

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL – CPGEI**

GREG JOSÉ DOS SANTOS

**SENSOR CAPACITIVO INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE
ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2015**

GREG JOSÉ DOS SANTOS

**SENSOR CAPACITIVO INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE
ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Marco José da Silva, Dr.

CURITIBA
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237s Santos, Greg José dos
2015 Sensor capacitivo inteligente para monitoramento de escoamentos bifásicos / Greg José dos Santos.-- 2015.
61 p.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2015.
Bibliografia: p. 59-61.

1. Escoamento bifásico. 2. Gás - Escoamento. 3. Detectores - Desenvolvimento. 4. Sensores inteligentes. 5. Capacitores. 6. Medição. 7. Método dos elementos finitos. 8. Métodos de simulação. 9. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Silva, Marco José da, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação N°. 683

Sensor Capacitivo Inteligente para Monitoramento de Escoamentos Bifásicos.

Por
Greg José dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 13h30min do dia 31 de março de 2015. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Marco José da Silva
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Fábio Alencar Schneider
(UNIBRASIL)

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Emílio Carlos Gomes Wille, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Valmir e Edilene;
E a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao meu orientador Dr. Marco José da Silva, pela orientação, por sua competência, dedicação e amizade que foram importantes para o êxito do meu trabalho.

Aos meus pais, Valmir e Edilene, pelo incentivo em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos, Kaliu e Arleto, e a minha namorada Iasmin Mara Leite Pereira, por todo apoio e companheirismo.

Aos amigos e colegas de Laboratório LASII e LACIT, pela ajuda direta ou indireta na realização deste trabalho e pela amizade: Eduardo N. dos Santos, Aluísio Nascimento, Tiago Vendruscolo, Jean Longo, Nikolas Libert, Frederico M. Aguiar, Murilo Gabardo Kramar.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior, CAPES, pela bolsa concedida durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP –, do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT – e do Programa de Formação de Recursos Humanos da PETROBRAS - PRH10-UTFPR.



RESUMO

DOS SANTOS, G. J. **Sensor capacitivo inteligente para monitoramento de escoamentos bifásicos**. 2015 61p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2015.

Escoamentos bifásicos são encontrados com frequência, em atividades industriais, como por exemplo, em reatores químicos e nas operações de produção e transporte de petróleo, onde escoamentos do tipo gás-líquido são os mais comuns. Esses são caracterizados pela passagem simultânea de dois fluidos imiscíveis em um duto, podendo tomar diversas formas ao longo da tubulação, chamado de padrão ou regime de escoamento. Em muitos casos, o tipo de escoamento determina a eficiência e segurança dos processos ou plantas onde tais ocorrem. Desta forma, a monitoração em tempo real de escoamentos bifásicos é de grande importância.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sensor inteligente para monitoramento de escoamento bifásico. Foram selecionados dois parâmetros importantes de monitoração, o primeiro deles é a fração de gás e o segundo a velocidade de translação de bolhas. Para isso foi desenvolvido uma sonda capacitiva que explora a diferença da permissividade elétrica das fases para diferenciá-las. Além disso, uma eletrônica anteriormente desenvolvida foi aprimorada para tornar possível a medição de dois canais simultaneamente e o firmware modificado para realização do cálculo de fração de vazio e velocidades de forma embarcada. A resposta da sonda capacitiva desenvolvida não depende apenas da proporção volumétrica das fases, mas também da forma que estão distribuídas em seu interior, portanto simulações de campo elétrico pelo método de elementos finitos foram realizadas para o levantamento da resposta do mesmo. A resposta do sensor foi validada através de testes estáticos e em escoamentos em plantas controladas, onde os resultados foram comparados com os obtidos, em medidas simultâneas com o sensor *wire-mesh*, adotado como referência neste trabalho. Os resultados obtidos mostram que o sensor capacitivo é capaz de medir os parâmetros de forma satisfatória. Assim, este sensor pode ser empregado em trabalhos futuros como ferramenta simples para monitoração de escoamentos bifásicos.

Palavras-chave: Sensor capacitivo, Escoamento Bifásicos, Fração de vazio.

ABSTRACT

DOS SANTOS, G. J. **Smart capacitive sensor for monitoring of two-phase flows.** 2015.61p Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2014.

Two-phase flow is frequently found in industrial activities, for instance in chemical reactors or during oil production and transport, where gas-liquid flow type is the most common. Such flow is characterized by the simultaneous passage of two immiscible fluids in a pipe. The fluids may assume various spatial distributions in a pipe, which are classified into flow regimes. In many cases, the type of flow determines the efficiency and safety of the processes or plants in which they occur.

The objective of this work is to develop a smart sensor for real-time monitoring of two-phase flows. Here two important monitoring parameters were selected; the first is the gas void fraction and the second translational bubble velocities. To this aim, a capacitive probe was developed that exploits the difference in electrical permittivity of the phases. In addition, a previously developed electronics have been further developed to make it possible to measure two channels simultaneously and the firmware has been modified for performing the calculation of the two parameters directly in the embedded microcontroller. The response of the capacitive probe depends not only on the volume fraction of the phases, but it also depends on the way they are distributed inside the pipe. In order to account for this, electric field simulations by finite element method were performed to survey the sensor responses. The overall sensor response was validated by static tests and controlled flow experiments in a pilot plant. The measurement results were compared with those obtained by simultaneous measurements with a wire-mesh sensor which was adopted as reference in this study. The results show that the capacitive sensor is able of measuring the parameters satisfactorily. Hence, the sensor can be applied in future work as a simple tool for two-phase flows monitoring.

Keywords: Capacitive sensor, Two-phase, void fraction

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Padrões de escoamentos em tubulações na vertical(a) e na horizontal(b). Adaptado de (SHOHAM, 2006)	15
Figura 2-2: Representação da célula unitária.	16
Figura 2-3: Modelo simplificado de um sensor capacitivo. Adaptado de (LIBERT, 2013)	21
Figura 2-4: Configuração de eletrodos para sondas capacitivas: (a) placas côncavas, (b) anéis duplos, (c) helicoidal. Adaptado de (MARCO, 2008)	21
Figura 2-5: (a) esquema simplificado do sensor <i>wire-mesh</i> (b) fotografica de um típico sensor desenvolvido. Adaptado de (MARCO, 2008).....	23
Figura 2-6: Exemplo de resultado da correlação cruzada.....	26
Figura 3-1: Diagrama simplificado do <i>hardware</i> . Adaptado de (LIBERT, 2013).....	27
Figura 3-2: Fluxograma representando o algoritmo do gatilho.....	30
Figura 3-3: Exemplo de cálculo de velocidade.	31
Figura 3-4: Captura da tela de configuração do sinal de excitação.	33
Figura 3-5: Captura de tela de configuração de parâmetros de recepção e processamento.	34
Figura 3-6: Captura da tela de recepção de dados.	35
Figura 3-7: a) Sensor desenvolvido em placa de circuito impresso; b) Arranjo de sensores utilizado para medição	37
Figura 3-8: Modelo utilizado para simular escoamento anular.....	38
Figura 3-9: Resultado da simulação para varias frações de vazio (Anular).....	39
Figura 3-10: Modelo utilizado para simular escoamento estratificado.	40
Figura 3-11: Resultado da simulação para varias frações de vazio (Estratificado).....	40
Figura 3-12: Resultado da simulação para varias frações de vazio (Bolhas).....	41
Figura 3-13: Representação dos segmentos que compõe os escoamentos em golfadas. Escoamento vertical(a), escoamento horizontal (b). Adaptado de (LIBERT, 2013).....	42
Figura 3-14: Curva de resposta do sensor para escoamentos intermitentes verticais.....	43
Figura 3-15: Curva de resposta do sensor para escoamentos intermitentes horizontais.	44
Figura 4-1: Representação esquemática da bancada de testes estáticos para escoamento estratificado.	45
Figura 4-2: Comparação de dados obtidos pela simulação com dados medidos (estratificado estático).	46
Figura 4-3: Comparação da curva de nível de líquido medido com simulado, (a) 5 % de fração de vazio e (b) 95 % de fração de vazio.	46
Figura 4-4: Representação esquemática da bancada de testes bolhas dispersas.....	47
Figura 4-5: Comparação de dados obtidos pela simulação com dados medidos (bolhas dispersas estático).....	48
Figura 4-6: Representação esquemática da planta de escoamentos horizontais.....	49
Figura 4-7: Mapa de Fluxo de Taitel e Dukler para a bancada de teste horizontal.....	50
Figura 4-8: Valores de fração de vazio média obtidas pelo sensor capacitivo e sensor <i>wire-mesh</i> em escoamentos horizontais.....	50
Figura 4-9: Diferença absoluta da fração de vazio medida pelo sensor capacitivo em relação ao <i>wire-mesh</i> em escoamentos horizontais.	51
Figura 4-10: Valores de velocidade média das bolhas em escoamentos horizontais.....	51
Figura 4-11: Séries temporais de medições em escoamentos horizontais.....	52
Figura 4-12: Representação esquemática da planta de escoamentos verticais.....	53
Figura 4-13: Mapa de Fluxo de Taitel e Dukler para bancada de testes vertical.	54

Figura 4-14: Valores de fração de vazio média obtidos pelos sensors capacitvo e sensor <i>wire-mesh</i> em escoamentos verticais.....	55
Figura 4-15: Diferença absoluta da fração de vazio medida pelo sensor capacitivo em relação ao <i>wire-mesh</i> em escoamentos verticais.....	55
Figura 4-16: Valores de velocidade média das bolhas em escoamentos verticais	56
Figura 4-17: Series temporais de medições em escoamentos verticais	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo de parâmetros para equação (2.9).....	18
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 MOTIVAÇÃO.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO	14
2.1.1 Definições	14
2.1.2 Padrões de escoamento bifásico gás-líquido	15
2.1.3 Regime intermitente.....	16
2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS	19
2.2.1 Sondas de impedância elétrica.....	19
2.2.2 Tomografia aplica a escoamentos multifásicos	22
2.2.3 Sensor <i>Wire-Mesh</i>	22
2.2.4 Técnica de filmagem rápida.....	23
2.3 TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE VELOCIDADE	24
2.3.1 Gatilho	24
2.3.2 Correlação cruzada	25
3 SENSOR CAPACITIVO E ROTINAS DE PROCESSAMENTO	27
3.1 HARDWARE	27
3.2 FIRMWARE	28
3.2.1 Aquisição dos dados	28
3.2.2 Velocidade de bolha usando “Gatilho”	29
3.2.3 Velocidade de bolha usando “Correlação Cruzada”	31
3.2.4 Escolha do método de cálculo de velocidade	32
3.3 SOFTWARE	33
3.3.1 Configurações de parâmetros de medição	33
3.3.2 Recepção de dados.....	34
3.4 PÓS PROCESSAMENTO	35
3.5 SENSOR CAPACITIVO EM ANEL.....	36
3.5.1 Simulações	37
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
4.1 Teste de validação das simulações	45
4.1.1 Estratificado	45
4.1.2 Bolhas Dispersas.....	47
4.2 Testes em Escoamentos.....	48
4.2.1 Escoamento Horizontal.....	49
4.2.2 Escoamento Vertical.....	53
5 CONCLUSÃO	58
6 REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O escoamento bifásico é caracterizado pela passagem simultânea de duas substâncias imiscíveis na mesma tubulação ao mesmo tempo. Esse tipo de escoamento ocorre frequentemente na natureza e em diversos setores da indústria, como na exploração e produção de petróleo, onde óleo e gás escoam simultaneamente em um duto. Escoamentos do tipo gás-liquido são os mais comumente encontrados em aplicações industriais. Neste caso, ao decorrer da linha diferentes padrões de escoamentos podem ser formados, dependendo das propriedades físicas dos fluidos, da vazão de cada uma das fases, da geometria e inclinação do duto. Essas distribuições são chamadas de padrões, ou regimes de escoamento. Em muitos casos o padrão de escoamento determina a segurança e a eficiência dos processos e equipamentos onde ocorrem. Portanto, o desenvolvimento de técnicas para medição de parâmetros e monitoramento em tempo real é de grande importância para a indústria.

Diversas técnicas vêm sendo estudadas em anos recentes. Pode-se citar os sensores como do tipo agulha, sensores capacitivos ou resistivos, utilizados para medir fração volumétrica do gás. Faz-se uso também de algumas técnicas ópticas como PIV (*Particle Image Velocimetry*) e LDA (*Laser Doppler Anemometry*) e câmeras de alta velocidade, apesar dessas técnicas serem eficientes, muitas vezes elas se tornam inviáveis em aplicações industriais devido à necessidade de um acesso óptico ao escoamento, ou seja, o uso de tubulações transparentes é impeditivo, não sendo o caso da maioria das aplicações industriais.

Os sensores baseados na permissividade elétrica são bastante utilizados, por ser uma técnica com baixo custo e alta resolução temporal. Porém a maioria dos sistemas atuais necessita que um especialista realize um pós-processamento nos dados medidos, ajustando alguns parâmetros conforme o padrão de escoamento. Portanto, é desejável o desenvolvimento e disponibilização de um sensor inteligente com a capacidade de fornecer ao usuário final em tempo real parâmetros do escoamento, dispensando a intervenção de um especialista. É neste contexto que se insere este trabalho.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sensor inteligente para obtenção de parâmetros de escoamentos, como velocidade das bolhas, fração de vazio em

escoamentos bifásicos. Esse sistema baseia-se em medidas de permissividade elétrica de cada substância. O *hardware* desenvolvido anteriormente por Libert (2013), é responsável por fazer medidas de capacitância dos fluidos através de uma sonda capacitiva em anel. No presente trabalho serão desenvolvidas melhorias no *firmware* para que torne o sistema inteligente, de tal forma que seja extraído de forma automática parâmetros do escoamento, como fração de vazio e velocidade das bolhas, minimizando a necessidade da intervenção de um especialista e pós-processamento dos dados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO

2.1.1 Definições

Escoamentos bifásicos tem como definição geral a passagem de duas substâncias, ao mesmo tempo em um recipiente. Este trabalho está focado em escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido em tubulações. Neste caso os fluidos podem assumir várias formas geométricas diferentes a o longo da tubulação. Existem vários parâmetros que devemos devem ser analisados no estudo deste tipo de escoamento. Será realizada uma breve descrição de alguns deles, os quais são importantes para o presente trabalho.

- Fração de vazio

Fração de vazio em escoamentos bifásicos é a razão entre a área ocupada pelo gás e a área total da seção transversal do duto. Então assumindo que a área total da seção é unitária, pode-se definir (eq 2.1). Onde α_L é a fração de líquido e α_G é a fração de gás.

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad (2.1.)$$

- Velocidade superficial e velocidade da mistura

Velocidade superficial trata da velocidade que a fase teria se fluísse sozinha em uma tubulação, caso a vazão fosse mantida constante (SHOHAM, 2006). Esta velocidade, representada por J , é obtida pela razão ente a vazão volumétrica Q e a área da seção transversal da tubulação A considerando que apenas uma das fases está passando através da seção transversal inteira da tubulação

$$j_G = \frac{Q_{gas}}{A} \quad (2.2)$$

Da mesma forma para o líquido:

$$j_L = \frac{Q_{liquido}}{A} \quad (2.3)$$

A velocidade da mistura é representada pela soma das velocidades superficial de cada fase

$$j = j_L + j_G \quad (2.4)$$

2.1.2 Padrões de escoamento bifásico gás-líquido

Como já dito na seção anterior as fases podem se distribuir de diversas formas geométricas diferentes a o longo da tubulação em um escoamento bifásico. A análise de escoamentos bifásicos se torna uma tarefa complexa, pois essa distribuição é muitas vezes desconhecida, dificultando a medição dos parâmetros do escoamentos. Três fatores definem a existência de um padrão de escoamento, um deles é a vazão de cada fase outro fator é a forma e a geometria de construção do duto e sua inclinação, e por fim as características físicas dos fluidos, como densidade, tensão superficial e viscosidade.

Devido à alta complexidade e aos diferentes níveis de detalhamento considerado por cada autor, não existe uma classificação universal definida. Os mais comumente encontrados na literatura são os mostrados na Figura 2-1.

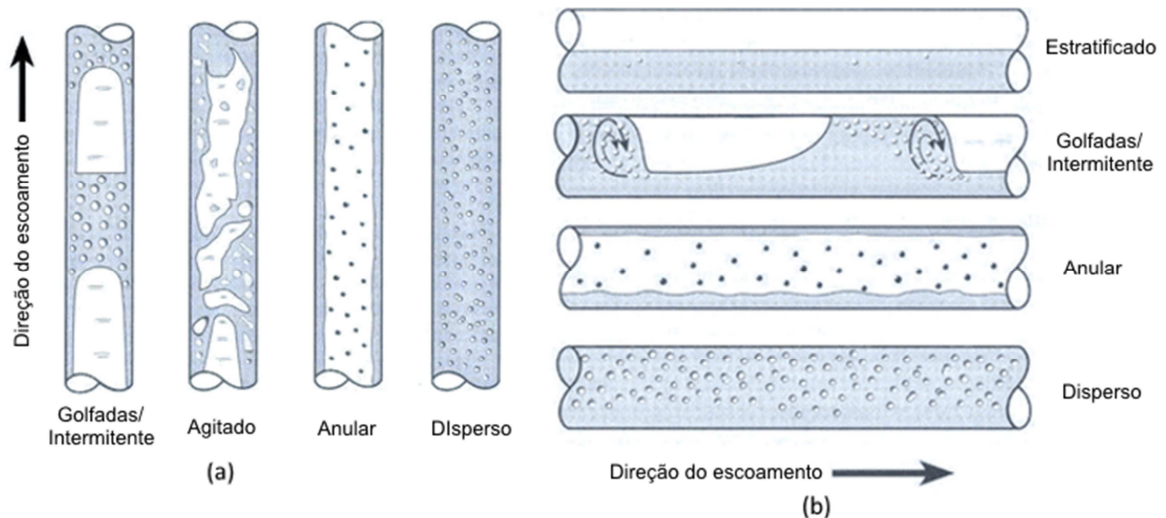


Figura 2-1: Padrões de escoamentos em tubulações na vertical(a) e na horizontal(b). Adaptado de (SHOHAM, 2006)

O escoamento do tipo “Disperso” possui uma vazão de gás baixa em relação à vazão do líquido, fazendo com que uma grande quantidade de pequenas bolhas fique espalhada meio ao líquido. Com o aumento da vazão do gás aparecem bolhas grandes seguidas por um pistão de líquido, este tipo de escoamento é classificado como “Golfadas” ou “regime intermitente”, em escoamentos verticais, e para altas velocidades de escoamento essas bolhas podem se quebrar dando origem a o escoamento chamado de “Agitado”. Aumentando ainda mais a vazão do gás dá-se origem ao escoamento do tipo “Anular” onde um núcleo gasoso é envolto por uma película de líquido, podendo ter gotículas de líquido em meio a o gás. E por fim o escoamento “Estratificado”, este tipo de escoamento não ocorre em escoamentos verticais,

devido à ação da gravidade, fazendo com que o líquido flua na parte inferior do duto e o gás na parte superior (SHOHAM, 2006).

