicos é mais viável economicamente devido a não necessidade de maquinários na linha de produção exclusivos para promover a separação das fases, além de maior produtividade devido a não necessidade deste procedimento durante o ciclo produtivo. Ainda que a aplicação desta técnica seja vantajosa devido ao baixo custo e grande versatilidade, continua bastante restrita por conta das incertezas decorrentes dos modelos empregados. Tal assertiva é confirmada por Pereira (2006) o qual menciona que a preferência pela determinação das vazões é mais comumente feita com separação devido à confiabilidade e exatidão das medições.

Algumas das técnicas mais usadas para medição de escoamentos multifásicos implicam na combinação de diferentes ferramentas de medição. Utiliza-se, de um modo geral, elementos deprimogênios (elementos que medem a vazão baseados em dados de pressão diferencial) tais como placa de orifício ou tubo de Venturi (SANTOS, 2011).

A seguir serão revisados alguns conceitos base para posteriormente serem abordados modelos teóricos relacionados à equação tradicional para medição de vazão. Tais modelos serão descritos com correções baseadas em modelos teóricos, propostos por diferentes autores da literatura a fim de minimizar possíveis erros.

Nas medições das vazões em escoamentos bifásicos, dispositivos utilizados como o tubo de Venturi, o qual acelera o fluido e temporariamente reduz a pressão, caracteriza-se por medir a vazão volumétrica através da medida da diferença de pressão entre dois pontos ao longo do fluxo. Em um sistema de escoamento monofásico, rearranjando as equações de Bernoulli, continuidade e equação de energia, ainda considerando o fluido incompressível e ausência de dilatação térmica do dispositivo e introduzindo o coeficiente de correção ou de descarga  $C_d$ , chega-se a relação a seguir entre taxa de vazão mássica  $\dot{m}$  e diferença de pressão  $\Delta P$ .

$$\dot{m} = \frac{C_d A_2 Y F_a}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\rho_l \Delta P} \quad (2.21)$$

Em que  $A_2$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ,  $\Delta P$ ,  $C_d$ ,  $Y$  e  $F_a$  representam respectivamente a área da seção (garganta do tubo de Venturi), a razão entre diâmetros (garganta do Venturi e o diâmetro da seção do tubo), à massa específica do líquido, a queda de pressão sobre

o dispositivo, o coeficiente de descarga, o coeficiente de expansão para fluidos compressíveis e o coeficiente de dilatação térmica.

Infere-se ao desconsiderar fatores térmicos e um escoamento incompressível que  $Y$  e  $F_a$  são iguais a um. Com relação ao tubo de Venturi o qual utilizaremos em testes neste trabalho, em caso de considerar a ação de compressão do fluido no escoamento, o fator de expansão isentrópica  $Y$  deve ser introduzido na fórmula. Segundo a norma NBR ISO 5167-1/1994 a equação (2.24) é válida quando respeitadas condições impostas a seguir (OLIVEIRA, 2007).

$$0,44 \leq \beta \leq 0,80 \quad (2.22)$$

$$20000 \leq Re_D \leq 10^7 \quad (2.23)$$

$$Y = \left[ \left( \frac{k\tau^{\frac{2}{k}}}{k-1} \right) \left( \frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{\frac{2}{k}}} \right) \left( \frac{1-\tau^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}}{1-\tau} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

$\tau$  - Razão entre a pressão na garganta do Venturi e a pressão da montante.

$k$  - Razão entre os calores específicos considerando pressão e volume constantes.

$Re_D$  - Número de Reynolds.

Com vista nas correlações semi-empíricas descritas anteriormente para medição das vazões em elemento com redução de seção (Venturi ou placa de orifício), Zhang et al. (1992) sugere a introdução do parâmetro  $K_L$  na equação (2.21) necessário para correções na taxa de vazão mássica  $\dot{m}$ , em que os efeitos de um escoamento bifásico são desta forma considerados nestas correlações. Reescrevendo a equação, temos:

$$\dot{m} = \frac{C_{d,bi} A_2 Y_{bi} F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} K_L \sqrt{2\rho_l \Delta P_{bi}} \quad (2.25)$$

O coeficiente de descarga bifásico para  $C_{d,bi}$  e  $Y_{bi}$  representam respectivamente o coeficiente de descarga para escoamentos bifásicos e o coeficiente de expansão. O coeficiente de expansão pode ser considerado de valor um para o número de Mach menor que 0,3, a exemplo de Oliveira et al. (2010).

O coeficiente de expansão bifásico  $Y_{bi}$  segundo Zhang et al. (1992) pode ser definido como:

$$Y_{bi} = 1 - \alpha + \alpha Y_G \quad (2.26)$$

em que  $Y_G$  representa o coeficiente de expansão para o gás. Pressupondo as considerações mencionadas anteriormente apresentam-se a seguir os modelos homogêneo, as correlações de Chisholm (1967), de Zhang et al. (1992) e de Zhang et al. (2005), tendo estes com equações reescritas em concordância com a forma proposta por Zhang et al. (1992), para a medição das vazões em escoamentos bifásicos a baixos títulos.

#### 2.4.1 Modelo Homogêneo

A premissa básica do Modelo Homogêneo é a de que as fases estão tão intimamente misturadas que se pode supor a mistura como homogênea, ou seja, a distribuição espacial das fases é tal que em cada região do campo do escoamento encontra-se um fluido que é a mistura composta proporcionalmente com cada uma das fases. Neste modelo, portanto trata-se o escoamento bifásico como de fase única e sendo o fator de escorregamento  $S$ , a taxa entre as velocidades médias de gás e líquido conforme mostrado na equação 2.27, considera-se  $S$  de valor unitário. Além disso, equilíbrio termodinâmico entre as fases do escoamento deve ser considerado para que este modelo seja válido.

$$S = \frac{V_g}{V_l} = \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{x}{(1-x)} \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \quad (2.27)$$

O parâmetro  $\rho_h$  o qual neste caso é a massa específica da mistura homogênea é representado pela equação (2.28) a seguir:

$$\rho_h = \frac{\rho_g \rho_l}{\rho_l x + (1 - x)\rho_g} \quad (2.28)$$

No regime borbulhado com bolhas pequenas o fator de escorregamento tende a um, podendo ser plausivelmente representado pelo modelo homogêneo. De acordo com Oliveira (2007), pode-se observar o desenvolvimento desse modelo em Carey (1992) e Collier et al. (1996). Combinando as equações (2.25) e (2.28) e reorganizando-as em função do fator  $K_L$  proposto por Zhang et al. (1992), de acordo com a equação (2.29).

$$K_L = \sqrt{\frac{1}{x \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) + 1}} \quad (2.29)$$

#### 2.4.2 Chisholm (1967)

Chisholm propôs um modelo empírico para escoamentos bifásicos extensivamente aplicado a uma variedade de condições de operação. Considerou para um escoamento bifásico o fator de escorregamento entre fluidos. Neste modelo assume-se um escoamento incompressível, quantidade de movimento desprezível a montante, ausência de mudança de fase, cisalhamento na parede desprezível em relação às forças interfaciais entre as fases, fração de vazio constante através do elemento medidor de vazão com redução de seção (OLIVEIRA, 2010).

A correlação de Chisholm é definida como:

$$\Delta p_{bi} = \Delta p_l + C \sqrt{\Delta p_l \Delta p_g} + \Delta p_g \quad (2.30)$$

onde  $C$  é o coeficiente empírico,  $\Delta p_l$  a queda de pressão apenas para escoamentos líquidos e  $\Delta p_g$  é a queda de pressão para escoamentos gasosos. O coeficiente  $C$  pode ser definido como:

$$C = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{\Delta p_l}{\Delta p_g}} + S \sqrt{\frac{\Delta p_g}{\Delta p_l}} \quad (2.31)$$

Chisholm propôs um método para análise do fator de escorregamento e de forma indireta avaliar  $C$  através de dados de escoamento vapor-água em placas de orifício, levando em consideração, portanto, a interação entre fases. O parâmetro de Lockhart–Martinelli (1949),  $X$ , foi usado como critério para estimar o fator de escorregamento. Duas condições serão apresentadas, para  $X \geq 1$ , Eq. (2.32) e  $X < 1$ , equação (2.33).

$$S = \left( 1 + X \left( \frac{p_l}{p_g} - 1 \right) \right)^{1/2} \quad (2.32)$$

$$S = \left( \frac{p_l}{p_g} \right)^{1/4} \quad (2.33)$$

O parâmetro de Lockhart–Martinelli foi definido como a raiz quadrada da queda de pressão para escoamentos líquidos e gasosos,  $\Delta p_l$  e  $\Delta p_g$  respectivamente. Algumas correlações utilizam este parâmetro para prever a queda de pressão em escoamentos bifásicos ou o fluxo de massa para escoamentos deste tipo. Este fator define-se como,

$$X = \sqrt{\frac{\Delta p_l}{\Delta p_g}} = \left( \frac{1 - X}{X} \right) \sqrt{\frac{\Delta p_g}{\Delta p_l}} \quad (2.34)$$

Combinando as Equações (2.25), (2.30), (2.31) e (2.34) e reescrevendo na forma proposta por Zhang et al. (1992), obtém-se:

$$K_L = \sqrt{\frac{\Delta p_l}{\Delta p_g}} = \left( \frac{1}{1-X} \right) \left[ 1 + \left( \frac{\frac{1}{S} \sqrt{\frac{p_l}{p_g}} + S \sqrt{\frac{p_g}{p_l}}}{\left( \frac{1-X}{X} \right) \frac{\sqrt{p_g}}{\sqrt{p_l}}} \right) + \left( \frac{1}{\left( \frac{1-X}{X} \right)^2 \frac{p_g}{p_l}} \right) \right]^{-1/2} \quad (2.35)$$

#### 2.4.3 Zhang et al. (1992)

Esta correlação teve como embasamento escoamentos ar-água com títulos de valores inferiores a 1% em placas de orifício. Considerando a vazão total dada pela equação (2.25) e  $K_L$  sendo reescrito de acordo com a equação (2.36) a seguir:

$$K_L = \sqrt{\frac{1}{x^{(1.25+0.25x^{\frac{1}{3}})} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) + 1}} \quad (2.36)$$

em que  $x$  é o título,  $\rho_g$  e  $\rho_l$  são as massas específicas do gás e do líquido respectivamente. A correção do modelo homogêneo assemelha-se a esta, se diferenciando pelo expoente  $n$  do título, fator o qual foi omitido na formulação anterior.

#### 2.4.4 Correlação de Zhang et al.(2005)

Zhang et al. (2005) propuseram um novo fator de correção baseados no modelo homogêneo mais sensível às variações das condições de escoamento. Tal correlação proposta para medição de vazão em escoamentos do tipo líquido-gás com dados coletados de mistura óleo-gás a baixo título (inferior a 2%). Neste modelo os coeficientes foram ajustados para o tubo de Venturi. Os autores propuseram um modelo o qual se trata um modelo trifásico como um modelo bifásico levando em conta o escorregamento entre fases e, para simplificar, não foi considerada a transferência de massa entre as fases escoantes, além de assumir condição de escoamento isotérmico. A vazão é expressa pela equação (2.21) com  $K_L$  reescrito de acordo com a equação (2.37).

$$K_L = \sqrt{\frac{1}{c \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^n \left(\frac{\rho_L}{\rho_g}\right)^m + 1}} \quad (2.37)$$

em que  $c$ ,  $n$  e  $m$  são constantes dependentes das condições de teste e dos padrões de escoamento. O fator de escoamento foi descrito por Zhang et al. (2005) como função da razão entre as massas específicas dos fluidos, ainda o título foi definido conforme expressão a seguir:

$$x = c' \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^m \quad (2.38)$$

onde as constantes  $c'$  e  $m$  são dependentes dos padrões de escoamento. Observe-se que os autores desta correlação não consideraram os padrões de escoamento e as condições dos experimentos nos cálculos do título e da vazão. Zhang et al. (2005) determinaram valores das constantes relativas aos padrões borbulhado, pistonado, ondulado e anular, apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1 - Valores das constantes determinadas por Zhang et al. (2005) para os padrões borbulhado, pistonado, ondulado e anular de um escoamento horizontal.**  
Fonte: Oliveira (2007).

