



Leandro Henschel Danés

Medição de Parâmetros de Escoamento bifásico Gás-líquido utilizando Sensores de Impedância

95/2012

CAMPINAS

2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

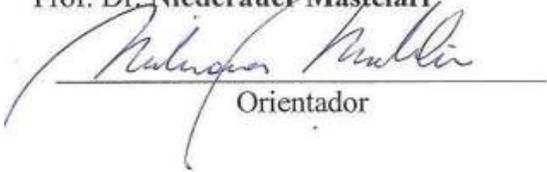
Leandro Henschel Danés

Medição de Parâmetros de Escoamento bifásico Gás-líquido utilizando Sensores de Impedância

Orientador: Prof. Dr. Niederauer Mastelari

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual de Campinas para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos
e Projeto Mecânico

Este exemplar corresponde à Versão final
da dissertação defendida pelo aluno
Leandro Henschel Danés e orientada pelo
Prof. Dr. **Niederauer Mastelari**



Orientador

Campinas, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

D199m	<p>Danés, Leandro Henschel, 1986-</p> <p>Medição de parâmetros de escoamento bifásico gás - líquido utilizando sensores de impedância / Leandro Henschel Danés. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Niederauer Mastelari.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Escoamento bifásico. 2. Medidores de fluxo. 3. Aquisição de dados. 4. Modelagem de processos. I. Mastelari Niederauer, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Parameters measurement from a two-phase gas-liquid slug flow using impedance sensors

Palavras-chave em Inglês: Two-phase flow, Flow measurements, Data acquisition, Process modeling,

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Luiz Felipe Mendes de Moura, Marco José da Silva

Data da defesa: 04-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Medição de parâmetros de Escoamento Gás-líquido
utilizando Sensores de Impedância**

Autor: Leandro Henschel Danés

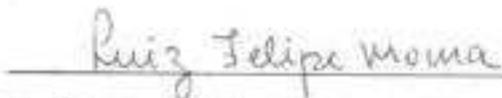
Orientador: Prof. Dr. Niederauer Mastelari

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta tese:



Prof. Dr. Niederauer Mastelari, Presidente

DPM/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura

DETF/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Marco José da Silva

CPGEI/Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campinas, 4 de julho de 2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Miguel Rodrigo Danés Ortiz e Eliana Henschel Danés , os meus pais que sempre me apoiaram e sempre acreditaram em mim. Agradeço a eles por todo o apoio que me deram em toda a minha vida e por terem financiado a maior parte da minha formação, o que possibilitou que eu chegasse ao patamar que estou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a PETROBRAS pelo apoio ao projeto desta tese, agradeço também ao meu orientador prof. Dr. Niederauer Mastelari por acreditar neste projeto e auxiliar o desenvolvimento do mesmo sempre que necessário.

“O que não te mata te fortalece”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

DANÉS L.H. Medição de parâmetros de escoamento bifásico gás-líquido utilizando sensores de impedância . Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2012. 235 p. Dissertação (Mestrado).

Uma mistura de gás e líquido escoando em um tubo em diferentes faixas de vazões se comporta como diferentes padrões de escoamento, em que interações cinemáticas e dinâmicas específicas de cada padrão, ocorrem entre gás e líquido. A estimação de dados sobre a velocidade média de deslocamento e a vazão de ambas as fases depende da aplicação de estratégias estatísticas e de modelos de escoamento para calcular estas informações. Neste trabalho, um sensor de impedância que, se devidamente calibrado, possui sinal proporcional ao nível de líquido na seção transversal do duto, foi utilizado para a obtenção destes dados sendo desenvolvidas técnicas e estratégias para alcançar este objetivo. O estudo foi desenvolvido no regime de escoamento horizontal água-ar nos regimes de bolhas alongadas, estratificado intermitente.

Foram utilizadas técnicas para a obtenção da velocidade média de deslocamento do escoamento bifásico a partir de um arranjo de dois sensores de impedância em série. Foi utilizada a técnica da correlação cruzada e foram elaboradas e apresentadas como opção, uma técnica baseada no cálculo numérico e outra na covariância entre os sinais como alternativa. As técnicas foram testadas e comparadas.

Foram utilizados modelos de escoamento e levantadas hipóteses para a estimativa das vazões de gás e líquido. Foram realizadas estimativas para o padrão de bolhas alongadas, estratificado e intermitente. Para o regime intermitente, considerado foco do estudo, foram obtidas respectivamente para gás e líquido, margens de erro de 24.4% e 28% considerando um perfil de escoamento constante e margens de 12.5% e 20.5% para um perfil laminar.

Palavras-chave

Escoamento bifásico, Medidores de fluxo, Aquisição de dados, Modelagem de processos

ABSTRACT

DANÉS L.H Parameters measurement from a two-phase gas-liquid slug flow using impedance sensors . Campinas: Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2012. 235

p. Dissertation (Master's Degree).

A gas-liquid mixture flowing in a tube at different flow rates , behaves as different flow patterns, which cinematic and dynamic interactions occurs between the gas and liquid phases. The estimation of average displacement rate data and flow data for both phases depends of the application of statistical strategies and flow models for calculating the information. In this work, a impedance sensor which, is correctly calibrated, has a proportional out to the liquid level of the tube cross section, was used for obtaining these data with techniques and strategies developed to achieve this goal. The study was developed for horizontal air-water flow at the bubbles, stratified and slug patterns.

It was used techniques for obtaining the average displacement speed of the flow between the two sensors. The cross-correlation technique was used and a numeric calculus based technique and a covariance based technique were elaborated and presented as an option. The techniques were tested and compared.

Flow-models were used and hypothesis were take in order to make estimations of gas and liquid flow magnitude. Estimatives were done for the elongated bubbles , stratified and slug patterns. For the slug pattern ,focus of the work, it was obtained respectively for the gas and the liquid phase, error margins of 24,4% and 28% considering a constant flow profile and 12.5% and 20.5% margins considering a laminar flow profile.

Keywords:

Two-phase flow, Flow Measurement, Data acquisition, Process Modeling

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	6
1.2. Objetivos	7
1.3. Organização do trabalho	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. Escoamento bifásico	10
2.2. Fração de vazio e Holdup.....	17
2.3. Técnicas de medição de parâmetros para estimativa de vazão.....	20
2.3.1. Medição de escoamentos bifásicos.....	23
2.3.2. Técnicas para a medição das frações dos componentes bifásicos	25
2.3.3. Medições das velocidades dos componentes bifásicos.....	29
2.4. Modelos de Escoamento	33
2.4.1. Modelo Homogêneo	35
2.4.2. Modelo separado.....	35
2.4.3. Modelo de Taitel-barnea.....	37
2.4.4. Modelo de Duckler –Hubbard	41
3. Equipamentos EXPERIMENTAIS.....	44
3.1. O Transdutor	44

3.2. A Calibração Estática do Transdutor	47
3.3. A placa condicionadora de sinais analógica	48
3.4. Arranjo de sensores	52
3.5. Aparato experimental	55
3.6. Tratamento de sinal	57
3.6.1. Filtragem.....	61
3.7. Sistema supervisorio e ensaios computacionais	63
4. OBTENÇÃO DE PARÂMETROS	67
4.1. Obtenção de velocidades.....	67
4.1.1. Gatilhos.....	71
4.1.2. Rastreadores Numéricos	77
4.1.3. Correlação Cruzada	83
4.1.4. Covariância	86
4.2. Estratégias para Obtenção de Parâmetros no Regime de Intermitente.....	88
4.2.1. Holdup e Fração de Vazio	88
4.2.2. Velocidade do gás na bolha V_{GB}	89
4.2.3. Velocidade da célula unitária V_B	91
4.2.4. Velocidade do gás no pistão V_{GS}	91
4.2.5. Velocidade do líquido no pistão V_{LS}	92
4.2.6. Velocidade do filme de líquido V_{LF}	93
4.2.7. Comprimento da Bolha L_B	94
4.2.8. Comprimento do pistão L_S	94

4.3. Regime de bolhas alongadas	95
4.3.1. Velocidade da fase gasosa V_{GS}	95
4.3.2. Velocidade da fase líquida V_{LS}	95
4.4. Regime estratificado	96
4.4.1. Velocidade da fase líquida V_L	96
5. METODOLOGIA E Resultados	97
5.1. Calibração Estática.....	98
5.2. Calibração Dinâmica.....	106
5.2.1. Normalização.....	106
5.2.2. Estimativa dinâmica de Holdup.....	114
5.3. Experimentos propostos de aquisição de velocidade e vazão em tempo real	
119	
5.3.1. Testes preliminares	119
5.3.2. Regime de bolhas alongadas.....	128
5.3.3. Desempenho dos algoritmos de velocidade.....	130
5.3.4. Regime Estratificado	135
5.3.5. Perfil de velocidade	137
5.3.6. Regime de Intermitente.....	140
6. CONCLUSÕES.....	148
REFERÊNCIAS.....	151
ANEXO A	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Linhas de pesquisa de escoamento multifásico em companhias de desenvolvimento de tecnologia	24
Tabela 2: Dados de ensaio de subida a 22 graus para calibração estática	101
Tabela 3: Dados de ensaio de descida a temperatura de 22 graus da calibração estática ..	103
Tabela 4: Vazões testadas para a estimação de pico	110
Tabela 5: Vazões utilizadas para ensaios de estudo para o Holdup dinâmico.....	117
Tabela 6: Escoamentos escolhidos para os testes preliminares dos algoritmos de velocidade	120
Tabela 7: Tabela de escoamentos na região do padrão estratificado	137
Tabela 8: Estatísticas de comprimentos para o regime intermitente	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Regimes de escoamento no padrão horizontal [FONTE: Fonseca Jr 2009]	12
Figura 2: Mapa de padrões de escoamento Verticais [FONTE: Mandhane, 1974]	15
Figura 3: Mapa de padrões de escoamento Horizontais [Dukler-Hubard 1975]	15
Figura 4: Mapa de escoamento para tubulação horizontal com seis milímetros de diâmetro	16
Figura 5: Mapa de padrões de escoamento Horizontais [FONTE: Baker, 1954]	17
Figura 6: Correlações para estimar a fração de vazio [WOLDESEMAYAT ET. AL. 2006]	20
Figura 7: Pesquisa sobre utilização de valores em processos (FONTE:Revista Control Engineering, 2002)	21
Figura 8: perfil de escoamento monofásico em um duto	22
Figura 9: Tomografia de raios gama para uma mistura de ar-polipropileno [Hammer Johansenn et al. ,2006]	28
Figura 10: Corte transversal da bolha e do filme	37
Figura 11: Distribuição de velocidades no escoamento intermitente (Taitel-Barnea,1990) .	39
Figura 12: Distribuição de velocidades no escoamento intermitente (Dukler-Hubbard,1975)	41
Figura 13: Configuração do sensor de haste na seção do tubo	45
Figura 14: Circuito equivalente á impedância do conjunto bifásico	46
Figura 15: Instalação da ponte RLC no transdutor	47
Figura 16: Segmento de duto utilizado para a calibração estática	48
Figura 17: Montagem de carcaça e placa eletrônica	49
Figura 18: Circuito conversor de admitância em tensão	50
Figura 19: Diagrama em blocos das funções que constituem o sensor	51
Figura 20: Arranjo formado por dois sensores separados por um distância d:O dispositivo A representa o sensor da montante e o dispositivo B representa o sensor da jusante	53
Figura 21: Exemplo de sinais aquisitados no escoamento para o teste	54
Figura 22: Desenho esquemático do equipamento utilizado nos experimentos	56

Figura 23. Espectro de densidade de potência para escoamentos bifásicos com vazão equivalente de gás e líquido a) 8,5 l/m b) 14 l/m c) 19,5 l/m d) 25 l/m.....	61
Figura 24. Dispersão de um sinal em relação à frequência de corte do filtro.....	63
Figura 25: Exemplo de diagrama de blocos	64
Figura 26: Região de escoamentos estudados	70
Figura 27: Formato de uma bolha deformada.....	72
Figura 28: Dependência funcional de um escoamento intermitente ar-água [FONTE: Duarte 2007).....	73
Figura 29: Fluxograma representando o processo de medição automática por gatilho	75
Figura 30: Algoritmo referente ao rastreador de atraso entre os sinais	80
Figura 31: Paradoxo do rastreador: O valor de B é menor que A e a A' demonstra que A decresce em direção a B, mas B na verdade esta atrasado, e um pico entre ambos os sinais causa o paradoxo.	82
Figura 32: Fluxograma demonstrando a o algoritmo da correlação cruzada	85
Figura 33: Fluxograma demonstrando a o algoritmo da covariância	87
Figura 34: instantes registrados pelo sistema de gatilhamento	90
Figura 35: Medições executadas em ensaio de subida, para uma temperatura de 22 C° ...	102
Figura 36: Medições aferidas em ensaio de descida, para uma temperatura de 22 C°	103
Figura 37: Medições aferidas em ensaio de subida, para uma temperatura de 25 C°	104
Figura 38: medições aferidas em ensaio de descida, para uma temperatura de 25 C°	105
Figura 39: Pontos para os quais a normalização foi realizada.....	107
Figura 40:. Comparação dos ranges estimados nos ensaios com o valor médio de range já medido	111
Figura 41: Comparação dos ranges estimados pela estimativa da tensão de cheio nos ensaios com o valor médio de tensão de cheio já medido.....	112
Figura 42: Comparação dos ranges estimados utilizando um sensor de referência nos ensaios com o valor médio de tensão de cheio já medido.....	114
Figura 43: Comparação do Holdup mensurado dinamicamente com a correlação de Aggour-Sims.....	118
Figura 44: Relação entre a medição do sensor de impedância e a correlação de Aggour-Sims	119

Figura 45: Estimação de velocidade no regime intermitente no tempo para velocidades constantes correspondentes á: a) 0.4 m/s b) 1,0 m/s c)1,6 m/s	122
Figura 46: Dispersão das estimativas no regime intermitente de velocidade para a) Método do rastreador c) correlação cruzada c) covariância.....	123
Figura 47: Estimação de velocidade no regime estratificado no tempo para velocidades constantes correspondentes á: a) 0.4 m/s b) 1,0 m/s c)1,6 m/s	125
Figura 48: Dispersão das estimativas no regime intermitente de velocidade para a) Método do rastreador c) correlação cruzada c) covariância.....	126
Figura 49: Estimação de velocidade no regime estratificado no tempo para velocidades constantes correspondentes á: a) 0.4 m/s b) 1,0 m/s c)1,6 m/s	127
Figura 50: Dispersão das estimativas no regime intermitente de velocidade para a) Método do rastreador c) correlação cruzada c) covariância.....	128
Figura 51: escoamentos utilizados para representar um escoamento na região de bolhas alongadas	130
Figura 52: Estimação do atraso para um escoamento no regime bolhas alongadas onde $Q_l=30,40$ l/m e $Q_g=24,32$ A) Rastreador B) Correlação cruzada C) Covariância	131
Figura 53: Estimação de vazão no padrão bolhas alongadas para a vazão de líquido para um perfil de velocidade Constante	133
Figura 54: Estimação de vazão no padrão bolhas alongadas para a vazão de gás para um perfil de velocidade Constante.....	134
Figura 55: Estimação do atraso estratificado para um escoamento estratificado onde $J_l=0.1$ e $J_g= 0.5$ mediante A) Rastreador B) Correlação Cruzada C) Covariância.....	136
Figura 56: Componentes de velocidade ao longo do duto a)Perfil de velocidade monofásico Constante b)Perfil de velocidade laminar	138
Figura 57: Estimação de vazão no regime estratificado para a vazão líquido A) Perfil de velocidade constante B) Perfil laminar	140
Figura 58: Diagrama de blocos do algoritmo para determinação das vazões da fase líquida e gasosa em um escoamento em padrão intermitente	142
Figura 59: escoamentos utilizados para experimentos no regime intermitente.....	145
Figura 60: Estimação de vazão no padrão intermitente para a vazão gasosa para a)Perfil de velocidade Constante b)Perfil de velocidade laminar	146

Figura 61: Estimação de vazão no padrão intermitente para a vazão líquida para a)Perfil de velocidade Constante b)Perfil de velocidade laminar 147

LISTA DE NOMENCLATURAS

Parâmetros do Escoamento Bifásico

x	Título	Ad.
S	Taxa de deslizamento	Ad.
α	Fração de Vazio da seção de área	Ad.
H	Holdup da seção de área	Ad.
R_s	Razão da quantidade de líquido no pistão	Ad.
R_a	Razão entre a vazão volumétrica de ar e vazão volumétrica total	Ad.
R_{BF}	Relação entre líquido na bolha e no filme	Ad.
C	Coefficiente de derramamento	Ad.
R_{fe}	Holdup do pistão no momento anterior ao derramamento	Ad.
α_{cordal}	Fração de Vazio cordal	Ad.
H_h	Holdup de nível	Ad.
α_{Vol}	Fração de Vazio volumétrica	Ad.
H_{Vol}	Holdup volumétrico	Ad.
l_g	Comprimento da distância da fase gasosa	[m]
l_l	Comprimento da distância da fase líquidagasosa	[m]
L_f	Comprimento do filme	[m]

L_m	Comprimento da seção de mistura	[m]
L_s	Comprimento do pistão	[m]
L_b	Comprimento da bolha	[m]
L_u	Comprimento da célula unitária	[m]
h	Nível de líquido na seção de líquido	[m]
S_l	Perímetro molhado	[m]
S_g	Perímetro seco	[m]
S_i	Largura da superfície de líquido	[m]
\dot{m}_g	Vazão mássica da fase gasosa	[kg / s]
\dot{m}_l	Vazão mássica da fase líquida	[kg / s]
Q_g	Vazão volumétrica da fase gasosa	[l / m]
Q_l	Vazão volumétrica mássica da fase líquida	[l / m]
θ	Ângulo molhado	[rad]
A_g	Área seca	[m ²]
A_l	Área molhada	[m ²]

Variáveis de eletrônica e sinais

R_m	Resistência do conjunto bifásico	[Ohm]
-------	----------------------------------	-------

C_m	Capacitância do conjunto bifásico	[F]
C_p	Capacitância de polarização próxima ao eletrodo	[F]
C_d	Capacitância de do fluido dielétrico	[F]
f	Frequência de excitação	[Hertz]
Z	Impedância do conjunto bifásico	[1/S]
Z_{in}	Impedância de entrada do instrumento	[1/S]
R_c	Resistência do potenciometro	[Ohm]
U_i	Tensão de excitação	[V]
U_o	Tensão de saída	[V]
$U(t)$	Tensão de saída instântanea	[V]
U_c	Tensão do duto preenchido apenas por líquido	[V]
U_v	Tensão do duto preenchido apenas por gás	[V]
$U(t)$	Tensão de saída instântanea	[V]
\bar{U}	Média da tensão	[V]
\dot{U}	Pico da tensão	[V]

Propriedades dos fluídos

ρ_g	Densidade do gás	[kg / m 3]
ρ_l	Densidade do líquido	[kg / m 3]

ν_g	Viscosidade cinemática do gás	[m ² / s]
ν_l	Viscosidade cinemática do líquido	[m ² / s]
μ_g	Viscosidade absoluta do gás	[N s/ m ²]
μ_l	Viscosidade absoluta do líquido	[N s / m ²]
X_{tt}	Correlação de Agours-Sims	Ad.

Velocidades

J_l	Velocidade superficial da fase líquida	[m/s]
J_g	Velocidade superficial da fase gasosa	[m/s]
V_g	Velocidade da fase gasosa	[m/s]
V_l	Velocidade da fase líquida	[m/s]
U_d	Velocidade de deslocamento da bolha	[m/s]
V_{GS}	Velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido	[m/s]
V_B	Velocidade da célula unitária	[m/s]
V_{LS}	Velocidade do líquido no pistão	[m/s]
V_{GB}	Velocidade do gás na bolha	[m/s]
V_{LF}	Velocidade do líquido no filme	[m/s]

V_t	Velocidade da célula unitária	[m/s]
V_s	Velocidade relativa da bolha em relação a célula unitária	[m/s]
V_f	Velocidade do líquido no filme	[m/s]
V_{ponta}	Velocidade da ponta da bolha obtida por gatilhamento	[m/s]
V_{Cauda}	Velocidade da cauda da bolha obtida por gatilhamento	[m/s]
V_{RA}	Velocidade obtida pela técnica do rastreador	[m/s]
V_{Corr}	Velocidade obtida pela técnica da correlação cruzada	[m/s]
V_{Cov}	Velocidade obtida pela técnica da covariância	[m/s]

Diversos

D	Diâmetro do duto	[m]
L	Distância entre o sensor da montante e sensor da jusante	[m]
R	Raio do duto	[m]
A	Área do duto	[m ²]
t	tempo	[s]
R_b	Raio volumétrico	Ad.
τ	Intervalo de tempo	[s]
τ_o	Intervalo de tempo na iteração anterior	[s]

1. INTRODUÇÃO

Um escoamento bifásico gás-líquido em um tubo possui um comportamento irregular em que a distribuição e a interação dinâmica e cinemática das fases variam de acordo com a faixa de vazão de gás e de líquido que o escoamento se encontra. Tanto o escoamento como os fluidos presentes no mesmo possuem comportamento variado e dependente de muitos fatores tais como: pressão, temperatura, densidade e viscosidade. Frequentemente essas variáveis são aproximadas para valores ideais ou valores médios. A partir destas aproximações estabelecem-se modelos a fim de obter algumas estimativas de maneira simplificada.

Os primeiros modelos para previsão de comportamento de escoamentos bifásicos surgiram entre 1940-1950. Segundo Falcone et al. (2009), Lockhart e Martinelli (1949) desenvolveram um modelo para queda de pressão friccional, que ocorre devido à dissipação de energia causada pela tensão de cisalhamento entre os fluidos e as paredes do tubo. Os autores introduziram o chamado parâmetro de Lockhart-Martinelli, que a partir dos fluxos e densidades de gás e de líquido, estabelece uma relação entre a queda de pressão de ambas as fases. Este parâmetro é utilizado até os dias atuais.

Posteriormente nos anos 50 e 60, os avanços na tecnologia aeroespacial e nuclear demandaram mais estudos na área. Uma vez que no escoamento gás-líquido ambas as fases são fluidos e apresentam grandes diferenças entre suas densidades e características dinâmicas, o posicionamento de suas fases em um canal fechado tal como um duto varia muito em relação à magnitude das vazões de cada fase. Em 1954, Baker propôs um mapa de escoamento para regimes horizontais adiabáticos a fim de introduzir avanços nesta área identificando as fronteiras dos denominados regimes de escoamento, padrões em que as fases se posicionariam de maneira semelhante.

A década de 70 foi marcada pelo desenvolvimento de modelos geométricos para estes regimes de escoamento visando quantificar os variáveis presentes neste escoamento a fim de entendê-los melhor. Durante os anos 80 a inclinação da tubulação passou a ser foco de estudos culminando em modelos mais abrangentes como o de Taitel e Barnea (1990). O desenvolvimento

destes modelos auxiliou não só a compreensão do comportamento de fluidos bifásicos como também a obtenção de parâmetros do escoamento de maneira indireta, a partir de cálculos feitos a partir das equações do modelo proposto.

A obtenção de parâmetros pode ser definida como o trabalho de refinar os indicadores de um processo a fim de detalhar, caracterizar e mensurar elementos quantitativos deste processo, estes índices são denominados parâmetros. Estes parâmetros são as variáveis, as constantes e os dados que atribuem valores para a compreensão quantitativa e qualitativa do fenômeno. No sensoriamento de escoamentos bifásicos, a obtenção de parâmetros estende-se sobre a aquisição e tratamento dos dados obtidos pelo sensor proposto a fim de obter diversas variáveis e padrões relativos ao comportamento do escoamento e das fases. Para tanto é necessário que o sinal obtido pelo sensor seja devidamente adquirido e tratado por um algoritmo computacional, a fim de que este possa fornecer variáveis físicas correspondentes ao mundo real.

Para obter variáveis sobre o escoamento é necessário elaborar um sistema de sensoriamento visando obter os valores mais relevantes ao processo. Diversos parâmetros tais como a temperatura, viscosidade e densidade dos fluidos e pressão em seções do duto podem ser obtidos diretamente e através de sensores projetados especificamente para este fim. Entretanto outros valores só podem ser obtidos por estimativa a partir dos parâmetros medidos diretamente e posteriormente estimando estes valores através de modelagens de escoamento.

Estas modelagens são feitas através do equacionamento do escoamento considerando princípios da mecânica dos fluidos e conservação de massa e energia. A partir destes modelos é possível achar relações entre as variáveis inerentes ao processo. Estas modelagens também se restringem para condições em que os fluidos se comportam de maneira preditiva, distribuindo-se em regiões conhecidas do duto e com as fases interagindo dinâmico e cinematicamente de maneira conhecida. Dependendo da magnitude de vazão de gás ou líquido, bem como das propriedades de ambos os fluidos, as fases irão interagir de modo diferente dentro do duto durante o escoamento. A definição de regimes de escoamento possibilita aproximar modelagens fluidodinâmicas em determinadas faixas de escoamento e assim compreendê-las melhor. Em seus estudos, Shoham (1982) definiu inicialmente quatro padrões de escoamento bifásico horizontal com base em suas observações, que posteriormente foram referência para muitos

trabalhos na área. Em seu trabalho foram realizados diversos experimentos em diferentes ângulos de inclinação separando as configurações vertical e horizontal. Para a configuração horizontal, o autor mapeou inicialmente quatro padrões principais:

- Bolhas dispersas
- Intermitente
- Anular
- Estratificado

Modelagens tais como a de Taitel e Barnea (1990) e Dukler e Hubbard (1973) abordam escoamentos horizontais em um padrão muito freqüente na indústria petrolífera chamado padrão intermitente. O padrão é também chamado de regime pistonado e se destaca principalmente devido suas características assimétrica e periódica, possuindo unidades denominadas células unitárias onde a disposição das fases separa-se em bolha, um pistão e um filme de líquido. Através destas modelagens é possível estabelecer a relação entre alguns parâmetros do escoamento.

A obtenção de parâmetros no escoamento bifásico é uma necessidade da indústria, sendo interessante o desenvolvimento de tecnologias a fim de obter medidas e estimativas parâmetros de maneira cada vez mais precisa e econômica.

Escoamentos bifásicos podem ser observados em diversos processos da produção tal como na refrigeração de uma máquina, ou no fluxo dos próprios materiais e produtos de uma fábrica. A aplicação contínua deste tipo de escoamento demanda cada vez mais estudos para compreender o comportamento dos mesmos. Entre as aplicações presentes de fluidos bifásicos na indústria, Shoham (2009) destacou os seguintes setores industriais:

- Indústria do petróleo: Escoamentos bifásicos ocorrem na produção e transporte de óleo e gás, em dutos horizontais, inclinados e verticais. Neste processo são utilizados separadores, capazes de subdividir o fluxo bifásico em dois fluxos monofásicos, de modo que se divida a matéria prima em subprodutos. Uma vez

que o fluido monofásico possui um comportamento com perfil de velocidade simétrico, é possível fazer medições mais acuradas nestas etapas. Ainda assim, existem linhas de produção submetidas a escoamentos em tubulações longas até ter acesso aos separadores, havendo muitas vezes a necessidade de estudar o comportamento dos fluidos neste segmento.

- Indústria de nuclear: Em um reator nuclear o conhecimento do comportamento dos escoamentos bifásicos é essencial para a segurança do processo. No reator nuclear a evaporação perto do núcleo pode significar uma falha no sistema de arrefecimento e ser tratada como uma emergência. Este risco demanda que ocorra total controle e conhecimento dos parâmetros da transferência de calor nos reatores. Uma vez que os chamados reatores nucleares de água leve (LWR) lidam com escoamentos bifásicos são necessárias técnicas a fim de prever o comportamento da transferência de calor também para estes escoamentos. São exigidos extensos estudos experimentais para prever o comportamento da refrigeração e não comprometer a segurança do processo.
- Indústria química: Na indústria química, escoamentos bifásicos estão presentes em diversos processos. O setor utiliza equipamentos como reatores, evaporadores, condensadores, caldeiras, trocadores de calor e destiladores, onde ocorre este tipo de escoamento. Sundareasan (2000) diz que os escoamentos bifásicos são um ponto central para indústria química, tendo um notável impacto econômico. Segundo o autor o contato entre as fases é crucial em reatores para promover uma interface para o transporte de energia em reatores químicos.
- Usinas geotérmicas: Nesta área escoamentos bifásicos verticais ocorrem nos “risers” da usina e previsões acuradas de pressão, temperatura e comportamento das fases são desejadas para a otimização do seu projeto.

Um sensor que pode se apresentar como uma solução de baixo custo e pouco para a medida de parâmetros no escoamento é o sensor por impedância elétrica. Sensores de impedância baseiam-se no princípio que ambas as fases, gás e líquido possuem propriedades elétricas

distintas e fornecem um sinal representando a impedância elétrica do conjunto gás-líquido da qual pode-se realizar estimativas da proporção de cada uma das fases no duto. Uma vez que as propriedades elétricas se comportam em frações de segundo este sensor também apresenta a vantagem de ter uma resposta na ordem de microssegundos possível adquirir a uma alta amostragem. Além de possuírem relativa simplicidade acarretando em baixos custos no processo, estes sensores podem ser intrusivos, em forma de uma haste transversal a haste do tubo, por exemplo, ou não intrusivos, como em forma de anéis externos ao duto.

Os sensores de impedância também podem ser utilizados com misturas de dois tipos diferentes de líquido. Uma vez que diferentes líquidos possuem diferentes propriedades elétricas é possível estimar a proporção de cada líquido na mistura através de sensores de impedância caso se conheça previamente a admitância de cada uma das substâncias. Na mistura entre óleo e água, muito comum na indústria petrolífera, a proporção de água é uma variável padrão denominada “Water-cut”.

No caso de um escoamento gás-líquido um dos principais parâmetros para o estudo do padrão intermitente é a fração de vazio que representa a proporção de gás no escoamento bifásico. O complemento da fração de vazio é denominado Holdup e representa a quantidade de líquido no escoamento bifásico.

Com a aquisição de amostras de fração de vazio em alta velocidade e a aplicação de técnicas matemáticas, algoritmos e modelos de escoamento, é possível estimar outras variáveis. No caso da utilização de sensores de impedância em seqüência ao longo de um tubo é possível fazer estimativa de componentes médios das velocidades entre as fases utilizando técnicas consagradas tais como a correlação cruzada. Para executar estas funções é necessário da utilização do sensor de impedância em conjunto com um micro-controlador ou sistema supervisório, os quais podem representar as modelagens de escoamento bifásico na configuração de algoritmos.

Apesar de possuir a capacidade computacional limitada em relação à um sistema supervisório, microcontroladores possuem vantagens como o custo reduzido e a acessibilidade de instalação em locais reduzidos. Portanto, é pertinente que algoritmos desenvolvidos para a

parametrização de dados de um sensor de impedância aplicado no escoamento bifásico, sejam elaborados a fim de possuírem portabilidade para firmware, levando em conta as limitações de um microcontrolador.

1.1. Motivação

O grande número de aplicações contendo escoamentos bifásicos demanda o desenvolvimento de tecnologias mais precisas e de novas opções para estas aplicações. Os setores que trabalham com escoamentos bifásicos movimentam bilhões de dólares ao ano necessitando o aprimoramento constante dos equipamentos utilizados.

O desenvolvimento de sensores de impedância com capacidade local de processamento e capacidade de comunicação possibilita que os sensores a partir da medida de impedância do escoamento identifiquem cada bolha e cada pistão em um escoamento, realizem estatísticas, determinem a mudança do padrão de escoamento, calculem variáveis de saída e repassem estas informações aos usuários através de um sistema de supervisão.

Os sensores de impedância apresentam vantagens como o seu baixo consumo, flexibilidade de instalação, demanda de pouco espaço, e principalmente, resposta em alta frequência, possibilitando taxas de milhares de amostras por segundo. Um sensor de impedância em haste devidamente calibrado possui sinal proporcional a quantidade de cada fase em na seção transversal do duto possibilitando o cálculo das áreas preenchidas por cada fase. Também é possível realizar a estimativa de componentes médias de velocidade através de sensores de impedância. Combinando estas duas características e conhecendo o regime de escoamento em que o escoamento se encontra, é possível realizar estimativas das vazões de ambas as fases, entretanto estes sensores ainda demandam aperfeiçoamento de sua precisão e calibração para serem utilizados de forma consagrada no meio industrial.

A principal motivação deste trabalho foi desenvolver técnicas aplicáveis para sensores de impedância, para avaliar as suas incertezas e compreender os limites de aplicação para este sensor. Entre as metas desta tese incluem-se o aproveitamento das características de projeto tal como a versatilidade dos sensores de impedância e alta velocidade de resposta de sinais elétricos

e foca na parametrização de informações predominantemente vindas do sensor de impedância por haste em questão.

Neste estudo o nível de líquido no duto foi correlacionado com o sinal de um sensor de impedância e foram testados métodos automáticos para a estimação da tensão do duto totalmente preenchido por líquido durante o regime intermitente. A partir de um arranjo de dois sensores de impedância em série, foram feitas estimativas da velocidade do deslocamento do fluido bifásico do sensor da jusante para o sensor da montante. Estas estimativas foram feitas utilizando um vetor de amostragem de apenas dois segundos e comparando três técnicas diferentes. A partir destas estimativas de velocidade média foram calculadas as vazões das fases para os regimes de bolhas alongadas, estratificado e intermitente, bem como o comprimento de bolhas e pistões para o regime intermitente.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação é obter avanços na medida dos parâmetros do escoamento bifásico gás-líquido utilizando sensores de impedância com destaque principalmente para aqueles associados ao regime intermitente horizontal. Para obter estes avanços, técnicas usando sensor de impedância serão elaboradas, revisadas e aplicadas para comparação e avaliação de resultados.

Neste trabalho os parâmetros abordados serão:

- Fração da área ocupada por gás e pelo líquido em relação à área da tubulação. As razões de gás e líquido em relação ao volume total.
- Identificação das bolhas e pistões e determinação de velocidades e comprimentos no regime de escoamento intermitente horizontal.
- Determinação de comprimentos de pistões e de bolhas, bem como a aquisição de componentes de velocidades médias no sentido do escoamento, representando a taxa de deslocamento de uma seção de área do escoamento de um ponto para outro.
- Estatísticas: comprimentos de bolhas e pistões, frequência de células unitárias.

- Estimativa de vazões tanto da fase líquida como gasosa para regimes de escoamento: intermitente horizontal, bolhas.

Para realizar as medidas dos parâmetros do escoamento bifásico gás-líquido e a interpretação dos sinais dos sensores de impedância, são desenvolvidos algoritmos. Estes algoritmos podem ser adaptados para microcontroladores e embarcados em instrumentos de campo. Esta etapa é um desdobramento futuro deste trabalho.

As sub-etapas necessárias para a realização deste estudo fazem parte do escopo deste trabalho e são considerados objetivos parciais:

- Estudar a calibração de um sensor de impedância em forma de haste sob a seção cruzada do tubo e afastadas por uma distância conhecida, e definir as melhores soluções computacionais a fim de sugerir um algoritmo de calibração automática e correções geométricas para a determinação da fração de vazio
- Estudar e elaborar metodologias a fim de estimar velocidades médias de deslocamento no escoamento multifásico gás-líquido nos regimes de escoamento de bolhas, bolhas alongadas, intermitente e estratificado. Posteriormente avaliar a utilização destes componentes em modelos geométricos conhecidos, em diferentes padrões de escoamento.
- Fazer um estudo comparativo destas metodologias com processamento de dados e comparar estes resultados a fim de determinar as técnicas de medição de velocidade mais adequadas para o sistema proposto.
- Estudar e elaborar estratégias para estimar a vazão das fases do escoamento bifásico, nos padrões de escoamento bolhas alongadas, estratificado e intermitente.

1.3. Organização do trabalho

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o estudo de escoamentos bifásicos e a aplicabilidade de sensores de impedância nos mesmos. A seção ainda apresenta a motivação e organização do trabalho.

O capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica e aborda as características de um escoamento bifásico, descreve os padrões de escoamento e os modelos geométricos de escoamento que buscam caracterizar e equacionar estes padrões, apresentando os principais modelos. O capítulo também apresenta estudo e levantamento bibliográfico sobre as variáveis principais a serem trabalhadas nesta dissertação: fração de gás e de líquido, reconhecimento de padrões, medida de velocidades, estatísticas, estimativa de vazões.

No capítulo 3 é apresentado o aparato experimental, os sensores de impedância, instrumentos, equipamento, procedimentos experimentais e os algoritmos que serão utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Nesta seção é apresentado em detalhes o design do sensor a ser estudado nesta dissertação. Neste capítulo ainda são apresentados abordados estudos para a calibração estática e dinâmica dos sensores e normalização abordando características do sinal do sensor.

O capítulo 4 aborda a parte experimental do trabalho. Os ensaios A seção apresenta os arranjos experimentais dispostos para a realização dos ensaios e as estratégias abordadas para obter resultados comparativos de diferentes variáveis em diferentes regimes de escoamento

O capítulo 5 apresenta a metodologia proposta para estimação das variáveis almeçadas por este estudo. Neste capítulo estão os resultados obtidos pelo processamento de dados. As estratégias e procedimento para implementação dos algoritmos testados na seção em microcontrolador também são apresentados e discutidos no final do capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação e algumas sugestões e recomendações para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão bibliográfica sobre escoamento bifásico e as técnicas de medição para escoamento bifásico. Este capítulo está dividido em quatro seções, a primeira trata-se do levantamento bibliográfico sobre o estudo do escoamento bifásico gás-líquido horizontal. A segunda seção é uma revisão bibliográfica sobre alguns dos parâmetros mais utilizados pela indústria e institutos de pesquisa em relação ao escoamento bifásico, a fração de vazio e o Holdup. A terceira seção faz um levantamento bibliográfico sobre medição de vazão em escoamentos bifásicos gás-líquido descrevendo tanto as técnicas existentes de medição de componentes fracionários do escoamento bifásico, como também as tecnologias e técnicas existentes para a medição das velocidades médias de deslocamento das fases. Por fim, a quarta seção aborda os modelos de escoamento que são utilizados para descrever alguns dos regimes de escoamento horizontais que serão utilizados neste estudo.

2.1. Escoamento bifásico

De acordo com Brennen (2005), por escoamento multifásico pode-se referir qualquer fluido contendo mais de uma fase ou componente. Segundo o autor, a convenção determina que quando se refere a fluido multifásico, são excluídas as circunstâncias onde os componentes estão misturados no nível molecular ou muito próximo deste nível. Desta forma restam apenas as situações onde as moléculas de cada componente conseguem se agrupar em grande número e constituir ao menos uma fase. Isto faz com que existam diversos tipos de escoamentos com diferentes fases, como o escoamento trifásico, e os escoamentos bifásicos líquido-sólido, gás-sólido e gás-líquido.

O escoamento bifásico gás-líquido está presente em diversos processos industriais e seu estudo tem se mostrado especialmente relevante no setor petrolífero. Durante a produção de hidrocarbonetos, é necessário conhecer comportamento do conjunto de fases dentro do tubo a fim de que seja possível mensurar variáveis, controlar e otimizar processos, tornando a parametrização de escoamentos bifásicos se torna um trabalho contínuo de aperfeiçoamento.

Externamente, a geometria do escoamento é equivalente a um cilindro com o diâmetro do duto, também cilíndrico. Contudo, na parte interna do tubo, as fases configuram uma distribuição espacial complexa e variante no tempo. Existem modelos simplificados, entretanto devido à complexidade e o acoplamento entre fases não existe uma solução analítica para os fenômenos bifásicos. O fenômeno é complexo e apesar de já ser fonte de estudos há mais de um século, não há modelos que forneçam resultados precisos para todos os casos (Zwanziger, 2007).

Os escoamentos bifásicos gás-líquido possuem padrões de escoamento também chamados regimes. Estes regimes se diferenciam pelos padrões geométricos e de distribuição de gás e líquido no duto. Estes padrões podem ser determinados por fatores como as vazões, densidade e viscosidade de ambas as fases. A inclinação dos dutos é outro fator determinante, uma vez que o efeito da gravidade sobre os fluidos atua alterando a distribuição dos mesmos no duto.

No escoamento horizontal as forças gravitacionais aliadas à diferença de densidade deslocam o líquido para baixo e as bolhas de gás para cima no escoamento. No escoamento horizontal, segundo Correa (2009), observa-se um fluxo suave (estratificado) ou ondular no caso de baixas vazões de líquido e gás. Conforme ocorre o aumento da vazão de gás, torna-se gradativamente mais ondulado. A presença de gás no topo na parte superior da tubulação acaba por formar grandes bolsas que se descolam sobre o fluxo de líquido. Dependendo da diferença de velocidade entre os fluidos, as bolhas se coalescem e ficam ainda maiores, transformando-se no padrão intermitente. Caso se eleve a velocidade do gás, poderá ocorrer um fluxo anular em que o gás “perfura” os pistões e o líquido se desloca ao longo das paredes do tubo, ou mesmo um regime estratificado onde o líquido se assenta na parte inferior do duto devido à gravidade. Caso se eleve a velocidade do líquido, as grandes bolhas colapsarão e um padrão com pequenas bolhas dispersas é esperado.

Diferentes definições de regimes de escoamento são encontrados na literatura, alguns autores utilizam um número mais reduzido de padrões, simplificando o estudo, outros utilizam número mais extensivo buscando descrever as regiões de transição. Um dos conjuntos de padrões definido para escoamento bifásico gás-líquido horizontal, foi utilizado por Fonseca Jr (2009), como demonstra a Figura 1.

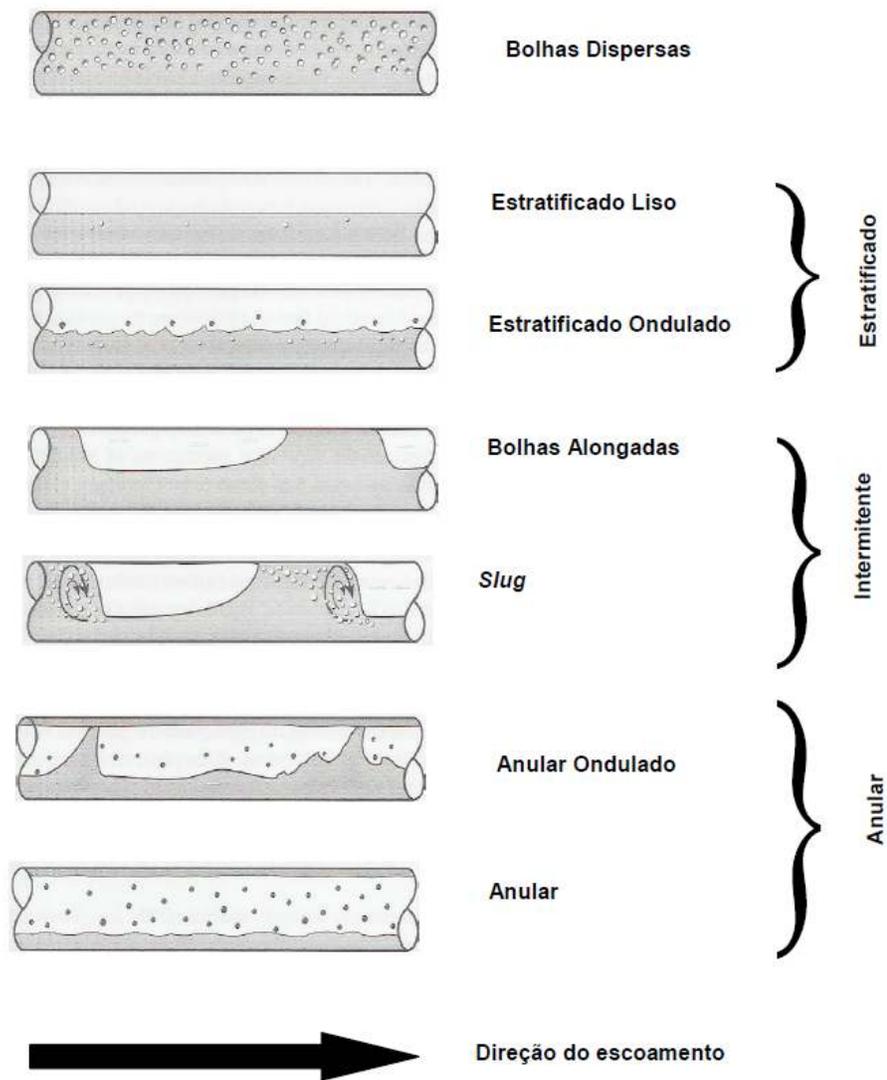


Figura 1: Regimes de escoamento no padrão horizontal [FONTE: Fonseca Jr 2009]

No padrão Bolhas dispersas a fase gasosa se distribui em bolhas, na maior parte do tempo, mono-dispersas com tamanho uniforme descrevendo trajetórias retilíneas e sem interação com as bolhas vizinhas. O segundo padrão é chamado de padrão de bolhas alongadas, onde as bolhas se concentram em bolhas longilíneas fluindo na parte superior do duto.

No padrão de bolhas alongadas, as bolhas se estendem e podem ocupar uma grande região do duto, ainda que em muitos casos possam continuar se deslocando a mesma velocidade que o líquido, assim como ocorre no subpadrão de bolhas dispersas. Como a Figura 1 demonstra, o

comportamento periódico deste subpadrão faz com que alguns autores o classifiquem como um padrão intermitente.

Em baixas vazões e tubos com diâmetro grande também pode ocorrer o regime de escoamento estratificado. Neste regime as fases de gás e de líquido se separam quase que totalmente e escoam uma sobre a outra. Este regime pode apresentar uma variação onde ocorre a presença de ondas na fase líquida, conforme a velocidade da fase gasosa aumenta. Esta variação é chamada de subpadrão estratificado ondulado.

Conforme a vazão de gás aumenta, estas bolhas começam a deslizar mais rapidamente na parte superior do tubo e alcançam umas as outras até começar a formar bolhas maiores, também chamadas bolhas de Taylor.

A presença de bolhas de Taylor no escoamento forma células, também denominadas pistões, que passam a ocorrer no escoamento sucessivamente, caracterizando o subpadrão intermitente (Golfadas), freqüentemente denominado padrão 'Slug'. A característica intermitente desse escoamento traz regularidade para o líquido presente no pistão, com exceção para a cauda das bolhas onde ocorre agitação e a formação de vórtices no líquido. O regime também é denominado padrão intermitente devido a sua vertente transitória.

À medida que a vazão de gás aumenta, o subpadrão Slug é sucedido pelo subpadrão Agitado. Neste subpadrão o líquido apresenta um movimento oscilatório tornando a geometria do escoamento instável. A proximidade das bolhas faz com que as pontes de líquido que unem um lado ao outro da bolha sejam constantemente rompidas pelo fluxo de gás. A aleatoriedade do preenchimento de líquido ou gás na distribuição no tubo gera uma característica caótica a este regime. O par pistão-bolha é definido como uma “célula”, e estas possuem padrão periódico, porém tanto o pistão, também denominado “Slug”, como a bolha possuem comportamento transiente, de modo que sua velocidade varia.

No subpadrão anular o gás concentrado no topo do duto contém gotas de líquido e escoam em alta velocidade enquanto o líquido escoam em forma de um filme de espessura uniforme, junto à parede do duto.

A caracterização dos subpadrões de escoamento foi feita basicamente por observação. A representação gráfica da ocorrência destes subpadrões foi feita por mapas de escoamento, ou seja, gráficos bidimensionais demonstrando as regiões de transição entre os diferentes regimes de escoamento.

Existem basicamente três métodos para a construção de um mapa de padrão de escoamento. O primeiro é pela utilização de variáveis adimensionais tanto na abscissa como na ordenada. A utilização deste tipo de variável faz com que o escoamento preserve a sua característica para efeitos de modelagem, portanto abrange uma utilização mais generalizada do gráfico, ou seja, independente de características como diâmetro do duto e propriedades físicas dos fluidos.

O segundo método consiste em utilizar variáveis dimensionais para a determinação dos gráficos. Parâmetros como a velocidade ou vazão das fases são utilizados a fim de corresponder a uma fácil interpretação dos dados. Com isto, variáveis como diâmetro e densidades dos fluidos são restringidas às condições de determinação do mapa. Apesar de estes mapas serem menos abrangentes, são de fácil implantação. Um conhecido gráfico para escoamentos verticais é o modelo do Mandhane (1974) demonstrado pela figura 2. Este mapa foi feito com base em um escoamento de água e ar em diâmetros de meia a duas polegadas (1,27 a 5,1 cm).

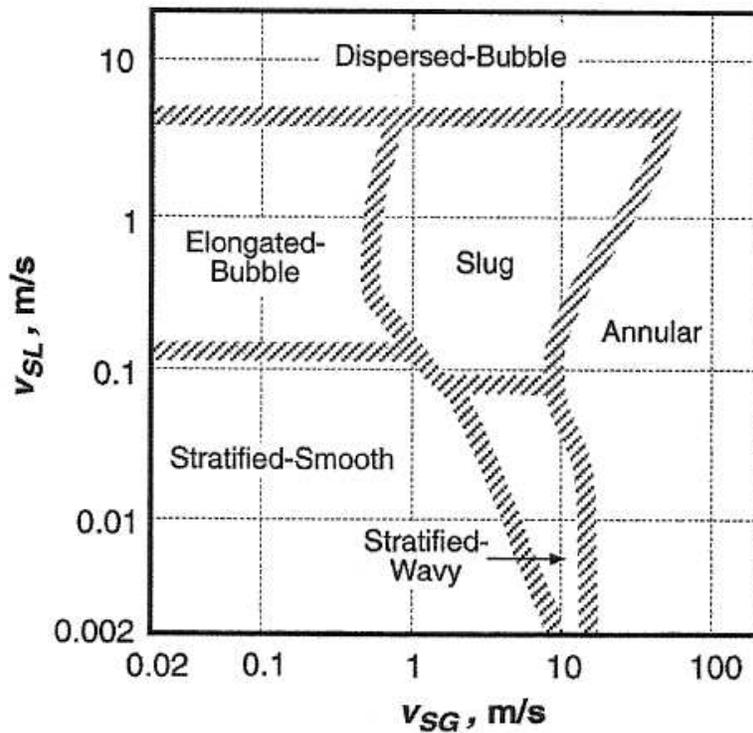


Figura 2: Mapa de padrões de escoamento Verticais [FONTE: Mandhane, 1974]

A figura 3 demonstra um dos mapas de escoamento mais consagrados para regimes horizontais desenvolvido por Dukler-Hubbard (1975), feito para um escoamento bifásico de água-ar em uma tubulação de 10 centímetros de diâmetro.

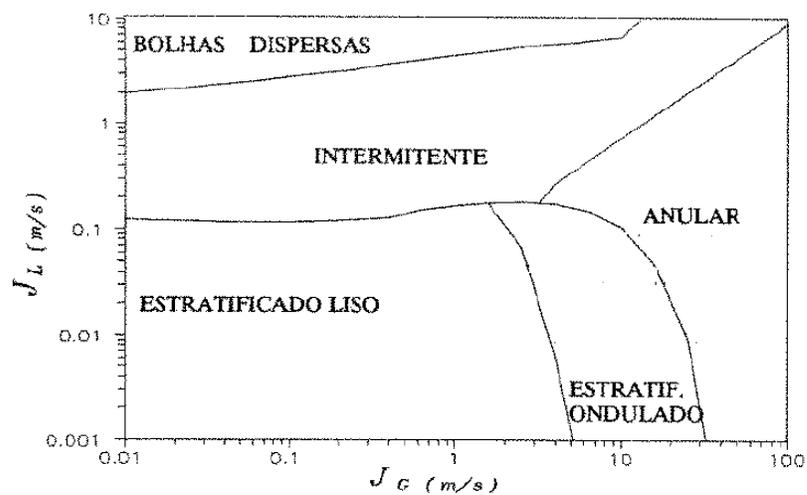


Figura 3: Mapa de padrões de escoamento Horizontais [Dukler-Hubbard 1975]

O mapa de Dukler-Hubard utiliza as velocidades superficiais J_l e J_g como eixo do mapa de escoamento. Estas velocidades são definidas como o fluxo volumétrico médio de ambas as fase dividida pela área da seção transversal interna, e são variáveis padrão para mapas de escoamento, o mapa pode ser passado também para medidas de vazão Q_l e Q_g na ordenada e na abscissa, obtendo o resultado na Figura 4 para um tubo de seis milímetros de diâmetro.

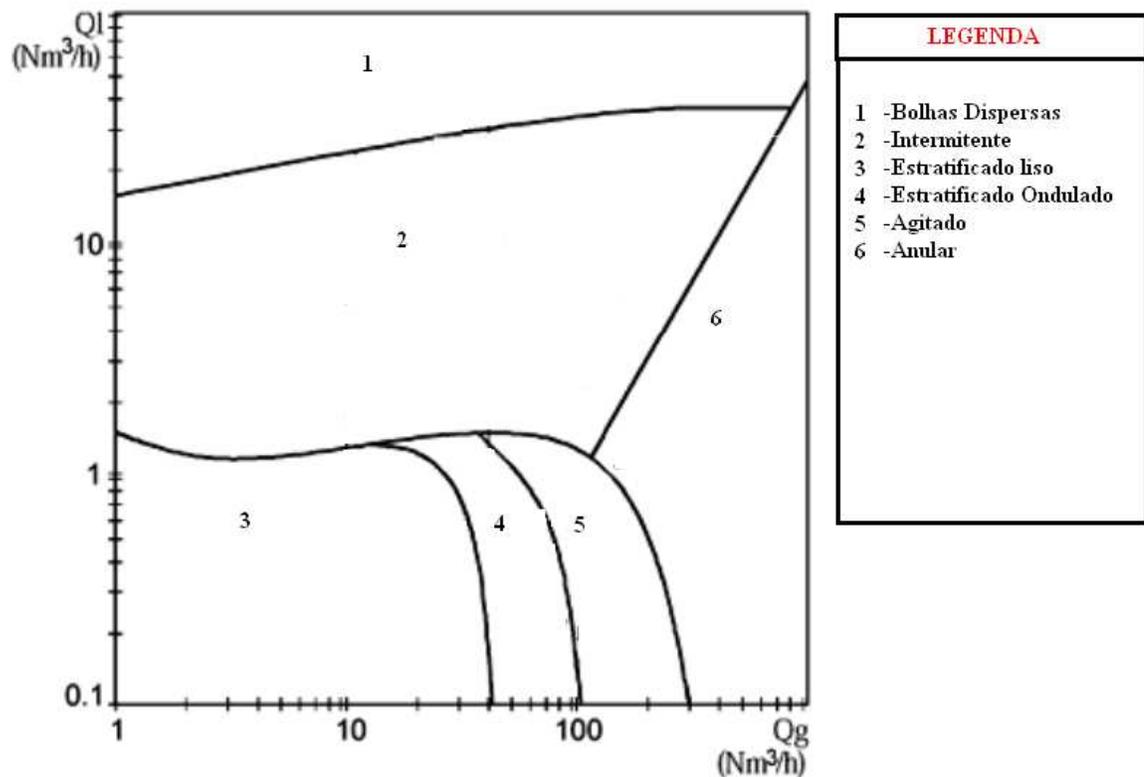


Figura 4: Mapa de escoamento para tubulação horizontal com seis milímetros de diâmetro

O terceiro modo de se constituir um mapa de padrões de escoamento é combinar a utilização tanto de variáveis dimensionais como adimensionais em sua constituição, formando um meio termo entre as vantagens das duas primeiras metodologias. Um modelo clássico deste método é mapa de Baker (1954) descrito pela figura 5 que utiliza os parâmetros adimensionais elaborados por Baker.

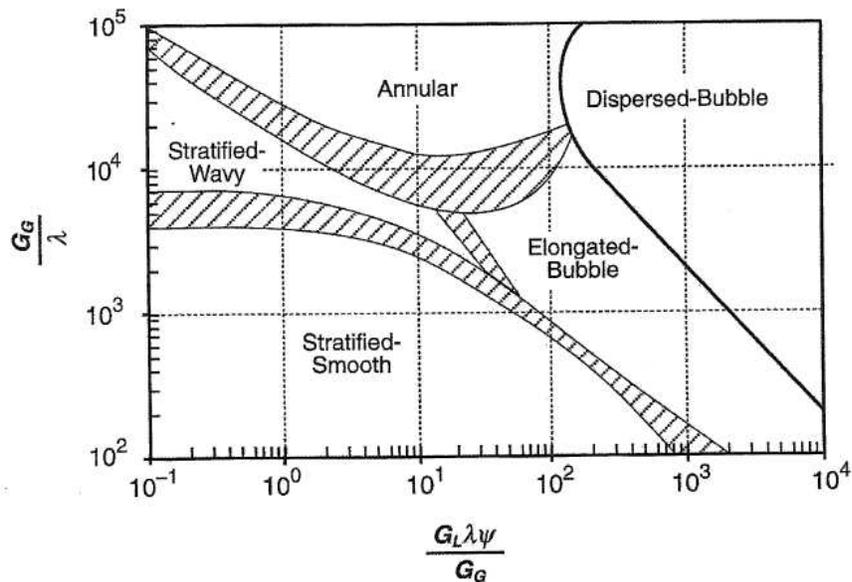


Figura 5: Mapa de padrões de escoamento Horizontais [FONTE: Baker, 1954]

As áreas de transição entre algumas regiões do regime demonstram a complexidade da distribuição geométrica entre as fases. Os subpadrões são definidos pelo formato, posicionamento, periodicidade e transitoriedade do escoamento das fases.

2.2. Fração de vazio e Holdup

A fração de vazio é uma das variáveis a serem estudadas em escoamentos bifásicos gás-líquido. Este parâmetro é um valor necessário para a determinação de outras variáveis, como densidade e viscosidade bifásica em alguns modelos. De modo geral, a fração de vazio pode ser utilizada para realizar cálculos sobre transferência de calor, queda de pressão e previsão de transições de estado no fluxo (Thome, 2010).