2.1.3 Regime intermitente

Este tipo de regime de escoamento, ou padrão de escoamento vem sendo bastante estudado, onde podemos citar revisões como (HALE, 2000) e (UJANG, 2003). Esses regimes ocorrem em escoamentos do tipo gás-líquido, tanto em tubulações verticais como horizontais e é caracterizado pelo surgimento de grandes bolhas, chamadas de bolhas de Taylor. Essas bolhas escoam no tubo junto com um pistão de líquido, podendo conter pequenas bolhas dispersas. Para melhor análise cria-se o conceito de célula unitária, proposto por (WALLIS, 1969), onde bolha e o pistão de líquido definem essa célula Figura 2-2.

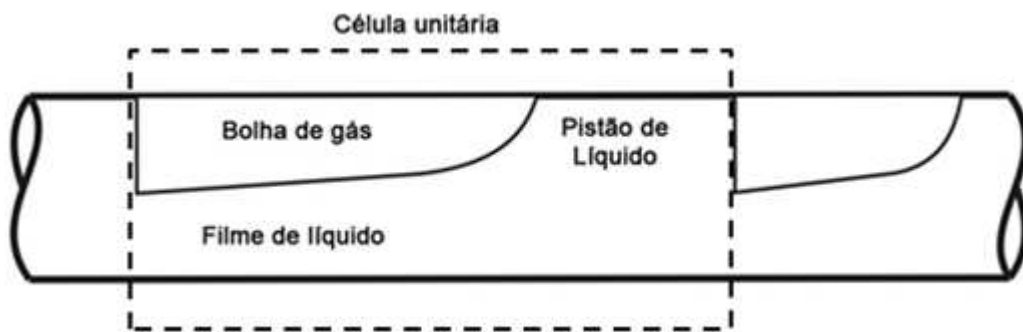


Figura 2-2: Representação da célula unitária.

Na literatura é encontrado algumas variações para o regime intermitente, onde é chamado de padrão de escoamento de bolhas alongadas quando ocorrem baixas velocidades de gás, $J_G < 1\text{m/s}$. Com o aumento da velocidade do gás ($J_G > 1\text{m/s}$) surge o padrão chamado de golfadas, onde pequenas bolhas aparecem no pistão de líquido.

Usando o conceito de célula unitária um modelo empírico foi apresentado por (DUKLER; HUBBARD, 1975) onde se tornou possível a extração dos principais parâmetros do escoamento como, velocidade do pistão de líquido, velocidade da bolha de Taylor e do filme, além dos comprimentos da bolha e pistão.

Neste trabalho serão analisadas as propriedades mais relevantes dos escoamentos bifásicos, revisando alguns parâmetros e conceitos importantes, a seguir.

a) Fração de vazão média

A fração de vazão média pode ser interpretada como a fração volumétrica ocupada pelo gás em um dado instante de tempo. Portanto usando uma definição generalista pode-se afirmar que a fração de vazão é um indicador adimensional da fração da fase ocupada pelo gás em um domínio espacial ou temporal. Em um dado instante de tempo T as fases no interior do duto podem ser representadas por um conjunto de pontos P . Com base nisso, pode ser definida a função densidade de gás $F_G(x,t)$, dada por

$$F_G(x,t) = \begin{cases} 1, & x \in \text{fase gasosa} \\ 0, & x \notin \text{fase gasosa} \end{cases} \quad (2.5)$$

onde x representa a posição na seção transversal do duto. Para obter a fração de vazão α em uma área (seção transversal) é calculada a média da função densidade de gás em uma área A dando origem a uma série temporal da fração de vazão média na seção transversal, representada por

$$\alpha(t) = \frac{1}{A} \int_A F_G(x,t) dA \quad (2.6)$$

Através da média temporal de $\alpha(t)$ obtém-se a fração de vazão média de um experimento $\bar{\alpha}$.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{T} \int_T \alpha(t) dt \quad (2.7)$$

Alguns estudos em específico para escoamentos intermitentes foram realizados com base em dados empíricos, Gregory e Scott (1969) propuseram a seguinte relação,

$$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,19 j} \quad (2.8)$$

onde j_G é a velocidade superficial do gás e j a velocidade da mistura.

Em seguida surgiram estudos aprimorando a relação proposta anteriormente para determinar a fração de vazão média de um escoamento (MATTAR; GREGORY, 1974).

$$\bar{\alpha} = \frac{j_G}{1,13 j + 0,7} \quad (2.9)$$

b) Velocidade de Bolha

Uma das maneiras de estudar escoamentos bifásicos é através da análise da velocidade de propagação das bolhas, devido a essa importância vários modelos e correlações foram propostas onde a velocidade de propagação da bolha U_B depende da velocidade da mistura J entre outros parâmetros, BENDIKSEN (1984) propôs uma equação onde os coeficientes são calculados de acordo com as propriedades dos fluidos e propriedades geométricas da tubulação onde o escoamento ocorre.

$$U_B = C_0 j + C_\infty \sqrt{gd} \quad (2.10)$$

onde g é a constante de aceleração da gravidade $9,81 \text{ m/s}^2$ e d o diâmetro da tubulação em metros, C_0 e C_∞ são calculados de acordo com a Tabela 1

		C_0	C_∞
$Re_m \geq 2000$	$Fr_m \geq 3,5$	1,2	$\frac{0,345}{(1 + 3805 / Eo^{3,06})^{0,58}} \text{sen}\beta$
	$Fr_m < 3,5$	1,0	$\left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \text{cos}\beta + \frac{0,345}{(1 + 3805 / Eo^{3,06})^{0,58}} \text{sen}\beta$
$Re_m < 2000$		2,0	$\left(0,542 - \frac{1,76}{Eo^{0,56}}\right) \text{cos}\beta + \frac{0,345}{(1 + 3805 / Eo^{3,06})^{0,58}} \text{sen}\beta$

Tabela 1 – Cálculo de parâmetros para equação (2.9)

Sendo Fr_m o número de Froude da mistura calculado em função da velocidade da mistura $Fr_m = J / \sqrt{gd}$, Re_m o número de Reynolds $Re_m = \rho_L J d / \mu_L$ e E_o o número de Eötvös $E_o = (\rho_L - \rho_G) g d^2 / \sigma$. Onde ρ_L e ρ_G se refere à densidade do líquido em Kg/m^3 e do gás respectivamente, μ_L é viscosidade dinâmica do líquido em N.s/m^2 e por fim σ é a tensão superficial do líquido, em mN/m .

c) Velocidade de deslizamento

A velocidade de deslizamento (*Drift velocity*) – U_D é a diferença entre as velocidades do gás - J_G e a velocidade do centro da mistura - J , ou seja, é uma grandeza referente ao desvio da velocidade da fase em relação à velocidade mistura J . Logo a média através da seção transversal do duto, pode ser expressa por:

$$\overline{J_G} = \overline{J} + \overline{U_D} \quad (2.11)$$

O símbolo barra sobre a variável (\overline{J}) significa que é uma variável local integrada em toda a área transversal do tubo onde o escoamento ocorre, representando o valor médio simples. Segundo TODREAS e KAZIMI (1990), o produto dessas médias no tempo da fração de vazio local pela velocidade local de arraste é chamado de Fluxo Deslizante ($\overline{U_{DL}}$).

$$\overline{U_{DL}} = \overline{\alpha U_D} \quad (2.12)$$

Fisicamente o fluxo deslizante representa a taxa volumétrica da fase gasosa que escoar através de um plano unitário, onde o mesmo viaja com a mesma velocidade da mistura J .

d) Frequência de bolhas

A frequência de passagem das bolhas (f) é definida pelo o inverso do período, ou tempo necessário para que uma bolha percorra uma distância entre dois pontos de medição. Alguns modelos, com base em dados empíricos foram propostos para cálculo desse parâmetro. Uma correlação foi proposta por Gregory e Scott (1969) para cálculo da frequência de passagem. Para tal correlação foram realizadas medidas em um sistema água-dióxido de carbono em uma tubulação de 19,1 mm de diâmetro

$$f = 0,0226 \left[\frac{j_L}{gD} \left(\frac{19,75}{j} + j \right) \right]^{1,2} \quad (2.13)$$

2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Devido a grande importância e necessidade de monitoramento e estudo de escoamentos bifásicos, tornou-se necessário o desenvolvimento de equipamentos e técnicas de medição de parâmetros dos escoamentos, com isso houve um grande avanço na pesquisa de novos métodos e técnicas. Porém, é importante salientar que nenhuma técnica proposta pode ser considerada universalmente aplicável e funcional em todas as situações práticas.

2.2.1 Sondas de impedância elétrica

A impedância elétrica está relacionada com as características de permissividade e condutividade de cada fase, caso existam diferenças dessas características entre as fases, é

possível a medição de fração de cada fase, usando sensores de impedância elétrica. Sendo classificados como capacitivos, quando baseados na permissividade elétrica e resistivos quando baseados na condutividade (SHU; WEINBERGER; LEE, 1982).

Os sensores por impedância podem ser invasivos ou não, mesmo os resistivos que precisam estar em contato com os fluidos, pode-se fazer o uso de eletrodos fixados nas paredes internas do duto, tornando-se assim praticamente não intrusivo. Tais sensores têm como principal vantagem o baixo custo e a alta resolução temporal (FALCONE; HEWITT; ALIMONTI, 2009).

a) Sensores capacitivos

Sensores capacitivos podem ser intrusivos ou não intrusivos, nas duas formas são necessários pelo menos dois eletrodos, um de excitação e outro de recepção, onde no eletrodo de excitação é injetado um sinal de tensão senoidal com amplitude e frequência controlada, como o intuito é medir a capacitância relativa do líquido entre os eletrodos, a frequência de excitação utilizada é na faixa de MHz. Desta forma uma corrente flui do eletrodo de excitação para o eletrodo de recepção, essa corrente é transformada em tensão por um conversor corrente-tensão, possibilitando o cálculo da permissividade média do material que está presente entre os eletrodos.

Geralmente são utilizados eletrodos não intrusivos fixados na parte de fora na tubulação, neste caso o duto deve ser de material isolante, existem diversos arranjos de eletrodos. (GREGORY; MATTAR, 1973). Podendo também ser intrusivos, onde os eletrodos ficam fixados nas paredes internas do duto, como utilizado por (ROSA; FLORA; SOUZA, 2012). A capacitância a ser mensurada nesses sensores está na faixa de 0,1 a 1 pF, portanto é indispensável uma boa blindagem para evitar capacitâncias parasitas mantendo uma boa relação sinal ruído. Trabalhos como o de HUANG et al.(1988) apresentam uma revisão de tipos de eletrodos de guarda e técnicas de medidas de capacitância.

Um modelo simplificado é mostrado na Figura 2-3 para facilitar o entendimento do funcionamento do sensor. Apesar de esse modelo ser uma aproximação é um modelo amplamente empregado podendo fornecer resultados satisfatórios (SHU; WEINBERGER; LEE, 1982)

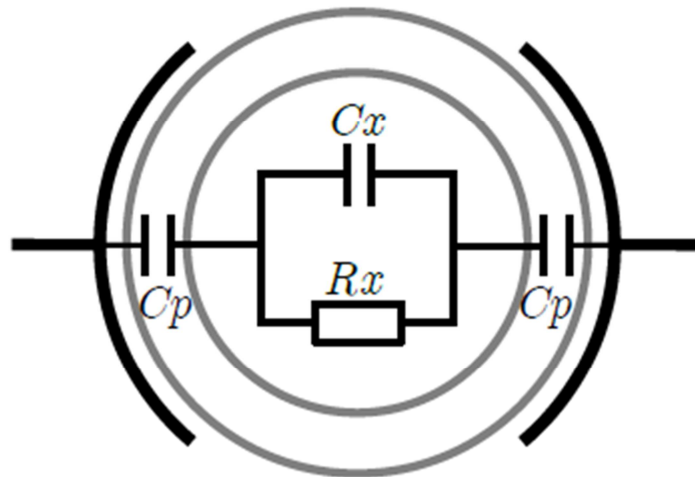


Figura 2-3: Modelo simplificado de um sensor capacitivo. Adaptado de (LIBERT, 2013)

Com base na figura podemos calcular a impedância entre os dois eletrodos onde o circuito equivalente é composto por C_p (capacitância do duto utilizado, deve ser de material isolante), C_x e R_x correspondem a capacitância e resistência do fluido em estudo. Na prática R_x pode ser desconsiderado quando o fluido em estudo é um isolante ou quando é aplicado um sinal de alta frequência nos eletrodos.

Além dos eletrodos de placas côncavas, diversos tipos de eletrodos foram desenvolvidos Gregory e Mattar (1973), onde os mais comumente utilizados são as configurações de placas côncavas, em anel e helicoidais. Como mostrado na Figura 2-4.

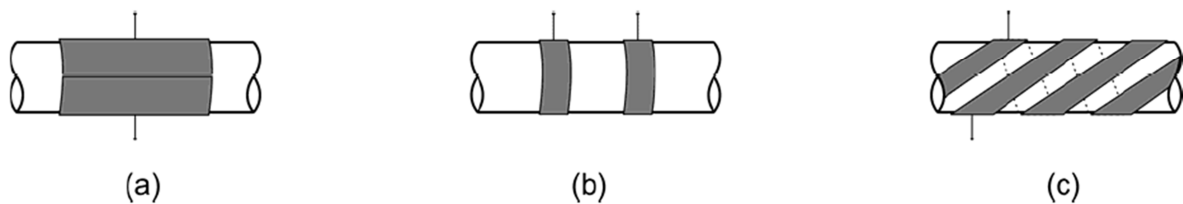


Figura 2-4: Configuração de eletrodos para sondas capacitivas: (a) placas côncavas, (b) anéis duplos, (c) helicoidal. Adaptado de (MARCO, 2008)

b) Sensores resistivos

Sensores resistivos funcionam de forma semelhante a os capacitivos, porem baseado na condutância dos fluidos, tendo que estar obrigatoriamente em contato com o fluido estudado. Testes com eletrodos em anel apresentaram uma boa linearidade para diversos tipos de escoamento, segundo Shi; Dong e Tan(2009), estudos de comparação e aprimoramento geométrico foram realizados por Fossa (1998), Devia e Fossa (2003) respectivamente.

A utilização dessa técnica é uma ótima estratégia para identificar e separar materiais isolantes dos não isolantes, por exemplo, água a gás. Uma desvantagem dos sensores dessa modalidade é a não sensibilidade a matérias com baixa condutividade ou isolantes, como petróleo e óleos no geral. Em uma situação em que seja necessária a separação de óleo e gás, por exemplo, isso não seria praticamente possível devido à baixa diferença da condutância entre as duas fases.

2.2.2 Tomografia aplica a escoamentos multifásicos

A tomografia e suas várias modalidades são amplamente utilizadas e desenvolvidas para diagnósticos médicos, porém vêm sendo adaptadas e aperfeiçoadas para a visualização de processos industriais, como por exemplo, a visualização e reconstrução de imagem da seção transversal de dutos de escoamento, como descrita em vários artigos como (DYAKOWSKI, 1996; PRASSER, 2008) e livros como (BECK, 1995).

De forma genérica a tomográfica consiste em fazer medidas de propriedades físicas do escoamento relacionadas à fração da fase, através da tubulação em vários ângulos de visão diferentes. Podendo ser feita a rotação do arranjo transmissor-receptor ou por chaveamento eletrônico dos sensores. Após as medidas serem realizadas é possível calcular uma representação da imagem da seção transversal do duto, através de algoritmos de reconstrução de imagens. Esses algoritmos consistem em resolver um problema inverso, ou seja, obter uma distribuição espacial dos parâmetros a partir de um conjunto de medidas, onde a geometria da rotação é conhecida.

Para escoamentos estudos foram realizados usando tomografias baseada em várias medidas de grandezas, como impedância elétrica (XIE et al., 1995), por ultrassom (YANG et al., 1999), por ressonância magnética (MANTLE; SEDERMAN, 2003), emissão de prótons (PARKER; MCNEIL, 1996) e baseados em atenuação de radiação de raios-x (HERVIEU; JOUET; DESBAT, 2002) e raios gama (KUMAR; MOSLEMIAN; DUDUKOVIĆ, 1995).

2.2.3 Sensor *Wire-Mesh*

O sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos, é uma técnica que permite a análise e visualização de escoamentos com boa resolução espacial e boa resolução temporal, onde sua principal desvantagem esta no fato do seu princípio de operação ser baseado em eletrodos invasivos, fato que faz com que a técnica não seja classifica como uma técnica tomográfica, porém é considerada uma boa alternativa aos sistemas de tomográfica clássicos. Essa técnica

foi introduzida por Prasser; Böttger e Zschau (1998) e desde então vem sendo aprimorada e usada por vários pesquisadores para investigar escoamentos multifásicos.

O dispositivo sensor é constituído de dois planos de fio condutores (eletrodos) estendidos na seção transversal do duto, no mesmo plano são posicionados em paralelo, de um plano para outro há uma rotação de 90° com um espaçamento entre os planos, ou seja, eles não se encostam. A Figura 2-5 mostra um esquemático simplificado do dispositivo.