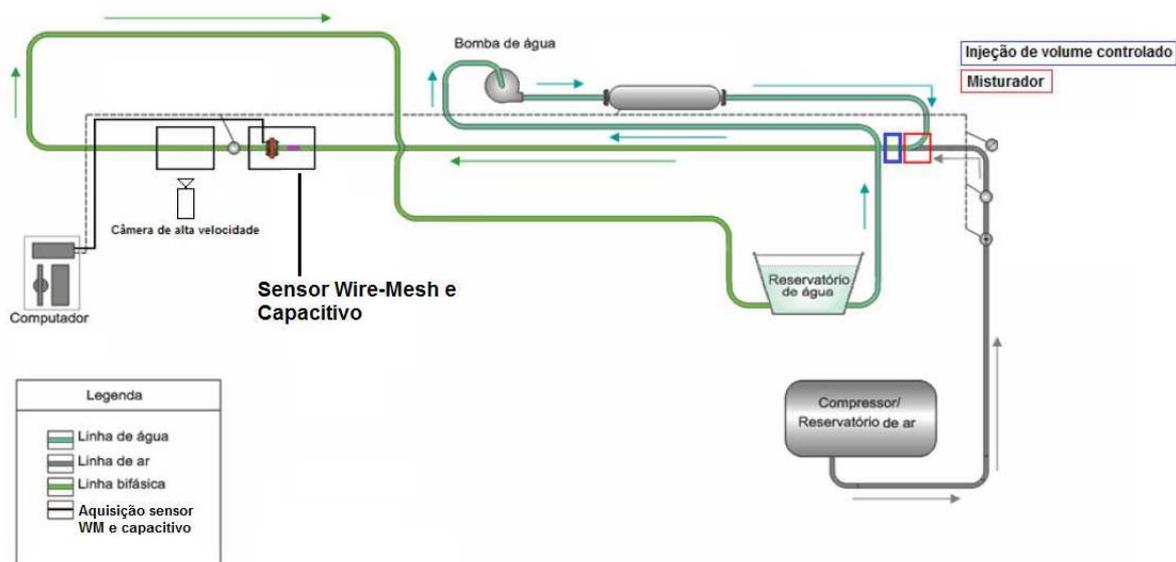
Padrão	c	N	M	c'	H
Borbulhado	0,5	0,95	0,02	0,51	0,65
Pistonado					
Ondulado	1,3	1,15	0,08	1,25	0,7
Anular	1,2	0,95	0,05	1,21	0,95

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 PLANTA EXPERIMENTAL

A realização dos testes e experimentos para a aquisição de dados foi realizada no Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT), no campus Curitiba da UTFPR. A estrutura do laboratório possui um circuito com linhas independentes de gás e líquido com tubulação transparente de 9,2 m de comprimento e 26 mm de diâmetro interno, o esquema da planta experimental é visto na Figura 13. Nesta planta experimental o escoamento bifásico é do tipo ar-água. O ar é armazenado em um reservatório de 100 litros equipado com um compressor de motor elétrico de 2 HP de potência. A água é procedente de um poço artesiano da própria instituição e possui uma condutividade elétrica de 380  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , sendo armazenada em um reservatório com capacidade para 300 litros. Para a medição do líquido existe um medidor do tipo Coriolis e um medidor de pressão diferencial é utilizado para a medição do gás.

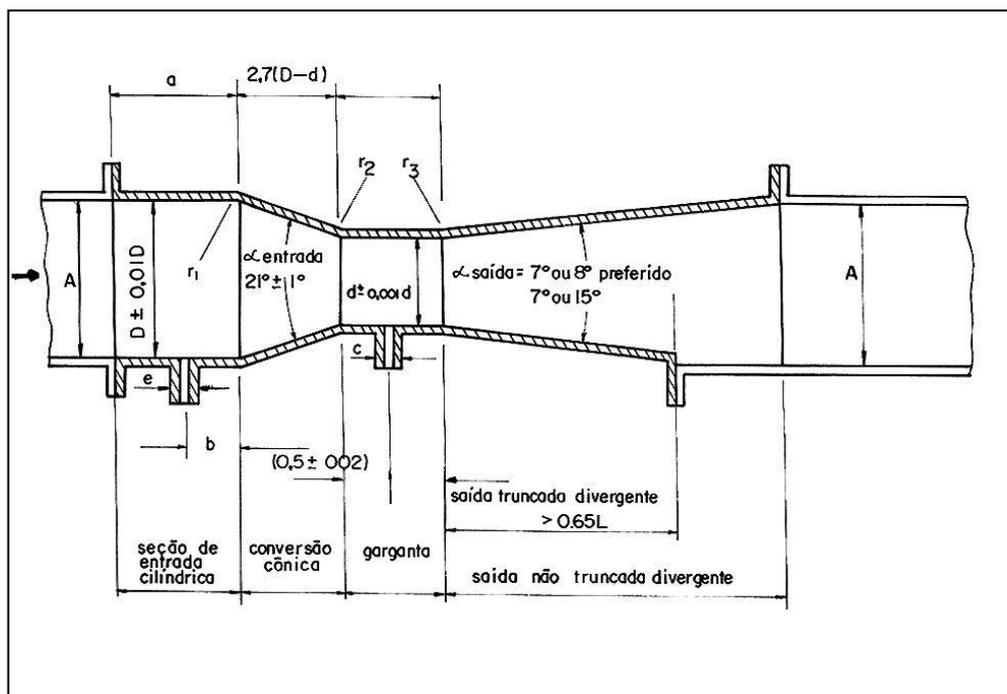
Uma bomba centrífuga que realiza a circulação do líquido no circuito é controlada por um inversor de frequência acionado remotamente, possibilitando controlar a velocidade das fases, e deste modo formar os diferentes padrões de escoamento na planta. A planta possui dois sensores *wire-mesh* separados por 5,12 cm, onde ambos realizam as medições da fração de vazão do escoamento em determinado intervalo de tempo. O sensor *wire-mesh* é posicionado a 8 metros do misturador e permite que o escoamento se desenvolva melhor para a realização da leitura. Ainda, uma câmera de alta velocidade presente no circuito é utilizada como referência para as medidas do escoamento.



**Figura 13 - Circuito Experimental de escoamentos bifásicos do LACIT.**  
**Fonte: Adaptado de Santos (2011).**

### 3.2 DIMENSIONAMENTO DO TUBO VENTURI

O dispositivo tubo de Venturi é constituído de uma seção de entrada cilíndrica, seguido de um convergente de entrada cônica, ligada à uma seção cilíndrica chamada de garganta, e uma seção cônica de expansão divergente chamada de saída truncada divergente conforme a Figura 14. Essas medidas são referenciadas na norma ASME de 2004.

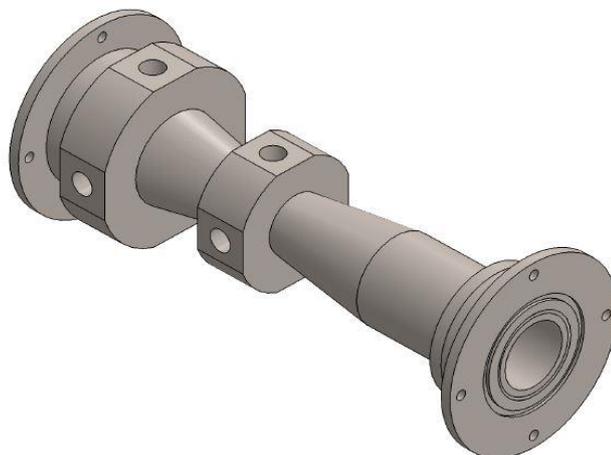


**Figura 14 - Tubo de Venturi, vista em corte lateral.**  
**Fonte: ASME MFC-M 2004.**

A Figura 14 nos fornece alguns valores de referência, segundo as normas, para o tubo de Venturi. A relação entre diâmetros  $D$ , diâmetro maior do tubo, e  $d$ , diâmetro menor, pode ser variada entre 0,3 e 0,7, sendo o mais comum o valor médio de 0,5 que conforme a ASME é chamado de  $\beta$ . O ângulo de inclinação da entrada deve ser de  $21^\circ$  com um erro de  $1^\circ$  (para mais ou para menos). Na saída truncada divergente, o ângulo segundo a norma ASME é  $7^\circ$  ou  $8^\circ$  mais comumente, ou senão  $15^\circ$  em alguns casos. O parâmetro  $A$  mostrado na Figura 17, localizado anterior à seção de entrada cilíndrica, segundo a norma, deve ter o seu valor no mínimo igual ao diâmetro  $D$ , da figura 14. As tomadas de pressão são realizadas na seção de entrada e na garganta. O tamanho da conversão cônica de entrada até a tomada de pressão corresponde a  $2,7(D - d)$ . A saída divergente deve ser menor que 65% do comprimento do total do Venturi (ASME, 2004).

Segundo a norma ASME e tendo como objetivo a utilização da planta experimental do LASII, a qual foi previamente descrita, utilizaremos o tubo de Venturi detalhado nesta seção. O mesmo foi projetado para a utilização no projeto de doutorado de Wrasse (2015) e será implementado nos testes vinculados à abordagem dos métodos alternativos que serão discutidos na sequência deste trabalho, para a obtenção da velocidade superficial dos fluidos nos tipos de escoamentos tal como o

estratificado liso, em que ocorreram discrepâncias significativas nos resultados gerados com o sensor *wire-mesh*. A Figura 15 mostra uma visão tridimensional do Venturi. A Figura 16 mostra uma foto real do tubo de Venturi do LASII que será usado nos experimentos na planta experimental.

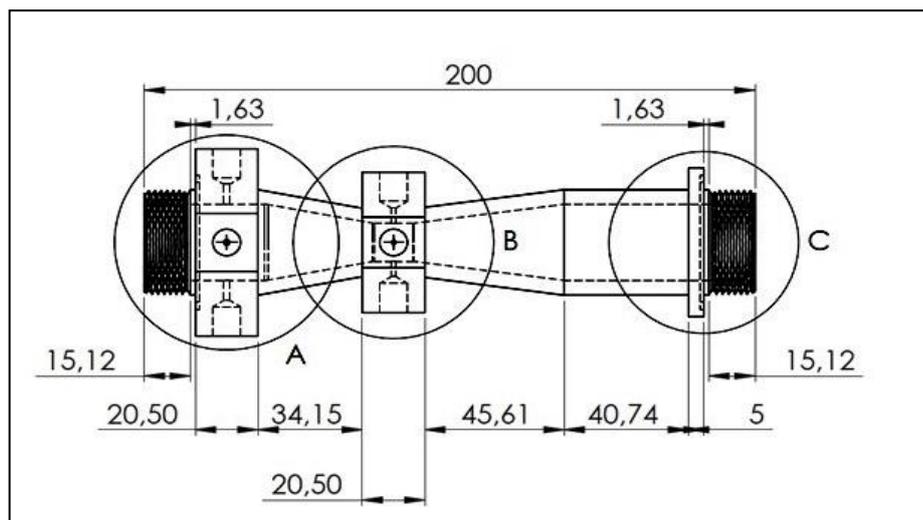


**Figura 15 - Modelagem tridimensional do Tubo de Venturi.**  
**Fonte: Conjunto Venturi (BERTOLDI, 2015).**



**Figura 16 - Tubo de Venturi do LASII.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A Figura 17 fornece um detalhamento das dimensões do tubo de Venturi, onde seu comprimento total é de 200 mm incluindo as roscas de fixação.

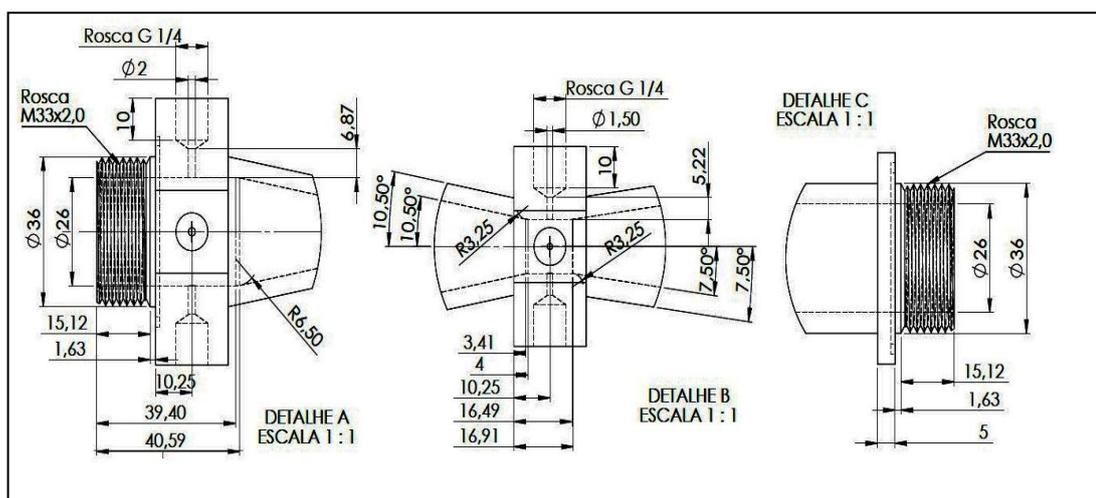


**Figura 17 - Detalhamento técnico de medidas do Tubo de Venturi, dividido em três regiões.**

**Sendo A entrada e Conversão cônica, B garganta e C saída não truncada divergente.**

**Fonte: Conjunto Venturi (BERTOLDI, 2015).**

Visto que a planta possui um diâmetro de 26 mm, o maior diâmetro especificado do tubo será de mesmo valor. Conforme a norma, o valor de  $\beta$  o qual corresponde à relação entre diâmetro maior (D) e diâmetro menor (d) é especificado para 0.5. A Figura 18 apresenta o detalhamento da garganta com um raio de 7,5 mm e, portanto, diâmetro de 13 mm.