Existem diferentes técnicas para se obter a fração de vazio, entre elas pode-se citar o fechamento rápido de válvula, sonda de condutância, atenuação de radiação, raios-X e medição de impedância (Yang, 2003).

A fração de vazio pode ser considerada uma medição pontual, de comprimento, de área ou até mesmo volumétrica. A variável da fração de vazio pode ser representada por α , e é

uma referência a quantidade de área transversal do duto ocupada pelo gás. Fração de vazio pode ser proporcional a diversos valores geométricos, sendo relacionada em três dimensões (volume), duas dimensões (área) ou uma dimensão. Unidimensionalmente a variável α pode ser proporcional a uma linha transversal seccionando o tubo, ao local ou ao uma reta cordal.

A fração de vazio local é referente a um único ponto e possui valor binário, ou seja ou $\alpha=1$ quando há gás no ponto ou $\alpha=0$ quando há líquido no ponto. Segundo Thome (2010) fração de vazio cordal é medida tipicamente por feixe radioativo por um canal bifásico. Este feixe atravessará uma distância contendo a mistura bifásica onde a diferença da absorvidade dos componentes mudará a intensidade do feixe. A fórmula da fração de vazio cordal pode ser dada por:

$$\alpha_{Cordal} = \frac{l_g}{l_g + l_l} \quad 2.1$$

Onde l_g é o comprimento da distância contendo a fase gasosa e l_l é o comprimento da distância contendo a fase líquida.

A fração de vazio de área é tipicamente medida utilizando ou técnicas ópticas ou técnicas de impedância sejam capacitivas ou condutivas no caso do líquido ser condutor. A fórmula é dada pela equação 2.26:

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad 2.2$$

Onde A_g é área de seção transversal do duto contendo gás e A_l é a área contendo líquido. Por fim a fração de vazio volumétrica é mais utilizada em técnicas que utilizam válvulas de fechamento rápido. As válvulas param o fluxo e então em uma tubulação definida os volumes são medidos. A grande desvantagem deste processo de medição, contudo, é que ele não é contínuo.

Analogamente as variáveis anteriores, porém com V_g como o volume total de gás e V_l como o volume total de líquido, a fórmula é dada pela equação 2.3:

$$\alpha_{Vol} = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad 2.3$$

Todavia é importante ressaltar que medir a fração de vazio das fases de modo dinâmico possui também algumas complicações pelo fato do escoamento ser assimétrico (Rahmann,2007). A complexidade da distribuição de fases do escoamento, por exemplo, acarreta em imprevisibilidade na distribuição de gás e líquido no duto, que fará com que muitos sinais de sensoriamento, tais como os de impedância, dificilmente serão perfeitamente diretamente proporcionais.

O Holdup, H, é um parâmetro geométrico que representa a quantidade de líquido em relação ao total. O Holdup é o complemento unitário da fração de vazio descrito pelas equações 2.4 e 2.5:

$$H_{Vol} = \frac{V_l}{V_g + V_l} \quad 2.4$$

$$H_{Vol} = 1 - \alpha_{Vol} \quad 2.5$$

Além do Holdup volumétrico, o Holdup pode ser calculado em um ponto, em uma linha, na área e no volume analogamente às frações de vazio.

Estimar a fração de vazio com base nas propriedades fluido dinâmicas não é uma tarefa que pode ser efetuada com muita precisão, aumentando a evidência da necessidade de um equipamento dedicado à obtenção deste parâmetro. Woldesemayat et. al. (2006) fez um trabalho de comparação da exatidão das diversas correlações para estimação de Holdup a partir das propriedades de escoamento, tanto para regimes verticais com para horizontais. Nos testes realizados para o regime horizontal, o autor utilizou um total de 900 pontos de sete fontes diferentes com oito configurações para a comparação entre as correlações. Ele chegou a

conclusão de que a estimativa mais adequada para uma tolerância de 5% de erro foi a correlação de Premoli (1970), uma correlação que possui como entrada, variáveis como o número de Froude, vazão e viscosidade e densidade de ambas as fases. Esta estimativa obteve 68,4 % dos pontos dentro da margem de erro de 5 %. A pesquisa também calculou a quantidade de pontos estimados em uma tolerância de 15%. A Figura 6 apresenta as estimativas realizadas pelas correlações para estimação de fração de vazio em um tubo horizontal comparadas com o valor aferido da fração de vazio para diversos pontos:

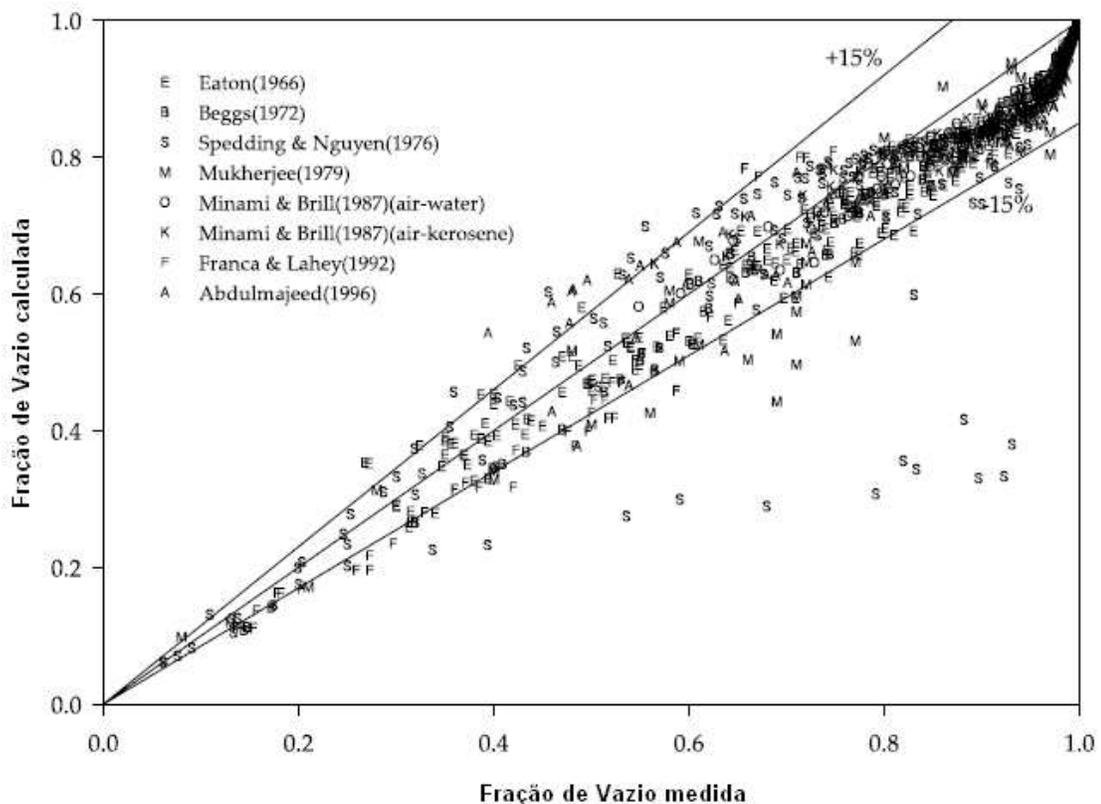


Figura 6: Correlações para estimar a fração de vazio [WOLDESEMAYAT ET. AL. 2006]

2.3. Técnicas de medição de parâmetros para estimativa de vazão

No escoamento bifásico, as vazões volumétricas da fase líquida e gasosa são dadas por Q_l e Q_g respectivamente. Ambas estão entre os principais valores utilizados em processos industriais. De acordo com a Figura 7 a vazão é uma das grandezas mais medidas em processos industriais,

estando no grupo das quatro principais variáveis em relevância para indústria. As aplicações são variadas cobrindo desde o consumo de residências até sofisticados reatores químicos.

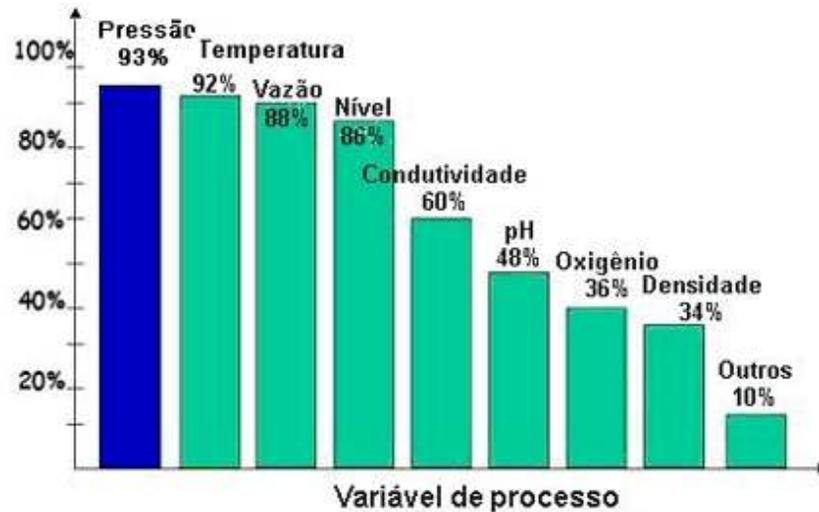


Figura 7: Pesquisa sobre utilização de valores em processos (FONTE:Revista Control Engineering, 2002)

No escoamento bifásico gás-líquido as vazões de gás e de líquido podem ter relevâncias distintas para o processo envolvido, uma necessitando de uma medição acurada e a outra apenas de uma estimativa ou mesmo nenhuma medição. Nesse caso será utilizado um equipamento superior na medição de uma fase em relação à outra. Em uma medição mais acurada é necessário medir muitos parâmetros que influenciam do fluido, tais como densidade, viscosidade e temperatura dos fluídos. Dependendo do tipo de processo envolvido, outras variáveis podem se apresentar necessárias, tais como condutividade elétrica, opacidade, espaço físico, condições termodinâmicas e custo.

A Vazão volumétrica pode ser definida como sendo a quantidade espacial de um fluido escoando através de uma seção por unidade de tempo. Algumas das unidades volumétricas mais comuns são metros cúbicos por segundo (m^3/s), metros cúbicos por hora (m^3/h), litros por hora (l/h), litros por minuto (l/m), litros por segundo (l/s), galões por minuto (GPM) e pés cúbicos padrão por hora (SCFH).

A equação dada para uma vazão monofásica J equivale ao volume V transladado por segundo em um dado canal:

$$J = \frac{V}{t} \quad 2.6$$

Onde t é o tempo decorrido durante a passagem do volume V . A vazão pode ser dada ainda pela equação 2.31:

$$Q = v \cdot A \quad 2.7$$

Onde A é a área transversal do duto e v a velocidade média do escoamento do fluido. Contudo em um duto o atrito entre a parede do tubo e o fluido, tal como a viscosidade do fluído fará com que o escoamento possua maior velocidade quanto maior a distância das fronteiras do canal , atingindo a velocidade máxima , $V_{\text{máx}}$, no centro do tubo, como descreve a figura 8.

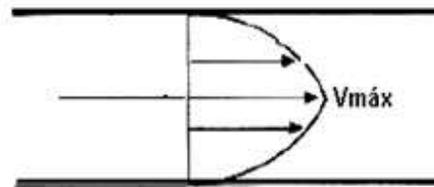


Figura 8: perfil de escoamento monofásico em um duto

A distribuição desta velocidade também depende do fato do escoamento obedecer a um regime laminar ou turbulento. No regime turbulento o fluido se mistura de forma não linear, formando turbulências e vórtices e apresentando um comportamento caótico. A principal variável utilizada para distinguir se um escoamento é laminar ou turbulento dentro de dutos é o número de Reynolds (Re) dado por:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

2.8

Onde v é a velocidade média do fluido, D é o diâmetro do tubo, ρ e μ são respectivamente a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido. O regime laminar em dutos ocorre para valores de $\text{Re} < 1400$ e o regime turbulento para valores de $\text{Re} \geq 1400$.

Esta equação decorre da experiência de Reynolds, que demonstrou a sua existência de escoamentos laminar e turbulento. No escoamento laminar as partículas do fluido deslocam-se linearmente em lâminas individualizadas, sem troca de massa entre elas, similarmente a placas planas deslizando umas sobre as outras de forma. Já o escoamento turbulento apresenta flutuações da velocidade em cada ponto, apresentando um perfil de velocidade imprevisível.

2.3.1. Medição de escoamentos bifásicos

A partir do conhecimento da fração de vazio ou Holdup e do regime de escoamento, é possível determinar a área de gás e líquido presentes na seção transversal da tubulação. A partir destes dados pode-se chegar à vazão através do cálculo das velocidades médias que as duas fases se locomovem. Contudo a determinação destas velocidades não é elementar.

Para se obter medidas de vazão em escoamentos bifásicos é necessário elaborar métodos para medir tanto os componentes de velocidade quanto os componentes fracionários de um escoamento bifásico. Uma vez que a vazão é o produto da velocidade média de deslocamento de cada uma das fases multiplicada por sua respectiva área, é necessário obter primeiramente estes valores para posteriormente realizar uma estimativa de vazão.

De acordo com os estudos de Thorn Johansen e Hammer (1997) pode-se ter a idéia da linha de pesquisa que alguns importantes institutos estão adotando para aprimorar as técnicas de medição de vazão em fluidos bifásicos. A tabela 1 demonstra as pesquisas sendo efetuadas para escoamentos trifásicos.

Tabela 1: Linhas de pesquisa de escoamento multifásico em companhias de desenvolvimento de tecnologia

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Método de medição de componentes fracionários													
Absorção de raios gama única				X				X		X			
Absorção de raios gama múltipla		X	X		X				X				
Impedância				X			X			X			
Microondas	X							X			X		
Ativação de Neutrons Pulsados (PNA)	X												
Método de medição de componentes de velocidade									X				
Correlação Cruzada		X		X			X	X					
Venturi		X		X	X	X		X			X		
Ativação de Neutrons Pulsados (PNA) outros	X								X				
Outras medições													
Medidor de vazão volumétrica da mistura		X				X							
Densimetria por raios gama						X							
Medidor monofásico gás		X									X	X	
Medidor monofásico líquido											X	X	
Análise In-line												X	
Exige separação de fases ?	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S
Exige homogeneização de fluxo?	N	N	N	S	N	S	S	N	N	S	S	N	N

- 1 - AEA Technology, Reino Unido
 2 - Agar Corporation Inc, EUA
 3 - Kvaerner FSSL
 4 - Daniel Industries Inc, Reino Unido/Shell
 5 - Fluenta AS, Noruega
 6 - Framo Engineering AS, Noruega
 7 - ISA Controls, Reino Unido/BP
 8 - Kongsberg Offshore AS, Noruega/Shell
 9 - Multi-Fluid International AS, Noruega
 10 - Jiskoot Autocontrol Ltd/Imperial College, Reino Unido
 11 - Tecnomare/AGIP, Itália
 12 - Texaco, EUA
 13 - WellComp, EUA

O trabalho demonstra que medições de vazão podem ser obtidas de diversas maneiras, desde que existam tanto métodos para determinar a área preenchida por cada fase como a taxa de deslocamento entre de cada uma das fases. Entretanto o alto valor da indústria exige que qualquer tecnologia desenvolvida para medir escoamentos bifásicos, atenda a requisitos mínimos antes de serem utilizados em larga escala. Segundo Thorn et al. (1997), um grupo de grandes companhias de petróleo apresentou uma revisão sobre seus dispositivos bifásicos medição necessidades e identificaram uma gama comum de requisitos de precisão. Os requisitos demandados:

- Fração de volume de gás-líquido na faixa de 0-99%
- Operar com water-cut na faixa de 0-90% do total de líquido.
- Medição de vazão de líquido e gás com erros de 5% - 10%%.
- Erro absoluto na medição do corte de água inferior a 2%.

Duas decisões importantes devem ser feitas quanto à utilização de separadores e homogenizadores de fases no processo. Apesar de cada uma das técnicas, melhorar a precisão das medições elas possuem a desvantagem de nem sempre terem a instalação dos equipamentos possível, pois isto depende da funcionalidade do local onde o escoamento está ocorrendo. Segundo Falcone et al (2009) todas as soluções abaixo já foram testadas e são consideradas estratégias viáveis para a medição de fluidos bifásicos:

- Total separação das fases e medição de parâmetros monofásicos utilizando equipamentos convencionais
- Separação parcial , separando apenas o gás em excesso a fim de determinar a taxa da vazão das fases
- Homogeneização da mistura, tornando a velocidade equivalente para ambas as fases aproximando o escoamento para o modelo homogêneo
- Amostragem dos fluidos para em condições controladas e testadas empiricamente a fim de estimar as razões das vazões a partir das velocidades mensuradas.
- “Deixe como esta” Estratégia que almeja uma medição totalmente não intrusiva, sem separação, homogeneização ou qualquer alteração no escoamento.

Para a utilização em larga escala algumas destas técnicas também possuem um custo demasiado elevado. A Absorção de raios gama e ativação de pulsos de Nêutron, apesar de obterem bons resultados em laboratório são, pelo custo da tecnologia atual, impensáveis para utilização em larga escala.

2.3.2. Técnicas para a medição das frações dos componentes bifásicos

Entre as técnicas de obtenção de fração de vazio, os sensores de impedância estão entre as de mais fácil aplicabilidade e as mais versáteis. Além de possuírem baixo custo e alta velocidade, estes sensores possuem variada configuração geométrica, tendo forma de haste, tela (wire-mesh) ou anel e podendo ser intrusivos ou não intrusivos (Flora, 2011). Diversos parâmetros apresentam variações que atuam diretamente nas variáveis do escoamento, fazendo com que o tratamento do

sinal seja mais do que uma simples questão de compensação de offset e linearização. Para um sensor de impedância, uma variação de tensão pode ser interpretado tanto como um aumento no nível de líquido como de condutividade do líquido.

Variáveis como a temperatura ou a densidade também podem influenciar as medições dos equipamentos. Esses parâmetros também alteram a condutividade do líquido, resultando em uma mudança nos valores adquiridos pelo o sensor. A condutividade também pode ser alterada pela presença de eletrólitos no líquido. Desta forma, uma variação na impedância do conjunto gás líquido pode ser interpretado tanto como uma variação na área de cada fase, como uma variação na concentração de sais ou até mesmo uma variação na temperatura, sendo necessário, portanto o controle destas variáveis e a calibração dos sensores de impedância para que estes funcionem corretamente.

Ahmed (2006) realizou testes em escoamentos bifásicos ar-óleo para a calibração de sensores de impedância. Vários parâmetros como a área, diâmetro e comprimento dos tubos foram avaliados no trabalho. Os testes foram realizados com escoamento monofásico de óleo ($\alpha = 0$) e de ar ($\alpha = 1$) e a variação das saídas foi verificada. Uma vez que as diferentes fases tinham também impedâncias diferentes e ambas sendo fundamentalmente capacitivas, a fração de vazio pode ser relacionada com uma capacitância normalizada (C) proporcional às medidas máxima e mínima obtidas pelo sensor.

Em um sistema envolvendo água e ar, a impedância do líquido em questão possui uma parte real muito alta, resultando em uma alta condutância. Desta forma, para efeitos de calibração do instrumento propõe uma normalização da condutância do líquido. Para tanto é necessário conhecer tanto o valor de tensão mensurada quando o tubo estiver completamente cheio como o valor de tensão medido para o tubo vazio. A diferença entre estas duas variáveis resulta no “range” do sensor, variável que apresentará proporcionalidade ao complemento da fração de vazio do escoamento Holdup(H), variável esta que também se entende de 0 a 1 e denominado e representa o nível de líquido no pistão.

Além do sensor em haste, outro sensor de impedância intrusivo é conhecido wire-mesh, um sensor em forma de tela possuindo hastes verticais e horizontais se cruzando ao longo da seção

transversal do duto. Entretanto, os sensores tipo Wire-mesh criam muito atrito na parte interna do duto influenciando algumas variáveis do escoamento. Wangjiraniran et. Al. (2003) destacou que este sensor possui grandes efeitos na alteração das velocidades das fases, reduzindo a velocidade de bolhas grandes em 40-50% apesar de que no caso de um escoamento vertical a velocidade original seria recuperada posteriormente ao longo do duto por ação das forças gravitacionais.

Entre as vantagens da utilização de um sensor wire-mesh destaca-se a melhor precisão na medida fração de vazio além de realizar uma tomografia a seção de área onde o sensor esta presente. Outras técnicas para a obtenção da tomografia da seção de área pode ser considerada tais como microondas, radiação e ultrassom. Uma das vantagens de técnicas de tomografia por uso de radiação ionizante é o fato de que a sensibilidade da medição para o parâmetro medido é uniforme e independente da distribuição de componentes. Isso facilita a obtenção de imagens de alta qualidade. Estas técnicas foram inicialmente desenvolvidas para a medicina onde são chamadas raios-X(Hammer et. AL. 2006).

Outra propriedade interessante é que um feixe de fótons com energia suficientemente alta, ou seja, um raio gama, será capaz de penetrar, por exemplo, um tubo de aço. O sistema de imagem pode então ser fixado em um lado externo do duto tornando-se um método de medição não intrusivo.

Os scanners atuais de raio X utilizam uma fonte rotativa de raios gama e um conjunto circular de detectores. Este conceito também é usado para geração de imagens de processos industriais, onde as constantes de tempo do processo são muito longas em comparação com o tempo de digitalização. A montagem da imagem dos processos industriais e sua dinâmica implica em uma troca entre três requisitos conflitantes: a resolução de medição de tempo, espaço e matéria Hammer et al.(2006).

No caso da utilização de mais de uma fonte de raios gama, é possível também realizar medições de frações volumétricas em sistemas trifásicos. Em Li et. al. (2005) a obtenção da fração volumétrica de um sistema trifásico água-óleo-gás foi estudada com a denominada inspeção radial nuclear utilizando técnicas de raios gama de dupla energia. O sistema de raios gama de dupla energia é baseado na medição dos coeficientes de atenuação dos materiais de dois

materiais radioativos, no caso, Césio e Amerício que possuam respectivamente energias de emissão de 662 keV e 59.5 keV no projeto.

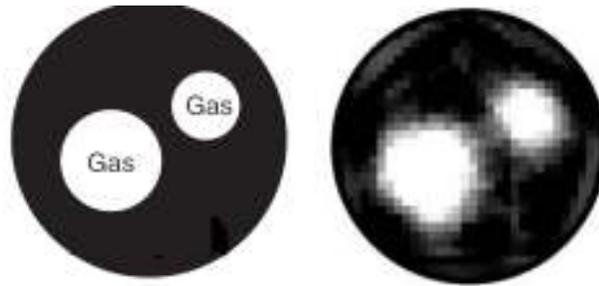


Figura 9: Tomografia de raios gama para uma mistura de ar-polipropileno [Hammer Johansenn et al. ,2006]

Densímetros por microondas também podem ser utilizados para a obtenção de fração de vazio. Este sensor mede a permissividade elétrica em uma mistura de dois componentes, e como no caso dos medidores de impedância, a relação entre os dois componentes pode ser determinada se a permissividade elétrica é diferente para cada componente.

Este transdutor funciona na região de gigahertz e pode no entanto ser utilizado como medidor de quantidade de água e óleo em uma mistura líquida. A desvantagem deste transdutor, em comparação com o transdutor de capacitância, é a dependência da condutividade da água em ambos os componentes água e óleo em misturas líquidas.

Além de microondas, e sensores de impedância, o ultrassom também pode ser utilizado a fim de realizar uma tomografia. Dyakowski(1996) destacou que a aplicação de tomografia de ultrassom para componentes bifásicos pode ser utilizada desde a indústria nuclear e química até a indústria alimentícia. Existem vários tipos de interações de ondas acústicas que viajam através de uma fase contínua e encontram fases dispersas. Quando uma onda acústica encontra um obstáculo (bolha de partículas, ou gota), algumas das ondas são desviadas de seu curso original. A diferença entre a onda real e a onda não perturbada, que estaria presente se os obstáculos não existissem, é chamada de dispersão. Quando uma onda plana, por exemplo, atinge um corpo em seu caminho, além da onda plana, há uma onda dispersa divergindo para fora do obstáculo em

todas as direções, distorcendo e interferindo com a onda plana. A interação entre uma onda acústica e uma onda obstáculo depende de dois fatores. A primeira é a razão entre o comprimento de onda e a dimensão do obstáculo e a segunda é a relação de impedâncias acústicas fase na interface das duas fases.

Através destas dispersões, é possível de maneira análoga tomografia por raios gama realizar um tomografia da seção transversal do duto, calculando posteriormente por processamento de imagens das componentes de fração de vazio e Holdup do escoamento. Outro tipo de tomografia que pode ser utilizado é a tomografia elétrica, podendo a tomografia ser feita por elementos resistivos (ERT) ou capacitivos (ERT) (Cao et. al., 2010)

2.3.3. Medições das velocidades dos componentes bifásicos

De acordo com Thorn Johansen e Hammer (1997), a correlação cruzada é o método mais consagrado entre os métodos propostos para a medição de velocidade, e é utilizada em processos de medição de vazão.

A correlação cruzada é uma fórmula estatística para relacionar a influência de uma variável sobre outra. Na parametrização de fluidos a correlação cruzada pode ser utilizada entre dois sinais para se descobrir a taxa de deslocamento entre os mesmos caso possua-se sinais referentes à jusante e a montante de um duto. Dois vetores dos dois sinais são multiplicados e somados alterando-se o valor de atraso entre ambos até obter-se todos de correlações no intervalo de atrasos testados. Aquele que obter o maior valor de correlação corresponde a maior semelhança de sinais sendo definida como a defasagem entre os sinais.

Uma consideração pertinente na implementação da correlação cruzada em um sistema de tempo real, é o grande trabalho computacional demandado pela mesma. A multiplicação e somatório de diversos pontos dentro de um período e comparação destes valores exige um alto processamento computacional, executado por um considerável período de tempo, além de uma alocação de um grande espaço de memória.

Para a obtenção de informações relativas às velocidades internas dos fluidos no escoamento, é necessário obter as informações sobre as mesmas partículas de fluido em pelo menos dois instantes diferentes, a fim de poder identificar taxas de deslocamento no tempo de algumas componentes no escoamento. Esta técnica também tem sido incorporada em medidores trifásicos de vazão, usando uma variedade de sensores, tais como microondas, Raios-gama e Capacitância (Thorn-Johansen,1997).

Contudo, este método estará sujeito a imprecisões dependendo da validade das relações usadas para conectar a velocidade inferida a partir da função de correlação de posição do pico com a velocidade média do fluxo.

No caso de um fluido multifásico, apenas a velocidade de uma das fases está sendo medida, e erros de medição deverão ocorrer devido ao escorregamento entre as fases. Atualmente, dois métodos são utilizados para reduzir os erros de medição devido ao deslizamento, na velocidade.

O primeiro método é uma medida de intervenção na dinâmica do escoamento que busca homogeneizar o fluxo a montante dos sensores. Desta forma, tenta-se assegurar que todos os componentes viajem na mesma velocidade.

Hewitt (1995) utilizou um misturador com base em uma célula de duplo princípio de rotação e obteve uma homogeneização suficientemente satisfatória em uma faixa de velocidade de 2 a 6 metros por segundo. Misturadores tradicionais em linha não são adequados para isso, pois eles não podem homogeneizar o fluxo sobre a faixa de velocidade que seria necessária em aplicações de medição de vazão (Thorn-Johansen,1997).

Os métodos de homogeneização apresentam algumas desvantagens quando devem ser instalados em uma linha de produção. Estes equipamentos colocam restrições que sobre as operações industriais posteriores ao processo, tais como o aumento da queda de pressão e diminuição da taxa de vazão das fases.

Em Olsvik (1995),uma estratégia alternativa para reduzir erros devido ao deslizamento foi utilizada. Neste método sensores de capacitância foram utilizados para medir a velocidade da fase gasosa. Utilizaram-se dois conjuntos de sensores: um para medir a velocidade

de grandes bolhas de gás que se supõe ser a velocidade da fase dispersa, e o segundo para medir a velocidade das pequenas bolhas de gás que acreditava-se estar a mesma velocidade que a fase líquida. Desta forma, utilizando conjuntos de sensores especializados para medir diferentes componentes de velocidade possibilita-se fazer estimativas utilizando modelos de escoamento mais avançados.

Além de sensores de impedância, a correlação cruzada também pode ser utilizada em conjunto com o princípio do efeito Doppler a fim de determinar componentes de velocidade a partir de sensores de ultrassom. Entretanto uma vez que apenas para realizar esta operação é necessário a utilização de partículas sólidas capazes de refletir o som, esta é uma solução mais coerente para fluidos trifásicos, uma vez que a necessidade da utilização de marcadores torna a técnica pouco viável para aplicações industriais. No caso de um escoamento bifásico gás-líquido, uma série de pulsos de ultrassom é refletida por partículas ocas revestidas por prata presentes no líquido e servindo como marcadores (Bouliard et. Al. 2001). O transdutor que primeiramente emitiu estes pulsos mede então os ecos difratados pelas partículas, formando um sinal extenso representando a geometria do fluido. Instantes depois o processo é repetido obtendo um segundo sinal, e a defasagem entre ambos os sinais é obtida usando a técnica da correlação cruzada (Carlson, 2005).

Bouliard et. al.(2001) destacou que técnicas de ultrassom também podem ser utilizadas para identificar padrões de recirculação de fluidos, turbulências e regiões cavernosas resultadas de imperfeições no duto, tornando então a técnica bem versátil.

Técnicas com utilizando o efeito Doppler também podem ser feitas com laser os quais possuem muito maior precisão, uma vez que possuem padrões de interferência mais constantes, melhor resolução espacial e ruídos menores que as técnicas de ultrassom (Bouliard et. Al. 2001).

Além da utilização do efeito Doppler o laser também pode ser utilizado de modo a obter outros tipos de componentes de velocidade. No caso de um sistema multifásico com líquido opaco o Fonseca jr.(2009) determinou a velocidade das bolhas no regime intermitente ar-óleo a partir do tempo medido entre o início e o término da cobertura total uma célula foto-receptora pelo líquido opaco ou pelo gás transparente. O sinal era identificado e o período de variação era

medido, uma vez que a extensão da célula fotorreceptora conhecida, era possível determinar a velocidade do bico e da cauda da bolha.

A combinação de um fluxômetro de pressão diferencial Venturi e um medidor de densidade também pode fornecer taxa de deslocamento das duas fases. Uma tubulação em formato de Venturi pode ser utilizado para gerar uma diferença de pressão que pode ser medida por dois equipamentos, como por exemplo, tubos de Pitot (Hammer et. Al.,2006).

Caso se conheça as diversas propriedades dos fluidos, tais como viscosidade e densidade, é possível equacionar com precisão o comportamento dos fluidos no Venturi e utilizar fórmulas empíricas para o um escoamento com números adimensionais semelhantes, e calcular a taxa de deslocamento de ambas as fases, obtendo posteriormente as vazões combinando com as componentes fracionárias de ambas as fases.

Um sensor combinando um tubo de Venturi com um sensor de impedância foi desenvolvido para um sistema ar-óleo por Zhang et. al.(2005). O sensor media a queda de pressão ao longo do Venturi e a fração de vazio ao longo do tubo mediante um sensor de capacitância. A partir destes dois valores foi elaborada uma correlação com a vazão mássica de óleo, experimentos foram realizados variando a fração de vazio de 15% a 87% englobando os regimes de escoamento de bolhas, intermitente, anular e anular ondulado. Segundo o autor a correlação elaborada apresentou um erro inferior a 5 %.

Além das técnicas mencionadas existem também algumas técnicas que ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento. Falcone et.al. (2009) enumera algumas técnicas de medição de componentes de velocidade média no escoamento que ainda estão em desenvolvimento:

- Campo magnético: Quando um campo magnético é aplicado através de um fluido condutor, uma tensão proporcional a velocidade é induzida.
- Ativação de pulsos de Nêutrons: Uma fonte de pulsos de Nêutrons que ativa os componentes em uma seção da mistura que pode ser detectada e o tempo de translação até um detector medido calculando posteriormente a velocidade.

- Correlação cruzada de raios gama: A saída de dois equipamentos de absorção de raios gama é gravada. Ambos equipamentos são separados por uma distância conhecida e a velocidade é obtida pela correlação cruzada.
- Correlação cruzada de nêutrons: No caso de reatores nucleares, as reações do núcleo radioativo com a mistura água vapor geram e carregam o escoamento de nêutrons que podem ser detectados em um sinal quase contínuo. Posteriormente estes sinais podem ser detectados por dois sensores separados por uma distância conhecida e aplicada a correlação cruzada.

2.4. Modelos de Escoamento

Modelos de escoamento estabelecem um modelo físico para compreender a interação entre as fases. Segundo Zwanziger (2007) o modelamento deve partir de resultados experimentais e simplificações das equações de conservação básicas da mecânica dos fluidos, tais como equações de conservação massa, conservação de energia e quantidade de movimento. Existem modelos sofisticados que buscam compreender a fundo as propriedades de escoamentos, entretanto estes modelos demandam conhecimento pontual de valores de pressão, tensão superficial e velocidade, tornando-os praticamente intangíveis para aplicações práticas. Variáveis como a temperatura ou densidade também podem influenciar o comportamento do fluxo bem como a forma como o gás e o líquido se distribuem no mesmo. Características da tubulação como a rugosidade do tubo e seu ângulo de inclinação com a horizontal também influenciam em muito a distribuição das fases, de modo que haja diferentes modelagens para o escoamento vertical e horizontal (Shoham, 2009).

Os modelos de escoamento mais avançados abrangem apenas um regime de escoamento em específico, portanto, para calcular parâmetros a partir destes modelos é necessário primeiramente obter a informação de como qual padrão de escoamento o fluxo bifásico está se comportando. Corrêa (2009) desenvolveu um sistema especialista projetado nas condições de campo, com limitações de memória e tempo de resposta e implementou este sistema em um firmware. O sistema especialista obtinha também o sinal de um sensor de impedância e a partir de estatísticas tais como média e desvio e padrão e apresentou uma alta taxa de acerto na identificação de padrões, demonstrando a possibilidade da obtenção de informações em alta velocidade no campo

por um sensor de impedância. O reconhecimento de regimes de escoamento também pode ser feito através de outras técnicas além de um sistema especialista. Mi et al. (1996) e Tsoukalas et al. (1997) identificaram padrões de escoamento através da lógica difusa utilizada em conjunto com redes neurais. Utilizando esta técnica denominada neuro-difusa, obtiveram 100% de acertos em sua identificação de padrões

Uma vez determinado o padrão de escoamento é necessário aplicar uma abordagem a fim de modelar esse escoamento, geometricamente e vetorialmente a fim de poder determinar a vazão de cada uma das fases a partir de informações como a área do duto ocupada por cada fluxo e velocidades em alguns setores do fluxo.

Na modelagem de diferentes padrões de escoamento, são levadas em conta as equações de balanço de massa e quantidade de movimento, formulando diversas hipóteses sobre as perdas por atrito e queda de pressão que ocorrem dentro do duto, segundo a geometria vigente no escoamento. Várias considerações sobre as propriedades das fases como viscosidade e densidade devem ser levadas em conta, assim como características adimensionais número de Reynolds e de Froude.

O padrão de escoamento intermitente vem sendo alvo de estudo a mais de 40 anos. Para a modelagem das características médias observadas neste escoamento foi adotado o conceito de célula unitária. O primeiro modelo de célula unitária é atribuído a Dukler e Hubbard (1975) e foi desenvolvido para escoamentos horizontais. Posteriormente, extensões e correções foram propostas por Nicholson, Aziz e Gregory (1978). Em 1983, Fernandes, Semiat e Dukler desenvolveram um modelo para escoamentos verticais levando em conta as idéias e conceitos do modelo anterior. No final da mesma década, Taitel e Barnea (1990) desenvolveram um modelo que foi adotado por ser considerado uma síntese dos anteriores, sendo o mais completo e genérico. Além destes modelos mais complexos, são utilizados modelos mais elementares, os chamados modelos de “caixa-preta”. Estes modelos são independentes do padrão de escoamento (Shoham 2009), eles simplesmente ignoram a configuração complexa de modelos bifásicos e tratam o fluxo como monofásico. Dois destes modelos são os modelos Homogêneo e separado.

2.4.1. Modelo Homogêneo

O modelo homogêneo de fração de vazio considera que as fases de gás e de líquido se movem na mesma velocidade. Este modelo pode ser adequado para o fluxo intermitente, ou mesmo para o padrão de escoamento Bolhas, onde as bolhas pequenas se movem na mesma velocidade que o líquido (Niño, 2002). A equação abaixo demonstra a relação para cálculo da fração de vazio (α) no regime homogêneo.

$$\alpha_{Homog.} = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)} \quad 2.9$$

Onde ρ_g é a densidade média da fase gasosa, ρ_l é a densidade média da fase líquida e x é o título, ou seja a razão entre a massa gasosa e a massa total do escoamento. Uma das conclusões evidentes desse modelo, é que a densidade média da mistura homogênea é:

$$\rho_{2\phi} = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_l} \right)^{-1} \quad 2.10$$

2.4.2. Modelo separado

Esta aproximação assume que o líquido e as fases de vapor são separados em duas correntes fluindo a diferentes velocidades médias. A razão entre a velocidade do gás e a velocidade média líquida é definida como a "Slip" ratio (S), ou velocidade de escoamento. Segundo Niño (2002), este modelo é mais adequado para regiões de fluxo estratificado e anular. As equações deste modelo podem ser dadas pelas equações 2.11 e 2.12 onde V_g é a velocidade da fase gasosa e V_l a velocidade da fase líquida.:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) S} \quad 2.11$$

$$S = \frac{V_g}{V_l} \quad 2.12$$

Tanto nos modelos homogêneo como separado, o cálculo das variáveis auxiliares e das vazões é mais simples do que em modelos mais sofisticados, uma vez que nestes as variáveis são mais regulares e previsíveis. As fases se comportam de maneira mais organizada, e as velocidades são aproximadas para uma componente média.

No entanto em modelagens mais avançadas a velocidade da fase varia com o perfil de velocidade, dependendo portanto da posição na área para ser pontualmente calculada. Desta forma ainda de acordo com Niño (2002) pode-se calcular a vazão das componentes em relação à fração de vazio utilizando integrais, onde é necessário relacionar a área e a velocidade da fase. As equações de 2.13 a 2.16 demonstram as vazões mássica e volumétrica sendo referenciadas tanto pela fração de vazio como pelo Holdup do escoamento bifásico:

$$\dot{m}_g = \rho_g \alpha \int \vec{V}_g d\vec{A} \quad 2.13$$

$$\dot{m}_L = \rho_L (1 - \alpha) \int \vec{V}_L d\vec{A} \quad 2.14$$

$$Q_g = \alpha \int \vec{V}_g d\vec{A} = (1 - H) \int \vec{V}_g d\vec{A} \quad 2.15$$

$$Q_L = (1 - \alpha) \int \vec{V}_L d\vec{A} = H \int \vec{V}_L d\vec{A} \quad 2.16$$

Onde \dot{m} é a taxa de fluxo mássico, ρ é a densidade e V é a velocidade de cada uma das fases. Conseqüentemente as vazões volumétricas podem ser aproximadas para as respectivas equações em termos da fração de vazio e do Holdup (H) da mistura:

2.4.3. Modelo de Taitel-barnea

O modelo de Taitel e Barnea (1990) apresentou um modelo de célula unitária com uma abordagem mais abrangente, buscando aplicabilidade para modelos horizontais, verticais e inclinados. Este modelo estabeleceu uma relação de dependência entre a fração de vazio média da célula unitária e as vazões de fluido.

Os dados de entrada deste modelo são: a vazão das fases, a velocidade de deslizamento da bolha (U_d), a velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido (V_{GS}), a razão da quantidade de líquido no pistão (R_S), o comprimento dos pistões de líquidos (L_S). No modelo de Taitel e Barnea (1990), a geometria do pistão de líquido é aproximada a um cilindro de diâmetro equivalente ao diâmetro interno do duto (D), e comprimento (L). O comprimento da célula unitária é completado pelo comprimento (L_b), que equivale ao comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido.

Abaixo da bolha alongada, o líquido se propaga em um filme cuja altura h varia ao longo da célula. Somente em alguns casos h é considerado constante e a interface gás-líquido se torna plana e horizontal (Zwanziger,2007) .

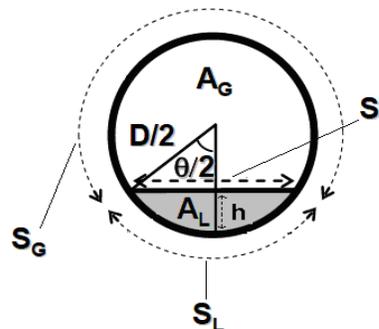


Figura 10: Corte transversal da bolha e do filme

A partir desta geometria são calculadas novas variáveis: S_g é o perímetro seco, S_l é o perímetro molhado, θ é o ângulo molhado, S_i é o perímetro da interface, A_g é a área ocupada pelo gás e A_l é a área ocupada pelo líquido. Primeiramente encontra-se θ a partir da altura h e do diâmetro D :

$$\theta = 2 \text{ACOS} \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \quad 2.17$$

Com θ e D , obtém-se S_l , S_g e S_i a área molhada A_l e a área seca A_g :

$$S_l = \frac{\theta \cdot D}{\pi} \quad 2.18$$

$$S_g = \frac{D(2\pi - \theta)}{\pi} \quad 2.19$$

$$S_i = D \cdot \text{SEN} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad 2.20$$

$$A_l = \frac{D^2 (\theta - \text{SEN}(\theta))}{8} = A \cdot H \quad 2.21$$

$$A_g = \frac{D^2 (2\pi + \text{SEN}(\theta) - \theta)}{8} = A \cdot \alpha \quad 2.22$$

A fração R_{BF} que relaciona líquido presente na região da bolha e do filme é obtida dividindo-se A_l por A . A expressão abaixo relaciona R_{BF} com θ e D :

$$R_{BF} = \frac{\theta - \text{SEN}(\theta)}{2\pi} \quad 2.23$$

Além das dimensões geométricas, o modelo apresenta diversos componentes vetoriais. As velocidades consideradas pelo sistema são a velocidade da célula unitária V_B , a velocidade da bolha alongada V_{GB} , a velocidade do filme de líquido sob a bolha V_{LF} , e as velocidades de gás e de líquido no pistão, dadas por V_{GS} e V_{LS} respectivamente.

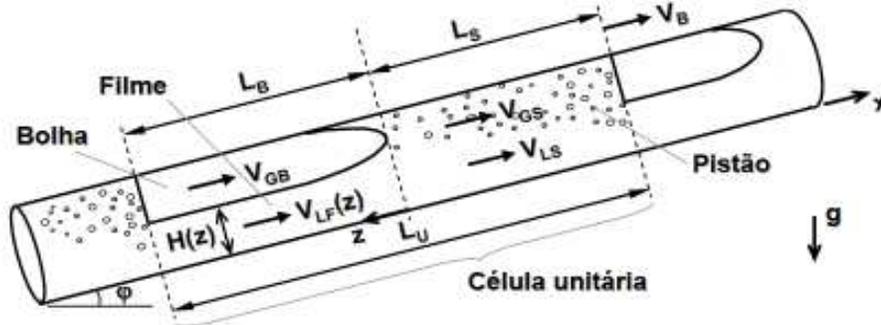


Figura 11: Distribuição de velocidades no escoamento intermitente (Taitel-Barnea,1990)

No modelo de Taitel e Barnea (1990) através do valor conhecido da velocidade superficial do gás J_G e do líquido J_L , utilizando como auxiliares as variáveis das às velocidades V_B e V_{GS} , H e a fração de líquido no pistão pode-se determinar V_{LS} , V_{LF} e V_{GB} devido aos balanços de massa na célula unitária:

$$J = J_L + J_G \quad 2.24$$

$$V_{LS} = \frac{(J - V_{GS}(1 - R_S))}{R_S} \quad 2.25$$

$$V_{LF} = V_B + \frac{R_S(V_{LS} - V_B)}{R_{BF}} \quad 2.26$$

$$V_{GB} = V_B + \frac{(1 - R_S)(V_{GS} - V_B)}{1 - R_{BF}} \quad 2.27$$

Onde J é a velocidade total do escoamento bifásico, R_S é a Fração de líquido (Holdup) no pistão e R_{BF} é a fração de líquido na bolha, podendo ser definida a partir do ângulo θ como:

$$R_{BF} = \frac{\theta - \text{sen}(\theta)}{2\pi} \quad 2.28$$

2.4.4. Modelo de Duckler –Hubbard

No modelo de Dukler-Hubbard, a velocidade de deslizamento da bolha de gás (U_d) não foi considerada, de modo que a velocidade da bolha depende somente da velocidade do pistão. Neste modelo a vazão de gás e de líquido e o Holdup (H) são dados de entrada assim como a frequência com que as células (Slugs) transitam no duto. A determinação da frequência das células atribui uma característica de periodicidade ao escoamento. Tal característica, entretanto, não existe em um modelo real de atribuição prática, uma vez cada Slug possui uma velocidade diferente. A aproximação do modelo de escoamento para um modelo completamente periódico que obedece a um frequência constante resulta portanto em imprecisões para as estimativas.

Assim como o modelo de Taitel-Barnea, a abordagem de Dukler-Hubbard não leva em conta as irregularidades na geometria do escoamento, resultando em inexatidões nos cálculos das velocidades. O modelo de Dukler-Hubbard desenvolve uma geometria específica e uma composição vetorial para o fluido. A célula unitária se locomove com uma velocidade denominada V_t . Também é considerado que ocorre um efeito de aceleração do pistão. A velocidade média relativa do pistão é dada pela variável V_s de modo que V_t seja a soma entre V_s e a taxa de adição de fluido na frente do pistão. Também há componentes para a velocidade média do filme de líquido (V_f) e a velocidade média do filme de líquido próxima a um novo pistão.

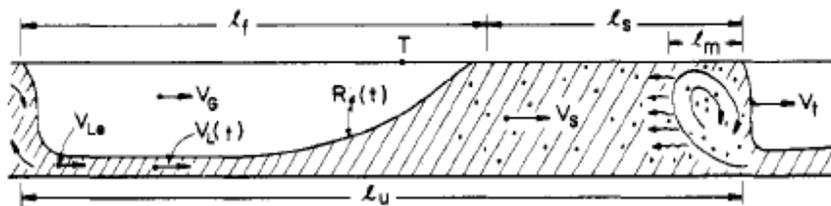


Figura 12: Distribuição de velocidades no escoamento intermitente (Dukler-Hubbard,1975)

Sobre a geometria, são considerados o Holdup do “Slug” chamado R_s e quatro comprimentos: O comprimento do pistão L_s , o comprimento do filme L_f , o comprimento da célula unitária L_u e o comprimento da seção de mistura L_m .

Dentre as variáveis presentes neste modelo, para o cálculo das velocidades se destaca a taxa de derramamento x , variável utilizada para quantificar o preenchimento de líquido no nariz do pistão. Neste modelo esta variável pode ser encontrada a partir de cálculo de queda de pressão e a partir dela pode-se encontrar uma relação entre V_t e V_s dada por:

$$V_t = V_s + \frac{x}{\rho l \cdot A \cdot R_s} \quad 2.29$$

Onde A é a área da seção cruzada do tubo. Desta fórmula, por conveniência, deduz-se coeficiente C , que é uma relação entre a taxa de derramamento, V_s , R_s e A como visto pode ser visto na equação abaixo:

$$C = \frac{x}{\rho l \cdot A \cdot R_s \cdot V_s} \quad 2.30$$

E portanto:

$$V_t = (1 + C)V_s \quad 2.31$$

Uma vez que o líquido presente neste processo de derramamento provém do filme sob o pistão, também é possível encontrar uma relação para encontrar a velocidade do filme a partir da taxa de derramamento.

$$x = \rho l \cdot A \cdot R_{fe} (Vt - Vfe)$$

2.32

Onde R_{fe} equivale ao Holdup do pistão no momento anterior ao derramamento.

3. EQUIPAMENTOS EXPERIMENTAIS

Os elementos sensores têm projeto e construção simples, podem ser construídos de forma intrusiva ou não intrusiva, e assumem diferentes configurações: placas, anéis, haste, “flush”, tais como os apresentados no trabalho de Abouelwafa e Kendall (1980). Neste capítulo são apresentados os sensores de impedância por haste e os procedimentos para a sua calibração e a normalização dos dados adquiridos. Além disto, são apresentados os aparatos experimentais utilizados na dissertação para a medida dos parâmetros estudados neste trabalho.

A escolha de sensores de impedância para o projeto o qual engloba esta dissertação necessita diversas considerações. Se devidamente calibrado e estando em de condições devidamente controladas, o sensor de impedância possui um sinal diretamente proporcional ao nível de líquido passando pela seção transversal do tubo

Uma vez que o fenômeno da condução de eletricidade em líquidos é afetado pela presença de íons na mistura, é importante ficar atento à concentração de sal na água, ou também a presença de água em líquidos dielétricos. Apesar de haverem diferenças nas magnitudes de resistência e impedâncias, em ambos os casos a presença de ma parte mínima do material altera bruta mente a condutividade da mistura. Em Ota Et. Al.(1999) um ensaio em que testava a influência da presença de água em fluidos pouco condutivos foi feito, e foi observado que uma pequena quantidade água dissolvida na mistura, na ordem de partes por milhão, aumentava visivelmente a condutividade elétrica. O experimento mostrou que, sob uma temperatura constante, o estado da água não muda , mas a condutividade de corrente alternada cresce linearmente até a salinidade atingir 1000 partículas por milhão.

3.1. O Transdutor

O transdutor utilizado consiste em uma haste de aço inoxidável introduzida em um tubo metálico e isolada eletricamente em relação ao duto. A haste cruza o duto transversalmente em

uma reta coincidente com o diâmetro da tubulação. Existem dois pontos de fixação, mantendo a haste na região central do tubo e, ao mesmo tempo, mantendo a mesma eletricamente isolada do duto. Dependendo do meio escoante podemos ter uma característica predominantemente resistiva caso o material seja a água ou água salgada, ou uma característica elétrica de reatância (capacitiva) caso seja óleo. Em Mastelari e Rosa (2011), o equacionamento quasi-eletrostático do sensor é demonstrado com detalhes, tal como o comportamento do mesmo para diversos líquidos ,incluindo água com diferentes concentrações de sal e óleo.

Por meio da medida da impedância elétrica pode-se detectar a passagem das interfaces gás e líquido. Se considerarmos o padrão golfadas - o mais recorrente na produção de óleo – a medida de transições na impedância elétrica permite que seja determinada a velocidade do nariz da bolha alongada, a frequência de passagem das bolhas e os comprimentos da bolha e pistão. Para tanto, mede-se o tempo de passagem das interfaces por um par de sondas cuja distância é conhecida. A partir do tempo de passagem da fronteira obtém-se a velocidade. Adicionalmente, medindo-se o tempo de duração de cada uma das fases em contato com a sonda, obtém-se os comprimentos da bolha e da golfada, por meio do produto dos tempos com VB.

A figura 13 representa a geometria do sensor. O conjunto formado por sensor, duto e fluidos do escoamento resulta na resistência (R_m) e na capacitância (C_m), as quais compõem uma impedância que será inversamente proporcional ao sinal de tensão que será transmitido pelo sensor.

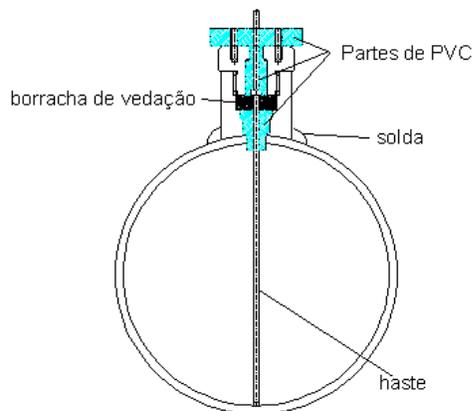


Figura 13: Configuração do sensor de haste na seção do tubo

A resistência e a capacitância da mistura, que flui através da tubulação, dependem das características elétricas das fases: permissividade e condutividade; da proporção entre as fases; e da distribuição geométrica destas fases (regime de escoamento). Há também dependência da tensão de excitação, temperatura, das características dos contatos elétricos, da geometria e materiais dos sensores, imperfeições construtivas, do circuito condicionador eletrônico, outras; neste trabalho estes efeitos secundários serão: controlados; compensados; considerados: conhecidos e/ou invariantes e/ou desprezíveis.

Estas tensões mensuradas pelo sensor serão inversamente proporcionais à impedância do modelo, que é baseada na capacitância e condutividade do fluido descrito pela figura 14:

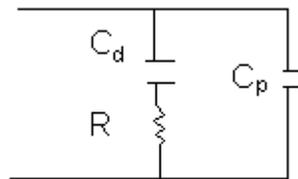


Figura 14: Circuito equivalente á impedância do conjunto bifásico

Onde R é a resistência do fluido, C_p é a capacitância gerada e a polarização das moléculas do fluido próximas aos eletrodos devido ao efeito de camada dupla, efeito observado devido a capacitância observada na dupla camada elétrica decorre da carga armazenada na interface entre dois materiais por um campo elétrico externo imposto. A capacitância C_d é dada pelo fluido dielétrico constante. A impedância total do modelo é representada pela equação 3.1:

$$Z(f) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega C_p} + R} + j\omega C_d} \quad 3.1$$

Onde f é a frequência AC nos eletrodos. A capacitância de polarização depende da geometria do eletrodo e da concentração do eletrólito. Porém, estes efeitos podem ser minimizados usando excitações de alta frequência, na ordem de 100 kHz.

3.2. A Calibração Estática do Transdutor

A calibração estática do transdutor estabelece a relação entre o nível de líquido e a impedância do transdutor através de um instrumento de referência, figura 14. Para estabelecer as curvas de calibração os níveis de líquido são medidos com o paquímetro digital e a impedância é medida usando uma ponte RLC BK Precision 889B. Para estabelecer a relação nível por impedância com diferentes fluídos foi utilizada uma seção de testes, figura 15, com diâmetro interno $D = 58,89\text{mm}$ e $d = 2,36\text{mm}$ (diâmetro da haste). A temperatura foi controlada com variação de $\pm 1^\circ\text{C}$.

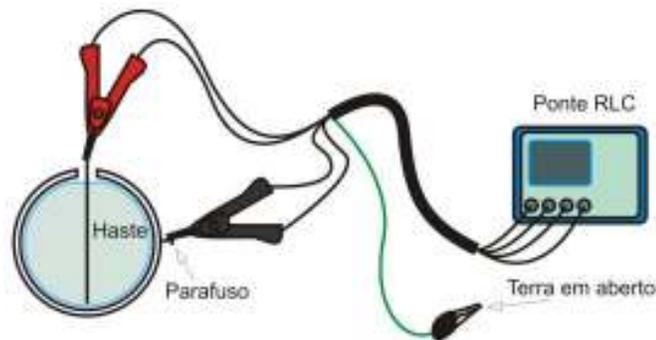


Figura 15: Instalação da ponte RLC no transdutor

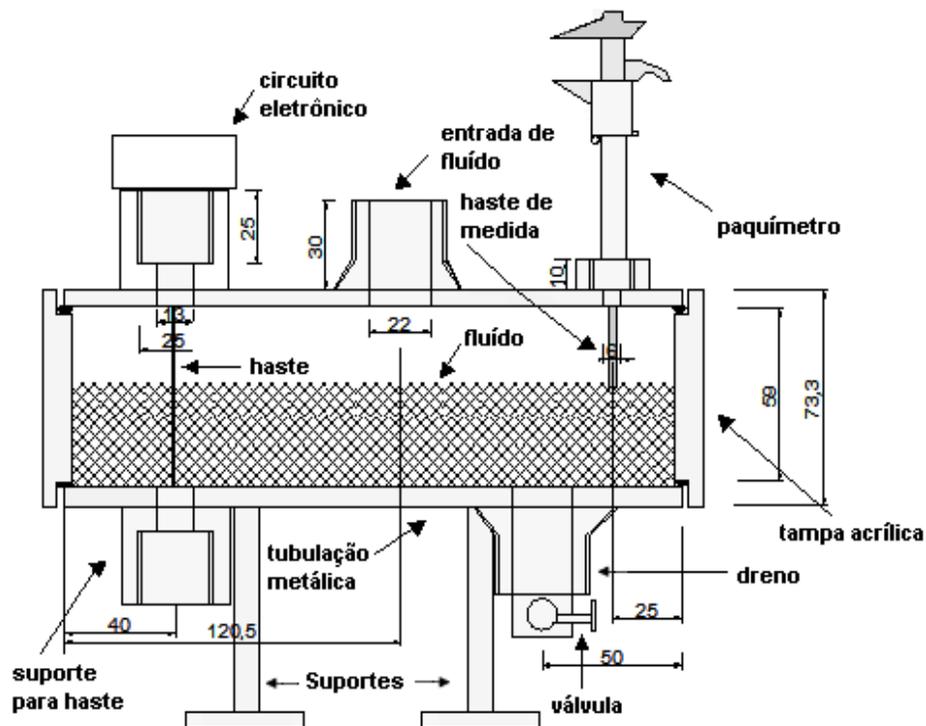


Figura 16: Segmento de duto utilizado para a calibração estática

3.3. A placa condicionadora de sinais analógica

Um circuito eletrônico é necessário para excitar o transdutor apresentado na figura 13 tal e fazer o condicionamento dos sinais medidos para obter a informação de impedância do escoamento. Este circuito eletrônico em conjunto com os eletrodos instalados na tubulação forma o Sensor de Impedância. O circuito é baseado em eletrônica analógica e seu desenvolvimento teve como objetivo abranger as aplicações do sensor tanto para laboratório como para testes em campo. A necessidade da produção de múltiplos sensores levou à fabricação do circuito eletrônico sobre uma placa de circuito impresso dedicada ao sensor à qual se denomina Placa Analógica. A placa é adaptável a sistemas de medida, controle e supervisão equipados com conversores Analógico/Digital capazes de fazer a leitura de sinais analógicos em loops de corrente 4-20 mA. O circuito é acondicionado em carcaças industriais de alumínio que protegem o circuito, figura 16.