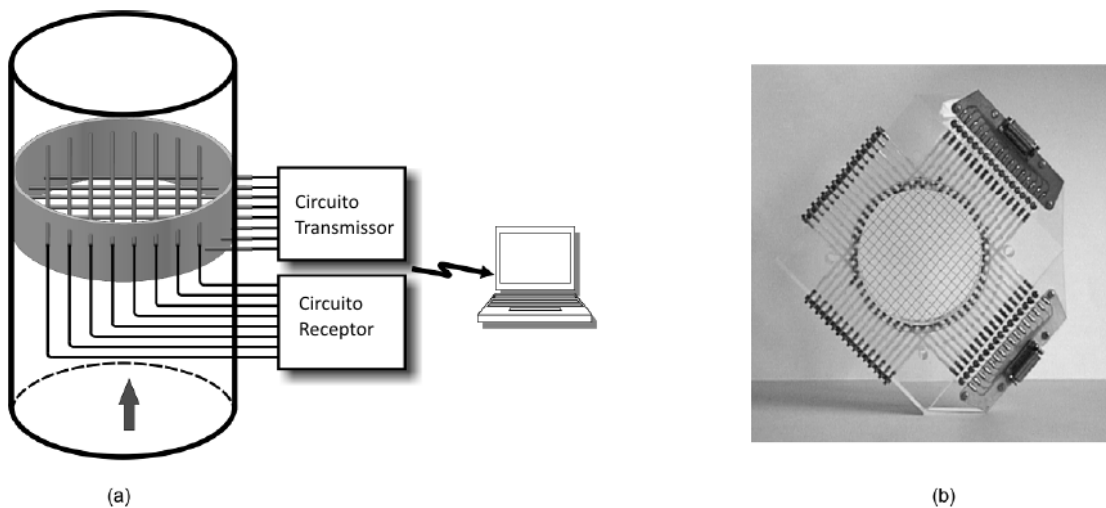


Figura 2-5: (a) esquema simplificado do sensor *wire-mesh* (b) fotografica de um típico sensor desenvolvido. Adaptado de (MARCO, 2008)

A eletrônica responsável pela medição é baseada no princípio de excitação e leitura multiplexada, onde os eletrodos de um plano são de excitação e os do outro plano são receptores. É feita a medida de impedância entre cada cruzamento, os eletrodos que não estão ativos no momento são ligados ao potencial de terra, onde cada transmissor e receptor são ativos sequencialmente até que a varredura de toda a seção transversal seja realizada. Essa varredura é feita com uma taxa de repetição de até 5 kHz. Desta forma a técnica permite a visualização da distribuição das fases em toda a seção transversal com uma resolução temporal e espacial alta (DA SILVA, 2008)

2.2.4 Técnica de filmagem rápida

Com a melhoria e avanço das câmeras de alta velocidade, tornou-se comum o uso desta técnica para a investigação de escoamentos e também para validação e comparação com outras técnicas, pois trata-se de um método de alta resolução temporal que possibilita a visualização de detalhes do escoamento além de não ser intrusivo, apesar da necessidade de um acesso óptico (duto e fluidos transparentes). Além da visualização de detalhes é possível,

através de algoritmos de processamento de imagens, obtermos parâmetros das bolhas como, por exemplo, formato, tamanho e velocidade, assim como analisar as interfases em escoamentos gás – líquido. Esta técnica vem sendo bastante explorada na literatura como, por exemplo, (ZARUBA et al., 2005). Os fatores negativos nessa técnica são óbvios, somente a superfície da tubulação pode ser observada, para escoamentos com altas frações de vazio e tanto tubo quanto o líquido devem ser transparentes para a realização das medidas.

2.3 TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE VELOCIDADE

A velocidade média das bolhas é um parâmetro importante para o monitoramento do escoamento. Para medir a velocidade das bolhas é preciso duas medidas em pontos próximos e com a distância e taxa de amostragem conhecidas. Diversos componentes como vórtices e diferença de pressão podem fazer que o escoamento tenha distribuições geométricas diferentes em cada sensor, mesmo que posicionados próximos, o que resulta em medidas diferentes, porém correlacionados, sendo possível então identificar o atraso entre os sinais de ambos os sensores, através de técnicas e estimativas capazes de identificar o atraso entre duas séries temporais. Alguns trabalhos foram feitos usando e comparando diferentes técnicas de medição da velocidade do escoamento e algumas correlações foram propostas como, por exemplo, (GREGORY; SCOTT, 1969)

Como dito anteriormente, existem várias técnicas para fazer a estimativa de atraso entre dois sinais correlacionados, a seguir serão detalhados dois métodos estudados neste trabalho.

2.3.1 Gatilho

Em regimes intermitentes se definirmos um limiar para o nível do líquido é possível identificar o momento em que a grande bolha ou pistão atravessa pelos sensores. Quando ocorre a transição de valores inferiores para valores superiores a esse limiar no primeiro sensor, esse instante é registrado em uma variável t_0 , essa variável é incrementada a cada amostra, até que o mesmo evento ocorra no segundo, sendo assim o atraso determinado por $T = \frac{t_0}{TA}$, onde TA é a taxa de amostragem. Desta forma para obter a velocidade basta calcular o produto da distância entre os sensores, denominada D , em metros e o atraso T obtido, em segundos. Como mostra a equação (2.13)

$$U_B = \frac{D}{T} \quad (2.14)$$

Esta técnica tem algumas vulnerabilidades como o registro de velocidades excessivamente altas, no caso de uma grande bolha se formar na parte intermediária entre os sensores, fazendo com que o cronômetro seja zerado e ativado por outra grande bolha. Outra vulnerabilidade é o registro de velocidades excessivamente baixas que pode ocorrer quando uma grande bolha se desfaz no meio da trajetória entre os dois sensores, fazendo com que o cronômetro fique ativo por muito tempo, até que uma nova bolha seja detectada. Portanto, torna-se necessário à implementação de um método estatístico, que reconheça essas velocidades muito baixas ou muito altas como valores muito acima dos naturais amostrados e os rejeite.

2.3.2 Correlação cruzada

A correlação cruzada é uma técnica bastante utilizada para estimar atrasos entre dois sinais relacionados, sobre uma medida em um tempo definido, amplamente utilizada para estimar velocidades no estudo de comportamento dos fluidos (BECK, 1981). Trata-se de um método matemático onde se integra no tempo t o produto de dois sinais relacionados x e y , onde y é transladado no tempo por m unidades, equivalente a um intervalo igual a variável τ . Como descrito pela equação (2.13).

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \sum_0^N x(n) \times y(n-m) \quad (2.15)$$

Assim, o tempo de atraso será determinado pelo maior valor de correlação cruzada, como ilustrado na Figura 2-6.

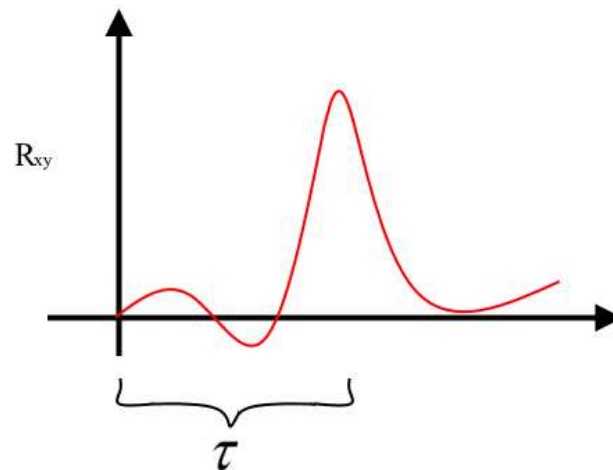


Figura 2-6: Exemplo de resultado da correlação cruzada.

Desta forma, sabendo a distância D entre os sensores, a velocidade da bolha pode ser calculada por:

$$U_B = \frac{D}{\tau} \quad (2.16)$$

A técnica de correlação cruzada é uma das mais consagradas e mais utilizada em processos de vazão até o momento. Porém, esse método possui algumas desvantagens, a maior delas é a grande demanda de processamento e memória necessária, devido a grande quantidade de multiplicações e somatórios de diversos pontos em um curto intervalo de tempo. Em um sistema em que haja necessidade de um monitoramento em tempo real e/ou seja necessário que o processamento seja feito de forma embarca, essa demanda merece considerações e pode desfavorecer ou até mesmo inviabilizar o uso dessa técnica.

3 SENSOR CAPACITIVO E ROTINAS DE PROCESSAMENTO

Neste capítulo será descrito o sensor capacitivo desenvolvido, assim como as rotinas de processamento para obtenção de parâmetros de interesse do escoamento bifásico. Neste capítulo são também descritas as simulações numéricas realizadas e as curvas de calibração obtidas para descrição do comportamento do sensor dependendo do padrão de escoamento.

3.1 HARDWARE

O *hardware* utilizado neste trabalho foi anteriormente desenvolvido por (LIBERT, 2013). Esse *hardware* pode ser dividido em três partes principais: excitação, recepção e microcontrolador. Um diagrama simplificado pode ser visto na Figura 3-1.

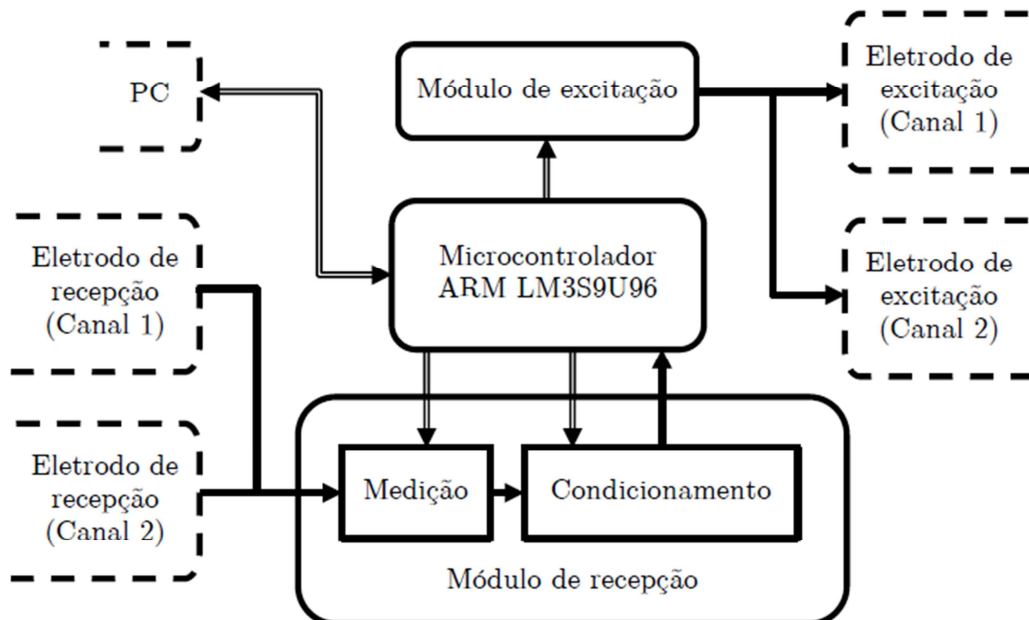


Figura 3-1: Diagrama simplificado do *hardware*. Adaptado de (LIBERT, 2013)

O módulo de excitação é responsável por gerar o sinal de excitação para ambos os canais, este sinal é gerado por um DDS (*Direct Digital Synthesizer*) que possui em sua memória uma tabela da função seno em sua memória interna possibilitando que o usuário selecione a frequência desejada. Na saída deste componente está ligada um filtro passa baixa de 250 Hz para remover a componente de corrente contínua (CC) e a um filtro com topologia Pi com frequência de corte de 10 MHz, para remoção de componentes de alta frequência provenientes do processo de digitalização da onda. O último estágio é um amplificador de baixa impedância de saída com ganho controlado por um potenciômetro digital. Sendo assim

é possível condicionar o sinal de acordo com a medida a ser realizada, podendo ser com frequência de 250 Hz a 10 MHz e amplitude de até 9 Vpp.

O módulo de recepção é responsável por converter o sinal de recepção, que é proporcional a capacitância nos eletrodos, em sinal de tensão, para que posteriormente possa ser amostrado pelo microcontrolador. O principal componente deste módulo é o amplificador de transimpedância que tem em sua saída o sinal de alta frequência, onde sua amplitude vai depender da capacitância. Para extrair a informação de amplitude deste sinal é usado um demodulador tendo com saída uma tensão DC. Ainda essa tensão pode ser condicionada através de ajustes de ganho e *offset* para melhor aproveitar a faixa de atuação do conversor analógico digital do microcontrolador.

Para fazer o controle de ambos os módulos citados anteriormente foi utilizado o microcontrolador LM3S8962 da Texas Instruments. Este microcontrolador é responsável por gerenciar todos os DDS e potenciômetros digitais através de um canal de comunicação SPI. Além disso, este microcontrolador é responsável por fazer a aquisição e processamento do sinal bem como estabelecer uma conexão com um *software* IHM (Interface Homem Máquina), como será detalhado a seguir.

3.2 FIRMWARE

O *firmware* desenvolvido em linguagem C por meio de ambiente de desenvolvimento Eclipse para um microcontrolador de 32 bits ARM Cortex M3 LM3S8962 que é responsável por fazer a aquisição da tensão proveniente dos eletrodos (proporcional à capacitância dos sensores). Após a aquisição é feito o processamento dos sinais e extraído os parâmetros de velocidade de frente de bolha e fração de vazio, e por fim enviado a um computador por meio de uma interface *Ethernet*. Cada funcionalidade será descrita a seguir

3.2.1 Aquisição dos dados

O microcontrolador utilizado possui um conversor analógico digital com resolução de 10 bits e suporte para quatro entradas analógicas, onde através de sequenciadores com “*Sample Hold*” possibilita a leitura de até quatro entradas analógicas simultaneamente, sua taxa de amostragem máxima é de 500k amostras por segundo. Além disso, possui um circuito de realização de média por *hardware* de até 64 amostras, essa opção foi utilizada fazendo com que a taxa de amostragem máxima seja reduzida para no máximo 7812 amostras por segundo.

No sistema desenvolvido foram utilizadas duas entradas analógicas (uma para cada sensor) onde a leitura de tensão é feita de forma simultânea, com uma taxa de amostragem de

até 1000 amostras por segundo, podendo ser definida pelo usuário na seção de configurações do *software*, também desenvolvido neste trabalho.

Os dados lidos são armazenados em *buffers* para que possa ser processados e enviados a pilha de *Ethernet* enquanto novos dados são lidos.

3.2.2 Velocidade de bolha usando “Gatilho”

Através do uso do sistema operacional FreeRTOS tornou-se possível o gerenciamento de tarefas como aquisição, processamento e transmissão de dados simultaneamente.

Uma tarefa foi criada para a realização do cálculo de atraso entre dois sinais, nessa tarefa foi implementado um algoritmo conforme a técnica do “Gatilho” descrita na seção 2.3.1, onde o fator de corte foi definido como padrão 50% da fração de vazio, podendo ser alterado pelo usuário, através do *software* de IHM, de acordo com a necessidade e/ou cada escoamento.

Quando o valor de tensão no canal analógico 1 (S_1) é superior ao fator de corte configurado, então o tempo é registrado em K_1 e quando o mesmo evento ocorre no canal analógico 2 (S_2) o tempo é registrado em K_2 , assim subtraindo K_1 de K_2 temos o atraso de um canal para o outro que se refere a o tempo em que a celular unitário demora para se deslocar do sensor 1 para o sensor 2

A Figura 3-2 mostra o algoritmo implementado para a medição de velocidade de bolha, onde a distância D é fixa de 35mm, FC é o fator de corte e TA é a taxa de amostragem configurado pelo operador do sistema.

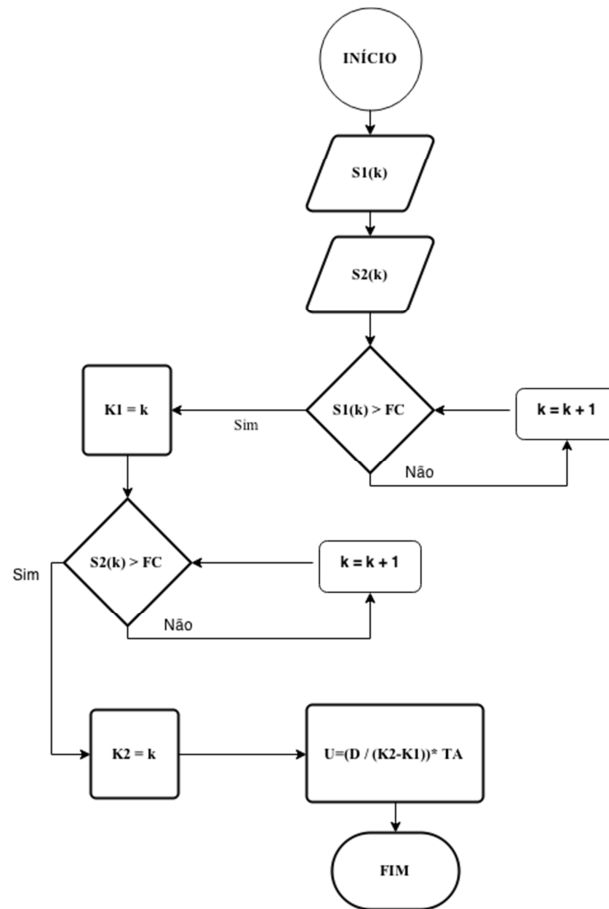


Figura 3-2: Fluxograma representando o algoritmo do gatilho.

Na Figura 3-3 é mostrado um exemplo do processamento para cálculo da velocidade no momento em que uma bolha passa pelos eletrodos, neste exemplo foi utilizado o fator de corte padrão de 50% de fração de vazio, porém com já dito pode ser alterado para melhor atender a demanda do escoamento em questão.

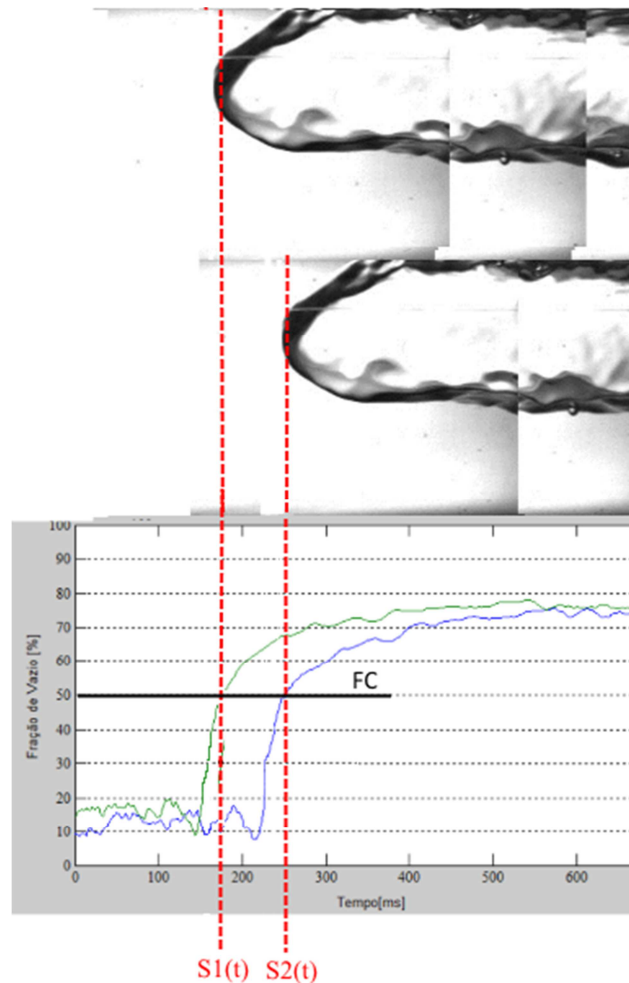


Figura 3-3: Exemplo de cálculo de velocidade.