**Figura 18 - Detalhamento de partes A, B e C do Tubo de Venturi.**

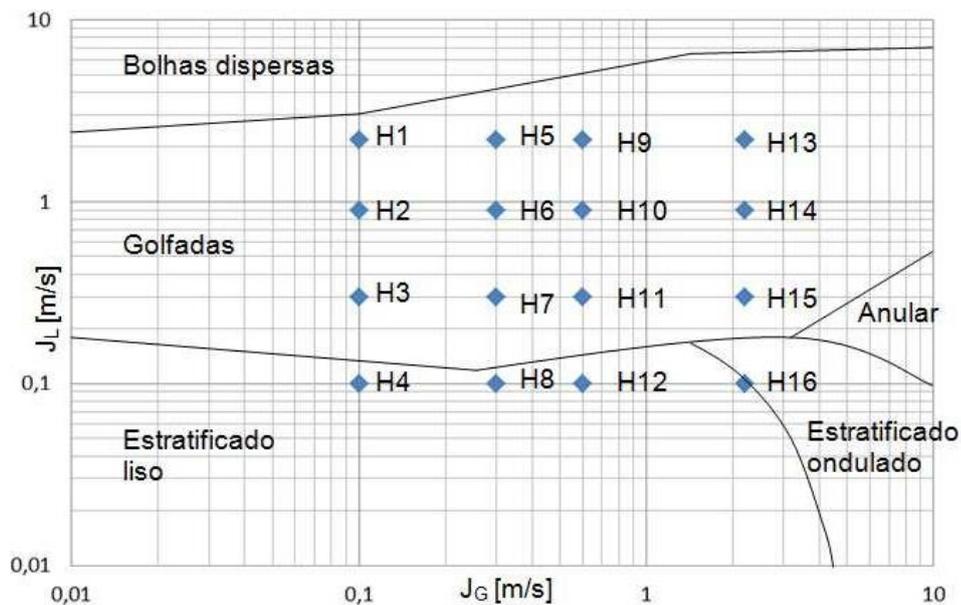
**Fonte: Conjunto Venturi (BERTOLDI, 2015).**

## 4 MÉTODOS E RESULTADOS

A seguir são descritos os resultados e metodologias desenvolvidas em torno do âmbito de escoamentos bifásicos. Após a apresentação da planta experimental, a seção é composta de três partes, a primeira descrevendo a técnica de correlação cruzada em conjunto com o sensor *wire-mesh* em um escoamento horizontal para determinação da velocidade das fases de um sistema bifásico ar-água. Em seguida serão apresentadas duas metodologias embasadas em autores distintos, buscando inferir as velocidades superficiais das fases líquida e gasosa utilizando o tubo de Venturi. Por fim, será abordado o desenvolvimento de um circuito tipo fonte de corrente aplicado à medição de impedância de fluidos e experimentalmente validado em protótipo com fluido em condição estática, cujo intuito é apresentar uma variação menos intrusiva do que o sensor *wire-mesh*.

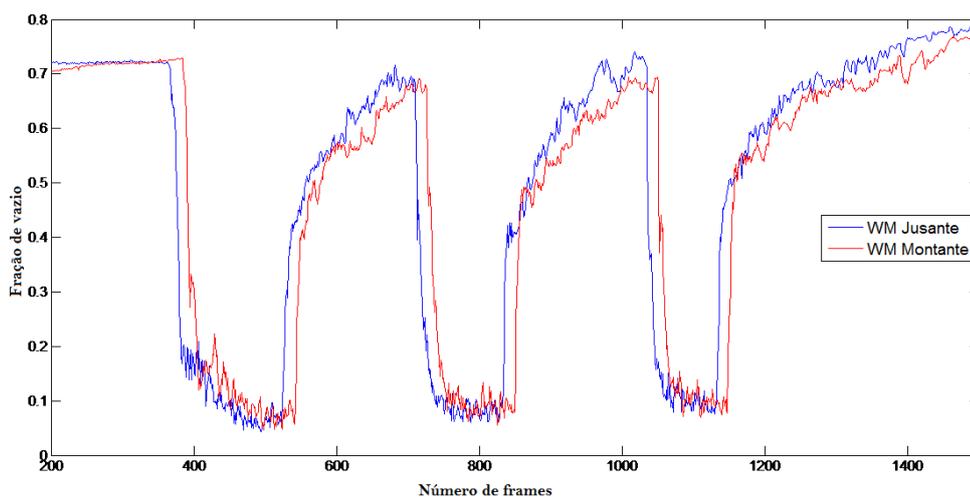
### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS DAS FASES ATRAVÉS DA CORRELAÇÃO CRUZADA

Na planta foram realizadas sessões experimentais com o objetivo de coletar dados para os diversos padrões de escoamento apresentados no mapa de fluxos da Figura 19. Foi realizado um total de 16 testes variando entre os tipos de fluxos e velocidades e posteriormente a determinação das velocidades superficiais da fase gasosa e da fase líquida. Para as séries temporais posicionou-se conforme mencionado, ambos os sensores *wire-mesh* em posição paralela e em planos adjacentes, um em relação ao outro, e separados por uma distância de 0.0512 m, de forma a adquirir dados com um atraso temporal que possibilitará encontrar as velocidades superficiais das fases pela técnica de correlação cruzada.



**Figura 19 - Mapa de fluxo para a bancada experimental referente a escoamentos bifásicos horizontais.**  
**Fonte: Adaptado de LIBERT (2013).**

A Figura 20 mostra a série temporal dos sensores WM à jusante e montante para o ponto H15, como exemplo das rotinas aplicadas, onde a frequência de aquisição dos dados foi de 1000 frames por segundo durante 60 segundos, desta forma totalizando 60000 frames por coleta. Pode-se observar o deslocamento entre as séries temporais.



**Figura 20 - Séries temporais do ponto H15.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Obtém-se um valor médio da fração de vazio de  $\alpha$  e da velocidade média do gás obtida da correlação cruzada, chega-se a velocidade superficial do gás ( $J_G$ ) a partir da equação (4.1).

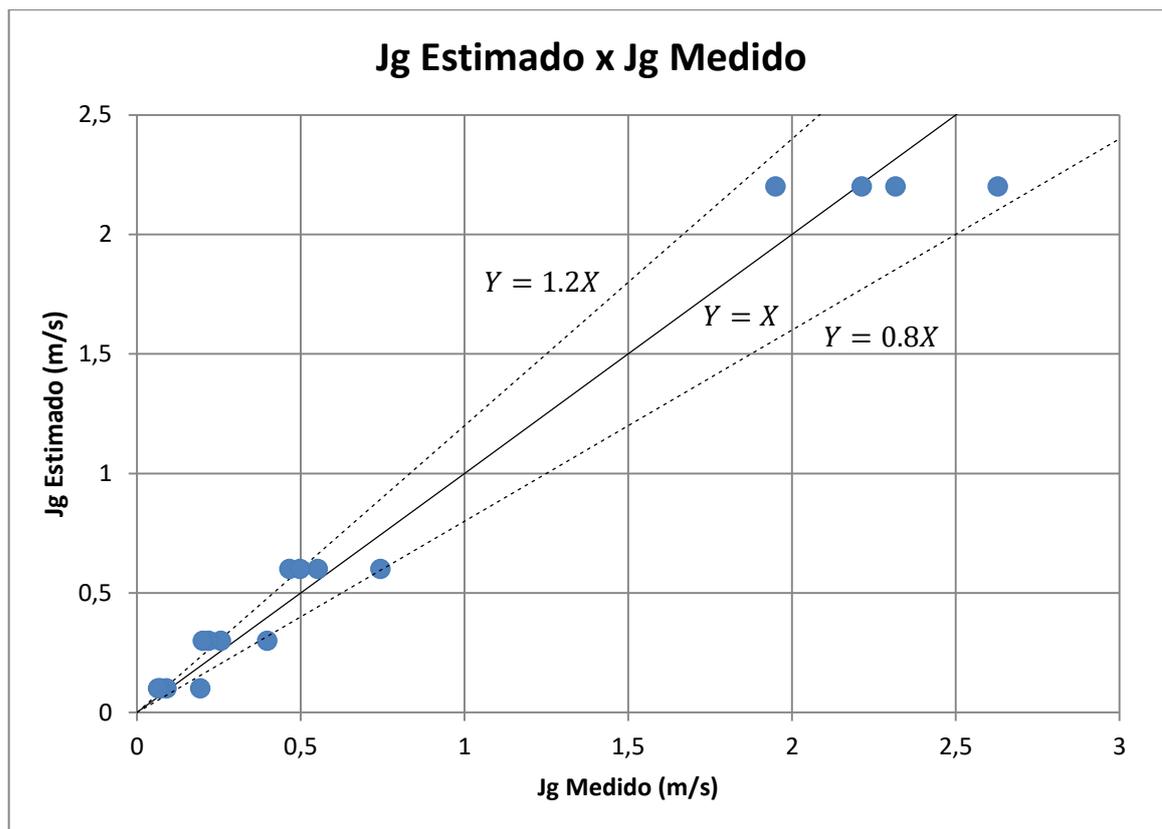
$$J_G = \frac{Q_{gás}}{A_t} = \frac{A_t \cdot \alpha \cdot V_{gás}}{A_t} = V_{gás} \cdot \alpha \quad (4.1)$$

Para cada serie temporal H1 à H16 foram executados os procedimentos descritos anteriormente, obtendo-se os valores de  $J_G$  através da correlação cruzada como mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Dados de velocidades superficiais do gás obtidos a partir da técnica de Correlação cruzada, e as velocidades superficiais do gás do mapa de fluxo da planta.**

	$J_G$ da Correlação Cruzada [m/s]	$J_G$ do Mapa de Fluxo [m/s]
H1	0.1937	0.1
H2	0.0901	0.1
H3	0.0714	0.1
H4	0.0650	0.1
H5	0.3981	0.3
H6	0.2561	0.3
H7	0.2193	0.3
H8	0.2015	0.3
H9	0.7435	0.6
H10	0.5515	0.6
H11	0.4657	0.6
H12	0.4975	0.6
H13	2.6284	2.2
H14	2.3166	2.2
H15	2.2135	2.2
H16	1.9498	2.2

Tendo como base os valores medidos da Tabela 2, foi construído o gráfico da Figura 21 que relaciona os valores experimentais com os valores do mapa de fluxo.



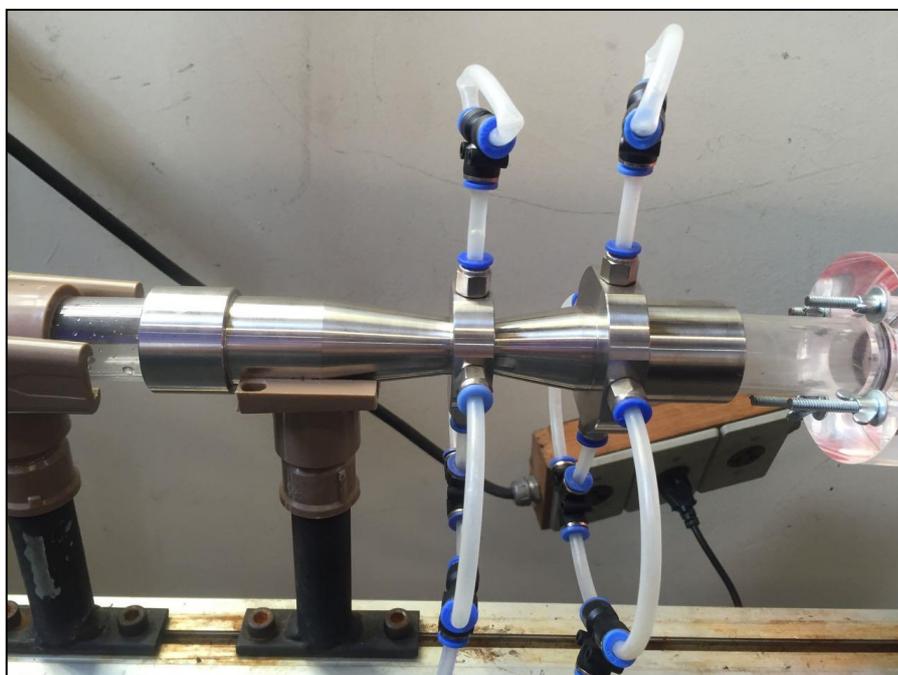
**Figura 21 - Gráfico  $J_G$  Estimado x  $J_G$  Medido. Reta tracejada ( $Y = 1.2X$ ) – Desvio de mais 20% do  $J_G$  medido em relação ao estimado. Reta contínua – Valores sem desvio. Reta tracejada ( $Y = 0.8X$ ) – Desvio de menos 20% do  $J_G$  medido em relação ao estimado. Fonte: Autoria Própria.**

O Gráfico da Figura 21 fornece um panorama dos resultados dos experimentos utilizando a técnica de correlação cruzada. Quanto mais próximos estiverem os pontos da reta contínua, mais próximos são os valores do  $J_G$  medido em relação ao pré-determinado pelo mapa de fluxo da planta. As retas tracejadas delimitam os desvios absolutos de 20% para mais e menos, relativos aos fatores correlacionados. Verifica-se que alguns pontos do experimento tiveram resultados com disparidades significativas, denotando em um questionamento acerca da eficácia da técnica aplicada. Esta análise serviu de critério para a escolha do tubo de Venturi no prosseguimento do estudo dos pontos do mapa de fluxo. A técnica de correlação cruzada diante desta problemática tornou-se ineficaz em alguns casos, devido às interferências geradas pelo tipo de sensor utilizado, deformando certos padrões de escoamentos. Por exemplo, em um escoamento com bolhas pequenas ou bolhas grandes, o primeiro *wire-mesh* pode distorcer ou deformar as mesmas até chegarem ao próximo sensor, inviabilizando a precisão do sistema.