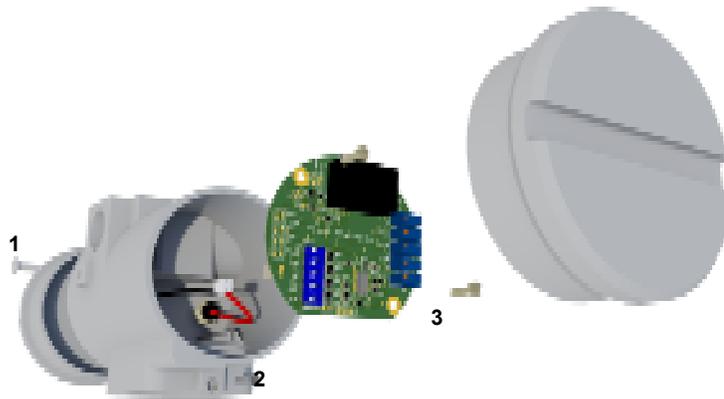


Figura 17: Montagem de carcaça e placa eletrônica

A placa foi desenhada para realizar a medição da admitância de uma mistura bifásica gás - líquido apresentando uma saída proporcional a sua fração de líquido. Alguns requisitos que guiaram o desenvolvimento da placa analógica foram:

- A utilização de loops de 4 a 20 mA , equivalentes a sinais padrão que permitem o uso de uma estrutura já instalada no laboratório e também aplicações de campo com controladores programáveis (CLPs).
- Capacidade de realizar ajustes finos na medida de admitância através de potenciômetros
- A facilidade de instalação
- Versatilidade para operar com faixa ampla de admitâncias. Isto é possível graças a incorporação de “jumpers” na placa capazes de alterar a resistência paralela de saída instrumento R_s , chamada de resistência de carga, de tal forma que esta possa ser configurada para trabalhar com diferentes misturas gás-líquido sem a necessidade de modificações no circuito.

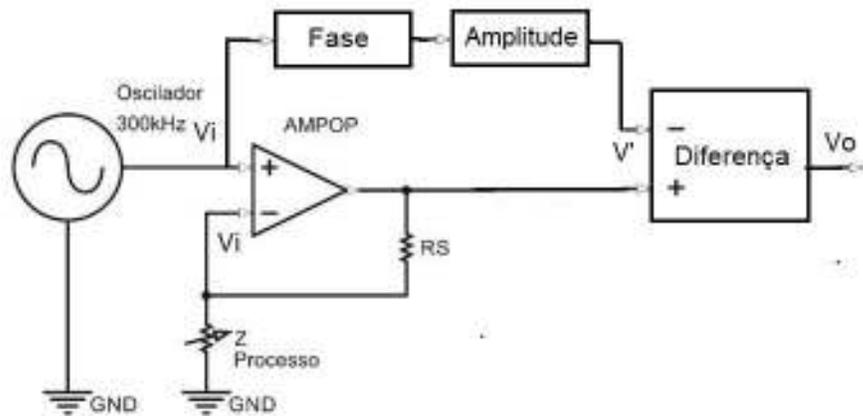


Figura 18: Circuito conversor de admitância em tensão

Na figura 18 devido ao amplificador operacional a tensão do oscilador é aplicada ao processo Z através do terra virtual, e a corrente que circula pelo resistor de carga R_s gera uma tensão na saída do operacional proporcional à admitância do escoamento, o outro braço do circuito ajusta a fase e amplitude do sinal do oscilador de tal forma que possa zerar a medida através da diferença destes sinais, eliminando as capacitâncias parasitas e as impedâncias dos cabos indesejadas na medida. O circuito é descrito pela equação 3.2.

$$U_o = U \left(\frac{R_s}{Z} + 1 \right) - U' \quad 3.2$$

O ajuste de instrumento é feito com o tubo vazio de tal forma que a passagem de líquido retira o instrumento do ponto nulo. Quando em vazio: $Z \rightarrow \infty$ e ajustando-se $V' = V_i$ o sinal vai à zero. Quando há passagem de líquido após o zeramento a saída fica inversamente proporcional à impedância e diretamente proporcional à admitância do processo.

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_s}{Z} = Y \cdot R_s \quad 3.3$$

O circuito converte a admitância equivalente do meio gás-líquido (processo Z) em tensão, U_o na figura 18, a qual é posteriormente convertida em corrente. Tal conversão é realizada para que a informação referente à admitância possa ser lida através de um par de cabos responsável pelo loop de corrente.

A figura 19 apresenta as funcionalidades que compõem o sensor analógico. A geração de sinal do sensor é composta de um oscilador que origina um sinal de tensão senoidal na frequência de 300 Kiloherz e com tensão ajustável. Esta tensão, chamada tensão de excitação é aplicada ao sensor e a corrente e posteriormente é medida.

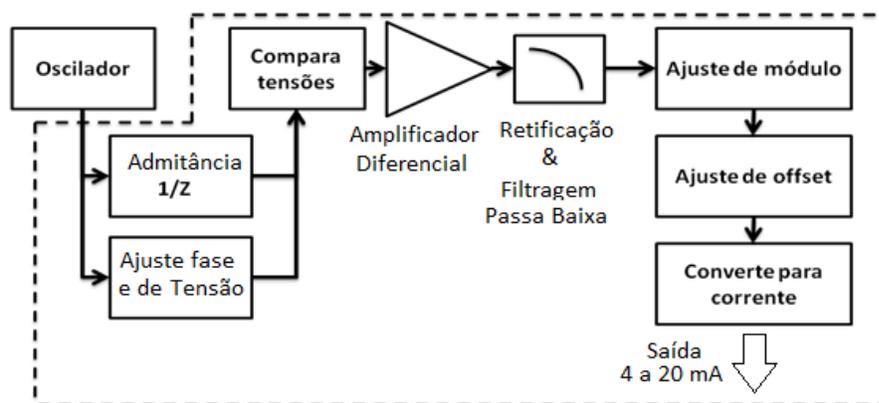


Figura 19: Diagrama em blocos das funções que constituem o sensor

Nos primeiros blocos, o oscilador gera uma tensão de entrada, cuja a fase e a tensão são ajustadas por um bloco paralelo à admitância do conjunto bifásico a ser medida. Em seguida, através de um comparador e amplificador, esta tensão é convertida em uma tensão de saída que é normalizada para um novo valor após ajustes de módulo e offset. Esta nova tensão de saída é aplicada sobre um resistor de 250 Ohms que converte a tensão para um sinal de corrente padronizado pela indústria: 4-20 miliamperes.

Para medir apenas o processo é interessante “zerar o instrumento”, ou seja, somar ao sinal em vazio o seu oposto. O “zeramento”, portanto é o ajuste através de potenciômetros da fase e amplitude de um sinal senoidal igual ao sinal de vazio. Feito isto o sinal é amplificado, retificado

e filtrado por um passa baixas, obtendo o sinal associado ao processo. Este sinal é então adequado por meio de um ganho e offset ao modo de saída 4-20mA.

3.4. Arranjo de sensores

O estudo se propôs realizar as medições de velocidades e vazões médias utilizando apenas os sinais de dois sensores de impedância contendo em forma de haste instaladas em duas seções do duto e separadas por uma distância conhecida. Tradicionalmente escoamentos bifásicos são complexos e exigem informações de vazões e pressões pré-determinadas para chegar a esses parâmetros. Apesar de informações como pressão e temperatura serem muito utilizadas para obtenção de informações, este trabalho pretende desenvolver as características dos sensores de impedância para determinar se existe a possibilidade de uma utilização mais abrangente destes sensores, principalmente utilizando um microcontrolador com capacidade de processamento equivalente a 100 MIPS. Para realizar este estudo propõe-se que sejam testadas técnicas de aferição dos sensores de impedância e avaliação de incertezas nas medidas, ora a obtenção de dados estatísticos e comparações dos sinais.

Para a obtenção de informações relativas à velocidade média de um seção de área do fluido bifásico de deslocando no duto, é necessário obter a informações sobre as mesmas partículas pontuais de fluido em pelo menos dois instantes diferentes, a fim de poder identificar taxas de deslocamento no tempo de algumas componentes no escoamento. Para tanto foram instalados, dois sensores por haste, separados por uma distância conhecida d , equivalente a 11,25 centímetros. Com esta disposição é possível adquirir dois sinais de elétricos simultaneamente e compará-los a fim de identificar variantes de velocidade. Por convenção o sensor da montante é considerado o sensor A e o sensor da jusante é considerado o sensor B. O esquema de configuração dos sensores é representado na figura 20 :

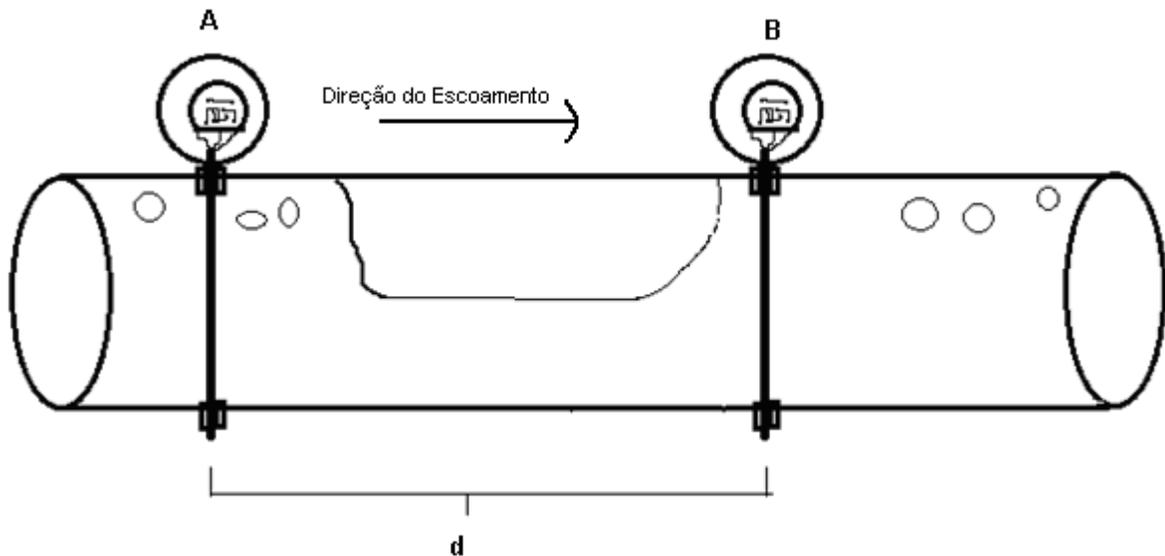


Figura 20: Arranjo formado por dois sensores separados por um distância d : O dispositivo A representa o sensor da montante e o dispositivo B representa o sensor da jusante

Uma vez que existem dois sensores de haste mensurando a impedância do líquido em posições diferentes, os gráficos de ambos deverão apresentar semelhanças devido à similaridade da disposição geométrica do escoamento bifásico nas diferentes posições. Medições de seções de área semelhantes estarão distanciadas por um atraso decorrente do tempo necessário para o escoamento transladar de uma posição para a outra, representando um segmento de área do escoamento se deslocando a uma velocidade média. Uma vez que o fluxo se comporta de maneira irregular no percurso entre os dois sensores, os sinais não serão exatamente iguais.

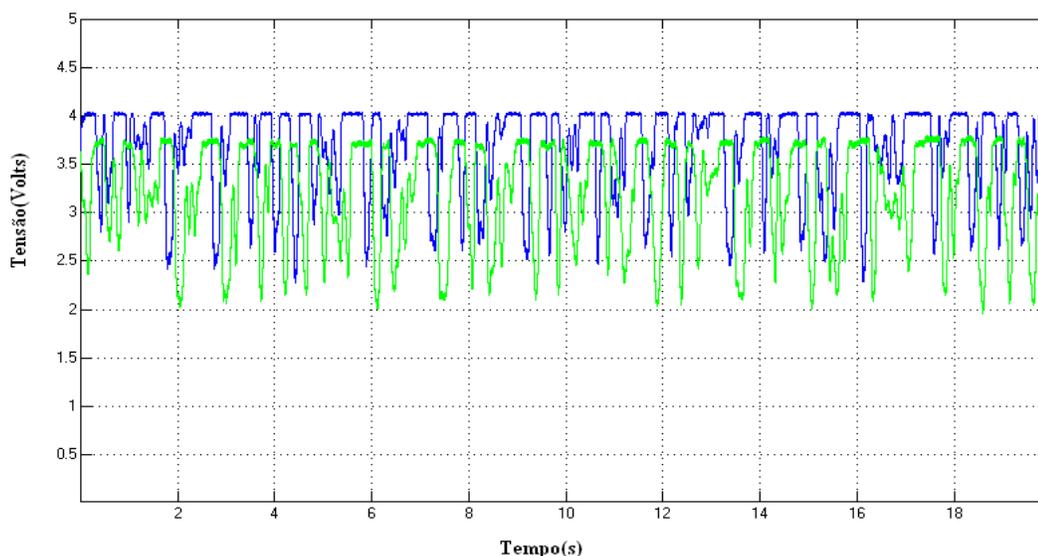


Figura 21: Exemplo de sinais aquisitados no escoamento para o teste

Uma vez que a distância entre os dois sensores é previamente definida, é possível a partir dos atrasos dos sinais estabelecer taxas de velocidade. Entretanto, existem diversos regimes de escoamento bifásico, cada um com uma geometria e composição vetorial diferente. Também ocorre a alteração da geometria do fluido entre uma haste e outra, uma vez que cada componente do fluido se desloca a uma velocidade diferente. Além do mais existem variações decorrentes da variação de condutividade elétrica da fase líquida e também de erros eletrônicos do circuito, tais como ruído branco, efeitos da temperatura e erros de calibração. Todos estes fatores dificultam a determinação de taxas de velocidade. Algumas das técnicas para diminuir o efeito destes fatores incluem-se a utilização de filtros analógicos e digitais, a fim de minimizar os efeitos dos ruídos, e para os erros sistemáticos do fluxo pode-se utilizar um sensor de referência ou mesmo um sensor flush para medir a condutividade da fase líquida. Podem ser usados sensores auxiliares para a medição de temperatura, por exemplo, e ser elaborado uma planta digital para calcular os efeitos da variação de temperatura na condutividade da fase líquida e realizar a correção da relação entre as tensões medidas e o nível de líquido.

3.5. Aparato experimental

O experimento utilizou uma montagem para produzir escoamentos bifásicos ar-água em menor escala e um equipamento de aquisição com três sensores de impedância por haste, cada um utilizando um circuito condicionador de sinal, instalados na referência na montante e na jusante. Além dos sensores de jusante e montante distribuídos para comparar os sinais do escoamento em dois instantes diferente, a adição de um sensor de referência no tubo preenchido apenas por líquido foi feita para monitorar a condutividade da água e calibrar os outros dois sensores de maneira adequada. O equipamento de aquisição foi conectado a um PC utilizando o software LabView para salvar os dados dos testes, enquanto um osciloscópio foi utilizado para verificar a autenticidade das amostras apresentadas pelo software. A instalação foi realizada em uma pequena montagem experimental contendo um reservatório cilíndrico, uma bomba, válvulas e rotômetros para controlar o fluxo de ambas as fases e um misturador de fase. O desenho esquemático do equipamento é mostrado no diagrama da figura 22:

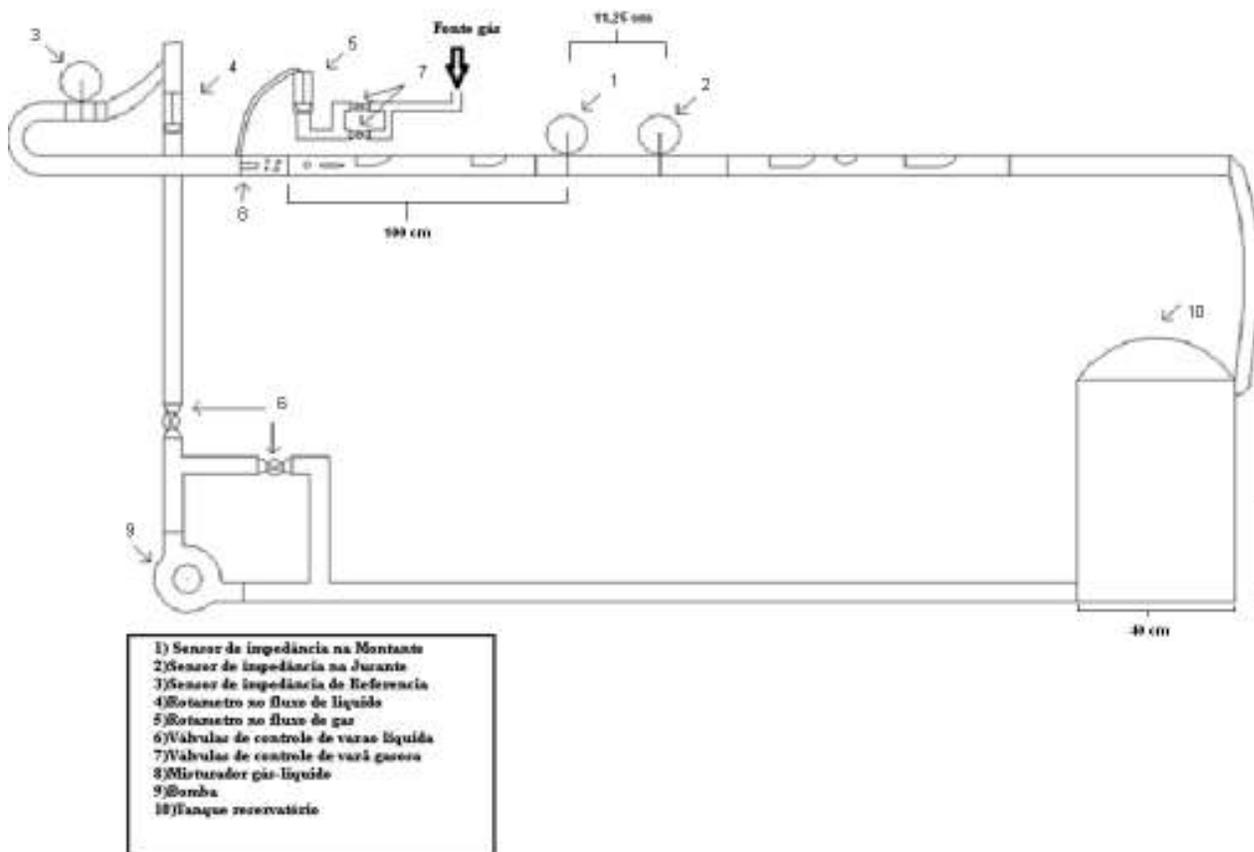


Figura 22: Desenho esquemático do equipamento utilizado nos experimentos

As saídas foram adquiridas a uma amostragem de 3000 amostras por segundo em formato de 8 bits, e transmitidas para um computador. As placas se comunicaram com um PC pela porta serial. Posteriormente, o sinal também foi salvo em uma memória de hardware para outras simulações com o programa Matlab. Os sinais de vários experimentos foram salvos nos formatos “adq” e “txt”.

Os rotômetros foram utilizados para mensurar as vazões de ambas as fases a fim de serem utilizadas futuramente como valores de comparação. O Rotômetro na tubulação de líquido utiliza como variável padrão galões padrão por minuto (Gpm), possuindo um range de 0.4 a 10 galões por minuto e uma incerteza de 0.1155 galão por minuto, calculado pelo fundo de escala do equipamento. O rotômetro responsável pela medição da vazão de gás por sua vez possuía como

variável padrão a unidade pés cúbicos padrão por hora (Scfh) operando em um range de 6 a 80 pés cúbicos por hora e com um erro equivalente a 1,155 Scfh também calculado pelo fundo de escala do respectivo equipamento. Ambos os erros foram calculadas tendo como base o fundo de escala.

3.6. Tratamento de sinal

Sensores de Impedância exigem várias etapas para sua utilização. Inicialmente é calibrado estaticamente para obter a sua curva de calibração, a relação entre o sinal de saída e o nível de líquido dentro do transdutor. Esta calibração é feita preliminarmente em bancada em uma seção de testes usando o mesmo procedimento apresentado na figura 17. Posteriormente, instalado na estrutura onde irá operar, pequenos ajustes são necessários para ajustar o ganho e o zero do instrumento tomando como referência a tubulação em vazio e cheio. Tipicamente estes ajustes são feitos a cada bateria de testes para adequar o Sensor de Impedância às características do ensaio como temperatura e condutividade do líquido que variam com o tempo.

O sinal de saída do sensor é na forma de uma corrente padronizado de 4-20mA, Posteriormente este sinal é convertido em tensão sobre um resistor de 250 Ohms para ser aquisitado como uma tensão de 1 a 5 volts. Estas tensões possuem notação U e são normalizadas segundo a equação 3.4, ou seja, o sinal do sensor líquido é convertido em um sinal que vai de zero a um referente ao nível de líquido é convertido em um sinal que vai de zero, tipicamente tomando como zero a tubulação em vazio e com um a tubulação cheia.

A normalização é uma fase que influencia diretamente a faixa de valores registrados pelo sensor. Uma das aplicações para sensores de impedância para medições bifásicas, é a medição da fração de vazio (α), um parâmetro que varia de valores zero a um. Através da normalização destas medidas é possível calcular o Holdup (H) e a fração de vazio do escoamento. É desejável que o essa medição seja precisa, uma vez as incertezas deste parâmetro serão propagadas para as demais variáveis, que serão calculadas posteriormente.

Diversos parâmetros apresentam variações que atuam diretamente nas variáveis do escoamento, fazendo com que a aferição seja mais do que uma simples questão de compensação de “offset” e linearização. Para um sensor de impedância, uma variação do sinal pode ser causado por um aumento no nível de líquido como pelo aumento da condutividade do líquido.

Os ensaios foram feitos com um escoamento bifásico de água de torneira e ar. Quanto maior a proporção de água maior a condutância do escoamento. O Sensor de Impedâncias apresenta um sinal proporcional ao nível de líquido, desta forma a normalização foi feita para que a saída seja zero quando a tubulação está vazia e um quando a tubulação está cheia. A diferença entre estes dois valores resulta no “range” do sensor. Esta variável será diretamente proporcional ao nível de líquido no duto dividido pelo diâmetro do tubo, variável que também se entende de 0 a 1 que pode ser também chamada de Holdup de altura e pode ser representada pela variável H_h e representa o nível relativo de líquido, ou seja a razão entre o nível de líquido h e o diâmetro do duto D .

$$H_h = \frac{U_{(t)} - U_v}{U_c - U_v} \quad 3.4$$

Onde U_c é tensão referente ao duto preenchido apenas por fase líquida, U_v a tensão referente ao escoamento monofásico de gás, e $U_{(t)}$ representa o valor instantâneo adquirido pelo sensor em haste medindo a impedância do conjunto bifásico.

Todavia em um sensor trabalhando no campo, ou mesmo algumas situações de laboratório não é recomendável parar, limitar ou alterar a produção visando obter em um dado momento as informações o tubo totalmente cheio ou totalmente vazio para determinar o “range” do sensor corrigindo a estimativa do Holdup e da fração de vazio.

Uma solução consiste em usar um sensor de referência no tubo. O objetivo deste sensor é medir a condutividade do líquido e, em seguida estimar a proporção da faixa de tensão dos sensores, e as duas fases do escoamento. No laboratório, esse sensor pode ser instalado antes da mistura de fases ou após a separação de fases. Em campo, no entanto, devido às instalações

padrão dos processos de extração de petróleo, o sensor de referência, provavelmente seria utilizado após um dos setores de separação de fases.

Outra solução é utilizar as características do escoamento horizontal, a fim de desenvolver uma solução heurística para a normalização do sinal. Para um escoamento horizontal, em alguns padrões de escoamento, com um fluido newtoniano e viscosidade consideravelmente elevado, a gravidade age como um separador de fases, elevando gás para o topo do tubo e, assim realocando o líquido para o fundo do tubo. De acordo com Dukler e Hubbard (1975) a camada líquida desacelera enquanto ele se move ao longo da tubulação e, como resultado, ocorre um aumento no nível. Com este aumento, o nível se aproxima do topo do tubo e eventualmente atinge a parede superior bloqueando o fluxo de gás. Para um sensor de impedância, estes momentos serão apresentados como os picos do sinal elétrico. A normalização do sensor poderia ser feita se houvesse acesso aos picos de informação, e pode ser feito automaticamente por um sensor com um algoritmo computacional. Para criar este sistema, entretanto, seria necessário desenvolver um método heurístico confiável para a amostragem destes valores e calibração automática do sensor.

Outro problema são os ruídos provenientes de equipamentos eletrônicos. Estes ruídos causam uma dispersão exagerada dos pontos na aquisição, por isso é necessário eliminá-los tanto quanto possível, seja pelo controle das condições de ensaios ou por descobrir uma maneira de filtrar o ruído.

O primeiro passo do procedimento foi definir quais regimes de escoamento o algoritmo iria focar. Escoamentos bifásicos possuem diversos comportamentos assimétricos, dependendo da quantidade de gás e de líquido que escoam. Um destes, o escoamento intermitente é considerado um dos padrões de maior complexidade entre os bifásicos, dado que possui pouca simetria, uma vez que é composto em maior parte por gás, cujo escoamento se dá, em sua maioria ou mesmo totalidade, na forma de bolhas alongadas. A maioria do líquido flui entre estas bolhas na forma de cilindros denominados “pistões”. (Zwanziger,2007).

Duarte (2007) demonstrou experimentalmente que a viscosidade influencia o comprimento do pistão em um regime intermitente. No escoamento com o sistema ar-água valor médio se encontra no intervalo de 12,7 a 18,8 diâmetros do duto, enquanto que no escoamento com o

sistema ar-glicerina seu valor médio foi obtido no intervalo de 10,3 a 15,1 diâmetros. A diminuição do comprimento do pistão dificulta a presença de picos mais próximos de um tubo totalmente cheio, portanto para este experimento a escolha da fase ar-água foi feita a fim de estabelecer um ponto inicial para um estudo de viabilidade destas técnicas.

3.6.1. Filtragem

Para reduzir os erros na estimativa do “range” dos sensores, focou-se em reduzir os erros aleatórios gerados pelo equipamento. Foram realizados ensaios a fim de obter o espectro de densidade de potencia dos sinais obtidos pelos sensores de impedância e a partir dos mesmo determinar a distribuição da potência gerada pela parte fluidodinâmica do processo de aquisição de dados, para futuramente reduzir os ruídos eletrônicos . A figura 23 descreve o espectro de freqüência de quatro escoamentos na região estudada.

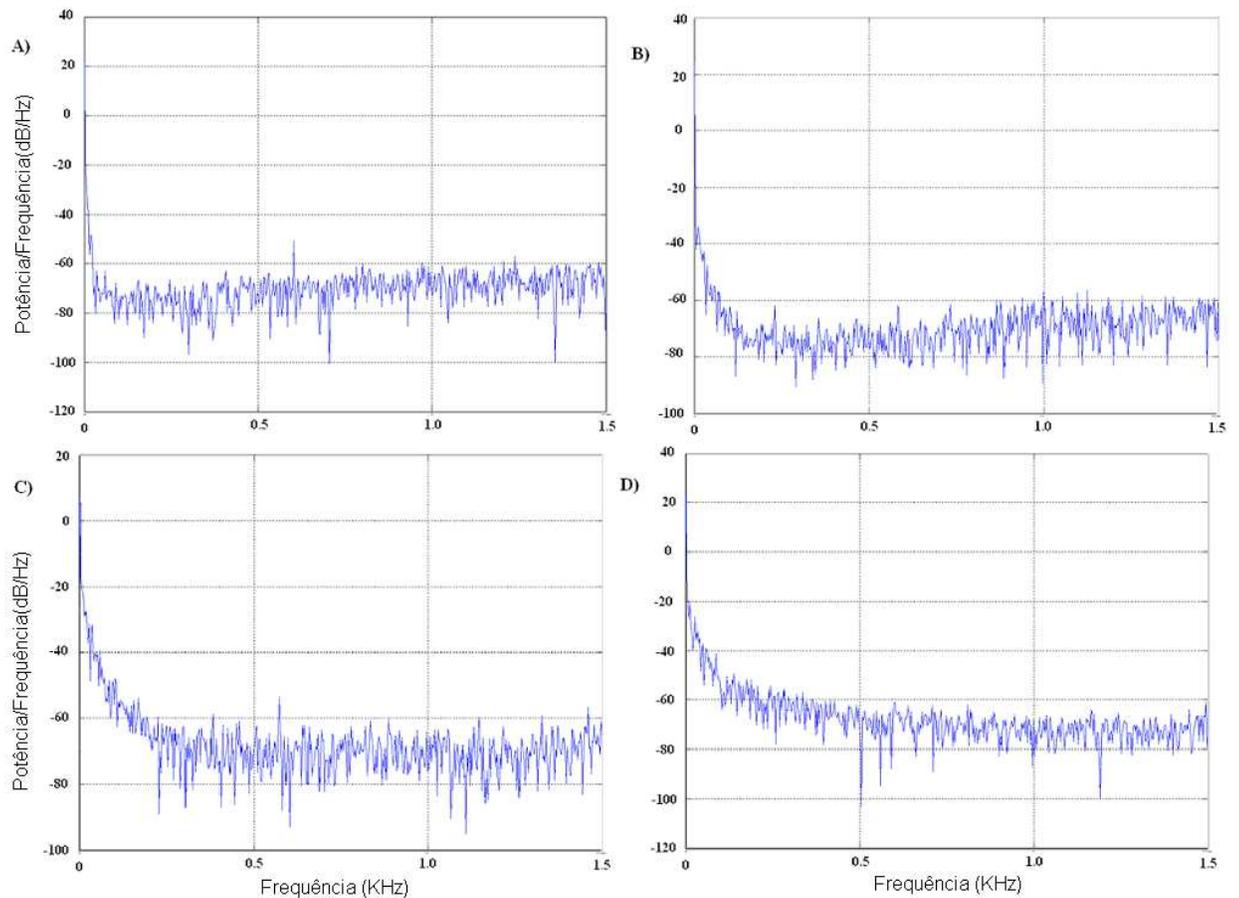


Figura 23. Espectro de densidade de potência para escoamentos bifásicos com vazão equivalente de gás e líquido a) 8,5 l/m b) 14 l/m c) 19,5 l/m d) 25 l/m

Enquanto um ruído branco geralmente tem uma distribuição unitária de densidade de potência, o gráfico acima mostra que até para o sinal em fluido bifásico, apenas algumas

freqüências possuem densidade de potência como uma distribuição unitária de -70dB/Hz . No entanto, uma densidade de potência diferente da distribuição unitária pode ser percebida para freqüências inferiores a 0.33 KiloHertz ou 330 Hertz , referindo-se a um sistema dinâmico atuando a freqüências específicas e não a erros aleatórios, distribuídos unitariamente no espectro de potência.

Optou-se por filtrar o sinal gerado pela aquisição de dados com um filtro digital simples de primeira ordem com freqüência de corte de 330 Hertz . Uma vez que erros aleatórios possuem distribuição unitária de potencia na freqüência e o equipamento amostra dados a velocidade muito acima do que flui do escoamento, um filtro passa-baixa foi utilizado para cortar a potencia do sinal em freqüências que o comportamento dos fluidos não atinge.

A ordem do filtro foi escolhido como a primeira ordem, devido à simplicidade de implementação, e pelo fato de não perder desempenho em relação a ordens superiores. A figura 24 mostra o quanto o ruído branco pode influenciar as medições da impedância de um sistema monofásico contendo apenas água parada, mostrando a relação entre freqüência de corte e a dispersão em um sensor de referência. A dispersão foi dada pelo desvio padrão da amostra de 3000 pontos feitas no ensaio de 1 minuto.

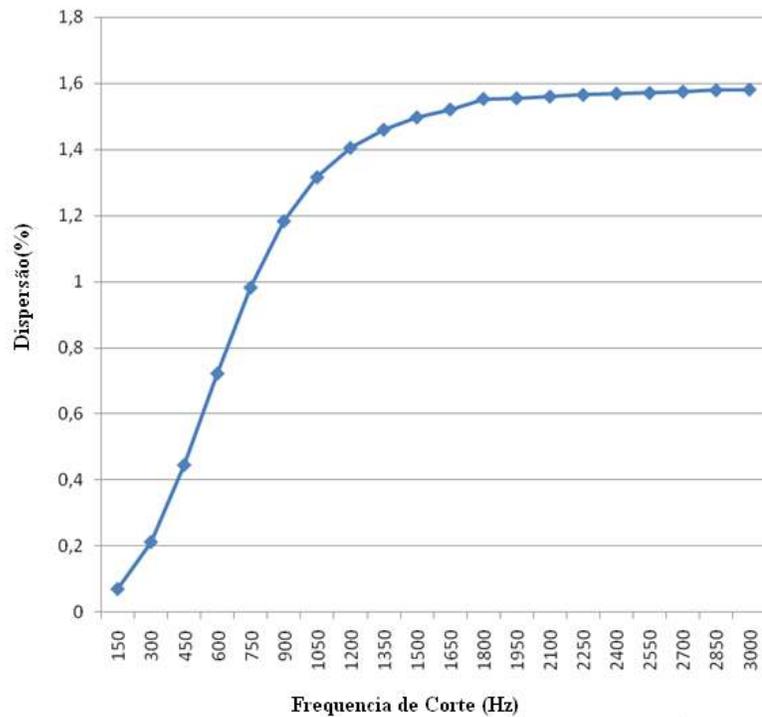


Figura 24. Dispersão de um sinal em relação à frequência de corte do filtro.

3.7. Sistema supervisorio e ensaios computacionais

Após serem convertidos para um sinal de 1 a 5 volts, os dados provenientes dos sensores devem ser adquiridos através de conversão analógico digital e serem processadas. Em laboratório os dados dos sensores são adquirido através de uma placa de aquisição de dados da National Instruments e por um sistema supervisorio em Labview projetado especificamente para este sensor.

O sistema supervisorio em Labview amostrou os sinais a 3000 amostras por segundo enquanto armazenava os valores de cada amostra na memória. Após o termino do período de total de amostragem, o mesmo programa em LabView armazenou todos os valores aquisitados em uma arquivo de extensão “txt”. O formato ‘txt’ foi escolhido por sua versatilidade e facilidade de conversão para o arquivo ‘mat’, utilizado pelo programa Matlab.

Posteriormente, os valores foram convertidos do formato "txt" para arquivos de extensão "mat" pelo software Matlab. Os arquivos de extensão ".mat" podem ser utilizados como entrada de simulações na interface simulink do Matlab, uma plataforma de simulação e análise de sistemas dinâmicos. Os ensaios então foram então processadas em diagramas de blocos tais como a figura 25 apresenta:

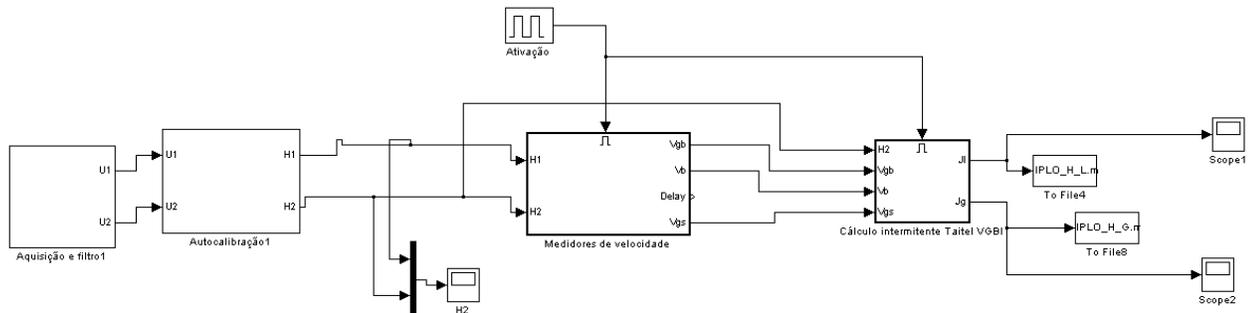


Figura 25: Exemplo de diagrama de blocos

Na interface Simulink, as etapas de filtragem digital, calibração automática, cálculo de componentes de fração, cálculo de componentes de velocidade, foram feitas em blocos, em seqüência e a partir dos mesmos valores iniciais, a fim de simular a operação de um sistema capaz de realizar tais estimativas em alta velocidade em uma operação de campo. Foram realizadas no total ao todo seis ensaios computacionais no simulink a partir de dados coletados em laboratório:

- Uma simulação de calibração dinâmica foi feita no regime estratificado, a fim de verificar a incerteza da relação entre a condutividade e o nível do líquido num escoamento bifásico dinâmico. O nível do líquido foi obtido através das informações de vazão de gás e líquido utilizando o modelo homogêneo e comparado com a tensão de saída do sensor.
- Uma simulação para o estudo comparativo entre os algoritmos de obtenção de velocidade: Foram elaborados três algoritmos para a obtenção de uma variável contínua representando a taxa de deslocamento de uma seção de área da jusante

para a montante do sensor: Um rastreador inspirado pelo método de Newton-Raphsow e cálculos da correlação e covariância dos sinais variando o valor do atraso τ entre os sinais. Foram realizadas posteriormente simulações utilizando dados de entrada amostrados em laboratório correspondentes a diversos padrões de escoamento e foram gerados a partir deste dois sinais distanciados por atrasos conhecidos a fim de verificar o sucesso destes algoritmos em calcular estes atrasos e ao mesmo tempo avaliar as características das variáveis propostas.

- Uma simulação no regime intermitente a fim de avaliar um método medição automática de comprimentos de bolha e de pistão. O método consiste em referenciar pontos de transição das regiões da célula unitária, da bolha e do pistão, e utilizar gatilhos para estimar a velocidade da bolha e do pistão e tempos de transição entre cada região. Posteriormente com estes dados é possível calcular também o comprimento de pistões e bolhas. Foram realizadas simulações os resultados foram documentados e apresentados.
- Uma simulação no padrão de escoamento de bolha alongadas a fim de avaliar a incerteza das estimativas de vazão de gás e de líquido neste regime, de maneira semelhante ao experimento anterior. Os valores das vazões correspondentes foram verificados novamente mediante rotâmetros.
- Uma simulação no regime estratificado a fim de calcular a vazão apenas da fase líquida e comparar com os valores verificados no rotâmetro. Neste ensaio não foi encontrada uma maneira de utilizar as variáveis obtidas pelo sensor de impedância fim de calcular a vazão da fase gasosa;
- Uma simulação no regime intermitente a fim de calcular as vazões de gás e líquido no mesmo, utilizando além das variáveis obtidas pelo sensor de impedância o modelo de Taitel-Barnea. Os valores obtidos foram comparados com os valores aferidos nos rotâmetros.

Foi utilizado para todas as simulações em Matlab o algoritmo ODE45 que utiliza o método chamado Dormand-Prince (1980), um método de solucionamento de questões diferenciais ordinárias proveniente da família de Runge-Kutta. Para a utilização deste solucionador, foram configurados como passo mínimo 166 microssegundos e como passo máximo 333 microssegundos, o equivalente a amostragem de 3000 Hertz . O Objetivo foi averiguar se os algoritmos testados poderiam funcionar tendo um processamento a esta velocidade e retornar uma resposta simultaneamente facilitando a utilização de rotinas de interrupção em caso de implementação em firmware.

4. OBTENÇÃO DE PARÂMETROS

4.1. Obtenção de velocidades

Para a obtenção de dados relativos à vazão de ambas as fases é preciso obter valores médios de velocidade que representam a dinâmica dos fluidos presentes no escoamento. Pontualmente, o escoamento é formado por diversas velocidades em diversas direções formando um comportamento bastante complexo, e representando um campo de velocidades. Entretanto para alguns padrões em que o escoamento encontra-se existem modelos de escoamento que simplificam o comportamento dos fluidos. O modelo de Taitel-Barnea utilizado no escoamento intermitente, por exemplo descreve o escoamento como possuindo cinco velocidades médias principais: As velocidades do líquido no filme e no pistão, velocidades do gás na bolha e pistão e a velocidade da célula unitária.

Contudo, para obter estas velocidades médias, é necessário primeiramente obter taxas de deslocamento calculadas a partir dos sinais de ambas as hastes presentes no sensor, e posteriormente aplicá-las como equivalentes a algumas das velocidades padronizadas propostas pelo modelo. Isto é realizado a partir de técnicas e estimativas capazes de identificar atrasos entre os sinais de ambos sensores de impedância. Ao lidar com estas estimativas, o objetivo é obter valores médios de velocidade, em toda uma seção de área ou até em uma seção volumétrica do escoamento. Foram elaborados no trabalho os seguintes métodos de estimativa de velocidade a partir dos sinais dos sensores:

- Gatilhos V_{ponta} e V_{cauda} : Para o regime intermitente, os gráficos relativos ao Holdup demonstram as características de periodicidade da célula unitária e é possível identificar nos gráficos os momentos em que uma grande bolha alongada, ou um pistão estão atravessando o sensor de impedância. A partir dos gráficos de ambos os sensores é possível elaborar um sistema automático de identificação de estruturas como pistões e bolhas, baseados em um fator de corte (FC) a fim de identificar a presença de uma bolha ou pistão. A partir destes dados são ativados e desativados pontos de referência em cada célula unitária, para cada sensor, e

posteriormente calcula-se por meio destes pontos de referência, os atrasos entre sinais. É possível isolar as velocidades tanto da ponta como da cauda da bolha, representados respectivamente por V_{ponta} e V_{cauda} . Em alguns trabalhos como em Duarte (2007) a velocidade da cauda de bolha também é denominada como velocidade traseira da bolha e nomeada V_{tr}

- Rastreadores V_{RA} : Através de uma estimativa contínua de atraso entre os sinais de jusante e montante baseada no cálculo numérico, em específico o método de Newton-Raphson, é possível estimar o atraso de qualquer seção de área correspondente no escoamento na variável aqui denominada V_{RA} .
- Correlação cruzada V_{corr} : O método mais consagrado entre os mencionados, a correlação cruzada é amplamente utilizada para estimar velocidade no estudo do comportamento de fluidos. A técnica consiste em estabelecer uma correlação matemática entre os sinais da jusante e da montante e relacionar o maior valor com o atraso entre ambos.
- Covariância V_{cov} : Análoga a correlação cruzada, esta variável estima o atraso entre os sinais da montante e jusante calculando a covariância entre ambas. Uma vez que um valor positivo elevado de covariância estabelece dependência direta entre as variáveis demonstrando que estas caminham juntas, esta técnica também pode ser utilizada para identificar o trajeto de uma seção de área do escoamento, da montante para a jusante.

Para obter medidas de velocidade, a partir do sensor proposto, é preciso relacionar os sinais de ambas as hastes a fim de obter uma defasagem de tempo entre ambas. Esta defasagem de tempo corresponderá ao intervalo necessário para uma seção de área do escoamento se deslocar de um sensor para o outro, e a partir deste intervalo é possível calcular uma componente de velocidade.

As diversas componentes vetoriais internas no escoamento, vórtices e diferenças de pressão fazem com que o escoamento possua geometrias diferentes (apesar de semelhantes) ao passar por

cada sensor, o que resulta em sinais divergentes, porém correlacionados, adquiridos pelos sensores.

Para obter defasagens utilizando estes sinais correlacionados são propostos abaixo três tipos de estratégias. A mais consagrada, a correlação cruzada, utiliza-se de conceitos estatísticos para comparar as correlações entre sinais, para todo um intervalo de atrasos. Uma vez que esta técnica precisa amostrar um período de cada sinal e posteriormente, multiplicá-los em todo um intervalo de defasagem, a mesma apresenta como desvantagem a alta demanda por memória e recursos computacionais para sua implementação.

Outra estratégia que necessita de menos memória é a utilização dos rastreadores. Os rastreadores são técnicas desenvolvidas neste trabalho com inspiração no cálculo numérico, principalmente no método de Newton-Raphson, a fim de encontrar a defasagem entre os sinais, assim com se encontra a solução de uma equação. Ao contrário da correlação cruzada, este método necessita de menos operações matemáticas e do armazenamento de apenas um vetor longo correspondente a um dos sinais, sendo o outro vetor curto ou mesmo dispensando a necessidade de um segundo vetor, uma vez que um sinal servirá de referência em tempo real, e o outro realizará operações a fim de persegui-lo tal como encontrar uma solução.

Para definir este intervalo, assim como o intervalo da correlação cruzada, é preciso estimar as velocidades mínimas e máximas que serão desenvolvidas nos testes. Para definir estes pontos a partir do deslocamento do gás, a velocidade média de translação do gás V_G pode ser simplificada para:

$$V_G = \frac{Q_G}{A \cdot \alpha_m} \quad 4.1$$

Onde Q_G é a vazão de gás no escoamento, A é a seção de área do duto e α_m é a fração de vazão média do escoamento, levando em conta a razão entre a vazão de gás e a vazão total do mesmo.

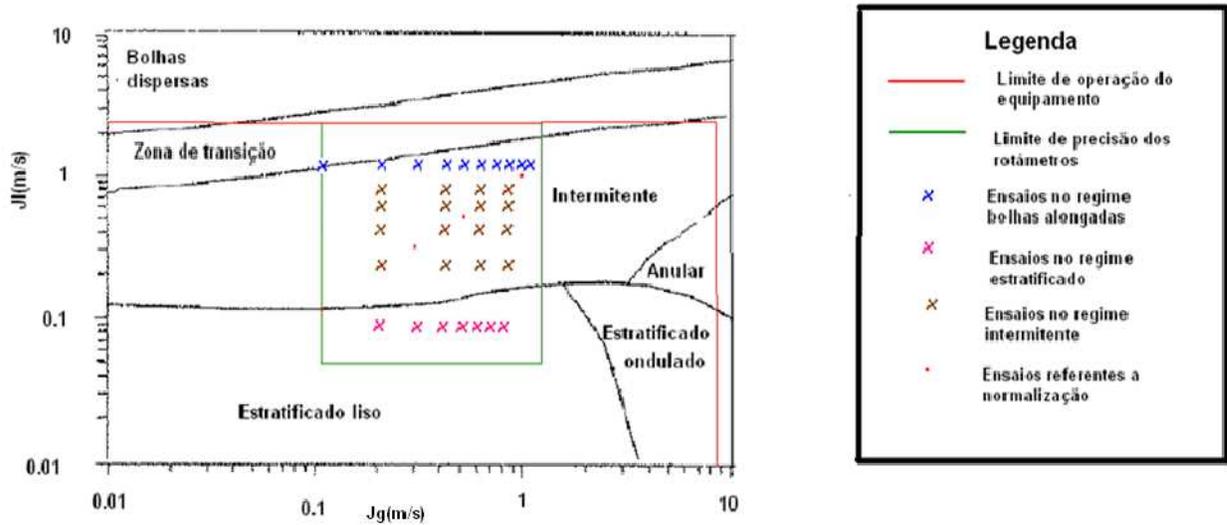


Figura 26: Região de escoamentos estudados

A figura 26 apresenta os limites das velocidades superficiais aos quais este estudo se restringiu. Foram realizados ensaios nos regimes intermitente, bolhas alongadas e estratificado. A fronteira externa representa o limite de operação do equipamento onde foram realizados os ensaios, enquanto a fronteira interna representa os limites de operação dos sensores de vazão utilizados para verificar as estimativas de vazão volumétrica.

O estudo foi realizado com um sensor de impedância com hastes e para um escoamento água-ar, estabelecendo um ponto inicial para o estudo proposto. A partir deste estudo será possível ponderar avanços da parametrização de informações em fluido bifásico com a utilização exclusiva de sensor de impedância. Ainda que a utilização de informações de pressão, temperatura e variáveis auxiliares tornarem as medições mais precisas, nem sempre estas estarão disponíveis nas aplicações de campo. A escolha dos padrões de escoamento intermitente, bolhas alongadas e estratificado foi feita devido a estas possuírem modelamentos geométricos consagrados e comportamento mais previsível em relação a outros, como o padrão agitado por exemplo.

A partir da figura 26, é possível concluir que a menor velocidade média na região corresponde à aproximadamente 0,2 metros por segundo e a maior a 1,64 metros por segundo. Aplicando uma margem de segurança para as componentes se deslocando acima da média

definimos as velocidades máxima e mínima de operação dos rastreadores e correlações como sendo 0,06125 metros por segundo e 6,125 metros por segundo, correspondendo a intervalos de tempo para a distância definida dos sensores equivalentes respectivamente a 2 e 0,02 segundos. Estes limites são importantes, pois serão utilizados como intervalo de testes do valor do atraso entre os sinais τ para todos os métodos de estimativa de velocidade.

Por fim, foi desenvolvida uma estratégia que obtém atrasos, sem necessitar do armazenamento de vetores de intervalos para ambos. Esta estratégia é o gatilhamento. Utilizando o conceito de fator de corte citado em Duarte (2007), ela detecta pontos de referências para as bolhas grandes e periódicas. Estes pontos de referência são considerados o início e o fim das bolhas grandes apresentadas no regime intermitente, e a partir destes pontos estabelecem as defasagens entre estes pontos de referência, podendo obter posteriormente informações sobre as velocidades da ponta e da cauda da bolha, e os comprimentos de bolha e de pistão.

4.1.1. Gatilhos

Utilizando as medidas de nível de líquido do sensor de impedâncias é possível determinar a presença de bolhas de maiores dimensões passando por ambos os sensores. A partir delas determinam-se as componentes de velocidade do escoamento

Segundo o trabalho de Feng (2010) as bolhas que possuam raio volumétrico equivalente (R_b) menor do 0,25 se deslocam praticamente a mesma velocidade que o líquido. O raio volumétrico equivalente é uma variável que estabelece a razão entre o raio volumétrico R_E (o raio teórico da bolha caso esta descreva uma esfera perfeita) da bolha e o raio do duto R , significando que a bolha se propagará mais rápido que a fase líquida a seu redor apenas quando a bolha detiver um raio volumétrico maior do que um quarto do raio do duto. A fórmula do raio volumétrico equivalente é dada pela equação 4.2:

$$R_b = \frac{R_E}{R} \tag{4.2}$$

Considerando as equações provenientes do ângulo teta calculado pela equação 2.17 e da área molhada descrita pela equação 2.21, o modelo decantado encontra-se um valor divergente deste. Calculando pelas equações do modelo um duto com nível equivalente a 75% de preenchimento por líquido, chegamos a um resultado equivalente a 80,42% da área do duto preenchida por líquido. Este valor serviu como uma referência teórica para posteriormente determinarmos a frequência de corte dos gatilhos utilizados. É importante ressaltar que este cálculo foi feito para uma bolha totalmente esférica ($r_1 = r_2$) correspondente ao maior valor de r_1 e, portanto, menor valor de razão em que a bolha se locomoverá a mesma velocidade que a fase líquida.

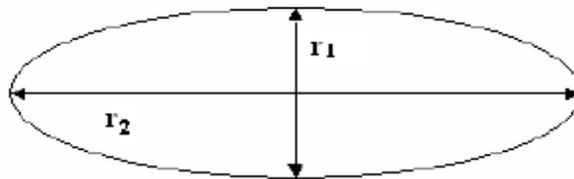


Figura 27: Formato de uma bolha deformada

Duarte (2007) apresentou gráficos de dependência funcional demonstrando para o padrão intermitente o número de bolhas alongadas detectada utilizando fatores de corte entre 0.4 e 0.8 se mantêm praticamente estável. Alguns trabalhos utilizam valores próximos a 0.5 enquanto outros recomendam utilizar uma faixa estável. Entretanto, em regiões de transição onde pistões possuem bolhas médias se deslocando a mesma velocidade que a bolha principal da célula unitária, não se deve esperar uma faixa muito extensa para aplicação destas técnicas. A figura 28 demonstra a presença desta faixa em um escoamento intermitente de ar e água.

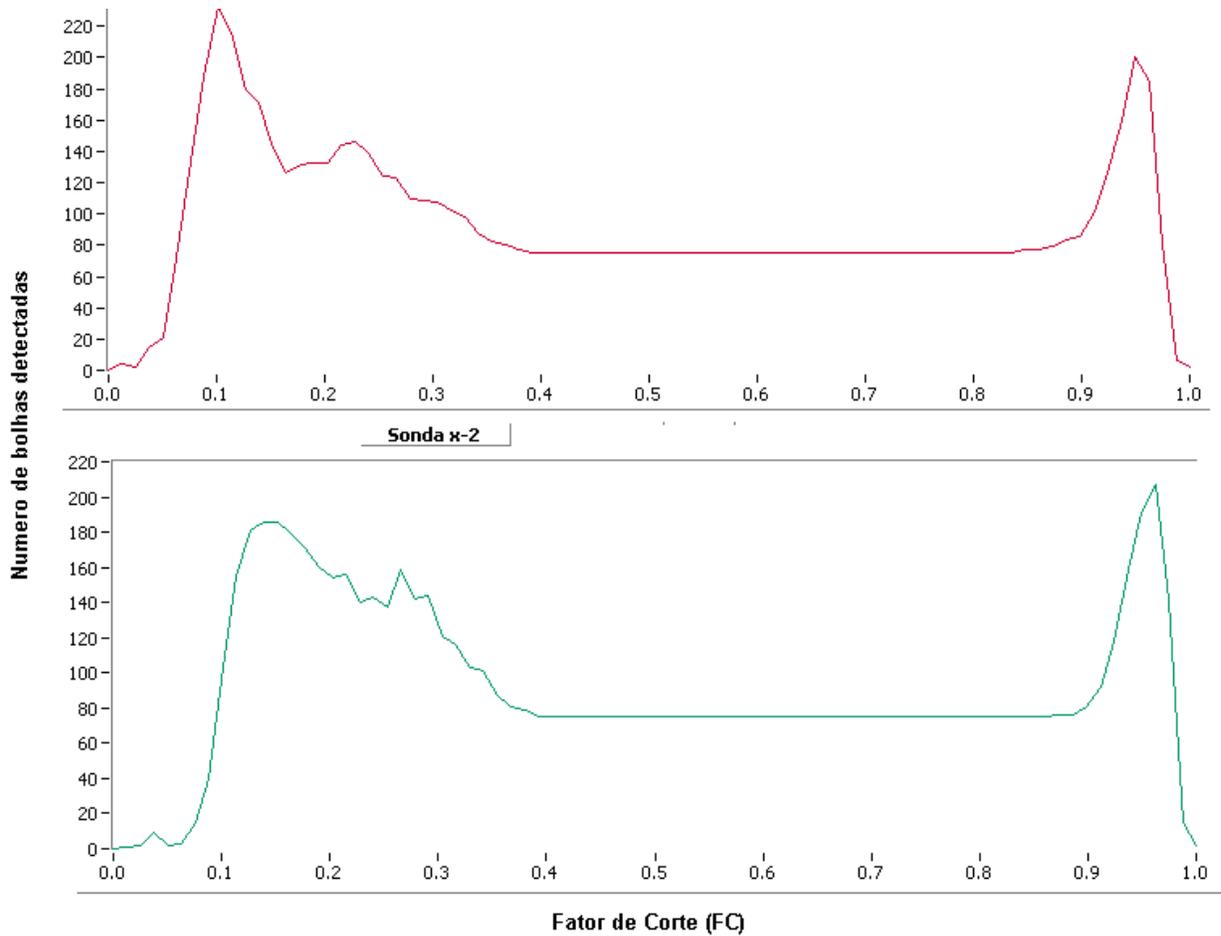


Figura 28: Dependência funcional de um escoamento intermitente ar-água [FONTE: Duarte 2007]

Detectar bolhas pequenas no líquido, entretanto, é uma tarefa quase impossível devido à frequência e disposição aleatória das mesmas. Elas ocorrem em grande quantidade simultaneamente dificultando contabilizá-las ou detectá-las separadamente.

Um sistema de medição de velocidade bolhas é constituído de dois gatilhos (triggers) visando detectar valores inferiores a 80,42% e superiores a este. Para o sensor, da montante quando é detectada a transição de um valor inferior ao gatilho para o valor superior, o instante é registrado na variável t_o , enquanto quando é registrado a transição de um valor superior para um valor inferior, é registrado a variável t_1 . Para o sensor da jusante, o mesmo procedimento é repetido, porém utilizando as variáveis t_2 e t_3 respectivamente. O valor de t_o , t_1 , t_2 e t_3 são

utilizados como referência por todo o tempo enquanto não for detectada a passagem completa de duas células (passagem esta marcada por duas alterações de cada um desses valores). Os valores futuros desses períodos, também devem ser armazenados, com a notação t' , a fim de poder futuramente calcular os períodos de tempo visados, como será explicado na seção sobre cálculo de velocidade.

A partir dos quatro pontos de referência, é possível estimar quando começa e termina a passagem da bolha tanto pela jusante como da montante, e pode-se inferir outras variáveis tais como os comprimentos de bolha e pistão dados por L_b e L_s respectivamente, que podem ser calculadas posteriormente a partir do intervalo de tempo entre estes períodos.