3.2.3 Velocidade de bolha usando “Correlação Cruzada”

Outro método testado foi usando a correlação cruzada citado na seção 2.3.2, onde devido às restrições de memória do microcontrolador a janela temporal máxima viável foi de 0,5s, portanto sendo a taxa de amostragem de 1000 Hz, temos 500 amostras. Devido às multiplicações e somatórios dos 500 pontos dentro desse período, o tempo gasto com o processamento foi de 1,4s inviabilizando o uso para monitoramento em tempo real, porém podendo ser usado em uma eventual aplicação onde o tempo de cálculo não seja um limitante.

Para fazer a correlação entre dois sinais é necessário armazenar dados dos dois canais por certo período de tempo, chamado de janela temporal, para a aplicação em questão é interessante que essa janela seja na faixa dos segundos, para que seja possível o cálculo de escoamentos com baixas vazões de líquido e gás. Porém para que fosse possível esse cálculo seria necessário 4 vetores de 2048 posições cada, utilizando assim 32 kbytes de memória, faltando memória para outros recursos utilizados no microcontrolador, sabendo que o mesmo

disponibiliza de 64kbytes. Portanto para fim de testes de desempenho e comparação das técnicas foi implementado com um período de armazenamento de 0,5s utilizando aproximadamente 16Kb de memória, sobrando memória para os outros recursos necessários, como por exemplo variáveis do sistema operacional e pilha TCP/IP.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos com o intuito de aperfeiçoar o algoritmo utilizado, bem como a evolução dos microcontroladores pode contribuir com a otimização e uso dessa técnica.

3.2.4 Escolha do método de cálculo de velocidade

Com a implementação dos métodos, pode-se fazer alguns comparativos e análises para a escolha do qual atende melhor as expectativas do trabalho.

Primeiramente foi implementado o método do “Gatilho”, este método tem como principais vantagens sua baixa complexidade em seu algoritmo e a baixa demanda de recursos computacionais. Além de que possibilita o cálculo de velocidade de cada bolha individual que está sendo monitorada pelos sensores, em tempo real. Como desvantagens podem ser citadas os fatos de que a escolha do limiar pode implicar na detecção ou não de bolhas menores em escoamentos intermitentes. Outra desvantagem é o fato de que pode ocorrer de uma grade bolha se formar ou se desfazerem na parte intermediária da distância entre os sensores. Neste caso teríamos cálculo de velocidades excessivamente altas ou muito baixas, respectivamente. Sendo assim necessário o uso de métodos estatísticos em um pós-processamento para detectar tais medidas, podendo ser descartadas pelo fato de serem velocidades fisicamente impossíveis de ocorrerem. Para a eliminação dessas medidas foi utilizado o teste de *Chauvenet* (LINK, 2000). Esse teste diz que uma medida pode ser rejeitada se probabilidade de se obter um dado desvio da média for menor do que $\frac{1}{2n}$, onde n é o número de amostras.

O outro método implementado foi o da correlação cruzada, este método é um método muito usado e consagrado para medida de atrasos entre dois sinais, e conseqüentemente medida de velocidades, porém o resultado que é apresentado é um atraso médio em um período de tempo, impossibilitando a análise de cada célula unitária. Outro ponto que desfavorece o uso desta técnica em sistemas com processamento embarcado é o grande trabalho computacional e a exigência de um grande espaço de memória para armazenamento de um período. Tornando assim inviável o uso desta técnica no sistema desenvolvido.

Desta forma, neste trabalho, optou-se pela utilização apenas da técnica baseado em gatilhos. É essa técnica que será apresentada no capítulo de resultados.

3.3 SOFTWARE

O *software* anteriormente desenvolvido por Libert(2013) foi alterado para atender as novas necessidades, este foi desenvolvido em JAVA, e tem três funcionalidades principais. A primeira é permitir que o usuário configure todos os parâmetros necessários para a medição, a segunda é receber os dados vindos do sensor em tempo de medição apresentar em tempo real e a terceira é a gravação dos dados e arquivos para uma análise posterior, facilitando o estudo das medidas realizadas.

3.3.1 Configurações de parâmetros de medição

Na seção de configuração vários parâmetros podem ser ajustados como amplitude, fase e frequência do sinal de excitação, ganho e *off-set* do sinal de entrada de cada canal separadamente e outros parâmetros utilizados para cálculo de velocidade de bolhas como o fator de corte, taxa de amostragem e distância entre sensores. Para tal é estabelecida uma conexão TCP com o microcontrolador, que recebe as informações do usuário e é responsável por gravar os DDSs e potenciômetros digitais.

Como é necessário apenas um sinal de excitação para a realização das medidas em dois canais, não foram feitas alterações no sistema desenvolvido anteriormente por (LIBERT, 2013). Uma captura da tela de configuração do sinal de excitação por ser vista na Figura 3-4

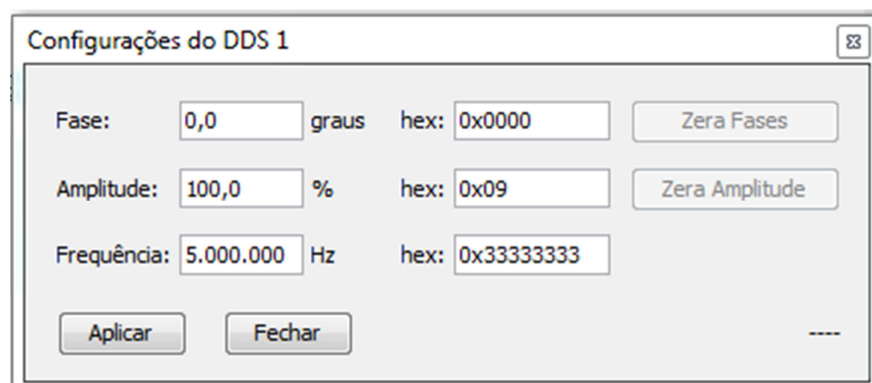


Figura 3-4: Captura da tela de configuração do sinal de excitação.

Para fazer o processamento do sinal também foi necessário oferecer a configuração de alguns parâmetros, não disponíveis anteriormente, como o fator de corte e distância entre

os sensores, o FC é definido como padrão 50% de fração de vazio, podendo ser alterado entre 0 e 100%, a distância deve ser configurada conforme o arranjo de sensores a ser utilizado, neste trabalho foi utilizado uma distancia de 35mm, isso será detalhado na próxima seção. Uma captura da tela de configuração dos parâmetros de recepção e processamento pode ser vista na Figura 3-5

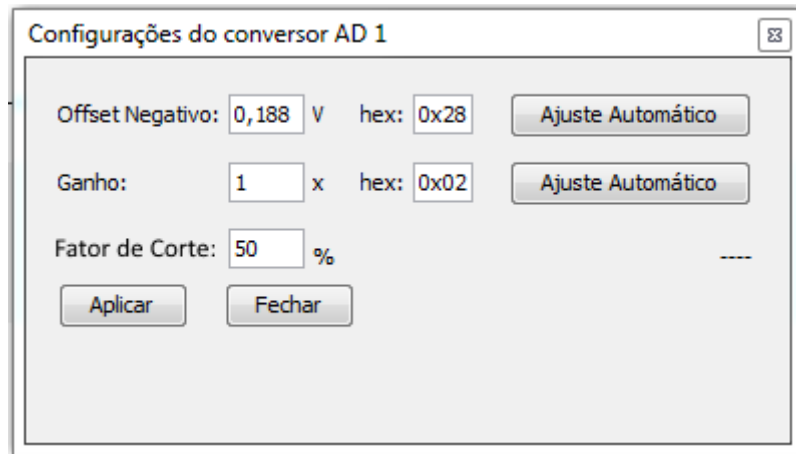


Figura 3-5: Captura de tela de configuração de parâmetros de recepção e processamento.

3.3.2 Recepção de dados

Como já dito o *software* tem conexão com o sistema através do protocolo TCP/IP, os dados de ambos os canais e de velocidades são recebidos em uma mesma conexão TCP. Esses dados então são devidamente identificados e separados, sendo que para a transmissão de todas as informações com apenas uma porta TCP. Foi necessário à criação de um cabeçalho próprio de comunicação.

Os dados referentes à fração de vazio nos canais são plotados em dois gráficos independentes, onde o eixo x representa o tempo e o eixo y representa a fração de vazio. As informações de velocidade são mostradas em uma lista, sendo atualizada a cada velocidade de bolha calculada. Além dos dados serem apresentados em tempo real, os valores de tensão e atraso entre os sinais são gravados em um arquivo para que possam ser analisados e reprocessados posteriormente se caso necessário. Uma captura da tela de recepção de dados pode ser visto na Figura 3-6.

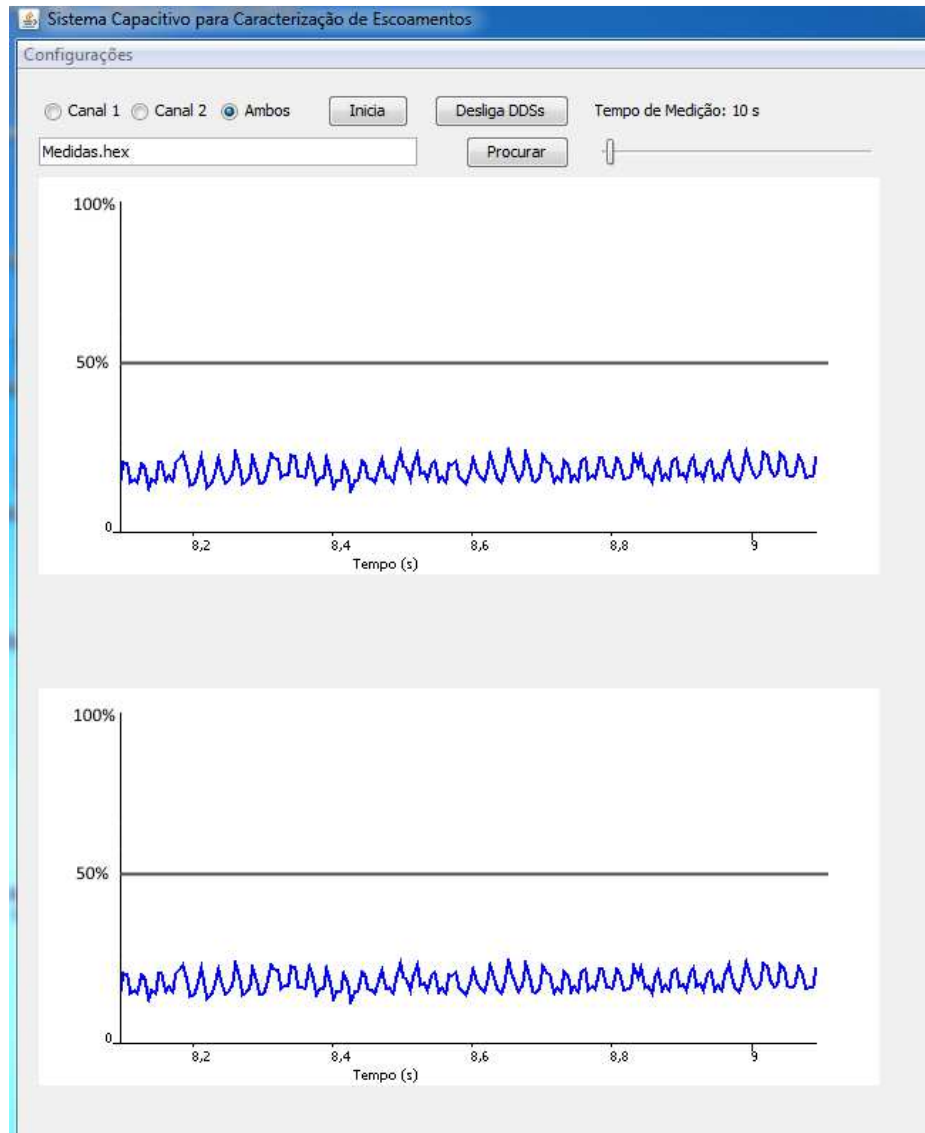


Figura 3-6: Captura da tela de recepção de dados.

3.4 PÓS PROCESSAMENTO

Uma rotina de pós processamento foi desenvolvida em Matlab para uma análise dos dados “*off-line*” se necessário. Essa rotina é responsável por separar os dados referente ao canal 1, canal 2 e valores de velocidades, de acordo com o cabeçalho de comunicação desenvolvido para tornar possível a transmissão de todos os dados em uma mesma conexão.

Os valores referentes à tensão dos canais 1 e 2 são transformados primeiramente em valores de tensão normalizados (V^*), conforme a equação 3.1, onde V_{Medido} é o valor de tensão medido, V_{Min} é o valor de tensão quando o duto está vazio e V_{Max} é o valor de tensão quando o duto está cheio. Esta normalização com base nos valores máximos e mínimos é necessária

sempre que é necessário comparar valores práticos com teóricos, devido a fato que nos valores teóricos não são levados em conta alguns fatores como: tolerância de componentes, ruído, variações de temperaturas e variações das propriedades elétricas dos fluidos. Sendo assim necessária a normalização antes de comparar valores práticos com valores teóricos.

Em seguida é aplicado o polinômio referente a fração de vazio, polinômio este obtidos através de simulações de vários tipos de escoamentos, conforme será detalhado na seção 3.5, tendo como saída uma série temporal da fração de vazio.

$$V^* = \frac{V_{Medido} - V_{Min}}{V_{Max} - V_{Min}} \quad (3.1)$$

Os dados de velocidades que o sistema grava são valores de números de amostras referentes ao atraso entre os dois sensores, ou seja, o tempo que uma bolha leva para se deslocar de um sensor para outro. Portanto, para obter a velocidade é necessário fazer a razão entre a distância dos sensores e o número de amostras e depois multiplicar pela taxa de amostragem. Após calcular as velocidades das bolhas é necessário eliminar os “*outliers*”, ou seja, valores que diferem excessivamente do conjunto de dados e/ou velocidades fisicamente impossíveis de ocorrer em um escoamento. Neste caso o método utilizado foi o teste de Chauvenet como citado anteriormente na seção 3.2.4.

3.5 SENSOR CAPACITIVO EM ANEL

O desenvolvimento do sensor utilizado para medidas de capacitância dos fluidos faz parte deste trabalho, tal sensor foi construído em uma placa de circuito impresso que é colocado na seção transversal da tubulação, onde o eletrodo de medição é toda a parte que fica em contato com o fluido e o restante da placa é aterrada. A parte interna do anel é metalizada para que seja possível medir a permissividade e/ou a condutividade dos fluidos, o restante é feito como no processo padrão de fabricação de placas de circuito impresso, tornando assim possível a fabricação do sensor em grande escala, conforme Figura 3-2 a.

Para tornar possível a medição de velocidade foi utilizado um conjunto de cinco eletrodos com espaçamento entre eles conhecido, onde os dois das extremidades são utilizados como guarda para minimizar ruídos externos, outros dois eletrodos são receptores e o eletrodo do centro é o responsável por emitir um sinal elétrico (excitação) que será medido nos receptores. O eletrodo emissor encontra-se entre os dois eletrodos receptores com um

distancia de 30mm entre cada um. Para formação do arranjo fora usadas flanges de acrílico com diâmetro interno igual ao da tubulação e diâmetro externo de 84mm, acompanhando o diâmetro externo da placa de circuito impresso do eletrodo, foi intercalado sendo acoplado uma flange e uma placa por vez, usando anéis de vedação para evitar vazamentos. Tal arranjo é ilustrado na Figura 3-2 b.

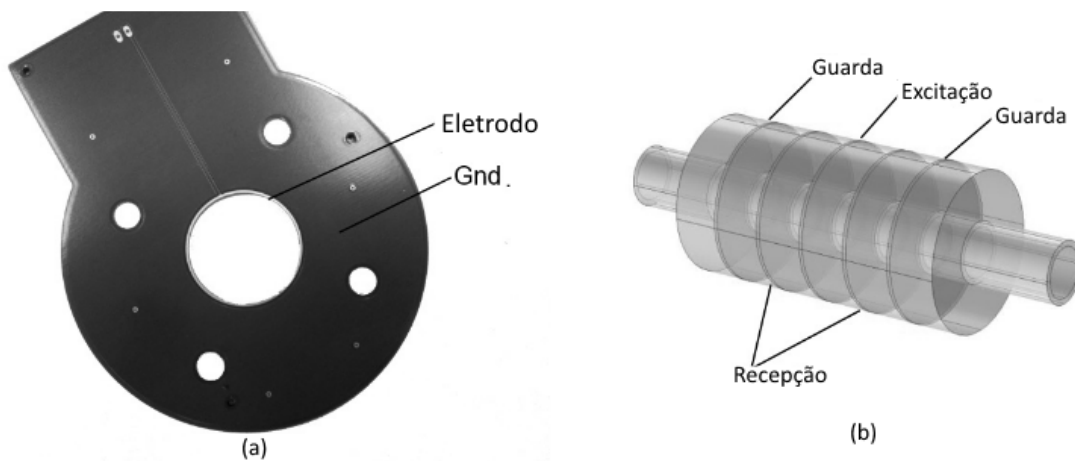


Figura 3-7: a) Sensor desenvolvido em placa de circuito impresso; b) Arranjo de sensores utilizado para medição

3.5.1 Simulações

A resposta da sonda capacitiva não depende apenas da vazão volumétrica entre as fases na seção de medição, mas também da distribuição espacial (STRIZZOLO; CONVERTI, 1993), devido a esse fato foi necessário o levantamento da curva de resposta através do método dos elementos finitos (FEM - *Finite element method*), para todos os tipos de escoamentos.

Considerando que na prática o sinal de excitação não excederá 10 MHz, o período $T = 1/f$ de variação de campo elétrico será sempre superior a 100ns, e caso exista condição de propagação de campo, sua velocidade de propagação será igual a 3×10^8 m/s, sendo o comprimento do sensor na ordem de 30mm, o tempo de propagação de onda pelo sensor será de $T_p = 30 \cdot 10^{-3} / 3 \cdot 10^8 = 100\text{ps}$. Como o tempo de propagação da onda no sensor é muito menor que o período do sinal de excitação pode desconsiderar o acoplamento entre os campos elétricos e magnéticos (HAUS; MELCHER, 1989), com isso o modelo eletrostático pode ser aplicado para simulações.

