

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS
INTERFACIAIS EM ESCOAMENTO BIFÁSICO UTILIZANDO TÉCNICAS
ULTRASSÔNICAS COMPARADAS

Leonardo Reis Pompeu Bastos Moreno

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:



Prof. Su Jian, DSc.



Prof. Helcio Rangel Barreto Orlande, PhD.



Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2012

Agradecimentos

Ao professor Orientador deste projeto final, Prof. Su Jian, por todo o seu esforço e dedicação para que o melhor sempre fosse alcançado.

Ao D.Sc. Faccini e ao D.Sc. Junradyr Cunha pelas incansáveis horas no laboratório a me ensinar o que é ser engenheiro.

Ao Eng. Marcos Santana pela colaboração no algoritmo do filtro em LabView.

A Amanda Briggs pelas aulas de LaTeX.

Aos meus pais e amigos que de uma forma ou de outra, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

E a Deus, pela oportunidade de estudar na Escola de Engenharia da UFRJ.

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS
INTERFACIAIS EM ESCOAMENTO BIFÁSICO UTILIZANDO TÉCNICAS
ULTRASSÔNICAS COMPARADAS

Aluno da Engenharia Mecânica da UFRJ.

Agosto/2012

Orientador: Prof. Su Jian

A fim de estudar escoamentos intermitentes foram montados dois experimentos com mistura ar-água, ambos com o objetivo de medir velocidades e comprimentos de bolhas alongadas. A seção de testes consiste numa tubulação de 6,0m de aço inox acoplada num tubo de 1,8m de acrílico, ambos com 1" de diâmetro interno, instrumentação auxiliar (medidores de vazão e pressão) e dois transdutores ultra-sônicos do tipo pulso-eco 5 Mhz fixos no final da seção de testes, que fizeram a medição dos parâmetros interfaciais estudados. Os parâmetros estudados foram medidos variando a inclinação da seção de testes positivamente. No primeiro experimento foram variados a inclinação da seção de testes e o par de vazões de água e ar. Já no segundo, foi planejado o experimento do drift flux: encheu-se o tubo de água, mantendo a saída aberta, e bolhas pressurizadas foram injetadas na entrada do mesmo; a inclinação também foi variada nesse último experimento.

Em ambos os casos a técnica utilizada foi uma técnica ultra-sônica de alta velocidade com uso de transdutores tipo pulso-eco. Vale ressaltar que no experimento com a água parada, foi desenvolvido um sistema de filtragem, em LabView, que analisa os sinais e elimina os resultados atípicos. Todos os resultados experimentais foram comparados com correlações da literatura.

Sumário

Dedicatória	1
Agradecimento	2
Resumo	3
Índice de Figuras	6
Índice de Tabelas	8
Lista de Símbolos	10
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Motivação Pessoal	3
2 Fundamentos e Revisão Bibliográfica	4
2.1 Fundamentos da Técnica Ultra-sônica	4
2.1.1 Propagação das Ondas Ultra-Sônicas	4
2.1.2 Geração de Ondas Ultra-Sônicas	7
2.2 Fundamentos de Escoamentos Bifásicos	9
2.2.1 Fração das Fases	9
2.2.2 Velocidade Superficial da Fase	10
2.2.3 Velocidade da Mistura	10
2.2.4 Velocidade da Fase	10
2.2.5 Razão de Deslizamento ou Escorregamento	10

2.2.6	Velocidade de Arraste	11
2.2.7	Número de Froude	11
2.2.8	Tipos de Regime de Escoamento	12
2.3	Estudos experimentais para predição de velocidades e comprimentos de bolhas em escoamento intermitente	14
2.3.1	Velocidades de bolhas alongadas com líquido parado (drift flux)	15
2.3.2	Velocidades de bolhas alongadas com líquido em movimento .	17
2.3.3	Comprimento de bolhas para líquido e gás em movimento . . .	21
2.4	Técnicas de Medição em Escoamentos Bifásicos	22
2.4.1	Métodos invasivos	22
2.4.2	Métodos invasivos indiretos	23
2.4.3	Métodos não-invasivos	23
3	Descrição do experimento	26
3.1	Setup experimental	26
3.2	Com o líquido parado	31
3.3	Com o líquido em movimento	32
3.3.1	Matriz dos pontos estudados	32
3.4	Metodologia Experimental	33
3.4.1	Sistema de aquisição e análise de sinais ultra-sônicos	34
3.4.2	Sistema de filtragem dos sinais ultra-sônicos	36
3.4.3	Sistema de visualização	39
4	Resultados e Discussões	41
4.1	Velocidades e comprimentos de bolhas alongadas para drift flux . . .	41
4.2	Velocidades e comprimentos de bolhas alongadas para slug flow . . .	44
4.2.1	Escoamento Horizontal	44
4.2.2	Escoamento Inclinado ($\beta = 5^\circ$)	50
4.2.3	Escoamento inclinado ($\beta = 10^\circ$)	54
5	Conclusões e Sugestões	59
5.1	Conclusões	59

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	61
Apendice I - Tabelas de Resultados	63
Apendice II - Estimativa máxima de incerteza experimental	76
Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

2.1	Transdutor.	9
2.2	Regimes de escoamento horizontal.	14
3.1	Equipamento experimental	27
3.2	Tubo de acrílico e outros componentes da seção inclinada.	28
3.3	Componentes do sistema de alimentação de ar comprimido	29
3.4	Transdutores ultra-sônicos instalados no tubo de acrílico.	30
3.5	Câmera digital fixa na ponta do suporte.	31
3.6	Pulsos Ultra-sônicos: o primeiro pico é o pulso inicial, o segundo a primeira reflexão e o terceiro, a segunda reflexão. A medição da técnica trabalha com o pulso inicial e a primeira reflexão.	34
3.7	Posicionamento dos transdutores (1 e 2).	34
3.8	Típico Resultado Temporal Ultrassônico	35
3.9	Fluxograma do algoritmo de filtragem	37
3.10	Cursores e sistema de filtragem	38
3.11	Sinal original (acima) e sinal filtrado com 1 iteração e tolerância=1.	38
3.12	Sinal filtrado com 2 iterações e tolerância=1	39
3.13	Sinal filtrado com 5 iterações e tolerância=0,85.	39
3.14	Progressão do nariz da bolha alongada de gás.	40
3.15	Progressão da cauda da bolha alongada de gás.	40
4.1	Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização para escoamento horizontal	46
4.2	Comprimentos da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento horizontal	50

4.3	Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento inclinado 5°	52
4.4	Comprimentos da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento inclinado $+5^\circ$	54
4.5	Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento inclinado $+10^\circ$	56
4.6	Comprimentos da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento inclinado $+10^\circ$	58

Lista de Tabelas

2.1	Comprimentos médios dos pistões de líquido em tubos horizontais. . .	21
3.1	Velocidades superficiais estudadas no escoamento horizontal-(m/s). . .	33
3.2	Velocidades superficiais estudadas no escoamento +5°-(m/s).	33
3.3	Velocidades superficiais estudadas no escoamento +10°-(m/s).	33
3.4	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.	40
4.1	Velocidades da bolha alongada com líquido parado obtidas pela técnica ultra-sônica variando a inclinação	42
4.2	L_{ABi} é o comprimento da bolha alongada medida pelo transdutor, ΔL_{ABi} é o desvio padrão dessa medida. L_{BBi} foi a maior bolha registrada em cada ângulo e L_{SBi} foi a menor bolha registrada em cada ângulo.	43
4.3	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada V_{NB}	47
4.4	Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultra-sônica e visualização com as correlações de Bendiksen (1984). . .	48
4.5	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada - Escoamento +5°.	51
4.6	Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultra-sônica e visualização com as correlações de Bendiksen (1984). . .	53
4.7	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada, V_{NB} - Escoamento +10°.	55

4.8	Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultra-sônica e visualização com as correlações de Bendiksen (1984).	57
1	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica no escoamento horizontal.	64
2	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização no escoamento horizontal.	65
3	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultrassônica no escoamento horizontal.	66
4	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica de visualização no escoamento horizontal.	67
5	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica - Escoamento +5°.	68
6	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +5°.	69
7	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultrassônica - Escoamento +5°.	70
8	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica de visualização - Escoamento +5°.	71
9	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica - Escoamento +10°.	72
10	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +10°.	73
11	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultrassônica - Escoamento +10°.	74
12	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica de visualização - Escoamento +10°.	75

Lista de Símbolos

A_G	Área da seção transversal ocupada pela fase gás
A_K	Área da seção transversal ocupada pela fase K
A_L	Área da seção transversal ocupada pela fase líquida
B_0	Número de Bond
C_0	Coefficiente de distribuição do perfil de velocidade no escoamento bifásico
C_1	Coefficiente de deslizamento
D	Diâmetro do transdutor
D_i	Diâmetro interno do tubo
E	Módulo de elasticidade
E_o	Número de Etövs
f	Frequência
g	Aceleração da gravidade
g	Constante relativa ao Coeficiente de Beggs & Brill
H	Horizontal
I	Intensidade acústica
I_0	Intensidade do pulso ultra-sônico emitido pelo transdutor

I_{in}	Intensidade acústica da onda ultra-sônica incidente
I_{re}	Intensidade acústica da onda ultra-sônica refletida
I_{tr}	Intensidade acústica da onda ultra-sônica transmitida
K	Número de onda da onda ultra-sônica
K_{TD}	Grupo adimensional para prever transição de regimes de escoamento - Taitel e Dukler (1976)
L_B	Comprimento da bolha
L_{PL}	Comprimento do pistão de líquido
N	Número de amostras
P	Pressão
P_{ATM}	Pressão atmosférica
P_{SIST}	Pressão de operação do sistema
P_a	Pressão acústica
Q	Vazão volumétrica
Q_G	Vazão volumétrica da fase gás
Q_K	Vazão volumétrica da fase K
Q_L	Vazão volumétrica da fase líquida
Re	Número de Reynolds
R_I	Coefficiente de reflexão da intensidade acústica
R_p	Coefficiente de reflexão da pressão acústica
R	Raio do tubo
S	Razão de deslizamento (<i>'slip ration'</i>)

T	Período
t	Tempo
te	Temperatura
U_G	Velocidade da fase gás
U_{Gu}	Velocidade de deslizamento (drift velocity)
U_{GS}	Velocidade superficial do gás
U_K	Velocidade da fase K
U_{KS}	Velocidade superficial da fase K
U_L	Velocidade da fase líquido
U_{LS}	Velocidade superficial do líquido
U_M	Velocidade da mistura
V	Vertical
V_{0H}	Componente horizontal da velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity)
V_{0V}	Componente vertical da velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity)
V_B	Velocidade de translação da bolha alongada
V_K	Volume da fase K
V_L	Velocidade do líquido
V_M	Velocidade da mistura no pistão de líquido
V_{NB}	Velocidade do nariz da bolha alongada
V_T	Volume total

v_0	Velocidade de máxima vibração da partícula
x	Distância
Z	Impedância acústica da onda ultra-sônica
Z_l	Impedância acústica da onda ultra-sônica longitudinal
Z_t	Impedância acústica da onda ultra-sônica transversal
α_G	Fração de volume da fase gás
α_{GP}	Fração de volume da fase gás no pistão de líquido
α_K	Fração de volume da fase K
α_L	Fração de volume da fase líquida
γ	Ângulo entre o eixo do tubo e a direção vertical
λ	Comprimento de onda da onda ultra-sônica
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
μ_A	Viscosidade dinâmica do ar
μ_G	Viscosidade dinâmica do gás
μ_L	Viscosidade dinâmica do líquido
μ_W	Viscosidade dinâmica da água
θ_1	Ângulo de incidência da onda ultra-sônica
θ_2	Ângulo de refração da onda ultra-sônica
ρ	Massa específica do meio
ρ_A	Massa específica do ar
ρ_G	Massa específica do gás
ρ_L	Massa específica do líquido

ρ_w	Massa específica da água
σ	Tensão superficial dos fluidos
Σ	Parâmetro da tensão superficial
τ_w	Tensão de cisalhamento entre as fases e a parede do tubo e na interface das fases

Subscrito

A	Ar
ATM	Atmosfera
a	Acústico
B	Bolha
G	Gás
GS	Gás superficial
GU	Deslizamento
H	Horizontal
i	Interface
K	Fase K
KS	Fase K superficial
L	Líquido
LS	Líquido superficial
l	Longitudinal
M	Mistura

Mo	Montante
p	Pressão
$SIST$	Sistema
T	Total
V	Vertical
v	Viscoso

Capítulo 1

Introdução

Os regimes de escoamentos bifásicos apresentam não-linearidades na distribuição das suas fases, que somadas às variações temporais geram um regime transiente.

O escoamento simultâneo de um gás e um líquido por uma tubulação geram diferentes padrões de escoamento. Os parâmetros medidos neste estudo se concentraram nos padrões plug e slug. No primeiro, vazões baixas de gás escoam na parte de cima do tubo gerando bolhas alongadas, intercaladas por um pistão de líquido. Com o aumento da vazão de gás gera-se o slug, em que os pistões se tornam mais aerados e as bolhas com interface mais instável. Segundo a literatura, uma bolha alongada é definida como sendo pelo menos 30% maior que o diâmetro do tubo. Em seções mais a frente esses padrões serão caracterizados mais detalhadamente.

Segundo Fabre e Liné (1992), esses tipos de escoamento estão presentes nas mais variadas áreas industriais: transporte de hidrocarbonetos em tubulações, ebulição e condensação em plantas termoelétricas, produção de vapor em plantas geotérmicas, transferência de massa e calor entre gases e líquidos em reatores químicos e centrais de resfriamento emergencial em reatores nucleares.

Em muitas dessas áreas a segurança é fator primordial, tendo-se a necessidade de uma maior exatidão na medição desses parâmetros. Como o regime muda a uma velocidade rápida, os sensores devem ser capazes de fazerem essas medições quase que instantaneamente. Outro problema é que, por haver grande transferência de calor e altas pressões nessas plantas indústrias, muitos sensores já são descartados

por não suportar tais condições. Além disso, há a necessidade de utilizar materiais metálicos nos tubos que transportam a mistura. Dessa forma, um sistema de imagens se tornaria inviável, pois necessitaria de material opaco para fazer a aquisição dos sinais.

Há ainda o problema da contaminação. Essa mistura pode estar contaminada e técnicas intrusivas, em geral, estão ligadas a pequenos, mas perigosos, vazamentos. Há de se salientar também que muitas das técnicas intrusivas carecem de curtos critérios de parada de medição para verificação de sua calibração. No caso do regime intermitente transiente, há grande instabilidade, pois, em geral, a bolha e o pistão de líquido não são duas fases separadas, ou seja, a aeração do pistão gera uma maior complexidade e, portanto, uma grande dificuldade de medição.

Para solução dos problemas apresentados, está sendo desenvolvido no IEN um sistema ultra-sônico de alta velocidade de aquisição e transmissão de dados. Ele é relativamente barato, não invasivo, não necessita de proteção por parte de seus operadores, tem sensibilidade para perceber as mudanças no escoamento, pode trabalhar a altas pressões e temperaturas, funciona perfeitamente em materiais metálicos e ainda possui grande exatidão. Tal sistema é dotado de grande facilidade de aplicação, sendo utilizado em medições de vazão na indústria de petróleo e gás e em medições de imperfeições em peças da indústria siderúrgica.

1.1 Objetivos

Devido a não-linearidade das fases somadas a variação temporal e a complexidade da geometria desse tipo de escoamento, há ainda uma demanda de estudos experimentais para definição de alguns parâmetros do escoamento. Muitas vezes, são esses estudos empíricos que validam ou não as técnicas computacionais utilizadas. Os parâmetros que medimos foram a velocidade e o comprimento da bolha alongada. Observamos o comportamento destes com a variação de ângulo e a variação das vazões de ar e água, relacionando aos diferentes padrões de escoamento do regime transiente.

1.2 Motivação Pessoal

O escoamento intermitente é dotado de tanta complexidade de mecanismos e ao mesmo tempo tanta simplicidade de natureza, que é impossível não ficar ao menos curioso com a instabilidade de suas fases. Embora haja inúmeras técnicas para medição dos parâmetros supracitados, há ainda a necessidade de aprimorar as mesmas. Muitas delas estão extremamente ultrapassadas dadas as demandas cada vez mais galopantes por critérios de segurança e exatidão. Outro ponto é que o crescimento industrial brasileiro tem se baseado em aplicações fluidodinâmicas, havendo grande carência por novas tecnologias na área. A demanda é tão grande, que apenas durante a elaboração deste trabalho, outros três novos projetos de seções de testes similares as do Laboratório de Termo-hidráulica estão sendo construídos na UFRJ. Dessa forma, o presente trabalho tenta responder alguns dos desafios que se apresentam e que ainda estão por vir nas mais diversas áreas da indústria.

Capítulo 2

Fundamentos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os fundamentos acústicos relativos as técnicas ultra-sônicas e os fundamentos dos escoamentos bifásicos. Em seguida é realizada uma revisão bibliográfica sobre escoamentos bifásicos em tubulação inclinada e a aplicação das técnicas ultra-sônicas nesse tipo de escoamento.

2.1 Fundamentos da Técnica Ultra-sônica

Transdutores ultra-sônicos transformam energia elétrica em ondas ultra-sônicas e vice-versa. Essas ondas serão emitidas a partir da parte externa do tubo, passando pela parede do mesmo e atingindo a mistura.

Para o presente estudo é importante ter dois parâmetros em mente: energia e velocidade. A variação desses parâmetros é intrínseca a cada meio de propagação, e portanto de alto interesse num estudo em que deve-se fazer a diferenciação de cada um dos 3 meios presentes (acrílico, água e ar).

Para um melhor entendimento da técnica serão explicadas a seguir as características dos transdutores e das ondas ultra-sônicas.