A Figura 29 mostra um algoritmo que descreve o processo de gatilhamento e obtenção de velocidade da cauda da bolha. Utilizando o fator de corte equivalente a 0,805 pode-se definir os instantes de passagem da cauda da bolha em cada sensor e posteriormente obter o atraso entre os mesmo e a velocidade de deslocamento da cauda da bolha

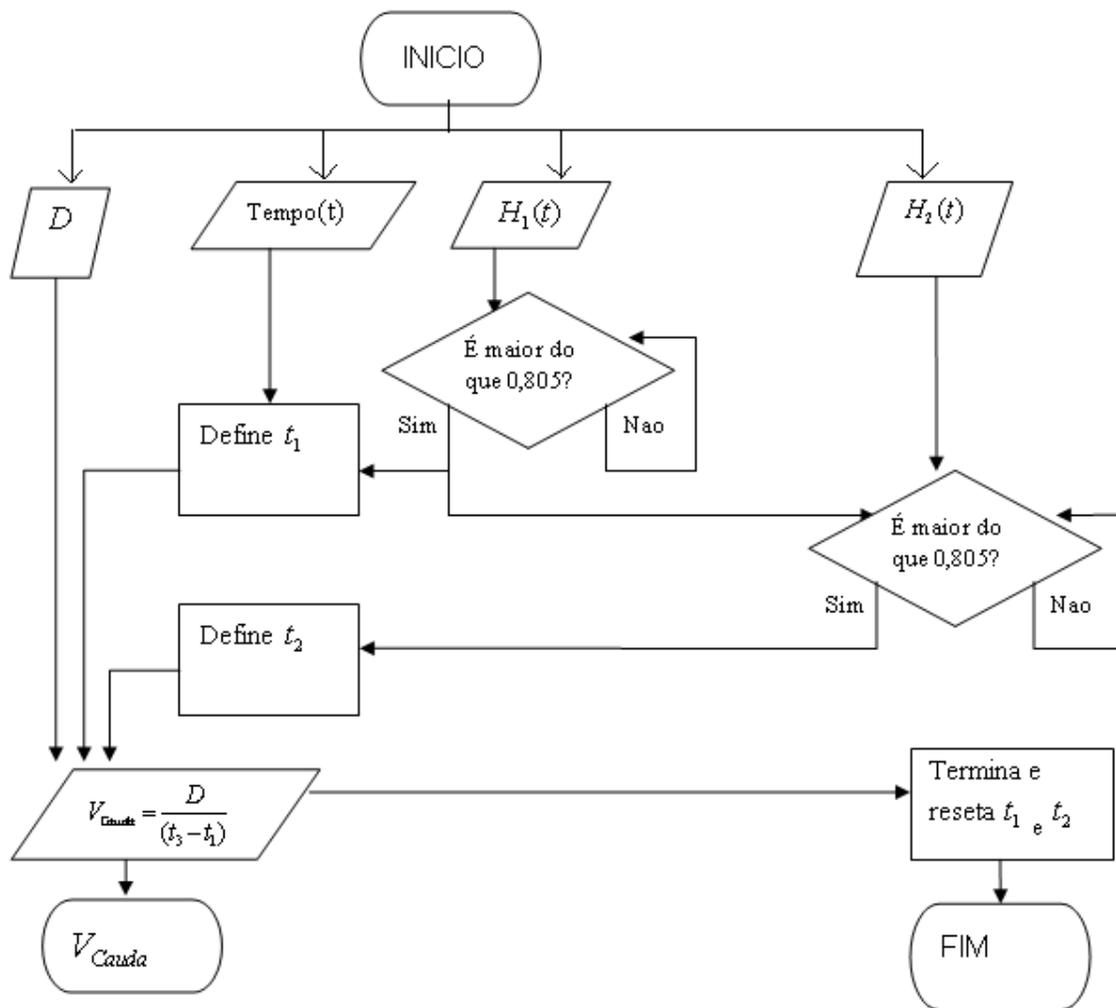


Figura 29: Fluxograma representando o processo de medição automática por gatilho

A sensibilidade de subida do gatilho na jusante contribuiu para que o zeramento do cronômetro não ocorra imediatamente no caso de uma bolha estar passando pelo mesmo quando outro corpo gasoso cruzar o primeiro sensor. Tal erro geraria uma velocidade infinita. Entretanto o sistema é vulnerável a outras particularidades dentre as quais se destacam duas: A primeira é o registro de uma velocidade excessivamente alta no caso de uma bolha grande se formar na parte intermediária da distância entre os sensores, e zerar o cronômetro ativado por outra bolha grande. A segunda é o cálculo de uma velocidade excessivamente baixa no caso de uma bolha se desfazer no meio da trajetória entre os dois sensores. O gatilho do primeiro sensor, e conseqüentemente o cronômetro ficariam muito tempo ativados até uma nova bolha ser detectada.

Desta forma, é necessário compreender estes gatilhos com uma solução heurística e suscetível a falhas que podem ocasionar erros grosseiros. Entretanto pode-se implementar métodos estatísticos que reconheçam estas velocidades muito elevadas ou muito baixas como “outliers”, valores muito acima da dispersão natural dos dados amostrados, e assim, rejeitem estes valores, considerando para efeitos instantâneos, a velocidade da célula anterior como a velocidade instantânea. Apesar de esta estratégia estar suscetível a erros, eles devem ser reduzidos em relação à obtenção de velocidades não condizentes com a frequência de escoamento.

A periodicidade do padrão de escoamento intermitente faz com que a velocidade da bolha de gás varie substancialmente de uma célula unitária para outra, impossibilitando um tratamento estatístico elementar, e, portanto, demandando o armazenamento de um vetor razoável de velocidades a fim de utilizar a amostragem para efeitos de remoção de outliers. Além do mais, a variação desta componente entre as células contribui para que erros grandes sejam gerados no caso de uma atribuição errada de velocidade ou perda de uma detecção pelo sistema de sensoriamento. É importante ressaltar que a maior parte do volume de gás se propaga dentro destas bolhas grandes, de modo que o valor desta medição contribuirá em muito para o valor da medição total de gás.

Este sistema, além de possuir como saída a velocidade detectada, fornece também a informação de ativação do gatilho do sensor da jusante. Esta ativação informa quando que a bolha principal esta passando pelo sensor da jusante, e quando é o pistão que esta transladando pelo sensor. Esta informação de ativação não funciona como o gatilho do segundo sensor, cujo valor é zerado logo após a sua ativação na subida. Este sinal se manterá igual a 1 por todo tempo que o sinal da tensão da jusante U_2 informe a seção de líquido inferior a 80,42% da seção do duto e se estabelecerá em 0 no restante do tempo. Esta informação será importante posteriormente para cálculos de vazão ao selecionar a velocidade adequada, uma vez que no modelo de Taitel Barnea possui duas velocidades para a fase gasosa e duas velocidades para a fase líquida.

4.1.2. Rastreadores Numéricos

Os rastreadores numéricos são soluções heurísticas apresentados como uma solução mais dinâmica do que a correlação cruzada, visando obter a velocidade instantânea de uma seção de área do escoamento, e visa obter esta informação através de iterações, em um período tão curto quanto possível. Desta forma não precisa esperar por uma bolha de referência e nem necessita de um grande período de amostragem para efeitos de medição. Estes rastreadores baseiam-se no princípio de um sinal “perseguir” o outro considerando um sistema de passos iterativos utilizando fundamentos do cálculo numérico.

O desenvolvimento dos rastreadores vem principalmente do método de Newton-Raphson para uma função desconhecida, que é o protótipo de diversos métodos utilizados no cálculo numérico. Segundo Dennis e Schnabel (1996) o método de Newton-Raphson é um método iterativo que busca encontrar a raiz de uma equação a partir da tangente da mesma de modo iterativo, seguindo uma seqüência de passos. O método segue as equações abaixo:

$$f'(x_c) = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x_c)}{\Delta x} \quad 4.3$$

$$x_+ = x_c - \frac{f(x_c)}{f'(x_c)} = x_c - \frac{y \cdot \Delta x}{\Delta y} \quad 4.4$$

Onde x_c representa a atual raiz calculada pelo método e x_+ representa a raiz calculada no passo seguinte. Para o caso dos sinais de jusante e montante foi proposto um modelo iterativo onde o sinal equivalente a H equivale a uma função $f(t + \tau)$ do tempo e de um atraso τ , e que se pode encontrar o valor τ iterativamente.

A partir destes cálculos pode-se estender este método para a obtenção de uma solução desejada ao definir ambos o holdup da jusante H_2 como a função $f(t)$ e o holdup da montante

H_1 como a equação $f(t - \tau) + h(t)$ onde $h(t)$ é a variação entre ambos os sinais em seus pontos equivalentes. A técnica considera que o valor de $h(t)$ permanecerá sempre baixo e oscilando obtendo valores próximos a zero por diversas vezes, desta forma pode ser equacionado pelo método:

$$H_2(t) - H_1(t + \tau) = h(t + \tau) \quad 4.5$$

$$h'(t + \tau) = \frac{\Delta h}{\Delta(t + \tau)} = \frac{H_2(t) - H_1(t + \tau)}{\Delta(t) + \Delta(\tau)} = \frac{H_2(t) - H_1(t)}{\Delta(t) + \Delta(\tau)} - \frac{H_1(t + \tau) - H_1(t)}{\Delta(t) + \Delta(\tau)} \quad 4.6$$

Uma vez que a variação Δ do tempo é fixa e equivalente a 0.01 segundo e é muito menor do que os valores da variação de τ , obtém-se:

$$h'(t + \tau) = \frac{\Delta h}{\Delta(t + \tau)} = \frac{H_2(t) - H_1(t + \tau)}{\Delta(t)} = H_2'(t) - H_1'(t + \tau) \quad 4.7$$

$$(t + \tau)_+ = t + \tau - \frac{h(t + \tau)}{h'(t + \tau)} \quad 4.8$$

Considerando que o valor de t não varia nesta aproximação, permanecendo sempre constante, temos que Δt é igual a zero, desta forma:

$$\Delta \tau = \frac{h(t + \tau)}{h'(t + \tau)} - \Delta t \approx \frac{H_2(t) - H_1(t + \tau)}{h'(t + \tau)} \quad 4.9$$

Portanto é possível estabelecer por estas equações um método iterativo para determinar o atraso τ_A . O algoritmo consiste em considerar que para cada ponto contido no primeiro sinal (representando cada um uma área preenchida por ambas as fases) existe um ponto equivalente,

defasados por um período τ_A . Estes pontos se equivalem ao tempo médio que decorre para o fluido viajar de um sensor para o outro. Basicamente o rastreador se aproveita da dispersão de bolhas e flutuações na condutividade do líquido para encontrar o atraso τ_A com base na taxa de variação do Holdup. Como a Figura 30 demonstra, inicialmente o algoritmo subtrai o Holdup H_2 de H_1 obtendo a diferença entre ambos em seguida deriva ambos os Holdups no tempo e divide um pelo outro. Se o resultado desta divisão for positivo, o valor da subtração é dividida pelo valor da derivada de H_1 no tempo, obtendo o que é denominado passo de atraso. Este passo representa o tempo que H_1 necessitaria ser defasado para atingir o seu ponto equivalente caso a sua derivada se mantivesse constante. Por exemplo, se o resultado da subtração for positivo e a derivada de H_1 negativa será determinado um passo negativo que diminuirá o atraso de H_2 , uma vez que este ponto estará atrasado demais em relação ao seu ponto equivalente.

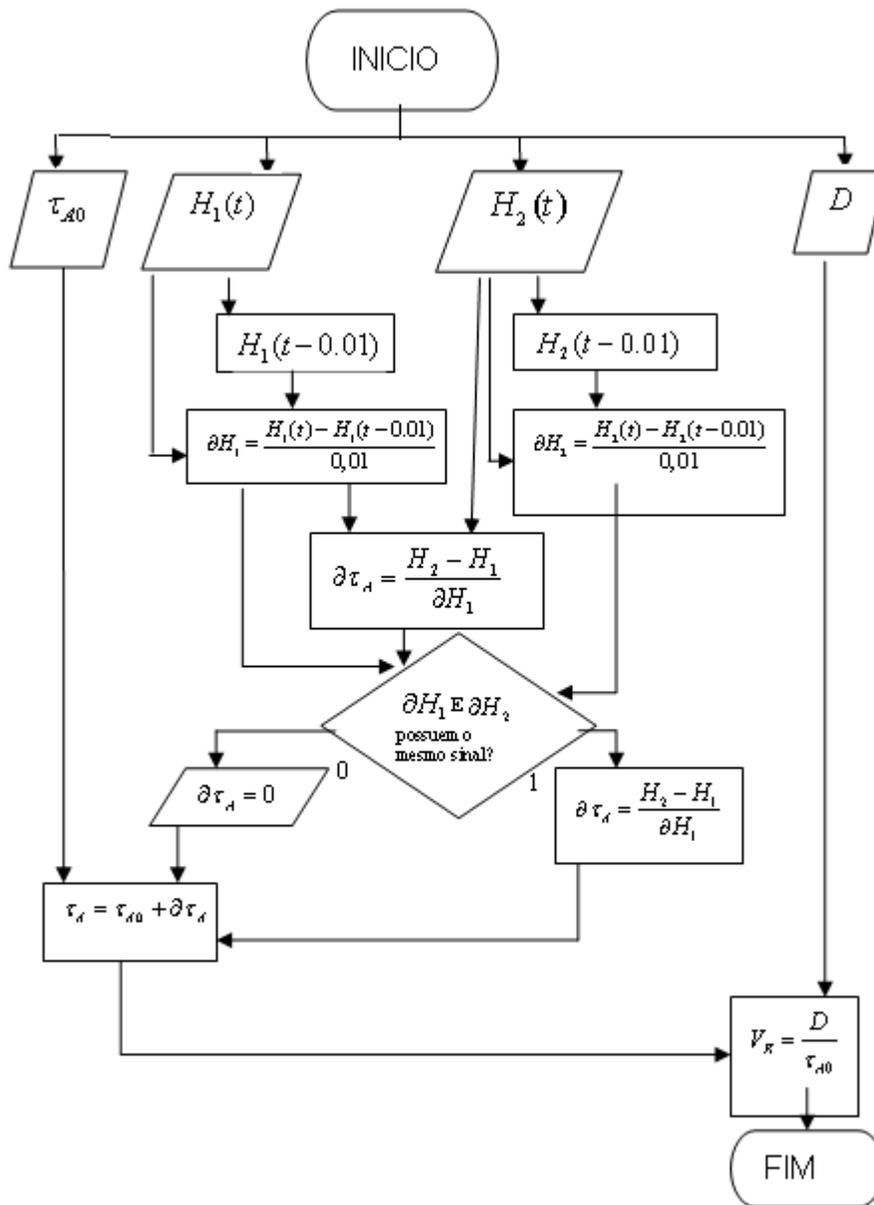


Figura 30: Algoritmo referente ao rastreador de atraso entre os sinais

Na figura 30, $\partial\tau_A$ é o passo realizado pelo algoritmo e $\partial\tau_{A0}$ o atraso equivalente a $\partial\tau_A$ antes do cálculo do novo passo. Após a determinação do passo este é limitado a um valor máximo. Esta medida é tomada para evitar que singularidades na derivada do Holdup possam comprometer todo o processo de “perseguição” de sinais em uma única interação, dado que uma derivada equivalente a zero ou um valor desprezível resultaria em um passo infinito.

É importante ressaltar o método de cálculo de ∂H_1 . Para que o rastreador seja bem sucedido em relação a perseguir o ponto correspondente de ambos os sinais, orientando-se pela dinâmica dos fluidos, é necessário que a derivada ∂H_2 represente uma variação na geometria de ambas as seções de escoamento amostradas ou mesmo uma variação de condutividade do líquido, ao invés de representar a variação no ruído de um sinal. Uma vez que o ruído já foi filtrado, e sabe-se que a frequência máxima do sinal corresponde 330 Hertz, a derivada é calculada utilizando o ponto instantâneo de A e o ponto defasado em 0,01 segundos, ou seja, representado a variação da dinâmica dos fluido a 100 Hertz , e sendo inferior ao menor intervalo de defasagem para a região , definido anteriormente como 0,02 segundos.

É muito importante para esta técnica também que os sinais estejam muito bem calibrados, uma vez que os erros de calibração serão propagados para as diferenças e derivadas, podendo deixar os sinais bastante instáveis.

O valor do atraso é atualizado a cada iteração, sendo somado ou subtraído o passo no total acumulado. Não obstante existe uma situação que este rastreador pode tomar uma decisão grosseira, locomovendo-se até mesmo na direção oposta da desejada . Esta situação ocorre na presença de um pico ou um vale.

Na presença de um pico ou vale, o valor da subtração poderá ser negativo ou positivo independentemente do fato de o atraso estar abaixo ou acima do ideal, contribuindo para que o rastreador opte muitas vezes por tomar um passo da direção errada durante a presença destas entidades. A figura abaixo exemplifica uma situação que o pico confunde o rastreador fazendo com que este pense que está adiantado demais quando na verdade este mais atrasado do que deveria.

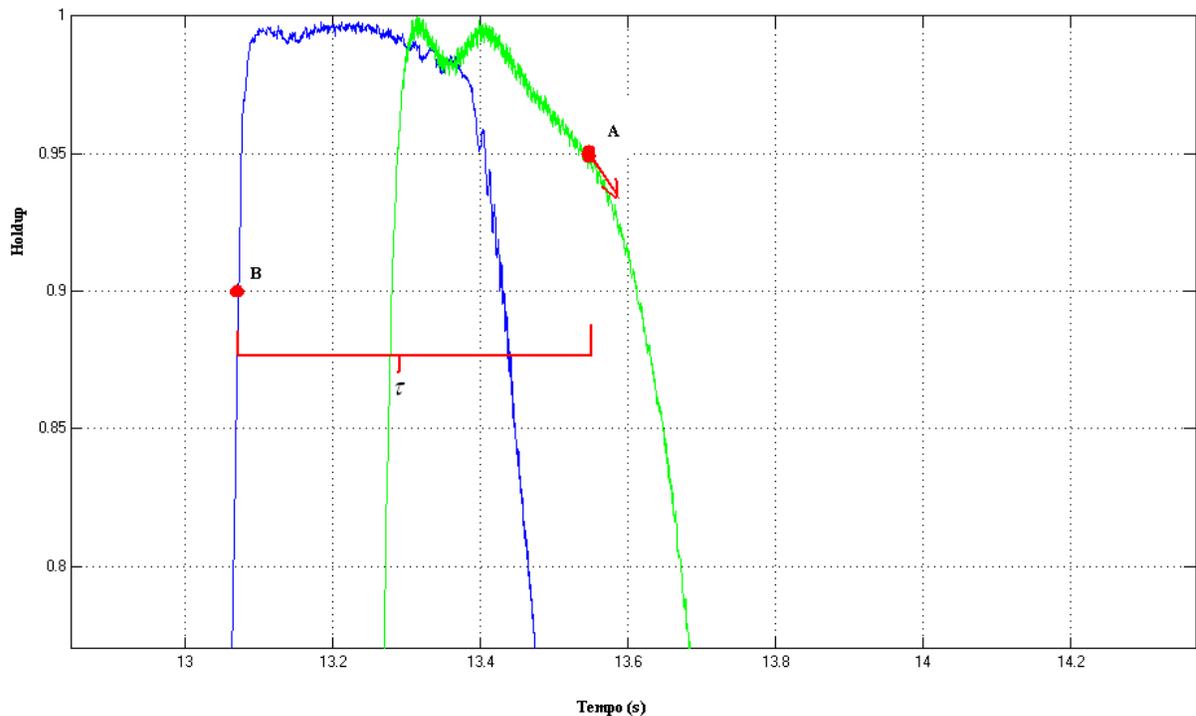


Figura 31: Paradoxo do rastreador: O valor de B é menor que A e a A' demonstra que A decresce em direção a B, mas B na verdade está atrasado, e um pico entre ambos os sinais causa o paradoxo.

Na presença de um pico ou vale o valor da divisão entre ambos os Holdups se torna negativo, uma vez que estes estarão em direções opostas. Ao detectar este constante negativa, o valor do passo é determinado como nulo, de modo que o atraso total se manterá constante. Em outras palavras o sistema esperará até o momento pertinente para realizar as iterações de “perseguição” de sinal.

Para a detecção de picos e vales ser efetiva é necessário que o sistema utilizado na implementação deste algoritmo seja muito rápido, caso o contrário poderá haver mais de um pico ou um vale entre ambos os sinais, o que anularia eficiência do detector. Apesar da distância de separação entre os sensores, a alta velocidade do sistema que adquire 3000 pontos por segundo contribuiu para que o sistema se mantenha estável.

4.1.3. Correlação Cruzada

A técnica de correlação cruzada é freqüentemente utilizada para medição da velocidade dos fluxos bifásicos (Beck-Plaskowsky,1987).Nesta técnica ,dois sensores são usados para monitorar o fluxo, uma sendo posicionada a jusante do outro.

Estes sensores são usados para detectar variações temporais em algumas propriedades do fluxo, tais como permissividade, densidade ou condutividade. O tempo de atraso entre os sinais de saída dos dois sensores podem ser encontrados pelo cálculo da correlação cruzada em função destes dois sinais e sobre uma medida por um período definido T. Integra-se no tempo t o produto de dois sinais x e y de sensores pré-posicionados e afastados um do outro por uma distância conhecida. A função de correlação cruzada é dada por:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \sum_0^N x(n) \times y(n - m) \quad 4.10$$

O sinal de y é transladado no tempo por m unidades, equivalente a um intervalo igual a variável τ . Deste modo, por relação estatística, o tempo de transição de um sensor para o outro determinará o maior valor para a correlação cruzada. Desta forma o valor que resulta no τ pico da função $R_{xy}(\tau)$ corresponderá ao tempo necessário para o fluido se deslocar de um sensor a outro, de modo que a velocidade v pode ser observada pela equação 4.11:

$$v = \frac{L}{\tau} \quad 4.11$$

A correlação cruzada, entre os métodos propostos para a medição de velocidade, é o mais consagrado, e o mais utilizado em processos de medição de vazão até o momento. Entretanto, esta metodologia possui suas desvantagens como a sua demanda pela utilização de memória e poder de processamento.

Uma consideração pertinente que deve ser ponderada na implementação da correlação cruzada em um sistema de tempo real, é o grande trabalho computacional demandado pela

mesma. A multiplicação e somatório de diversos pontos dentro do período, assim como a comparação destes valores, exige um alto processamento computacional, executado por um considerável período de tempo, além de uma alocação de um grande espaço de memória.

Um método para reduzir o trabalho computacional de maneira simples é reduzir o número de pontos com que irá se trabalhar em um mesmo período de tempo. O número de pontos pode ser reduzido calculando-se a média-móvel de N pontos e definido este valor como o vigente pelo mesmo período em que os N pontos foram processados. Este processo é chamado de redução de dados e é utilizado para economizar recursos computacionais a acelerar o tempo de resposta do programa Na simulação realizada os 3000 pontos do sinal por segundo foram reduzidos para 60 pontos por segundo, sendo estes definidos pela a seguinte equação:

$$H_1^* = \frac{1}{50} \sum_{i=0}^{50} H_1(i) \quad 4.12$$

$$H_2^* = \frac{1}{50} \sum_{i=0}^{50} H_2(i) \quad 4.13$$

Onde a variável i equivale ao índice em um vetor de 50 pontos consecutivos no tempo. Posteriormente este número menor de pontos é introduzido na correlação cruzada para um período T de 2 segundos, transladando o tempo m pontos equivalentes ao atraso τ limitado entre 0.02 e 0.5 segundos. Estes valores são introduzidos na equação 4.14 adaptada para as variáveis do sistema, dadas por.

$$R_{HH}(m) = \frac{1}{T} \sum_0^N H_1(n) \times H_2(n - m) \quad 4.14$$

Onde H_1 é o Holdup do primeiro sensor e H_2 o Holdup do segundo sensor. Em seguida, os valores de m são guardados em um vetor e aquele que resultar no maior valor da correlação dada por $R_{HH}(m)$, é armazenado é usado de quociente da equação 4.15, onde L é o espaçamento entre os sensores, obtendo a velocidade desejada definida como V_{Corr}

$$V_{Corr} = \frac{L}{\tau}$$

4.15

A Figura 32 Descreve a manipulação de variáveis pelo algoritmo da correlação cruzada elaborado para a aplicação da mesma em um microcontrolador e com armazenagem de pontos limitada por k elementos:

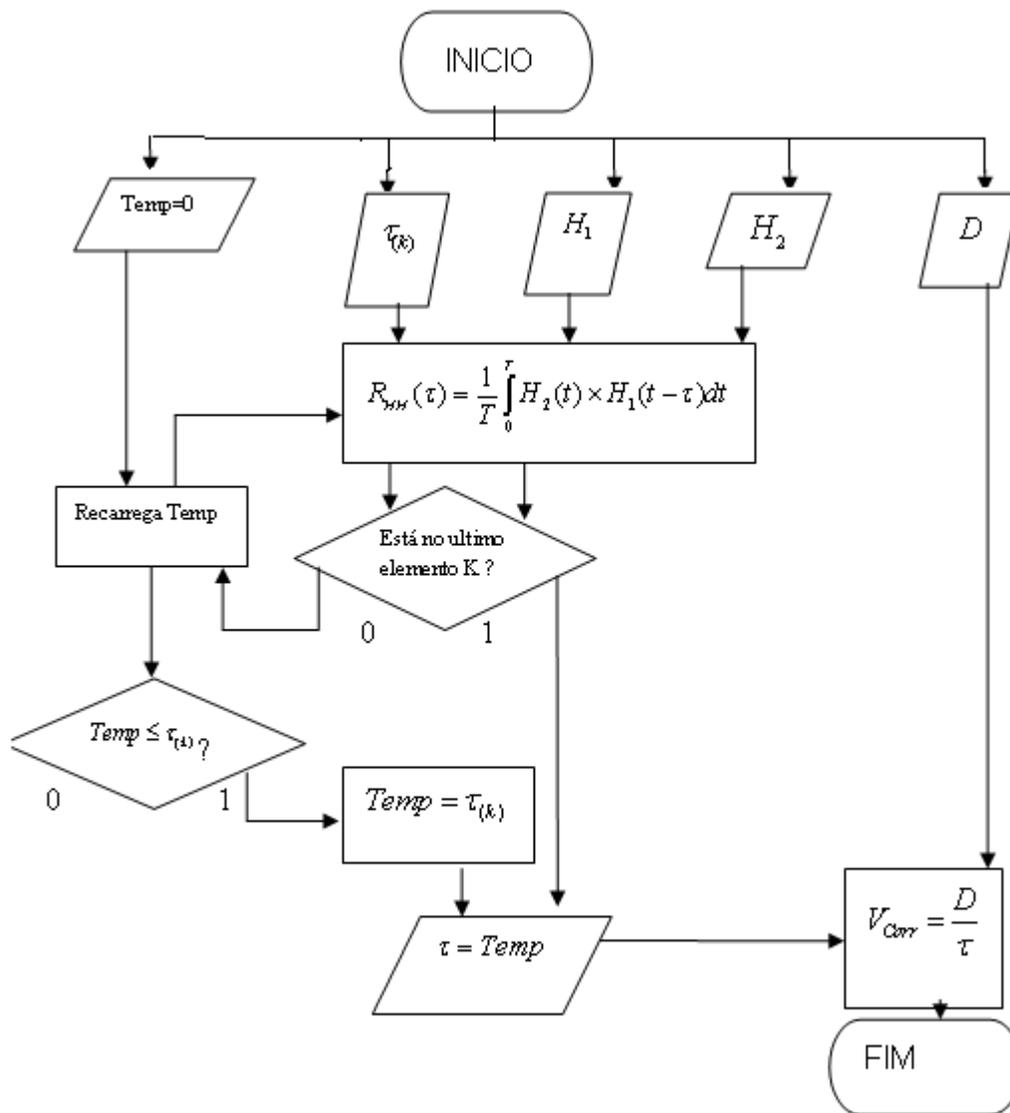


Figura 32: Fluxograma demonstrando a o algoritmo da correlação cruzada

4.1.4. Covariância

Assim como a correlação cruzada é utilizada como uma ferramenta poderosa para estabelecer o atraso em sinais, a covariância pode ser utilizada de maneira análoga. A covariância ou variância conjunta é o momento conjunto de primeira ordem centrado em médias das variáveis X e Y, estabelecendo um grau de interdependência ou inter-relação numérica entre elas.

Uma variância próxima de zero estabelece total independência entre as variáveis, enquanto um valor positivo estabelece dependência direta entre as variáveis estabelecendo que estas caminham juntas. Já um valor de módulo elevado, porém negativo, estabelece dependência inversa entre ambas variáveis, estabelecendo que os sinais se movem em direções opostas. A fórmula 4.16 demonstra a equação padrão da covariância para funções x e y contendo i elementos cada, onde $p(x_i, y_i)$ é a frequência relativa ou probabilidade de ocorrer o par (x_i, y_i) e a média de cada variável é representada por um variável μ .

$$\sigma_{xy} = \sum_{i=1}^n [(x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) p(x_i, y_i)] \quad 4.16$$

Analogamente a utilização de m na correlação cruzada, esta também pode ser utilizada na covariância estabelecendo a seguinte relação:

$$\sigma_{H_1 H_2}(m) = \frac{1}{T} \sum_o^N (H_1(n) - \mu_{H_1})(H_2(n - m) - \mu_{H_2}) \quad 4.17$$

Uma vez que um valor positivo alto estabelece dependência e simetria de deslocamento, pode-se interpretar esta dependência como sendo um dos fenômenos fluidodinâmicos presentes no escoamento, estabelecendo m como o número de pontos equivalente ao tempo médio de deslocamento do fluido no percurso da montante para a jusante. Posteriormente pode-se calcular a velocidade pela relação entre o atraso conhecido e a distância entre as hastes do equipamento. O

fluxograma abaixo demonstra a obtenção do valor de τ e posteriormente do vetor de velocidade denominado aqui V_{corr} .

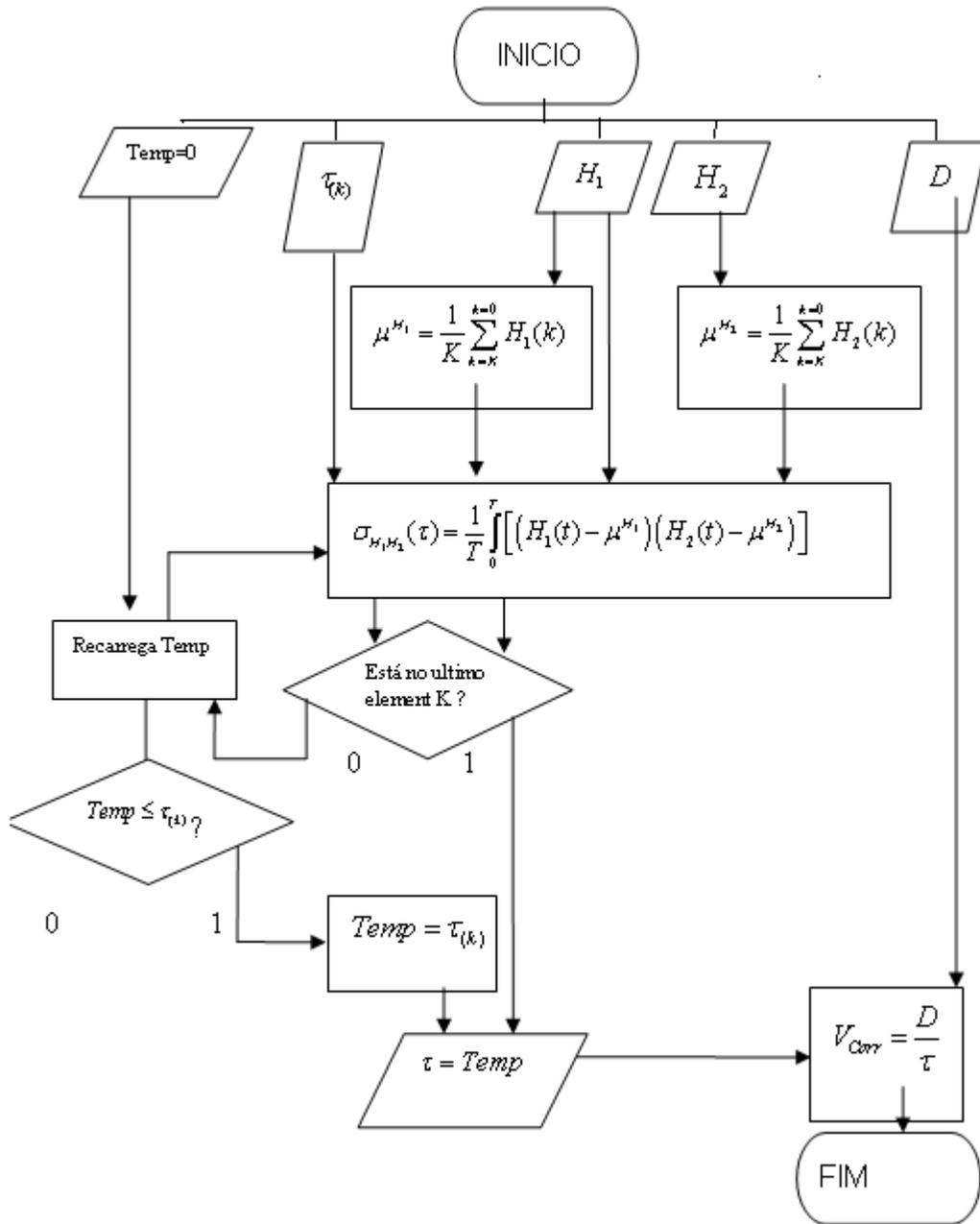


Figura 33: Fluxograma demonstrando a o algoritmo da covariância

Uma das possíveis vantagens da covariância, é que uma vez que esta é calculada sobre a variação do sinais, pode ser mais sensível as variações de sinal do que a correlação cruzada necessitando de uma amostragem menor para estabelecer boas relações com os fenômenos físicos presentes no escoamento termodinâmico.

4.2. Estratégias para Obtenção de Parâmetros no Regime de Intermitente

4.2.1. Holdup e Fração de Vazio

A determinação do Holdup e posteriormente das áreas preenchidas por líquido depende de qual padrão de regime de escoamento o fluxo está. Caso a proporcionalidade direta do sensor de impedância com haste em relação ao nível de líquido seja mantida, será possível estabelecer uma relação entre o nível de líquido e o sinal após uma normalização do sinal.

Após a obtenção de nível de líquido, ainda é necessário obter relações trigonométricas a fim de estabelecer uma relação entre nível e áreas. Tanto para o regime intermitente, como para o regime estratificado são utilizadas as equações 2.17 e 2.21, baseadas em um fluido onde a parte líquida esta perfeitamente decantada e que levam a relação abaixo:

$$H = \frac{Al}{A} = \frac{(\theta - \text{SEN}(\theta))}{2\pi} \quad 4.18$$

Um dos grandes problemas desta técnica é que em um sistema dinâmico, não haverá tempo para a estabilização do nível de líquido, o qual jamais estará totalmente nivelado, podendo essa relação trigonométrica estabelecer uma estimativa grosseira das áreas.

4.2.2. Velocidade do gás na bolha V_{GB}

A Velocidade V_{GB} se refere à velocidade do gás na bolha principal da célula unitária. Esta velocidade é frequentemente a mais elevada entre os vetores estudados. Devido à diferença de densidade, a bolha deformada se locomove mais rapidamente que o líquido a sua volta sofrendo inclusive um efeito de alongamento ou encurtamento, devido às diferenças de velocidade na ponta e na cauda da bolha.

Uma forma de relacionar uma aferição instantânea é levantar outra hipótese de que a velocidade do gás se mantém praticamente constante em relação à velocidade da ponta, equivalendo á:

$$V_{GB} = V_{Ponta} \quad 4.19$$

Desta forma pode-se obter uma aproximação para esta velocidade a partir das velocidades de ponta (V_{Ponta}). Esta velocidade, juntamente com a velocidade da cauda (V_{Cauda}) são medidas por dois gatilhos, valores de 0 ou 1 referenciados por pontos no gráfico que identificam a transição do setor contendo a bolha para o setor contendo o pistão no regime estratificado . Os outros dois gatilhos serão utilizados para medir os tempos em que é detectada a ponta e a cauda da bolha, seguindo o exemplo abaixo.

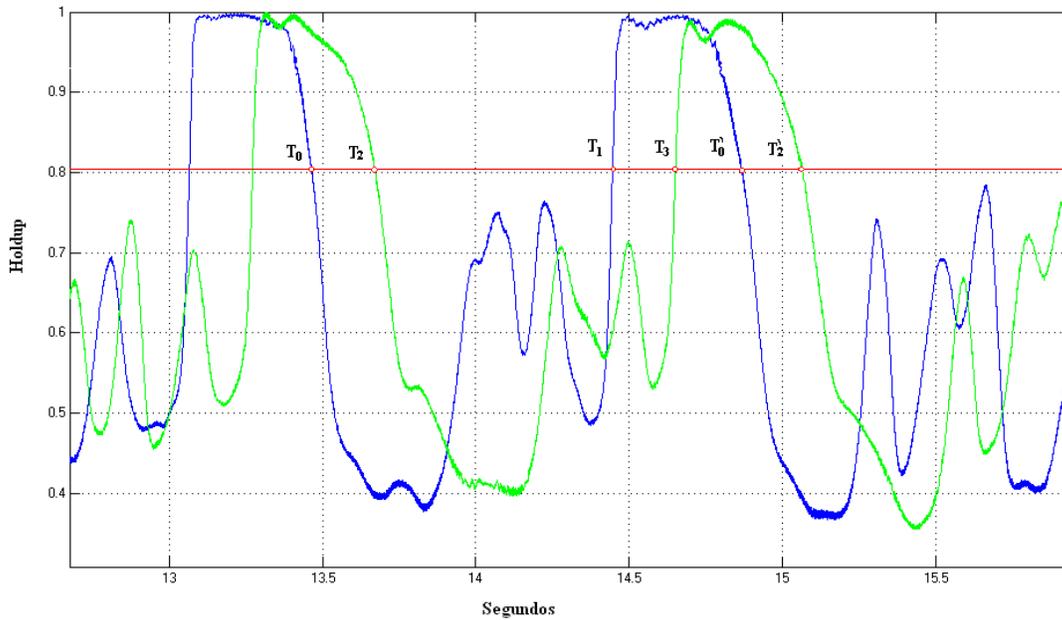


Figura 34: instantes registrados pelo sistema de gatilhamento

Na Figura 34, o tempo t_0 marca o instante em que a ponta da bolha passa pelo sensor da montante, enquanto t_1 marca o instante em que a cauda da bolha atravessa o mesmo sensor. Os instantes t_2 e t_3 são análogos aos instantes t_0 e t_1 mas para o sensor da jusante. Os instantes da célula unitária futura são denominados por t_0' , t_1' , t_2' e t_3' . Desta forma, considerando que a velocidade pode ser calculada pela distância conhecida D dividida pelo tempo decorrente, pode-se calcular as velocidades da ponta e da cauda da bolha através das equações 4.20 e 4.21:

$$V_{Ponta} = \frac{D}{(t_2 - t_0)} \quad 4.20$$

$$V_{Cauda} = \frac{D}{(t_3 - t_1)} \quad 4.21$$

4.2.3. Velocidade da célula unitária V_B

A componente V_B é a notação que define a velocidade média com que a célula unitária se move como um todo. Como pode ser visualizada na figura 27, a posição em que a velocidade é válida, é uma posição adjacente à cauda da bolha, tornando portanto a velocidade V_B muito próxima da velocidade da cauda da bolha. De acordo com Duarte (2007) para diversos experimentos a velocidade da cauda da bolha e a velocidade V_B nunca se divergiram em mais de 2 %. Desta forma, para se calcular V_B como primeira aproximação, é possível inferir:

$$V_B = V_{Cauda} \quad 4.22$$

4.2.4. Velocidade do gás no pistão V_{GS}

A velocidade V_{GS} se refere à velocidade do gás no pistão, portanto a velocidade das bolhas menores que se encontram no pistão. Uma vez que podem existir diversas bolhas pequenas e médias, a geometria transversal do escoamento, nesse instante não é simples de ser adquirida.

O sinal representativo do nível de preenchimento do duto, e conseqüentemente o Holdup mensurados irão se comportar como um sinal contínuo e imprevisível, de modo que não será possível esperar por postos de referência a exemplo dos gatilhos. Desta forma é necessário utilizar técnicas que acompanhem o sinal de maneira contínua, estabelecendo valores para as taxas de deslocamento em tempo real, ou ao menos muito reduzido.

Os rastreadores e as correlações são ferramentas capazes estabelecer essas taxas, mesmo para funções quase aleatórias, portanto uma vez que os rastreadores e correlações respondam de maneira rápida o suficiente, o valor de V_{GS} pode ser considerados o valor de V_{Corr} , V_{RA} e V_{cov} . Estudos são demandados a fim de comparar a exatidão e precisão destas inferências, a fim de estabelecer qual delas é a mais adequada.

4.2.5. Velocidade do líquido no pistão V_{LS}

Uma vez que no pistão, o gás está concentrado em bolhas pequenas, as quais podem ser consideradas viajando a mesma velocidade do líquido, uma primeira aproximação sugere:

$$V_{LS} = V_{GS} \quad 4.23$$

Entretanto é necessário valorizar uma das peculiaridades do escoamento em um duto totalmente horizontal. Em um duto horizontal, o duto funciona como um decantador grosseiro contribuído para que as forças de empuxo elevem o gás para a parte superior da canalização, se aproximando da parede do tubo. Desta forma caso as forças de fricção fossem nulas, a velocidade da bolha se desenvolveria até a velocidade do líquido fluindo junto à borda superior do tubo, de modo que estas de fato se equivaleriam.

Apesar de desprezar forças de atrito para aproximar V_{GS} de V_{LS} ser possível e utilizável, definir este V_{LS} como a média da velocidade em toda a seção transversal do tubo pode resultar em uma grande distorção de valores. Sabe-se que devido à força de atrito entre líquido e superfície do tubo a velocidade do líquido obedece a um perfil linear. As velocidades do perfil do líquido podem ser aproximadas para as equações 4.24 e 4.25, no regime laminar e turbulento respectivamente (Noakes & Sleight ,2009):

$$V = V_m \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad 4.24$$

$$V = V_m \left(1 - \frac{r}{R} \right)^n \quad 4.25$$

Onde V_m é a velocidade do líquido no meio, R o raio do tubo, r a distância do centro do tubo e $V_{(r)}$ a velocidade do líquido na mesma distância do centro. O número n é um coeficiente que varia de acordo com o número de Reynolds, o qual poderá variar o tempo todo em um

processo com a aferição do sensor. Apesar de ser desejável desenvolver uma correlação entre V_m e V_{GS} atingindo uma velocidade corrigida \hat{V}_{LS} , com a finalidade atingir uma precisão maior, desenvolver tal modelo para um sensor com informações limitadas não é um trabalho simples.

4.2.6. Velocidade do filme de líquido V_{LF}

Talvez a componente de maior variabilidade do padrão intermitente, V_{LF} descreve a velocidade média do filme de líquido que se encontra abaixo da bolha. A translação da bolha cria diferenças de pressão no duto que podem tornar a componente de V_{LF} até mesmo negativa, de modo que o líquido do filme se desloque para o sentido oposto do que a fluxo bifásico.

Desta forma, a componente V_{LF} deve ser calculada a partir de das outras velocidades conhecidas, mediante balanços de massa. No modelo de Taitel e Barnea (1990) através do valor conhecido da velocidade superficial do gás J_G e do líquido J_l , utilizando como auxiliares as variáveis das às velocidades V_B , V_{GS} , V_{LS} além da fração de líquido no pistão R_S , pode-se determinar V_{LF} e V_{GB} devido aos balanços de massa na célula unitária:

$$V_{LF} = V_B + \frac{R_S(V_{LS} - V_B)}{R_{BF}} \quad 4.26$$

$$V_{GB} = V_B + \frac{(1 - R_S)(V_{GS} - V_B)}{1 - R_{BF}} \quad 4.27$$

Onde R_S é a Fração de líquido (Holdup volumétrico) no pistão e R_{BF} é a fração de líquido na bolha. Para efeitos de aproximação, R_S pode ser aproximado para 1 (pistão não areado) ou mesmo pode-se utilizar a média do Holdup mensurado no pistão para determinar R_{BF} em outra aproximação, um pouco mais adequada. Segundo Zwanziger (2009), o valor de R_{BF} pode ser calculado a partir do ângulo θ pela seguinte equação:

$$R_{BF} = \frac{\theta - \text{Sen}(\theta)}{2\pi} \quad 4.28$$

As equações 4.30 e 4.31 demonstram que também é possível obter a velocidade V_{LS} a partir de V_{GB} e V_B , de modo a formar um bom mecanismo de comparação com os valores obtidos pelas correlações e rastreadores.

4.2.7. Comprimento da Bolha L_B

O comprimento L_B , referente ao comprimento da bolha pode ser calculado multiplicando a velocidade da bolha V_{GB} pelo tempo decorrido para que a bolha se inicie e termine. De acordo com a figura 17, L_B pode ser calculado como:

$$L_B = V_{GB} \cdot (t_3 - t_2) \quad 4.29$$

De acordo com Van Hout, Shemer e Barnea (2002) o modo mais preciso de determinar o comprimento de bolhas com a mesma velocidade do sistema multifásico, é propagar imediatamente a velocidade da ponta ou da cauda da bolha considerando-a a velocidade média da Bolha. Uma vez que V_{ponta} é obtida de forma mais rápida, este valor foi considerado no estudo como sendo a velocidade da bolha V_{GB} .

4.2.8. Comprimento do pistão L_S

Similarmente aos cálculos de L_B , o comprimento do pistão L_S pode ser calculado multiplicando a velocidade média do líquido entre o início e o final do pistão multiplicado pelo tempo decorrido para que o pistão se inicialize e finalize. Neste caso os tempos são de início e fim do pistão pode ser considerados t_3 e t'_2 respectivamente. A velocidade média entre os pontos também pode ser calculado de forma que:

$$L_S = V_{LS} \cdot (t'_2 - t_3) \quad 4.30$$

4.3. Regime de bolhas alongadas

4.3.1. Velocidade da fase gasosa V_{GS}

No regime de bolhas alongadas, presente em um escoamento horizontal, a vazão de gás é suficiente para a formação de bolhas deformáveis, mas não de grandes bolhas e conseqüentemente pistões. Uma vez que estas bolhas não possuem diâmetro suficiente para se deslocar mais rapidamente do que o líquido, o escoamento pode ser descrito como um modelo homogêneo.

O modelo homogêneo de fração de vazio considera que as fases de gás e de líquido se movem na mesma velocidade. Este modelo pode ser adequado para o fluxo intermitente, ou mesmo para o padrão de escoamento Bolhas, onde as bolhas pequenas se movem na mesma velocidade que o líquido (Niño, 2002).

Da mesma maneira que a variável V_{GS} para o regime intermitente, a velocidade poderá ser definida por V_{Corr} , V_{RA} , ou V_{Cov} .

4.3.2. Velocidade da fase líquida V_{LS}

Uma vez que é feita a consideração de que para o regime de bolhas alongadas, o escoamento se comporta como o modelo homogêneo, pode-se inferir que a fase líquida irá se deslocar a mesma velocidade da fase gasosa. Neste caso, como primeira aproximação considera-se:

$$V_{LS} = V_{GS} \quad 4.31$$

Contudo, analogamente ao cálculo de V_{LS} para o regime intermitente, para uma aproximação otimizada, pode-se considerar as equações do perfil de velocidade também. Apesar de que nesta hipótese o fluido não se comporta exatamente como o modelo homogêneo, esta pode ser uma maneira mais adequada de se aproximar do valor verdadeiro de V_{LS} .

4.4. Regime estratificado

4.4.1. Velocidade da fase líquida V_L

No regime estratificado e estratificado ondulado, ambas as fases, líquida e gasosa são reduzidas, de modo que estas se desloquem em um escoamento laminar e estável. O líquido acaba se concentrando no fundo do tubo enquanto o gás se desloca na parte superior do mesmo. Neste regime a vazão do gás acaba por ser suficiente para gerar algumas ondulações na superfície do líquido, enquanto no regime estratificado liso, estas ondulações não ocorrem.

No regime estratificado ondulado, a presença de ondas na fase líquida acaba criando oscilações nos sinais. A partir destas variações pode se aplicar as correlações e rastreadores, a fim de estabelecer a velocidade de deslocamento destas ondas entre a jusante e a montante de modo que se possa estimar V_L , a partir das componentes V_{Corr} , V_{RA} , ou V_{Cov} .

Uma vez que estas três estratégias irão detectar a velocidade da propagação das ondas de líquido na interface líquido-gás do escoamento, estas técnicas serão capazes apenas de estimar a velocidade média referente a fase líquida. Será necessário então, estimar a relação entre a velocidade de propagação das ondas da superfície do líquido através de um cálculo representando uma integral relativa ao perfil de velocidade do escoamento.

5. METODOLOGIA E RESULTADOS

A medida das componentes médias de velocidades dos fluidos e comprimento de bolhas passando pelos sensores são parâmetros que figuram dentre os objetivos deste estudo. Para obter estas informações são utilizados os valores das tensões no tempo aquisitadas pelo par de sensores de impedâncias de haste.

A obtenção de variáveis referentes ao escoamento bifásico utilizando exclusivamente o sensor proposto será decorrente de sete valores principais, sendo todos os outros parâmetros calculados a partir das mesmas.

Destes valores dois são constantes conhecidas referentes à geometria do sensor: a distância entre os dois sensores, dada por L (11,25 centímetros) e o Diâmetro do tubo de escoamento dado pela variável D (2,54 centímetros para os nossos experimentos). Outro valor, é a variável tempo medida em segundos e que será utilizado para calcular os atrasos do escoamento entre os sensores.

As duas variáveis principais são os sinais elétricos instantâneos de ambos os sensores denominados $U_{1(s)}$ para o sinal do sensor instalado na montante e $U_{2(s)}$ para o sinal do sensor instalado na jusante respectivamente. Estes sinais são diretamente proporcionais à admitância do escoamento, de forma que auxiliarão a mensurar a quantidade de cada fluido no duto.

Os dois últimos valores representam sinais elétricos calibrados no duto com fluido monofásico gasoso, ou duto teoricamente vazio, tomando a quantidade de líquido como referência. Estas medidas, dadas respectivamente por U_{1v} e U_{2v} , serão considerados constantes em cada ensaio devido a impossibilidade de obtê-las em tempo real. Os valores de tensão de vazio em todos os ensaios realizados nesta seção foram obtidas antes de cada ensaio por medições de escoamentos monofásicos, ou seja, o duto preenchido plenamente por líquido e posteriormente o duto preenchido completamente por gás. Uma vez que cada um dos ensaios teve duração inferior a um minuto foi considerada que a variação deste valor seria muito pequena neste período, o desvio padrão das medições monofásicas de cheio e vazio era aproximadamente 0.4 % .

Nos experimentos relativos à normalização, também foi estabelecida uma terceira variável para o sensor de referência chamada $U_{3(s)}$ a fim de descrever um sinal de impedância proveniente de um tubo sempre cheio de líquido. A partir desta variável pode-se monitorar a condutividade elétrica do líquido, inclusive verificando variações na temperatura e salinidade do líquido. Para auxiliar a normalização do sinal do sensor de referência, também foi necessário a implementação de uma variável para descrever o tubo preenchido totalmente por gás, analogamente as anteriores esta variável foi chamada de U_{3v} . A disposição dos sensores no aparato experimental pode ser conferida na figura 21.

A normalização proposta irá definir uma faixa de trabalho do sensor, que permitirá relacionar os valores de tensão instantânea no fluxo bifásico em valores entre zero e um, representado o nível relativo do escoamento bifásico.

5.1. Calibração Estática

Como primeiro passo foi feito um ensaio de calibração estática, a fim de verificar qual a dispersão entre tensão aferida e o nível de líquido no tubo, e também estudar se existem efeitos macroscópicos neste comportamento devido à variação de temperatura

Para os experimentos de calibração estática foram utilizados basicamente um segmento de duto com o sensor de haste acoplado, um paquímetro para calibração do nível, dois instrumentos para inferir o nível a partir da admitância, uma ponte RLC BK-Instrument e o conjunto envolvendo a placa analógica e o sensor de impedância em haste, como apresentado na figura 14. A placa analógica foi devidamente calibrada e foi utilizada a frequência de oscilação equivalente a 100 kilohertz.

O estudo da variável de interesse foi feito mediante um conjunto de medidas sob condições operacionais de controle. Entretanto, além das diversas variáveis ambientais, a variável sob estudo é influenciada por um grande número de fatores intrínsecos não controláveis que resultam em uma

variável aleatória cujo comportamento, segundo o teorema do limite central, seguirá uma distribuição normal.

Desta forma, a variável sob estudo, o nível de líquido, assumirá diferentes valores contidos dentro de uma faixa com certa probabilidade de ocorrência. A partir do conhecimento sobre as medições extrai-se uma faixa provável de erro das medidas, essa estimativa conhecida como a incerteza da variável. Esta incerteza estabelece o intervalo em torno do valor medido o qual o valor verdadeiro estará contido segundo uma probabilidade determinada.

Considerando uma variável aleatória x cuja distribuição segue uma curva normal pode-se afirmar que a i -ésima medida tem o intervalo de confiança dado pela equação 5.1 (Figliola, et al., 2007):

$$x_i = \bar{x} \pm t_v S_x \quad (P\%) \tag{5.1}$$

Onde t_v é a distribuição Student para uma probabilidade P . Em um sistema de medida calibrado podemos determinar o valor médio verdadeiro a partir da amostra de dados pela equação 5.2:

$$x' = \bar{x} \pm t_v S_x \quad (P\%) \quad \text{onde} \quad S_x = \frac{S_x}{\sqrt{N}} \tag{5.2}$$

A variável h , correspondente ao nível de líquido, é função da admitância através de tensão pelo sensor de impedâncias e a partir de $|Z|$ pela ponte BK. Utilizando uma regressão linear para estabelecer esta relação funcional é possível obter o desvio médio S_{yx} entre a variável medida e a variável conhecida, valor o qual será fundamental para a determinação da incerteza.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{1}{v} \sum (y_i - y_{c_i})^2} \quad \text{onde} \quad v = N - (m + 1) \tag{5.3}$$

Onde m é o grau do polinômio e v é o grau de liberdade. Aproximando a curva para uma equação de primeira ordem obtém-se:

$$y = a.x + b \pm t_v S_{yx} \quad (P\%) \quad \text{onde} \quad S_{yx} = \frac{S_{jx}}{\sqrt{N}} \quad 5.4$$

Onde S_{yx} é dada por:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{1}{v} \sum (ax_i + b - yc_i)^2} \quad \text{onde} \quad v = N - (m + 1) \quad 5.5$$

Inferindo x de y, o valor de x acrescentado da incerteza é dado pela variável x_i é calculada pela equação 5.6:

$$x_i = \frac{yc_i - b}{a} \pm t_v S_{xy} \quad (P\%) \quad \text{onde} \quad S_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{N}} \quad e \quad S_{xy} = \frac{S_{yx}}{a} \quad 5.6$$

Portanto o valor isolado da incerteza em porcentagem é dado pela equação 5.7:

$$\sigma_{inc} = 100 \frac{t_v S_{xy}}{x_i} \quad 5.7$$

Nos ensaios, foi comparada a incerteza da estimativa de altura pela tensão e saída do sensor e pela impedância medida pelo equipamento BK precision, a fim de comparar ambos os gráficos. Foram realizados os ensaios das tabelas x e y, os resultados de um ensaio de subida a 22 graus Celsius, são comparados na tabela 2:

Tabela 2: Dados de ensaio de subida a 22 graus para calibração estática

Ensaio Subida (T=22C)				Normalizados		
Nível	Z	Vout	G - BK	Nível	Vout	G - BK
(mm)	(ohm)	mV	(mS)	Norm	Norm	Norm
0,0	7360	447	0,1359	0,00	0,00	0,00
5,1	1990	634	0,5025	0,09	0,12	0,13
10,9	1243	801	0,8045	0,18	0,23	0,24
16,0	1008	909	0,9921	0,27	0,30	0,30
20,6	804	1050	1,2438	0,35	0,39	0,39
24,7	683	1171	1,4641	0,42	0,47	0,47
30,7	591	1300	1,6920	0,52	0,55	0,55
35,8	522	1421	1,9157	0,61	0,63	0,63
42,0	466	1546	2,1459	0,71	0,71	0,71
47,1	417	1682	2,3981	0,80	0,80	0,80
51,0	384	1789	2,6042	0,86	0,87	0,87
55,4	345	1944	2,8986	0,94	0,97	0,98
59,0	337	1992	2,9674	1,00	1,00	1,00

A partir da tabela 2, foi calculada uma incerteza equivalente a 1.8 % entre medição do nível de líquido realizada pelo sensor e a medição do nível de líquido realizada pelo paquímetro. Analogamente, o nível de líquido também foi estimado por um equipamento específico para medições de impedância, a ponte BK Precision, resultando em uma incerteza de 1.9 % entre a estimativa e a medição do paquímetro: A comparação entre as medições é apresentada pela figura 35:

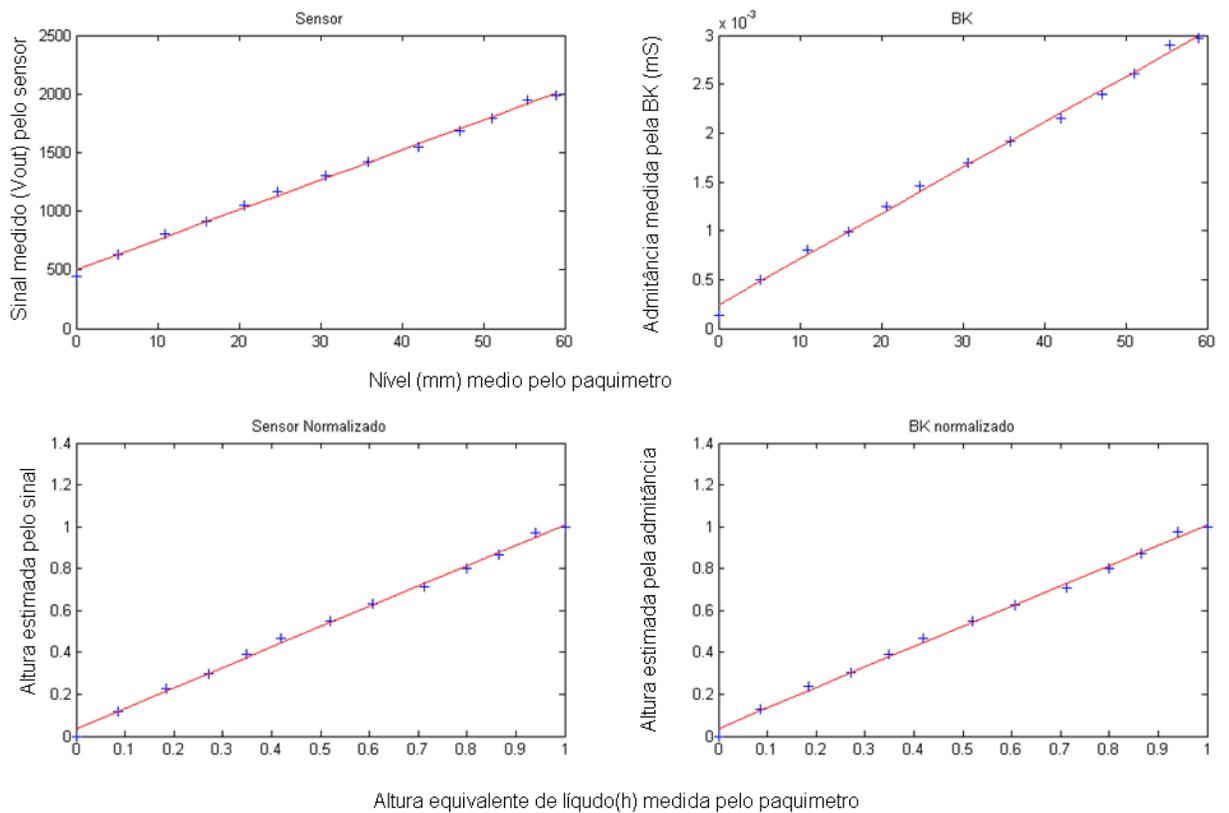


Figura 35: Medições executadas em ensaio de subida, para uma temperatura de 22 C°

O procedimento anterior também foi repetido para ensaios de descida, a fim de comparar e verificar qualquer efeito de histerese nos ensaios. Os ensaios de descida também foram realizados e utilizando os mesmos valores dimensionais que o ensaio anterior. Os ensaios de descida realizados a 22 graus Celsius obtiveram incertezas equivalentes à 2.4 % para o sensor de impedância e 2.7% para o equipamento da BK.