Para realizar as simulações foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics®, primeiramente o domínio de avaliação foi definido, esse domínio é chamado de universo,

neste trabalho o universo foi definido por um paralelepípedo de 400mm de largura, 400mm de profundidade e 275mm de altura. Esses limites foram definidos com base nas dimensões do sensor e também visando minimizar erros sem comprometer o custo computacional. Outro parâmetro a ser definido é a malha, neste caso foi usado uma malha fixa pra todos os escoamentos, com elementos de no máximo 14mm e mínimo de 0,6mm. Com esses parâmetros definidos, restam atribuir os valores de potencial elétrico e permissividade de acordo com sua localização espacial. Para os eletrodos de guarda e recepção definiu-se como potencial elétrico nulo e para o eletrodo de excitação foi definido com um potencial de 1V. A permissividade de cada local foi definida da seguinte maneira: para o universo atribuiu-se a permissividade do vácuo, os tubos e flanges de acrílico atribuiu-se permissividade relativa igual a 4 (correspondente ao acrílico, material da tubulação) e em todas as simulações o fluido formado por ar e água com permissividade igual a 80.

a) Escoamento Anular.

Para simulação de um escoamento anular um modelo como o da Figura 3-8 foi criado, onde o fluido é representado por uma lamina de líquido em torno da tubulação com um núcleo gasoso concêntrico ao duto. Para a obtenção de diferentes frações de vazio variou-se o raio do núcleo gasoso, na faixa de 0% e 100% em intervalor de 5% de fração de vazio. Para cada fração de vazio foi calculada a integral da densidade de corrente no eletrodo de recepção, que equivale numericamente a capacitância do sensor.

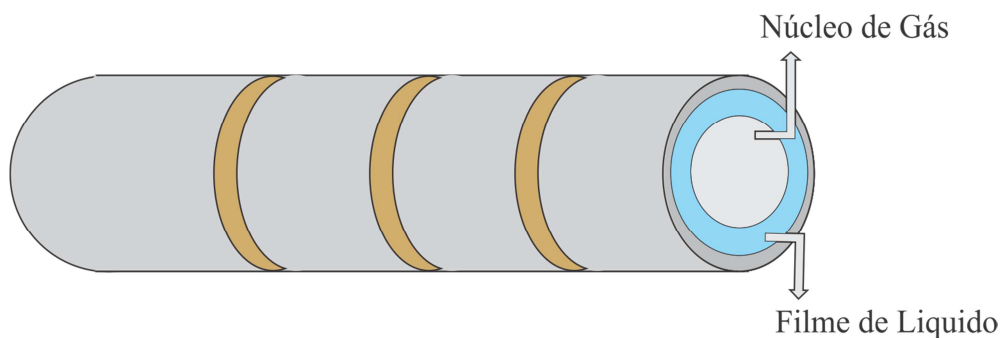


Figura 3-8: Modelo utilizado para simular escoamento anular.

Para que seja possível comparar os dados de fração de vazio com capacitância, é necessário normalizar os dados de capacitância por meio de

$$C^* = \frac{C - C_{Ar}}{C_{agua} - C_{Ar}} \quad (3.2)$$

onde, a C representa a capacitância a ser normalizada, enquanto C_{Ar} e C_{agua} , são as capacitâncias simuladas para o tubo vazio e tudo cheio, respectivamente.

Os valores de capacitâncias normalizada obtidos para as diferentes frações de vazio são mostrados na Figura 3-9

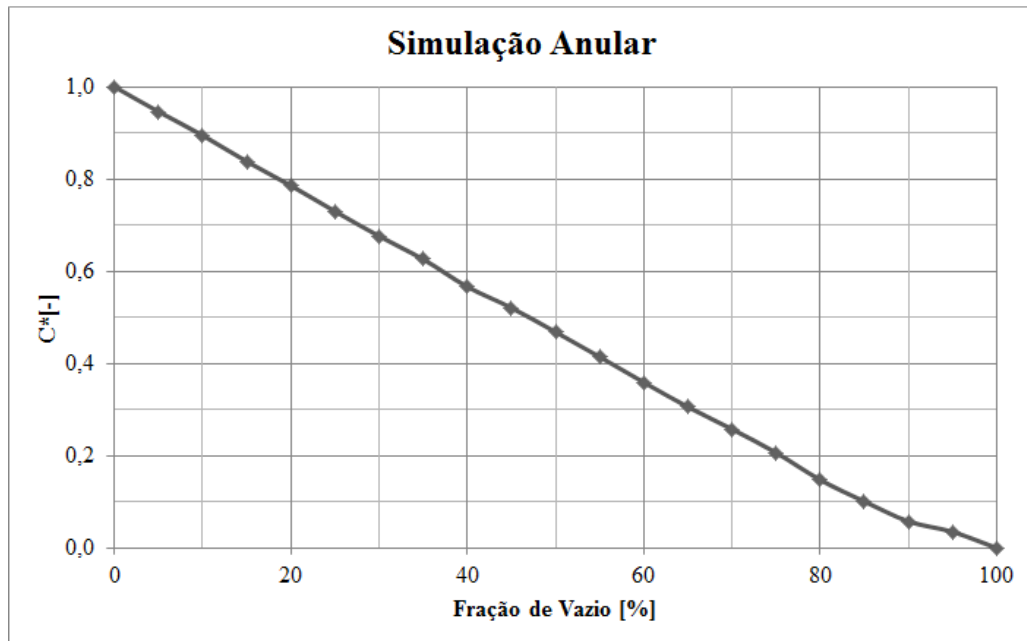


Figura 3-9: Resultado da simulação para varias frações de vazio (Anular).

b) Escoamento Estratificado.

O modelo da Figura 3-10 foi utilizado para simular escoamento estratificado, onde a altura do líquido “ h ” foi variado de 0mm a 26mm de altura em intervalos de 2 mm variando assim a fração de vazio entre 0% e 100%. Para fazer a conversão de altura de líquido “ h ” para fração de vazio foi necessário calcular o volume total do sensor, através de

$$V = \pi.r^2.L \quad (3.3)$$

onde r é o raio interno do duto (13mm) e L é o comprimento do sensor (270mm). Também é necessário saber o volume de água quando o nível é aumentado a cada 2mm, formando um semi cilindro de água. Para calcular o volume do semi cilindro é usado a seguinte equação

$$V = A(h).L \quad (3.4)$$

onde L é o comprimento do sensor e $A(h)$ é a área do semi cilindro para a altura h , calculada por

$$A(h) = \frac{\pi r^2}{2} - r^2 \arcsin\left(\frac{r-h}{r}\right) + (h-r)\sqrt{r^2 - (h-r)^2} \quad (3.5)$$

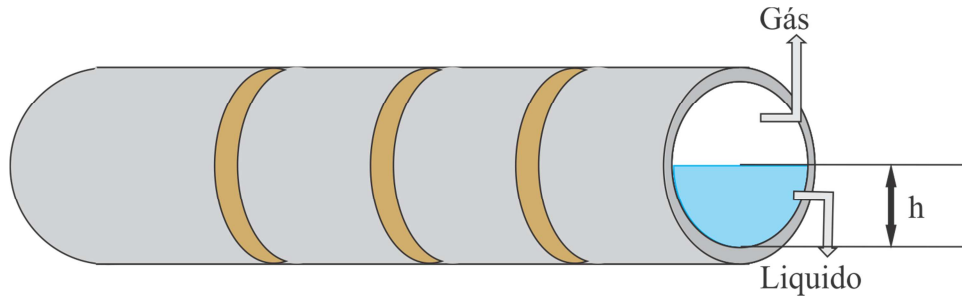


Figura 3-10: Modelo utilizado para simular escoamento estratificado.

Da mesma forma que para o escoamento anular, a capacitância normalizada foi calculada e é apresentada na Figura 3-11

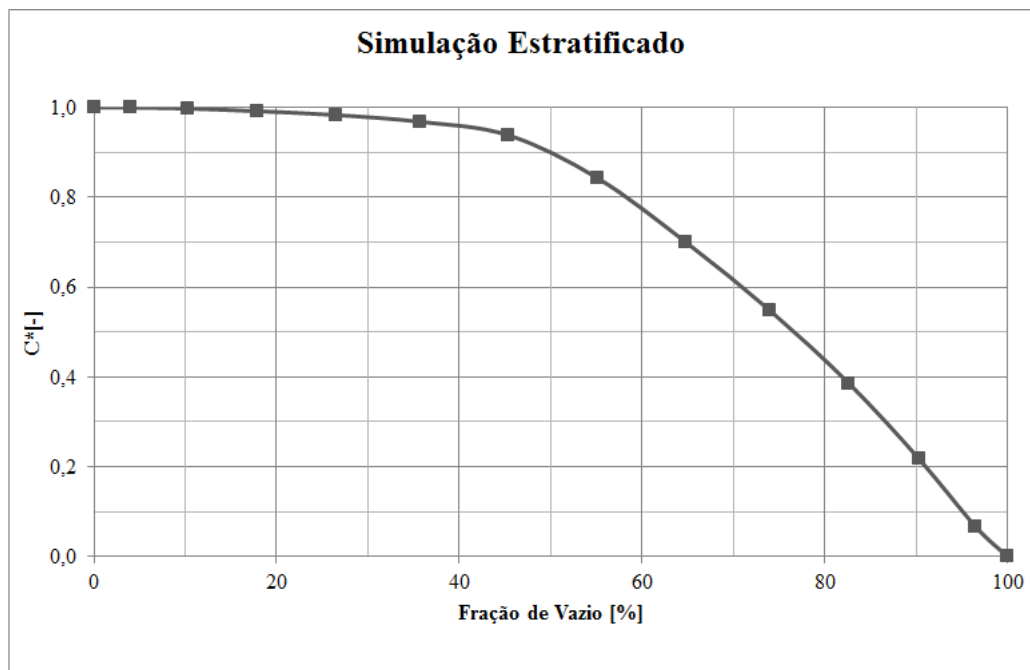


Figura 3-11: Resultado da simulação para varias frações de vazio (Estratificado).

c) Bolhas Dispersas

Para realizar a simulação de bolhas dispersas foi criado um modelo monofásico, onde a permissividade da única fase foi determinada através da equação de Maxwell Garnett Sihvola (1999) também validado por Libert (2013), transcrita abaixo, tendo assim a permissividade elétrica da mistura ϵ_m . Esta estimativa é válida quando os raios das bolhas são muito menores que a distância entre elas. Nem sempre isso é verdade em escoamentos com bolhas dispersas, porém o modelo pode servir como uma aproximação (LIBERT, 2013).

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{\text{agua}} + \varepsilon_{\text{agua}} \cdot \left(3\alpha \cdot \frac{(\varepsilon_{\text{ar}} - \varepsilon_{\text{agua}})}{\varepsilon_{\text{ar}} + 2\varepsilon_{\text{agua}} - \alpha \cdot (\varepsilon_{\text{ar}} - \varepsilon_{\text{agua}})} \right) \quad (3.6)$$

Na equação (3.6), α é a fração de vazio, ε_{ar} é a permissividade do ar e $\varepsilon_{\text{agua}}$ é a permissividade da água.

Para realizar a simulação com várias frações de vazio, variou-se a permissividade média ε_m , na faixa entre 1 a 80, onde 1 é a permissividade do ar e 80 corresponde a permissividade da água, a fração de vazio equivalente calculada através da equação (3.7), obtida a partir da equação (3.6).

$$\alpha_{MG} = \frac{\left(2 + \frac{\varepsilon_{\text{ar}}}{\varepsilon_{\text{agua}}} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{\text{agua}}} \right)}{\left(1 - \frac{\varepsilon_{\text{ar}}}{\varepsilon_{\text{agua}}} \right) \left(2 + \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{\text{agua}}} \right)} \quad (3.7)$$

Os valores de capacitâncias normalizadas obtidos para as varias frações de vazio são mostrados na Figura 3-12.

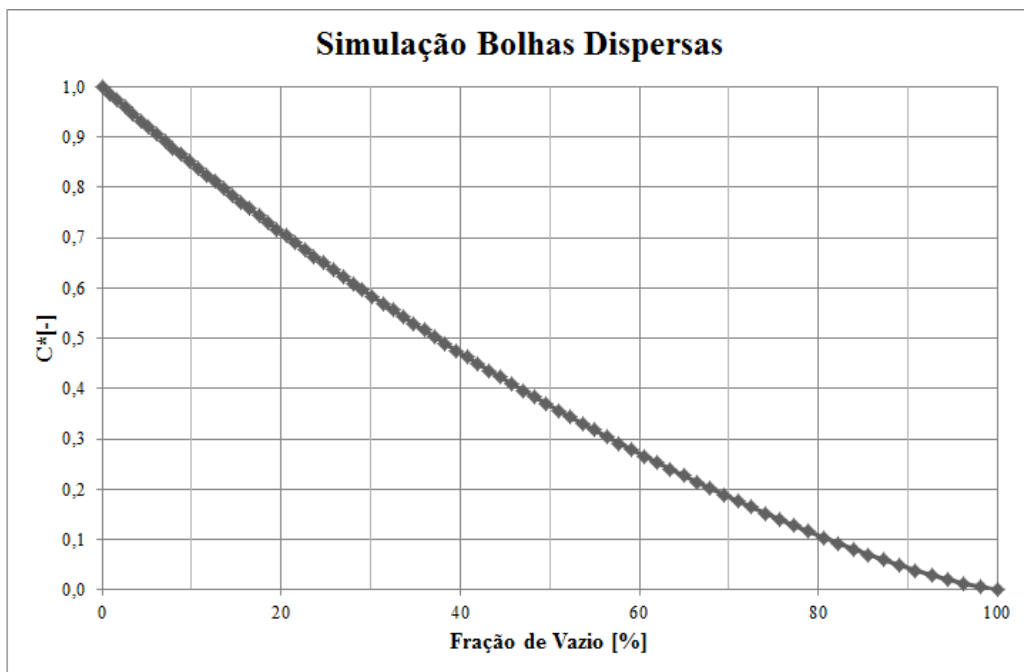


Figura 3-12: Resultado da simulação para varias frações de vazio (Bolhas)

d) Escoamento Intermitente.

Baseado em Rosa; Flora e Souza (2012) um escoamento intermitente pode ser segmentado em dois extremos, como ilustrado na Figura 3-13 sendo para escoamentos verticais dividido em bolhas dispersas e anular (a), e para escoamentos na horizontal dividido em bolhas dispersas e estratificado ou bolha alongada (b). Essa segmentação foi usada para tornar possível a simulação e aplicação do método dos elementos finitos (FEM) onde cada tipo de escoamento foi simulado separadamente obtendo uma curva de calibração para cada tipo. Para escoamentos intermitentes uma curva é selecionada de acordo com fração de vazio, sabendo que a fração esta diretamente relacionada com o tipo de escoamento.

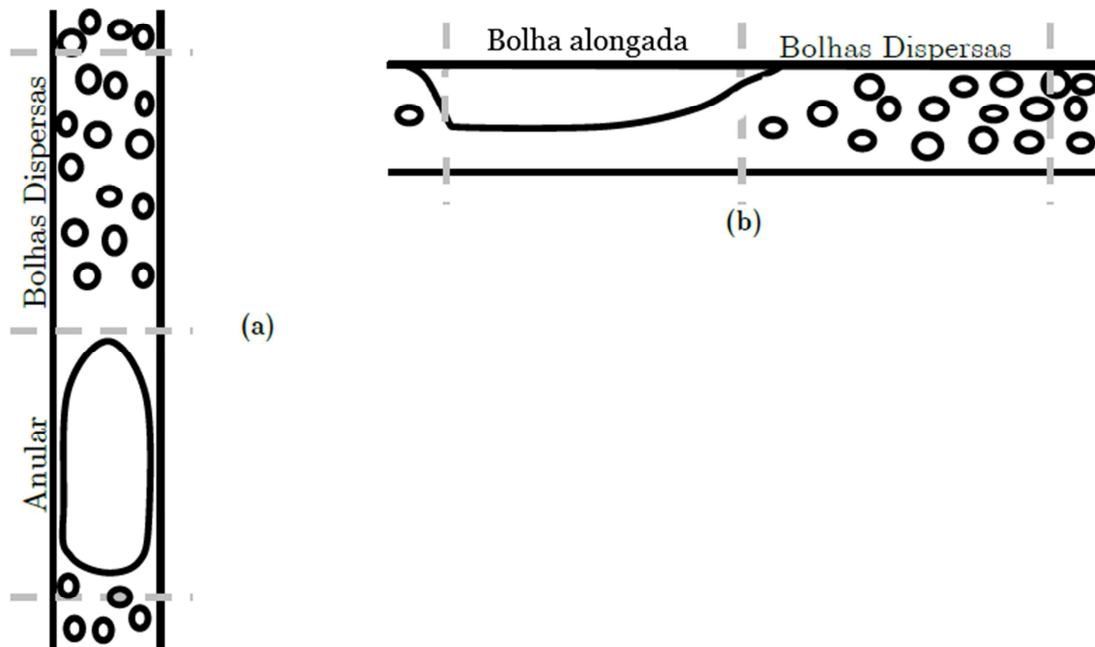


Figura 3-13: Representação dos segmentos que compõe os escoamentos em golfadas. Escoamento vertical(a), escoamento horizontal (b). Adaptado de (LIBERT, 2013)

e) Resposta Geral

Tendo que o tipo de escoamento está relacionado com a fração de vazio, podemos definir alguns limites para a escolha de qual polinômio a ser utilizado de acordo com a capacitância.

Para escoamentos verticais a transição de bolhas dispersas para intermitente ocorre aproximadamente para fração de vazio maior que 20% (TAITEL; BORNEA; DUKLER, 1980) para a transição de intermitente para anular não existe uma correlação por meio da fração de vazio apenas pelas velocidades superficiais. Porém, com base em dados empíricos a

fração de vazio de escoamentos anular sempre está acima de 80%, então para escoamentos intermitentes podemos assumir que a fração de vazio será entre 20% e 80%. Com isso obtemos uma curva de resposta do sensor para escoamentos intermitentes verticais, mostrada na Figura 3-14 onde cada faixa de fração de vazio está relacionado com um polinômio “y” calculado.