2.1.1 Propagação das Ondas Ultra-Sônicas

A propagação das ondas ultra-sônicas se classificam em: ondas transversais, longitudinais, de Lamb e superficiais. As duas primeiras são fenômenos importantes na aplicação da técnica ultra-sônica em escoamentos bifásicos.

Ondas Transversais

As ondas transversais ou de cisalhamento, são muito utilizadas em ensaios não destrutivos de materiais metálicos. Para propagação das ondas transversais é necessário que cada partícula apresente uma forte força de atração com a partícula vizinha, permitindo com isso o arraste da partícula adjacente. Nos gases e líquidos as ondas transversais não conseguem se propagar. A força de atração entre as moléculas é muito fraca nos gases e líquidos, a exceção de fluídos extremamente viscosos ou escoamentos de camada muito fina. Na aplicação das técnicas ultra-sônicas em escoamentos bifásicos as ondas transversais ocorrem na parede do tubo. A propagação desta forma de onda pode causar interferências nas ondas ultra-sônicas que retornam ao transdutor.

Portanto, na verdade, o sistema de aquisição de sinais deve ter como um de seus objetivos, a atenuação dessas ondas.

Ondas Longitudinais

Já as ondas longitudinais ou de compressão, se propagam em meios elásticos através de compressões e dilatações, propagando-se no através de vibrações para frente e para trás na direção da sua transmissão. Elas se propagam facilmente em meios líquidos e gasosos pela simples colisão elástica entre as partículas do meio. Também se propagam em sólidos elásticos.

Dessa forma, as ondas longitudinais são as desejadas para medição de parâmetros interfaciais em escoamentos bifásicos. Sendo assim, os transdutores utilizados serão desse tipo de onda.

Impedância Acústica

Outro fenômeno importante na propagação da onda ultra-sônica é a Impedância Acústica, que é a resistência que se opõe à passagem da onda, ou seja, representa a dificuldade ou resistência a propagação do som através de um determinado meio. Dessa forma, essa será a característica que fará a diferenciação das fases (sólida do acrílico, líquida da água e gasosa do ar). A diferença de impedância entre as fases

somadas ao ângulo de incidência (Lei de Snell) da onda no meio produzirá reflexões, espalhamentos e difrações, que veremos adiante. Vale ressaltar, que o ângulo de incidência será constante, uma vez que os transdutores estarão fixos na parede do tubo. Dessa forma, a impedância acústica terá papel decisivo na propagação das fases.

Essa resistência a propagação das ondas, gerará velocidades específicas de propagação de pulsos acústicos. A partir do mapeamento dessas velocidades características, foi possível, por exemplo, fazer estudos geológicos para definição de reservatórios de petróleo.

Fenômenos ocorridos na incidência de ondas ultra-sônicas em diferentes meios

Segundo Nepomuceno (1980), a trajetória de propagação das ondas ultra-sônicas em um meio contínuo ocorre em linha reta a partir da onda emissora. No entanto, se a onda incide sobre um obstáculo, podem ocorrer difração, espalhamento e reflexão ou transmissão.

Se o obstáculo for da ordem de grandeza do comprimento de onda, ocorrerá difração. Se o obstáculo for muito maior que o comprimento de onda, ocorrerá reflexão.

Quando o comprimento de onda é muito menor que o obstáculo (bolha ou parede do tubo), o efeito da difração pode ser ignorado e a onda acústica se propaga em linha reta (Chang e Morala, 1990). Por essa razão, em experimentos bifásicos, o enfoque será o estudo da reflexão e da transmissão.

Reflexão e Transmissão de ondas

A velocidade de propagação de uma onda acústica depende das propriedades físicas do meio através do qual ela se propaga. Fenômenos de reflexão e refração ou transmissão ocorrem quando uma onda acústica incide sobre uma superfície de separação entre meios de propriedades acústicas diferentes. Parte da energia da onda acústica incidente é refletida, retornando ao meio inicial de propagação, e parte é transmitida ao segundo meio.

A quantidade das energias acústicas, refletida e transmitida em uma interface, depende da razão entre suas impedâncias acústicas e dos ângulos de incidência e refração. Como já dito anteriormente, o ângulo de incidência será constante para esse experimento, portanto não se faz necessário, nesse caso, o estudo desse parâmetro. No entanto, a diferença entre as impedâncias entre as fases será primordial para que a onda ultrassônica reflita ou seja transmitida dependendo do meio em que se encontra.

As reflexões múltiplas na espessura da parede do tubo, próximo ao transdutor, são compostas por ondas acústicas que alternam mudanças de fases (Zaço > Zágua), ocasionando interferências construtivas e destrutivas nos pulsos ultra-sônicos gerados pelo transdutor. Conforme experimentos a serem apresentados, observa-se que esse fenômeno contribui para o aumento da amplitude de ruídos e a formação de complexos grupos de onda (Filho, 2010).

Quando uma onda acústica incide normalmente à superfície da interface, ela é transmitida em forma exclusiva de onda longitudinal (Chang e Morala, 1990). No estudo a ser apresentado, o sentido da onda se dá: do acrílico para água e da água para o ar no caminho de ida. Os coeficientes de reflexão e transmissão da primeira interface são, respectivamente, $-36,46\%$ e $63,54\%$. Isso demonstra que a maior parte do sinal é transmitida (como desejado) e o sinal negativo apenas mostra a mudança de fase da onda. Já na segunda interface, os coeficientes de reflexão e transmissão são de $-99,46\%$ e $0,54\%$. Isso demonstra que a maior parte desse sinal é refletida (como desejado).

2.1.2 Geração de Ondas Ultra-Sônicas

As ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas com frequência de vibração acima de 20 KHz, comportando-se da mesma forma que as ondas sonoras audíveis. Existem dois tipos de fenômenos extremamente importantes para a geração de ondas ultra-sônicas: efeito piezoelétrico e efeito Lippmann.

Efeito Piezelétrico

É a capacidade de cristais anisotrópicos de gerar cargas elétricas a partir de deformações mecânicas. Há uma relação de proporcionalidade entre essas duas grandezas.

Efeito Lippmann

É o fenômeno oposto ao efeito piezoelétrico, ou seja, a capacidade de gerar deformações mecânicas proporcionais a cargas elétricas. Esses dois fenômenos serão decisivos na escolha do material dos transdutores, pois o objetivo é gerar ondas ultra-sônicas (mecânicas) a partir de uma corrente elétrica (caminho de ida) e gerar corrente elétrica a partir de ondas ultra-sônicas (caminho de volta). Dessa forma, os transdutores ultra-sônicos como os transdutores devem ser capazes tanto de gerar pulsos ultra-sônicos a partir de energia elétrica e vice-versa, eles devem ter alto módulo piezoelétrico e Lippmann.

Transdutores

O material dos transdutores é o titanato de bário (PMN), por apresentar alto módulo piezoelétrico, ou seja, tem alta capacidade de transformar energia elétrica em mecânica, gerando assim ondas ultra-sônicas de alta energia, com baixo custo e durabilidade. Segundo Boyer et al. (2002), os transdutores podem trabalhar com temperaturas de até 140°C e pressões de 20 Mpa. Essa característica faz com que esses sensores possam ser aplicados a uma gama enorme de aplicações industriais. As especificações dos transdutores são essenciais para obtenção de resultados confiáveis, sendo assim duas propriedades são desejadas: resolução e sensibilidade. Sensibilidade é a capacidade do transdutor em detectar pequenas discontinuidades, sendo necessário portanto, apresentar alto módulo piezoelétrico. A sensibilidade permite que o transdutor não perceba as variações entre as ondas ultra-sônicas geradas, mantendo a coerência entre as fases.

Resolução é a capacidade do transdutor em detectar, com precisão, discontinuidades próximas umas das outras. Dessa forma, é a resolução que permitirá

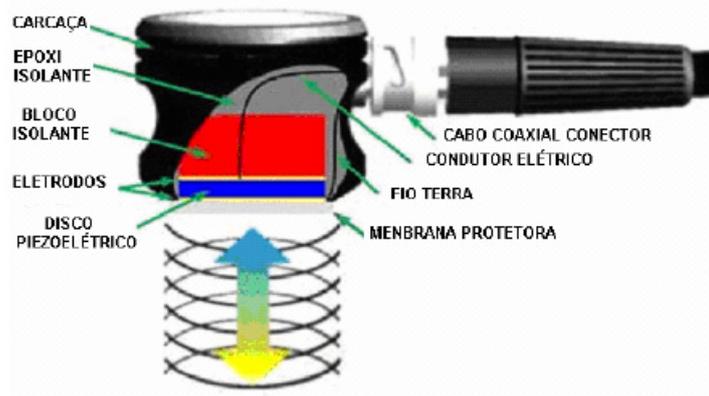


Figura 2.1: Transdutor.

obter a interface entre as fases com precisão. A figura 2.1 apresenta os principais componentes de um transdutor.

2.2 Fundamentos de Escoamentos Bifásicos

Por apresentar alta complexidade de mecanismos das fases e entre as fases, os escoamentos bifásicos possuem nomenclatura técnica bem particular. Nessa seção serão explicitados alguns dos parâmetros que caracterizam e definem esse fenômeno.

2.2.1 Fração das Fases

A fração entre as fases é a fração volumétrica ou interfacial ocupada por uma fase em relação ao todo. A fração do volume de controle V que é ocupada pela fase k num dado instante pode ser expressa por:

$$\langle \alpha_k \rangle = \frac{1}{V} \iiint \alpha_k dV = \frac{V_k}{V} = \frac{V_k}{V_k + V_{k'}}. \quad (2.1)$$

O subscrito K e a representação simbólica da fase, quando a fase K é um gás a fração volumétrica é normalmente denominada de fração de vazio, (*void fraction*) α_G . Já quando a fase é um líquido é normalmente denominada de fração de líquido (*holdup*) α_L .

2.2.2 Velocidade Superficial da Fase

A velocidade superficial da fase U_{KS} é definida como a razão entre a vazão volumétrica fase K (Q_K) e a área total da seção transversal do tubo (A_T).

$$U_{KS} = \frac{Q_K}{A_T}. \quad (2.2)$$

As velocidades superficiais das fases gás (U_{GS}) e líquido (U_{LS}) correspondem as velocidades que as fases exibiriam se estivessem escoando sozinhas através da área da seção transversal do tubo. Esse parâmetro será de grande importância para as correlações de velocidades das bolhas alongadas.

2.2.3 Velocidade da Mistura

No escoamento bifásico gás-líquido a velocidade da mistura U_M é definida como a soma das velocidades superficiais das fases:

$$U_M = U_{GS} + U_{LS} = \frac{Q_G + Q_L}{A_T}. \quad (2.3)$$

2.2.4 Velocidade da Fase

A velocidade da fase U_K é definida como a razão entre a vazão volumétrica de cada fase K (Q_K) e a área da seção transversal ocupada pela mesma (A_K).

$$U_K = \frac{Q_K}{A_K}. \quad (2.4)$$

2.2.5 Razão de Deslizamento ou Escorregamento

Num escoamento bifásico, em que dois fluidos de viscosidades e densidades diferentes escoam juntos numa tubulação, um deles tende a se mover mais velozmente que o outro. Dá-se o nome de razão de deslizamento, S (slip ratio), a essa razão entre as velocidades de cada fase.

A razão de deslizamento, S (*slip ration*), é definida como a razão entre a velocidade da fase gás (U_G) e a velocidade da fase líquida (U_L).

$$S = \frac{U_G}{U_L}. \quad (2.5)$$

Segundo Hulburt (2002), a razão de escorregamento também pode ser interpretada como a razão entre as velocidades do nariz da bolha e do pistão de líquido adjacente a mesma. Vale dizer que, para um escoamento completamente desenvolvido, ou seja, com fluxo não variando ao longo da direção principal do escoamento, a razão de escorregamento é igual a 1.

2.2.6 Velocidade de Arraste

A velocidade de arraste, *Drift Velocity* – U_{GU} , é definida como a diferença entre a velocidade da fase gás e a velocidade do centro no volume da mistura. A velocidade de deslizamento representa uma grandeza relativa ao desvio da velocidade da fase em relação a velocidade da mistura U_M .

$$U_{GU} = U_G - U_M. \quad (2.6)$$

Desde o experimento realizado por Davies e Taylor (1950), esse parâmetro tem sido medido como a velocidade de uma única bolha alongada com o líquido parado e o ar pressurizado mas com fluxo nulo, ou seja, zerando o termo da velocidade da mistura.

O termo do drift velocity ainda será de extrema importância tanto para a determinação do valor da velocidade da bolha (de acordo com as correlações presentes na literatura) como na mudança de comportamento da mesma velocidade. Este assunto será melhor discutido em seções posteriores.

2.2.7 Número de Froude

O número de Froude é um número adimensional que relaciona o efeito das forças de inércia com as forças de gravidade que atuam no fluido, sendo expresso por:

$$Fr = \frac{U_M^2}{gDi} = \frac{(U_{GS} + U_{LS})^2}{gDi}. \quad (2.7)$$

A equação acima é a definição geral do número de Froude para escoamento multifásico. No entanto, existe uma infinidade de relações que autores consagrados dão o nome de número de Fr, em geral computando um outro parâmetro que

seja relevante para o mesmo. Bendiksen (1984) colocou a raiz quadrada em cima e embaixo e troca o termo da velocidade da mistura pela velocidade da bolha alongada. Zukoski (1966) computou um termo adimensional de densidades, pois está estudando os efeitos das mesmas no escoamento. Há ainda autores que trocam o termo da velocidade da mistura pela diferença entre a velocidade das fases, pois estão interessados em estudar a variação desses parâmetros ao longo de uma mesma célula unitária.

2.2.8 Tipos de Regime de Escoamento

A fim de facilitar a compreensão do presente trabalho, serão caracterizados os diferentes padrões de escoamento bifásico em regime intermitente. Segundo Filho (2010):

Escoamento em bolhas (*Bubbly flow*) Este padrão está enquadrado dentro dos escoamentos chamados dispersos. Nesta configuração as bolhas tendem a escoar na parte superior do tubo uma vez que a fase dispersa é menos densa do que a contínua. Estas bolhas podem se apresentar na forma esférica em pequenos diâmetros ou em tamanhos maiores com formas elípticas alongadas. Quanto a velocidade do líquido aumenta o escoamento tende a se tornar mais disperso e com bolhas menores. (Figura 2.2).

Escoamento pistonado (*Plug flow*) À medida que a velocidade da fase gás aumenta, ocorre o coalescimento das bolhas, formando bolhas maiores e alongadas. Devido a diferença de velocidade das fases ocorre a formação de pistões (*plugs*) de líquido, também chamados na literatura de slugs de líquido. As bolhas tendem a escoar pela metade superior do conduto. Neste caso, esta condição assimétrica é mantida independentemente da velocidade de escoamento, devido ao maior tamanho das bolhas (Figura 2.2).

Escoamento estratificado suave (*Stratified Smooth Flow*) Acontece em velocidades muito baixas de líquido e gás. As duas fases são separadas por uma interface suave, sem ondulações (Figura 2.2).

Escoamento estratificado ondulado (*Wavy flow*) Quando no escoamento estratificado a velocidade do gás aumenta, aparecem oscilações na interface, ou seja, surgem ondas que não chegam a tocar na superfície superior do tubo. O padrão e amplitude da onda varia com as variações das vazões das fases gás e líquido e com as propriedades físicas do fluido como a densidade e tensão superficial (Figura 2.2).

Escoamento slug (*Slug flow*) É similar ao escoamento pistonado, porém como a velocidade do gás é maior do que a velocidade do líquido formam-se ondas (“*slugs*” de líquido) maiores que periodicamente molham a parede superior do tubo, gerando grandes bolhas de gás presas entre duas ondas. Pequenas bolhas de gás misturam-se a fase líquida tornando-a altamente aerada. Este escoamento é caótico uma vez que os pistões de líquido (“*slugs*” de líquido) são intermitentes e não periódicos (Figura 2.2).

Escoamento anular (*Annular flow*) Aumentando-se ainda mais a velocidade do gás, haverá concentração do gás ao centro do tubo com a formação de uma camada de líquido totalmente em contato com a parede do tubo. A camada de líquido é geralmente muito mais espessa na parte inferior do tubo devido à ação da gravidade. A fase gás escoar a alta velocidade e frequentemente apresenta quantidade significativa de gotículas líquidas dispersas (Figura 2.2).

A figura 2.2 apresenta uma representação esquemática dos regimes de escoamento descritos acima.

Como o foco do presente trabalho é o escoamento slug e plug, foi adotado o modelo teórico proposto por Dukler e Hubbard (1975) que explica o aparecimento, estabilidade e perda da estabilidade desses tipos de escoamento. Segundo os autores, o pistão de líquido está num constante fluxo de perda e ganho de água para os filmes de líquido posteriores e anteriores. A partir do momento em que a perda se torna igual ao ganho, o comprimento do pistão se estabiliza. No entanto, esse critério é extremamente instável dada a complexidade do escoamento. Ainda hoje, não existe consenso na comunidade científica a cerca do assunto e diversos modelos empíricos

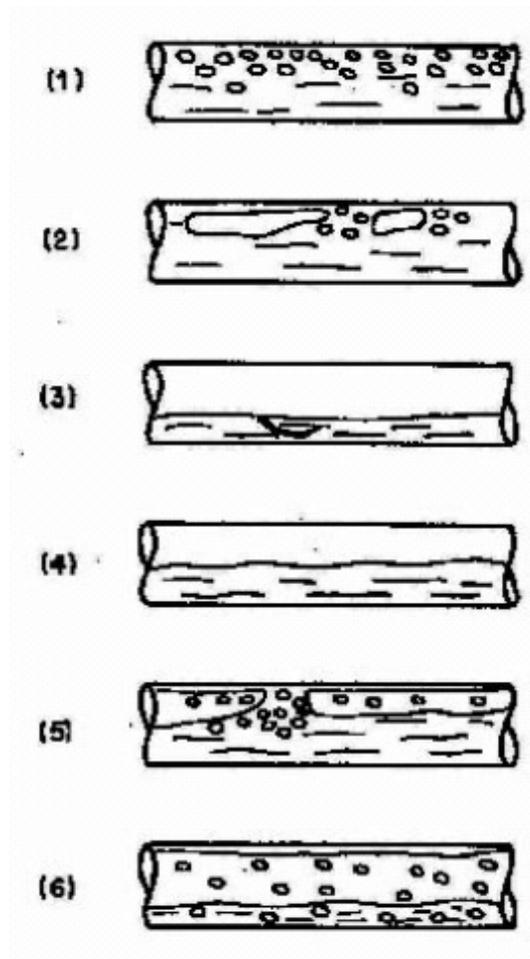


Figura 2.2: Regimes de escoamento horizontal.

ou computacionais foram propostos.