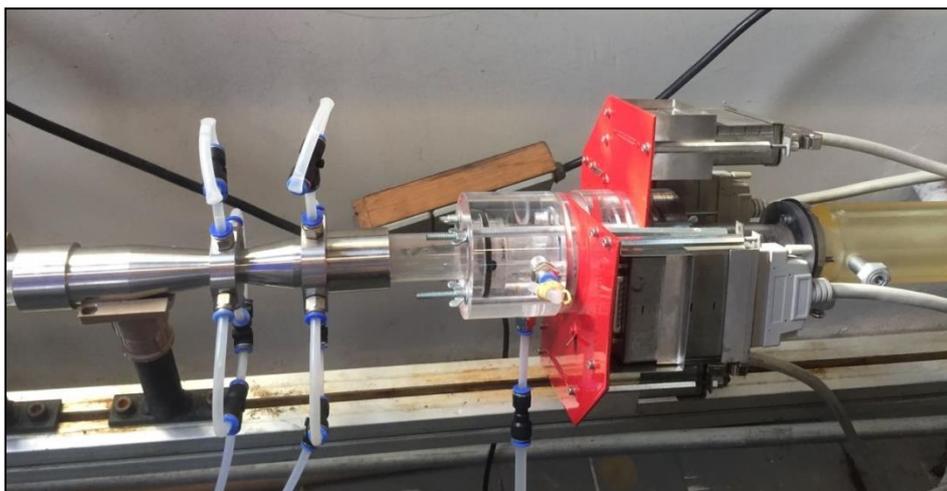
## 4.2 METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES E VELOCIDADES SUPERFICIAIS DAS FASES

Como segundo objeto de estudo, tem-se a utilização do tubo de Venturi como opção auxiliar aos sensores e, deste modo, determinar a velocidade das fases. Entretanto, medir a vazão de um sistema multifásico requer um estudo muito mais aprofundado se comparado com a medição de um sistema monofásico, visto a maior complexidade do sistema. Ainda se atribui o fato de que os processos de medição em sistemas multifásicos requerem alta tecnologia e precisão, aumentando os custos de processo. Geralmente as fases são separadas antes de realizar a medição da vazão (PEREIRA, 2006). Nesta etapa do trabalho, não haverá separação de fases com o objetivo de medi-las de forma simultânea. Será, portanto, utilizado um tubo de Venturi em conjunto com sensores capacitivos *wire-mesh*, a fim de medir as velocidades das fases sem proceder com a separação das mesmas.

Sessões de testes experimentais foram realizadas na planta do LACIT com o objetivo de adquirir novos dados do tubo de Venturi e dos sensores capacitivos. Os dispositivos são mostrados nas imagens a seguir.



**Figura 22 - Tubo de Venturi da planta experimental do LACIT - UTFPR Curitiba.  
Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 23 - Tubo de Venturi e sensores *wire-mesh*, planta experimental LACIT - UTFPR Curitiba.  
Fonte: Autoria Própria.**

Os parâmetros do tubo de Venturi foram coletados por meio de um transdutor conectado via rede *Field Bus* ao controlador (PC), o qual armazenou e analisou os dados a partir de uma plataforma supervisória desenvolvida em ambiente LabVIEW.

O procedimento de testes foi inicialmente executado apenas com ar e na sequência apenas com água. Após uma sessão prévia de teste para calibração dos sensores, foi realizado um total de 16 testes, os quais forneceram dados das séries temporais correspondentes coletadas por cada um dos sensores *wire-mesh*, e parâmetros tais como a diferença de pressão, pressão diferencial e absoluta e temperatura do fluido proveniente do transdutor ligado ao Venturi.

Outros transdutores foram utilizados para capturar as pressões absolutas do gás e da água antes da mistura, bem como suas velocidades monofásicas, pressão atmosférica, temperatura ambiente, entre outras características. A fração de vazio ( $\alpha$ ) foi obtida das séries temporais dos sensores *wire-mesh*. A tabela 3 seguir apresenta os dados da correlação cruzada aos quais foram tratados conforme descrito na sessão 4.1, enquanto que os parâmetros do Venturi podem ser encontrados nas Tabelas 6 e 7 do APÊNDICE I.

**Tabela 3 - Dados de referência e fração de vazio.**

Amostra	$J_{g\ ref}$ [m/s]	$J_{l\ ref}$ [m/s]	$\alpha_g$
H1	0,103702	2,2	0,0757
H2	0,097938	0,9	0,0702
H3	0,100057	0,3	0,1233
H4	0,100057	0,14	0,1753
H5	0,303224	2,2	0,1411
H6	0,302437	0,9	0,189
H7	0,307174	0,3	0,2648
H8	0,30345	0,1	0,3528
H9	0,593602	2,2	0,2473
H10	0,610965	0,9	0,3602
H11	0,607146	0,3	0,4044
H12	0,608719	0,1	0,4795
H13	1,71	2,16	0,4582
H14	2,2	0,91	0,5582
H15	2,15	0,3	0,626
H16	2,15	0,17	0,6843

Na Tabela 3, foram adicionadas duas colunas com as velocidades de referência da água ( $J_{l\ ref}$ ) e do gás ( $J_{g\ ref}$ ), antes das substâncias passarem pelo misturador e ingressarem no circuito da planta experimental. Nas sessões seguintes, estes valores serão usados como referencial para análise comparativa com os valores calculados, viabilizando avaliar a precisão do sistema.

#### 4.2.1 Análise dos Dados Coletados

A análise dos dados foi fundamentada no trabalho de pesquisa de três autores distintos, onde cada um destes contemplou uma parcela da metodologia descrita a seguir, objetivada na determinação das velocidades superficiais das fases. Primeiro, foi analisado o trabalho de Oliveira (2007) o qual descreve o método de correção do modelo homogêneo semi-empírico proposto por Zhang et al. (1992) e (2005). O autor atribui em seu trabalho constantes para a correção de medições e parâmetros do sistema, com os quais é possível chegar a valores de vazões mássicas dos fluidos. Em prosseguimento à determinação da velocidade das fases, foi necessário a avaliação de um segundo método, neste caso descrito por Morales (2004). Entretanto, visto que o autor considera informações além das disponíveis nas medições

experimentais envolvidas neste trabalho, foi necessário avaliar a pesquisa de Da Silva (2011) complementando a metodologia aplicada.

A primeira etapa deste método considerará o escorregamento entre as fases ( $S$ ) dentro de uma tubulação, o qual é matematicamente descrito na Equação 2.27. Esta equação relaciona as massas específicas das fases, fração de vazio do escoamento e o título. Em escoamentos monofásicos considera-se o escorregamento do sistema como de valor unitário (STEVEN, 2002), entretanto, por se tratar de um sistema bifásico o valor de ( $S$ ) será diferente de um, devido ao título  $x$  sofrer alteração em seu valor, uma vez que a fase gasosa estará fluindo concomitante com a fase líquida. Será previamente necessário, portanto, realizar o cálculo do título que utilizará a equação 2.38, em que o parâmetro é relacionado aos padrões de escoamento considerando algumas das constantes numéricas mostradas na Tabela 1. De acordo com a Tabela 1 e visto que o circuito da planta do LACIT operava no modo borbulhado, o coeficiente  $c'$  será neste caso igual a 0,5, enquanto o parâmetro  $m$  será igual a 0,02. Após o cálculo do título  $x$  para cada amostra, retoma-se a equação 2.27 e calcula-se o escorregamento do sistema. A tabela 8, localizada no APÊNDICE I, contém os valores dos parâmetros descritos.

A partir deste ponto é utilizada a Equação 2.25 para o cálculo da vazão mássica ( $\dot{m}$ ). Assume-se  $Y_{bi}$  e  $F_a$  como de valor um de acordo com o mencionado na seção 2.4, devido a considerar o número de Mach igual a 0,3, visto que esta informação é desconhecida da planta experimental. Oliveira (2007) atribui este valor para fluidos a baixos títulos (em concordância aos resultados da Tabela 8) e, deste modo, classifica o escoamento como incompreensível. Além disso, considerou-se  $A_2$  com valor de  $0,00053 \text{ m}^2$ ,  $\beta$  igual a 0,5 e massa específica do líquido ( $\rho_l$ ) igual a  $996,8 \text{ kg/m}^3$ . Os valores da queda de pressão ( $\Delta P$ ) no Venturi são apresentados na Tabela 7 do APÊNDICE I.

O fator de correção  $K_L$ , o qual realizará a correção do sistema (ver seção 2.4 para mais detalhes), em sistemas monofásicos pode ser desconsiderado, mas para escoamentos bifásicos este fator é relevante e pode ser determinado com a equação 2.37, onde os parâmetros  $c$ ,  $n$  e  $m$  são encontrados na Tabela 1.

O coeficiente de descarga  $Cd$ , é, segundo o autor, definido como uma função do número de Reynolds ( $Re$ ) quando em escoamentos internos, sendo necessário para corrigir ruídos e distorções que aparecem na prática quando do uso da equação

de Bernoulli. O número de Reynolds da mistura ar-água será calculado pela equação 3.1, onde  $J$  é a velocidade da mistura,  $D$  o diâmetro da tubulação,  $\rho_L$  a densidade específica do fluido e  $\mu_L$  é a viscosidade do líquido (CASTILLO, 2013).

$$Re = \frac{\rho_L J D}{\mu_L} \quad (4.2)$$

A velocidade da mistura  $J$  será a soma das velocidades de referência ( $J_{g\ ref}$  e  $J_{l\ ref}$ ), mostradas na tabela 3. O diâmetro da tubulação é de 26 mm, a densidade do fluido  $\rho_L$  para cada amostra é 996,4 kg/m<sup>3</sup> e a viscosidade  $\mu_L$  de valor 1,002x10<sup>-3</sup> Ns/m<sup>2</sup>. A Tabela 9 do APÊNDICE I contém os valores do número de Reynolds para este circuito. Com todos os parâmetros previamente determinados foram calculadas as vazões mássicas para cada uma das amostras coletadas, conforme a tabela 11.

Serão assumidas algumas considerações propostas pelo autor, que expõe que o coeficiente  $Cd$  torna-se constante quando o número de Reynolds é maior que 25000, ocorrência que é observada para a maioria das amostras da Tabela 9. Assumindo a consideração acima, Oliveira (2007), ainda complementa que de acordo com a NBR ISO 5167-1/1994, o coeficiente de descarga para tubos de Venturi pode ser considerado de valor 0,98. Contudo este valor é atribuído de forma empírica e pode facilmente variar dependendo do processo, da planta, e de características construtivas do tubo de Venturi.

A próxima seção será um prosseguimento das etapas previamente descritas, e avaliará os métodos propostos por Morales (2004) e por Da Silva (2011).

#### 4.2.2 Metodologia de Determinação das Velocidades Superficiais

Nesta seção será dada sequência à abordagem anterior, objetivando determinar as velocidades das fases com o emprego de sensores capacitivos (*wire-mesh*) em conjunto com um tubo de Venturi. Os trabalhos de Morales (2004) e de Da Silva (2011) serão a fundamentação desta etapa. Serão usados os mesmos dados experimentais e os valores previamente calculados sob o embasamento de Oliveira (2007).