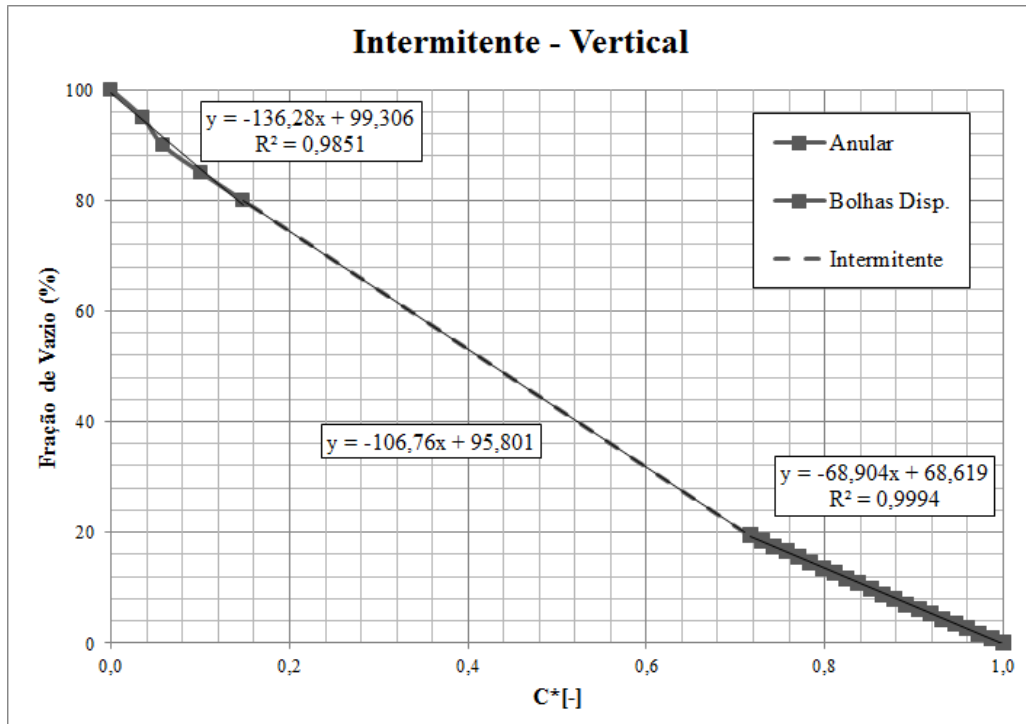


Figura 3-14: Curva de resposta do sensor para escoamentos intermitentes verticais.

Para escoamentos horizontais não existe uma correlação direta entre fração de vazio e tipo de escoamento apenas para velocidades superficiais, porém ao longo de vários experimentos realizados por Santos(2011) e Vicencio(2013) na mesma planta de escoamentos horizontais utilizada para este trabalho, observamos que a transição de bolhas dispersas para intermitente ocorre com frações de vazio de aproximadamente 10% para qualquer velocidade de líquido. Enquanto a transição de estratificado para intermitente ocorre com frações de vazio de aproximadamente 65% variando de acordo com as velocidades de líquido e gás, contudo na faixa de velocidades testadas a transição sempre se aproximou deste valor.

Sendo assim a curva de resposta do sensor para escoamentos horizontais é obtida, como mostrado na Figura 3-15, onde para cada faixa de fração de vazio esta relacionada a um polinômio “y” calculado.

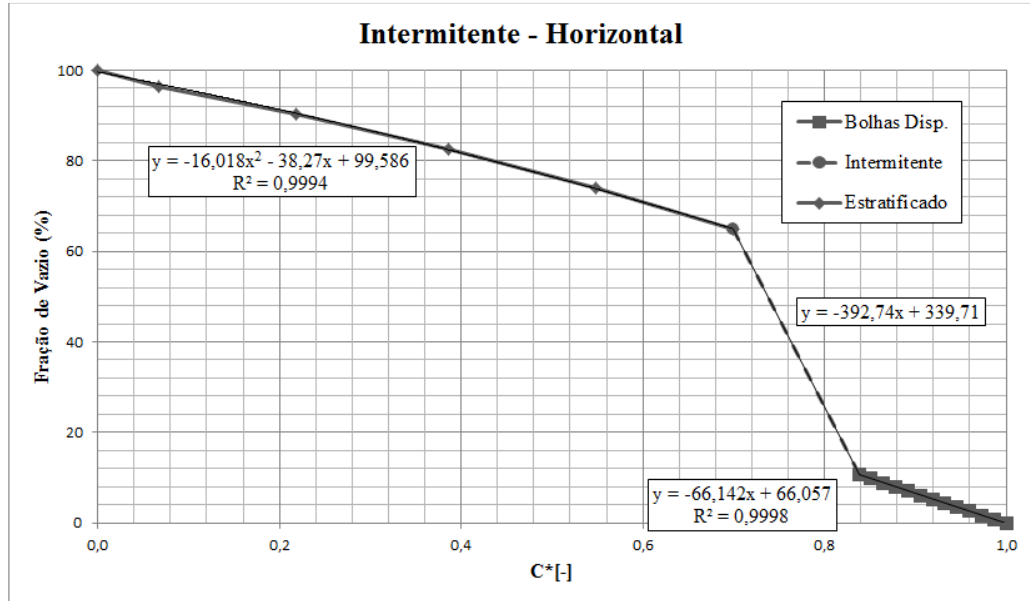


Figura 3-15: Curva de resposta do sensor para escoamentos intermitentes horizontais.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Teste de validação das simulações

Foram realizados alguns testes estáticos com o intuito de validar as simulações realizadas. Tais teste serão descritos a seguir.

4.1.1 Estratificado

Para fazer a comparação dos dados obtidos pela simulação dos elementos finitos foram feitas medições em uma bancada estática, cujo esquemático pode ser visto na Figura 4-1. O mesmo procedimento da simulação para alteração da altura do líquido foi adotado, onde o líquido é injetado por uma seringa, aumentando a altura do liquido em 2mm em 2mm. Sendo assim obtendo 13 pontos de medida incluído tubo cheio e vazio, para cada ponto foi realizado medidas de 10s.

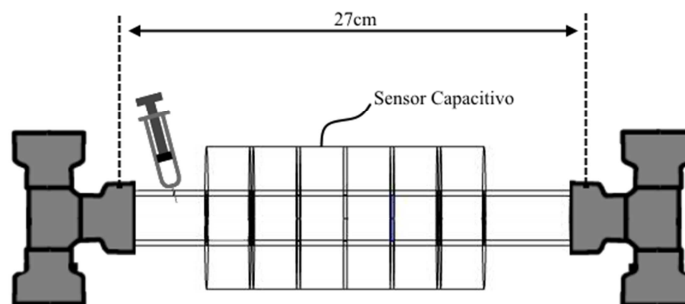


Figura 4-1: Representação esquemática da bancada de testes estáticos para escoamento estratificado.

Da mesma forma que na simulação os dados obtidos foram normalizados para que seja possível a comparação dos valores da simulação com os valores obtidos das medidas, essa comparação pode ser vista na Figura 4-2.

Na comparação dos resultados observa-se que para baixas frações de vazio a valor simulado é maior do que o medido, e para frações de vazio altas isso se inverte. Possivelmente isso ocorre devido ao formato da curva do nível de liquido formado devido a tensão superficial da água, essa formato não foi considerado na simulação. Essa diferença é ilustrada na Figura 4-3, onde do lado esquerdo está uma fotografia da seção transversal do tudo e do lado direito uma figura da seção transversal da simulação FEM.

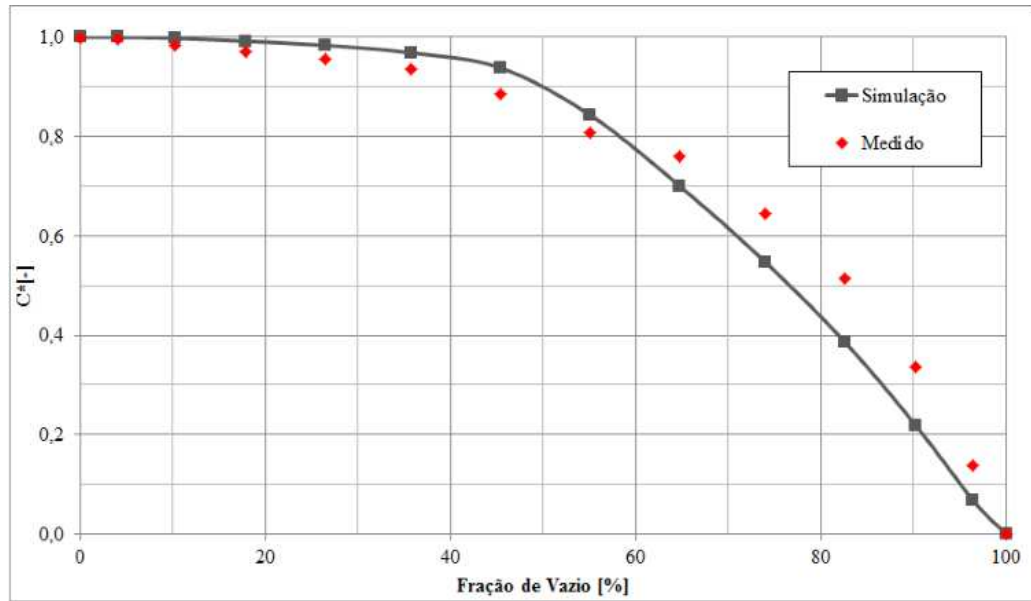


Figura 4-2: Comparação de dados obtidos pela simulação com dados medidos (estratificado estático).

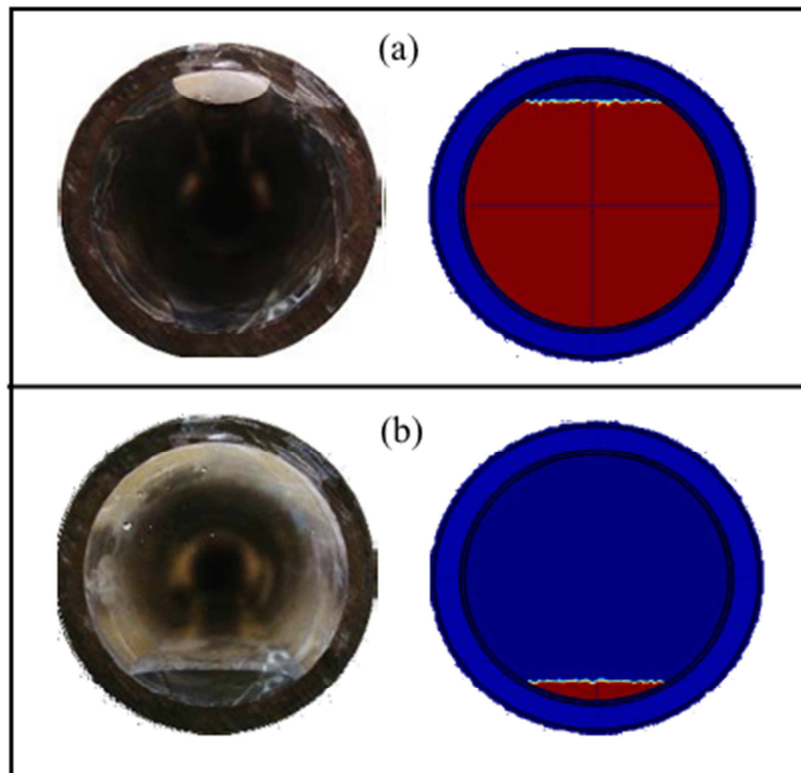


Figura 4-3: Comparação da curva de nível de líquido medido com simulado, (a) 5 % de fração de vazio e (b) 95 % de fração de vazio.

4.1.2 Bolhas Dispersas

Também foram realizados testes para validar a simulação de escoamento de bolhas dispersas. Para isso foi utilizado um segmento de tudo de acrílico de 30cm antes e outro após o sensor, na vertical. Para fazer as medidas foi colocado água até 10cm após o sensor, ficando 20cm de tubulação disponível pra subida de gás. O gás foi injetado através de um compressor de ar usado para oxigenação de aquários, onde o gás antes de ir pra tubulação passa por uma pedra porosa para poder gerar bolhas dispersas, para tornar possível vários pontos de medida foi usado um “*varivolt*” na alimentação do compressor tendo assim várias intensidades de funcionamento do compressor. Um esquemático da bancada pode ser visto na Figura 4-4

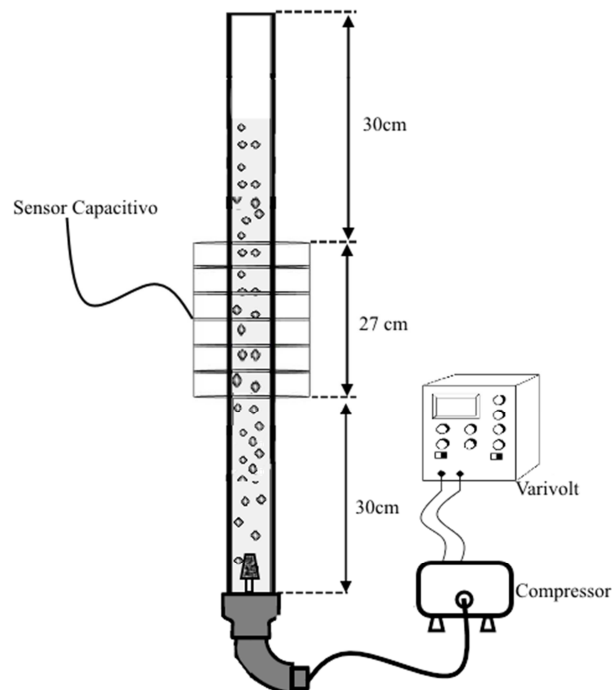


Figura 4-4: Representação esquemática da bancada de testes bolhas dispersas.

Variando a tensão de alimentação do compressor foi possível gerar bolhas dispersas fazendo a fração de vazio chegar a 11% sem que seja gerado golfada, dentro da faixa de 1 e 11% foram selecionados nove pontos de medição distintos para comparação com a simulação. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 4-5.

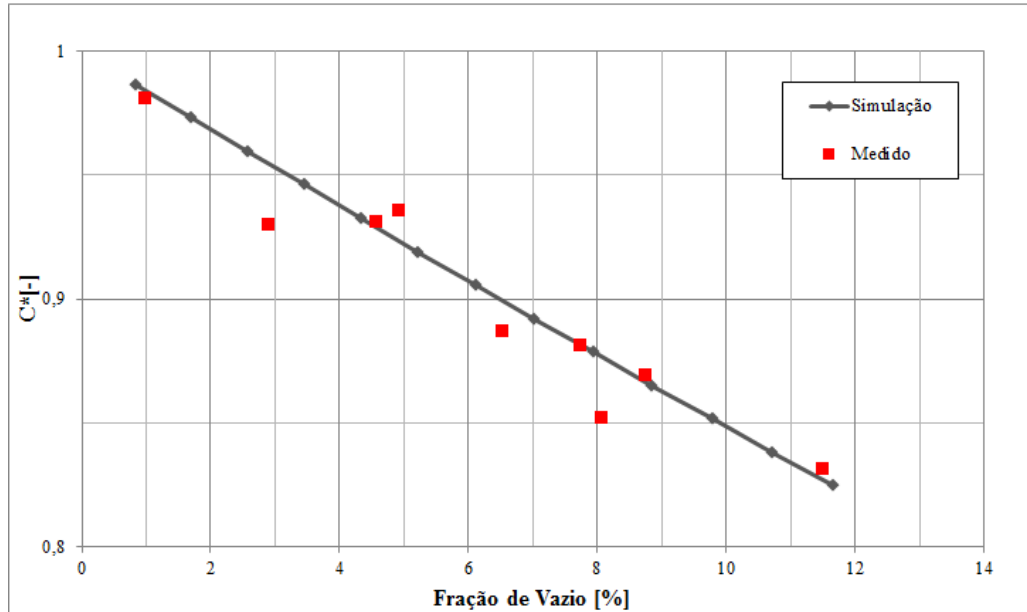


Figura 4-5: Comparação de dados obtidos pela simulação com dados medidos (bolhas dispersas estático).

A fração de vazio de cada ponto selecionado foi calculada através da diferença da altura da coluna de líquido quando o compressor é ligado, sabendo que a altura inicial h_i com o compressor desligado é de 77cm de líquido, medindo o quanto a coluna de líquido sobe ao ligar o compressor temos a altura final h_f , então α pode ser calculado pela equação (4.1)

$$\alpha = \frac{(h_f - h_i)}{h_f} \quad (4.1)$$

4.2 Testes em Escoamentos

Nesta seção serão descritos os testes realizados para a avaliação do sensor desenvolvido. Foram realizadas medidas em plantas com vazões de gás e líquido controladas, sendo gerados escoamentos na horizontal e vertical de padrões distintos. Os resultados obtidos foram comparados com os dados de medidas simultâneas feitas com o sensor de referência *Wire-Mesh*, essa técnica é baseada em imageamento direto, não necessitando de uma curva de ajuste, podendo assim ser utilizado como referência. Por ser um sensor intrusivo este deve ser instalado sempre depois do sensor capacitivo, foram instalados dois sensores *wire-mesh* a uma distância de 5,12cm entre si, possibilitando o cálculo da velocidade das bolhas no escoamento.

4.2.1 Escoamento Horizontal

Primeiramente foram realizados teste na planta de escoamentos horizontais. Esta bancada é formada por tubos de acrílico com 26mm e 32mm de diâmetro interno e externo, com 9m de extensão, a contar do misturador de água/ar. O sensor capacitivo foi instalado a uma distância de 7m do misturador e o sensor de referencia *wire-mesh* a uma distância de 7,3m, como representado pela Figura 4-6.

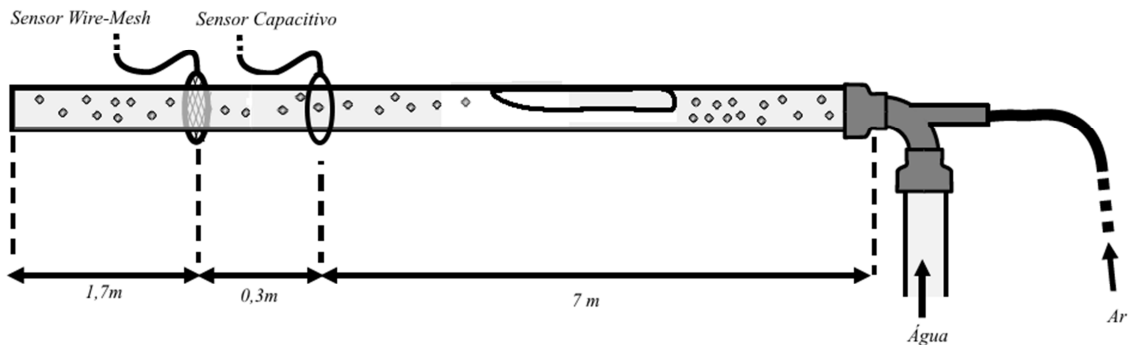


Figura 4-6: Representação esquemática da planta de escoamentos horizontais.