2.3 Estudos experimentais para predição de velocidades e comprimentos de bolhas em escoamento intermitente

Na presente seção serão mostrados alguns dos principais trabalhos do assunto. A linha escolhida não será a do tempo e sim a do assunto; dessa forma, a seção será dividida em dois: estudos com líquido parado ($U_M = 0$) e com líquido em movimento ($U_M \neq 0$).

2.3.1 Velocidades de bolhas alongadas com líquido parado (drift flux)

É possível conseguir uma bolha alongada seguida de um pistão de líquido apenas enchendo um tubo com água e injetando certa quantidade de ar pressurizado no mesmo. Dessa forma, a bolha sobe, pois o empuxo gerado é maior que a somatória de todas as outras forças contrárias a direção do escoamento. Como já dito anteriormente, a esse tipo de velocidade foi dado o nome de velocidade de deslizamento, pois o ar desliza sobre a água. O grande precursor desse tema foram Davies e Taylor (1950). Esse trabalho ganhou tanta notoriedade que freqüentemente a literatura trata o escoamento pistonado como 'bolhas de Taylor'. Os autores concluíram que, para um escoamento vertical, a forma do nariz da bolha era esférica e propuseram um modelo teórico baseado nessa observação. Este trabalho ainda traz medições de velocidades e de distribuição de pressão que comprovam as suposições do mesmo. Segundo os autores, a velocidade de deslizamento da bolha para um escoamento vertical segue a equação:

$$U_{GU} = C_1 \sqrt{gD} \quad (2.8)$$

O parâmetro C_1 , também chamado por muitos de velocidade normalizada, será função da viscosidade, do ângulo de inclinação e da tensão superficial. Zukoski (1966) resumizou esses três parâmetros em seu trabalho experimental. Tendo em vista esses aspectos, ele propôs uma alteração da equação acima, generalizando o problema para diferentes fluidos:

$$U_{GU} = C_1 \sqrt{gD \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}} \quad (2.9)$$

No caso de escoamento água-ar, a diferença entre as velocidades é tão acentuada que o termo de alteração proposto por Zukoski tenderá a zero, e portanto, é comumente retirado da equação.

O autor fez ainda conclusões interessantes sobre o assunto:

1. A velocidade de propagação da bolha se mostrou independente do tamanho da mesma, desde que o raio da mesma seja maior que 1.5 vezes o diâmetro.

2. A velocidade da bolha decresce com o aumento da tensão superficial.
3. Se $\frac{C_1}{\sqrt{gD\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}}} > 0.15$, os efeitos da viscosidade se tornam desprezíveis.
4. Se o comprimento do tubo for aumentado indefinidamente, as forças viscosas aparecerão.
5. Quaisquer distúrbios (desde bolhas coalescendo ou uma aproximação entre bolhas) no escoamento geram discrepância nos resultados.

Em meados da década de 70, o drift flux gerou uma grande quantidade de trabalhos na discussão do mesmo para escoamento horizontal. Esse problema, tratado de forma teórica, é mais difícil de ser analisado, pois o escoamento perde simetria. Dukler e Hubbard (1975) e Heywood (1979), levando em conta o balanço de forças, concluíram que o termo do drift seria zero. Bonnecaze et al. (1971) encontrou o mesmo que os autores acima, no entanto, avaliou que a velocidade de deslizamento mudaria de sentido caso a inclinação fosse negativa.

Benjamin (1968) aplicou a teoria de escoamentos não-viscosos para a bolha penetrando num tubo aberto em uma das pontas e obteve $C_1 = 0.542$, o que estava de acordo com o trabalho experimental de Zukoski (1966). Weber (1981) apresentou a correlação empírica para o problema:

$$C_1 = 0.542 - \frac{1.76}{Bo^{0.56}} \quad (2.10)$$

Onde Bo é o número de Bond, que é função da tensão superficial, σ :

$$Bo = gD^2\frac{\rho_L - \rho_G}{\sigma} \quad (2.11)$$

Bendiksen e Espedal (1992) apresentaram uma correlação para a velocidade de deslizamento com ângulo de inclinação, θ , variando de -30° até 90° :

$$U_{GV} = 0.35\sqrt{gD}\cos\theta + 0.54\sqrt{gD}\sin\theta, \quad \text{para } Fr < 0.35 \quad (2.12)$$

e

$$U_{GV} = 0.35\sqrt{gD}\cos\theta, \quad \text{para } Fr > 3.5 \quad (2.13)$$

Quando o assunto parecia finalizado, Cook e Behnia (2001) concluíram que o mecanismo de transição para velocidade de bolhas alongadas com líquido em movimento dependia diretamente da velocidade de deslizamento. Segundo os autores, a baixas vazões, o empuxo exerce influencia significativa no escoamento, enquanto a altas vazões a bolha é puxada pela máxima velocidade do líquido a frente da bolha. Como a velocidade de deslizamento está diretamente ligada ao empuxo, os autores concluíram que ela deveria exercer papel importante na transição. Esse critério de transição será mais bem discutido e explicitado na sessão seguinte.

2.3.2 Velocidades de bolhas alongadas com líquido em movimento

Nicklin et al. (1962) propuseram uma correlação para a velocidade translacional da bolha alongada em escoamento intermitente vertical. Eles concluíram que a velocidade translacional da bolha, ou simplesmente a velocidade do nariz da bolha, é igual ao somatório da máxima velocidade do líquido à frente da bolha mais componente de empuxo (velocidade de deslizamento), já descrito na seção acima. Para Re entre 8000 e 50000:

$$V_{NB} = C_0U_L + C_1\sqrt{gD} \quad (2.14)$$

Como, por hipótese, o escoamento é plenamente desenvolvido, ou seja, tem perfil parabólico, há a necessidade de se multiplicar a velocidade média do líquido no pistão por um coeficiente empírico a fim de determinar a máxima velocidade dessa mesma porção de líquido (C_0). No entanto, Nicklin encontrou C_0 como uma constante e igual a 1,2. A constante é comumente chamada na literatura por parâmetro de distribuição das fases.

Vale ressaltar que Nicklin achou para C_1 um valor fixo, pois como foi visto na seção anterior, esse parâmetro varia com a inclinação e o autor em questão trabalhou

somente na vertical. O valor achado por Nicklin foi de 0,35, confirmando os dados experimentais de Zukoski (1966), Bendiksen (1984) e outros.

Bonnecaze et al. (1971) foi um dos precursores no estudo do escoamento intermitente próximo ao horizontal, ou seja, com pequenas inclinações. O autor partiu das premissas de Nicklin e adicionou ao termo do drift um sentido de acordo com a sua inclinação:

$$V_{NB} = C_0 U_L + \delta_B U_{GV} \quad (2.15)$$

Onde $\delta_B = 0$ se o escoamento for horizontal; $\delta_B = 1$ se o escoamento for ascendente; $\delta_B = -1$ se o escoamento for descendente.

Bendiksen (1984) realizou o maior experimento relatado até a data de seu trabalho em escoamento intermitente inclinado. Varrendo inclinações de -30° até 90° e usando os mais variados pares de velocidades superficiais de líquido e gás, o autor achou a mesma equação proposta por Nicklin (2.14). No entanto, os coeficientes C_0 e C_1 precisavam de correção em virtude da inclinação. Bendiksen concluiu que esses parâmetros eram fundamentalmente função do diâmetro do tubo e da inclinação. Dessa forma, ele dividiu a correlação de Nicklin em duas faixas de trabalho, de acordo com o número de Froude, que é extremamente dependente do diâmetro e inclinação:

- Para $Fr < 0.35$

$$C_0 = 1.05 + 0.15 \cos^2 \theta \quad (2.16)$$

- Para $Fr > 0.35$

$$C_0 = 1.2 \quad (2.17)$$

Onde $Fr = U_L / \sqrt{gD}$.

Vale ressaltar que essas equações só são válidas quando a razão de deslizamento é igual a 1 e o comprimento do pistão de líquido é maior que $10D$.

Mais tarde, Bendiksen e Espedal (1992) deduziram que a velocidade do líquido no pistão de líquido era função da velocidade superficial do gás, do líquido e da fração de vazio no pistão. Fazendo um volume de controle em torno do pistão de líquido:

$$U_M = U_{GS} + U_{LS} = \alpha_{GP}U_G + (1 - \alpha_{GP})U_L \quad (2.18)$$

Onde α_{GP} é a fração de vazio no pistão de líquido.

A seção de testes desse trabalho não possui a instrumentação necessária para medição de α_{GP} . Dessa forma, foi feita a análise desse parâmetro de acordo com a correlação de Woods et al. (2000):

$$\alpha_{GP} = 0.8 - \frac{0.8}{1 + \left(\frac{U_M}{8.66}\right)^{1.39}} \quad (2.19)$$

Dessa forma, **por hipótese**, foi considerada que a para as velocidades da mistura utilizadas neste trabalho, a fração de vazio no pistão de líquido seria pequena. No entanto, como será visto mais tarde, essa hipótese não se verificou e afetaram sensivelmente os Resultados.

$$U_L = U_M = U_{GS} + U_{LS} \quad (2.20)$$

E finalmente, a correlação de Bendiksen se resume a:

$$V_{NB} = C_0U_M + C_1\sqrt{gD} \quad (2.21)$$

Cook e Behnia (2001) concluíram que o coeficiente não deveria ser função do número de Froude. Segundo os autores, a velocidade translacional da bolha apresenta duas faixas de trabalho em virtude da influencia ou não do empuxo no escoamento, ou seja, a partir de uma dada velocidade da mistura a bolha se move somente devido a máxima velocidade do líquido no pistão; abaixo dessa certa velocidade da mistura, o empuxo exerce influencia no escoamento. Dessa forma, deve-se somar o componente do drift na velocidade do nariz. Sendo assim, a transição ocorre quando:

$$V_{NB} = 5U_{GU} \quad (2.22)$$

Existe uma grande variedade de modelos para predição da estabilidade do slug. A quantidade de parâmetros interfaciais que cercam esse problema foge ao escopo desse trabalho. No entanto, vale identificar que no modelo proposto por Bendiksen

e Espedal (1992) dois critérios devem ser respeitados para que o padrão intermitente ocorra:

1. À medida que as velocidades crescem, ocorre a transição do escoamento estratificado ondulado para o slug. Para que o pistão continue a crescer a velocidade da frente do pistão deve ser superior a da posterior do mesmo;
2. A velocidade da posterior do pistão de líquido deve ser igual a do nariz da bolha.

Todos esses trabalhos baseiam suas conclusões num escoamento intermitente plenamente desenvolvido, ou seja, quando o perfil de velocidades é parabólico e o slug é estável. Quando a mistura entra na tubulação, é necessário certo comprimento de tubo para que as bolhas coalescerem e formarem um pistão estável.

Barnea e Taitel (1993) mostraram que para um escoamento próximo ao horizontal, a mistura ainda está se desenvolvendo numa distância de $30m$ da entrada do tubo. Cook e Behnia (2000) fizeram uma comparação entre um modelo matemático e uma extensa base experimental usando uma seção de testes de $16m$ de comprimento. Os autores predisseram um comprimento mínimo para o fim do coalescimento na ordem de $500D - 600D$.

Vale ressaltar também que variadas algumas condições experimentais, o escoamento rapidamente muda. Esse fato é muito recorrente no caso dos misturadores. Existem poucos relatos na literatura do design dessas importantes peças para a formação de um slug estável. Rosa (1989) realizou um estudo experimental para identificar as variações de velocidade utilizando dois diferentes misturadores numa seção de testes de $23,4m$ de comprimento de $26mm$ de diâmetro. Diferentemente da literatura, ele não observou a dependência do número de Froude como parâmetro de distribuição da fase e o próprio termo do drift não foi identificado. O parâmetro de distribuição da fase, C_0 , foi de 1,12 para ambos misturadores. O autor observou também que embora haja uma diferença na estrutura das bolhas na entrada da seção para diferentes misturadores, essa disparidade cai depois de uma medida a jusante dos misturadores.

2.3.3 Comprimento de bolhas para líquido e gás em movimento

Por hipótese a ser verificada, o comprimento das bolhas não é um parâmetro influenciador na velocidade de deslizamento. Sendo assim, os estudos a serem apresentados nessa seção se referem a ambos fluidos em movimento.

Segundo Filho (2010), o escoamento intermitente apresenta um comportamento transiente das interfaces gás-líquido e um comportamento estocástico dos comprimentos do pistão de líquido e da bolha alongada. Dukler et al. (1985) estudaram o comprimento do pistão de líquido em tubo horizontal de $38mm$ e concluíram que o comprimento do pistão de líquido estável aumenta com o número de Reynolds. Segundo os autores, deve existir um mínimo comprimento no pistão de líquido para que a vazão de água que verte pela frente do pistão deva ser igual a que entra pela posterior do mesmo, ou seja, deve existir um comprimento mínimo que acomode esses dois movimentos sem acelerar ou desacelerar a bolha. São inúmeros os trabalhos experimentais e teóricos que discutem esse comprimento mínimo. Segue abaixo uma tabela com alguns valores apresentados pela literatura:

Tabela 2.1: Comprimentos médios dos pistões de líquido em tubos horizontais.

Referência	Di (mm)	Fluidos	Comprimentos médios
Dukler e Hubbard (1975)	38	Ar/Água	12-30Di
	25, 51	Ar/Óleo leve	$\approx 30Di$
	25, 51	Ar/Óleo leve	$\approx 30Di$
Barnea e Brauner (1985)	teórico	teóricos	32Di
Andreussi e Bendiksen (1989)	50	Ar/Água	22Di
Nydal et al. (1992)	53	Ar/Água	15-20Di
	90		12-16Di
Manolis (1995)	78	Ar/Água e Ar/Óleo	10-25Di

Fagundes et al. (1999) e Filho (2010) voltaram seus trabalhos para o estudo do perfil das bolhas alongadas. No entanto, até hoje existe uma grande dificuldade

no sentido de formular uma expressão matemática para o comprimento das bolhas alongadas devido ao seu alto grau de intermitência, ou seja, o desvio padrão de uma amostra é muito alto. Mesmo assim, muitos autores afirmam que há uma relação linear entre o comprimento da bolha e a velocidade superficial de gás.

2.4 Técnicas de Medição em Escoamentos Bifásicos

Uma maneira de dividir as diferentes técnicas de medição é organizá-las segundo a sua intrusão ser significativa, parcial ou simplesmente não ocorrer.

2.4.1 Métodos invasivos

Esse método baseia-se nas diferenças de condutividade elétrica e permissividades relativas que o gás e o líquido têm. Em geral, se dividem em dois: método resistivo e capacitivo.

Um método resistivo comumente utilizado é a anemometria de fio quente em que um pequeno sensor é aquecido eletricamente e exposto ao escoamento (Fossa et al., 2003). Dependendo das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condução térmica, calor específico) pode-se estabelecer uma relação entre a velocidade do fluido incidente e a taxa de transferência de calor do fio-quente. Dependendo das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condução térmica, calor específico) pode-se estabelecer uma relação entre a velocidade do fluido incidente e a taxa de transferência de calor do fio-quente (Freire et al., 1998). Segundo Freire et al. (2006), a anemometria de fio quente é um método pouco intrusivo, pois as dimensões do fio são pequenas se comparadas com as do escoamento.

Os métodos capacitivos baseiam-se no fato das constantes dielétricas das fases serem diferentes, permitindo a medição da permissividade elétrica. Uma nova medição por capacitância é o wire-mesh, que é uma malha de eletrodos colocados numa seção transversal do tubo medindo a capacitância dos fluidos e, portanto, conhecendo a distribuição instantânea de fases na seção transversal do tubo (Silva, Arruda, Amaral e Morales, 2010). Embora essa técnica seja extremamente sensível a variação dos parâmetros do escoamento (como a fração de vazio local), ela destrói

o escoamento, pois a malha de eletrodos cruza toda a seção da tubulação (Da Silva, 2010).

2.4.2 Métodos invasivos indiretos

As técnicas intrusivas indiretas se baseiam na medição local de pressão no escoamento bifásico. Em geral, são colocados transdutores de pressão ao longo do tubo para caracterização de padrões de escoamento (Dukler e Hubbard, 1975). Isso se deve ao fato de o pistão de líquido representar um salto hidráulico devido as suas diferenças de velocidade com o filme de líquido. Esse salto hidráulico pode ser observado como uma variação de pressão. Para colocação desses transdutores de pressão, são feitos pequenos furos ao longo do tubo.

2.4.3 Métodos não-invasivos

As técnicas não-invasivas são muito utilizadas quando a medição do escoamento interfere no mesmo, alterando a exatidão dessa medição. Existem diversos métodos com os mais variados e por vezes sofisticados princípios de funcionamento, como: vídeo/fotografia, atenuação de radiação e ultra-sônica.