Morales realizou os experimentos com o tubo de Venturi disposto verticalmente, porém os dados coletados para este trabalho foram gerados a partir do emprego de um Venturi em uma tubulação horizontal. Por este motivo, a influência da gravidade pode ser descartada da análise. Considerou-se ainda para este experimento a temperatura ambiente e a pressão sobre o Venturi com um valor próximo ao da pressão atmosférica.

Em relação aos cálculos e a análise dos resultados, o autor determinou de forma empírica os valores do coeficiente de descarga ( $Cd$ ) e da correlação cruzada. Neste trabalho, o valor da correlação cruzada foi demonstrado e calculado na seção 4.1, através das aquisições com o sensor *wire-mesh*.

Devido à pequena variação da massa específica da água, esta será considerada constante de valor  $996,8 \text{ kg/m}^3$ , de acordo com as medições do transdutor da planta. A massa específica do ar deverá ser corrigida tendo como base a teoria dos gases ideais, como pode ser visto a seguir na equação 4.3.

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (4.3)$$

Em que  $M$  é a massa molar de valor 28,96 mols,  $P$  é a pressão absoluta do gás apresentado na Tabela 7 APÊNDICE I,  $R$  a constante dos gases ideais de valor 8314 e  $T$  a temperatura em Kelvin (valores convertidos da temperatura medida em grau Celsius), apresentados também na Tabela 7. Ainda, foi necessário corrigir a massa específica da mistura ( $\rho_h$ ) usando a equação 4.4, a seguir:

$$\rho_h = (1 - \alpha_g)\rho_l + \alpha_g\rho_g \quad (4.4)$$

Em que  $\alpha_g$ ,  $\rho_l$  e  $\rho_g$  representam a fração de vazio do gás, a massa específica do líquido e a massa específica do gás respectivamente. A tabela 10 apresenta os valores corrigidos para cada amostra experimental.

Partindo da equação (4.5), mostrada a seguir, chega-se às velocidades superficiais das fases, objetivo final do método descrito. Porém, o uso desta expressão é dependente de parâmetros ainda não conhecidos os quais terão de ser avaliados preliminarmente.

$$\begin{bmatrix} \rho_l A & \rho_g A \\ -\alpha_g C_0 & 1 - \alpha_g C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_l \\ J_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{m} \\ \alpha_g V_{jg} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

As constantes  $C_0$  e  $V_{jg}$  são respectivamente, o parâmetro referente à distribuição de fases e a velocidade de fluxo de deriva. Estas constantes serão determinadas a partir da construção de um gráfico (Gráfico de Drift) que relacionará a velocidade de referência da mistura com a velocidade média  $\left(\frac{J_g}{\alpha_{cc}}\right)$  do gás procedente da metodologia descrita para a técnica de correlação cruzada, abordada na seção 3.1.

A velocidade de referência da mistura pode ser obtida como a soma das velocidades de referência de cada fase, equação 4.6.

$$J = J_{l\ ref} + J_{g\ ref} \quad (4.6)$$

As velocidades de referência do gás e do líquido são dependentes da vazão volumétrica dos fluidos e da área da garganta do tubo de Venturi. Relacionando primeiramente a pressão absoluta com a vazão volumétrica, fundamentada na lei da continuidade (equação 2.17), obtém-se equação (4.7),

$$Q_1 P_1 = Q_2 P_2 \quad (4.7)$$

Tendo conhecidas as vazões volumétricas  $Q_l$  e  $Q_g$ , e sendo  $A_T$  a área da garganta do tubo de Venturi, determina-se o valor das velocidades de referência utilizando as equações 4.8 e 4.9.

$$J_{l\ ref} = \frac{Q_l}{A_T} \quad (4.8)$$

$$J_{g\ ref} = \frac{Q_g}{A_T} \quad (4.9)$$

Retomando a equação 4.6 encontra-se finalmente a velocidade de referência. A Tabela 12 do APÊNDICE I contém os valores calculados necessários para a construção do Gráfico de Drift.

A equação 4.9 de Zuber e Findley determinou o modelo de velocidade Drift. Este modelo conhecido como modelo de deriva (Drift Flux Model de 1965) é aplicado para sistemas multifásicos para avaliar parâmetros locais de escoamento em uma determinada área de seção que influenciam no movimento relativo entre fases (mais detalhes em Romo (2015)). Os parâmetros  $C_0$  e  $V_{jg}$  encontrados foram respectivamente 1.3481 e 0.072. O modelo Drift e o respectivo gráfico podem ser visualizados no APÊNDICE I.

$$\frac{J_g}{\alpha_g} = C_0 \cdot (J_g + J_l) + V_{jg} \quad (4.10)$$

Retomou-se por fim a Equação 4.5, considerando o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) como constante de valor 0.98 segundo a norma NBR ISO 5167-1/1994, e foram obtidos os valores das velocidades superficiais, conforme a Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados obtidos com o emprego do uso do tubo de Venturi em conjunto com o sensor capacitivo *wire-mesh* para obtenção das velocidades das fases.**

Amostra	$J_l$ (m/s)	Erro (%)	$J_g$ (m/s)	Erro (%)
H1	2,2585	2,6579	0,2498	140,8745
H2	0,9868	9,6454	0,1151	17,5743
H3	0,3845	28,1645	0,1145	14,4606
H4	0,2278	62,6827	0,1345	34,4682
H5	2,2330	1,4998	0,5036	66,0865
H6	0,9961	10,6730	0,3686	21,8791
H7	0,5459	81,9815	0,3791	23,4034
H8	0,3688	268,8185	0,4686	54,4087
H9	2,2465	2,1133	1,0444	75,9452
H10	0,9275	3,0509	0,8986	47,0812
H11	0,5614	87,1225	0,7754	27,7095
H12	0,5535	453,4882	1,0968	80,1738
H13	2,1366	-1,0840	2,8542	66,9105
H14	1,1299	24,1665	2,7365	24,3867
H15	0,8477	182,5778	3,2108	49,3391
H16	0,5817	242,1628	3,6481	69,6783

Como observado na Tabela 4, o método não atingiu resultados satisfatórios. Os fatores que contribuíram para a imprecisão da análise podem ser a atribuição de forma empírica à constantes e parâmetros tal como o coeficiente de descarga (Cd), sugerido pelo método de Oliveira (2007), a falta de sincronização completa entre a coleta de dados do sensor *wire-mesh* e do tubo de Venturi, além da presença de ruídos no circuito e da imprecisão dos valores das velocidades de referência das fases, as quais foram medidas antes das substâncias serem misturadas.

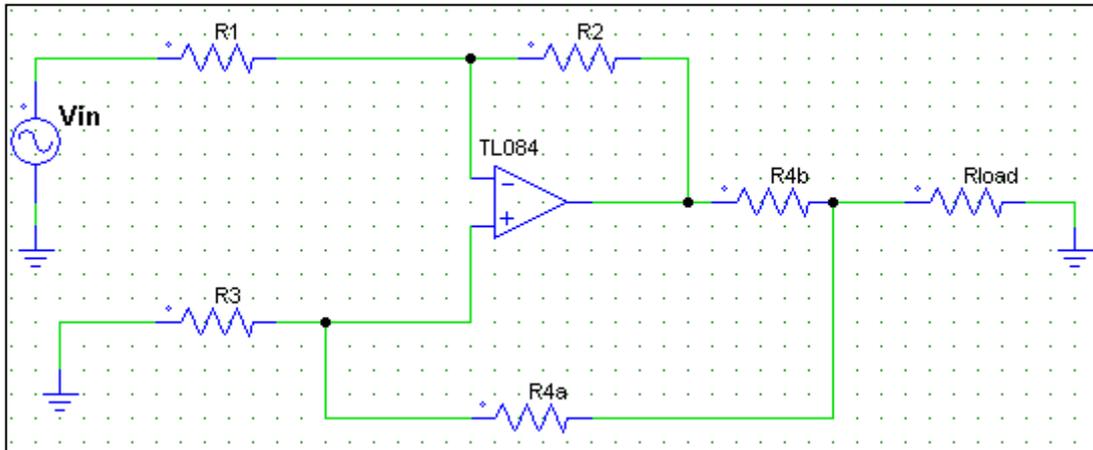
#### 4.3 PROPOSTA DE SENSOR EM HASTE E ELETRONICA PARA OPERAR O SENSOR

O sensor proposto atua sob o princípio de injeção de uma corrente elétrica conhecida e posterior determinação da impedância do fluido investigado. É uma técnica que se destaca pela simplicidade e versatilidade, podendo ser aplicada em sensoriamentos com a relação da resistência elétrica variando linearmente não apenas em função da tensão, mas também em função de outras grandezas físicas tais como pressão ou temperatura. A partir da aquisição da impedância de um meio físico, é viável, por exemplo, a diferenciação de fluidos presentes em um escoamento pela resistência característica de cada substância.

A fonte de corrente tem como características possuir uma impedância de saída alta e de fornecer um valor fixo de corrente alternada na saída independentemente do valor da carga, ou seja, a corrente sobre a carga não depende da mesma (Moro et al., 2016). Para a finalidade deste trabalho será apresentada a topologia fonte de corrente Howland Modificado que permitirá o ajuste da corrente com a alteração da magnitude dos resistores dispostos no circuito, viabilizando trabalhar com altos valores de impedância de saída e mantendo a estabilidade em uma ampla faixa de frequências.

### 4.3.1 Princípio de funcionamento da fonte de corrente de Howland

A Fonte Howland é uma Fonte de Corrente controlada por tensão. Se a resistência da carga sofrer variações, a fonte se encarregará de regular a tensão de saída, mantendo constante a corrente de saída.



**Figura 24 - Topologia de Howland Modificado. Fonte: Autoria Própria.**

A sua corrente de saída  $I_{OUT}$ , é dada pela relação:

$$I_{OUT} = \frac{V_{IN} \cdot R2}{R1 \cdot R_{4b}} \quad (4.11)$$

A corrente de saída é independente do valor da carga, entretanto a equação 4.12 a seguir, fornece uma estimativa da resistência de partida para o circuito atuar.

$$R_{OUT} = \frac{R1 \cdot R_{4b} \cdot (R3 \cdot R_{4a})}{R2 \cdot R3 - R1(R_{4a} \cdot R_{4b})} \quad (4.12)$$

Para manter a linearidade do circuito, a tensão de saída limiar do Amp-Op antes da saturação é descrita pela equação 4.13.

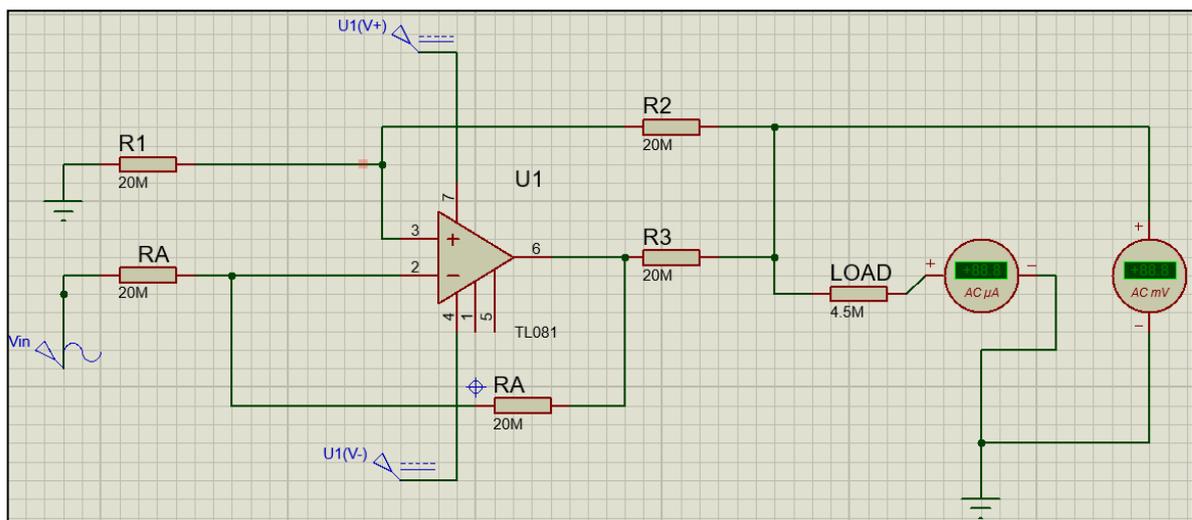
$$|V_{SATURAÇÃO}| = \left| \left( \frac{R3}{R3 + R_{4a}} \right) \left( \frac{R1 + R2}{R1} \right) V_L - \left( \frac{R2}{R1} \right) V_{IN} \right| \quad (4.13)$$

Em que  $V_{SATURAÇÃO}$  é a tensão de saída máxima em operação linear do Amp-Op,  $V_L$  é a tensão na carga e  $V_{IN}$  representa a tensão de entrada. O amplificador operacional usado foi o TL081, pois é um componente de baixo custo, de alta velocidade e com capacidade de operação em uma ampla faixa de frequências, além de pouco susceptível a ruídos, sendo ideal a este tipo de aplicação.