Para o controle da vazão de água utilizou-se uma bomba acionada por um inversor de frequência para possibilitar o ajuste da vazão, com um medidor de vazão do tipo coriolis em sua saída.

O ar é fornecido por um reservatório de 500 l que é pressurizado por um compressor, pra controlar a vazão é utilizada uma placa de orifício de 2mm de diâmetro, sendo também necessário a medição da pressão diferencial da placa, para o controle de uma válvula reguladora de pressão.

O controle da bomba, leitura dos transdutores e cálculos das velocidades superficiais foram realizados por um sistema supervisorio do laboratório de ciências térmicas da UTFPR (ALVES, 2013). O sistema é desenvolvido em *LabView* da *National Instruments* utilizando uma rede *Foundation FielBus*.

Foram realizadas medições com varias vazões diferentes de ar e água, explorando ao máximo os limites impostos pela planta, os pontos selecionados e suas respectivas velocidades superficiais podem ser visto no mapa de fluxo da Figura 4-7.

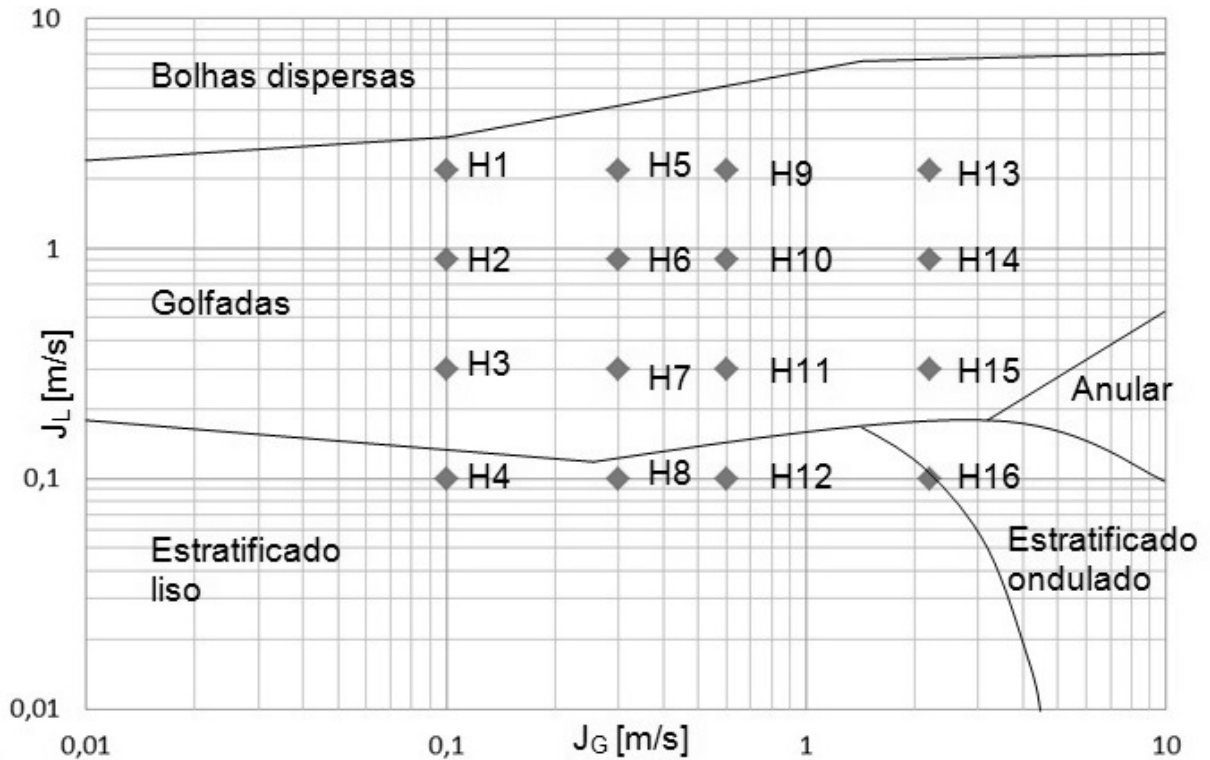


Figura 4-7: Mapa de Fluxo de Taitel e Dukler para a bancada de teste horizontal

Para tais pontos foram realizadas medidas de fração de vazio média com o sensor desenvolvido e com o sensor de referência *wire-mesh*, a comparação dos resultados podem ser observado na Figura 4-8. Como pode-se observar a diferença absoluta entre as medidas não ultrapassa 15%, conforme o gráfico da Figura 4-9.

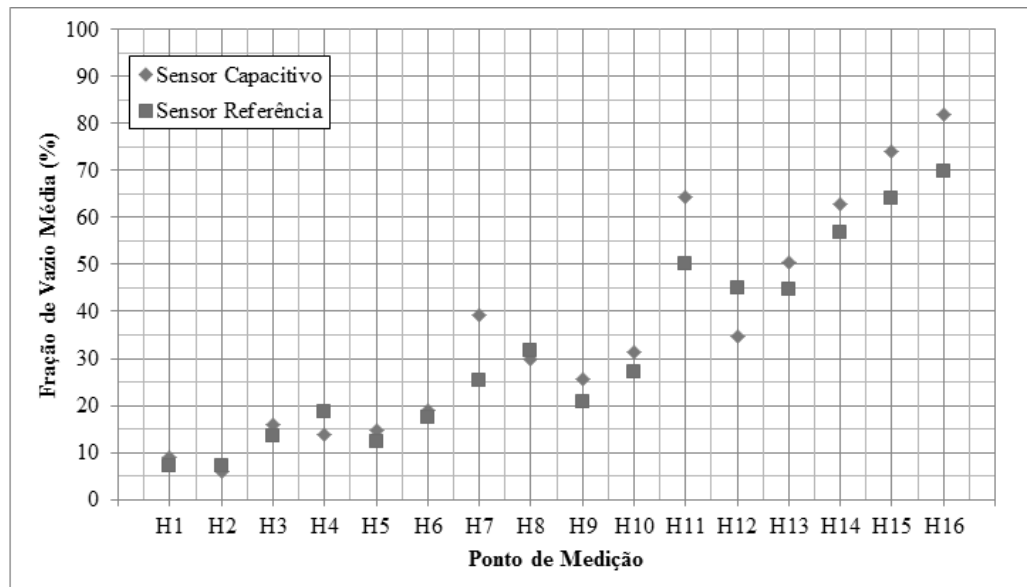


Figura 4-8: Valores de fração de vazio média obtidas pelo sensor capacitivo e sensor *wire-mesh* em escoamentos horizontais.

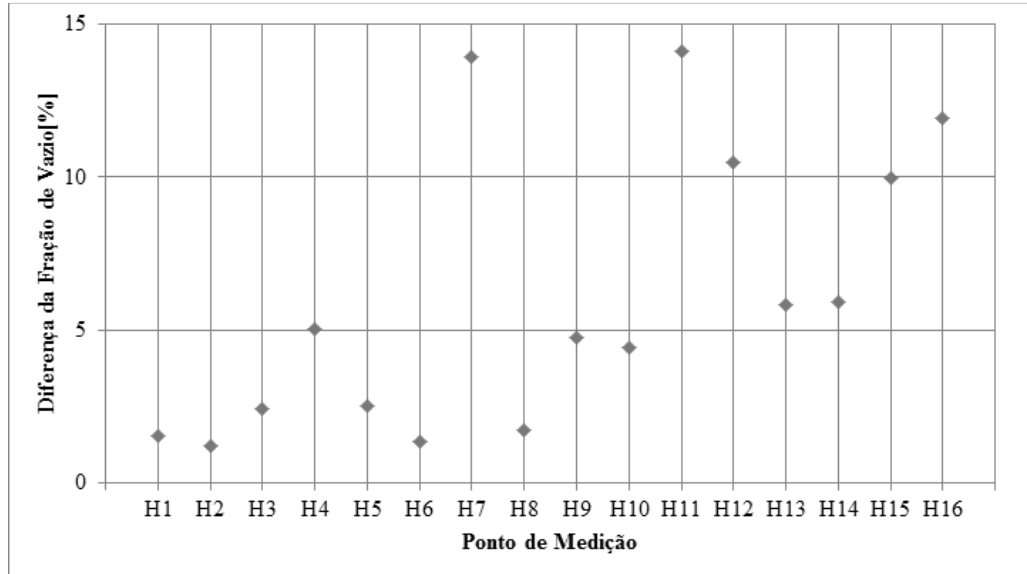


Figura 4-9: Diferença absoluta da fração de vazio medida pelo sensor capacitivo em relação ao *wire-mesh* em escoamentos horizontais.

Outro parâmetro medido foi a velocidade das bolhas em escoamentos intermitentes ou golfadas, para que essa informação seja extraída dos dados gerados pelo sensor *wire-mesh*, foi utilizado o sistema desenvolvido por (SANTOS, 2011). A comparação dos resultados obtidos pode ser vista na Figura 4-10.

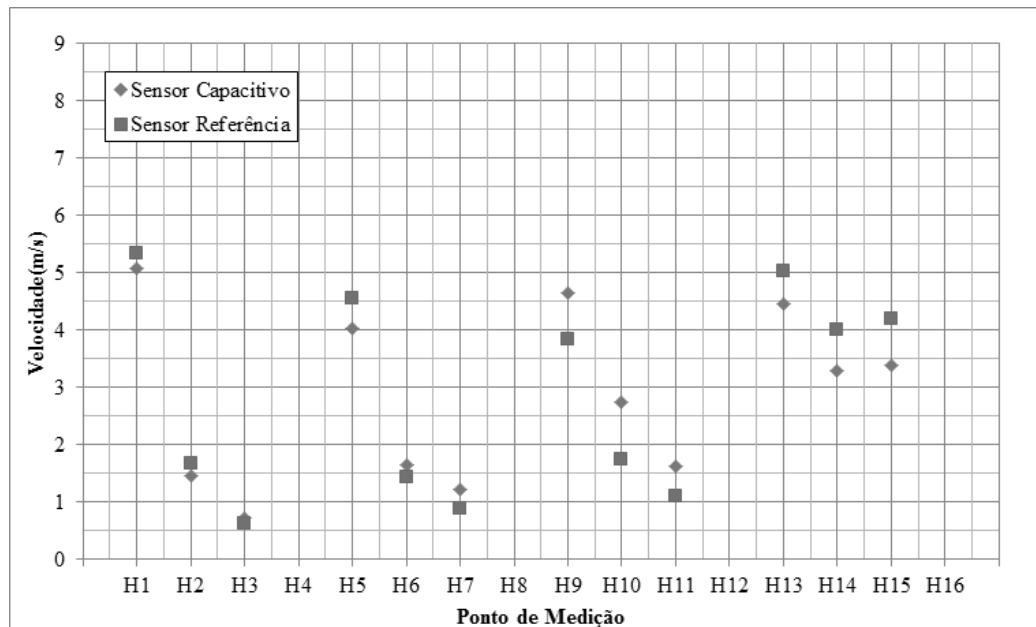


Figura 4-10: Valores de velocidade média das bolhas em escoamentos horizontais.

Alguns exemplos de medidas de fração de vazio em relação ao tempo são apresentados na Figura 4-11.

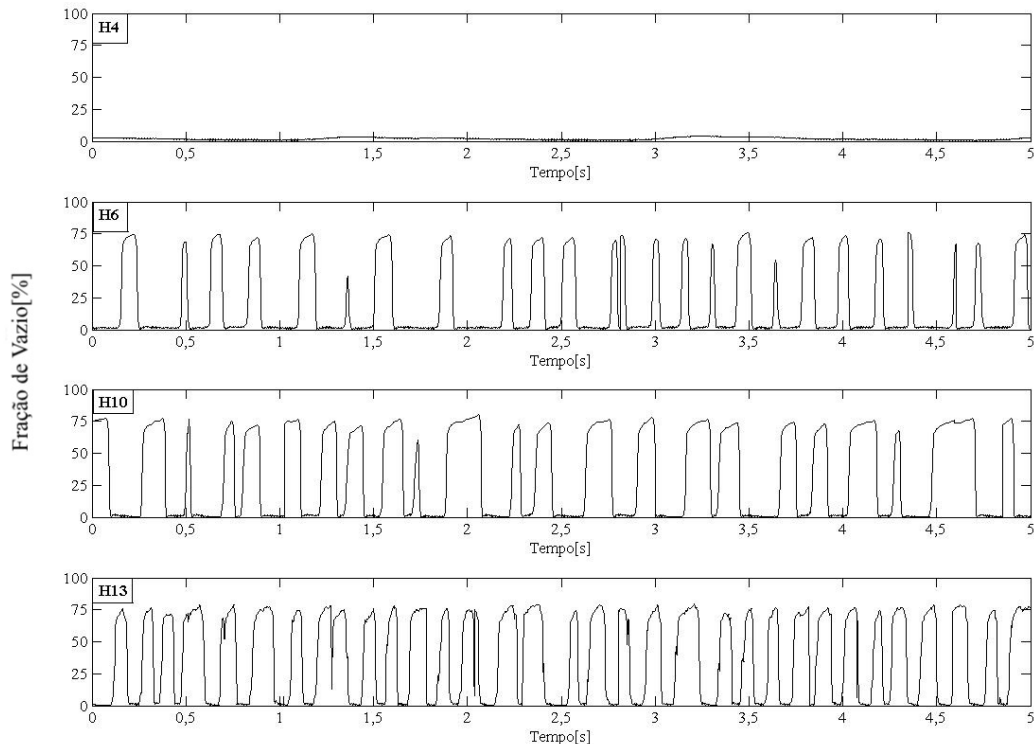


Figura 4-11: Séries temporais de medições em escoamentos horizontais.

4.2.1.1 Discussão

Observando a comparação das frações de vazio para escoamentos horizontais pode ser observado que a diferença nos resultados é maior nos pontos H7, H11 e H16 que são escoamentos intermitentes com maiores frações de vazio, sendo assim para uma melhor precisão nos resultados seria necessário ajustar os limites de transição das curvas de calibração do sensor de forma automática. Neste caso, por exemplo, diminuir a faixa considerada como estratificado. Quanto a velocidade medida nota-se a ausência de dados para H4, H8, H12 e H16 por estes serem escoamentos do tipo estratificado, não tendo bolhas. Analisando que para os escoamentos com maiores vazões de líquido e gás as diferenças entre as velocidades medidas pelo sensor capacitivo e pelo sensor de referência aumentam isso ocorre devido a maior complexidade para detectar e separar as bolhas do pistão de líquido, devido a grande quantidade de gás no pistão de líquido tornando assim mais difícil a escolha de um fator de corte para o cálculo da velocidade.

4.2.2 Escoamento Vertical

Também foram realizados testes em uma planta vertical. Esta bancada é formada por tubos de acrílico com diâmetro interno de 26mm e externo de 32mm, tem 3,5 metros de altura a contar do misturador de água/ar. O sensor capacitivo foi instalado a 2,45m de distância do misturador e o sensor *wire-mesh* foi instalado a 0,3 m a cima do sensor capacitivo, ficando assim a uma distância de 0,75m do final da bancada. Um esquemático pode ser visto na Figura 4-12.

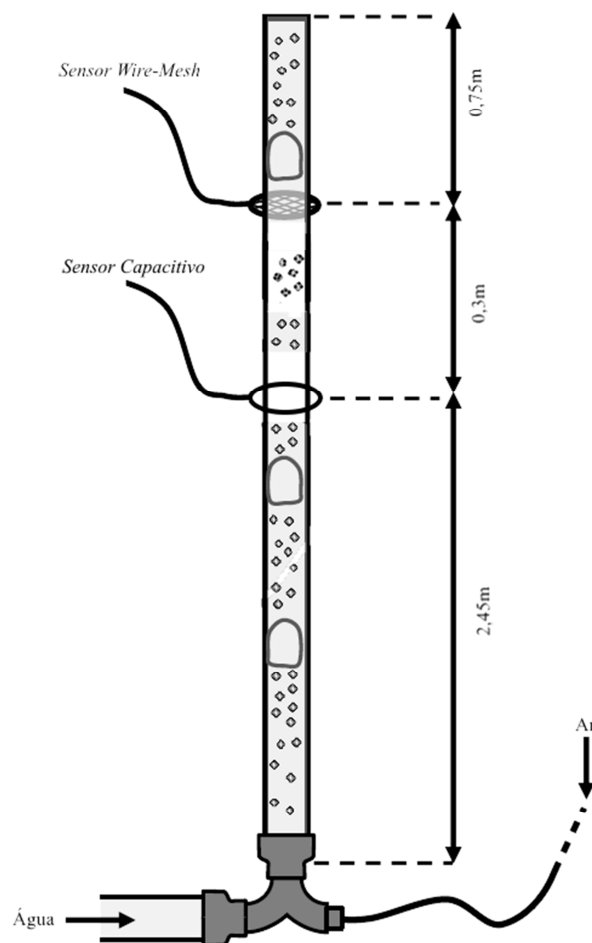


Figura 4-12: Representação esquemática da planta de escoamentos verticais

O controle das vazões de gás e líquido é feito da mesma maneira que é feito na bancada horizontal, usando a mesma bomba de água e mesmo reservatório de ar.

Foram realizadas 13 medidas com vazões de líquido e gás distintas, esses pontos foram selecionados de maneira a explorar a o máximo a bancada de medições. Esses pontos e suas respectivas velocidades superficiais podem ser visto no mapa de fluxo da Figura 4-13. Pode-se observar que alguns pontos divergem do mapa de fluxo, onde V2 que segundo o

mapa seria um regime de golfadas, mas na planta apresentou bolhas dispersas e V9 que segundo o mapa seria bolhas dispersas e apresentou o regime de golfadas. Isso se da ao fato que a planta não possui o comprimento suficiente para desenvolver totalmente o escoamento, dando algumas divergências de acordo com o mapa de fluxo.