Tabela 3: Dados de ensaio de descida a temperatura de 22 graus da calibração estática

Ensaio Descida (T=22C)				Normalizados		
Nível	Z	Vout	G	Nível	Vout	G - BK
(mm)	(ohm)	mV	(mS)	Norm	Norm	Norm
59,0	302	2158	3,3113	1,00	1,00	1,00
52,3	355	1899	2,8169	0,89	0,85	0,85
48,5	400	1734	2,5000	0,82	0,76	0,75
43,1	435	1627	2,2989	0,73	0,70	0,69
37,8	491	1485	2,0367	0,64	0,62	0,61
33,0	540	1386	1,8519	0,56	0,56	0,56
28,3	619	1253	1,6155	0,48	0,48	0,49
22,6	721	1128	1,3870	0,38	0,41	0,42
18,2	846	1015	1,1820	0,31	0,35	0,35
12,1	1203	820	0,8313	0,21	0,24	0,25
8,5	1661	690	0,6020	0,14	0,16	0,18
2,4	4690	481	0,2132	0,04	0,04	0,06
0,0	78000	407	0,0128	0,00	0,00	0,00

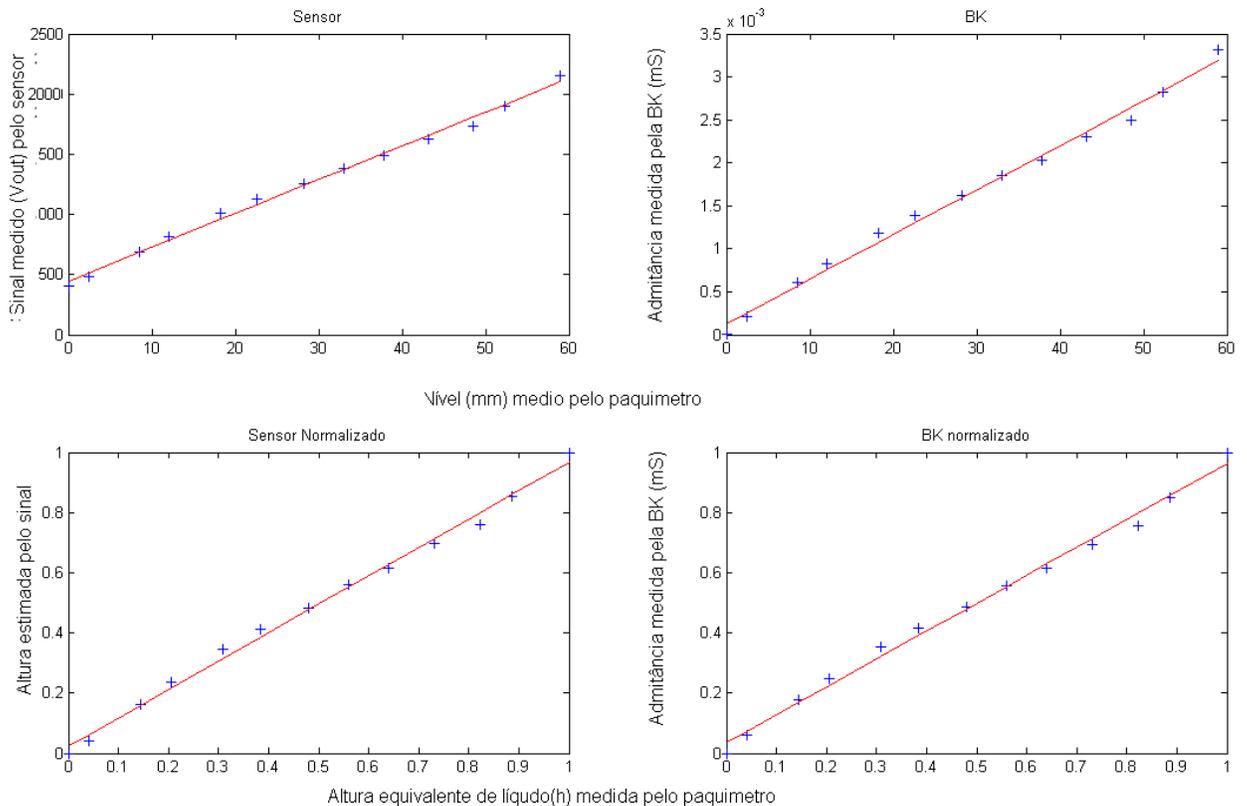


Figura 36: Medições aferidas em ensaio de descida, para uma temperatura de 22 C°

A fim de comparar a influência da temperatura nos resultados foram feitas medições também a temperatura de 25 graus Celsius, a fim de averiguar se existe variação no comportamento da admitância devido à temperatura. Novamente foram realizados ensaios de subida e de descida. Foram obtidas respectivamente nos ensaios de subida e descida incertezas de 2.5 e 2.3 % para o sensor de impedância e 2.8 e 2.5 % para o equipamento BK. Os resultados são apresentados pelas figuras 37 e 38:

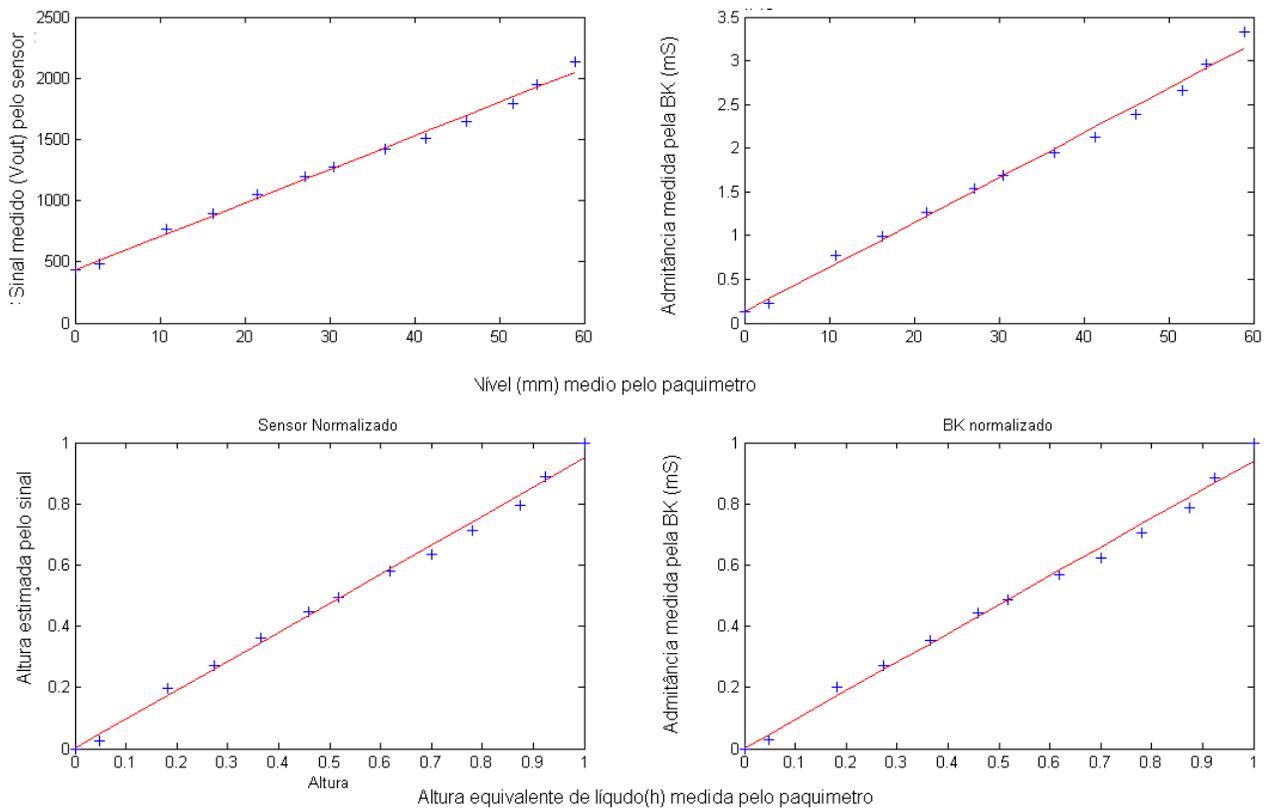


Figura 37: Medições aferidas em ensaio de subida, para uma temperatura de 25 C°

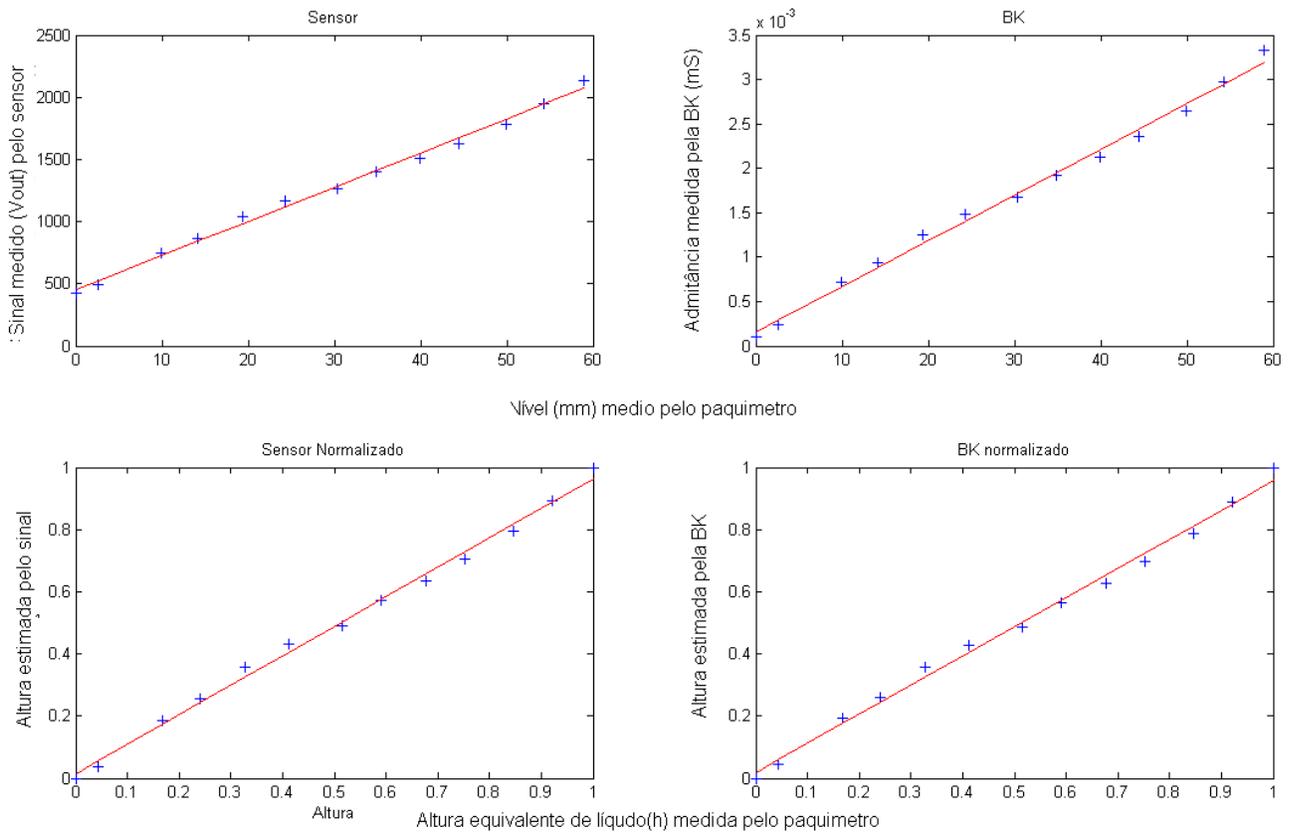


Figura 38: medições aferidas em ensaio de descida, para uma temperatura de 25 C°

Os testes demonstraram que, para as duas temperaturas, tanto os ensaios de subida como decida, a impedância apresentada demonstraram linearidade com o nível de líquido. As baixas dispersões e incertezas apresentadas demonstram que o princípio de funcionamento do sensor estáticamente, demonstra ser válido.

Em Mastelari e Rosa (2011) estes experimentos foram estendidos para quatro diferentes componentes líquidos a fim de determinar se estas misturas manteriam a proporcionalidade entre o nível de líquido e a admitância. Foram utilizados, óleo SAE 50W, água deionizada, água de torneira e água salgada (60 g/l de água). O artigo demonstrou que apesar do valor da admitância variar de ordem de grandeza dependendo da mistura, para os quatro componentes ocorreu a proporcionalidade entre nível e admitância.

5.2. Calibração Dinâmica

5.2.1. Normalização

Após determinar a existência de proporcionalidade entre a tensão registrada para o sensor e o nível de líquido, passou-se para a etapa de determinar estratégias para medir dinamicamente o nível de líquido do sensor. Para realizar essa medição inicialmente foi necessário normalizar a tensão aferida entre 0 e 1, representando nível relativo de preenchimento do tubo.

Para realizar esta normalização é necessário obter dois valores de referência, a tensão de cheio que representa o valor medido para um duto completamente preenchido por líquido e a tensão de vazio que representa um tubo completamente preenchido por gás. Para um projeto futuro de um sensor que visa determinar estimativas em períodos próximos a grandeza de décimos de segundo, é recomendável que existam meios de estimar estes dois valores dinamicamente. Apesar de ser a principal limitação do trabalho, estas condições são muitas vezes encontradas em aplicações de campo, como elevação de petróleo por exemplo, sendo necessários portanto trabalhos nessas situações

Apesar de ainda haver a necessidade de estudos futuros nessa área para completar esta autonomia, possivelmente necessitando de sensores auxiliares, é possível em um escoamento horizontal e para o regime intermitente realizar algumas estimativas para a tensão de cheio. No regime horizontal, a gravidade atua como um separador natural de modo que a fase gasosa tende a se concentrar na parte superior do duto, e diversos fatores como a diferença de velocidade entre a fase gasosa e a fase líquida, bem como a tensão superficial do líquido fazem com que em alguns padrões de escoamento, o duto esteja quase totalmente preenchido por líquido em alguns momentos. Este fenômeno pode ser notado principalmente nos regimes de bolhas dispersas, bolhas alongadas e intermitente. Nos dois primeiros as fases se deslocam à velocidades muito próximas enquanto no padrão intermitente a diferença de pressão causada pelas diferentes velocidades de translação resulta em um comportamento periódico, onde ocorrem pistões preenchidos em sua grande maioria por líquido. Apesar do aumento entre a razão de densidades diminuir o comprimento dos pistões, a sua ocorrência permanece periódica, mantendo a possibilidade de realizar estimativas da tensão de cheio. De acordo com Duarte (2007) os pistões de um sistema ar-glicerina foram 20% menores que os pistões em sistemas ar-água nos experimentos realizados pelo mesmo.

Para averiguar a possibilidade de realizar uma estimativa automática de tensão de cheio para o regime intermitente, foi optado testar alguns algoritmos em escoamentos dentro este regime variando a razão entre vazão volumétrica de gás e a vazão volumétrica total dada pela variável Ra. Uma vez que tais estimativas são impossíveis no regime estratificado liso, evitou-se também a proximidade como a zona de transição entre estes dois regimes. Portanto foram selecionados 10 pontos no regime intermitente, conforme a Figura 39 demonstra.

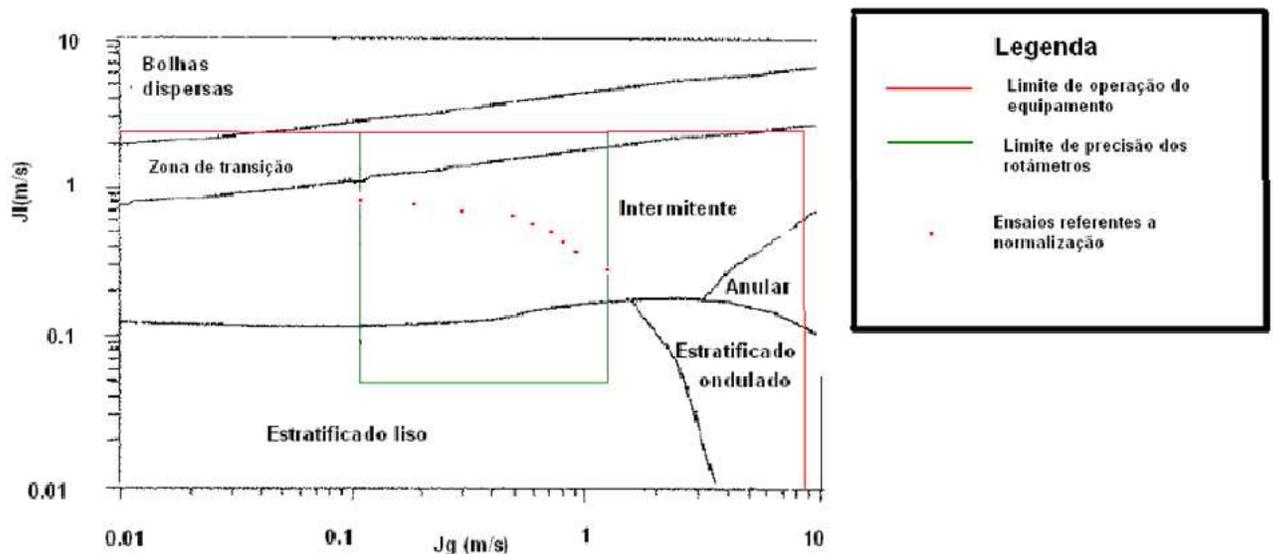


Figura 39: Pontos para os quais a normalização foi realizada.

Com base nos dados coletados, foi desenvolvido um algoritmo, para calibrar o equipamento automaticamente em caso de variação da admitância da água. O método definido foi desenvolvido considerando os valores de pico e sua correlação com as medições tubo cheio.

Definindo uma amostra de pico como uma amostra correspondente ao duto totalmente preenchido por líquido, quanto maior é o número de amostras de pico utilizado em uma estimativa, menor é o erro associado a esta estimativa. No entanto, não há como saber se um valor elevado realmente corresponde a uma medida feita com o tubo cheio de líquido. A seleção de picos é feita armazenando as medidas de sinal feitas em um período determinado e ordenando as medidas mais altas. Entretanto, se um grande número de valores mais altos forem tomados, a probabilidade utilizar um valor não correspondente ao tubo completamente preenchido por líquido aumenta, e isso afeta não apenas o valor estimado como o desvio padrão da medição, causando erros grosseiros de medição.

Por outro lado, a estimativa do valor do único ponto, aquele que possuir a tensão máxima medida, seria a única maneira que evitaria o uso de ranges maiores que o máximo previsto e portanto a perda de informação. Uma vez que o nível relativo pode ser calculado pela divisão do range instantâneo pelo range máximo, isto resultaria em um nível relativo maior que 1, Resultando em distorção de sinal em correções posteriores (o achatamento de picos por exemplo). Além do mais, a utilização de apenas um único ponto, poderia reduzir o trabalho computacional, preservando os recursos para processar e calcular outras informações mais tarde. Por esta razão, este trabalho optou por verificar primeiramente as estimativas de range utilizando apenas um único ponto equivalente ao pico de tensão no período amostrado.

Após definir o número de pontos a serem obtidos resta definir o período armazenado no buffer para compara os valores e obter estes pontos. Se o período de amostragem for muito longo a normalização não vai atualizar as informações com muita frequência, resultando na possibilidade de muitos erros devido às variações súbitas na condutividade do líquido. Quanto menor e mais recente for o período de amostragem mais precisa a será estimativa da condutividade líquido. No entanto, se o período de amostragem for menor que um período de célula Slug, e os equipamentos não amostrarem um segmento de pistão, o pico de tensão não vai chegar perto de corresponder à amostra do tubo preenchido apenas por líquido, resultando em erros grosseiros na normalização.

Neste experimento, o período de amostragem foi definido pelo cálculo das frequências de células baseadas em equações experimentais para o escoamento ar-água. De acordo com as equações de Gregory & Scott (1969), a frequência mais baixa de células para este experimento corresponderia a 0,7035 Hertz para o teste J que pode ser verificado na Tabela 4 . Considerando que o resultado de menor frequência corresponde ao maior período de célula, é possível inferir que a maior média de período de células corresponderia a um valor de cerca de 1,43 segundos no experimento. No entanto, a fim de implicar um fator de segurança, o período de amostragem foi definido como 5 segundos, uma vez que o valor escolhido deve assegurar que seja maior do que todos os prazos médios das células deste teste. Abaixo pode ser verificada a correlação de Gregory & Scott (1969) para calcular a frequência f onde J_L equivale à velocidade superficial do líquido , J equivale à velocidade da mistura e g à gravidade terrestre. Esta correlação apresenta discrepâncias tipicamente equivalentes a 10% (Issa Kempf , 2003).

5.8

$$f = 0.0226 \left(\frac{J_l}{gD} \left(\frac{19.75}{J} + J \right) \right)^{1.2}$$

O range da normalização será dado pelo pico da amostra filtrada, representada pela variável \dot{U} menos a média do tubo vazio, adquirida no início de cada bateria. A equação pode ser vista na equação 5.9, onde \bar{U}_v equivale a média de 50 segundos de medição de vazio com o duto preenchido apenas por gás

5.9

$$\Delta \dot{U} = \dot{U} - \bar{U}_v$$

Para comparar esta estimativa de range com outra técnica, foi definida uma outra medição baseada nos ensaios com escoamento monofásicos preliminares aos ensaios com escoamento bifásico. Esta estimativa foi feita pela subtração das próprias médias de tensões máxima e mínima amostradas no início de cada bateria dadas respectivamente pelas variáveis \bar{U}_c e \bar{U}_v . Como as medições de gás e líquido, só foram realizadas no início de cada bateria de teste, elas terão valores menos atualizados do que as mudanças de condutividade do que os outros métodos, porém, como o experimento foi controlado para que a condutividade se mantivesse o mais constante possível, estas medidas serão úteis como referência para as outras duas. Este range foi chamado de range teórico.

Foram utilizadas amostras de 60 segundos, sendo a tensão de cheio estimada como o pico destas amostras. Os escoamentos utilizados foram os da tabela seguintes. Os valores obtidos do experimento posteriormente foram comparados com o valor médio obtido por 10 ensaios de 60 segundos com o tubo completamente cheio de líquido para ser usado como variável de comparação, nos gráficos este valor está representado pela faixa vermelha. Estes ensaios com o tubo completamente cheio foram feitos intercaladamente com os ensaios da Tabela 4.

Tabela 4: Vazões testadas para a estimação de pico

Ensaio		J (m/s)	Ql(Gpm)	Qg(Scfh)	Q(l/m)	Ra
A						
Líquido		0,8	6,425		24,321	0,111
Gás		0,1		6,391	3,04	
B						
Líquido		0,74	5,943		22,497	0,213
Gás		0,2		12,783	6,08	
C						
Líquido		0,68	5,461		20,673	0,306
Gás		0,3		19,174	9,12	
D						
Líquido		0,62	4,979		18,849	0,392
Gás		0,4		25,565	12,161	
E						
Líquido		0,56	4,497		17,025	0,472
Gás		0,5		31,956	15,201	
F						
Líquido		0,5	4,016		15,201	0,545
Gás		0,6		38,348	18,241	
G						
Líquido		0,44	3,534		13,377	0,614
Gás		0,7		44,739	21,281	
H						
Líquido		0,38	3,052		11,553	0,678
Gás		0,8		51,13	24,321	
I						
Líquido		0,32	2,57		9,728	0,738
Gás		0,9		57,521	27,361	
J						
Líquido		0,26	2,088		7,904	0,794
Gás		1		63,91	30,40	

Rs=fração gás líquido do escoamento

A figura 40 demonstra a comparação das estimativas dinâmicas da tensão de cheio durante os escoamentos bifásicos, representados cada 1 por um ponto azul, com a média das medições preliminares como tubo preenchido apenas com líquido, representada pela reta vermelha.

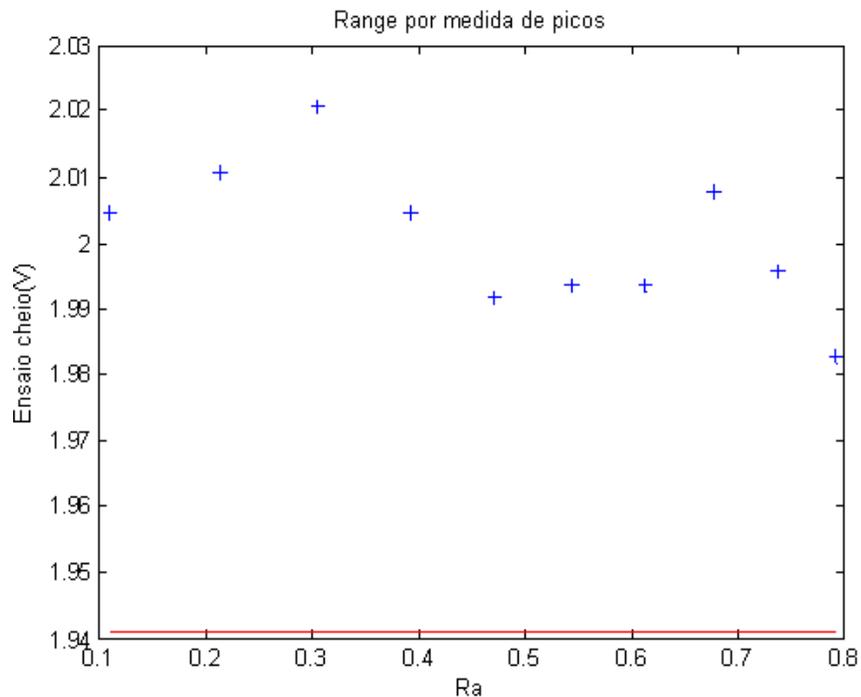


Figura 40: Comparação dos ranges estimados nos ensaios com o valor médio de range já medido

Apesar de ser uma solução bastante trivial as estimativas utilizando apenas um ponto demonstraram um desvio padrão próximo a 5%. Entretanto ao se estimar o valor equivalente a tensão de cheio apenas por um ponto, soma-se os erros aleatórios ao valor da estimativa, incluindo as oscilações de tensão causadas pelo ruído branco.

Uma alternativa para uma técnica um pouco mais precisa, foi a introdução de uma medida de pico corrigida. Uma vez que o pico amostrado corresponde a um pico de líquido somado a um pico de ruído foi feita uma tentativa de estimar e subtrair o ruído a fim de aumentar a precisão da estimativa. Esta modificação foi feita a partir do calculo do desvio da amostra dos próximos 22 pontos após estes picos. Estes 22 pontos equivalem a 0,0073333 segundos , varrendo portanto dois períodos da frequência de corte para ruídos. Apesar de haver um chance da parte do escoamento não estar cheio o tempo todo durante esse processo , esta estimativa é feita muito mais rápida do que a

fluidodinâmica do sistema , minimizando a chance destes erros sistemáticos. Os testes mostraram que esta modificação resultou em uma redução significativa do desvio padrão do processo resultando em desvios na ordem de 2%.

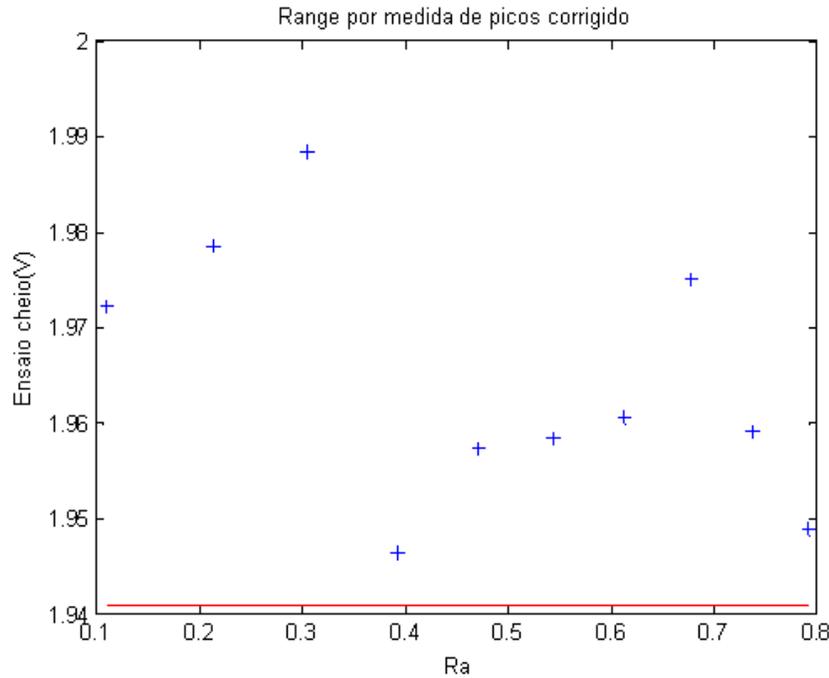


Figura 41: Comparação dos ranges estimados pela estimativa da tensão de cheio nos ensaios com o valor médio de tensão de cheio já medido

Uma normalização com base externa também foi desenvolvida. A técnica consiste na utilização de um sensor de referência em outro segmento do tubo que vai ficar sempre preenchido com o líquido, já que há incerteza a respeito da situação do preenchimento total nos sensores da montante e da jusante. No entanto, as tensões representativas de tubo cheio e vazio, serão diferentes dos valores de outros sensores estudados, uma vez que cada um tem suas próprias características eletrônicas. Assim, para determinar os erros, foi necessário determinar uma metodologia alternativa para estabelecer os limites de ambas às tensões, estabelecendo relações entre a faixa de medição (range) da montante com a faixa de medição da referência. Essas razões podem ser dadas por:

$$R_1 = \frac{\Delta \bar{U}_1}{\Delta \bar{U}_3} \quad 5.10$$

$$R_2 = \frac{\Delta \bar{U}_2}{\Delta \bar{U}_3} \quad 5.11$$

Estas razões vão estabelecer uma referência de comparação para parametrizar os escoamentos da montante e da jusante a partir do range do sensor de referência. Esses intervalos são representados pela notação ΔU_{R1} . Como exemplo, ΔU_{R2} será dado pela seguinte formula:

$$\Delta U_{R1} = R_1 \cdot (\bar{U}_3(-\lambda) - \bar{U}_{V3}) \quad 5.12$$

Onde λ é o período de tempo para a fase líquida chegar do sensor de referência para o sensor estudado, conhecendo da velocidade de deslocamento do líquido no percurso de escoamento monofásico. Esta estratégia de utilizar uma aproximação para o valor de λ , ajudará aos sensores acompanharem as variações sistemáticas de condutividade no líquido, entretanto não poderá ser determinada com exatidão, uma vez a velocidade variará ao longo da seção do duto contendo escoamento bifásico. Esta inexatidão também demanda que para uma determinação mais aproximada da dispersão entre estas duas estimativas, os parâmetros do líquido sejam suficientemente controlados a fim de estabilizar ao máximo a variação de condutividade do líquido no tempo. Os erros em relação à montante e a jusante são calculados de maneira análoga.

A fim de realizar um trabalho comparativo, foi feita também uma estimativa de valor de cheio a partir de um sensor de referência, a exemplo das equações 5.10 á 5.12 . Os seguintes resultados foram obtidos.

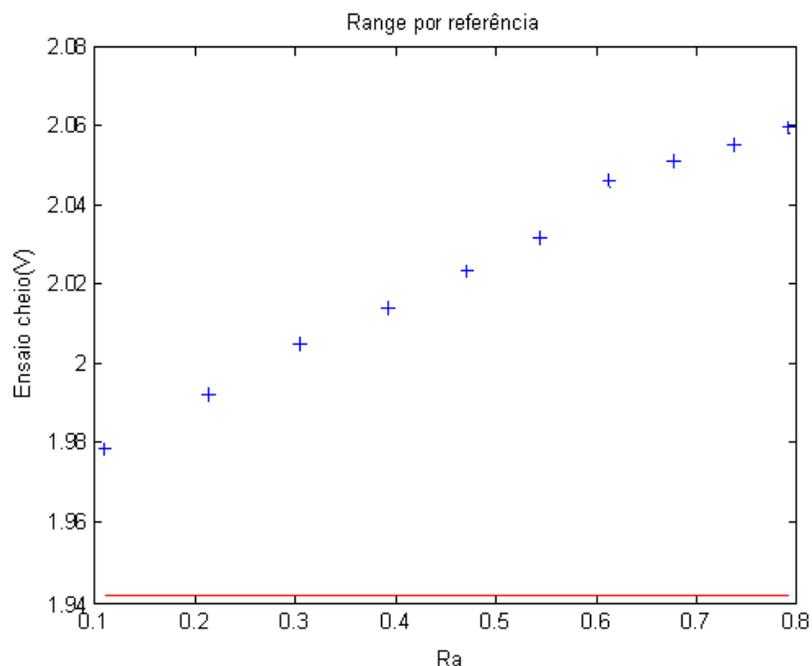


Figura 42: Comparação dos ranges estimados utilizando um sensor de referência nos ensaios com o valor médio de tensão de cheio já medido

Nota-se aparentemente que o range do sensor de referência ainda estava variando devido a variáveis desconhecidas, resultando num aumento do desvio padrão para 7.2%. O motivo desta variação provavelmente é uma elevação de temperatura da placa, demonstrando que a utilização de um sensor de referência também acarreta em grandes desafios como o fato de lidar ao mesmo tempo com as incertezas provindas da eletrônica das duas placas e estabelecer uma relação entre elas.

5.2.2. Estimativa dinâmica de Holdup

Para estimar dinamicamente a precisão de cálculo de R_s utilizando o equipamento proposto utilizou uma faixa de velocidades de fase em que o escoamento se aproximasse ao máximo de um modelo simplificado tal como o modelo separado, e deixá-lo estabilizar até obter uma velocidade constante, onde o valor de R_s pudesse ser relacionado com o valor do Holdup pelas equações 2.3 e 2.4 válida para um modelo separado:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) S} \quad 2.3$$

$$S = \frac{V_g}{V_l} \quad 2.4$$

Uma vez que o valor de ambas as velocidades e do título x permanecerão constantes, o valor de α também se mantém constante e, uma vez que o líquido se mantém decantado na parte inferior do duto, a fração de vazio pode ser calculada pela equação 5.12, proveniente da equação 2.14:

$$\alpha = \frac{2\pi + SEN(\theta) - \theta}{2\pi} \quad 5.13$$

Com isto o valor de α será obtido através da medição de nível feita utilizando o sinal, calculando primeiramente a equação 2.9 e posteriormente a equação 5.12. A medição de nível é obtida de maneira análoga a equação 3.5 :

$$H_h = \frac{U_{(t)} - U_v}{U_c - U_v} \quad 3.5$$

$$\theta = 2ACOS\left(1 - \frac{2h}{D}\right) = 2ACOS(1 - 2H_h) \quad 2.9$$

Foi utilizado neste experimento uma correlação específica para o regime estratificado, a fim de estimar o Holdup médio de um sistema dinâmico. Aggour (1978) estudou o regime estratificado a fim de estabelecer uma relação válida entre as vazões de gás e líquido, viscosidade e densidade de fluidos e o comportamento de ambos os fluidos no regime estratificado. A correlação pode ser verificadas nas equações abaixo:

$$X_u = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.875} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.125} \quad 5.14$$

$$X_u = \frac{1.189(1-\alpha)^2(2-\alpha)}{\alpha^3} \quad 5.15$$

Onde X_u é o valor da correlação que pode ser calculada tanto como em função do título x e das viscosidades dinâmicas μ e densidades ρ do gás e do líquido, como em função da fração de vazio α . Após calcular o valor da correlação X_u pode-se calcular o valor da fração de vazio, buscando uma solução positiva entre 0 e 1.

A região de escoamento escolhida para realizar a coleta de dados foi à região cujo regime predominante é um regime estratificado. No regime estratificado, o gás tende a se deslocar sobre o líquido aproximando, resultando em um escoamento próximo ao modelo separado.

Tabela 5: Vazões utilizadas para ensaios de estudo para o Holdup dinâmico

Ensaio	J (m/s)	Ql(Gpm)	Qg(Scfh)	Q(l/m)	Rs
A					
Líquido		0,1	0,80		3,04
Gás		0,1		6,39	3,04
B					
Líquido		0,1	0,80		3,04
Gás		0,2		12,78	6,08
C					
Líquido		0,1	0,80		3,04
Gás		0,3		19,17	9,12
D					
Líquido		0,1	0,80		3,0401552
Gás		0,4		25,56	12,16
E					
Líquido		0,1	0,80		3,04
Gás		0,5		31,96	15,20
F					
Líquido		0,1	0,80		3,04
Gás		0,6		38,35	18,24
G					
Líquido		0,1	0,80		3,04
Gás		0,7		44,74	21,28

Após a comparação entre a correlação de Aggour-Sims foi possível perceber de um desvio de cerca de 18% , ficando um pouco acima do esperado , dada a precisão da correlação e a precisão estática do sensor de impedância. A diferença entre os valores medidos e estimados pode ter sido causada pela baixa precisão dos rotômetros utilizados no experimento. A figura 43 apresenta os dados

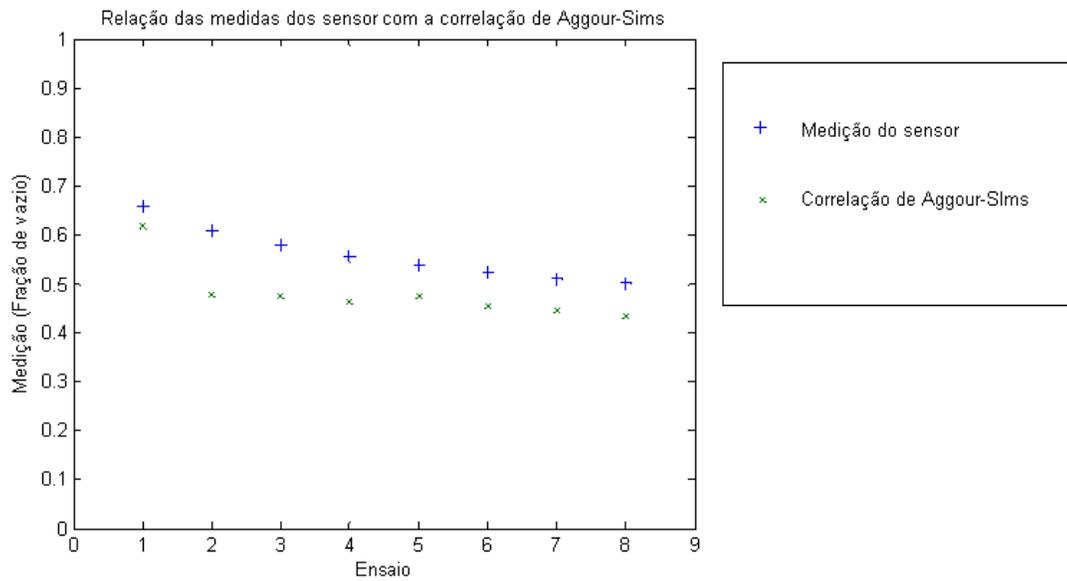


Figura 43: Comparação do Holdup mensurado dinamicamente com a correlação de Aggour-Sims

Na figura é possível perceber que existe um desvio sistemático entre a medição do sensor e a correlação de Aggour-Sims que sempre calcula para todos os casos uma fração de vazio menor do que a medida. Aplicando uma regressão linear para estabelecer uma função para ambos os resultados obtém-se uma incerteza equivalente a 15,2%.

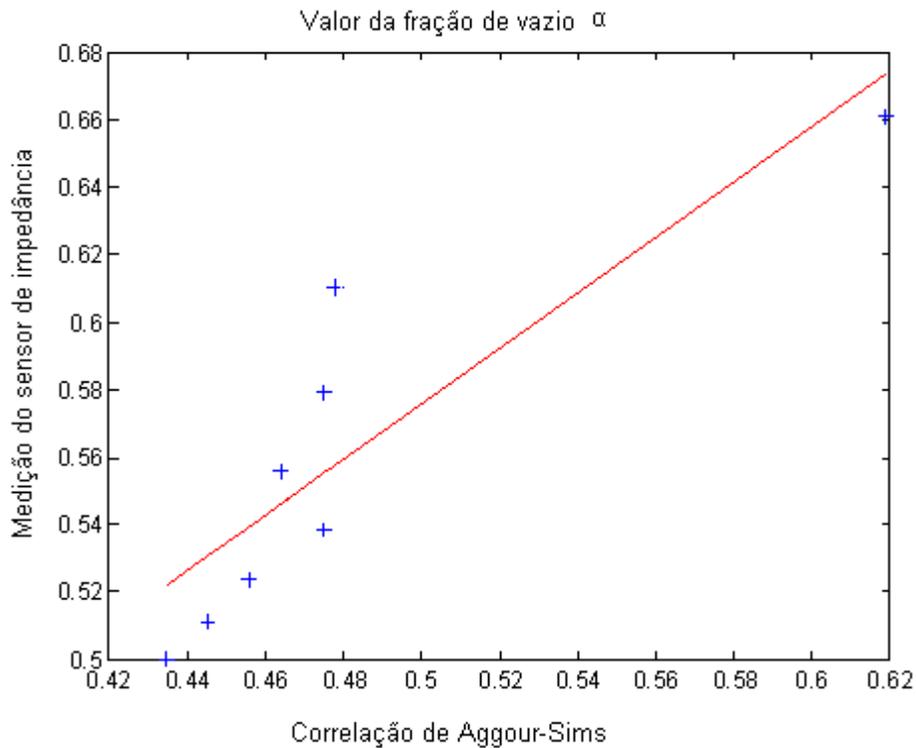


Figura 44: Relação entre a medição do sensor de impedância e a correlação de Aggour-Sims

5.3. Experimentos propostos de aquisição de velocidade e vazão em tempo real

5.3.1. Testes preliminares

Neste ensaio, foram escolhidos escoamentos para testar três algoritmos de inferência de velocidade. Um rastreador baseado no método de Newton –Raphsow, a correlação cruzada e a covariância. Como teste preliminar foi utilizado apenas o sinal do sensor da montante, defasado por atrasos conhecidos e determinados mediante simulação. Neste teste, em vez de utilizar ambos os sinais, da jusante e da montante, foi utilizado apenas o sinal da montante, o sinal da jusante foi criado como o sinal da montante defasado. Foram utilizados atrasos conhecidos equivalentes ao atraso visto em velocidades de 0.2 a 2 metros por segundo, o teste consistia em saber se as técnicas de medição de velocidade poderiam obter estes valores.

Primeiramente foram escolhidos três pontos do mapa de escoamento para o fluxo estudado, correspondendo estes três pontos a um ponto no escoamento intermitente, um ponto no escoamento

estratificado e um ponto no escoamento de bolhas dispersas. O objetivo desta escolha é avaliar se os algoritmos de estimativa de velocidade em tempo real possuem a capacidade de estimar com precisão o atraso entre dois sinais para diferentes regimes de escoamento, incluído a tarefa de detectar as pequenas ondulações do regime estratificado e pequenas quedas de tensão verificadas no regime de bolhas dispersas. Os escoamentos estudados podem ser verificados na tabela 6.

Tabela 6: Escoamentos escolhidos para os testes preliminares dos algoritmos de velocidade

Ensaio	J (m/s)	Ql(Gpm)	Qg(Scfh)	Q(l/m)	Rs
estratificado	0,1	0,803		3,04	66,667
	0,2		12,783	6,06	
Intermitente	0,4	3,212		12,161	50
	0,4		25,565	12,161	
Bolhas	0,5	4,016		15,201	1,961
	0,01		0,639	0,304	

Os sinais da montante destes escoamentos foram obtidos em laboratório pelo o sensor de impedância em questão. Os algoritmos são desenvolvidos para estabelecer a velocidade a partir de um sinal de montante e um sinal de jusante, ambos os sensores separados por uma distância específica.

A correlação cruzada e covariância são feitas com apenas dois segundos de amostragem no buffer utilizando 120 pontos que são calculados por sua vez são calculados cada um pela média do valor de 50 pontos da amostragem original de 3000 pontos por segundo. Isto foi realizado para diminuir o trabalho computacional, uma vez que o propósito final destes algoritmos é torná-los aplicáveis a sistemas rápidos e embarcáveis em microcontroladores.

São armazenados dois períodos na memória para realizar estas estimativas. O primeiro é equivalente aos dois segundos mais recentes do sinal da montante, e o segundo equivale ao meio segundo mais recente do sinal da jusante. Em seguida tanto os métodos da correlação cruzada como da variância fazem uma varredura pelo sinal, aplicando um atraso λ no sinal da jusante, variando de zero a um segundo e meio e verifica pelas correlações qual atraso melhor corresponde à defasagem entre ambos os sinais.

Neste experimento, entretanto, foram utilizados apenas os sinais de montante , estes foram separados por atrasos específicos na simulação , de modo a simular um escoamento perfeitamente homogêneo e de velocidade conhecida. Desta forma pudemos comparar o resultado calculado pelos algoritmos com o atraso resultante das velocidades de entrada conhecidas.

Foram utilizados sinais de 60 segundos obtidos na montagem, dos quais se retirou a média de atraso calculado dos últimos 50 segundos. Isto ocorre por que o sistema gasta 5 segundos para começar a realizar uma normalização do sinal, e os algoritmos ainda necessitam de cerca de 5 segundos para se estabilizarem. Foi estabelecido para também para este ensaio que as velocidades estimadas estariam em uma faixa compatível com a região do mapa de escoamento estudada sendo estes extremos equivalentes correspondentes à velocidade máxima (V_{max}) e mínima (V_{min}) da estimacão correspondentes à respectivamente 5 e 0,05 metros por segundo. As velocidades simuladas equivaleram a dez velocidades entre 0,2 e 2 metros por segundo.

Apesar de este ensaio não apresentar todas as singularidades do mesmo ensaio realizado com um sinal diferente de jusante e montante , ele servirá como uma fase preliminar de testes para os algoritmos.

Regime Intermitente

Na figura 45 podem ser verificados alguns dos sinais da estimacão instantânea velocidade obtida mediante o atraso entre sinais para um atraso constante e conhecido no regime intermitente.

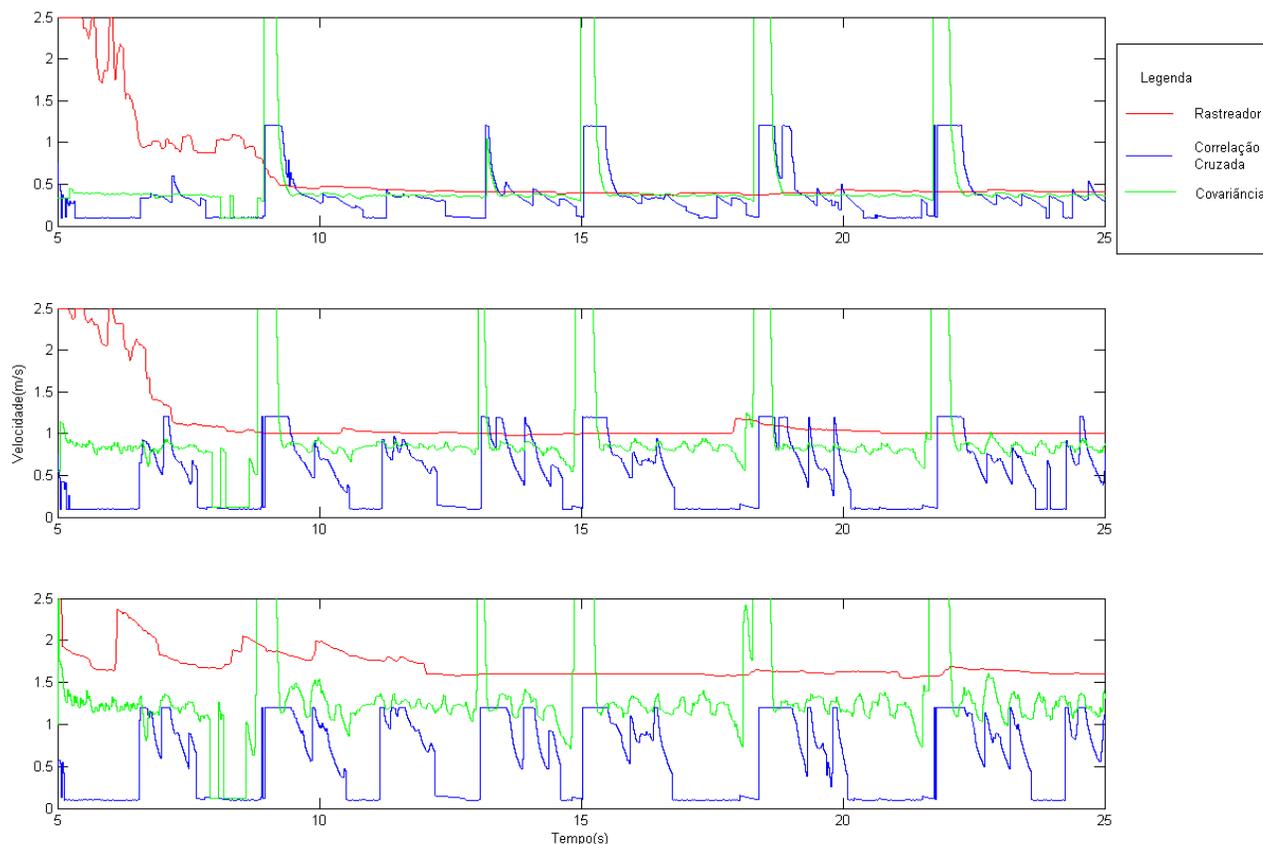


Figura 45: Estimação de velocidade no regime intermitente no tempo para velocidades constantes correspondentes á: a) 0,4 m/s b) 1,0 m/s c)1,6 m/s

Como pode se verificar o período de apenas 2 segundos armazenados no buffer provou ser insuficiente para a correlação cruzada estimar com exatidão o atraso entre os sinais e posteriormente a velocidade de deslocamento do fluido. O fato do período de armazenamento ser muito curto em comparação com a periodicidade do escoamento, torna a correlação cruzada suscetível a falhas, podendo em muitos momentos convergir para os valores extremos da estimativa.

Se for feita a correlação cruzada de um sinal periódico com um sinal em rampa, por exemplo, que não é um sinal periódico, a estimativa de deslocamento no tempo sempre convergirá para o máximo possível no período calculado, uma vez que valores futuros sempre possuem um valor médio maior a ser multiplicado na correlação. A utilização de um período de amostragem menor do que o período de uma célula unitária faz com que o sinal utilizado na correlação se assemelhe com uma função que se eleva ou decai rapidamente em alguns momentos, fazendo a estimativa do intervalo convergir para os valores extremos.

Estes instantes que convergem à valores extremos são representados como picos no sinal no tempo . Também podem ser verificados alguns picos na técnica da covariância , porém estes são muito menos freqüentes do que na correlação cruzada.

O método do rastreador mostrou que é capaz de convergir para o valor correto após algumas iterações e que após esta conversão tende a se manter estável no valor desejado. Entretanto é importante ressaltar que isto ocorreu em sinais completamente equivalentes não ainda necessariamente ocorrendo também para os diferentes sinais da jusante e da montante.

Na figura 46 são mostrados os gráficos das dispersões entre os valores médios das velocidades estimadas no período de 10 a 60 segundos e os valores conhecidos de velocidade simulada.

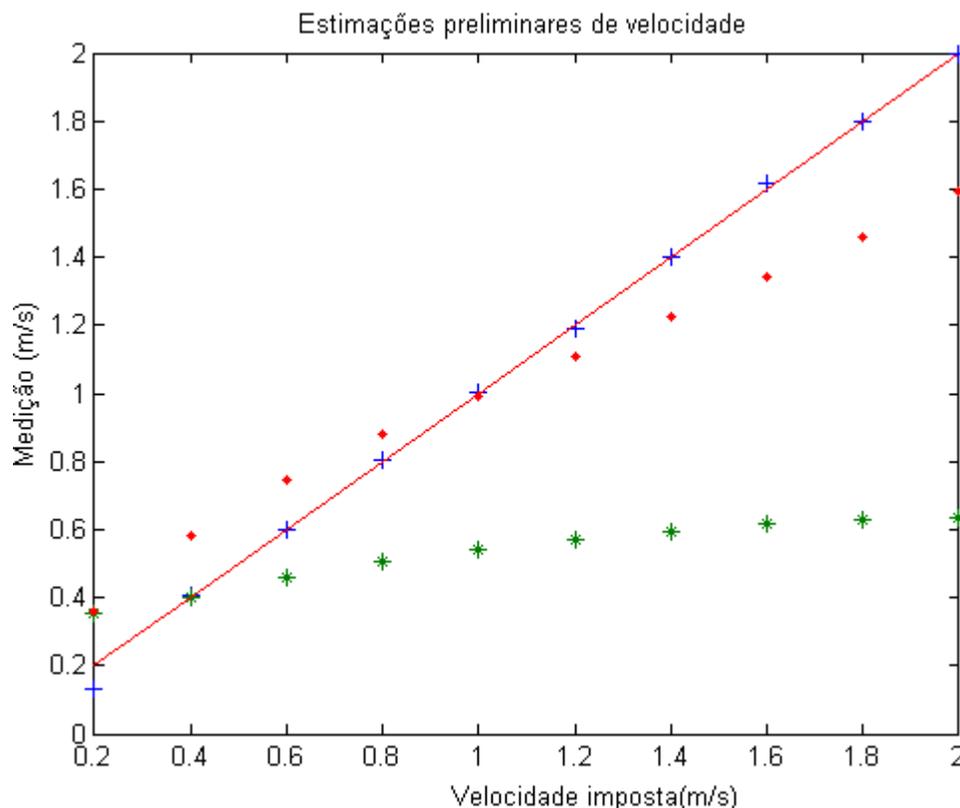


Figura 46: Dispersão das estimativas no regime intermitente de velocidade para a) Método do rastreador c) correlação cruzada c) covariância.

Como pode ser aferido o rastreador demonstrou uma incerteza muito baixa correspondendo a 1.8% enquanto a correlação cruzada apresentou uma incerteza exagerada. O método da covariância demonstrou alguma exatidão apresentando uma incerteza equivalente á 17%.

As simulações demonstraram que o método de estimação da velocidade por covariância apresentou uma grande tendência em convergir para o valor correto , porém em alguns instantes , por decorrência da própria geometria do sinal , acabava por estimar um valor incorreto , geralmente um valor extremo , alterando a média calculada.

O fato destes valores incorretos serem bastante esporádicos e agirem quase sempre em forma de um impulso entretanto possibilitou a utilização de um método estatístico para retirar estes desvios e calcular com mais exatidão a média das estimativas de velocidade pro covariância.

Estes picos súbitos puderam ser tratados como outliers e substituídos por valores mais condizentes com a realidade na estimativa. Para realizar esta tarefa, era armazenado um segundo de valores correspondentes ao atraso calculado pela covariância ,e deste um segundo de amostragem eram calculados a média e o desvio padrão.

Em seguida a partir da média e dos desvios, os pontos fora da região correspondente a dois Sigma em relação ao desvio padrão eram sequencialmente removidos e substituídos pelo valor imediatamente anterior.

Regime de bolhas dispersas

Analogamente à análise feita para o regime intermitente também foi feito para o regime de bolhas dispersas, a simulação de uma velocidade conhecida a fim de aferir se os estimadores de velocidade apresentariam um bom desempenho. A figura 47 demonstra os valores dos estimadores obtidas no tempo .desempenho no tempo dos estimadores de velocidade para um escoamento em regime estratificado.