Técnica de visualização

A técnica fotográfica ou de vídeo é utilizada para caracterizar vários parâmetros do escoamento multifásico que vão desde aos padrões do mesmo até as velocidades e comprimentos das fases. Davies e Taylor (1950) e Bendiksen (1984) usaram da técnica fotográfica em seus estudos experimentais em bolhas alongadas. Tendo em vista a intermitência do escoamento, o aumento da velocidade de captura e resolução da imagem das filmadoras modernas foi de grande relevância para a comunidade científica entender alguns dos mecanismos do slug. Faccini et al. (2007) utilizaram uma filmadora de alta velocidade para medição de velocidades e comprimentos de bolhas e Filho et al. (2009) utilizaram da mesma técnica para comparação com uma técnica ultra-sônica. Liumbas et al. (2005) se utilizaram de gravações em vídeos de alta velocidade para estudar as ondas do escoamento estratificado ondulado.

Raios-X e gama

A técnica a partir de raios-X ou gama tem como princípio a emissão de feixe de partículas de alta intensidade e na medição de sua atenuação após percorrer o fluxo bifásico. Heywood (1979) utilizaram a técnica de absorção de raios gama para determinação do hold-up no líquido.

Técnicas ultra-sônicas

São divididas em três tipos: Doppler, transmissão e pulso-eco. Sua utilização em escoamentos bifásicos é extremamente variada, podendo ser usada desde para a percepção de um padrão de escoamento até a medição direta de parâmetros inter-fásicos. A técnica ultra-sônica por efeito Doppler se baseia no movimento relativo entre a fonte (transdutor) e receptor (interface gás-líquido), sendo medido o desvio de frequência entre a variação de velocidades da interface. São comumente utilizadas quando uma das fases apresenta quantidade de volume muito inferior a outra, como os nanofluidos. A técnica de transmissão necessita de um transmissor e um receptor colocados diametralmente opostos no tubo. Existem dois tipos de sensores ultra-sônicos por transmissão: atenuação e tempo de transito. Este último se baseia na propriedade que a água tem de transmitir a onda ultra-sônica e do ar de refleti-la. Já a medição da atenuação se baseia no fato de parte da energia da onda ultra-sônica se perde na água, mas uma parte maior ainda se perde no ar. Essas diferenças de comportamento das fases servirão para medir os parâmetros interfaciais da mistura bifásica. A técnica de pulso-eco possui apenas um transdutor que atua como emissor e receptor. O cristal piezoelétrico do transdutor transforma a energia elétrica em mecânica transmitindo-a para o escoamento através de onda ultra-sônica. Ao encontrar a interface gás-líquido, que tem alto índice de reflexão, a onda retorna para transdutor, sendo a onda mecânica transformada em sinal elétrico (Chang e Morala, 1990). Da mesma forma que a técnica por transmissão, é obtido o tempo de transito ou a atenuação dessa onda ultra-sônica.

Chang et al. (1984) utilizaram a técnica ultra-sônica por transmissão para medição de fração de vazio num escoamento de bolhas dispersas. Massignan (2010) utilizaram a técnica ultra-sônica por atenuação de sinais para determinação da fração

de vazio no slug.

Chang e Morala (1990) desenvolveram duas técnicas ultra-sônicas, uma por transmissão aplicada em uma coluna vertical e outra por pulso-eco aplicada no escoamento horizontal. No escoamento vertical, padrão de bolhas dispersas, foram obtidas correlações relativas a atenuação do sinal ultra-sônico e medidas da velocidade de ascensão e o diâmetro médio das bolhas dispersas na condição de baixas frações de vazio. No escoamento horizontal foram realizadas medições da altura do filme de líquido, fração de vazio média e área interfacial.

Faccini et al. (2004) utilizaram da técnica híbrida de transmissão e pulso-eco para identificação de padrões e medição de fração de vazio num escoamento estratificado num circuito horizontal

Faccini et al. (2006) utilizaram uma técnica híbrida de pulso-eco e transmissão para medição de altura de filme de líquido num escoamento pistonado horizontal.

Faccini. et al. (2008) utilizaram a mesma técnica híbrida para comparação de seus dados experimentais de altura de filme de líquido num escoamento estratificado com uma modelagem numérica para resolução das equações de Navier-Stokes usando modelo k-w.

Filho (2010) realizou um trabalho para predição de comprimentos, velocidades e perfis de bolhas alongadas utilizando uma técnica ultra-sônica por pulso-eco.

Capítulo 3

Descrição do experimento

Neste capítulo será feita uma descrição dos componentes da seção de testes e suas funções nos dois experimentos realizados. Além disso, a metodologia de aquisição e análise de resultados das técnicas ultra-sônica, ultra-sônica filtrada e de visualização será explicitada.

3.1 Setup experimental

A planta para testes bifásicos é constituída por: uma seção de testes de 1" que permite variação no ângulo de inclinação, um sistema de alimentação e circulação de água, um sistema de alimentação de ar comprimido, um sistema ultra-sônico de alta velocidade, instrumentação eletrônica e analógica para controlar as variáveis do experimento, um sistema de aquisição de imagens, um sistema de iluminação, tanques de expansão, destiladores de água e purificadores de ar.

A seção de testes inclinada está apoiada numa estrutura de seção quadrada de aço de $3.0mm$ de espessura, que por sua vez está soldada, na metade de seu comprimento, num cavalete fixo no chão que permite inclinação de -10° a $+10^\circ$. Nas pontas dessa estrutura quadrada estão duas placas de aço que irão fixá-las no ângulo desejado. Para fazer o ajuste fino do ângulo, entre o tubo de inox e a estrutura de aço, existem mancais que fazem esse trabalho através de parafusos. Para se estimar a incerteza na medição do ângulo, um medidor de inclinação com $0,1^\circ$ de resolução foi usado.

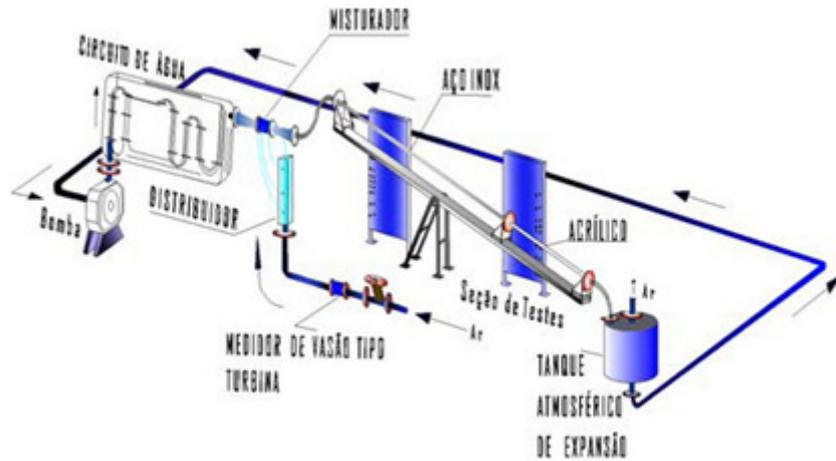


Figura 3.1: Equipamento experimental

O circuito de água consiste numa tubulação de aço inoxidável de diâmetro interno de 50mm , em que estão presentes medidores de temperatura, pressão e vazão. A água é impulsionada por uma bomba centrífuga de um estágio, marca KSB, modelo *CPK-cm-200*, faixa de vazão de 0.05l/s a 9.72l/s , com altura manométrica máxima de 51mca . A variação da bomba é feita através de um variador de corrente contínua, marca Baumuller Numberg, modelo *GNV132MTE14*. O monitoramento da vazão de água é feita através de dois estágios e de acordo com a capacidade dos medidores. Na faixa de $2\text{m}^3/\text{h}$ a $5\text{m}^3/\text{h}$ são usados concomitantemente um medidor tipo turbina Thermo Measurement-Flow Automation, modelo 6500, faixa de vazão $2.5\text{m}^3/\text{h}$ a $40\text{m}^3/\text{h}$, precisão de $\pm 0.5\%$ do valor lido e outro tipo placa de orifício acoplado a um medidor de pressão, marca Smar, modelo LD 302, faixa de vazão de zero a $40\text{m}^3/\text{h}$, precisão de $\pm 3\%$ do valor lido. Na faixa de vazão de 100l/h a 1000l/h , é utilizado um rotâmetro, marca CONAUT, modelo 440. No final do circuito e antes do misturador, o controle da admissão da água é feita por uma válvula globo KSB, modelo *ND10/16 DIN 3791*. Próximo a essa válvula existe um termômetro de expansão Arma Therm e um manômetro Bourdon OTA, modelo DIN 16070 que indicam a temperatura e a pressão da água antes de entrar no misturador.

O sistema de monitoramento e registro de dados é feito com tecnologia Fieldbus Foundation de automação Smar, onde cada instrumento possui um microprocessador ligado a um sistema supervisório.

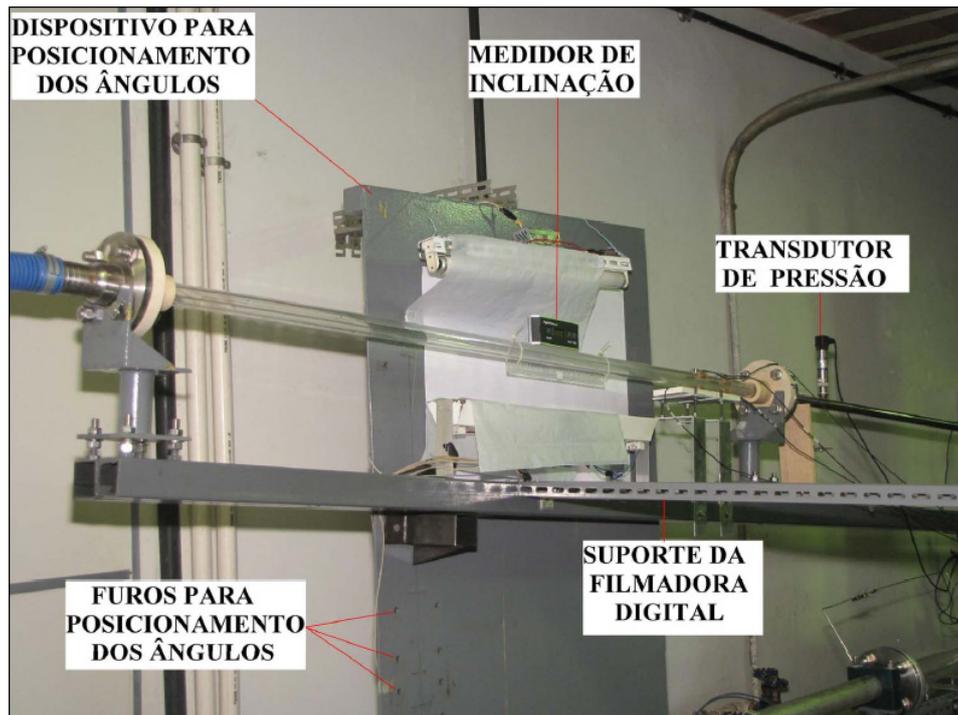


Figura 3.2: Tubo de acrílico e outros componentes da seção inclinada.

Como a água atrita nos tubos, ela aquece, o que deve ser evitado. Portanto, há, logo após a bomba, um trocador de calor tipo duplo tubo. Para indicar a temperatura da água, está ligado ao trocador um termômetro de resistência de platina marca Hartmann Braun, tipo Pt 100°C, ligado a um transmissor de temperatura tipo Fieldbus, marca SMAR, modelo *TT302*.

O sistema de ar comprimido é composto por um compressor, que gera ar comprimido a uma pressão de 2.2 bar. O ar comprimido, antes de entrar na seção de testes é filtrado e secado por uma unidade de tratamento marca HB Domnic- Hunter, modelo DPR 0020. Em seguida há um controlador de pressão, tipo FESTO, modelo *LR-1/2-D-MIDI*, onde a pressão é medida por um manômetro tipo Bourdon, marca Terbrasma. O controle volumétrico é feito por um manifold, composto por quatro válvulas de agulha. A vazão de ar é medida por dois rotâmetros em paralelo e de acordo com a faixa de trabalho de cada um. O primeiro, na faixa de vazão de $0.42Nm^3/h$ a $4.2Nm^3/h$, é o modelo 440 da CONAUT. Na vazão de $1.2Nm^3/h$ a $12Nm^3/h$ é utilizado o modelo 400 da CONAUT. O ar sai do manifold e entra,

através de pequenas mangueiras, no misturador.

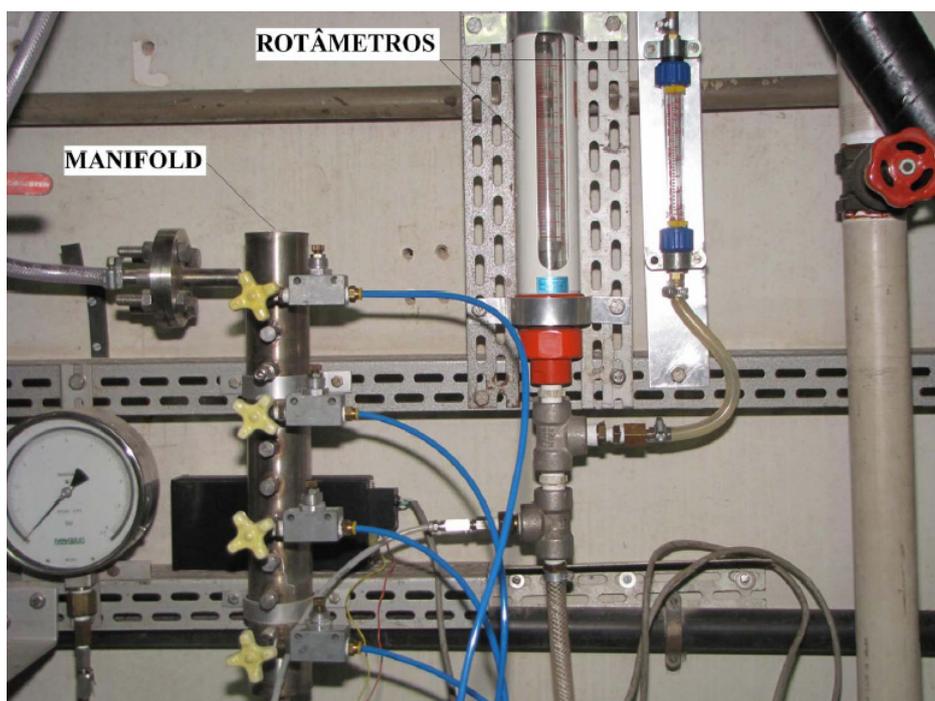


Figura 3.3: Componentes do sistema de alimentação de ar comprimido

O sistema ultra-sônico de alta velocidade foi construído em colaboração entre o Laboratório de Termo-Hidráulica e o Serviço de Instrumentação do IEN. O sistema consiste de: uma CPU; um emissor/ receptor de pulsos ultra-sônicos acoplado a uma placa analógico digital (A/D) de 100 MHz para PCI Bus que permite trabalhar com quatro saídas multiplexadas; quatro transdutores ultra-sônicos tipo monocristal da Panametrics, modelo A111S, diâmetro 6.0 mm, frequência de 10 MHz e um programa para aquisição dos sinais.

A CPU tem 1 Gb de RAM e permite armazenar 8000 pontos. A taxa de amostragem da placa é de 100 MHz e, portanto o tempo entre cada ponto é de 10 ns. O tempo transcorrido entre cada pulso ultra-sônico é de cerca de 200 microsegundos. Entre um ciclo e outro, o tempo pode ser controlado variando a frequência entre 187 Hz e 940 Hz. Portanto o tempo mínimo para geração de pulsos ultra-sônicos é de 1.06 ms, ou seja, a cada 1.06 ms o transdutor é excitado, e portanto, para cada transdutor consecutivo (dos 4) o intervalo é de 265 ns. Um programa para aquisição dos sinais

foi desenvolvido, onde somente são registrados sinais com tempo de trânsito menores que o diâmetro do tubo, afim de eliminar reflexões atípicas.

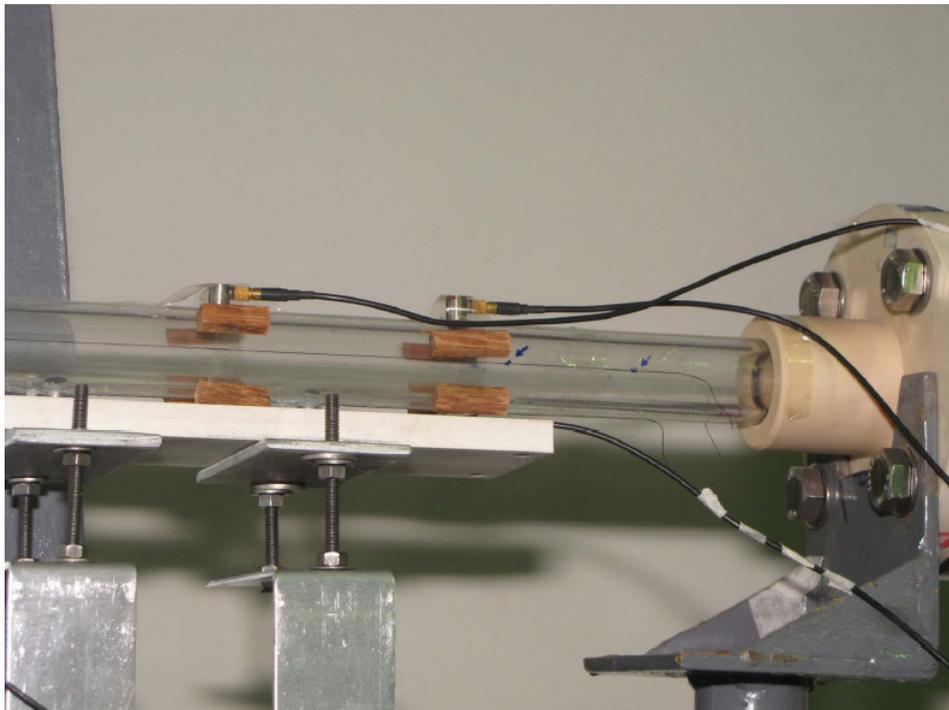


Figura 3.4: Transdutores ultra-sônicos instalados no tubo de acrílico.