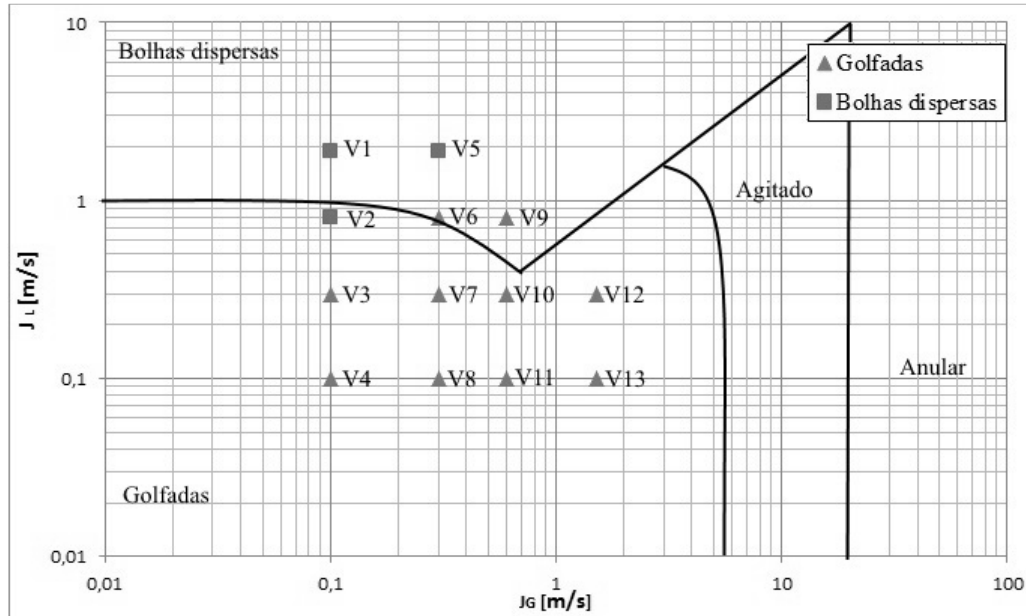


Figura 4-13: Mapa de Fluxo de Taitel e Dukler para bancada de testes vertical.

Assim como feito para os escoamentos horizontais também foi feito para os pontos de medição na vertical, os valores de fração de vazão média podem ser vistos e comparados com os dados obtidos pelo sensor referência na Figura 4-14. Como é possível observar, a diferença absoluta entre a medida com o sensor capacitivo e do sensor de referência não ultrapassa os 10%, conforme gráfico da Figura 4-15.

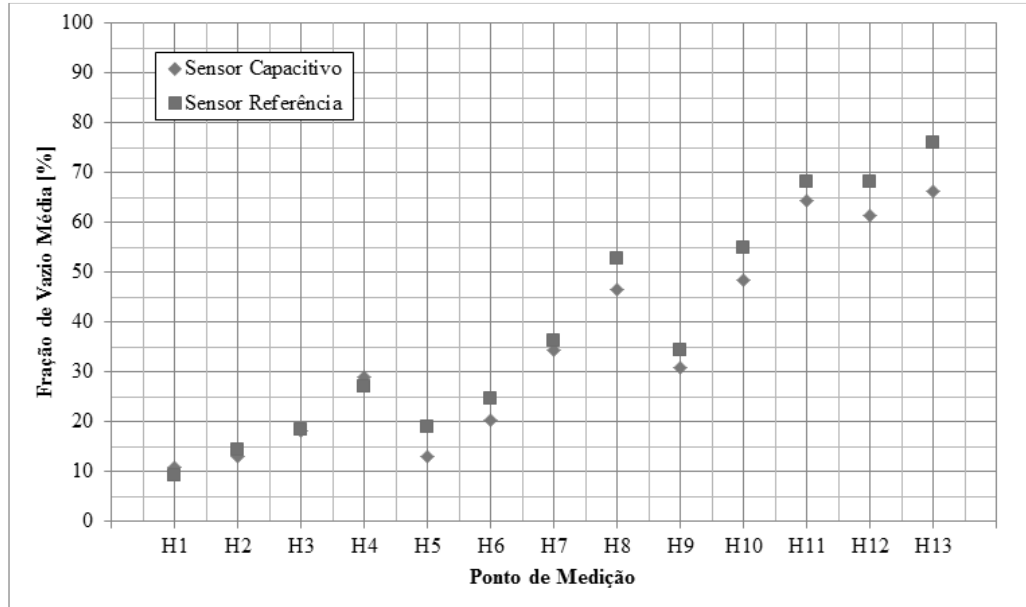


Figura 4-14: Valores de fração de vazão média obtidos pelos sensores capacitivo e sensor *wire-mesh* em escoamentos verticais

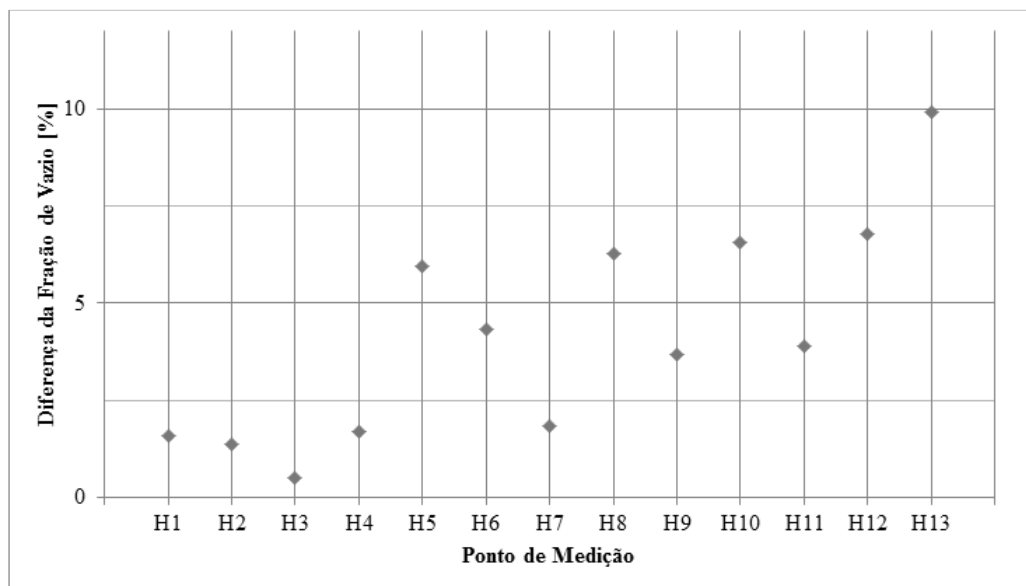


Figura 4-15: Diferença absoluta da fração de vazão medida pelo sensor capacitivo em relação ao *wire-mesh* em escoamentos verticais.

Para os escoamentos verticais também foi medido a velocidade das bolhas em escoamentos do tipo intermitente, os resultados são apresentados na Figura 4-16.

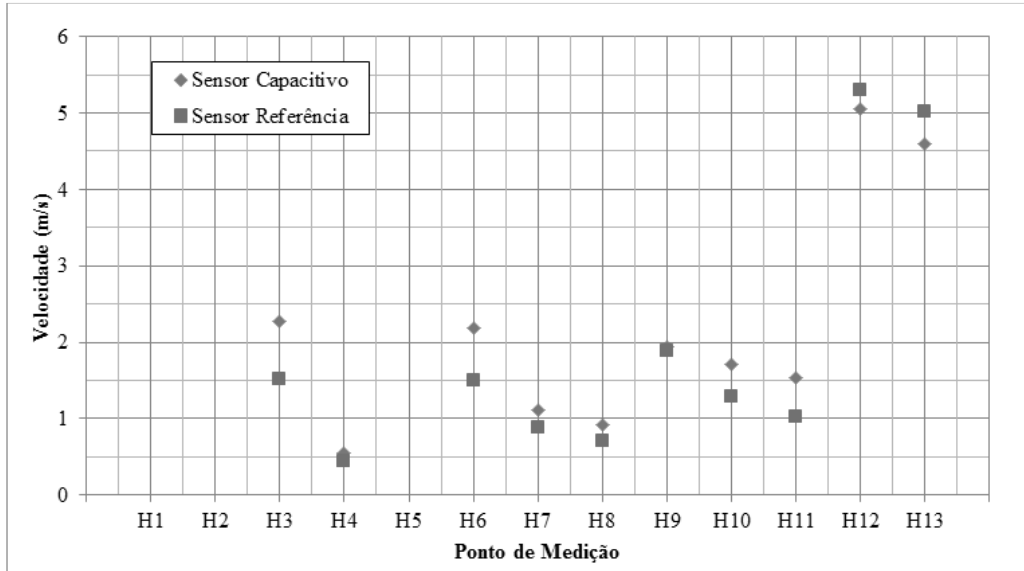


Figura 4-16: Valores de velocidade média das bolhas em escoamentos verticais

Alguns exemplos de medidas de fração de vazio em relação ao tempo são apresentados na Figura 4-17.

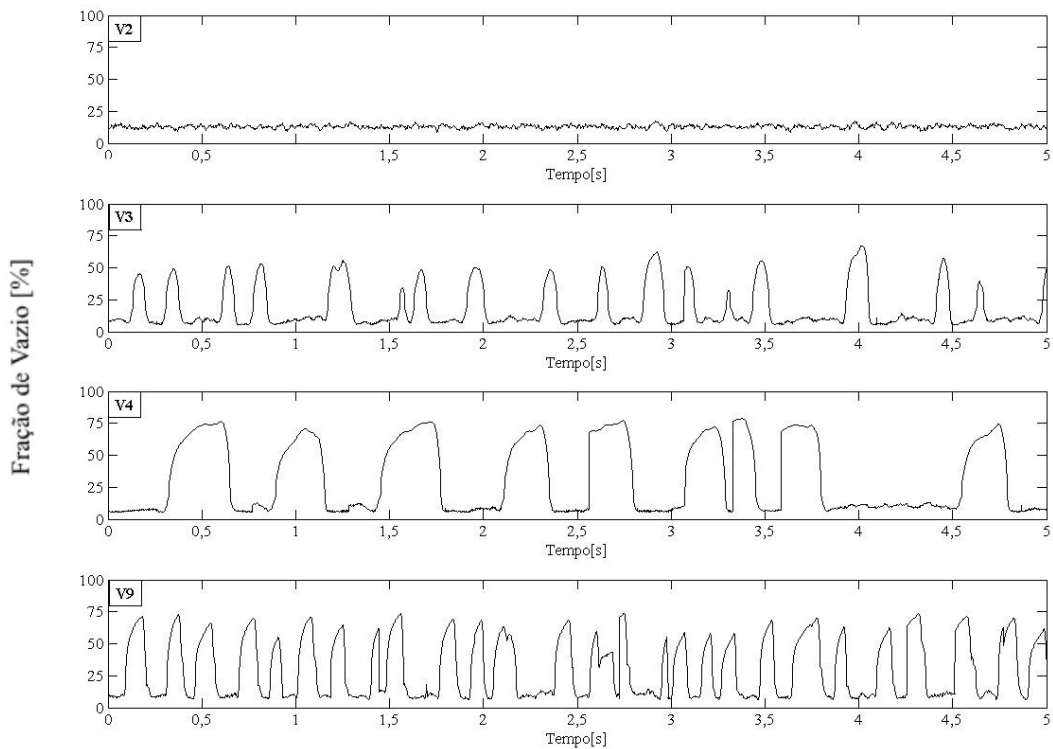


Figura 4-17: Series temporais de medições em escoamentos verticais.

4.2.2.1 *Discussão*

Para os escoamentos verticais o mesmo procedimento foi adotado, e notaram-se diferenças menores na comparação das frações de vazio medidas entre os sensores, não ultrapassando os 10%. Quanto a velocidade das bolhas medidas, as médias também se aproximam tendo um resultado satisfatório, onde a diferença entre as medidas é maior nos pontos V3 e V6 onde existem bolhas dispersas nos pistões de líquido tornando mais complexo a detecção das golfadas.

5 CONCLUSÃO

O foco deste trabalho foi o desenvolvimento de um sensor capacitivo com uma calibração única independente do padrão de escoamento que está ocorrendo, tornando o sistema inteligente, e com isso mostrar em tempo real parâmetros como a fração de vazio e velocidade das bolhas. Para tal foi utilizado um sistema desenvolvido anteriormente por Libert (2013), o qual foi expandido para possibilitar a medida em dois canais simultaneamente e realizadas alterações no *firmware* para calibração de acordo com as curvas de respostas levantadas através de simulações. Também foram feitas alterações para medida de velocidades de bolhas com base no atraso entre os dois canais.

Para a validação dos resultados foram realizadas comparações entre medições e simulações, nos casos estáticos. Para validação em escoamentos verticais e horizontais foram feitas medidas com o sensor desenvolvido simultaneamente com o sensor *wire-mesh* para uma comparação posterior. Tanto para escoamentos horizontais como para escoamentos verticais os resultados obtidos foram satisfatórios em ambos os parâmetros analisados, fração de vazio média e velocidade média das bolhas.

A principal contribuição deste trabalho é disponibilizar um sistema de fácil manuseio para monitoramento em tempo real de escoamentos bifásicos principalmente no regime intermitente. Para trabalhos futuros propõem-se a implementação de novas técnicas de detecção de bolhas com o intuito de melhorar a acurácia nas medidas com grande quantidade de gás no pistão de líquido. Para que isso seja possível é necessário o uso de um microcontrolador com maior capacidade de processamento e memória interna.

6 REFERÊNCIAS

ALVES, Rafael F. **Estudo Experimental da Influência da Pressão no Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Dutos Horizontais**. 2013. 192 f. UTFPR, 2013.

BECK, M. S. Correlation in instruments: cross correlation flowmeters. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 14, n. 1, p. 7–19, 1981.

BECK, Maurice S. **Process tomography: principles, techniques and applications**. Butterworth-Heinemann, 1995.

BENDIKSEN, Kjell H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984..

DEVIA, F.; FOSSA, M. Design and optimisation of impedance probes for void fraction measurements. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 14, n. 4-5, p. 139–149, 2003.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 14, n. 4, p. 337–347, 1975.

DYAKOWSKI, T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 343–353, 1996..

FALCONE, Gioia; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications - Developments in Petroleum Science**. Elsevier Science, 2009.

FOSSA, M. Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, n. 2, p. 103–109, 1998.

GREGORY, G. A.; MATTAR, L. An In-Situ Volume Fraction Sensor For Two-Phase Flows of Non-Electrolytes. **Journal of Canadian Petroleum Technology** 1973. Petroleum Society of Canada.

GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. **AIChE Journal**, v. 15, n. 6, p. 933–935, 1969.

HALE, C. P. **Slug formation, growth and decay in gas-liquid flows**. 2000. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 2000.

HAUS, H. A.; MELCHER, J. R. **Electromagnetic fields and energy**. Prentice Hall, 1989.

HERVIEU, ERIC; JOUET, EMMANUEL; DESBAT, LAURENT. Development and Validation of an X-ray Tomograph for Two-Phase Flow. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 972, n. 1, p. 87–94, 2002.

HUANG, S. M. et al. Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 21, n. 3, p. 242–250, 1988.

KUMAR, Sailesh B.; MOSLEMIAN, Davood; DUDUKOVIĆ, Milorad P. A γ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 6, n. 1, p. 61–73, 1995.

LIBERT, Nikolas. **Sistema de medição capacitivo para determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos**. 2013. 2013.

LINK, Walter. **Tópicos avançados da metrologia mecânica: confiabilidade metrológica e suas aplicações na metrologia**. 2000.

MANTLE, M. D.; SEDERMAN, A. J. Dynamic MRI in chemical process and reaction engineering. **Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy**, v. 43, p. 3–60, 2003.

MARCO, Dipl. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. 2008.

MATTAR, L.; GREGORY, G. A. Air oil slug flow in an upward-inclined pipe – I: Slug velocity, holdup and pressure gradient. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 13, n. 1, 1974.

PARKER, D. J.; MCNEIL, P. A. Positron emission tomography for process applications. **Measurement Science and Technology**, v. 7, p. 287 – 296, 1996.

PRASSER, H. M. Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD validation. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, n. 3, p. 744–770, 2008.

PRASSER, H. M.; BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, p. 111–119, 1998.

ROSA, E. S.; FLORA, B. F.; SOUZA, M. a S. F. Design and performance prediction of an impedance void meter applied to the petroleum industry. **Measurement Science and Technology**, v. 23, n. 5, p. 055304, 2012.

SANTOS, Eduardo N. **Técnicas para Extração de Parâmetros de Escoamentos Bifásicos em Regime Intermitente Utilizando o Sensor Wire-Mesh**. 2011. 2011.

SHI, Yanyan; DONG, Feng; TAN, Chao. Conductance probe for the measurement of liquid volume fraction and axial velocity in gas-liquid two phase flow. **2009 9th**

International Conference on Electronic Measurement & Instruments, p. 2–826–2–831, 2009. Ieee.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. 1 Texas: Richardson, TX : Society of Petroleum Engineers, 2006.

SHU, Ming T.; WEINBERGER, Charles B.; LEE, Young H. A simple capacitance sensor for void fraction measurement in two-phase flow. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 21, n. 2, p. 175–181, 1982.

SIHVOLA, Ari H. **Electromagnetic mixing formulas and applications**. Iet, 1999.

DA SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase flow**. 2008. 170 f. Technical University of Dresden, Alemanha, 2008.

STRIZZOLO, C. N.; CONVERTI, J. Capacitance sensors for measurement of phase volume fraction in two-phase pipelines. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 42, n. 3, p. 726–729, 1993.

TAITEL, Yehuda; BORNEA, Dvora; 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.

TODREAS, Neil E.; KAZIMI, Mujid S. **Nuclear systems II: elements of thermal hydraulic design**. Taylor & Francis, 1990.

UJANG, P. M. **Studies of slug initiation and development in two-phase gas-liquid pipeline flow**. 2003. Imperial College London, 2003.

VICENCIO, Fernando Enrique Castillo. **Caracterização Experimental Do Escoamento Intermitente Líquido-Gás Em Tubulações Horizontais**. 2013. 2013.

WALLIS, GB. **One-dimensional two-phase flow**. , v. 2, 1969. New York: McGraw Hill.

XIE, C. G. et al. Electrical Tomography Techniques for Process Engineering Applications. **The Chemical Engineering Journal**, v. 56, p. 127–133, 1995.

YANG, M. et al. Real-time ultrasound process tomography for two-phase flow imaging using a reduced number of transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 46, p. 492–501, 1999.

ZARUBA, A. et al. Measurement of bubble velocity profiles and turbulent diffusion coefficients of the gaseous phase in rectangular bubble column using image processing. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 29, n. 7, p. 851–860, 2005.