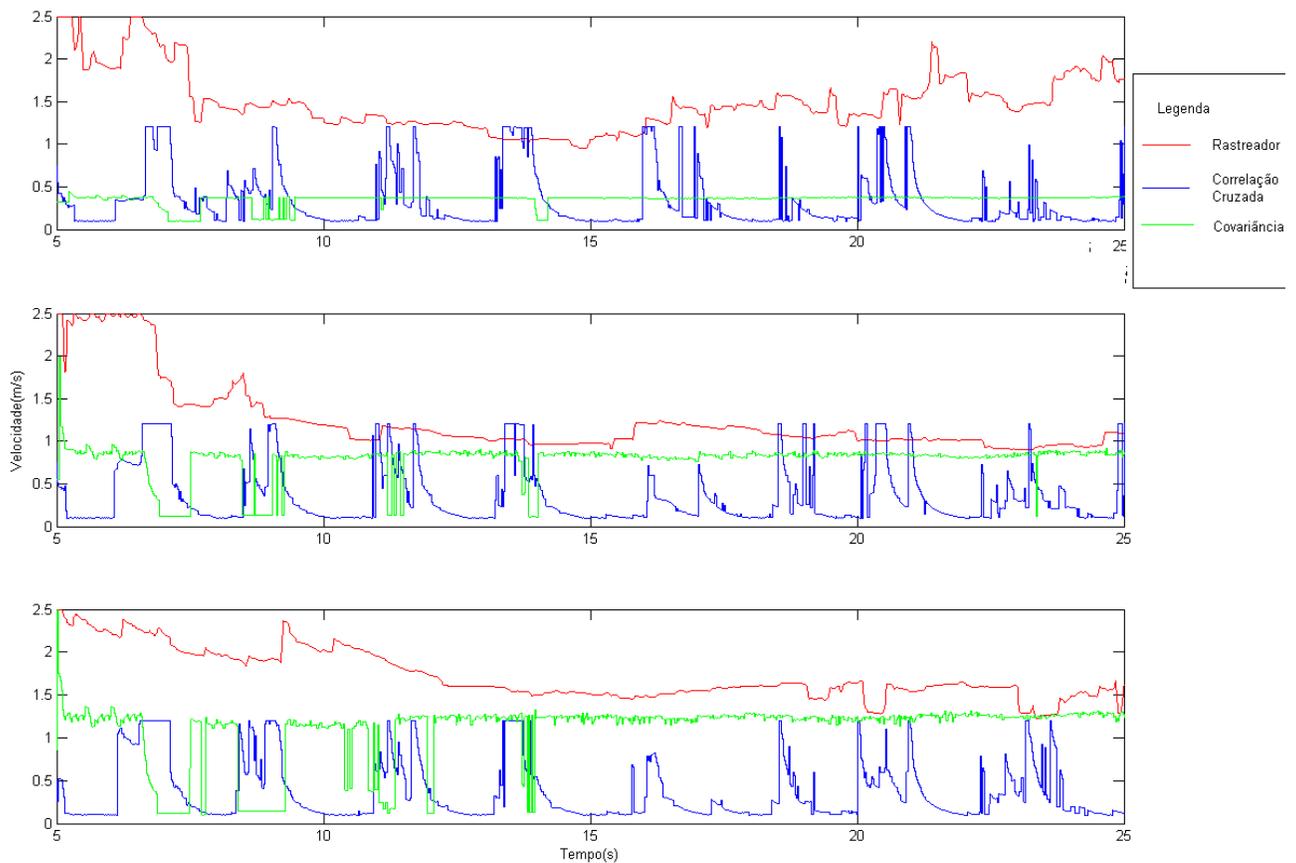


Figura 47: Estimação de velocidade no regime estratificado no tempo para velocidades constantes correspondentes á: a) 0,4 m/s b) 1,0 m/s c)1,6 m/s

A grande diferença que pode ser notada, é o mau desempenho da estimativa de velocidade pelo método do rastreador. A simulação demonstrou que o rastreador não foi bem sucedido em acompanhar as pequenas oscilações no sinal presentes em um regime de bolhas dispersas. A correlação cruzada e a covariância apresentaram gráficos semelhantes aos testes feitos no regime intermitente.

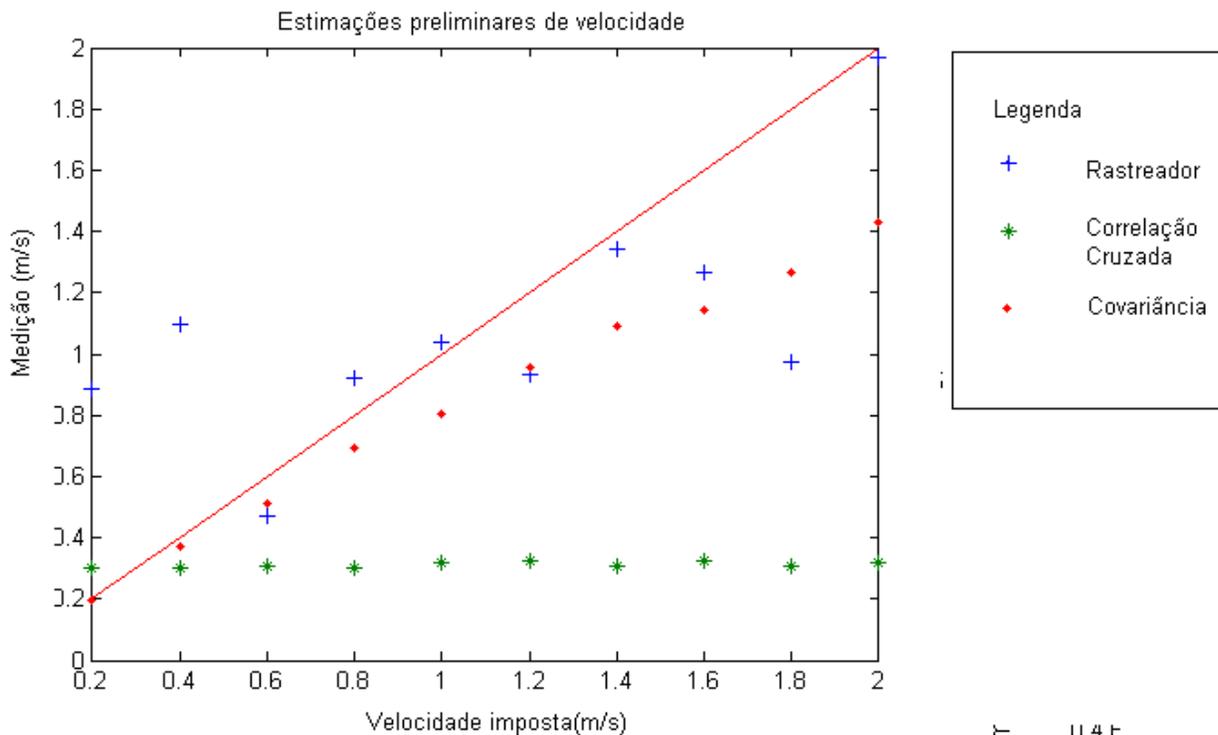


Figura 48: Dispersão das estimativas no regime intermitente de velocidade para a) Método do rastreador c) correlação cruzada c) covariância.

Como pode ser aferido na figura 48 o rastreador apresentou uma incerteza muito maior do que nos testes anteriores, equivalente à 35%. demonstrando ser inutilizável neste regime de escoamento. A correlação cruzada apresentou incerteza muito alta e assim como a covariância demonstrou uma incerteza de 26% demonstrando que nenhuma técnica obteve sucesso para este teste

Regime Estratificado

O desempenho dos estimadores de velocidade em um sinal do regime estratificado foi, de certa forma, muito semelhante ao desempenho dos estimadores em um sinal do regime de bolhas dispersas, demonstrando que, tanto o sensor de impedância como as técnicas não tem problemas em detectar as pequenas ondulações do regime estratificado. A figura 49 demonstra o desempenho no tempo dos estimadores de velocidade para um escoamento em regime estratificado.

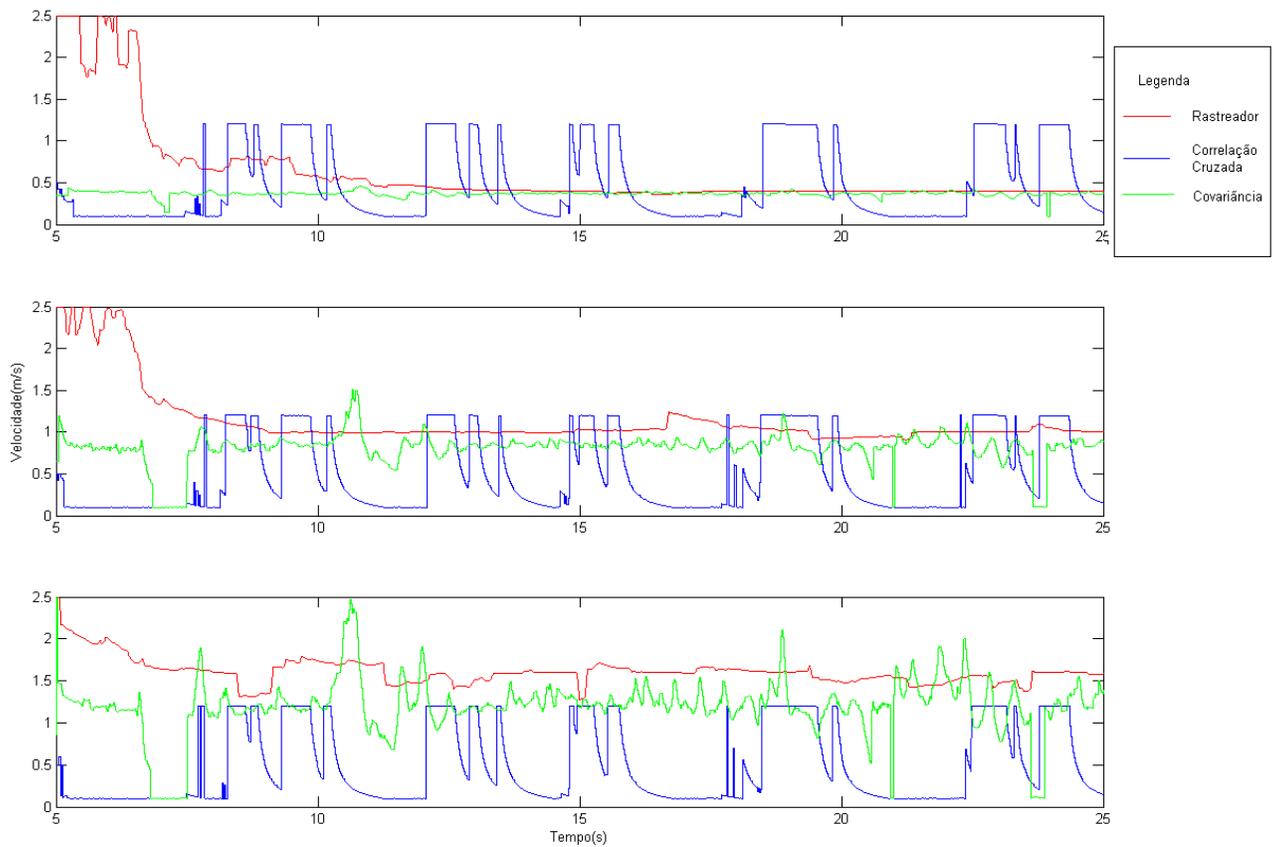


Figura 49: Estimação de velocidade no regime estratificado no tempo para velocidades constantes correspondentes á: a) 0.4 m/s b) 1,0 m/s c)1,6 m/s

Assim como no regime intermitente , o rastreador apresentou uma incertezas bastante reduzida equivalente à 2,6% . As estimativas pela técnica da correlação cruzada e pela covariância equivaleram a 71% e 19% respectivamente.

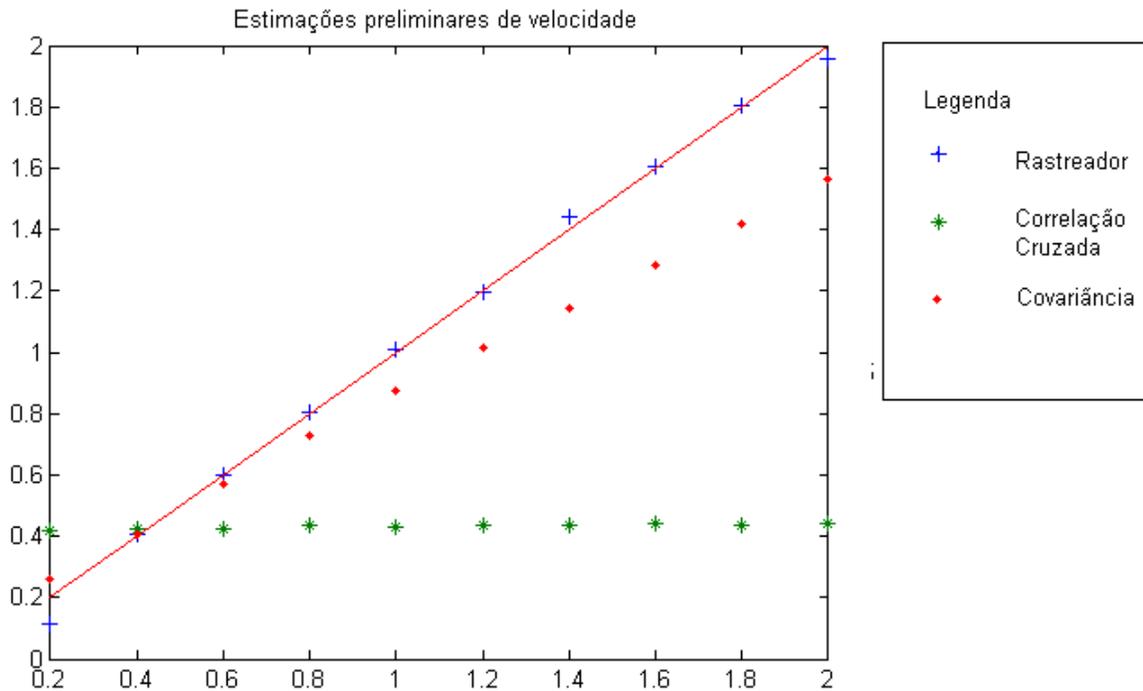


Figura 50: Dispersão das estimativas no regime intermitente de velocidade para a) Método do rastreador c) correlação cruzada c) covariância.

5.3.2. Regime de bolhas alongadas

Neste ensaio, Os algoritmos de obtenção de velocidade da covariância cruzada, correlação cruzada e rastreador foram testados em um sistema com os sinais obtidos tanto na jusante como na montante.

Para obter a velocidade das fases foram utilizadas as técnicas referentes ao rastreador e a covariância após passar por um tratamento de picos conforme visto nos testes preliminares. Ao assumir que este regime de escoamento obedece a um modelo homogêneo, tanto a velocidade obtida pela técnica da covariância V_{cov} como a velocidade obtida pela técnica do rastreador V_{RA} , passam a equivaler a V_l e V_g . Em seguida este valor foi multiplicado pela informação da área preenchida por cada fase obtida pela informação do Holdup, fração de vazio e área da seção transversal do tubo. Para o regime de bolhas alongadas foi considerado que a velocidade da fase gasosa e líquida eram equivalentes na mesma altura de um perfil de velocidade. Na primeira equação, com o a velocidade das fases não variando no perfil de velocidade e o escoamento obedecendo a um comportamento

homogêneo, pode-se obter as seguintes equações para cálculo das vazões a partir das equações 2.7 e 2.8.

$$Q_{g(t)} = (1 - H_{(t)}) \cdot A \cdot V_{g(t)} \quad 5.16$$

$$Q_{l(t)} = H_{(t)} \cdot A \cdot V_{l(t)} \quad 5.17$$

$$V_{g(t)} = V_{l(t)} \quad 5.18$$

A informação da vazão real foi obtida através da informação de vazão obtida por rotâmetros instalados no escoamento. É importante ressaltar que esta simplificação também acarretará em erros para os algoritmos de obtenção de velocidade, entretanto o objetivo deste teste é saber se é possível obter a velocidade das ondulações no regime estratificado e posteriormente utilizar esta informação para calcular a vazão de líquido.

Primeiramente foram escolhidas as seguintes vazões para um escoamento de bolhas alongadas.

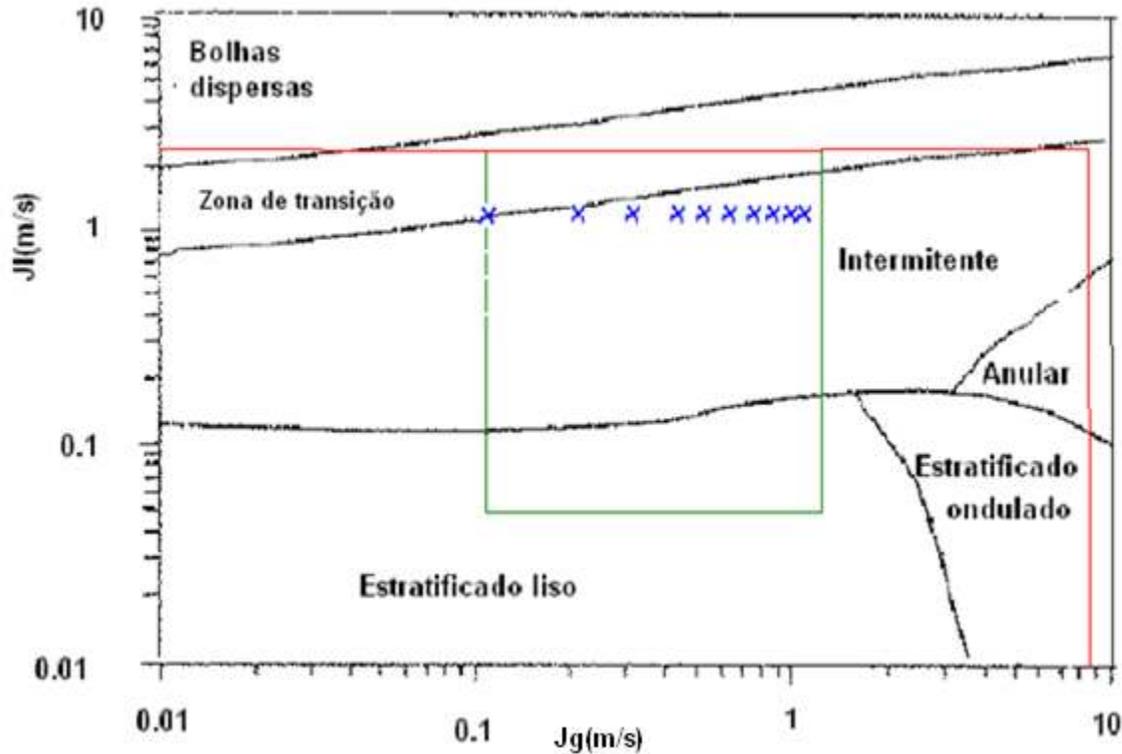


Figura 51: Escoamentos utilizados para representar um escoamento na região de bolhas alongadas

5.3.3. Desempenho dos algoritmos de velocidade

Foram realizados testes de laboratório a fim de obter os sinais da montante destes escoamentos para o sensor de impedância em questão. Os algoritmos são desenvolvidos para estabelecer a velocidade a partir de um sinal de montante e um sinal de jusante, ambos os sensores separados por uma distância específica. Ambas as correlações cruzadas são feitas com apenas 2 segundos de amostragem no buffer, uma vez que o propósito final destes algoritmos é aplicá-los de modo instantâneo e em microcontrolador.

Foram utilizados sinais de 60 segundos obtidos na montagem, dos quais se retirou a média de atraso calculado dos últimos 50 segundos. Esta média de 50 segundos foi utilizada tanto para determinar a velocidade mensurada na superfície, como também a altura média preenchida por líquido no escoamento de bolhas. A informação desta última média foi utilizada posteriormente para calcular a fração de vazio e o Holdup médios do período de amostragem.

Foi possível notar que, enquanto as estimativas por covariância apresentaram um valor coerente e diretamente proporcional às vazões mensuradas, a técnica do rastreador apresenta valores que parecem ser aleatórios sem relação ao rastreador. A figura 52, apresenta o comportamento da estimativa de velocidade ao longo dos 60 segundos de amostragem, quando a velocidade deve se manter constante.

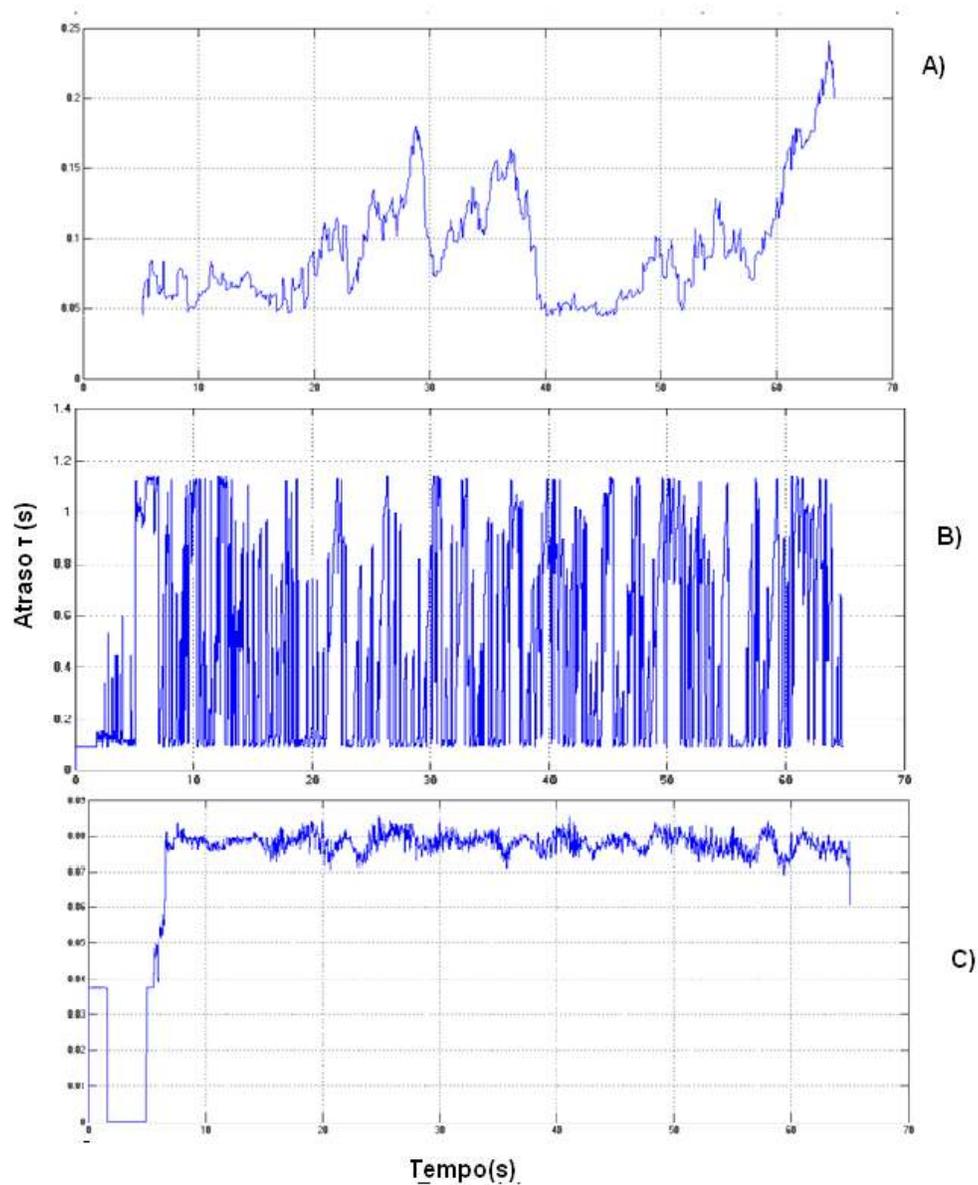


Figura 52: Estimação do atraso para um escoamento no regime bolhas alongadas onde $Ql=30,40$ l/m e $Qg=24,32$ A) Rastreador B) Correlação cruzada C) Covariância

A figura 52, apresenta o comportamento da estimativa de velocidade ao longo dos 60 segundos de amostragem, quando a velocidade deve se manter constante. A figura mostra um padrão que pode ser verificado para praticamente todas as estimações de de velocidade, não apenas no regime de bolhas alongadas mas também nos regimes estratificado e intermitente. Para todos estes casos a técnica de medição de velocidade mediante rastreador falhou em se estabilizar, jamais convergindo para um valor. Em contrapartida, a técnica da covariância conseguiu se estabilizar, apresentando apenas alguns picos a serem tratados, tal como havia ocorrido nos testes preliminares. Enquanto as estimativas por covariância apresentaram um valor coerente e diretamente proporcional às vazões mensuradas, a técnica do rastreador apresenta valores que parecem ser aleatórios sem relação ao rastreador. A figura x, apresenta o comportamento da estimativa de velocidade ao longo dos 60 segundos de amostragem, quando a velocidade deve se manter constante.

As tensões representativas de cheio e vazio, necessárias para obter ao Holdup do escoamento, foram obtidas mediante ensaios estáticos intercalados com os escoamentos testados. Os resultados dos experimentos utilizando a o perfil de velocidade homogêneo e o perfil de velocidade laminar, podem ser verificados pela figura 53. Os resultados apresentados correspondem a média da vazão instantânea durante os últimos 50 segundos do experimento, As estimativas de vazão demonstraram uma dispersão de 36% em relação ao valor medido pelos rotâmetros.

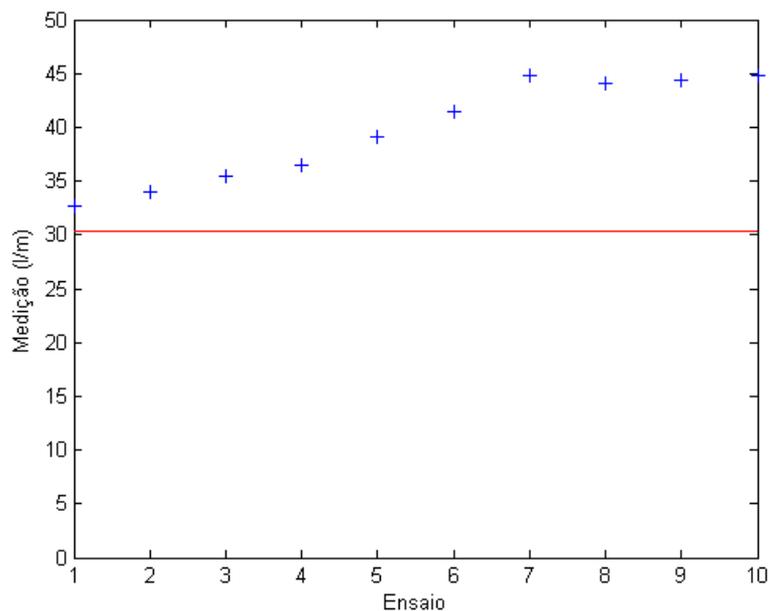


Figura 53: Estimação de vazão no padrão bolhas alongadas para a vazão de líquido para um perfil de velocidade Constante

Uma vez que para o regime de bolhas alongadas a velocidade do gás foi considerada equivalente a vazão de líquido bastou utilizar as 5.16 e 5.17 substituindo o valor do Holdup pela fração de vazio para obter a vazão de gás tanto com o perfil de velocidade constante como para o perfil laminar. A figura 54 demonstra os resultados obtidos:

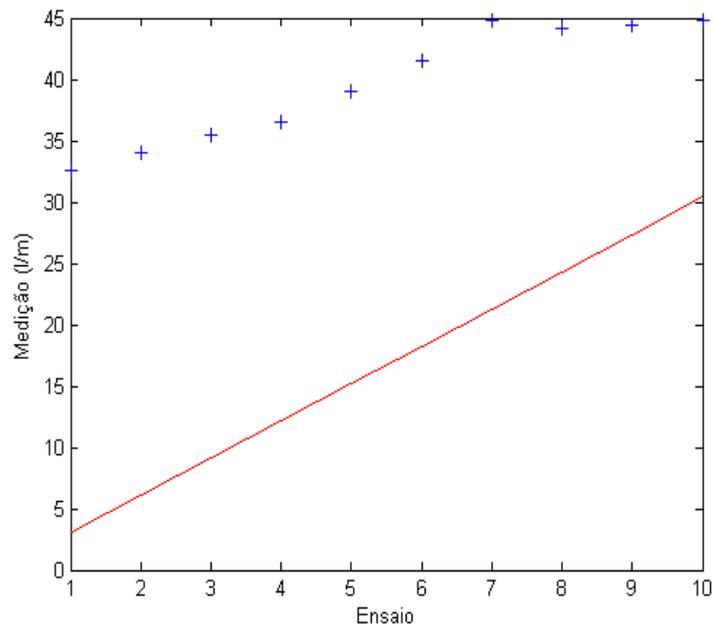


Figura 54: Estimação de vazão no padrão bolhas alongadas para a vazão de gás para um perfil de velocidade Constante

A estimativa demonstrou uma dispersão inaceitável em relação as medidas do rotâmetro, em contrapartida, apresentou alguma proporcionalidade em relação aos valores. Um dos motivos que pode ter levado a este insucesso é o fato destes escoamentos se encontrarem em regime turbulento, apresentando grande variação entre a velocidade do centro do escoamento e na fronteira com o duto. Neste caso a técnica da covariância provavelmente estimou uma componente de velocidade não equivalente a velocidade de deslocamento das bolhas e sim uma componente de velocidade mais próxima ao centro do duto.

5.3.4. Regime Estratificado

Após estimar as vazões para o regime de bolhas alongadas, foi testada a aplicabilidade destas estimações no regime estratificado. Um detalhe importante é que pelo fato de não conter bolhas, no regime estratificado as técnicas de velocidade devem se referenciar pelas ondulações na fase líquida.

Assim como no regime de bolhas alongadas os ensaios demonstraram que para um escoamento estratificado, com sinais diferentes na jusante e na montante, a técnica do rastreador falhou em se estabilizar perante uma velocidade constante, enquanto como pode ser averiguado pela figura 55, a técnica da covariância obteve êxito em apresentar um resultado estável a maior parte do tempo. Contrariamente as fases preliminares, a técnica do rastreador também conseguiu estimar um valor razoavelmente estável, oscilando em valores próximos aos valores estimados pela técnica da covariância.

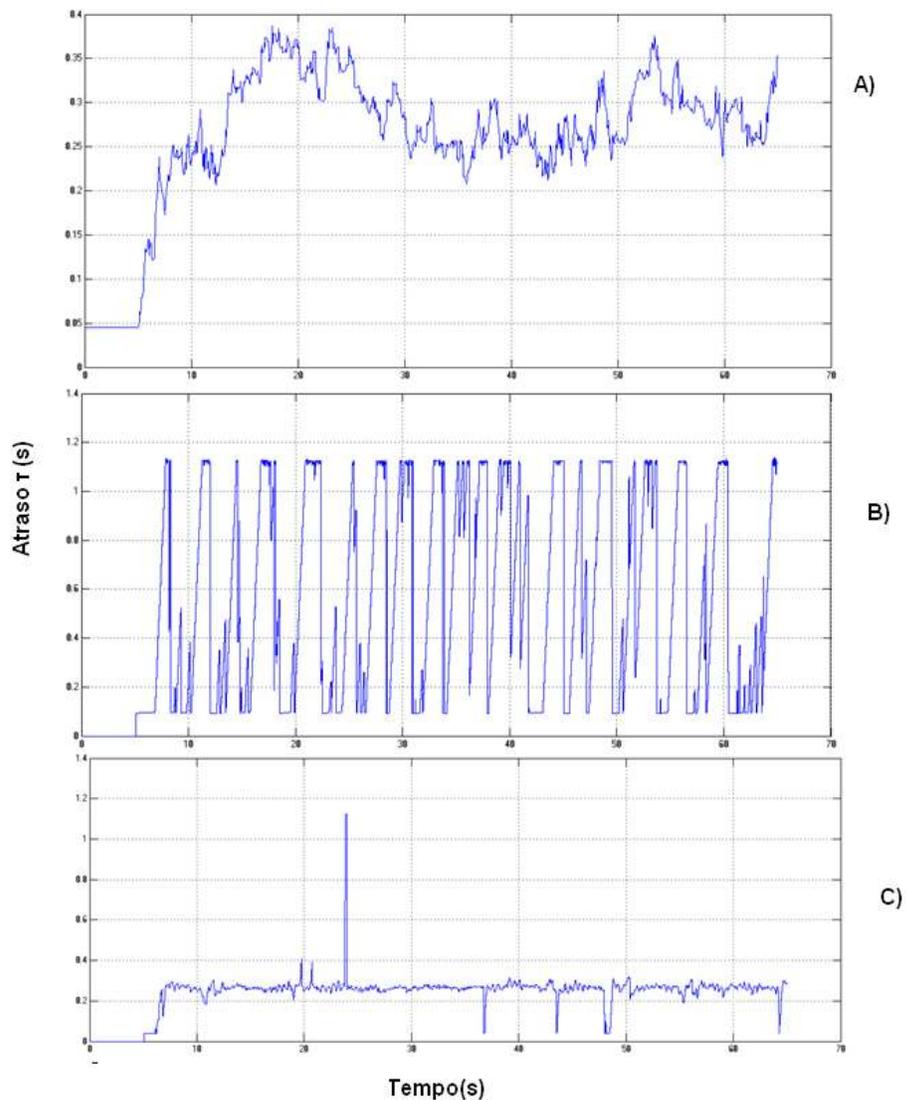


Figura 55: Estimação do atraso estratificado para um escoamento estratificado onde $Jl=0.1$ e $Jg= 0.5$ mediante A) Rastreador B) Correlação Cruzada C) Covariância

Novamente foram utilizadas as equações 5.15 e 5.16 para calcular a vazão a partir do Holdup e atraso obtido pela covariância dos Holdups da montante e jusante. É importante ressaltar que no padrão estratificado, a velocidade obtida reflete apenas a velocidade das ondulações da fase líquida. Não é possível neste regime estimar os valores da vazão de gás, uma vez que para isso seria necessário conhecer as tensões de cisalhamento na interface gás líquido, podendo ser obtida apenas o conhecimento da queda de pressão no duto. Foram escolhidos sete pontos no mapa de escoamento para testar as estimativas de vazão do líquido, que novamente foram comparadas com a informação obtida por rotâmetros.

Tabela 7: Tabela de escoamentos na região do padrão estratificado

Ensaio	J (m/s)	Ql(Gpm)	Qg(Scfh)	Q(l/m)	Rs
A					
Líquido	0,1	0,80		3,04	0,6667
Gás	0,2		12,78	6,08	
B					
Líquido	0,1	0,80		3,04	0,75
Gás	0,3		19,17	9,12	
C					
Líquido	0,1	0,80		3,0401552	0,8
Gás	0,4		25,56	12,16	
D					
Líquido	0,1	0,80		3,04	0,8333
Gás	0,5		31,96	15,20	
E					
Líquido	0,1	0,80		3,04	0,8571
Gás	0,6		38,35	18,24	
F					
Líquido	0,1	0,80		3,04	0,875
Gás	0,7		44,74	21,28	

È importante ressaltar que alguns autores classificam a região destes escoamentos como região de escoamento estratificado liso, onde não haveria perturbações na superfície que possibilitariam o funcionamento dos algoritmos de obtenção de velocidade. Entretanto, durante o experimento, foram aferidas perturbações na superfície visualmente no escoamento, o que motivou ao estudo de obtenção de velocidades no mesmo.

5.3.5. Perfil de velocidade

Uma das características mais complexas de se medir em um escoamento é a distribuição da velocidade de uma fase ao longo de toda seção de área de um duto. Existem diferentes modelagens como, que dependem do número de fatores como Reynolds e necessitam. A equação 5.18 descreve um perfil de velocidade constante ao longo de toda seção do duto, enquanto as equações 4.28 e 4.29 descrevem respectivamente um perfil de velocidade laminar e turbulento.

$$V = V_m \quad 5.19$$

$$V = V_m \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad 4.28$$

$$V = V_m \left(1 - \frac{r}{R} \right)^n \quad 4.29$$

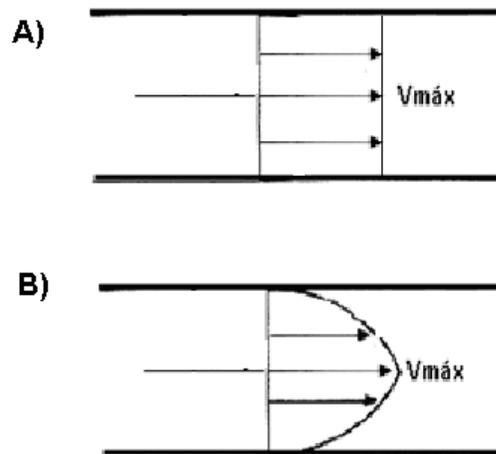


Figura 56: Componentes de velocidade ao longo do duto a)Perfil de velocidade monofásico Constante b)Perfil de velocidade laminar

Enquanto o perfil de velocidade laminar obedece uma relação quadrática, o perfil de velocidade turbulento depende de um expoente n . Este expoente tem valores entre 6 e 10 variando conforme o número de Reynolds se eleva (Noakes & Sleight, 2009). O expoente é determinado de modo empírico. Uma vez que o sensor proposto visa trabalhar com uma fase líquida que inclui uma mistura desconhecida de água e óleo com viscosidade variante a determinação do expoente n em campo torna-se uma tarefa bastante complexa. Desta forma, este trabalho optou por restringir aos perfis de escoamento constante e laminar. Para obter a velocidade média laminar calcula-se primeiramente a velocidade de escoamento no centro do duto utilizando para a velocidade na interface gás líquido e a altura obtida através do Holdup do escoamento. Em seguida uma integral calcula a velocidade média de translação da fase em relação à velocidade no centro. Os cálculos são demonstrados pelas equações 5.20 e 5.21.

$$V_m = \frac{V}{\left(1 - \left(\frac{h-R}{R}\right)^2\right)} \quad 5.20$$

$$V_{m\acute{e}dia} = \frac{\int_0^h V_m \left(1 - \left(\frac{h-R}{R}\right)^2\right) dh}{h} = V_m \frac{3Rh^2 - h^3}{3hR^2} \quad 5.21$$

È importante ressaltar que este equacionamento é válido para escoamentos monofásicos. Entretanto, uma vez que será obtida no escoamento estratificado a velocidade das ondas na superfície do líquido, e será calculada apenas a velocidade do líquido, foi utilizado este modelo. Para estimar a velocidade do gás seriam necessários modelos de conservação de energia e equilíbrio de forças na superfície do líquido além de diversos dados empíricos.

Após definir os perfis de escoamento serem testados e descartar a utilização da técnica do rastreador para a obtenção de velocidade, foi calculado mediante a velocidade do fluido obtida pela técnica da covariância (com e sem correção de perfil) e do Holdup. Este cálculo teve como base a obtenção do escoamento instantâneo a partir das equações 5.14 e 5.15.

A figura 57 demonstra o desempenho das estimativas de vazão considerando um perfil laminar e considerando um perfil fixo. O perfil de velocidade constante obteve uma dispersão altíssima entretanto demonstrou tendência de manter o valor de vazão constante representando uma correspondência com o valor real. Ao considerar o perfil de escoamento perfil laminar obteve uma dispersão em torno de 25%. Como pode ser notado na figura, a diferença entre a estimativa e medição aumentou para os escoamentos onde a vazão de gás era mais elevada, uma vez que nestes escoamentos o número de Reynolds era mais elevado podendo compor um escoamento turbulento, esse aumento do erro na estimativa demonstra que a aproximação para o regime laminar pode ser razoável para alguns casos, entretanto deve ser revista para escoamentos turbulentos.

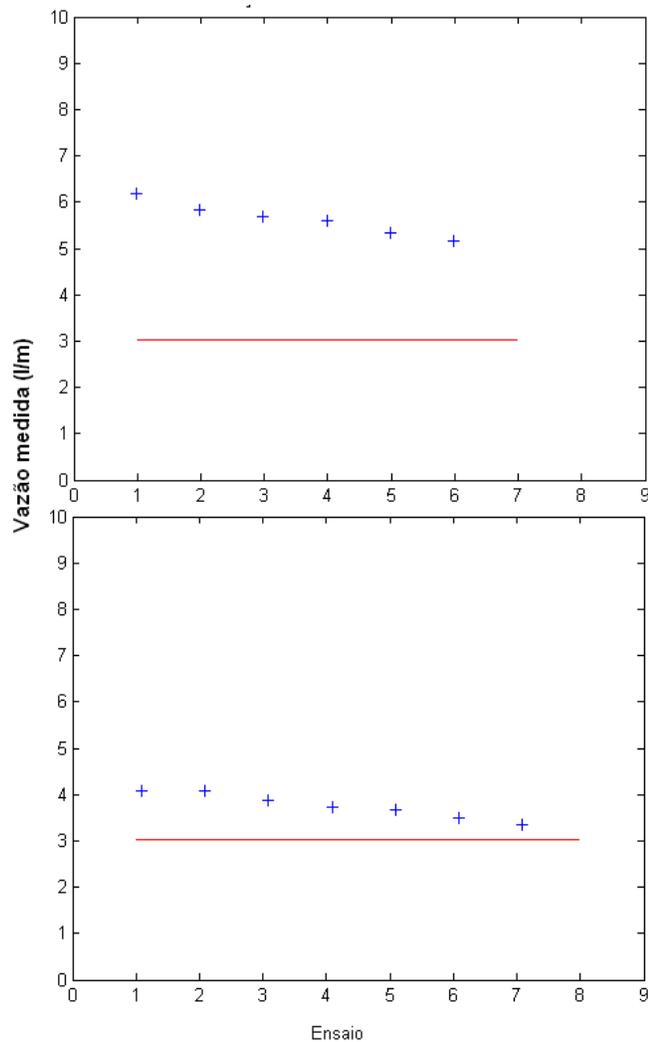


Figura 57: Estimação de vazão no regime estratificado para a vazão líquido A) Perfil de velocidade constante B) Perfil laminar

5.3.6. Regime de Intermitente

No Padrão deslocamento intermitente, a obtenção da vazão instantânea depende também da determinação do segmento da célula unitária em que a secção de escoamento se encontra. Uma vez que a célula unitária possui diversas componentes de velocidade, é importante saber de o segmento de área constitui-se em uma região de bolha ou pistão, e para isso pode ser utilizado o fator de corte (FC) executado pelo gatilho que também determina a velocidade da pontada bolha. Desta forma a

determinação da vazão instantânea pode ser determinada pelas equações 5.22 e 5.23 na região do pistão:

$$Q_{g(t)} = (1 - H_{(t)}) \cdot A \cdot V_{GS(t)} \quad 5.22$$

$$Q_{l(t)} = H_{(t)} \cdot A \cdot V_{LS(t)} \quad 5.23$$

E pelas equações 5.24 e 5.25 na região da bolha:

$$Q_{g(t)} = (1 - H_{(t)}) \cdot A \cdot V_{GB(t)} \quad 5.24$$

$$Q_{l(t)} = H_{(t)} \cdot A \cdot V_{LF(t)} \quad 5.25$$

O diagrama de blocos da figura 58 demonstra o processo de estimação para as vazões no regime intermitente. Neste fluxograma já feito no próprio simulador Matlab é possível averiguar que o bloco responsável pelo cálculo das vazões instantâneas recebe inicialmente os valores do nível h do sensor da jusante, um valor proveniente do gatilho do fator de corte que obterá valor 0 quando estiver na região da bolha e valor 1 quando estiver na região do pistão, a velocidade instantânea obtida pela covariância V_{cov} e a velocidade da ponta da bolha V_{ponta} , obtida pelo gatilho. A partir destes valores, as áreas preenchidas por gás e por líquido são obtidas por sub-blocos que calculam θ , A_g e A_l conforme as equações 2.9, 2.13 e 2.14.

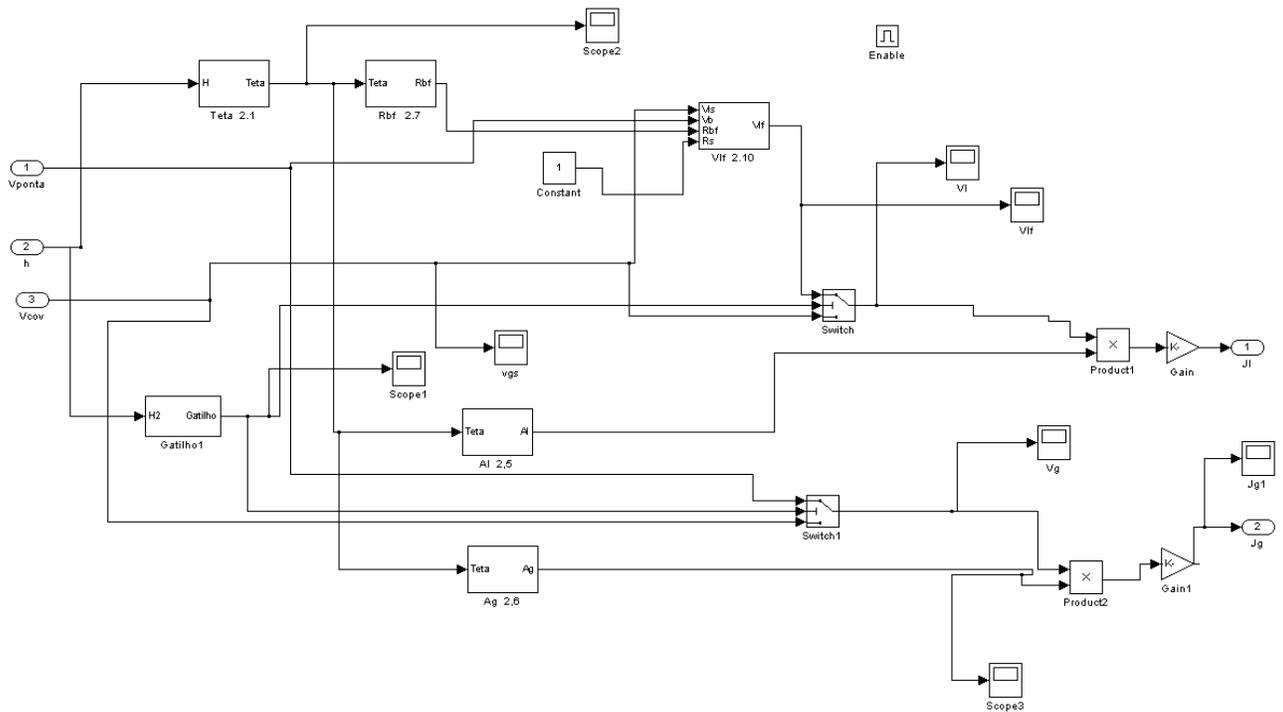


Figura 58: Diagrama de blocos do algoritmo para determinação das vazões da fase líquida e gasosa em um escoamento em padrão intermitente

Como pode ser averiguado no fluxograma pode-se conferir que diversas hipóteses foram elaboradas a fim de determinar todas as variáveis necessárias para se estimar as vazões das fases líquida e gasosa. O valor de R_{BF} foi transformado em uma variável instantânea de seção de área obtida a partir do ângulo θ conforme a equação 2.15. O valor de R_s foi aproximado para 1, configurando uma situação denominada pistão não areado (Zwanziger, 2007). Os demais valores foram obtidos como se pode conferir nas seguintes equações 5.26 a 5.28.

$$V_{GB} = V_{ponta} \quad 5.26$$

$$V_{gs} = V_{Cov} \quad 5.27$$

$$V_{ls} = V_{gs} \quad 5.28$$

Uma vez que a covariância estima a velocidade de translação de bolhas na fase líquida, esta foi utilizada para determinar V_{GS} , e, de acordo com os experimentos de Feng (2009), uma vez que no pistão as bolhas possuem raio esférico menor que 0.25 o raio do tubo, foi considerado para o cálculo de V_{LS} a validade da equação 5.28.

Para determinar V_{GB} , a velocidade de resposta de uma estimativa mediante gatilho provou ser muito mais conveniente para o propósito de estimativas de vazão resultando na utilização da equação 5.25 para a determinação de V_{GB} . A determinação de V_{LF} é um pouco mais complexa, pois depende da obtenção de diversas outras variáveis e posteriormente da aplicação das equações 2.17 a 2.19 relativas à conservação de massa. Para obter as variáveis necessárias para o cálculo de V_{LF} , algumas hipóteses tiveram de ser levantadas. Segundo Duarte (2007) experimentos demonstraram que a diferença entre a velocidade da cauda da bolha e a velocidade não seriam superiores a 2%, de modo que a utilização de um gatilho de velocidade de cauda para determinar V_B pareceu ser uma escolha coerente. Entretanto, uma vez que só é possível saber o valor de V_{Cauda} após a total translação da bolha (ou seja, após a translação do líquido do filme) foi optado por calcular V_B mediante a equação 2.19 para posteriormente calcular V_{LF} e V_{GB} mediante a equação 2.18 e 2.19.

$$V_{LF} = V_B + \frac{R_S(V_{LS} - V_B)}{R_{BF}} \quad 2.18$$

$$V_{GB} = V_B + \frac{(1 - R_S)(V_{GS} - V_B)}{1 - R_{BF}} \quad 2.19$$

A partir das velocidades V_{GB} e V_{LS} e também do tempo decorrido entre as ativações dos gatilhos de ponta e de cauda da bolha, é possível estimar os comprimentos tanto da bolha como do pistão, utilizando as relações dadas pelas equações 4.33 e 4.34. A partir destas informações foram estimados os comprimentos de bolhas e pistões, assim como o número de olhas e pistões medidos, e portanto a frequência de pistões por segundo de cada um dos escoamentos realizados no regime intermitente. Estes dados são apresentados no Anexo A, na forma das estatísticas com comprimentos médios de bolha e pistão e também apresentados mediante histogramas.

$$L_B = V_{GB} \cdot (t_3 - t_2) \quad 4.33$$

$$L_S = V_{LS} \cdot (t'_2 - t_3) \quad 4.34$$

O Anexo também A apresenta às ilustrações dos sinais de cada um dos dezesseis escoamentos em regime intermitente que foram testados, demonstrando a dinâmica destes fluxos. A Tabela 8 apresenta um resumo dos dados apresentados no Anexo A.

Tabela 8: Estatísticas de comprimentos para o regime intermitente

	Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Frequência das bolhas (Hertz)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)	Número de pistões detectados (45 s)	Frequência dos pistões (Hertz)
A	0,76	0,09	29	0,6444	0,27	0,16	30	0,6667
B	0,20	0,88	20	0,4444	0,23	0,11	21	0,4667
C	0,39	0,68	16	0,3556	0,46	0,24	16	0,3556
D	0,38	0,82	15	0,3333	0,36	0,11	14	0,3111
E	1,00	0,62	34	0,7556	0,43	0,40	34	0,7556
F	1,72	1,03	41	0,9111	0,45	0,28	40	0,8889
G	1,96	0,86	41	0,9111	0,45	0,27	42	0,9333
H	1,87	0,77	38	0,8444	0,24	0,15	39	0,8667
I	0,68	0,32	50	1,1111	0,51	0,32	50	1,1111
J	0,64	0,29	102	2,2667	0,26	0,15	102	2,2667
K	0,86	0,29	96	2,1333	0,11	0,23	95	2,1111
L	0,94	0,33	95	2,1111	0,20	0,09	95	2,1111
M	0,36	0,15	124	2,7556	0,26	0,13	123	2,7333
N	0,39	0,10	147	3,2667	0,17	0,07	148	3,2889
O	0,54	0,16	155	3,4444	0,17	0,08	156	3,4667
P	0,74	0,25	146	3,2444	0,19	0,10	146	3,2444

A metodologia experimental dos ensaios para o regime intermitente foi definida de maneira análoga as anteriores, utilizando simulações computacionais com dados obtidos em laboratório e comparando com valores mensurados mediante rotâmetros. A figura 59 define os escoamentos que foram utilizados para os testes no regime intermitente.

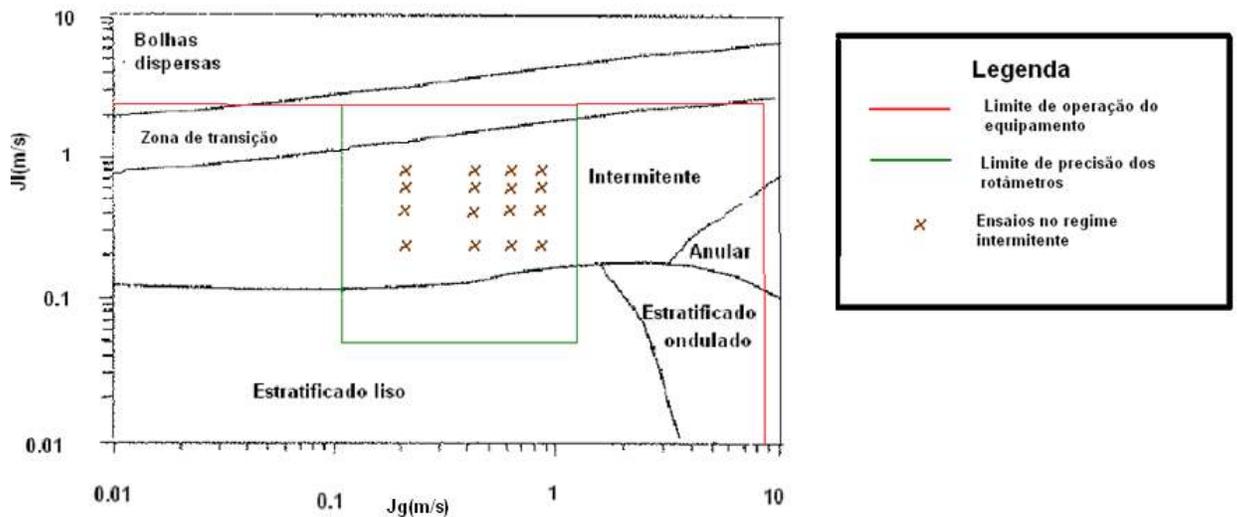


Figura 59: Escoamentos utilizados para experimentos no regime intermitente

Conforme a figura 60 demonstra, as vazões de gás foram obtidas com uma precisão próxima a 24.4 % para o perfil de velocidade constante e 12.5% para o perfil de velocidade laminar. A figura 63 demonstra que como esperado, a simplificação para um perfil de velocidade constante estimou todos quase os valores de vazão acima da medição real dada pelos rotâmetros. A aproximação para o perfil laminar demonstrou ser mais confiável em vazões baixas, demonstrando que conforme a vazão aumenta e o escoamento se torna turbulento à hipótese de um perfil laminar torna-se muito simples e inexata para realizar uma boa estimativa de vazão.

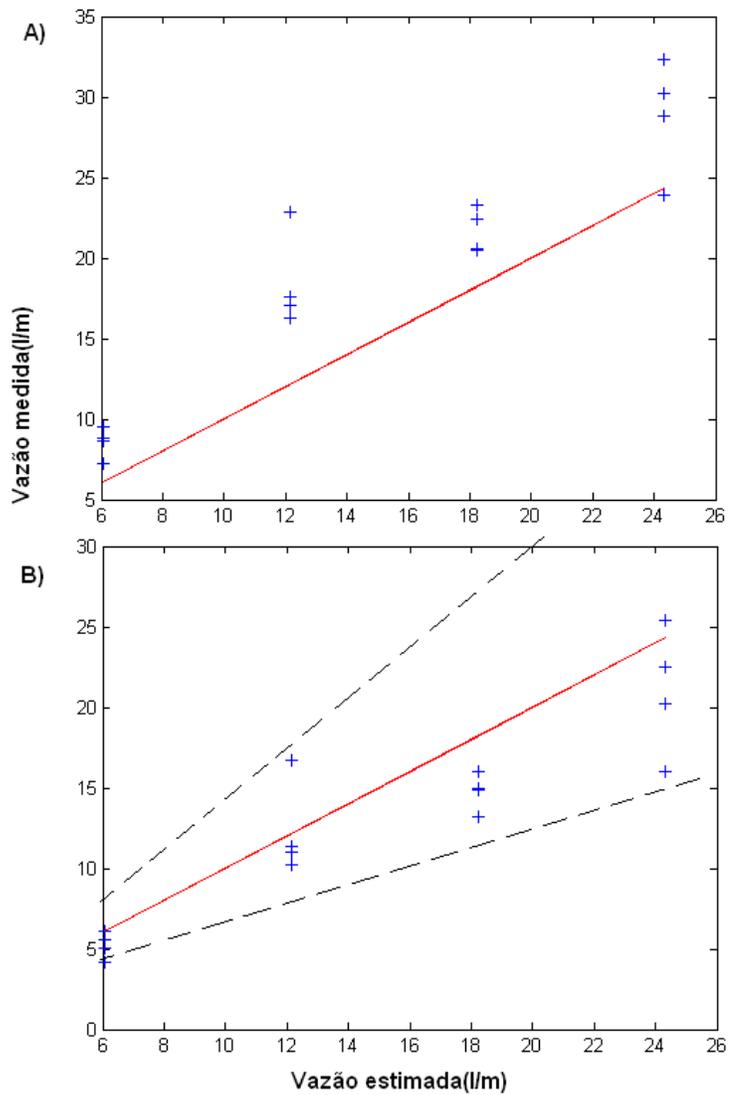


Figura 60: Estimação de vazão no padrão intermitente para a vazão gasosa para a) Perfil de velocidade Constante b) Perfil de velocidade laminar

A figura 61 apresenta os resultados obtidos para a estimação de vazão da fase líquida considerando um perfil de velocidade constante e um perfil de velocidade laminar. Com o perfil de velocidade constante a estimação calculou valores muito acima do esperado obtendo uma incerteza de cerca de 28.45 %, uma queda de confiabilidade em relação à estimação da velocidade do gás. Assumindo um perfil de velocidade laminar a estimativa obteve uma incerteza de 20.85% .