Para fazer a correção da vazão, foi usado um transdutor de pressão na entrada do tubo de acrílico. Como apenas o ar é compressível a temperatura de trabalho (entre $25^{\circ}C$ e $28^{\circ}C$), só havia necessidade de fazer a correção do mesmo. Para fazer a correção, comparamos o transdutor de pressão com o medidor tipo Bourdon próximo a admissão de ar (manifold).

Há ainda a aquisição de imagens, com uma filmadora fixa a um suporte que acompanha o movimento de inclinação da seção de testes.

O sistema de visualização é o da Redlake Imaging Corporation, modelo *Motionscope PCI 8000S* composta por uma filmadora digital monocromática de alta velocidade, modelo 1108 – 0014, equipada com um sensor CCD (resolução máxima 480 x 420 pixels), uma placa controladora PCI de 12 bits, um programa de aquisição e análise de imagens e um microcomputador com processador AMD *K6* 800 MHz, 128 Mb de memória RAM. O sistema tem capacidade para gravar imagens em preto e branco com velocidade de 50 até 8000 quadros por segundo. A visualização e reg-

istro das imagens é direcionada para a metade do comprimento longitudinal do tubo de acrílico, imediatamente após os transdutores de ultra-som, de modo a permitir a comparação entre as duas técnicas (Filho, 2010).



Figura 3.5: Câmera digital fixa na ponta do suporte.

A partir dessa configuração, foram realizados dois tipos de experimentos para o presente trabalho: medição de velocidade e comprimento de bolhas com o líquido parado com uma técnica ultrassônica e comparação entre a técnica ultrassônica e de visualização com o líquido em movimento.

3.2 Com o líquido parado

O experimento do drift flux consiste em encher a seção de testes deixando uma de suas pontas aberta e injetar uma pequena quantidade de ar próximo a entrada fechada da seção. A pressão do ar na entrada deve ser ligeiramente acima da atmosférica, a fim de que o ar entre no tubo, mas que devido à perda de carga na entrada, o componente de pressão rapidamente seja desprezado. A posição angular da seção de testes foi variada para ângulos de $2,5^\circ$; 5° e 10° .

Como já dito anteriormente, se o líquido estiver parado e inclinando levemente a seção, ao injetarmos certa quantidade de ar, este último irá se expandir e se

movimentar ao longo do tubo devido ao empuxo. Nessas condições é medida a velocidade de arraste.

A fim de testar a hipótese de Zukoski, que afirmou que a expansão do ar não interferia na velocidade, o tempo de abertura do manifold foi aleatório, gerando diferentes tamanhos de bolhas. Na maioria dos casos, foram gerados também um número diferentes de bolha, em geral variando de um a três. Isso possibilitou obtermos conclusões a cerca da hipótese de Cook Behnia, que afirmaram que o trem de bolhas não interferia na velocidade da bolha.

Nesse experimento, apenas a técnica ultra-sônica de pulso-eco foi utilizada e foram feitas comparações com a correlação de Bendiksen (1984).

3.3 Com o líquido em movimento

A condição de slug flow é mais complexa de ser testada experimentalmente, pois exige fluxo contínuo de dois fluidos que tem suas propriedades (temperatura, pressão e vazão) medidas em circuitos monofásicos segregados um do outro.

A água sai do tanque de armazenamento, é succionada pela bomba que a lança no circuito d'água. Quando está cheio somente de água, ou seja, todo ar foi eliminado, abre-se a válvula globo aos poucos, de acordo com a vazão pretendida, jogando toda água na seção de testes. A pressão da água nesse momento gira em torno de 2 atm. Abre-se as válvulas de ar, observando a pressão de 2, 3 atm (maior do que a de água), e o mesmo entra na seção de testes através das pequenas mangueiras. No final dos 6 metros de aço inox, a mistura entra no tubo de acrílico, onde serão feitas a aquisição dos sinais ultra-sônicos e da filmagem. Ao final da seção de testes, a mistura cai no tanque de expansão, onde o ar é expandido para atmosfera e a água vai para uma mangueira de onde é succionada novamente pela bomba, reiniciando o ciclo.

3.3.1 Matriz dos pontos estudados

Conforme descrito anteriormente, foram relacionadas, para cada ângulo estudado três velocidades superficiais de gás com três velocidades superficiais de líquido,

perfazendo uma matriz de nove pontos.

A seguir são apresentadas matrizes referentes aos pontos estudados para cada ângulo.

Tabela 3.1: Velocidades superficiais estudadas no escoamento horizontal-(m/s).

$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,55 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 2,07 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 2,07 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 2,01 - U_{LS} = 1,08$

Tabela 3.2: Velocidades superficiais estudadas no escoamento +5°-(m/s).

$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 1,50 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,50 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 2,02 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 2,02 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,93 - U_{LS} = 1,08$

Tabela 3.3: Velocidades superficiais estudadas no escoamento +10°-(m/s).

$U_{GS} = 0,78 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 0,76 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,52 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 1,57 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,52 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,98 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 2,00 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,94 - U_{LS} = 1,08$

3.4 Metodologia Experimental

No caso de regime intermitente transiente, existirá sempre um filme de líquido e a possibilidade ou não de haver uma bolha a cima. Não havendo bolha, chamaremos a água entre as bolhas de pistões de líquido.

O sistema ultra-sônico trabalha com os transdutores no modo pulso-eco e apresenta um programa de aquisição de sinais que identifica a amplitude máxima de excitação, ou pulso inicial, e a amplitude máxima da primeira reflexão, que pode ser na interface gás-líquido, ou na parede oposta ao transdutor. Foi desenvolvido

ainda um filtro offline que detecta sinais atípicos, substituindo-os. Há ainda o sistema de filmagens que trabalha paralelamente ao sistema ultra-sônico, gerando duas medições para o mesmo fenômeno. Esses três sistemas serão melhor detalhados nessa sessão.

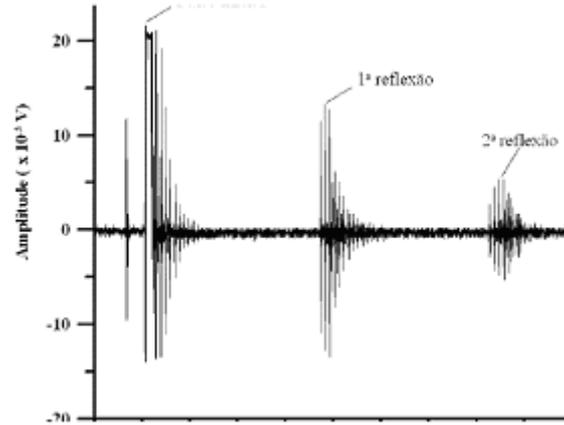


Figura 3.6: Pulsos Ultra-sônicos: o primeiro pico é o pulso inicial, o segundo a primeira reflexão e o terceiro, a segunda reflexão. A medição da técnica trabalha com o pulso inicial e a primeira reflexão.

3.4.1 Sistema de aquisição e análise de sinais ultra-sônicos

Caso haja uma bolha, a onda ultra-sônica é refletida na interface, voltando para o transdutor. Não havendo bolhas, a onda refletirá na parede superior do tubo, voltando para o transdutor. Esse tempo de transito é registrado pelo ultrassom e enviado a sala de controle. Mil pontos são aquisitados, em mais ou menos 4,6 segundos.

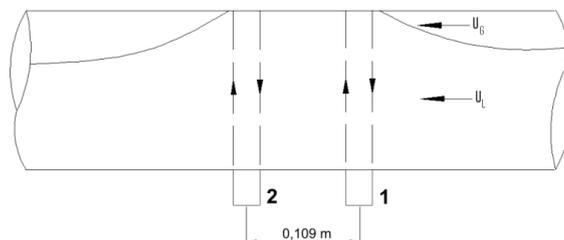


Figura 3.7: Posicionamento dos transdutores (1 e 2).

A figura a seguir mostra um trecho típico de dois transdutores ultra-sônicos. Observa-se que no eixo y, temos o tempo de transito da onda ultra-sônica, enquanto no eixo x temos o tempo de aquisição dos sinais ultra-sônicos. Quando o tempo de transito é mais alto, temos os pistões de líquido e quando eles são mais baixos, temos as bolhas.

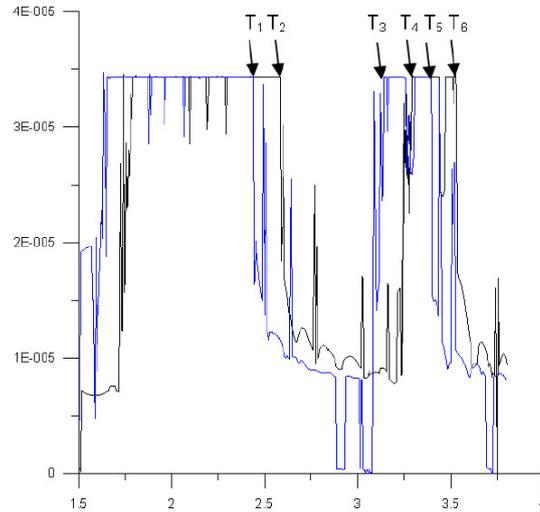


Figura 3.8: Típico Resultado Temporal Ultrassônico

Na mesma figura, podemos ver que os transdutores estão defasados, propositalmente, ou seja, o mesmo sinal que um capta o outro captará alguns décimos de segundos depois. Através de um software, marca-se os pontos do início do pistão (T_3 e T_4) e final do pistão (T_5 e T_6). Nota-se que o início do pistão é o final da bolha (T_3 e T_4) e o início da bolha coincide com o final do pistão anterior (T_1 e T_2). Embora o programa forneça coordenadas cartesianas, só nos interessaremos pelas coordenadas do eixo x (tempo transcorrido). Essa marcação é feita para cada transdutor e os pontos serão colocados numa planilha.

Há ainda de se salientar que os dois transdutores estão posicionados um do outro a uma distancia constante (ΔX) de $0,109m$, medidos com um paquímetro.

As velocidades do nariz, da cauda e média da bolha foram obtidas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$V_{NB} = \sum \frac{\Delta X}{\Delta T_{Ni}} = \sum \frac{\Delta X}{t_i - t'_i} \quad (3.1)$$

Foram feitas ainda os cálculos dos comprimentos das bolhas medidos por cada um dos transdutores:

$$L_B = \sum \frac{V_{NBi} \Delta T_{Bi}}{N_i}. \quad (3.2)$$

Para fazer a correção de vazão, calcula-se a média das pressões instantâneas que o transdutor de pressão registrou, chamando-a P_2 . Toma-se a medida do manômetro tipo Bourdon na entrada do manifold, chamando-a P_1 . Para fazer a correção da vazão, usamos a equação:

$$Q_{G2} = \frac{P_1 Q_{G1}}{P_2} \quad (3.3)$$

Onde Q_{G1} é a vazão do gás no manifold e Q_{G2} é a vazão corrigida do gás.

3.4.2 Sistema de filtragem dos sinais ultra-sônicos

Como pode ser visto da figura 3.8, existem muitos ruídos e aeração do pistão, que dificultam o tratamento dos sinais ultra-sônicos. Esse fenômeno é gerado tanto pelo escoamento intermitente em si, quanto pela técnica de medição ultra-sônica, a serem explicados:

1. Escoamento intermitente: devido ao alto grau de cisalhamento entre as fases e pelas acelerações do filme de líquido abaixo da bolha, pequenos bolsões de ar são desprendidos da bolha alongada indo para o pistão de líquido. Esse fenômeno é aleatório, mas a quantidade de ar desprendido na cauda da bolha aumenta significativamente como o aumento de Re . A medida que o número de Reynolds aumenta, o sensor ultra-sônico começa a não ser capaz de acompanhar o perfil da bolha devido ao alto grau de aeração do pistão e aumento do caos do escoamento, saindo do pistonado para o de bolhas dispersas.
2. Múltiplas reflexões e perda de sinal: à medida que o número de Reynolds aumenta, alguma parte do sinal retorna sem medir o escoamento por inteiro. Isso se deve tanto pela perda de energia do sinal quanto pelo fenômeno de múltiplas reflexões, que é amplificado com o aumento do cisalhamento das fases.

A fim de contornar esse problema, foi desenvolvido um sistema de filtragem pós-análise usando LabView, que detecta esses sinais atípicos, substituindo-os pela média dos três últimos resultados. Como cada sinal adquirido difere um do outro, cabe ao usuário controlar alguns parâmetros desse sistema: banda a ser filtrada, número de iterações, tolerância de filtragem e trecho a ser filtrado.

O filtro gera um array da média dos últimos três resultados e divide esses resultados pelo array original vindo do sistema de análise e aquisição. Se o resultado dessa divisão for maior que a 'tolerância' (número entre 0,85 e 1,05), significa que o sinal é atípico e ele será substituído pela média dos três últimos sinais. Quanto mais ruidoso for o experimento, menor a tolerância deve ser. Além disso, o cursor longitudinal (amarelo) determina a banda a ser filtrada, ou seja, o filtro irá agir apenas para valores inferiores ao nível do cursor amarelo. Enquanto os cursores vermelho e verde dão liberdade para o operador filtrar apenas um trecho dos 1000 pontos gerados. Já o cursor rosa, 'levanta' o escoamento ao nível da bolha, quando as múltiplas reflexões são muito acentuadas e o pulso sequer entra no interior da tubulação.

A figura 3.9 resume, através de um fluxograma simplificado, a movimentação dos cursores e o parâmetro de controle (tolerância).

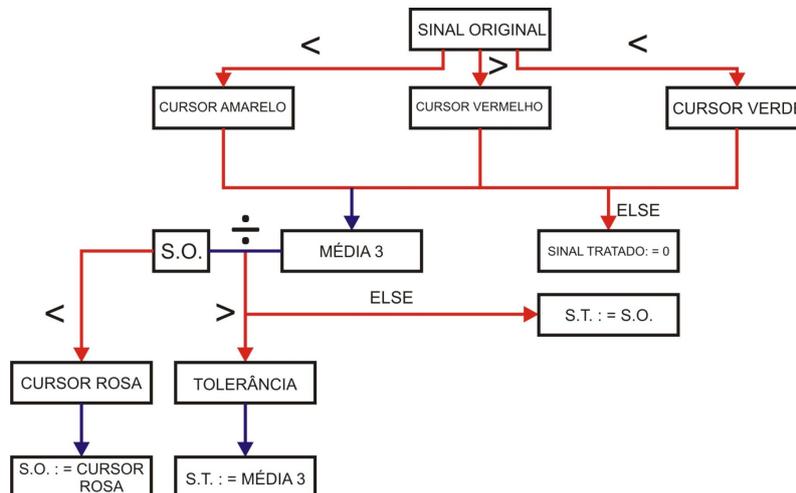


Figura 3.9: Fluxograma do algoritmo de filtragem

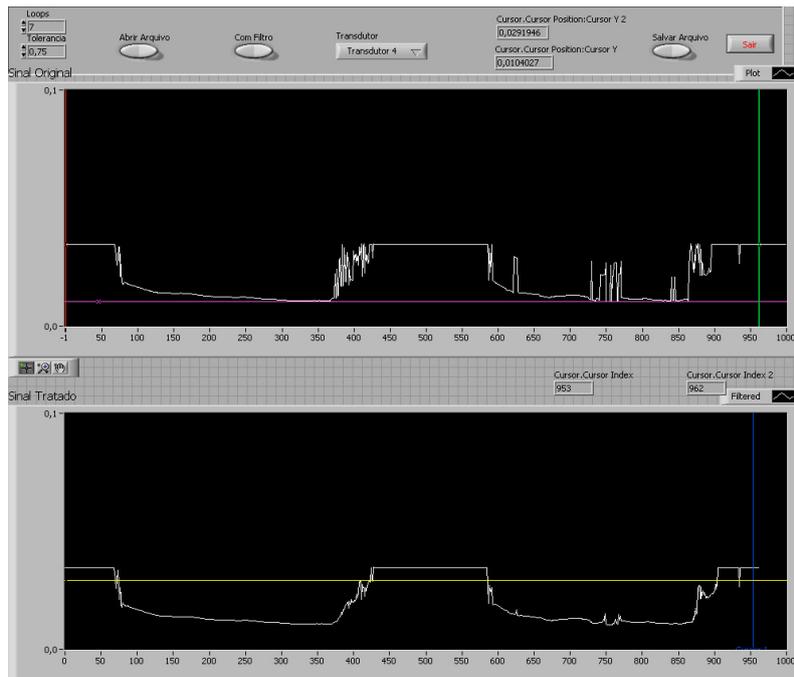


Figura 3.10: Cursores e sistema de filtragem

As figuras abaixo mostram o sinal original (acima) e o resultado do filtro variando seus parâmetros. É possível observar que o número de iterações interfere bastante. No entanto a cada loop a filtragem é suavizada, pois a o tolerância é acrescida de 0,1. Isso evita que, aumentando o número de loops, o resultado seja uma reta.