#### 4.3.2 Simulação e Resultados

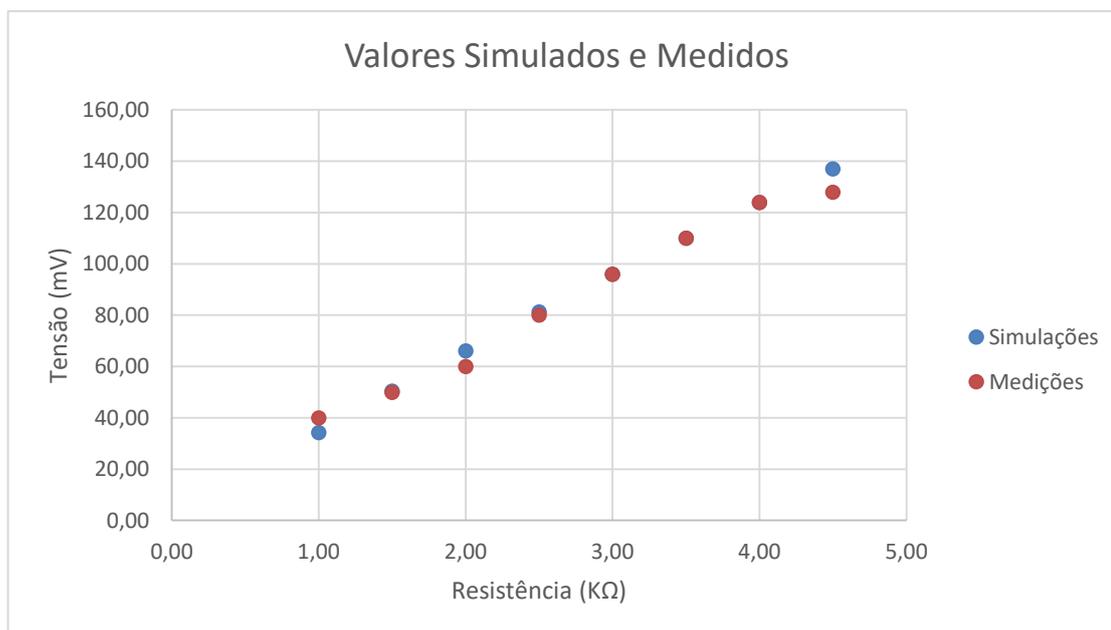
Em primeira abordagem foi projetado um circuito de Howland Modificado com valores de resistências de 20 M $\Omega$ , com exceção ao da carga, a qual teve seu valor variado. Foi utilizado nesta etapa o software Proteus para a simulação, devido a maior fidelidade com os componentes eletrônicos usados experimentalmente.

Visto que a corrente de saída  $I_{OUT}$  é independente do valor da carga, verifica-se a constância do valor de corrente com a variação de resistência. O gráfico a seguir demonstra a variação da carga até o valor de 5 M $\Omega$ , limiar de linearidade antes da saturação da fonte de corrente.



**Figura 25 - Simulação de circuito Howland Modificado no software Proteus.  
Fonte: Autoria Própria.**





**Figura 28 - Gráfico comparativo entre valores de tensão medidos e simulados.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.3.3 Sensor Experimental

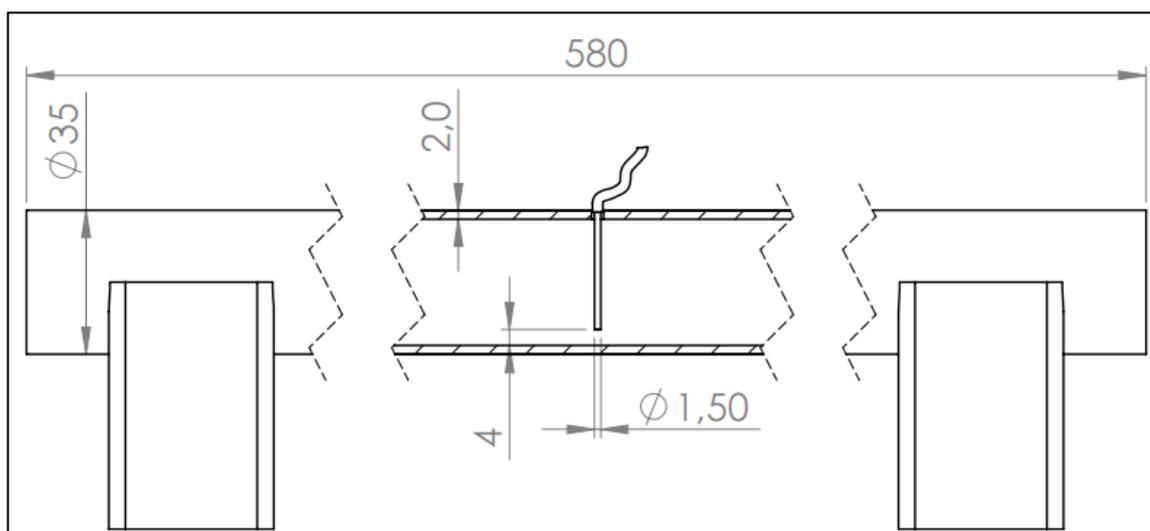
Após as simulações com os softwares Proteus e Psim e os testes experimentais com cargas previamente conhecidas, abordou-se uma última fase deste experimento, a qual consistiu em simular o sensor sob a presença do fluido atuando como carga. Foi projetado um tubo de cobre puro com 35 mm de diâmetro e 58 mm de comprimento, com capacidade volumétrica de 500 ml aproximadamente, como demonstrado na Figura 29. O objetivo do experimento foi medir a tensão na carga com volumes de água predeterminados e posteriormente relacioná-los com a corrente de saída, a qual apresentou consistência nas medições, pois se manteve aproximadamente constante independentemente do valor da carga. A razão entre a tensão medida sobre a carga e a corrente injetada pela fonte, é a impedância elétrica da substância a ser considerada no processo de caracterização. A água foi o fluido do experimento, devido a sua condutividade e facilidade de manuseio. O cobre foi o metal escolhido por apresentar boa condutividade elétrica.



**Figura 29 - Tubo de cobre fabricado para utilização como prova do circuito de Howland Modificado.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.3.4 Experimento

Tendo em vista a intenção de medir a tensão na carga na ordem de milivolts, e a presença significativa de ruídos, foi utilizado um osciloscópio digital para maior precisão nas medidas. A ponta de prova foi posicionada estrategicamente no interior do tubo de forma a não ter contato com superfície interna do mesmo. O aterramento foi ligado na superfície metálica externa do tubo. Neste teste, o circuito disposto é o da Figura 27, onde as resistências têm valores de  $20\text{ M}\Omega$  com exceção da carga que foi substituída pelo fluido que conduziu corrente entre a ponta de prova interna e a superfície do tubo de cobre, conforme desenho técnico em vista frontal mostrado na figura 30. A Tabela 5 apresenta os valores medidos do experimento.

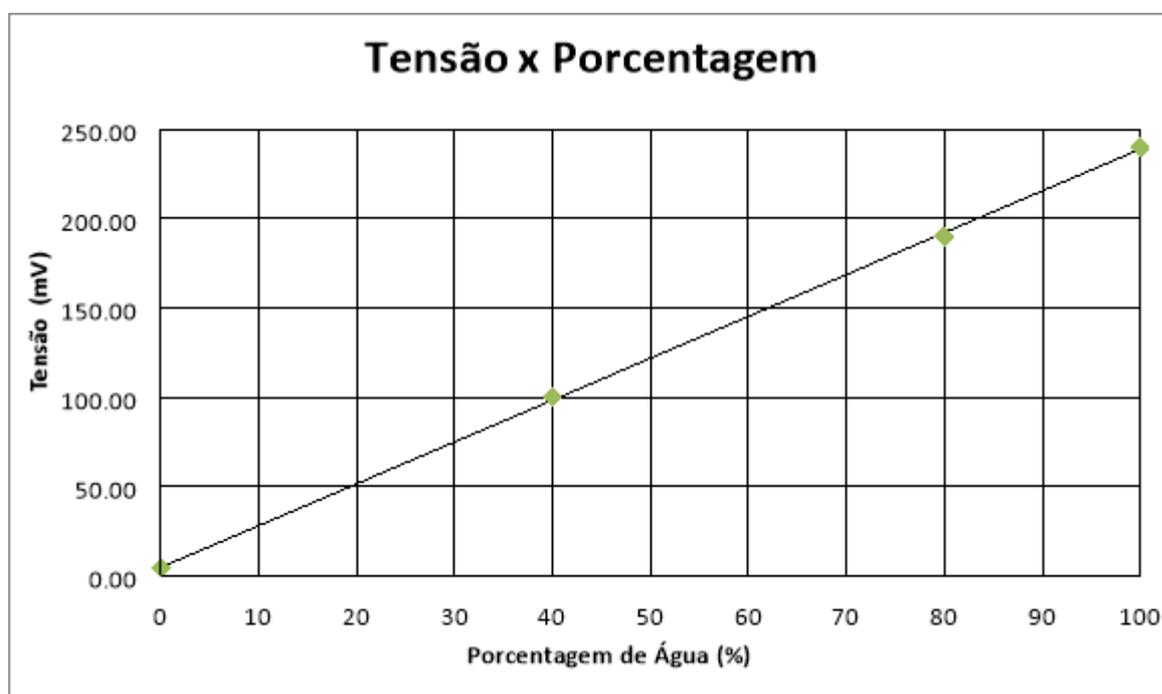


**Figura 30 - Desenho Técnico em vista frontal, do tubo experimental para o sensor de Howland Modificado.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

**Tabela 5 - Valores práticos circuito de Howland melhorado.**

Quantidade H2O (ml)	Quantidade H2O (%)	V(milivolts)	Corrente ( $\mu$ A)
0	0	4	0.023
200	40	100	0.021
400	80	190	0.029
500	100	240	0.035

Conforme dados da Tabela 5, houve uma linearidade na medição da resistência da água, demonstrada pela proporcionalidade entre a quantidade de líquido no interior do tubo, a tensão medida e a corrente que se manteve aproximadamente constante. Conclui-se que, devido a este comportamento, houve concordância com as características da fonte de corrente de Howland Modificado e suas relações fundamentais, validando o experimento. Com os dados contidos na Tabela 5, foi gerado o gráfico da Figura 31 contendo as medições realizadas com o sensor de impedância que demonstra a linearidade entre a tensão na carga e a porcentagem de água presente no tubo.



**Figura 31 - Gráfico contendo as medições realizadas com o sensor de impedância. Fonte: Aatoria Própria.**

## 5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sensor *wire-mesh* foi inicialmente avaliado em um cenário de escoamento bifásico horizontal composto por ar e água. Para a medida de velocidade das fases, foi utilizada a técnica de correlação cruzada a qual tratou os dados coletados das séries temporais geradas por cada um dos sensores presentes na tubulação. Contudo, foi observado que o experimento não gerou respostas satisfatórias para alguns padrões, como por exemplo, as séries H9, H13 e H16 onde o erro foi considerável. Um fator que pode ter impactado nos desvios de resultados, é o fato de terem sido considerados os valores médios das medições durante um intervalo de 60 segundos, e que no caso da presença de mais de um tipo de escoamento durante este intervalo, os valores podem ter sido interpretados de maneira errônea. Desta maneira, surgiu a necessidade de avaliar um segundo sensor para determinar seu comportamento frente aos tipos de escoamentos presentes no âmbito multifásico.

Na segunda parte desse trabalho foram abordadas metodologias de fusão de dados do sensor *wire-mesh* com dados de um tubo de Venturi para extração do parâmetro vazão multifásica. Estes métodos foram baseados nos modelos de medição de vazão multifásica por pressão diferencial. A utilização de um valor constante de coeficiente de descarga  $C_d$  implicou nos desvios de resultados, visto que neste trabalho foi utilizado um valor oriundo de um circuito semelhante, porém não idêntico.

Como parte final deste trabalho, foi desenvolvido o sensor de topologia Howland Modificado, a qual é capaz de manter a corrente constante para uma determinada variação na resistência da carga (fluido condutor). Dentro da abordagem experimental avaliada, o sensor teve uma boa resposta mantendo a linearidade prevista, em que a corrente permaneceu aproximadamente constante com a variação de 0 a 100% do volume total de líquido presente no tubo.

## REFERÊNCIAS

BARRETO, M. N. **Uma abordagem híbrida para identificação de escoamentos bifásicos**. p.18-21. Universidade Federal de Alfenas, 2011

BERTOLDI, D.; DALLALBA, C. C. S.; BARBOSA, J. R. **Investigação experimental dos fluxos intermitentes de duas fases de uma mistura binária de volatilidade relativamente infinito em um tubo Venturi**. Ciências Térmicas e Fluidos Experimental , v. 64, p. 152-163, 2015.