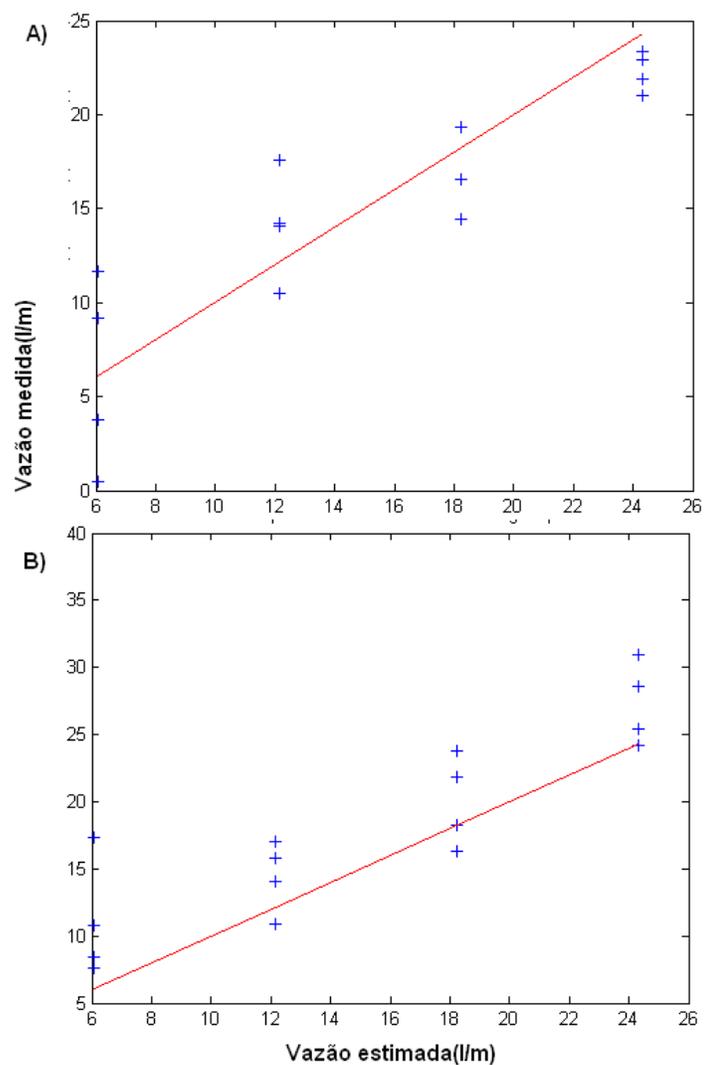


Figura 61: Estimação de vazão no padrão intermitente para a vazão líquida para a) Perfil de velocidade Constante b) Perfil de velocidade laminar

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou heurísticas para a obtenção de parâmetros em escoamentos bifásicos a partir de um sensor de impedância. Este estudo foi restrito para o regime de escoamento horizontal água-ar nos regimes de bolha, intermitente e estratificado. Foram desenvolvidos algoritmos utilizando os sinais provenientes de sensores de impedância com transdutor intrusivo baseado em uma haste instalada transversalmente na tubulação.

O estudo foi todo feito considerando o controle de cinco variáveis iniciais, sendo estas a base para o cálculo de outros parâmetros. Além disto, foi utilizado o valor de duas constantes conhecidas referentes à geometria do sensor: a distância entre os dois sensores de impedância dispostos em sequência, o diâmetro do tubo. As variáveis utilizadas foram a variável relativa ao tempo que é contínua e conhecida e os sinais elétricos correspondentes as medições da montante e da jusante, além das medições prévias para ambos os sensores dos sinais quando o duto esta preenchido apenas por gás.

Primeiramente foi realizado um estudo a fim de verificar a precisão da correlação entre a magnitude do sinal dos sensores de impedância e o nível de líquido na mistura. Foi elaborado um experimento de calibração estática, feito em uma pequena seção de tubo, a fim de estimar a incerteza da relação e condutividade e nível de líquido. O nível do líquido foi verificado com um paquímetro e após realizar a regressão linear do sinal, foram verificadas incertezas próximas à ordem de 2% em ensaios realizados em diferentes temperaturas, demonstrando uma relação diretamente proporcional entre a variação da tensão de saída do sensor de impedância e o nível de líquido no duto.

Posteriormente foram apresentadas alternativas dinâmicas para uma das etapas do processo de calibração na normalização da tensão para um valor entre 0 e 1: A medição e estimativa da tensão do tubo completamente preenchido pelo líquido. Foram apresentadas duas metodologias capazes de estimar este valor dinamicamente e seus resultados foram comparados com valores estimados em ensaios preliminares com escoamentos monofásicos de líquido (cheio) e gás (vazio). Foram verificadas dispersões correspondentes respectivamente a 6% e 3% para os métodos com e sem correção de ruído respectivamente, concluindo-se que existe a aplicabilidade destas estratégias.

Também foi possível perceber uma consequência de aumento progressivo de erro devido à ausência de uma calibração automática de tensão de vazio. Futuramente recomenda-se a elaboração de estratégias dinâmicas para outras etapas da calibração, tal como a obtenção da tensão de vazio, ou a compensação das variações de temperatura nos sensores .

Em seguida ,foram elaboradas três técnicas a obtenção da taxa de deslocamento de uma seção de área da jusante para a montante do sensor representando a velocidade média do escoamento: Um rastreador inspirado pelo método de Newton-Raphsow e cálculos da correlação e covariância dos sinais variando o valor do atraso τ entre os sinais. Os métodos utilizando os cálculos de correlação e covariância foram feitos com amostragens relativamente pequenas, correspondentes a 2 segundos.

Os algoritmos possuíam como limite de velocidade estimada a faixa de 0.05 a 5 metros por segundo , e foram testados com velocidades variando de 0.2 à 2 metros por segundo. Os estudos demonstraram. Que a técnica do rastreador obteve incertezas próximas a 1.7 e 2.6 % para os regimes intermitente e estratificado respectivamente, porém no regime de bolhas a precisão decaiu para 36%. A técnica da correlação cruzada , utilizando um período de amostragem pequeno falhou em todo os casos , demonstrando a necessidade de utilizar esta técnica em um período maior englobando diversas células unitárias. Uma alternativa demonstrada para a correlação cruzada em períodos curtos foi a utilização de outra técnica estatística, a covariância. O método obteve incerteza entre 15 e 20 % para todos os três tipos de escoamento.

Utilizando um fator de corte padrão preliminarmente calculado, componentes de velocidade também foram estimadas a partir de um sistema de gatilhamento, capaz de identificar dinamicamente pontos de referência nas células unitárias do regime intermitente e distinguir o início e o termino das bolhas e tal como dos pistões. Utilizando-se desta informação é possível cronometrar a velocidade da ponta e da cauda da bolha além do tempo de duração de cada um dos segmentos da célula unitária. A partir destas informações , foi realizado um ensaio para avaliar um método medição automática de comprimentos de bolha e de pistão. Foram realizadas experimentos e os resultados foram comparados e apresentados.

Em relação às estimativas de vazão foi demonstrada a versatilidade de uma medição pontual de escoamentos , multiplicando segmentos de área com vetores de velocidade a uma frequência bem maior que a hidrodinâmica dos fluidos , e foram demonstrados alguns equacionamentos capazes de

chegar nestas estimativas para alguns padrões de escoamento, partindo apenas de cinco variáveis iniciais.

Foram avaliadas as incertezas das estimativas de vazão de gás e de líquido padrão escolhido, a partir das variáveis de Holdup e velocidade avaliadas nas etapas anteriores. Os valores das vazões correspondentes foram verificados mediante rotâmetros instalados no equipamento experimental, e foram testados dez pontos do mapa de escoamento. Enquanto a estimação da vazão de líquido apresentou uma dispersão equivalente à 36% , a estimação da fase gasosa obteve uma dispersão inaceitável , entretanto demonstrou proporcionalidade as medições reais. Uma teoria que pode explicar este comportamento é que a técnica da covariância não obtém para este caso a velocidade das bolhas e sim , uma componente vetorial da velocidade do líquido.

Posteriormente, utilizando o modelo separado, foram realizados ensaios e, dez pontos do regime estratificado a fim de calcular a vazão apenas da fase líquida. Não foi encontrada uma maneira de utilizar as variáveis obtidas pelo sensor de impedância fim de calcular a vazão da fase gasosa, entretanto foi apresentada uma dispersão equivalente à 25% para a vazão de líquido considerando que o escoamento possuiria um perfil laminar.

O regime intermitente exigiu uma abordagem mais sofisticada. Foi utilizado o modelo de Taitel-Barnea (1990) e as variáveis de velocidade obtidas pelos gatilhos e pela covariância obtidas a fim de calcular as vazões de gás e líquido. Para este ensaio foram utilizados 16 medições variando J_l e J_g entre as velocidades correspondentes à 0.2, 0.4, 0.6 e 0.8 metros por segundo. Ao final dos ensaios foi observada uma dispersão correspondente à 12.5% para a fase gasosa e 20.5% para a fase líquida linearizando as estimativas de velocidade para um perfil linear. Ao considerar o perfil de cada fase tendo uma velocidade constante , as incertezas aumentaram para 24.4% e 28% respectivamente.

Futuras dissertações também poderão utilizar as mesmas técnicas desenvolvidas neste trabalho a fim de obter parâmetros e testa-las em outros sensores que trabalhem com técnicas de tomografia, o que inclui sensores de impedância capacitivos não intrusivos que podem ser utilizados em aplicações de campo bem restrita. Também são necessários extensivos trabalhos de mapeamento do comportamento das variáveis sobre a influência de parâmetros específicos dos fluidos, como viscosidade e densidade, e de parâmetros termodinâmicos como a temperatura.

REFERÊNCIAS

ABOUELWAGA, M., & KENDALL, E. J. (1980). The Use of Capacitance Sensors for Phase Percentage Determination in Multiphase Pipelines. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* , 29, 24-27.

AGGOUR, M.A. (1978), *Hydrodynamics and Heat Transfer in Two-Phase Two-Component Flow*, Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Canada.

ALMEIDA, J. A. *Sistemas de velocimetria por imagens de partículas*. Tese (Doutorado), faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

AHMED, W., *Capacitance Sensors for Void-Fraction Measurements and Flow-Pattern Identification in Air and Oil Two-Phase Flow*, *Sensors Journal, IEEE*, 2006, 6, 1153 -1163

AHRENS, F. W., *Heat Pump Modeling, Simulation, and Design: Heat Pump Fundamentals*, *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Heat Pump Fundamentals*, Espinho, Spain, 1980. J. Berghmans, Ed. The Hague, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1983.

AZEVEDO, A. C., & MENDES, L. F. (2002). *Desenvolvimento de um Sistema de Tomografia Capacitiva para Processos Multifásicos*. Universidade de Campinas.

BAKER, O., 1954, *Simultaneous Flow of Oil and Gas*, *Oil Gas Journal*, Vol. 53, pp. 185-190.

BECK M S and PLAKOWSKI A 1987 *Cross-Correlation Flowmeters: Their Design and Application* (Bristol: Adam Hilger)

BOULIARD J., ALBAN B., JACQUES P., XUEREB C. , *Liquid flow velocity measurements in stirred tanks by ultra-sound Doppler velocimetry*, LSGC/ENSIC/CNRS, 2001, France

BENNEN C. E., *Fundamentals of multiphase flow*, Cambridge University Press ,2005,chapter 1

Cao Z. , XU L. , XU C. , WANG H. , *Electrical resistance tomography(ERT) by using an ECT sensor*, *Sch. of Instrum. Sci. & Opto-Electron. Eng., Beihang Univ., Beijing, China , Imaging Systems and Techniques (IST)*, 2010 *IEEE International Conference on*,pg 63-66 , 2010

CARLSON J.,*Ultrasonic characterization of materials and multiphase flows*, Doctoral thesis, EISLAB, 2005

CORRÊA, F. C. *Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado).

DENNIS J.E. , SCHNABEL R.B. , *Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations*, 1996, SIAM society for industrial and applied mathematics

DYAKOWSKI T. ,Process tomography applied to multi-phase flow measurement 1996 ,*Meas. Sci. Technol.* 7 343, doi:10.1088/0957-0233/7/3/015

DORMAND, J. R.; PRINCE, P. J. (1980), "A family of embedded Runge-Kutta formulae", *Journal of Computational and Applied Mathematics* 6 (1): 19–26,

DUARTE, M. , ROSA, E.S., Influência da Viscosidade sobre o Escoamento Gás-Líquido Horizontal Intermitente ,Dissetação Mestrado,Campinas, 2007 Capítulo 5, Pag 148-160 ,

DUKLER, A. E., HUBBARD, M. G., 1975. "A model for gas-liquid slug flow in horizontal tubes." *Ind. Eng. Chem. Fund.*, Vol. 14, No. 4, pp. 337-347.

FALCONE G., HEWITT G. F., ALIMONTE C., *Multiphase Flow Metering: Principles and Applications* , 2009, pag 14-17, *Developments in petroleum science*

FENG J., Steady axisymmetric motion of a small bubble in a tube with flowing liquid, Cardiovascular R & D, Boston Scientific Corporation, Three Scimed Place, C-150 Maple Grove, MN 55311, USA, 2009

FERNANDES, R. C., SEMIAT, R., DUKLER, A. E., 1983. "Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes." *AIChE J.*, Vol. 29, No. 6, pp. 981-989.

FIGLIOLA, R., & BEASLEY, D. (2007). *Teoria e Projeto para Medições Mecânicas*. Rio de Janeiro: LTC.

FLORA B. F. , Sensor de impedância de anéis para medida de fração de vazio em escoamento gás-líquido. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas.

FONSECA JR, Roberto da , Medição do campo instantâneo de velocidade do líquido no escoamento bifásico intermitente em tubos horizontais e inclinados, Rio de Janeiro: Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. 206 p. Dissertação (Mestrado).

GREGORY, G. A. , SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. *AIChE J.*, v.15, pp. 833-835, 1969.

HAMMER E.A., JOHANSEN G.A., DIAKOWSKY T., ROBERTS E.P.L., WILLIAMS R.A. , HASSAN Y. A., CLAIBORN C.S. , *Multiphase Flow Handbook* , Capítulo 14 – Advanced Experimental techniques, 2006, Taylor & Francis Group

HEWITT G F, HARRISON P S, PARRY S J and SHIRES G L 1995 Development and testing of the 'Mixmeter' multiphase flowmeter *Proc. 13th North Sea Flow Measurement Workshop(Lillehammer, Norway)*

ISSA R. I., KEMPF M.H.W. , Simulation of Slugflow in Horizontal and Nearly Horizontal Pipes with the Two Fluid Model, *Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, International Journal of Multiphase Flow* , Vol 29 , 2003

LI D.H. , WU Y.X., LI Z.B., and ZHONG X.F. , Volumetric fraction measurement in oil-water-gas multiphase flow with dual energy gamma-ray system, China-UK Workshop on process tomography, april, 2005

LOCKHART, R.W., MARTINELLI, R.C.; Chem. Eng. Prog., Vol. 45. 1949, pp. 39–48

MANDHANE J.M., GREGORY C.A. and AZIZ K., "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes," *Int J Multiphase Flow*, 1(4), pp 537-554, 1974.

MASTELARI N., ROSA E. , Impedance Sensor for Industrial Measurement of Gas-Liquid Flow, Faculty of Mechanical Engineering-State University of Campinas, 2011

MAZIDI M.A., MAZIDI J.G. . The 8051 Microcontroller and embedded systems, Columbus , Ohio , pg 13-35

MI, Y.; TSOUKALAS, L. H.; ISHII, M.; LI, M.; XIAO, Z. Hybrid fuzzy-neural flow identification methodology. In: Proc. of the 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. New Orleans, USA: [s.n.], 1996. 6, 11, 12, 13, 16

NICHOLSON, M. K., AZIZ, K. and GREGORY, G.A., 1978. "Intermittent Two-Phase Flow in Horizontal Pipes: Predictive Models." *Can. J. of Chem. Eng.*, v.56, pp. 653-663.

NIÑO V. G., HRNJAK P. S. and NEWELL T. A. , Characterization of Two-Phase Flow in Micro channels , ACRC TR-202 October 2002 pg-26-28

NOAKES C., SLEIGHT A., An Introduction to Fluid Mechanics, School of Civil Engineering, University of Leeds, 2009

OLSVIK K, MARSHALL M and Whitaker T 1995 Fluenta multiphase flow meter, tested and marinised Proc. 13th North Sea Flow Measurement Workshop (Lillehammer, Norway) Pal R 1994 Metering

OTA K., ITAHASHI S., HAYASHI Y., SONE M., MIITSUIU H., MUROOKA Y., Relationship between Molecular Orientation and Conductivity of Dielectric Liquids Dissolving Restrained Water, Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL '99), Nara, Japan, July 20-25, 1999

PREMOLI, A., FRANCESCO, D., PRIMA, A., 1970. An empirical correlation for evaluating two-phase mixture density under adiabatic conditions. In: European Two-Phase Flow Group Meeting, Milan, Italy.

RAHMAN, M.A. and AMIRFAZLI, A. and HEIDRICK, T. & FLECK, B. A., A Review on Advanced Two-Phase Gas/Liquid Flow Measurement, *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering*, 2007, 13, 1-6

RICE, C. K., The Effect Of Void Fraction Correlation And Heat Flux Assumption On Refrigerant Charge Inventory Predictions, ASHRAE Transactions, vol. 93, Part 1, pp. 341-367, 1987.

SHOHAM, O., 1982. Flow pattern transition and characterization in gas–liquid two phase flow in inclined pipes. Ph.D. Thesis, Tel-Aviv University.

SHOHAM O., Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes , Society of petroleum engineers (SPE), 2009 , cap 1-2

SMITH, S. L., Void Fractions in Two-Phase Flow: A correlation Based upon an Equal Velocity Head Model, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, London, vol. 184, pt. 1, no. 36, pp. 647-664, 1969.

SUNDARESAN S. , Modeling the Hydrodynamics of Multiphase Flow Reactors: Current Status and Challenges, *AIChE Journal*, volume 46, pages 1102-1105, 2000

TAITEL, Y., BARNEA, D., 1990. “Two-phase slug flow.” *Advances, Heat Transfer*, Vol. 20, pp. 83-132. Ed. Academic Press, New York.

TMS320F2808, TMS320F2806, TMS320F2801 Digital Signal Processors Data Manual
Literature Number: SPRS230C , October 2003 – February 2005, Texas instruments

THOME, J. R. Engineering data book III, 2010, Faculty of engineering Science and technology, Swiss federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, Cap 17

THORN R, JOHANSEN G A and HAMMER E A 1997 Recent developments in three-phase flow measurement *Meas. Sci. Technol.* 8 691–701

TSOUKALAS, L. H.; ISHII, M.; MI, Y. A. Neuro-fuzzy methodology for impedance-based multiphase flow identification. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, [S.l.], v. 10, p. 545–555, 1997. 11, 12, 13, 16

VAN HOUT R., SHEMER L., BARNEA D., Evolution of hydrodynamic and statistical parameters of gas–liquid slug flow along inclined pipes, Department of Fluid Mechanics and Heat Transfer, Faculty of Engineering, Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel, *Chemical Engineering Science* 58 , 2003, 115 – 133

WANGJIRANIRAN W., MOTEGI Y., RICHTER S., KIKURA H., ARITOMI M. and YAMAMOTO K., Intrusive Effect of Wire Mesh Tomography on Gas–liquid Flow Measurement, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 40, No. 11, p. 932–940 , November, 2003

WOLDESEMAYAT M. A., GHAJAR A. J. , Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078, 2006

YANG, H. C.; KIM, D. K. & KIM, M. H., Void fraction measurement using impedance method *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, 14, 151 - 160

ZHANG H. J., YUE W.T., HUANG Z.Y., Investigation of oil-air two-phase mass flow rate using Venturi and void fraction sensor, Institute of automation instrumentation, journal of Zhejiang university SCIENCE , Zhejiang university,2004

ZWANZIGER, Marc, *Inversão de Um Modelo de Célula Unitária Para Medição dos Fluxos Bifásicos de Gás e Líquido em Escoamentos no Padrão Intermitente*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 137 p. Dissertação (Mestrado).

ANEXO A

Na seção em anexo podem ser verificados, os sinais obtidos para o regime intermitente pelo sensor, o Holdup estimado a partir e os histogramas referente ao comprimento das bolhas e pistões de cada escoamento.

Tabela A.1 – Parâmetros de escoamento em regime intermitente

Ensaio	J (m/s)	Ql(Gpm)	Qg(Scfh)	Q(l/m)	Rs
A	0,2	1,61		6,08	50
	0,2		12,78	6,08	
B	0,2	1,61		6,08	66,67
	0,4		25,57	12,16	
C	0,2	1,61		6,08	75
	0,6		38,35	18,24	
D	0,2	1,61		6,08	80
	0,8		51,13	24,32	
E	0,4	3,21		12,16	33,33
	0,2		12,78	6,08	
F	0,4	3,21		12,16	50
	0,4		25,57	12,16	
G	0,4	3,21		12,16	60
	0,6		38,35	18,24	
H	0,4	3,21		12,16	66,67
	0,8		51,13	24,32	
I	0,6	4,82		18,24	25
	0,2		12,78	6,08	

J	0,6	4,82		18,24	40
	0,4		25,57	12,16	
K	0,6	4,82		18,24	50
	0,6		38,35	18,24	
L	0,6	4,82		18,24	57,14
	0,8		51,13	24,32	
M	0,8	6,42		24,32	20
	0,2		12,78	6,08	
N	0,8	6,42		24,32	33,33
	0,4		25,57	12,16	
O	0,8	6,42		24,32	42,86
	0,6		38,35	18,24	
P	0,8	6,42		24,32	50
	0,8		51,13	24,32	

A

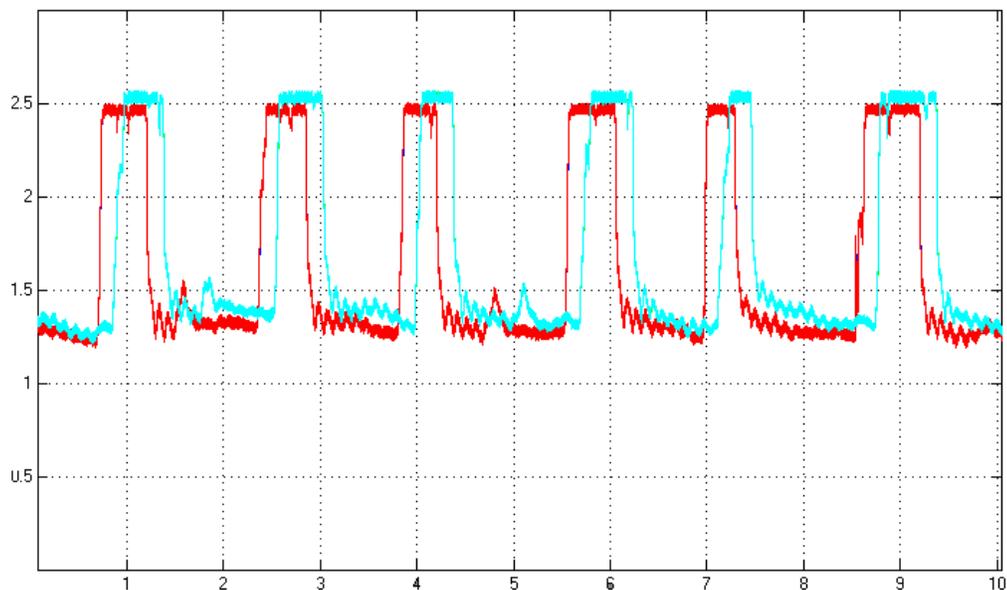


Figura A.1 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

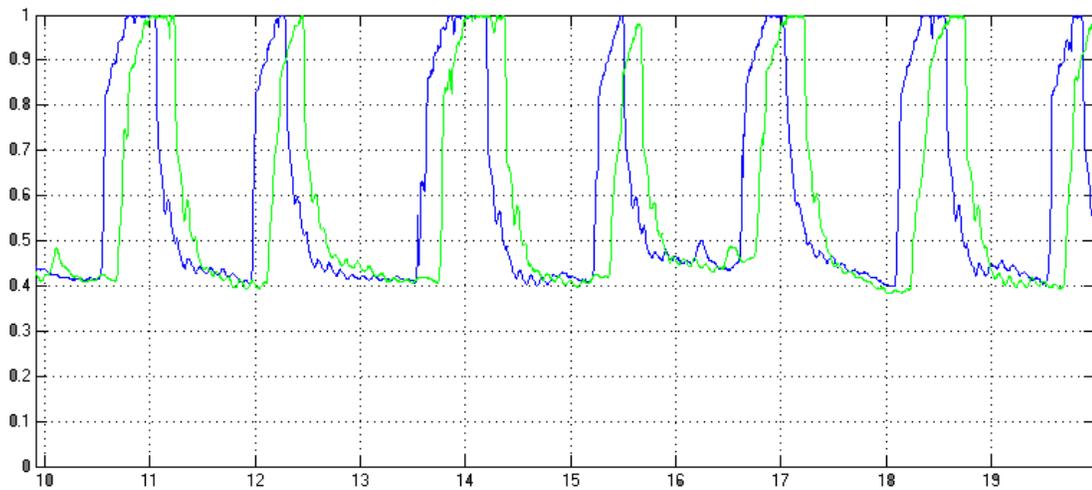


Figura A.2 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

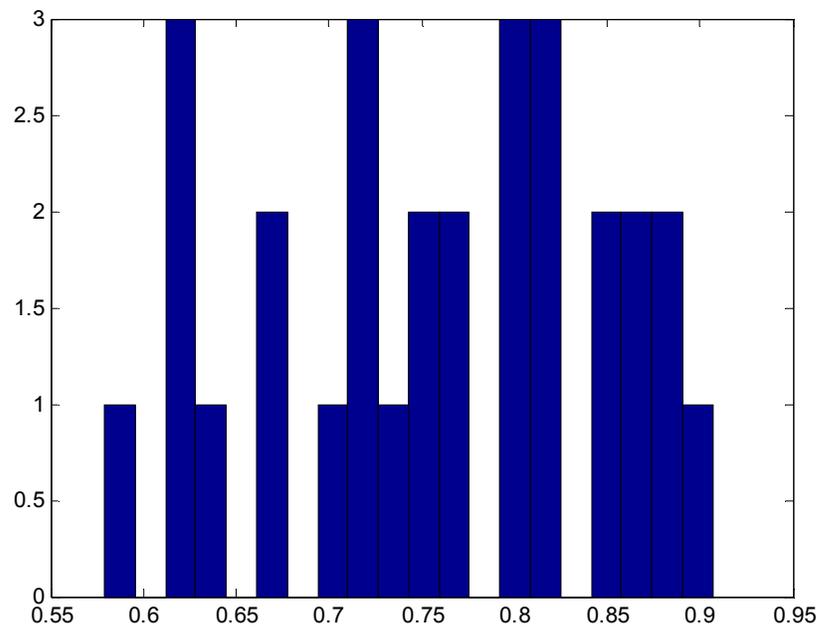


Figura A.3 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

Tabela A.2 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)

0.7595	0.0921	29	0.2693	0.1633
--------	--------	----	--------	--------

B

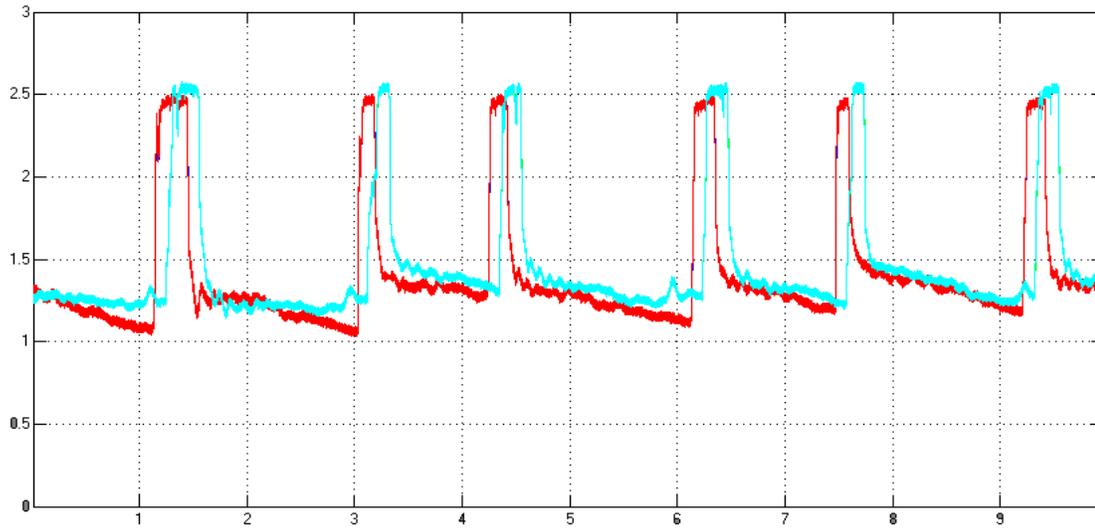


Figura A.4 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

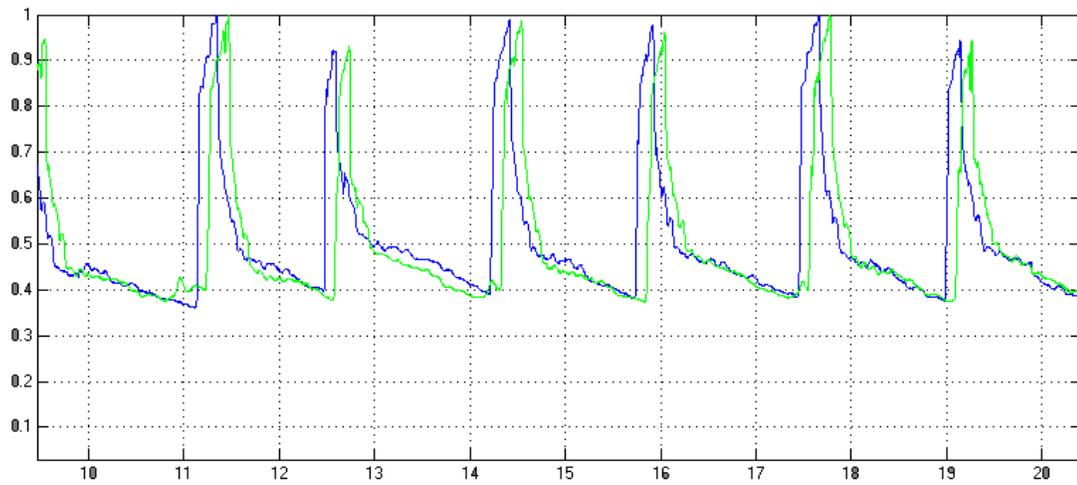


Figura A.5 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

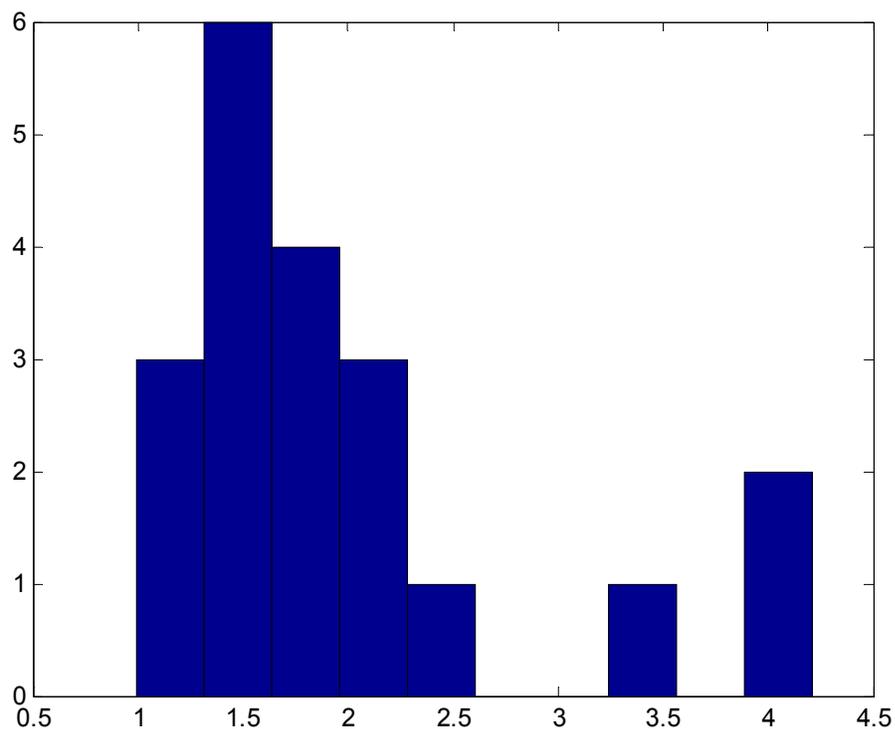


Figura A.6 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

Tabela A.3 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido.

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
1.9906	0.8845	20	0.2296	0.1100

C

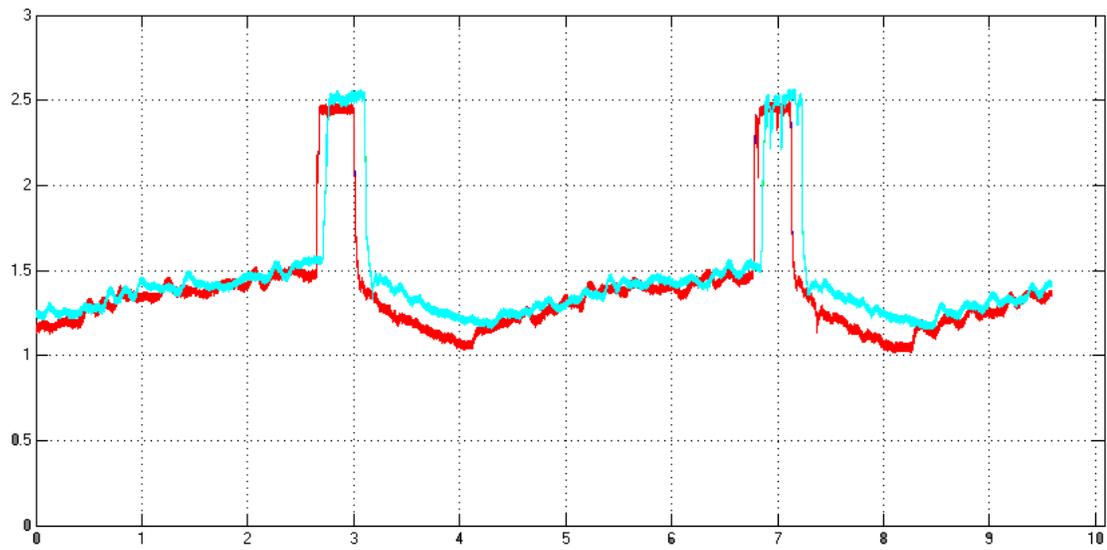


Figura A.7 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

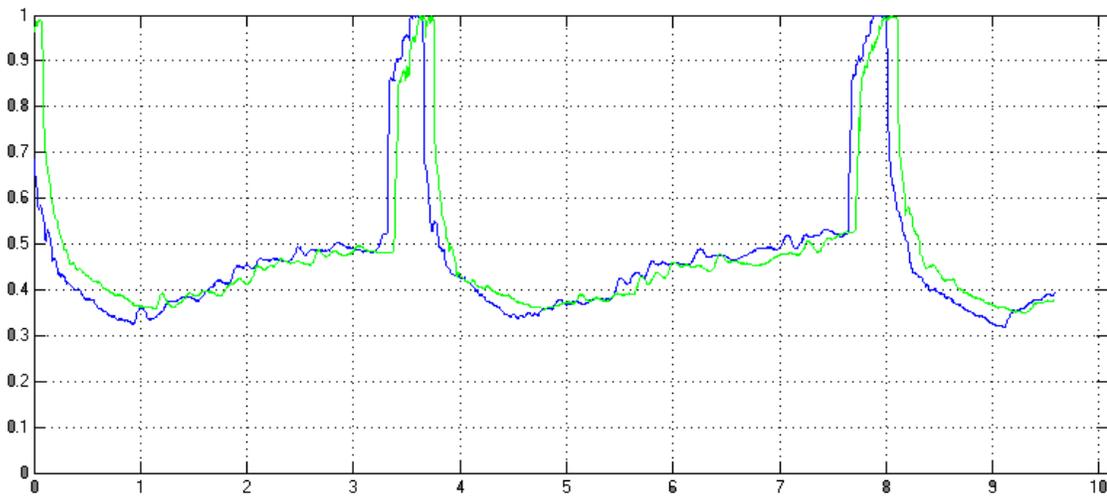


Figura A.8 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

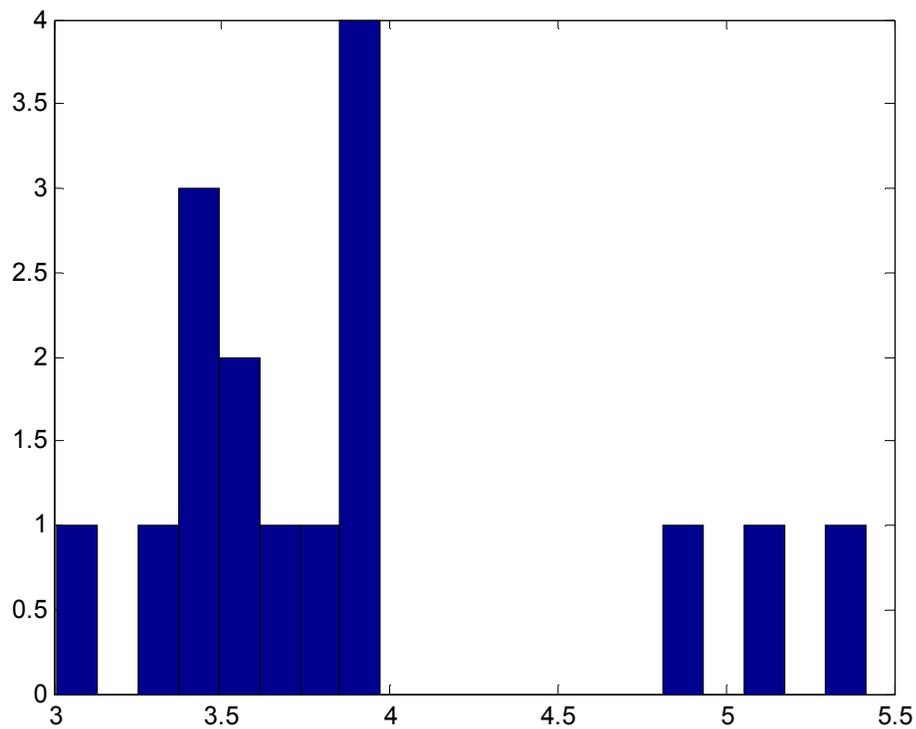


Figura A.9 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

Tabela A.4 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido.

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
3.8941	0.6844	16	0.4643	0.2376

D

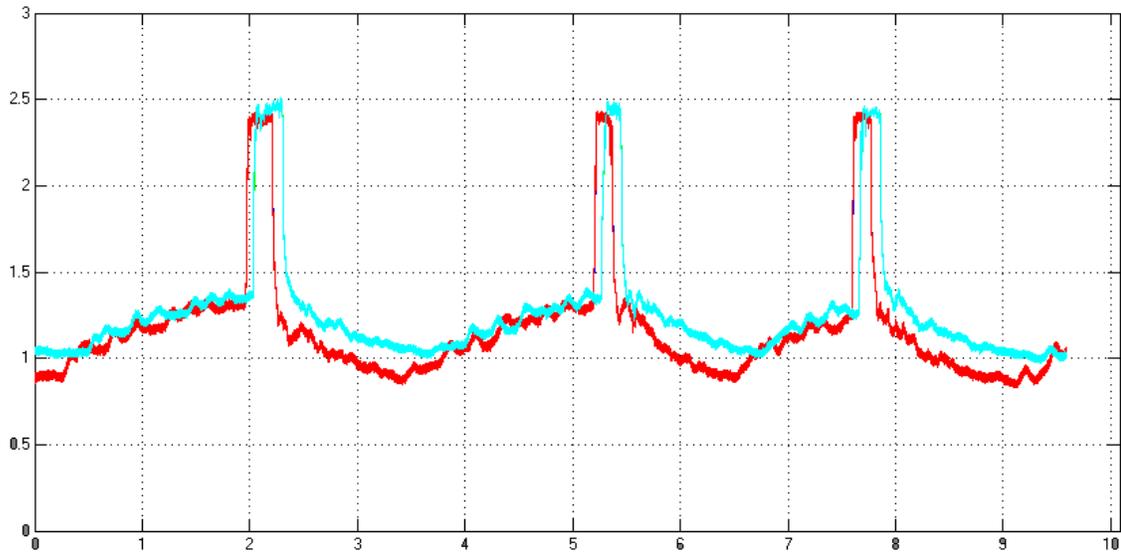


Figura A.10 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

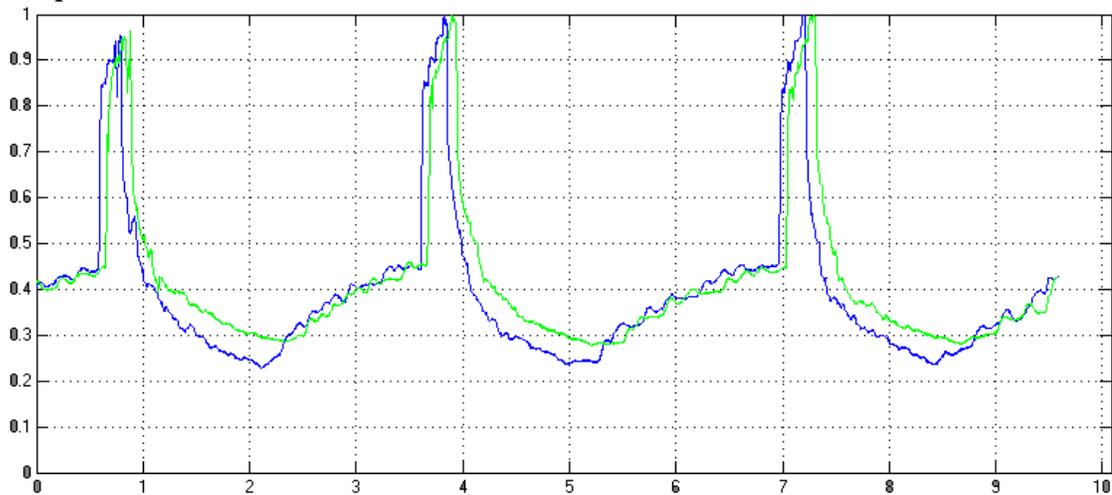


Figura A.11 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

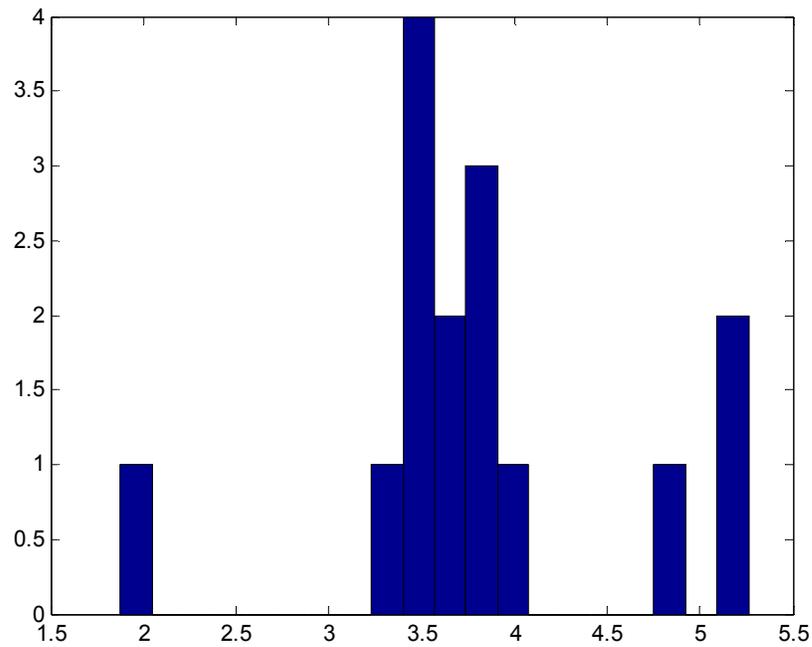


Figura A.12 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido

Tabela A.5 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 6,08 l/m de líquido.

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
3.8105	0.8167	15	0.3599	0.1078

E

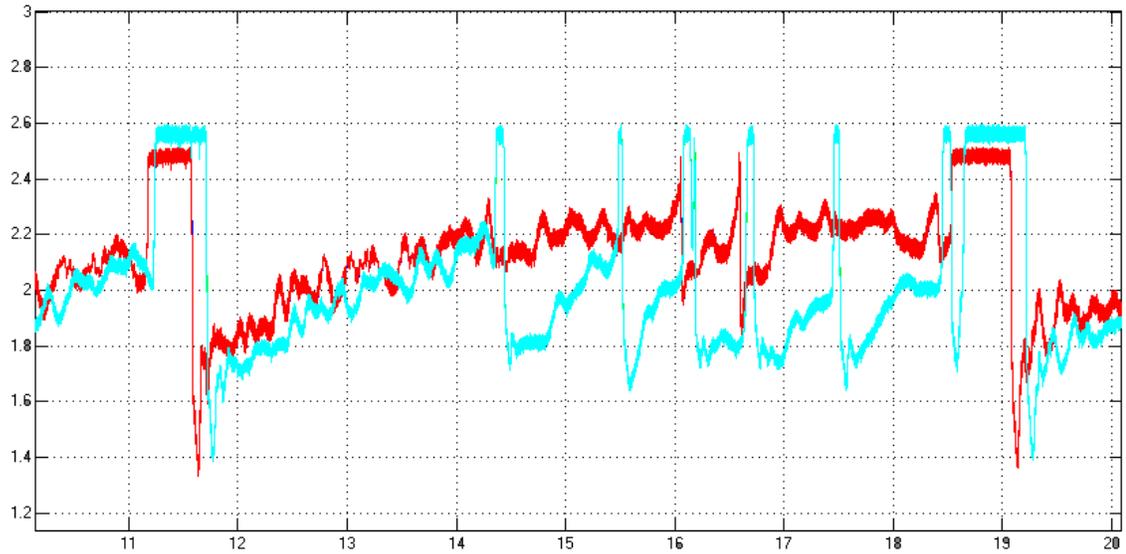


Figura A.13– Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

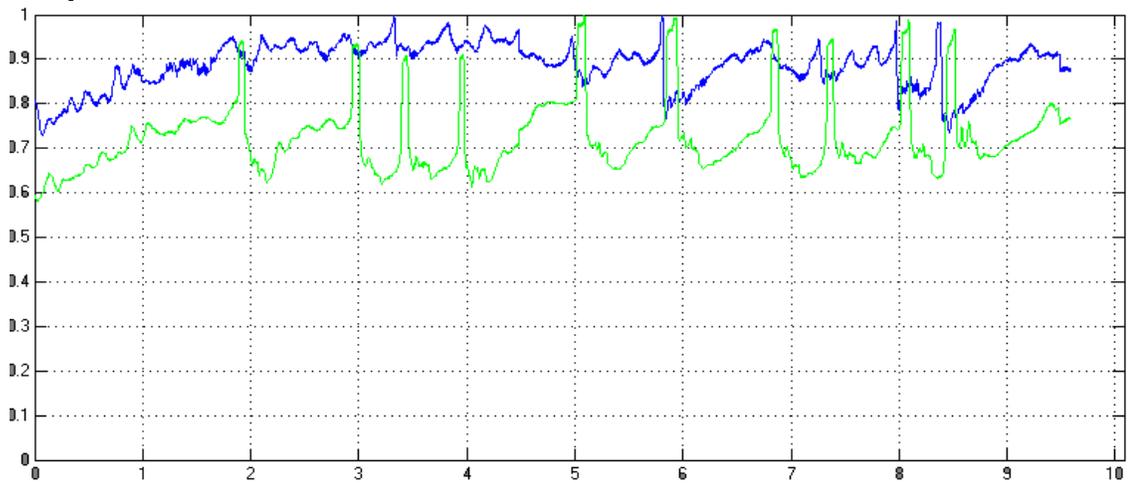


Figura A.14 –Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

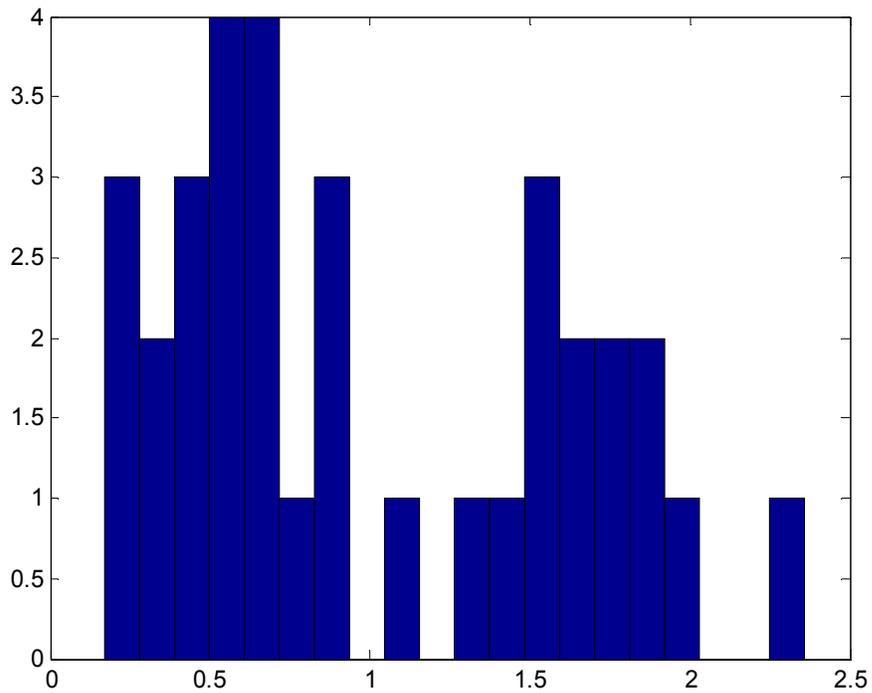


Figura A.15 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Tabela A.6 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
1.0045	0.6215	34	0.4344	0.4043

F

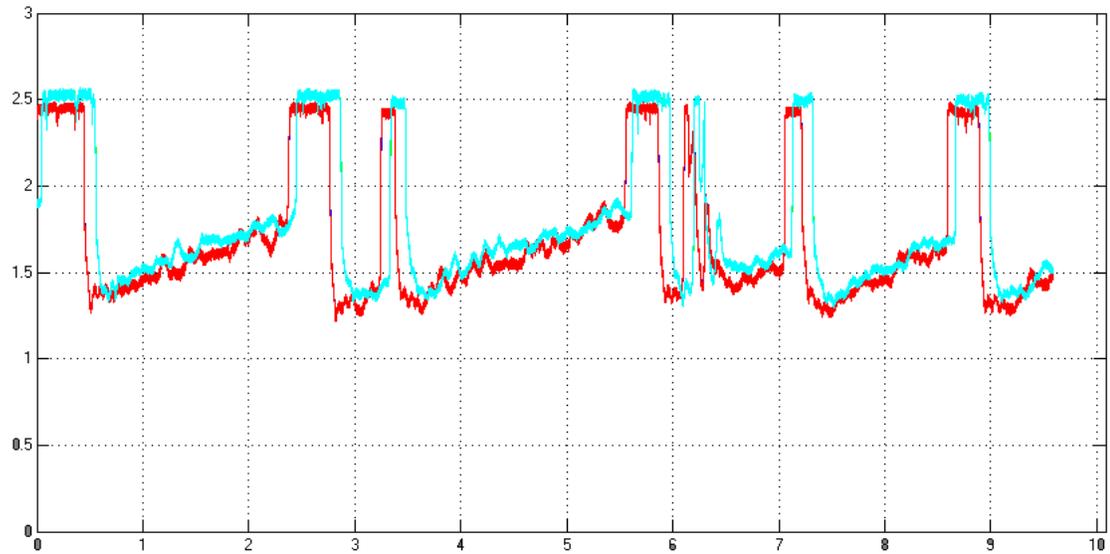


Figura A.16 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

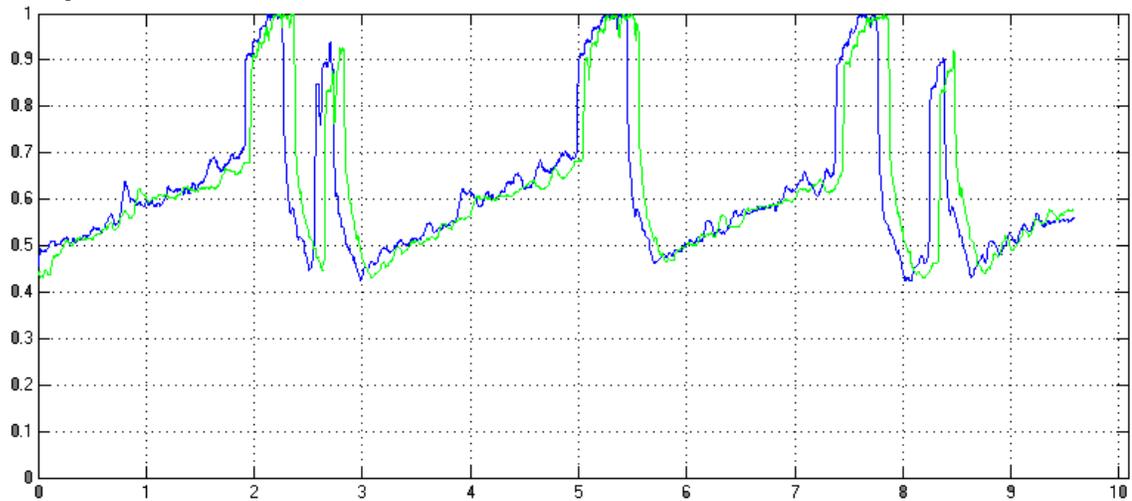


Figura A.17 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

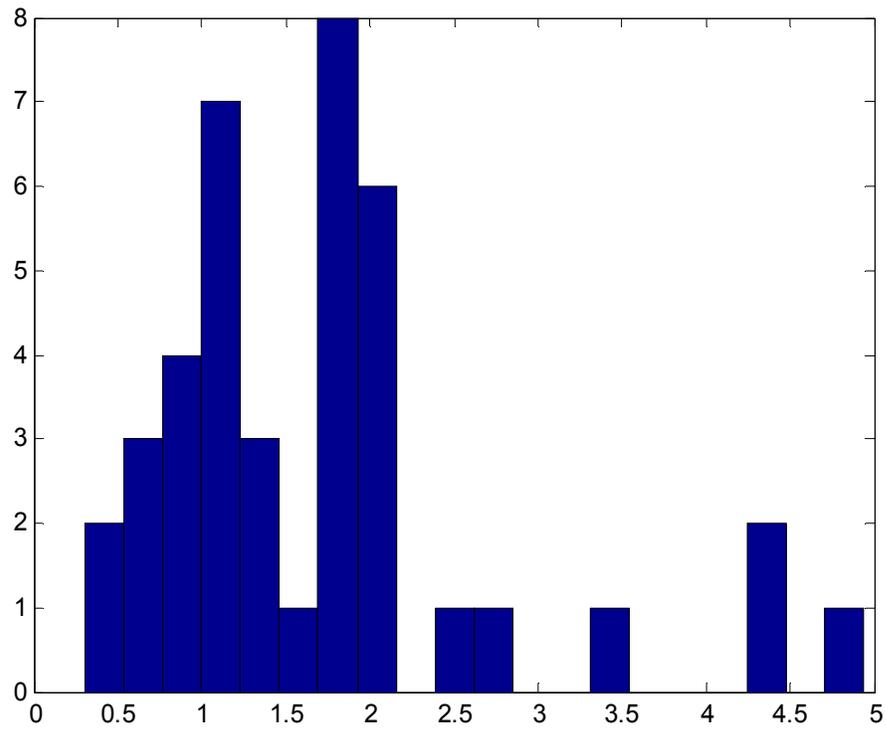


Figura A.18 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Tabela A.7 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
1.7185	1.0327	41	0.4506	0.2841