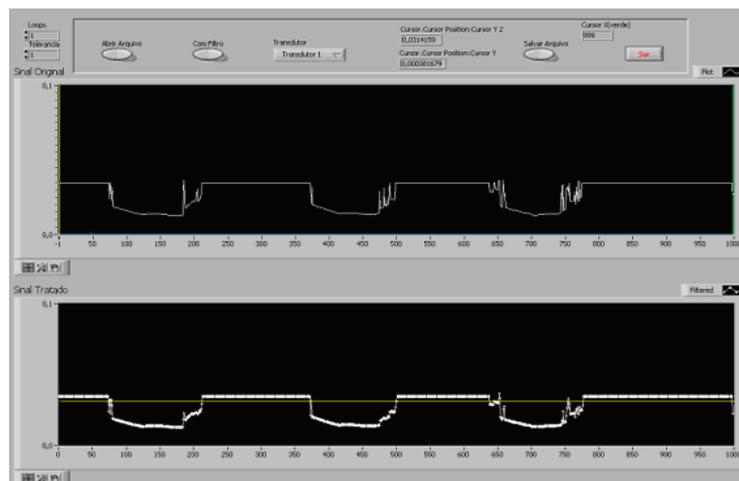


Figura 3.11: Sinal original (acima) e sinal filtrado com 1 iteração e tolerância=1.

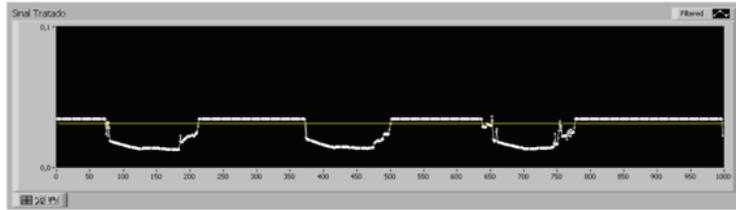


Figura 3.12: Sinal filtrado com 2 iterações e tolerância=1

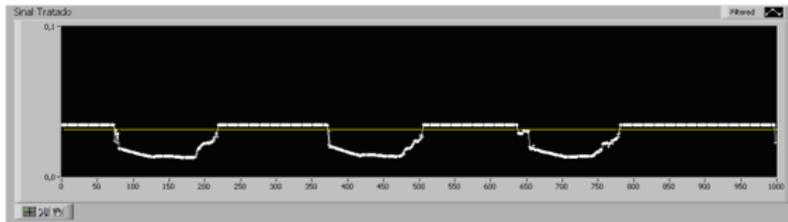


Figura 3.13: Sinal filtrado com 5 iterações e tolerância=0,85.

3.4.3 Sistema de visualização

Como já dito anteriormente, a técnica de visualização foi utilizada em paralelo a ultrassônica, registrando as imagens em alta velocidade e resolução para o cálculo e posterior comparação entre as velocidades e comprimentos de bolha registrados nos experimentos. Para que tais medições fossem realizadas uma régua milimétrica foi colocada perto da tubulação para auxiliar como referência para as dimensões medidas através do programa da câmera. A dimensão e o movimento de uma imagem foram medidos quadro a quadro, a partir do programa de aquisição e análise de imagens do equipamento de imagem. O programa fornece o número de quadros registrados durante o tempo de duração de um experimento e apresenta um par de eixos que permitem ao operador determinar a posição e a velocidade de um ponto de interesse em relação a uma referência calibrada.

Para medir a velocidade do nariz da bolha alongada de gás, um ponto de referência é escolhido no início do nariz (x_0). No quadro seguinte, outro ponto é marcado na mesma linha horizontal do ponto anterior (x_1), de modo a acompanhar a progressão do nariz e garantir que seja calculada somente a velocidade axial da bolha. Automaticamente, através destes dois pontos, suas distâncias são calculadas a partir da calibração feita anteriormente, assim como a velocidade do nariz da bolha alongada é fornecida pela razão entre essa distância ($x_1 - x_0$) e a diferença de tempo

$(t_1 - t_0)$ conhecida entre os dois quadros registrados.

Como algumas das interfaces estudadas são um tanto instáveis, muitas vezes essa marcação de pontos se torna um tanto difícil, principalmente para velocidades de mistura maiores. Para contornar esse problema, para uma mesma bolha, diversos pontos foram marcados e assim, foram registrados a velocidade média de um mesmo nariz de bolha. A tabela e a figura abaixo mostram um típico resultado de velocidade medido pela técnica de visualização:

Tabela 3.4: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.

Pontos	Coordenadas	Quadro	Distância (cm)	Velocidade (cm/s)
0	(296, 150)	-511	0	0
1	(330, 150)	-508	3,304348	206,5218
2	(335, 150)	-505	3,217391	201,0869

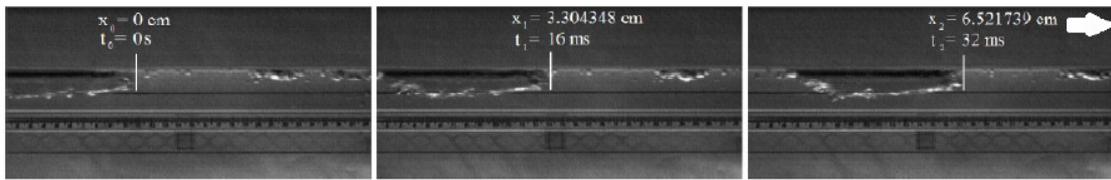


Figura 3.14: Progressão do nariz da bolha alongada de gás.

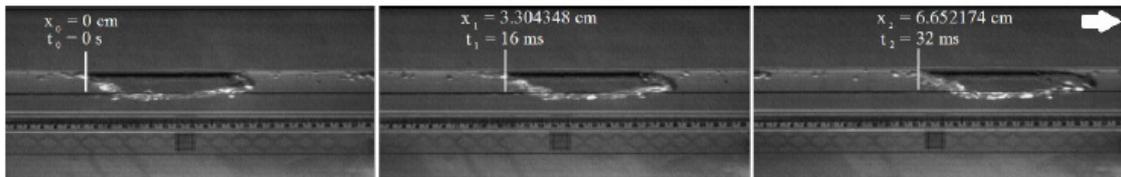


Figura 3.15: Progressão da cauda da bolha alongada de gás.

Vale acrescentar que a técnica de visualização só foi utilizada para os experimentos de slug flow.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes feitos. Eles serão divididos de acordo com o fluxo. Na primeira parte serão expostos os testes para fluxo nulo, ou seja, drift flux, na segunda parte serão apresentados para fluxo diferente de zero, ou seja, slug flow.

4.1 Velocidades e comprimentos de bolhas alongadas para drift flux

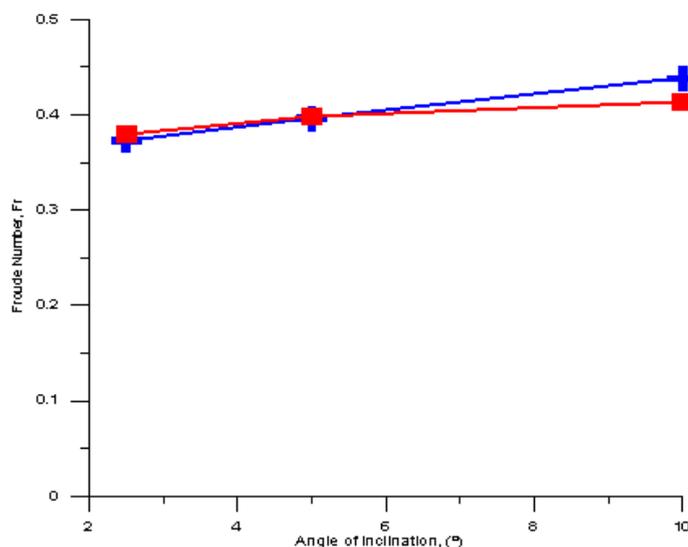
Como já dito anteriormente, se enchermos um tubo inclinado com água e injetarmos certa quantidade de ar, uma bolha será formada pela expansão do ar e deslizará a cima da fase líquida devido ao empuxo. Exatamente por essa natureza física do problema, os resultados apresentados serão não somente os dados brutos mas também uma análise adimensional do problema. Por essa razão, foi escolhido o número de Froude, pois ele relaciona as forças gravitacionais com as inerciais, explicitando todas as grandezas envolvidas no problema sem variar o fluido de trabalho.

A fim de garantir repetitividade ao experimento foram feitos cerca de 100 amostras para cada inclinação usando somente a técnica ultrassônica.

Tabela 4.1: Velocidades da bolha alongada com líquido parado obtidas pela técnica ultra-sônica variando a inclinação

Inclinação(°)	N	$V_{NB}(m/s)$	ΔV_{NB}
2,5	94	0,188	0.0057
5,0	109	0,196	0.0061
10,0	114	0,204	0.0062

Foi feita também uma comparação o número de Fr medido e o tirado da correlação de Bendiksen. Eles estão dispostos no gráfico abaixo.



O desvio máximo entre o Fr medido e o Fr de Bendiksen foi de 5%, que é inferior a superposição dos erros de medição dos parâmetros. Dessa forma, a técnica está alinhada com a correlação de Bendiksen.

Foi feito também uma comparação entre a metodologia com o filtro e sem o filtro. O desvio máximo obtido foi de 1%, que é bastante inferior a incerteza de medição do experimento. Isso demonstra que as duas metodologias estão alinhadas, porém a técnica filtrada possibilita uma análise dos sinais muito mais eficiente que a não-filtrada, uma vez que nessa última a marcação de pontos da interface é mais incerta.

Outra hipótese já mencionada foi também testada: Zukoski (1966) propôs que a expansão das bolhas não influenciava a velocidade de deslizamento, ou seja, o com-

ponente gravitacional da velocidade é independente do comprimento da bolha, desde que tenha maior que 1,5D. Como o tempo de abertura do manifold foi aleatório, volumes diferentes de gases foram inseridos na seção de testes, gerando comprimentos e número de bolhas diferentes para cada teste. O que foi observado é que assim como previu Zukoski, a velocidade permanecia constante mesmo com uma variação de mais de 100% entre o comprimento mínimo e o máximo. Segue a tabela abaixo dos comprimentos aqusitados:

Tabela 4.2: L_{ABi} é o comprimento da bolha alongada medida pelo transdutor, ΔL_{ABi} é o desvio padrão dessa medida. L_{BBi} foi a maior bolha registrada em cada ângulo e L_{SBi} foi a menor bolha registrada em cada ângulo.

Inclinação(°)	L_{MB1}	ΔL_{MB1}	L_{MB2}	ΔL_{MB2}	L_{BB1}	L_{BB2}	L_{SB1}	L_{SB2}
2,5	0.153	0.059	0.147	0.058	0.245	0.246	0.067	0.066
5,0	0.159	0.052	0.152	0.053	0.364	0.362	0.065	0.066
10,0	0.105	0.031	0.103	0.030	0.200	0.189	0.045	0.045

Cook e Behnia (2001) fizeram um experimento com um trem de bolhas com água em movimento. A partir da extrapolação da reta da velocidade translacional da bolha, eles obtiveram a componente gravitacional da mesma. Eles observaram que mesmo para um trem de bolhas, a velocidade de deslizamento era a mesma que a prevista por Bendiksen e outros, que trabalharam com a injeção de uma única bolha. Como no experimento descrito tivemos um número de bolhas variando de 1 a 3 e não houve variação da velocidade entre bolhas do mesmo teste, pode-se concluir que a hipótese semi-empírica de Cook Behnia estava correta.

4.2 Velocidades e comprimentos de bolhas alongadas para slug flow

4.2.1 Escoamento Horizontal

Velocidades de bolhas alongadas

Os valores médios das velocidades do nariz da bolha alongada, para os nove pontos estudados, foram medidos utilizando as técnicas ultra-sônica e de visualização. Esses valores, com os respectivos desvios padrões, estão indicados nas tabelas do Apêndice I.

Filho (2010) analisou os desvios padrões referente aos parâmetros bifásicos estudados, utilizando os coeficientes de variação (CV), que representam a média da dispersão dos parâmetros medidos, expresso pela equação abaixo:

$$CV = \frac{\Delta q_i}{\bar{q}_i} 100 \quad (4.1)$$

Onde:

- q_i é o desvio padrão,
- \bar{q}_i é o valor médio da variável.

O autor ainda adotou o seguinte critério: $CV \leq 15\%$ - baixo; $15\% < CV \leq 35\%$ - médio; $CV > 35\%$ - alto

Para a técnica ultrassônica, os coeficientes de variação para a velocidade do nariz da bolha apresentaram os seguintes valores:

- 10,7% a 25,6% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 8,2% a 21,6% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 14,7% a 21,0% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Enquanto que utilizando a técnica por visualização apresentaram os seguintes valores:

- 6,2% a 7,6% para a velocidade superficial de líquido de 0; 22 m/s,
- 5,5% a 6,4% para a velocidade superficial de líquido de 0; 49 m/s e
- 2,9% a 5,2% para a velocidade superficial de líquido de 1; 08 m/s.

Portanto a técnica ultrassônica apresentou coeficientes de variação entre baixo e médio enquanto a técnica por visualização apresentou um baixo coeficiente de variação. Da análise dos coeficientes de variação verifica-se que as duas técnicas podem ser utilizadas para estudo dos parâmetros bifásicos.

As duas técnicas foram comparadas através da diferença relativa que é obtida através da equação abaixo e tem como valor de referência (x_{ref}) os valores obtidos pela técnica ultrassônica.

$$\epsilon = \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}} 100 \quad (4.2)$$

Para o escoamento horizontal foram analisados um número médio de amostras de 10 tanto para a técnica ultra-sônica quanto para a de visualização.

A figura abaixo mostra o comportamento da velocidade translacional da bolha alongada de acordo com a variação das velocidades superficiais de água e gás. Pode-se observar nitidamente o comportamento linear da velocidade da bolha em relação a incrementos de velocidade superficial de gás. Tal comportamento já tinha sido prevista nas correlações empíricas de Bendiksen.

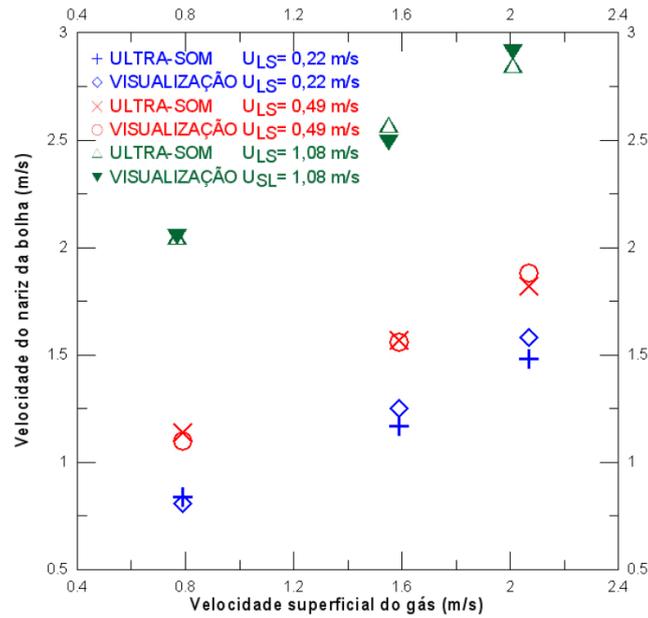


Figura 4.1: Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento horizontal

Outro ponto que se pode notar é a visível proximidade entre as medições feitas por ambas às técnicas. A tabela abaixo resume as diferenças relativas entre uma técnica e outra. Como detalhado no Apêndice II, as incertezas máximas relativas entre as duas técnicas sobrepostas é inferior ao desvio máximo entre as mesmas.

Tabela 4.3: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada V_{NB} .

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
3,6%	6,8%	6,8%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
3,5%	0,6%	3,3%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,55 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,01 \text{ m/s}$
0,0%	3,1%	2,1%

Além disso, foi feita também uma comparação entre as velocidades medidas experimentalmente e a correlação de Bendiksen (1984). Como se pode ver da tabela abaixo, existem grandes diferenças entre os dados medidos e os da literatura.

Tabela 4.4: Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultrassônica e visualização com as correlações de Bendiksen (1984).

U_{GS} (m/s)	0,79	1,59	2,07
$U_{LS} = 0,22$ m/s			
U_M (m/s)	1,01	1,81	2,29
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	0,84	1,17	1,48
Visualização	0,81	1,25	1,58
Bendiksen (1984)	1,33	2,18	2,68
$U_{LS} = 0,49$ m/s			
U_M (m/s)	1,29	2,08	2,56
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,14	1,57	1,82
Visualização	1,10	1,56	1,88
Bendiksen (1984)	1,62	2,45	2,96
$U_{LS} = 1,08$ m/s			
U_M (m/s)	1,88	2,66	3,12
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	2,05	2,57	2,85
Visualização	2,05	2,49	2,91
Bendiksen (1984)	2,25	3,06	3,55

Filho (2010) trabalhando com os mesmos resultados experimentais expostos nesse trabalho, explicou essa diferença baseando-se no fato de que o escoamento não estaria plenamente desenvolvido. Para tal o autor demonstrou que as velocidades da cauda e posterior da bolha tinham valores diferentes, gerando um pistão instável e, sendo assim, um escoamento ainda em fase de desenvolvimento.

Comprimento médio da bolha alongada

Na literatura há pouca informação sobre comprimentos da bolha alongada, sendo um consenso que existem grandes dispersões durante o escoamento. Isso poderá ser observado analisando os altos desvios padrões nas amostras analisadas. A figura abaixo apresenta os comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultra-sônica e de visualização. Observa-se que, para velocidades superficiais de gás praticamente iguais, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do líquido diminui e, para velocidades superficiais de líquido constante, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, indicando uma tendência de relação linear entre as variáveis. Vale ainda ressaltar que o grande desvio entre as técnicas se deve ao fato da ausência de gatilho de medição, ou seja, as bolhas medidas pelas duas técnicas são de amostras diferentes. No entanto, vale notar também que para velocidades da mistura mais baixas (em verde ou algumas em vermelho), os comprimentos medidos pelas duas técnicas foram muito similares. Isso se deve ao fato de que com vazões mais baixas era mais fácil para os técnicos sincronizarem as duas técnicas de medição. Por um outro lado, com vazões mais altas essa sincronização se tornava mais difícil. Além disso, à vazões mais altas começa a ocorrer a transição do escoamento, gerando grande despreendimento de bolhas e maior fluxo de líquido entre o filme e o pistão. Todos esses fenômenos acabam gerando bolhas de comprimentos cada vez mais instáveis e portanto, aumentando significativamente o desvio padrão entre amostras.