CAREY, V. P. **An introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment**. 1992.

CASSIOLATO, C.; ALVES, E.. **Medição de vazão. Controle e instrumentação**. São Paulo, v. 11, n.138, p. 70-78, jun./2008.

CASTILLO, F. E., **Caracterização Experimental do Escoamento Intermitente Líquido-Gás em Tubulações Horizontais**, 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

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

CHISHOLM, D. **Pressure gradients during the flow of incompressible two-phase mixtures through pipes, venturis and orifice plates**. British Chemical Engineering. v.12 (9), p. 454-457, 1967.

CHISHOLM, D. Reserch note: Two-phase flow through sharp-edged orifices. **Journal Mechanical Engineering Science**, v.19 (3), p. 128-130, 1977.

COLLIER, J. G.; THOME, J. R. **Convective Boiling and Condensation**. New York: Oxford University Press Inc., 1996.

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

DA SILVA, M. J.; **Experimental Investigation of Horizontal Gas-Liquid Slug Flow by Means of Wire-mesh Sensor**. In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 33, 2011.

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

FISCHER, A.; SCOTTI, F.; BORGES, L.; LEMOS, R. **Visualização de Escoamento Através de Medidores de Restrição**. Trabalho final da disciplina de medições térmicas, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

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

LIBERT, N. **Sistema de medição capacitivo para determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LIVI, C. P. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte: Um Texto Para Cursos Básicos**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2000.

LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R. C. **Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes**, Chemical Engr. Progress, 45, N-1:39—48, 1949.

MARASHDEH, Q.; WARSITO, W; FAN, L. S.; TEIXEIRA, F. L. A Multimodal Tomography System Based on ECT Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, p. 426-433, 2007.

MORALES, R. E. M., **Experimental and Numerical Development of a Two-Phase Venturi Flow Meter**. Journal of Fluids Engineering, Vol. 126, 2004.

MORO, L. C.; PORTO, R. W. **Estudo e implementação de tomógrafo por impedância elétrica**. Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada. Vol. 1, No 1. Universidade de Caxias do Sul, 2016.

OFUCHI, C. Y. **Técnicas avançadas para análise de escoamentos bifásico gás-líquido em golfadas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba.

OLIVEIRA, J. L. G. **Medição de Vazão de escoamentos bifásicos utilizando tubo de Venturi ou placa de Orifício associados a um sensor de fração de vazio com campo elétrico girante**. 2007.

OLIVEIRA, J. L. G.; PASSOS, J.; VERSCHAEREN, R.; VAN DER GELD, C. **Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a venture or orifice plate coupled to a void fraction sensor**. 2010.

OLIVEIRA, L. A.; CUNHA FILHO, J. S., J.; FACCINI, J. L. H.; Su. **Visualization of two-phase gas-liquid flow regimes in horizontal and slightly-inclined circular tubes**. In: 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Uberlândia, 2010.

PEREIRA, M. F. **Determinação das vazões em escoamentos bifásicos ar-água por meio de tubo Venturi e medidor de fração de vazio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

PETROBRAS MAGAZINE, Profundo futuro. Disponível em: <<http://www.petrobras.com/pt/magazine/post/profundo-futuro.htm>> Acesso em 2 de Outubro de 2016.

ROMO, B. N. **Escoamentos Multifásicos - Modelo de Deriva (Drift Flux Model)**. SISEA - Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, 2015.

SANTOS, E. N. dos. **Técnicas para extração de parâmetros de escoamentos bifásicos em regime intermitente utilizando o sensor *Wire-Mesh***. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, p. 75-82, 2011.

SANTOS, G. J. dos. **Sensor Capacitivo Inteligente para Monitoramento de Escoamentos Bifásicos**, p. 14-34, 2014.

SEDIVA, S.; UHER, M. **Analysis of the effect of body shape of multiport averaging Pitot tube on permanent pressure loss using ANSYS/FLUENT**. In: Programmable Devices and Embedded Systems. 2012. p. 322-326.

SHABAN, H.; TAVOULARIS, S. **On the accuracy of gas flow rate measurements in gas-liquid pip flows by cross-correlating dual *wire-mesh* sensor signals**. 2015.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes**. Richardson, EUA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

SILVA, C. B. C.; Borges Filho, M. J.; Pinheiro, J. A. **Medição de vazão e propriedades em escoamento multifásico: solução econômica para diferentes atividades industriais**. Bol. Téc. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 43 (1): 45-61, jan./mar. 2000.

STEVEN, R. N. **Wet gas metering with a horizontally mounted venture meter**. Flow Measurement and Instrumentation, 12, pp. 361-372, 2002.

TAITEL, Y.; BORNEA, D.; DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v. 26, n. 3, p. 345–354, 1980.

THORN R.; JOHANSEN, G. A.; HJERTAKER, B.T. **Three-phase flow measurement in the petroleum industry**. *Measurement Science Technology*, 2013

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.

WRASSE, Aluísio do Nascimento. **Sensor Capacitivo para imageamento direto de escoamentos bifásicos**, p. 16-70, 2015.

ZHANG, H. J.; LU, S. J.; YU, G. Z. **An investigation of two-phase flow measurement with orifices for low-quality mixtures**. In: International Journal of Multiphase Flow. v.18 (1), p. 149-155. 1992.

ZHANG, H. J.; YUE, W. T.; HUANG, Z. Y. **Investigation of oil-air two-phase mass flow rate measurement using venture and void fraction sensor.** In: Journal of Zhejiang University SCIENCE. v.6A (6), p. 601-606, 2005.

## APÊNDICE I - DADOS EXPERIMENTAIS

**Tabela 6 - Dados experimentais do tubo de Venturi.**

Amostras	Fluxo mássico [kg/s]	Temperatura do Líquido [°C]	Vazão Volumétrica do líquido [m <sup>3</sup> /s]	Pressão Absoluta do Venturi [N/m <sup>2</sup> ]
H1	1,16653	19,98342	0,001169	17829,34681
H2	0,479152	19,99426	0,00048	9988,792633
H3	0,159875	20,00246	0,00016	7899,672266
H4	0,076049	20,01532	0,0000762	7509,966597
H5	1,166096	19,96705	0,001169	30788,99474
H6	0,473763	19,96875	0,000475	12782,36795
H7	0,164973	19,96655	0,000166	8090,101212
H8	0,054209	19,97255	0,000543	7591,763461
H9	1,160873	20,01225	0,001163	47973,80817
H10	0,466037	20,0026	0,000467	14472,59222
H11	0,152949	19,99379	0,000153	8328,738632
H12	0,074712	19,98378	0,0000750	7814,635062
H13	1,145524	20,0514	0,001148	81556,01439
H14	0,474407	20,06419	0,000475	22354,2064
H15	0,17307	20,09754	0,000172	10652,92663
H16	0,050324	20,08873	0,0000512	8346,819741

**Tabela 7 - Dados Experimentais do tubo de Venturi, continuação.**

Amostra	$\Delta P$ Gás Monofásico [N/m <sup>2</sup> ]	Temperatura do gás [°C]	Vazão Volumétrica do gás [m <sup>3</sup> /s]	Pressão Absoluta do gás [N/m <sup>2</sup> ]	$\Delta P$ Venturi [N/m <sup>2</sup> ]
H1	602,724	20,35959	0,0000486281	428540,7	43768,77946
H2	470,824	20,3501	0,000011116	431606,5	8090,312454
H3	470,763	20,34286	0,0000029348	431668,7	1040,486276
H4	471,45	20,32923	0,0000013240	432017,5	314,0354654
H5	7550,05	20,43379	0,0000864928	416021,5	46181,44681
H6	5237,43	20,39583	0,0000147494	411701,6	9199,028578
H7	4833,34	20,41556	0,0000032187	416203,2	1840,523344
H8	4686,4	20,37817	0,0000010000	412384	868,5324624
H9	53902,5	20,53663	0,000141195	395299,6	53197,45059
H10	28643,2	20,53456	0,0000167984	402496,3	9076,740585
H11	23912,4	20,53065	0,0000031312	407910,3	1652,25533
H12	23827,4	20,51787	0,0000014422	406538,4	1767,468645
H13	58973,8	20,57196	0,000258461	362270,2	65308,35454
H14	40334	20,58689	0,0000271732	391006,4	13255,77916
H15	30835,3	20,58862	0,0000047583	384946	3804,238405
H16	31026,6	20,59	0,0000011019	387575,571	882,37368

Tabela 8 - Escorregamento e título do gás para cada amostra de dados coletada.

Amostra	$S(\%)$	$x$
H1	1,878928	0,036849
H2	1,80706	0,033975
H3	2,377759	0,063288
H4	2,869676	0,095653
H5	2,597735	0,07387
H6	3,06801	0,10477
H7	3,767908	0,161958
H8	4,70765	0,245076
H9	3,692704	0,147585
H10	4,85215	0,252985
H11	5,376606	0,305188
H12	6,577501	0,414047
H13	6,556018	0,379226
H14	8,701055	0,567423
H15	12,45907	0,751467
H16	35,36022	0,97328

Tabela 9 - Número de Reynolds para cada amostra coletada.

Amostra	$Re$
H1	57293,66
H2	24818,97
H3	9949,533
H4	5970,291
H5	62255,83
H6	29904,92
H7	15100,59
H8	10033,91
H9	69477,62
H10	37578,1
H11	22560,94
H12	17626,03
H13	96247,9
H14	77346,51
H15	60932,14
H16	57699

**Tabela 10 - Massas específicas corrigidas para cada amostra coletada.**

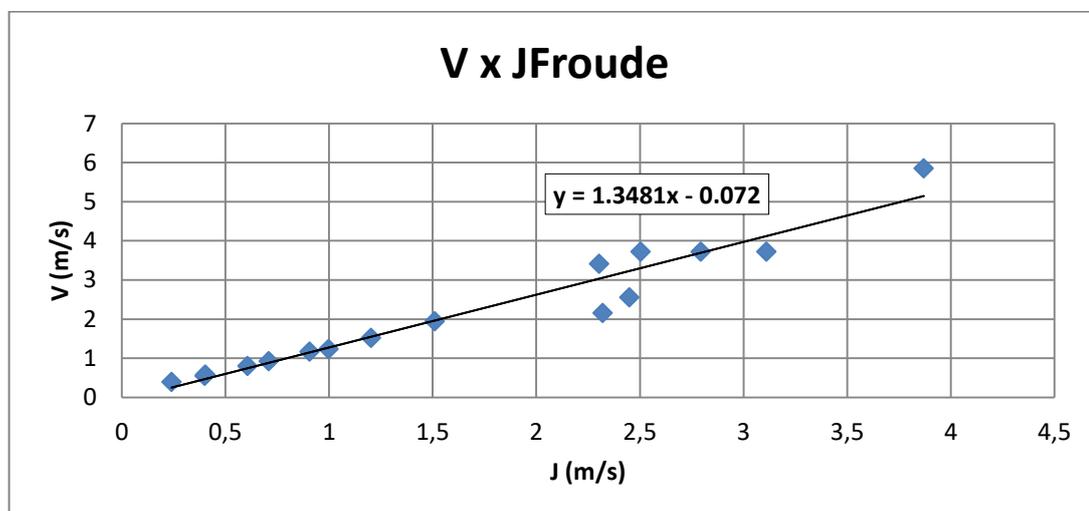
Amostra	$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_h$ (kg/m <sup>3</sup> )
H1	5,096694981	996,8	921,7281
H2	5,133245732	996,8	927,185
H3	5,134109665	996,8	874,5276
H4	5,138488903	996,8	822,9617
H5	4,946870491	996,8	856,8495
H6	4,896249045	996,8	809,3302
H7	4,949333731	996,8	734,1579
H8	4,904642467	996,8	646,8593
H9	4,699365254	996,8	751,4535
H10	4,784755639	996,8	639,4761
H11	4,849033486	996,8	595,655
H12	4,832972519	996,8	542,2807
H13	4,307101317	996,8	442,7905
H14	4,647650233	996,8	375,3975
H15	4,575756821	996,8	375,6676
H16	4,606895086	996,8	317,8423

**Tabela 11 – Fator de correção e vazão mássica.**

Amostra	$K_L$	$\dot{m}$
H1	0,97517	4,698891
H2	0,976957	2,029891
H3	0,959506	0,694359
H4	0,941723	0,36319
H5	0,953476	4,550167
H6	0,936839	1,939233
H7	0,908815	0,801442
H8	0,872885	0,496348
H9	0,915423	4,39086
H10	0,869617	1,589411
H11	0,84971	0,639496
H12	0,823564	0,611669
H13	0,76782	3,132378
H14	0,723942	1,225134
H15	0,723888	0,656506
H16	0,68025	0,273295

**Tabela 12 - Valores da velocidade de referencia da mistura e da velocidade média do gás, oriunda da correlação cruzada com os sensores *wire-mesh*.**

Amostra	J [m/s]	V [m/s]
H1	2,303	3,42
H2	0,997	1,24
H3	0,400	0,55
H4	0,240	0,4
H5	2,503	3,73
H6	1,202	1,52
H7	0,607	0,80
H8	0,403	0,58
H9	2,793	3,73
H10	1,510	1,95
H11	0,907	1,17
H12	0,708	0,93
H13	3,87	5,86
H14	3,11	3,73
H15	2,45	2,56
H16	2,32	2,16



**Figura 32 - Gráfico de Froude e modelo de velocidade Drift.**

## APÊNDICE II - CIRCUITO DE HOWLAND CLÁSSICO

Apresenta-se, neste anexo, o equacionamento detalhado das principais relações tensão-corrente para a topologia clássica da fonte de corrente de Howland. As principais relações têm para critério de validação, a respectiva simulação em software PSIM 9.0. Esta análise fundamenta a topologia de Howland Modificado utilizado nos experimentos, visto que todas as variações apresentadas na literatura para este modelo de fonte de corrente partem deste modelo clássico.