G

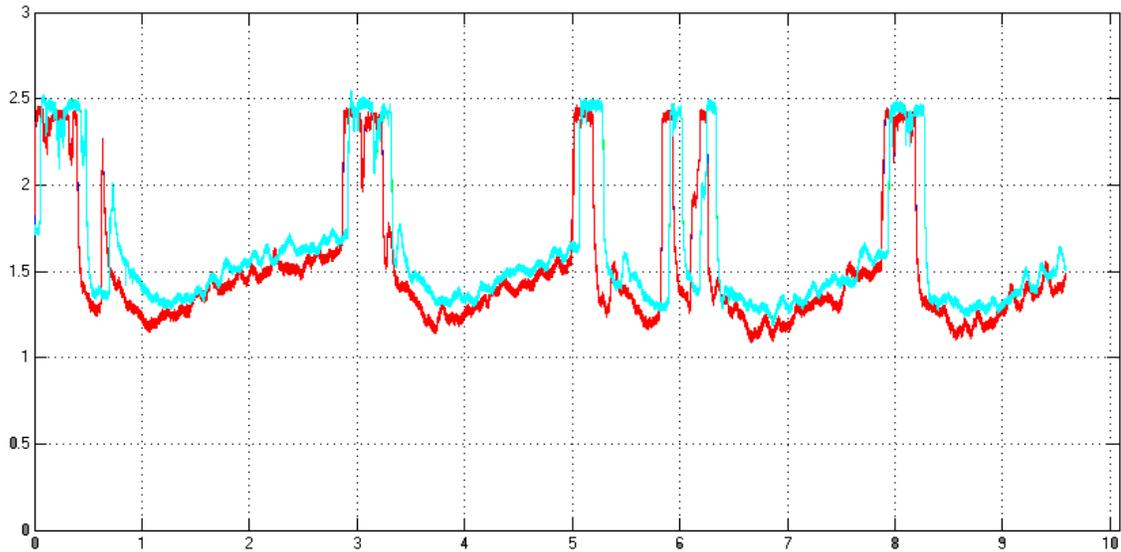


Figura A.19 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

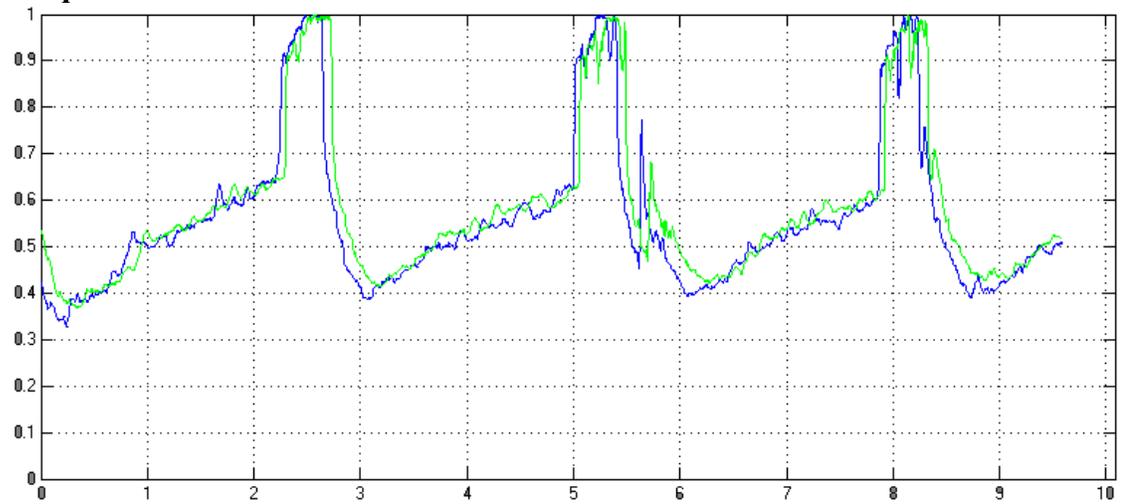


Figura A.20 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

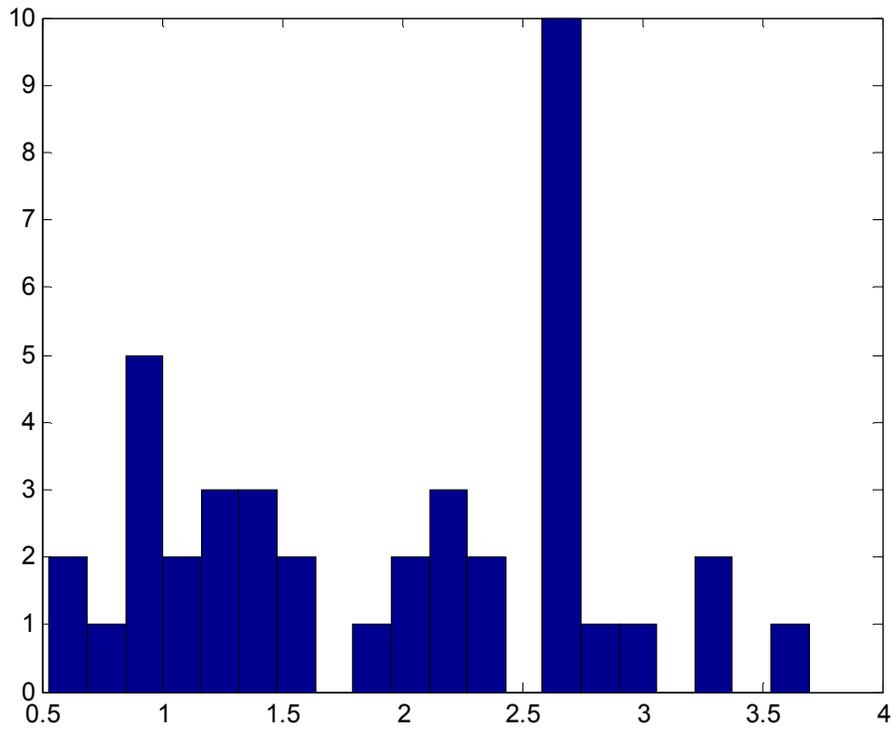


Figura A.21 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás 12,16 l/m de líquido

Tabela A.8 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
1.9593	0.8576	41	0.4539	0.2698

H

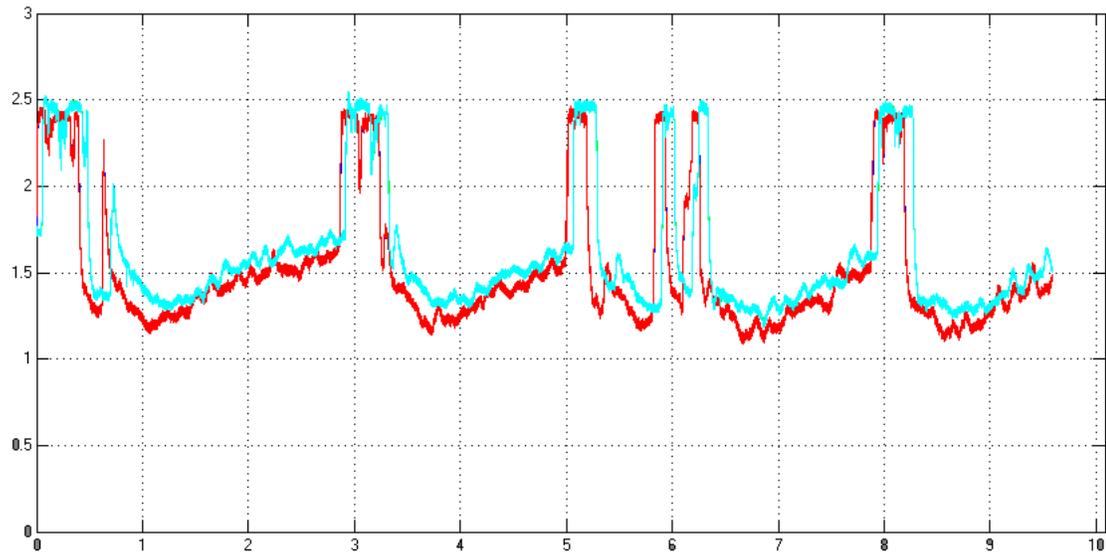


Figura A.22 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

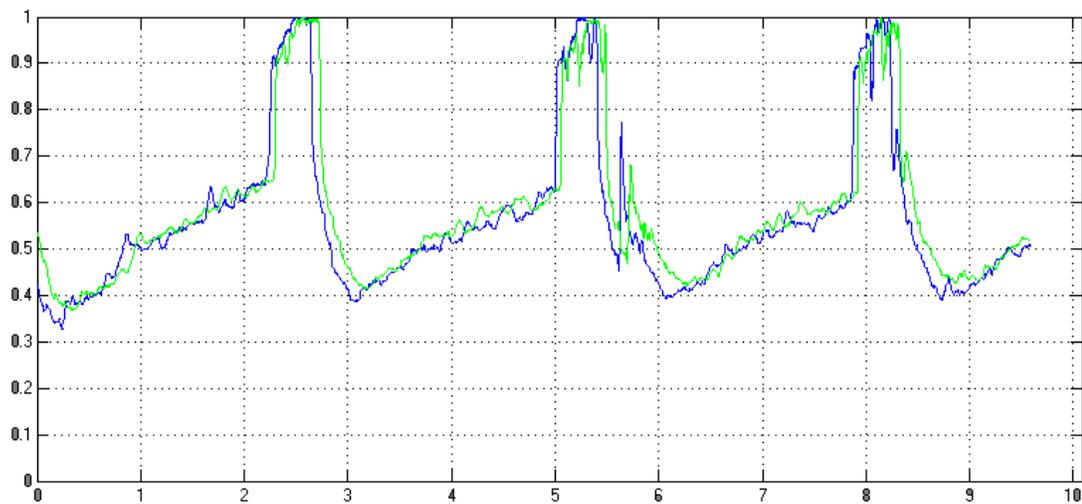


Figura A.23 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

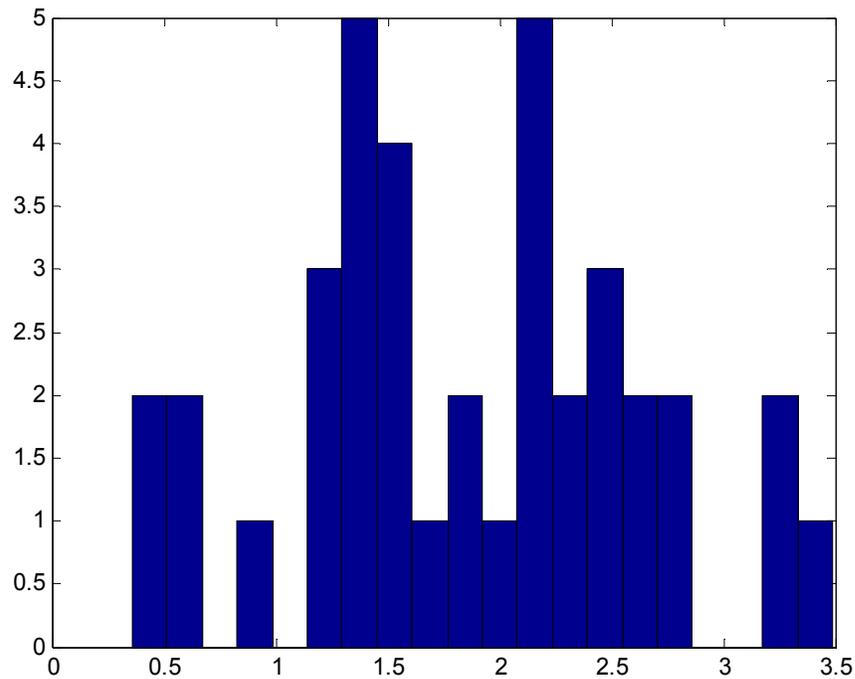


Figura A.24 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Tabela A.9 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 12,16 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
1.8667	0.7740	38	0.2423	0.1516

I

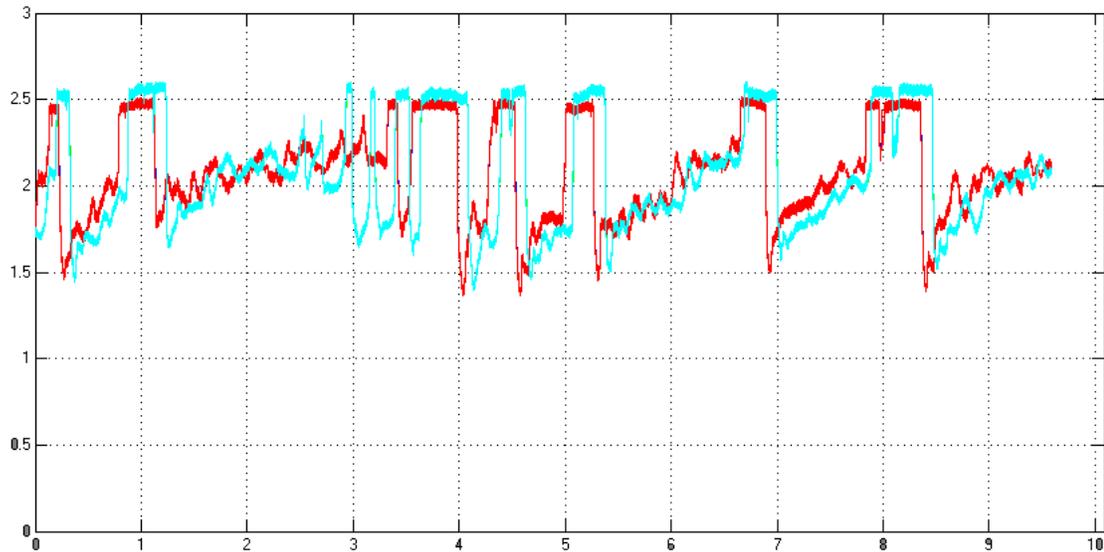


Figura A.25 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

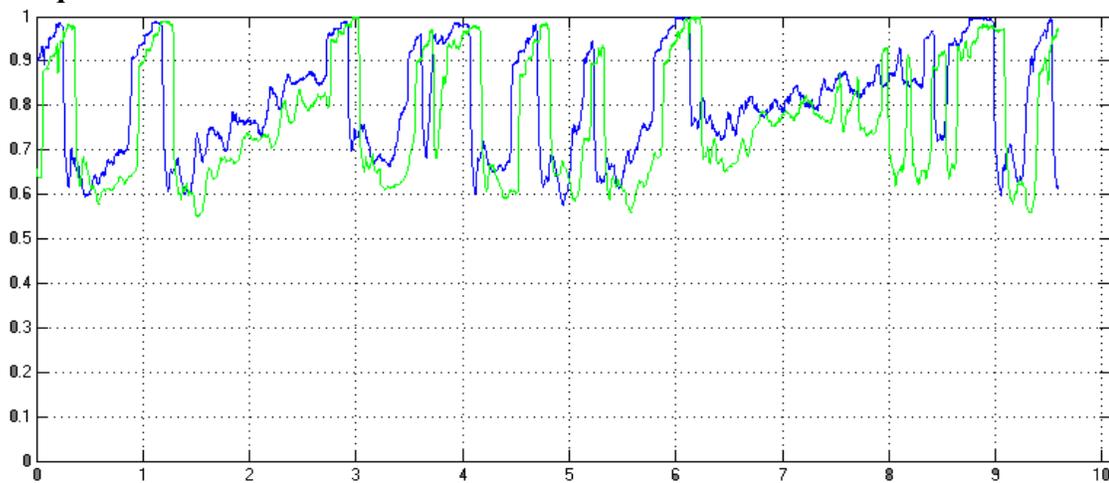


Figura A.26 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

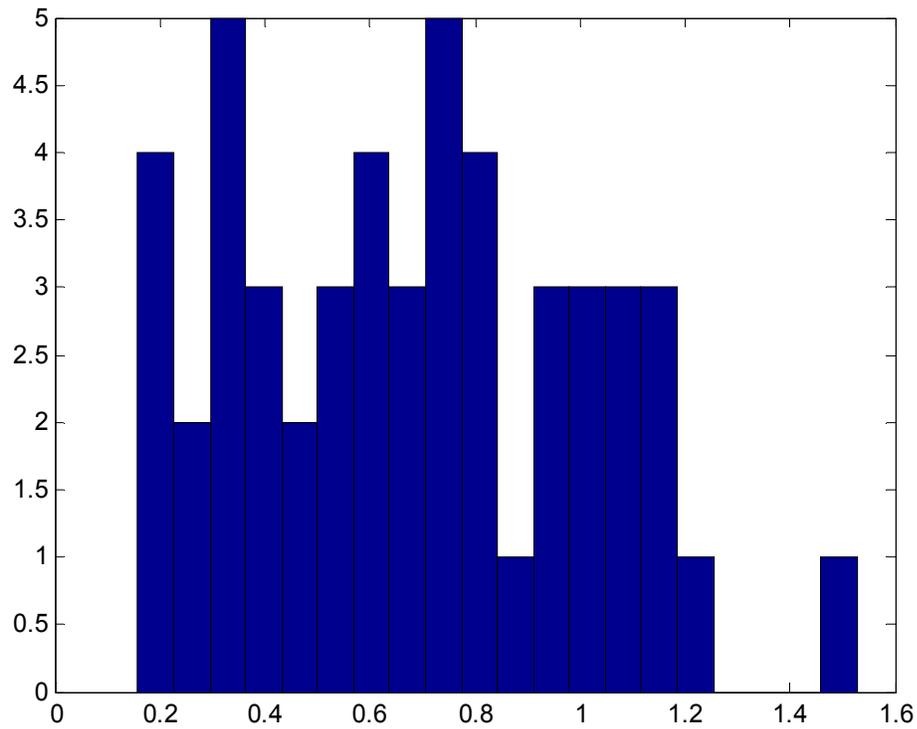


Figura A.27 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Tabela A.10 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.6819	0.3249	50	0.5114	0.3191

J

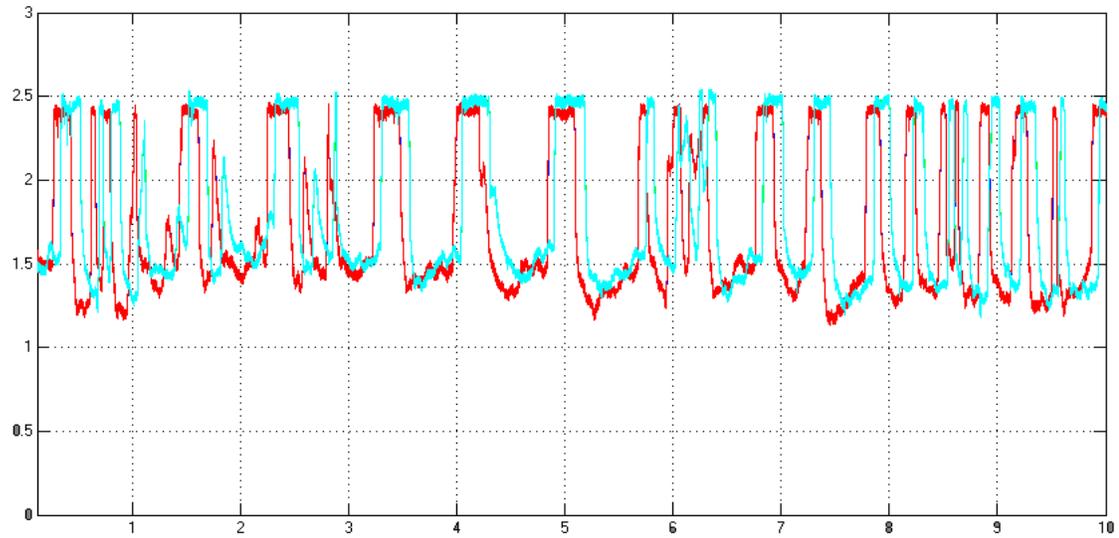


Figura A.28 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

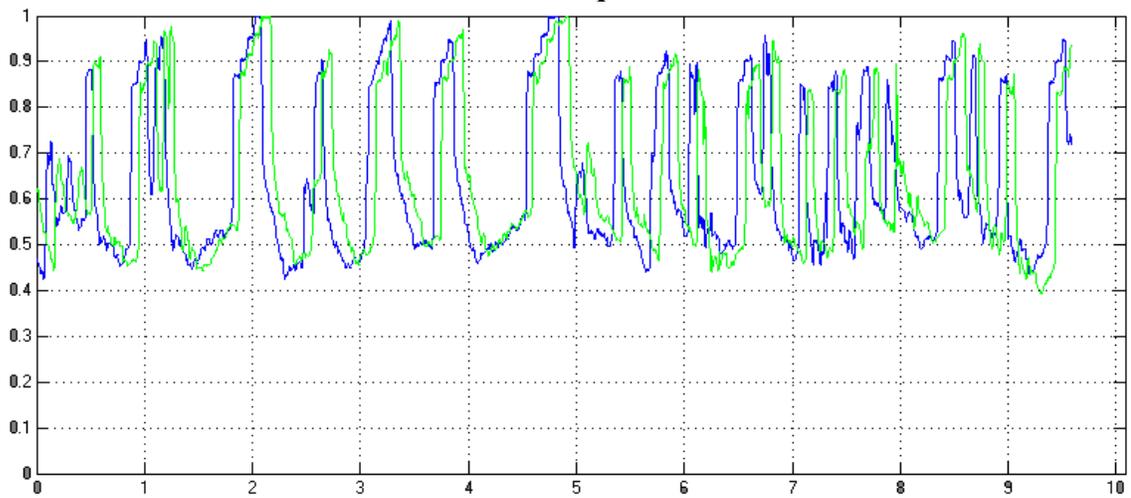


Figura A.29 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

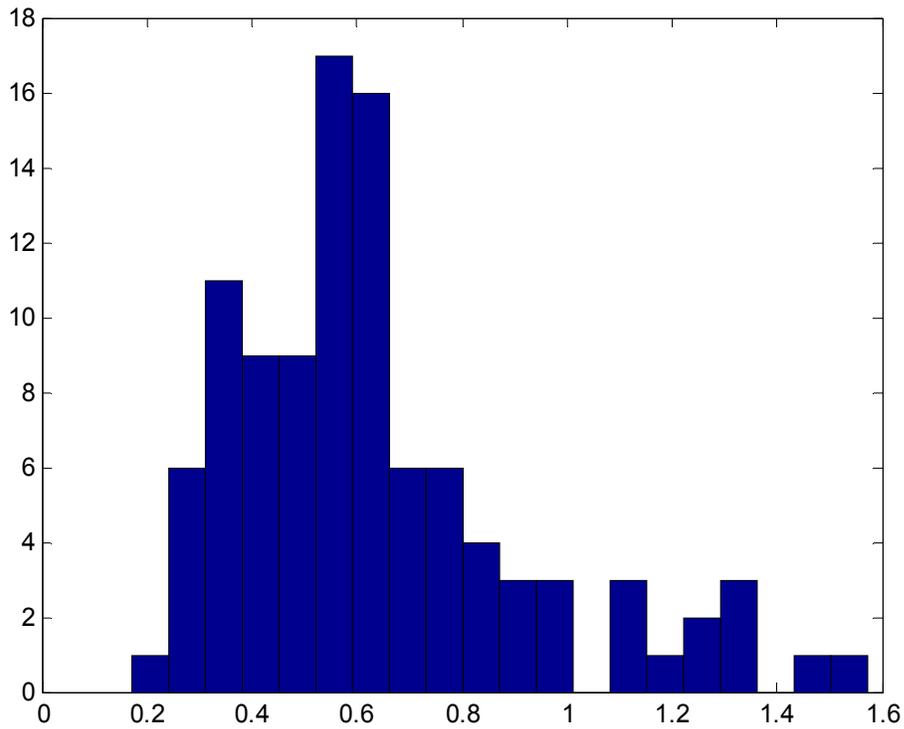


Figura A.30 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Tabela A.11 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.6398	0.2855	102	0.2611	0.1457

K

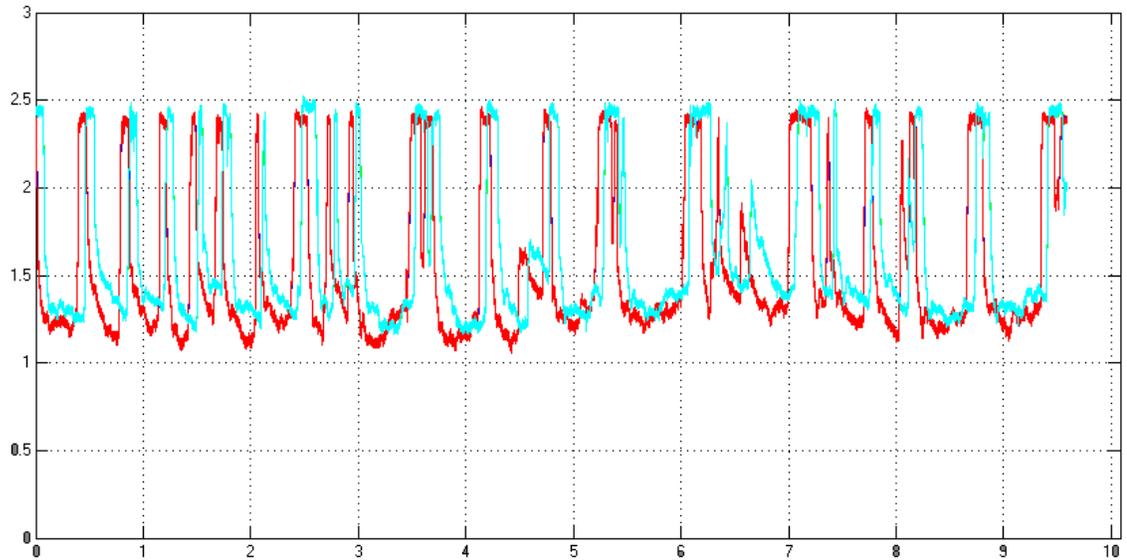


Figura A.31 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

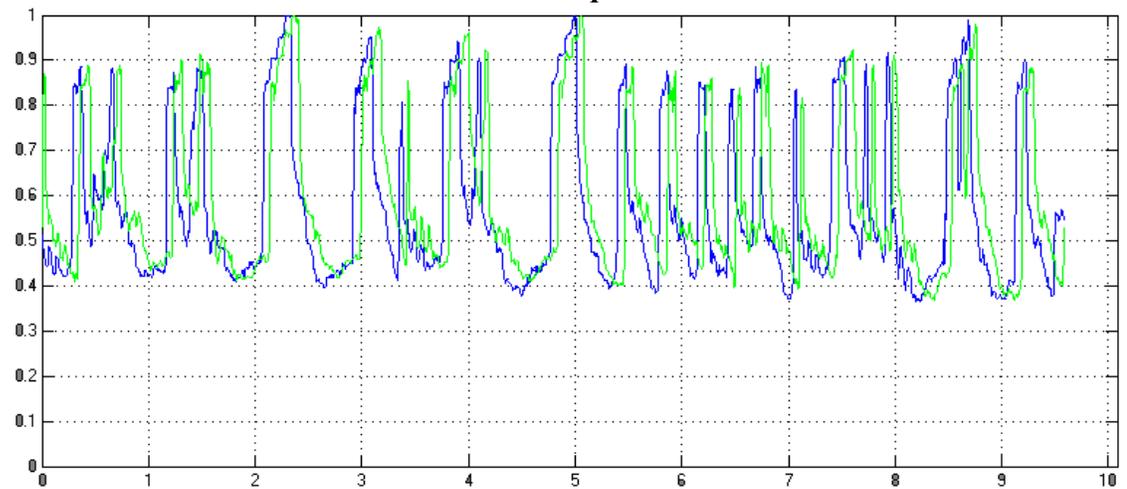


Figura A.32 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

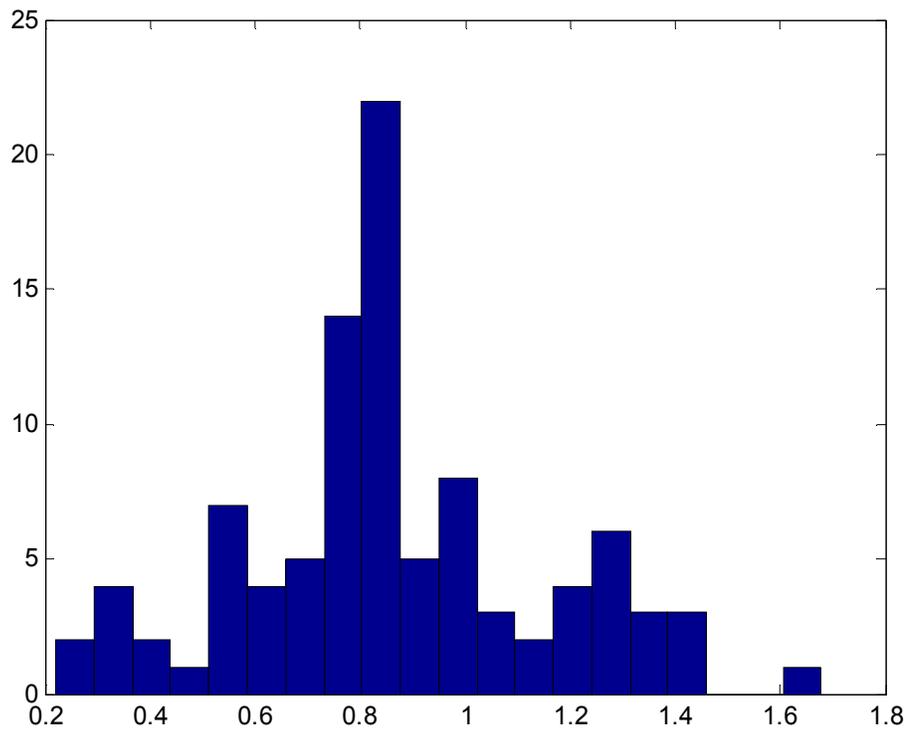


Figura A.33 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Tabela A.12 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.8578	0.2890	96	0.1118	0.2303

L

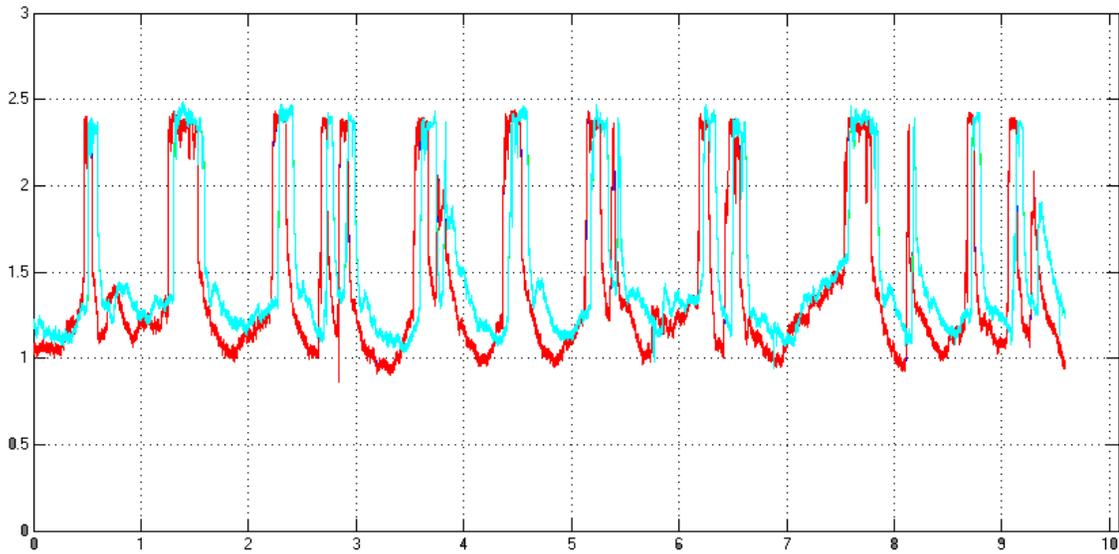


Figura A.34 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

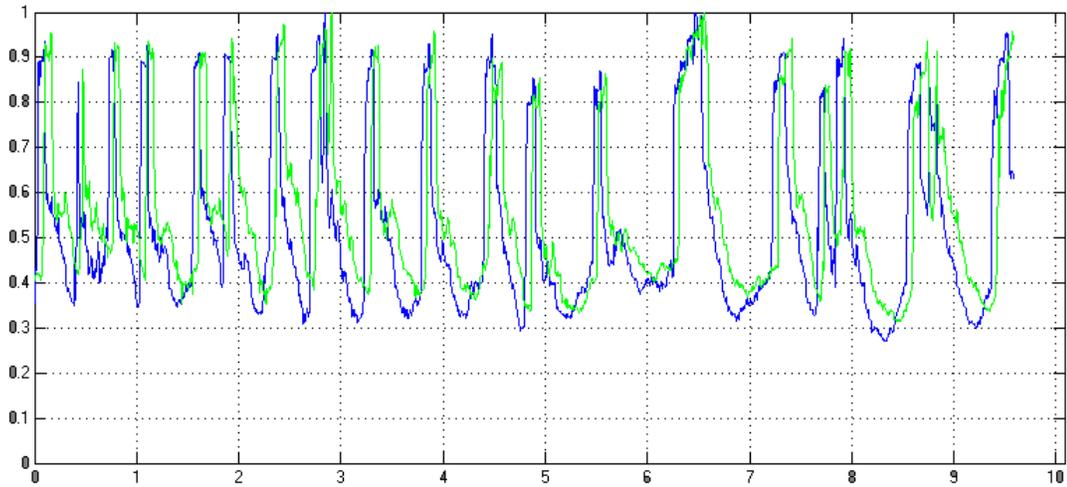


Figura A.35 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

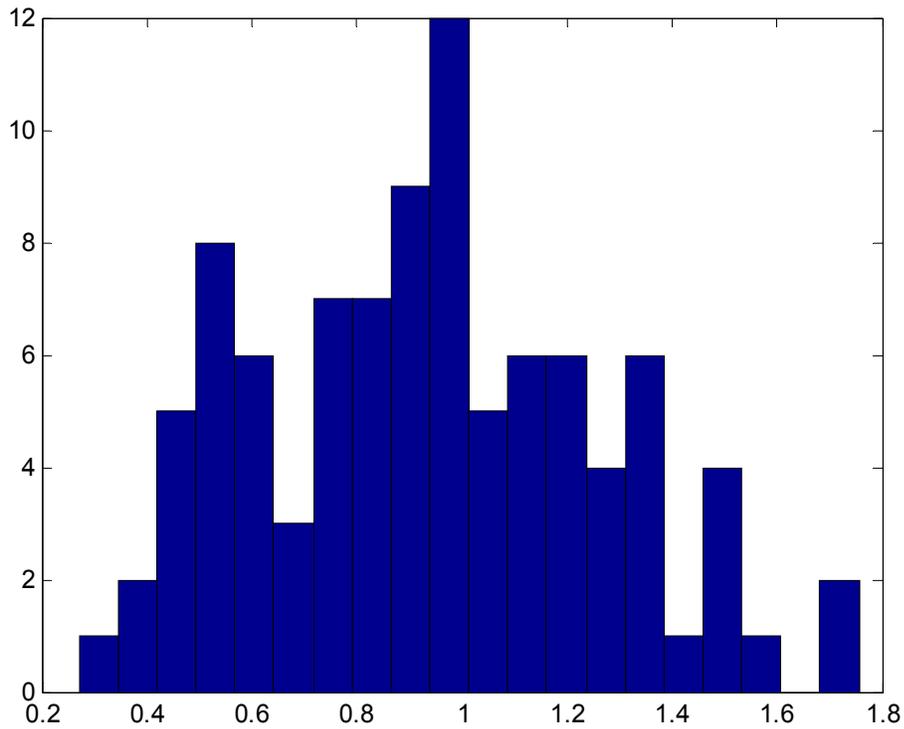


Figura A.36 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Tabela A.13 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 18,24 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.9388	0.3259	95	0.2007	0.0866

M

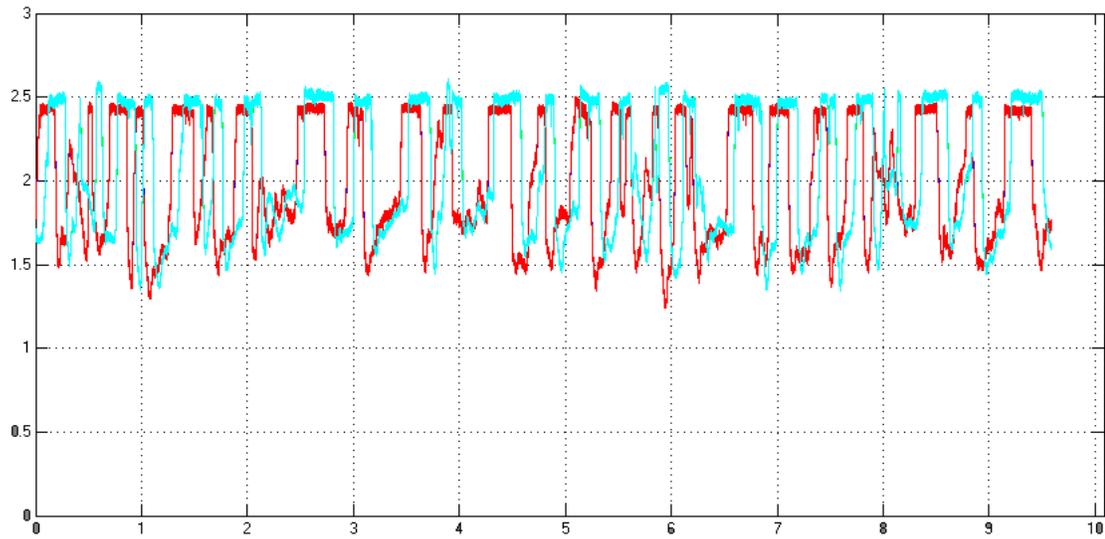


Figura A.37 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

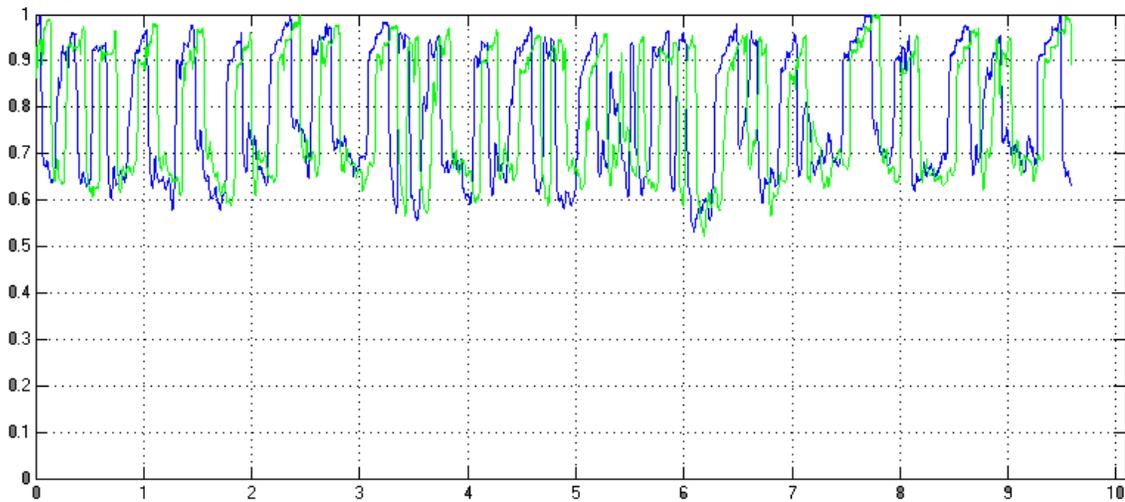


Figura A.38 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

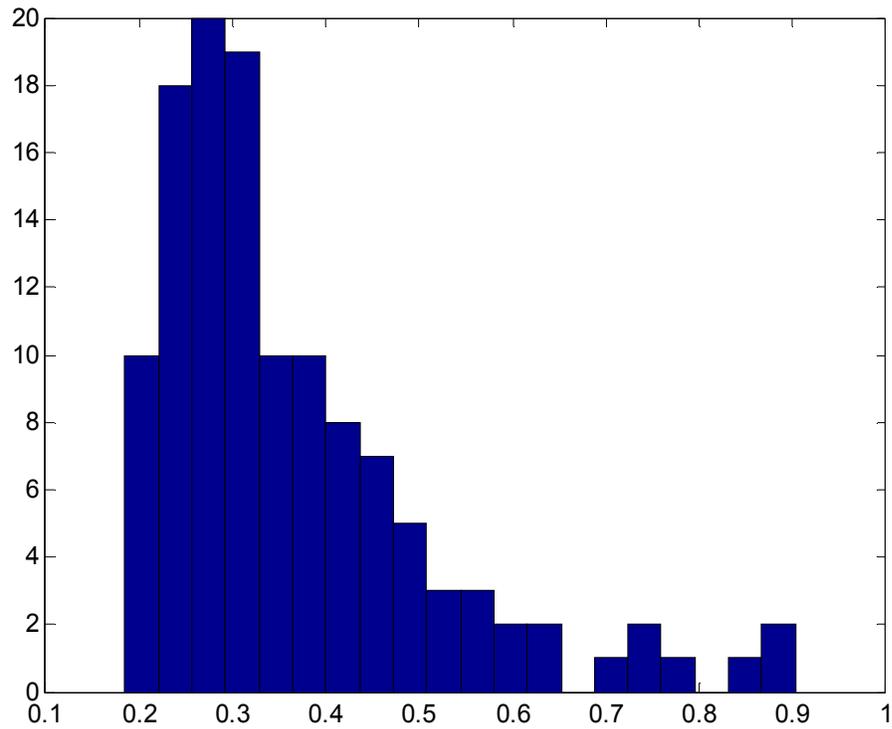


Figura A.39 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Tabela A.14 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 6,08 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.3639	0.1499	124	0.2578	0.1278

N

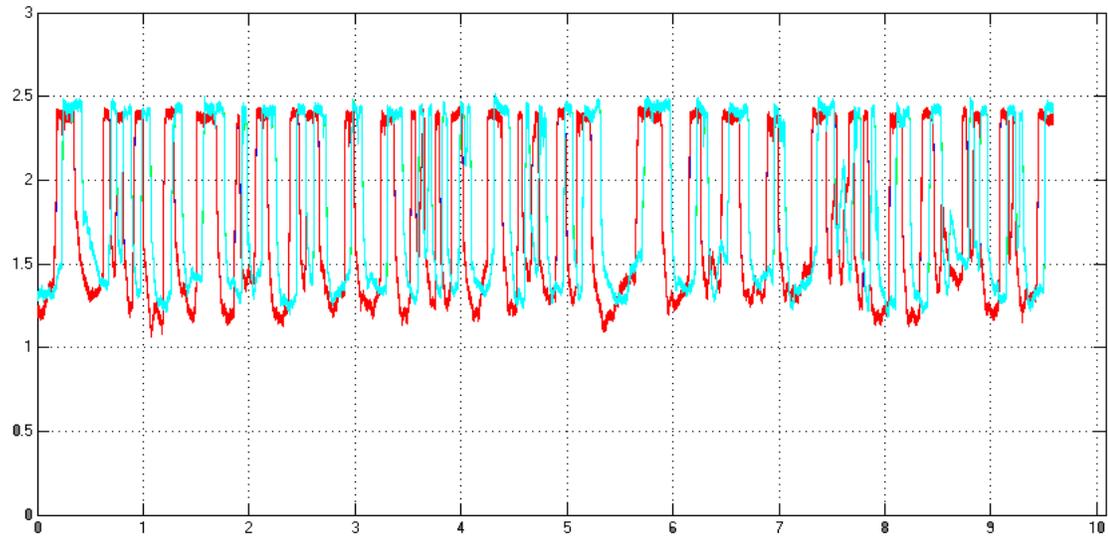


Figura A.40 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

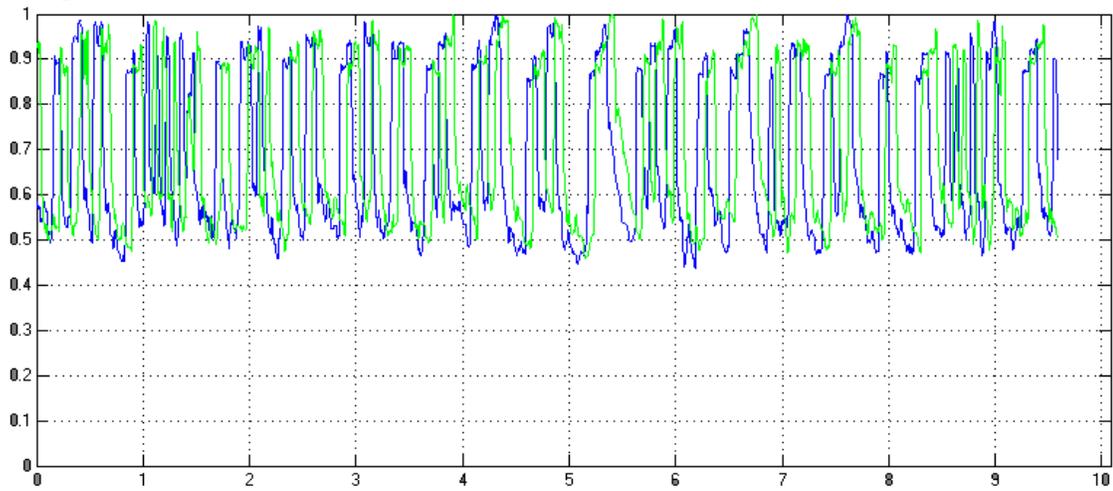


Figura A.41 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

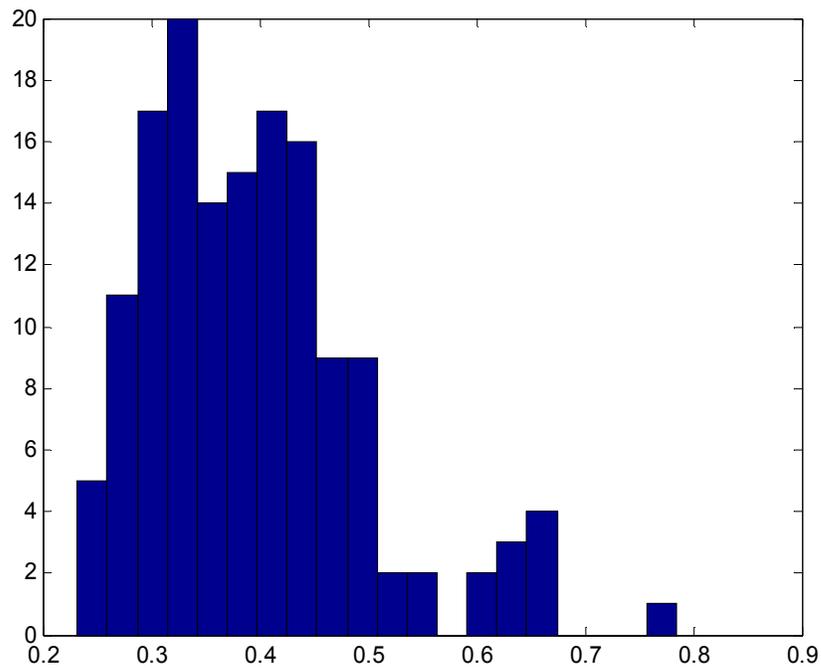


Figura A.42 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Tabela A.15 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 12,16 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.3941	0.1012	147	0.1664	0.0689

O

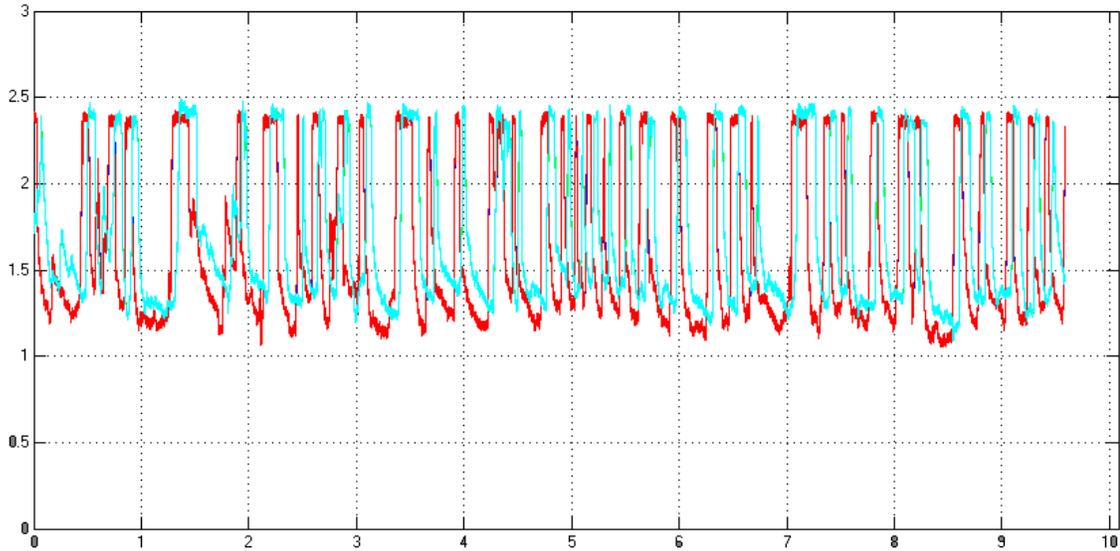


Figura A.43 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

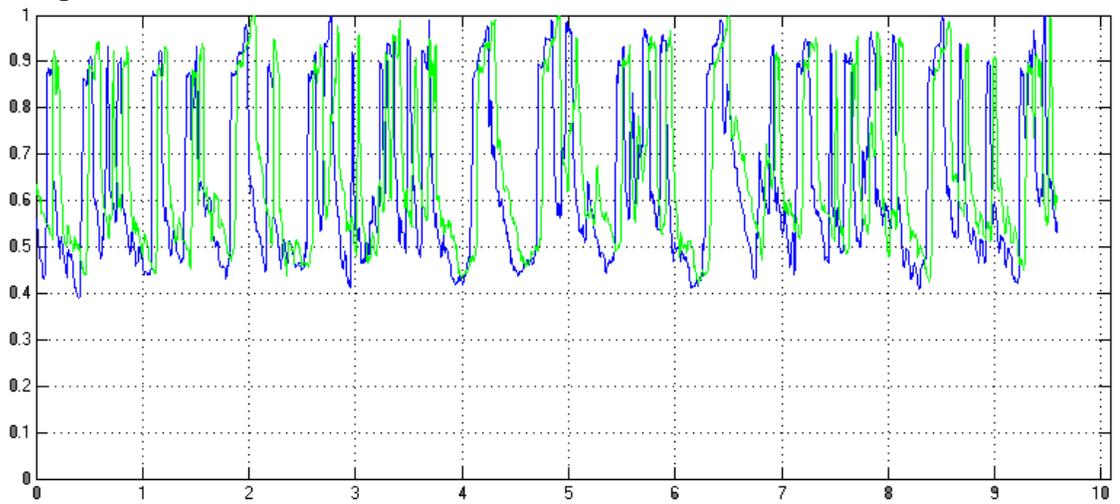


Figura A.44 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

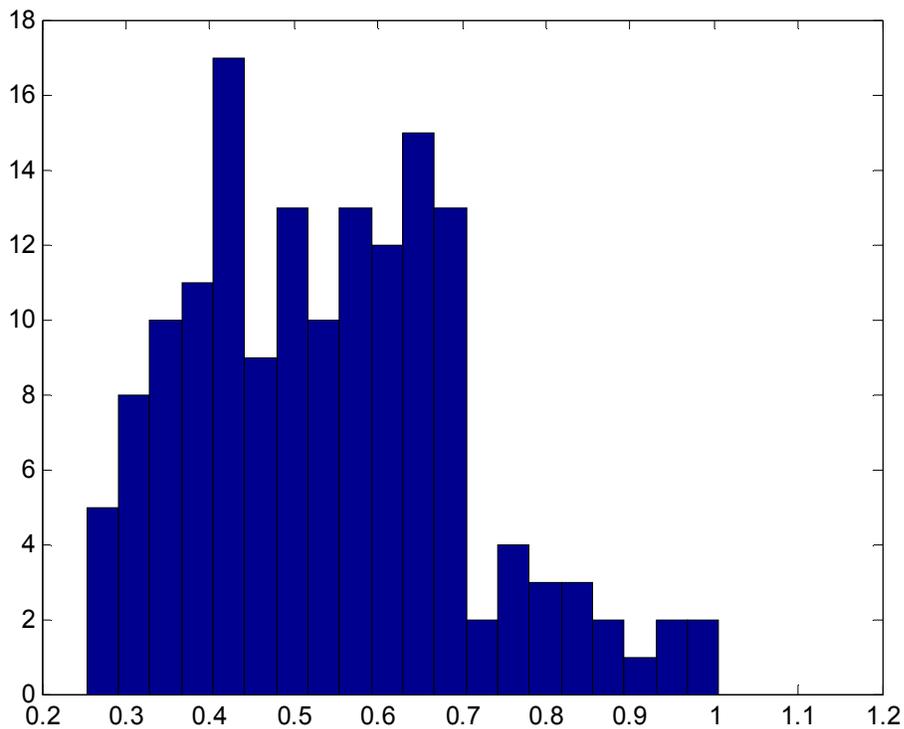


Figura A.45 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Tabela A.16 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 18,24 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.5409	0.1641	155	0.1702	0.0848

P

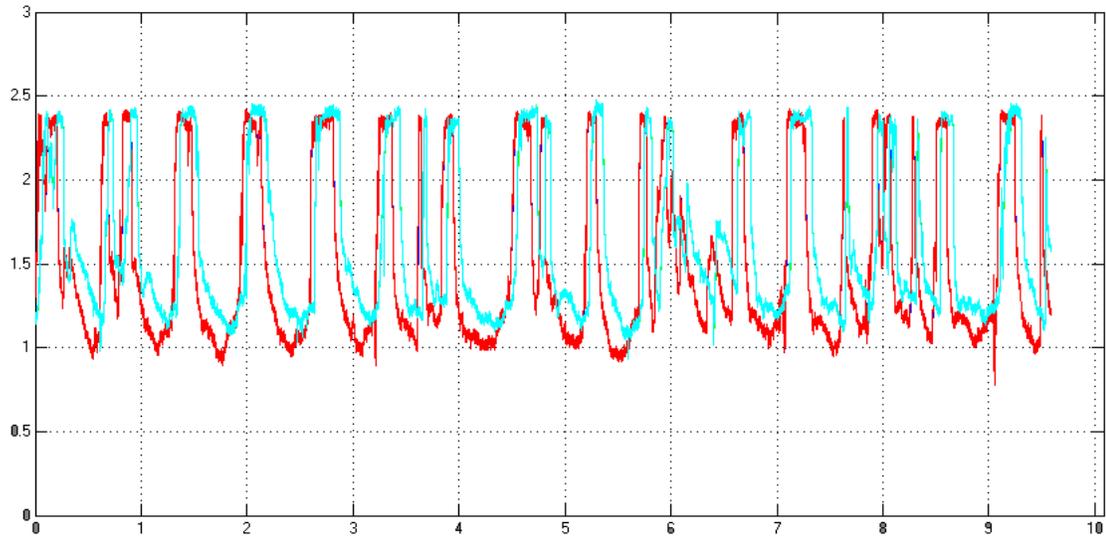


Figura A.46 – Sinal (V) no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

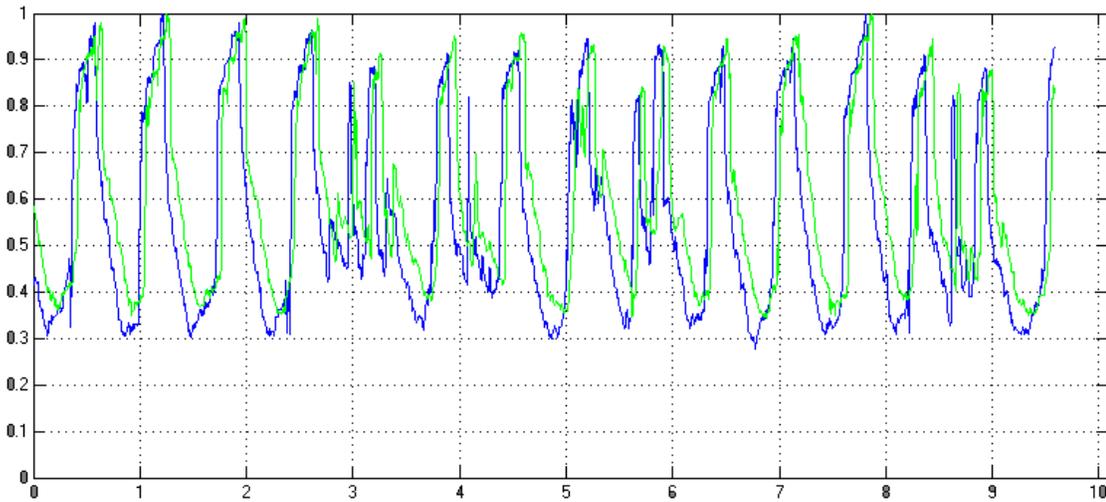


Figura A.47 – Holdup no tempo para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

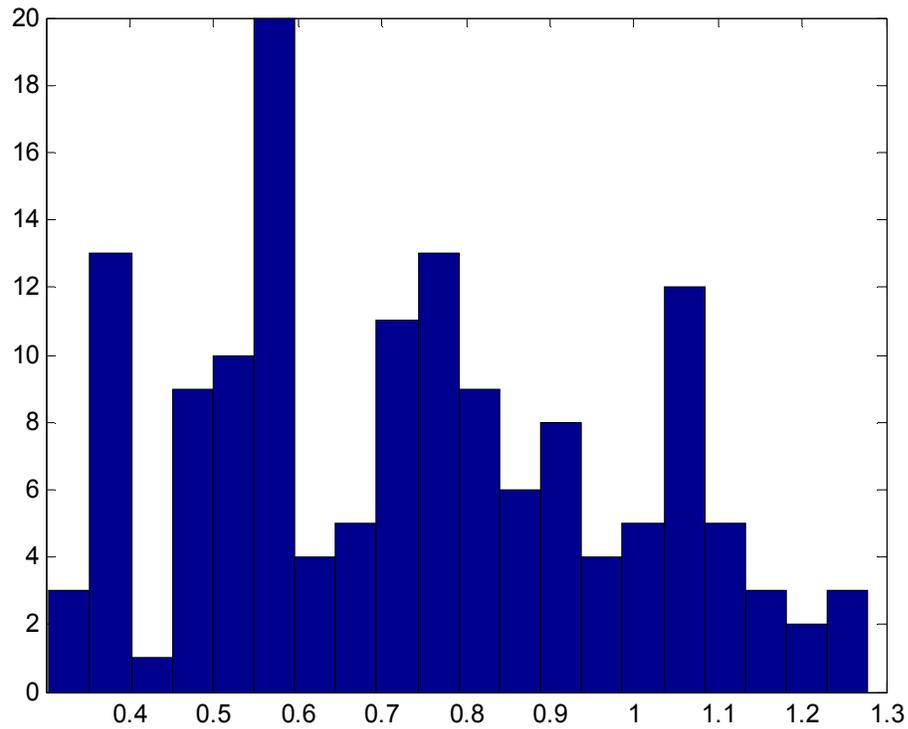


Figura A.48 – Histograma de distribuição de comprimento de bolhas para um escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Tabela A.17 – Estatísticas da célula unitária para o escoamento com vazão de 24,32 l/m de gás e 24,32 l/m de líquido

Comprimento médio da bolha (m)	Desvio padrão do comp. da bolha(m)	Número de bolhas detectadas (45 s)	Comprimento médio do pistão(m)	Desvio padrão do comp. do pistão(m)
0.7382	0.2451	146	0.1940	0.0980