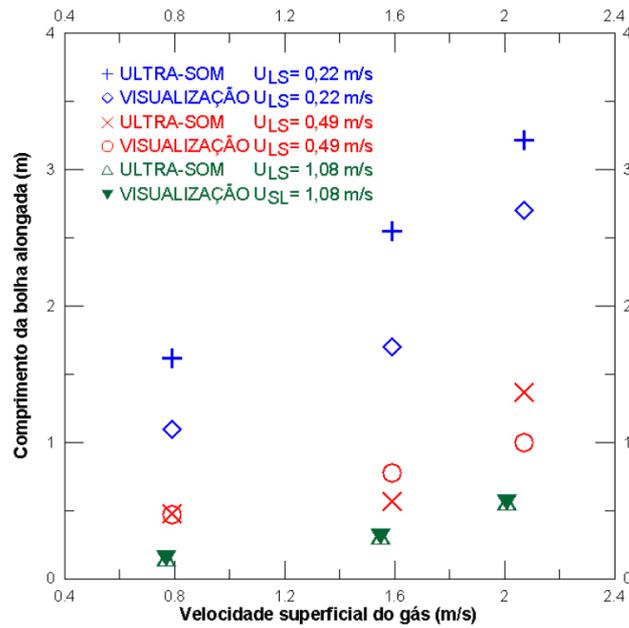


Figura 4.2: Comprimentos da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento horizontal

4.2.2 Escoamento Inclinado ($\beta = 5^\circ$)

Vale ressaltar que, como mostrado no apêndice, para essa inclinação cada par de velocidades é representado por amostras que variam de 60 a 100 bolhas. Portanto, esses resultados tem grande relevância estatística.

Da mesma forma que no escoamento horizontal, as medições de velocidade apresentaram coeficiente de variação médio:

- 11,1% a 19,4% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 12,8% a 18,5% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 10,1% a 17,3% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Enquanto que utilizando a técnica por visualização as variações percentuais médias foram:

- 4,5% a 7,0% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 3,3% a 5,1% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e

- 3,3% a 5,1% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Como se pode observar os coeficientes de dispersão utilizando a técnica ultrassônica foram sensivelmente menores para essa inclinação do que os obtidos no escoamento horizontal. Isso já era esperado, uma vez que o número de amostras aumentou de 6 a 10 vezes.

Segue abaixo também, uma tabela resumo da comparação entre os resultados obtidos pelas duas técnicas. Embora a diferença tenha aumentado ligeiramente, elas ainda estão numa faixa considerada aceitável.

Tabela 4.5: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada - Escoamento +5°.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
9,9%	4,8%	1,3%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
4,3%	1,2%	10,0%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,93 \text{ m/s}$
9,5%	9,5%	9,7%

Mais uma vez, como se pode observar do gráfico abaixo, a velocidade do nariz da bolha aumenta com o incremento da velocidade superficial de gás e apresenta forte relação linear entre esses parâmetros.

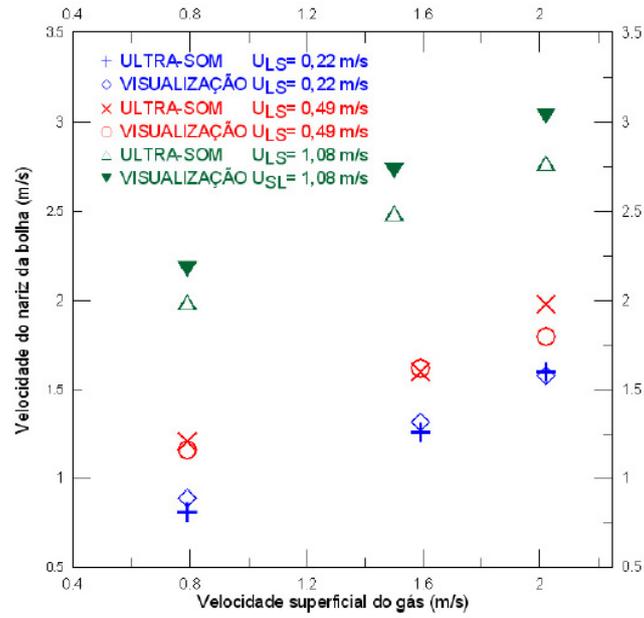


Figura 4.3: Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrasônica e de visualização para escoamento inclinado 5°

Assim como observado no escoamento horizontal, a comparação entre as velocidades medidas experimentalmente e as da literatura foram bastante discrepantes.

Tabela 4.6: Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultrassônica e visualização com as correlações de Bendiksen (1984).

U_{GS} (m/s)	0,79	1,59	2,02
$U_{LS} = 0,22$ m/s			
U_M (m/s)	1,00	1,81	2,24
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	0,81	1,26	1,60
Visualização	0,89	1,32	1,58
Bendiksen (1984)	1,34	2,19	2,64
U_{GS} (m/s)	0,79	1,50	2,03
$U_{LS} = 0,49$ m/s			
U_M (m/s)	1,27	1,98	2,51
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,16	1,62	1,80
Visualização	1,21	1,60	1,98
Bendiksen (1984)	1,62	2,37	2,92
U_{GS} (m/s)	0,77	1,51	1,93
$U_{LS} = 1,08$ m/s			
U_M (m/s)	1,88	2,66	3,12
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,99	2,49	2,77
Visualização	2,18	2,73	3,04
Bendiksen (1984)	2,23	3,06	3,45

Comprimento da bolha alongada

A figura abaixo apresenta os comprimentos da bolha alongada utilizando as técnicas ultrassônica e de visualização:

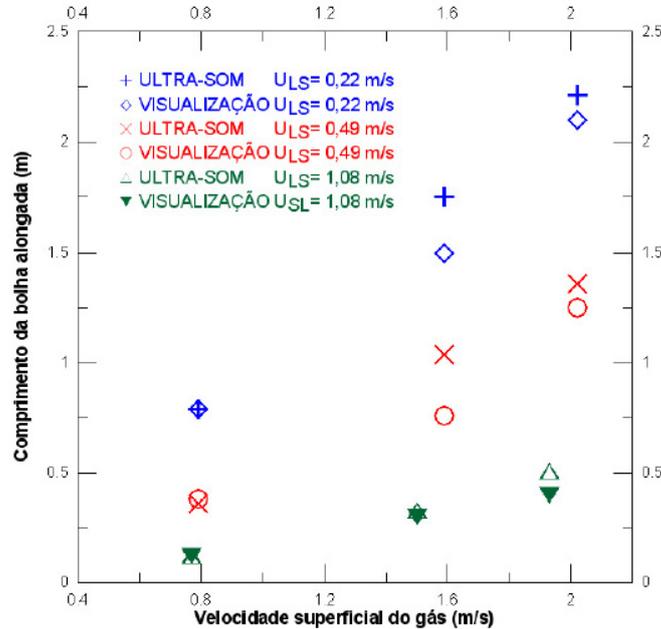


Figura 4.4: Comprimentos da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrassônica e de visualização para escoamento inclinado $+5^\circ$

Mais uma vez, observa-se que, para velocidades superficiais de gás praticamente iguais, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do líquido diminui e, para velocidades superficiais de líquido constante, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, indicando uma tendência de relação linear entre as variáveis.

Vale ressaltar também que as discrepâncias devido a ausência de gatilho diminuem sensivelmente para alguns dos pontos do gráfico. Mais uma vez, o aumento do número de amostras colabora para esse fato.

4.2.3 Escoamento inclinado ($\beta = 10^\circ$)

Os coeficientes de variação referente aos valores medidos da velocidade do nariz da bolha, utilizando a técnica ultrassônica, apresentaram as seguintes variações percentuais médias:

- 7,4% a 20,7% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 8,7% a 28,6% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 6,5% a 24,4% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Enquanto que para a técnica de visualização as variações percentuais médias foram:

- 4,4% a 6,1% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 3,5% a 5,7% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 1,0% a 3,2% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Como se pode ver, o comportamento dos coeficientes de variação permaneceu os mesmos: médios para o ultrassom e baixos para a visualização.

A tabela abaixo apresenta a comparação entre os valores medidos das velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica e pela técnica de visualização, utilizando a diferença relativa.

Tabela 4.7: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada, V_{NB} - Escoamento $+10^\circ$.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,78 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,98 \text{ m/s}$
12,3%	5,7%	1,2%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,57 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,00 \text{ m/s}$
8,7%	8,1%	1,5%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,76 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,94 \text{ m/s}$
9,0%	12,4%	9,5%

Embora a diferença entre as técnicas tenha aumentado um pouco, na média entre os nove pontos analisados, ela ainda permanece dentro de uma faixa razoável. Dessa forma, a concordância entre os valores experimentais entre as técnicas de visualização e ultrassônica permanece sendo observada.

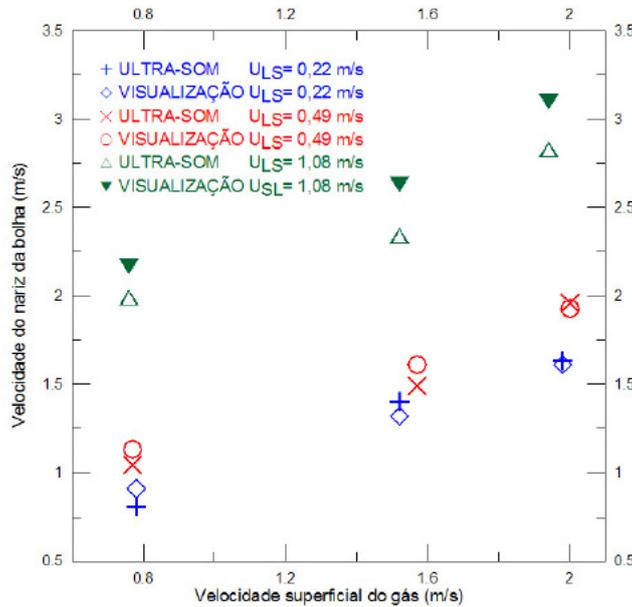


Figura 4.5: Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrassônica e de visualização para escoamento inclinado $+10^\circ$

A figura acima mostra o comportamento da velocidade do nariz da bolha com a variação das velocidades superficiais de líquido e gás medidas tanto pela técnica ultrassônica quanto pela de visualização. Observa-se que mantida a velocidade superficial do líquido constante, as velocidades do nariz e da média da bolha alongada aumentam com o aumento da velocidade superficial da fase gás, indicando também uma tendência de relação linear entre elas.

A comparação entre as técnicas e a correlação de Bendiksen mostrou o mesmo padrão que nas inclinações anteriores:

Tabela 4.8: Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultrassônica e visualização com as correlações de Bendiksen (1984).

U_{GS} (m/s)	0,78	1,52	1,98
$U_{LS} = 0,22$ m/s			
U_M (m/s)	1,00	1,74	2,22
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	0,81	1,40	1,63
Visualização	0,91	1,32	1,61
Bendiksen (1984)	1,37	2,26	2,81
$U_{LS} = 0,49$ m/s			
U_M (m/s)	1,00	1,74	2,22
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,04	1,49	1,96
Visualização	1,13	1,61	1,93
Bendiksen (1984)	1,68	2,64	3,16
$U_{LS} = 1,08$ m/s			
U_M (m/s)	1,00	1,74	2,22
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,99	2,34	2,83
Visualização	2,17	2,63	3,1
Bendiksen (1984)	2,38	3,29	3,80

Comprimento médio da bolha alongada

A figura abaixo apresenta a variação dos comprimentos médios das bolhas alongadas obtidas pelas técnicas ultrassônica e de visualização. Conforme ocorreu no escoamento horizontal, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, indicando também uma tendência de correlação linear entre as variáveis. Também se observa que, para mesmas velocidades superficiais de gás, os comprimentos das bolhas alongadas diminuem à medida que a velocidade superficial do líquido aumenta. Comportamento semelhante também ocorreu no escoamento horizontal e no ascendente de 5° .

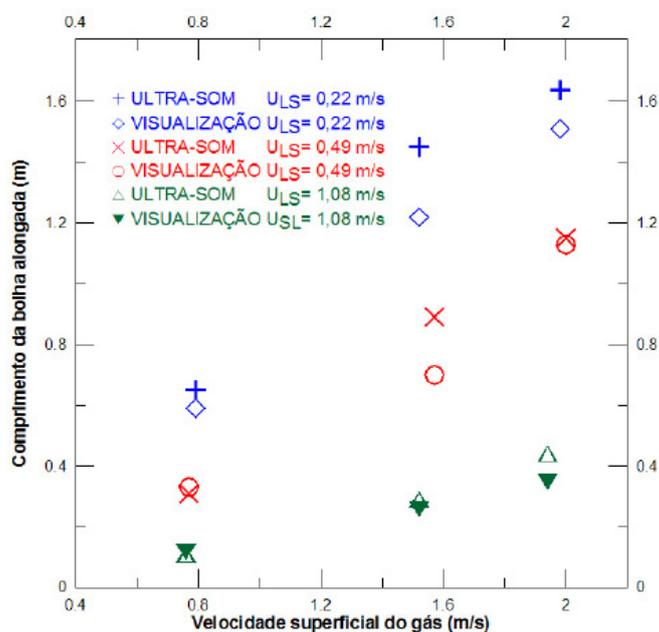


Figura 4.6: Comprimentos da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultrassônica e de visualização para escoamento inclinado $+10^\circ$

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões feitas a partir da análise dos resultados demonstrados no capítulo anterior. No entanto, vale dizer que, diferentemente do Capítulo de Resultados, não será feita separação entre slug flow e drift flux, uma vez que a comparação entre os dois experimentos será um dos métodos escolhidos para esse capítulo. Ao final do mesmo, serão apresentadas algumas sugestões de novos trabalhos a serem desenvolvidos com a seção de testes inclinada.

5.1 Conclusões

Nesse trabalho foram medidos velocidades e comprimentos de bolhas alongadas, variando a inclinação e as vazões de líquido e gás, utilizando uma técnica ultrassônica pulso-eco e comparando com uma técnica de visualização. Também foi desenvolvida uma técnica ultrassônica filtrada para os experimentos de drift flux. Tendo isso em mente, pode-se concluir que:

1. O sistema ultrassônico pode captar a interface ar-água com satisfatória resolução, tendo em vista os perfis de resultados e o tempo de propagação da onda ultrassônica encontrados.
2. A comparação entre as técnicas ultra-sônicas e de visualização se mostraram alinhadas, uma vez que a superposição das incertezas relativas foi inferior aos desvios encontrados para a maioria dos pares de vazão encontrados.

3. A técnica ultra-sônica filtrada foi capaz de detectar e eliminar sinais atípicos de múltiplas reflexões, mantendo as características dos sinais originais. Isso fica evidente na comparação numa amostra diminuta entre os valores de drift velocity encontrados usando ambas as técnicas (com filtro e sem filtro): a discrepância foi de menos de 1%. Além disso, os sinais filtrados não eliminaram características sutis da interface bolha-pistão como os saltos hidráulicos.
4. Verificou-se um padrão linear entre o aumento da velocidade da mistura e o aumento das velocidades das bolhas encontradas. Tal padrão é previsto na literatura pelas correlações de Bendiksen (1984), Cook e Behnia (2001), Bonnacaze et al. (1971) e outros.
5. Também verificou-se padrão linear entre o aumento da velocidade da mistura e o aumento dos comprimentos das bolhas alongadas. Dessa forma, pode-se concluir que quando o sentido do empuxo coincide com o do escoamento, o comprimento da bolha tende a crescer com o aumento da velocidade da mistura.
6. Na comparação entre as velocidades do slug flow medidas experimentalmente e as expressas na correlação de Bendiksen, pode-se observar que as medições experimentais ficaram abaixo das correlações. Como já dito anteriormente se pode observar que as bolhas encontradas nos experimentos se mostraram instáveis. Dessa forma, pode-se dizer que o escoamento encontrado não era plenamente desenvolvido, que é um requisito das correlações de Bendiksen. Outro fato que comprova essa tese, é que o comprimento da seção de testes era inferior a $500D$, condição necessária para desenvolvimento do escoamento segundo Cook e Behnia (2000).
7. Na comparação entre os valores das velocidades experimentais e as previstas na correlação de Bendiksen para velocidade de deslizamento, as medições experimentais se mostraram em concordância com a literatura, uma vez que a máxima discrepância reportada foi inferior a superposição de incertezas da correlação e dos valores experimentais.

8. O comprimento de bolhas no teste de drift flux foi aleatório, fato esse que não interferiu na velocidade de deslizamento, como já tinha previsto Zukoski (1966).
9. Também no experimento de drift flux, a quantidade de bolhas inseridas para um mesmo resultado variou de um até três, não tendo interferido no resultado da velocidade de deslizamento. Isso é um forte indício de que o trem de bolhas não interfere na velocidade de bolhas alongadas, como já mencionado por Cook e Behnia (2001).
10. Na comparação entre os desvios padrões encontrados no experimento do drift flux e slug flow, pode-se observar que o desvio da velocidade de deslizamento foi vertiginosamente inferior. Dessa forma, o filtro atingiu seu objetivo principal: diminuir a incerteza relativa a dispersão amostral. No entanto, vale fazer uma ressalva em relação a esse item, uma vez que já seria esperada uma diminuição do desvio padrão para o drift flux, uma vez que quanto menor o número de Reynolds, menores as perturbações do escoamento.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir da seção de testes inclinada, uma infinidade de trabalhos pode ser desenvolvida. Alguns mais relevantes foram destacados.