Sendo R1 e R2 de valores iguais conforme sugere esta topologia, a entrada negativa do amplificador operacional terá a metade do valor da saída. A entrada positiva também terá este mesmo valor, visto o divisor resistivo com resistores R3 e R4 de mesmo valor. É demonstrada a relação tensão de entrada e saída do amplificador operacional na simulação da figura 33, a qual foi utilizada uma fonte senoidal na entrada com amplitude  $V_{pp}$  de 1 Volt e frequência de 100000 Hertz.

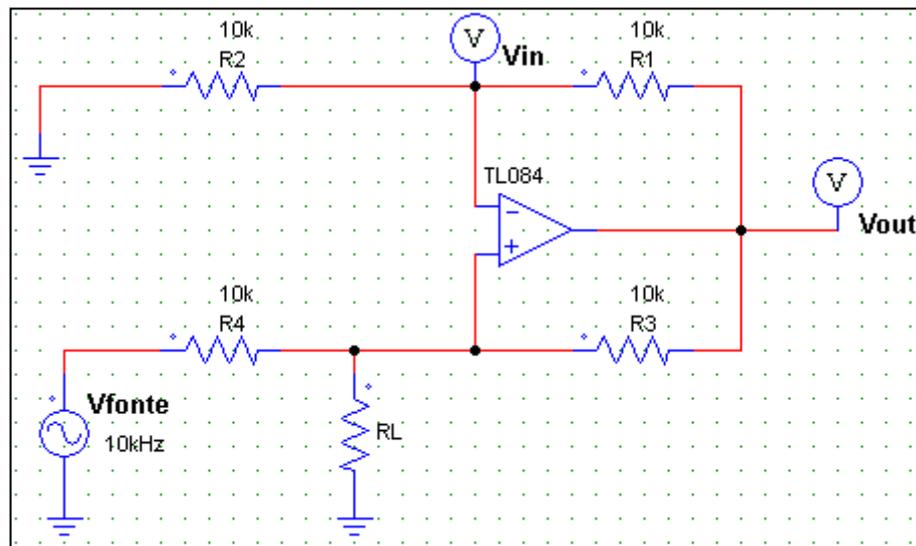
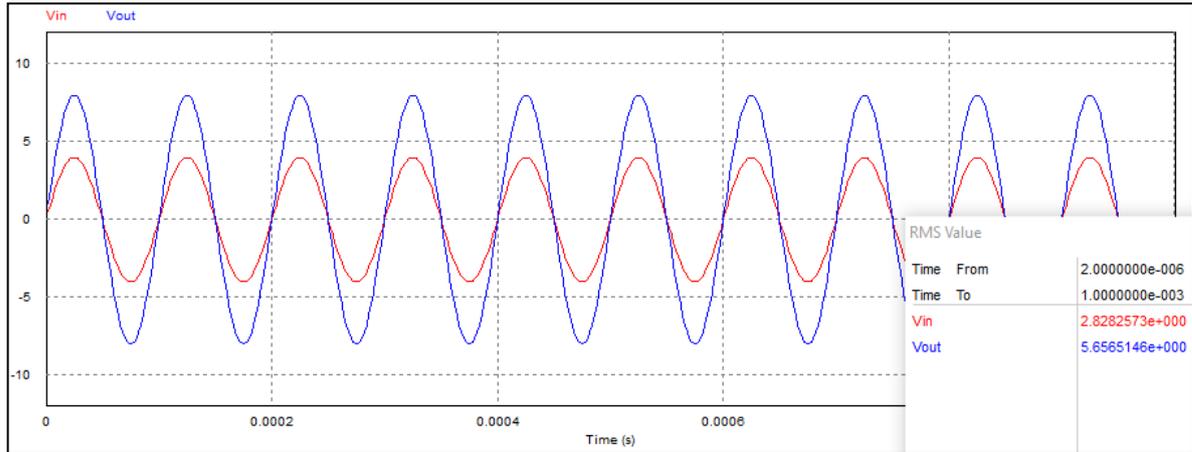


Figura 33 - Topologia Howland básico.

$$V_{in} = \frac{V_{out}}{2} \quad (1.1)$$



**Figura 34 - Relação entre a Tensão de saída e de entrada.**

A corrente através de R3 é dada por,

$$I_3 = \frac{V_{\text{fonte}} - V_{\text{in}}}{R_3} \quad (1.2)$$

A corrente através de R4 é dada por,

$$I_4 = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{R_4} \quad (1.3)$$

A corrente total, portanto sobre o resistor de carga RL pode ser formulada como,

$$I_{\text{out}} = \frac{V_{\text{fonte}} - V_{\text{in}}}{R_3} + \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{R_4} \quad (1.4)$$

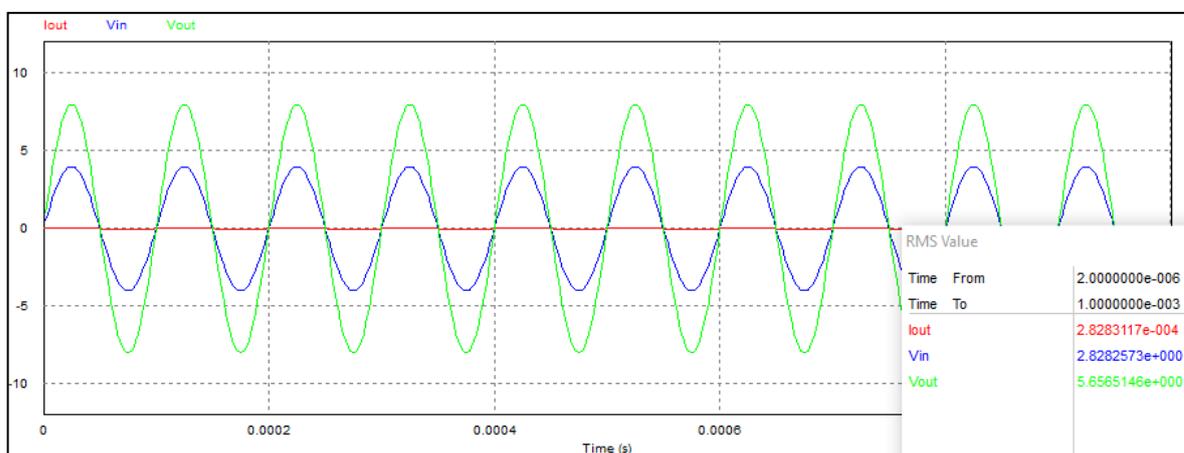
Simplificando a nomenclatura de R3 e R4 para R visto que ambos têm o mesmo valor e substituindo a relação 2.38 na equação 2.41 obtém-se:

$$I_{\text{out}} = \frac{V_{\text{fonte}} - \frac{V_{\text{out}}}{2}}{R} + \frac{V_{\text{out}} - \frac{V_{\text{out}}}{2}}{R} \quad (1.5)$$

Cancelando os termos e simplificando a expressão chega-se a relação entre a tensão da fonte de entrada e a resistência R mencionada, obtendo a corrente de saída do circuito.

$$I_{out} = \frac{V_{fonte}}{R} \quad (1.6)$$

A relação 2.42 é validada através da simulação do circuito em questão. A corrente obtida é de 20.82 mA que é exatamente o valor rms de tensão da fonte (2.82 V) dividido pelo valor de resistência aplicada nos resistores (10 k $\Omega$ ).



**Figura 35 - Corrente de saída e respectivo valor rms.**

A seguir, as imagens referentes ao circuito eletrônico em placa PCB, do sensor resistivo tipo fonte de corrente.

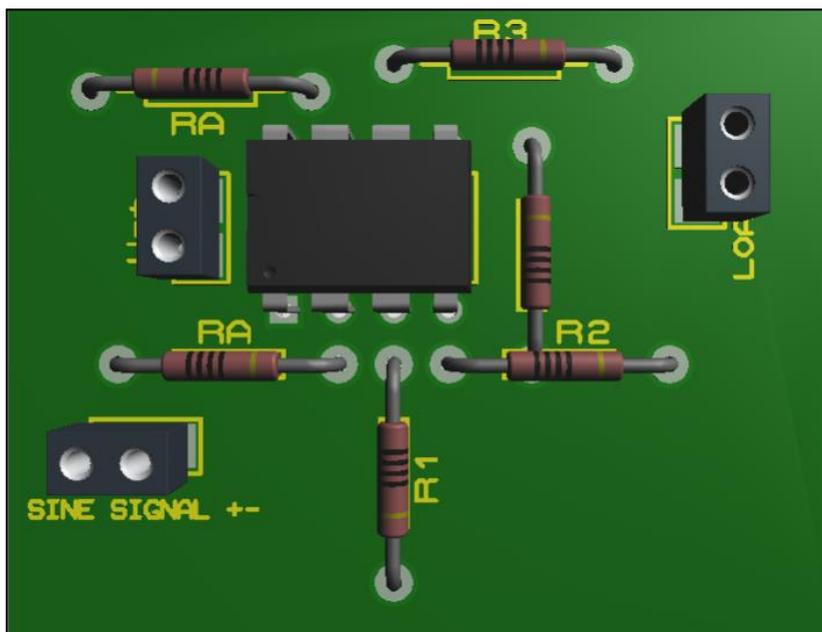


Figura 36 - Layout da placa PCB com os componentes alocados.

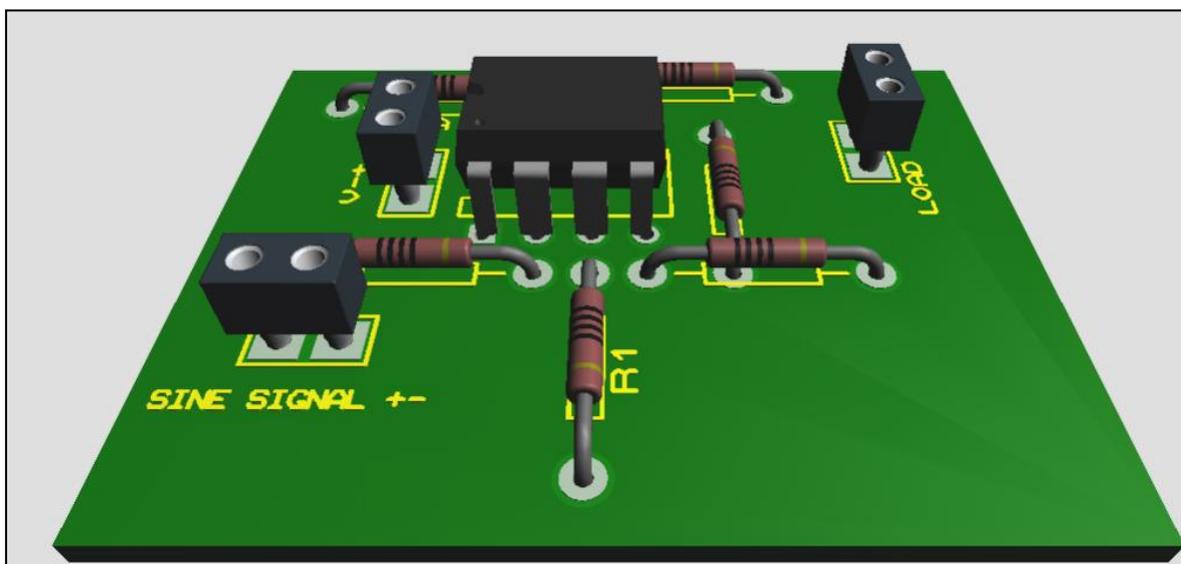


Figura 37 - Layout PCB, circuito de Howland Modificado.