- Uma comparação entre os resultados experimentais obtidos sem a filtragem para o slug flow e novas medições com fluxo diferente de zero utilizando a técnica filtrada.
- Um maior número de pares de vazões bem como inclinações diferenciadas podem ser testados a fim de obter um padrão mais preciso do comportamento da velocidade e comprimento da bolha alongada.
- A técnica ultrassônica foi aplicada em tubos de acrílico, o passo seguinte seria aplica-la em tubos de aço inox, que são mais presentes em aplicações industriais.

- Medição de outros parâmetros relativos a escoamentos multifásicos como a fração de vazio e o hold-up do líquido.
- Estudo de parâmetros multifásicos na mudança entre tipos de escoamentos diferentes que o slug e o comportamento dos mesmos nas transições do escoamento.

Apêndice I

Tabelas de Parâmetros Bifásicos

Neste apêndice são apresentados através de tabelas os valores dos parâmetros bifásicos medidos pelas técnicas ultrassônica e de visualização.

Escoamento Horizontal, $\beta=0^\circ$

Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os valores medidos dos componentes das velocidades das bolhas alongadas obtidos respectivamente pelas técnicas ultrassônica e de visualização.

São apresentadas as velocidades médias do nariz da bolha alongada V_{NB} . N = Número de amostras tratadas e Δ é o desvio padrão.

Tabela 1: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais(m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	N
ULTRASSOM			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	0,84	0,09	9
$U_{GS} = 1,59$	1,17	0,30	9
$U_{GS} = 2,07$	1,48	0,18	6
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	1,16	0,20	9
$U_{GS} = 1,59$	1,56	0,30	9
$U_{GS} = 2,07$	1,82	0,23	11
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	2,05	0,31	10
$U_{GS} = 1,55$	2,57	0,54	12
$U_{GS} = 2,01$	2,85	0,42	10

As tabelas 3 e 4 apresentam os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B), com os respectivos desvios padrões (Δ).

Tabela 2: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	0,81	0,05	5
$U_{GS} = 1,59$	1,25	0,10	6
$U_{GS} = 2,07$	1,58	0,12	5
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	1,10	0,06	10
$U_{GS} = 1,59$	1,56	0,09	10
$U_{GS} = 2,07$	1,88	0,12	6
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	2,05	0,06	10
$U_{GS} = 1,55$	2,49	0,08	11
$U_{GS} = 2,01$	2,91	0,15	10

Tabela 3: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultrassônica no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N
ULTRASSOM			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	1,62	0,32	9
$U_{GS} = 1,59$	2,5	0,85	10
$U_{GS} = 2,07$	3,22	0,88	10
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	0,48	0,18	10
$U_{GS} = 1,59$	0,57	0,30	9
$U_{GS} = 2,07$	1,37	0,66	11
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	0,15	0,04	9
$U_{GS} = 1,55$	0,31	0,09	7
$U_{GS} = 2,01$	0,56	0,20	10

Tabela 4: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica de visualização no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N
VISUALIZAÇÃO			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	1,10	0,31	8
$U_{GS} = 1,59$	1,70	0,39	8
$U_{GS} = 2,07$	2,70	1,04	8
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	0,47	0,11	9
$U_{GS} = 1,59$	0,78	0,27	10
$U_{GS} = 2,07$	1,00	0,48	7
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	0,14	0,04	25
$U_{GS} = 1,50$	0,25	0,11	10
$U_{GS} = 1,93$	0,36	0,15	18

Escoamento Inclinado, $\beta=5^\circ$

As tabelas 5 e 6 apresentam valores médios das velocidades e respectivos desvios padrões das bolhas alongadas para diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido obtidos respectivamente pelas técnicas ultrassônica e por visualização.

As tabelas 7 e 8 apresentam os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B), com os respectivos desvios padrões (Δ), medidos pela técnica ultrassônica e por visualização.

Tabela 5: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica - Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	N
ULTRASSOM			
<hr/>			
<i>$U_{LS} = 0,22$</i>			
<i>$U_{GS} = 0,79$</i>	0,81	0,09	60
<i>$U_{GS} = 1,59$</i>	1,26	0,14	51
<i>$U_{GS} = 2,02$</i>	1,60	0,31	52
<hr/>			
<i>$U_{LS} = 0,49$</i>			
<i>$U_{GS} = 0,79$</i>	1,16	0,20	86
<i>$U_{GS} = 1,50$</i>	1,62	0,30	32
<i>$U_{GS} = 2,02$</i>	1,80	0,23	73
<hr/>			
<i>$U_{LS} = 1,08$</i>			
<i>$U_{GS} = 0,77$</i>	1,99	0,20	99
<i>$U_{GS} = 1,50$</i>	2,49	0,27	70
<i>$U_{GS} = 1,93$</i>	2,77	0,48	92

Tabela 6: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização- Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	0,89	0,04	76
$U_{GS} = 1,59$	1,32	0,08	116
$U_{GS} = 2,02$	1,58	0,11	89
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	1,21	0,04	64
$U_{GS} = 1,50$	1,60	0,07	136
$U_{GS} = 2,02$	1,98	0,10	84
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	2,18	0,06	82
$U_{GS} = 1,50$	2,73	0,07	89
$U_{GS} = 1,93$	3,04	0,09	66

Tabela 7: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultrassônica - Escoamento +5°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N
ULTRASSOM			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	0,79	0,25	60
$U_{GS} = 1,59$	1,75	0,63	52
$U_{GS} = 2,02$	2,21	0,83	53
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	0,36	0,13	86
$U_{GS} = 1,50$	1,04	0,45	48
$U_{GS} = 2,02$	1,36	0,52	74
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	0,12	0,05	99
$U_{GS} = 1,50$	0,33	0,19	80
$U_{GS} = 1,93$	0,51	0,26	96

Tabela 8: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica de visualização - Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N
VISUALIZAÇÃO			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,79$	0,79	0,26	99
$U_{GS} = 1,59$	1,50	0,57	116
$U_{GS} = 2,02$	2,10	0,90	97
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,79$	0,38	0,15	61
$U_{GS} = 1,50$	0,76	0,31	137
$U_{GS} = 2,02$	1,25	0,42	85
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,77$	0,12	0,05	80
$U_{GS} = 1,50$	0,30	0,15	86
$U_{GS} = 1,93$	0,40	0,16	66

Tabela 9: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultrassônica - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	N
ULTRA-SOM			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,78$	0,81	0,06	18
$U_{GS} = 1,52$	1,40	0,29	10
$U_{GS} = 1,98$	1,63	0,28	10
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,77$	1,04	0,11	24
$U_{GS} = 1,57$	1,49	0,13	10
$U_{GS} = 2,00$	1,96	0,56	13
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,76$	1,99	0,13	20
$U_{GS} = 1,52$	2,34	0,37	10
$U_{GS} = 1,94$	2,83	0,69	9

Escoamento Inclinado, $\beta=10^\circ$

As tabelas 9 e 10 apresentam valores médios das velocidades e respectivos desvios padrões das bolhas alongadas para diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido obtidos respectivamente pelas técnicas ultrassônica e por visualização.

As tabelas 11 e 12 apresentam os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B), com os respectivos desvios padrões (Δ), medidos pela técnica ultrassônica e de visualização.

Tabela 10: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,78$	0,91	0,04	15
$U_{GS} = 1,52$	1,32	0,08	14
$U_{GS} = 1,98$	1,61	0,09	14
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,77$	1,13	0,04	11
$U_{GS} = 1,57$	1,61	0,06	10
$U_{GS} = 2,00$	1,93	0,11	12
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,76$	2,17	0,07	16
$U_{GS} = 1,52$	2,63	0,07	12
$U_{GS} = 1,94$	3,10	0,03	10

Tabela 11: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultrassônica - Escoamento +10°

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N
ULTRASSOM			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,78$	0,65	0,13	22
$U_{GS} = 1,52$	1,45	0,33	10
$U_{GS} = 1,98$	1,64	0,65	10
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,77$	0,31	0,11	24
$U_{GS} = 1,57$	0,89	0,30	10
$U_{GS} = 2,00$	1,15	0,51	12
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,76$	0,11	0,05	20
$U_{GS} = 1,52$	0,29	0,19	10
$U_{GS} = 1,94$	0,44	0,16	10

Tabela 12: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica de visualização - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N
VISUALIZAÇÃO			
$U_{LS} = 0,22$			
$U_{GS} = 0,78$	0,59	0,21	16
$U_{GS} = 1,52$	1,22	0,42	15
$U_{GS} = 1,98$	1,51	0,56	13
$U_{LS} = 0,49$			
$U_{GS} = 0,77$	0,31	0,16	12
$U_{GS} = 1,57$	0,70	0,24	12
$U_{GS} = 2,00$	1,13	0,40	11
$U_{LS} = 1,08$			
$U_{GS} = 0,76$	0,12	0,04	15
$U_{GS} = 1,52$	0,26	0,11	11
$U_{GS} = 1,94$	0,35	0,14	10

Apêndice II

Estimativa de máxima incerteza experimental

Nessa seção será mostrado o cálculo da máxima incerteza experimental encontrada para um par de velocidades superficiais de gás e líquido. Dessa forma, foram considerados os máximos erros no tempo (mínima frequência) e máximo desvio padrão das variações temporais.

Vale acrescentar que foi utilizado um ponto do escoamento inclinado $+5^\circ$, devido ao seu maior número amostral de resultados.

Técnica Ultrassônica

Derivado a equação 3.1 para uma velocidade, obtemos a expressão para a análise de incerteza experimental da técnica ultrassônica (E_u):

$$E_u = \sqrt{\left(\frac{E_{Su}}{\Delta t}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta S}{\Delta t^2} E_{Tu}\right)^2} \quad (1)$$

Na qual a incerteza espacial (E_{Su}) é definida como:

$$E_{Su} = \frac{RES_S}{2\sqrt{3}} = \frac{10^{-3}}{2\sqrt{3}} = 2.8910^{-4} \quad (2)$$

Supondo uma distribuição retangular e uma resolução de $1mm$.

Além disso, a incerteza no tempo é subdividida em incerteza estatística (U_{a2u}) e incerteza gerada pela resolução do sistema ultrassônico (U_{b2u}):

$$U_{a2u} = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{0.005}{\sqrt{198}} = 3.5510^{-4} \quad (3)$$

Onde s foi o desvio padrão dos tempos instantâneos e N é o número de medições desses tempos. Vale dizer que nesse caso, foram analisadas 99 bolhas e para tal, foram feitas 198 medições de tempos instantâneos.

A incerteza gerada pela resolução do sistema ultra-sônico (U_{b2u}) é calculada a partir da derivação da variação do tempo, uma vez que as medições ultra-sônicas captam tempos instantâneos e não a variação como sugere a equação 3.1.

$$U_{b2u} = \sqrt{U_{b2tu}^2 + U_{b2tu}^2} = U_{b2tu}\sqrt{2} \quad (4)$$

Onde U_{b2tu} é a incerteza gerada pela resolução temporal instantânea dos transdutores, ou seja, a mínima frequência de excitação dos mesmos. O sistema ultra-sônico é capaz de gerar excitações entre 187Hz e 940Hz. As mínimas frequências utilizadas no trabalho foram de 230Hz e, sendo conservador, essa será a frequência utilizada para a análise de incerteza:

$$U_{b2tu} = \frac{RES_{Tu}}{2\sqrt{3}} = \frac{1/230}{2\sqrt{3}} = 1.2610^{-3} \quad (5)$$

Dessa forma $U_{b2u} = 1.7710^{-3}$. Desse resultado, pode-se observar que a incerteza gerada pela resolução é ordem de grandeza maior do que a gerada pelo desvio padrão.

Sendo assim a incerteza de ΔT se resume a:

$$E_{Tu} = t_{95}\sqrt{U_{au}^2 + U_{b2u}^2} = 1.96\sqrt{(3.55 \times 10^{-4})^2 + (1.77 \times 10^{-3})^2} = 0.0035 \quad (6)$$

Onde t_{95} é a distribuição t-student encontrada para um intervalo de confiança de 95% e infinitos graus de liberdade ($N > 120$).

Dessa forma, encontramos $E_u = 0.13$, que seria da ordem de 6, 7% do valor da velocidade do nariz da bolha medidos experimentalmente pela técnica ultrassônica.

Vale dizer também que o filtro induz à inclusão de uma outra incerteza experimental temporal:

$$U_{b3} = \frac{1}{230} = 4.34 \times 10^{-3} \quad (7)$$

No entanto, utilizando a metodologia filtrada, as velocidades de deslizamento são muito inferiores, gerando incertezas bem menores que as registradas acima.

Técnica de Visualização

Analogamente e utilizando a mesma derivação da equação da velocidade do nariz da bolha, pode-se chegar a incerteza experimental da técnica de visualização. Vale acrescentar que na técnica de visualização as incertezas amostrais são muito inferiores, sendo consideradas desprezíveis se comparadas com a incerteza temporal e espacial.

A incerteza espacial (E_{Sv}) é definida como:

$$E_{Sv} = \frac{RES_{Sv}\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} = \frac{10^{-3}}{2\sqrt{3}}\sqrt{2} = 4.08 \times 10^{-4} \quad (8)$$

Vale dizer que a incerteza espacial é multiplicada por $\sqrt{2}$, pois para que a calibração de 1 mm seja feita, dois pontos devem ser marcados, gerando assim uma incerteza similar a da equação 4.

A incerteza temporal se deve basicamente pela resolução da imagem, ou seja, pelo número de quadros por segundo aquisitado. Nos experimentos em questão a mínima resolução utilizada foi de 100 quadros por segundo. Sendo assim, a incerteza temporal é definida como:

$$U_{b2v} = \frac{1/100}{2\sqrt{3}} = 2.88 \times 10^{-3} \quad (9)$$

Combinando os valores das incertezas temporais e espaciais e utilizando uma equação análoga a 1, chegamos ao valor de $E_v = 0.064$, que seria da ordem de 4,1% do valor da velocidade do nariz da bolha medidos experimentalmente pela técnica de visualização.

De ambas as análises, pode-se concluir que ambos os sistemas tem suas incertezas aumentadas exponencialmente com o aumento da velocidade. Isso era de se esperar, tendo em vista que quanto mais o escoamento caminha para o slug, mais instáveis as bolhas e interfaces gás-líquido se tornam.

Referências Bibliográficas

- Andreussi, P. e Bendiksen, K. (1989). An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 15:937 – 946.
- Barnea, D. e Brauner, N. (1985). Holdup of the liquid slug in two-phase intermittent flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 11:43–49.
- Barnea, D. e Taitel, Y. (1993). Kelvin-hermholtz stability criteria for stratified flow: viscous non-viscous (inviscid) approaches. *International Journal of Multiphase Flow*, 19:639–649.
- Bendiksen, K. H. (1984). An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 10:467–483.
- Bendiksen, K. H. e Espedal, M. (1992). Onset of slugging in horizontal gas-liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 18:237–247.
- Benjamin, T. B. (1968). Gravity currents and related phenomena. *Journal Fluid Mechanics*, 31:209–248.
- Bonnecaze, R. H., Erkine, J., e Greskovich, E. J. (1971). Holdup and pressure drop for two-phase flow in inclined pipelines. *AIChE Journal*, 17:1109–1113.
- Chang, J. S., Ichikawa, Y., Irons, G. A., Morala, E. C., e Wan, P. T. (1984). Void fraction measurement by an ultrasonic transmission technique in bubbly gas-liquid two-phase flow. *IUTAM Symposium of Measurement Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flow - Nancy, France*.

- Chang, J. S. e Morala, E. C. (1990). Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique. *Nuclear Engineering and Design*, 122:143 – 156.
- Cook, M. e Behnia, M. (2000). Slug length prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow. *Chemical Engineering Science*, 55:2009–2018.
- Cook, M. e Behnia, M. (2001). Bubble motion during inclined intermittent flow. *Heat and Fluid Flow*, 22:543–551.
- Da Silva, M.J., A. L. A. C. M. R. (2010). Investigação experimental de escoamentos bifásicos gás-líquido em tubulações através da técnica wire-mesh. *2º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos*.
- Davies, R. e Taylor, G. (1950). The mechanism of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. *Proc. Roy. Soc.*, 200-A:375–390.
- Dukler, A. E. e Hubbard, M. G. (1975). A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Industrial. Engineering Chemistry Fundamentals*, 14:337–347.
- Dukler, A. E., Maron, D. M., e Brauner, N. (1985). A physical model for predicting the minimum stable slug length. *Chemistry Engineering Science*, 40:1379–1385.
- Fabre, J. e Liné, A. (1992). Modeling of two-phase slug flow. *Fluid Mech.*, 24:21–46.
- Faccini, J. L. H., Harvel, G. D., Su, J., e Chang, J. S. (2004). An advanced ultrasonic technique for flow and void fraction measurements of two-phase flow. *Proc. of ICONE12*.
- Faccini, J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2006). Experimental study of horizontal plug flow by ultrasonic and visualization techniques. *Proc. of ENCIT*.
- Faccini, J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2007). Assessment of intermittent two-phase flow using a high-speed visualization technique. *Proceeding of XV ENFIR-National Meeting of Reactor Physics and Thermal Hydraulics - International Nuclear Atlantic Conference - Santos, SP, Brasil*.

- Faccini., J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2008). Estudos experimentais e numéricos de escoamentos bifásicos gás-líquido em duto circular horizontal. *Proc. of EBECEM*.
- Fagundes, J. R., Fabre, J., e Peresson, L. (1999). Shape of long bubbles in horizontal slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 25:1129–1160.
- Filho, J. S. C. (2010). *Estudo Experimental de Escoamento Bifásico em Tubo Circular e Inclinado Usando Técnicas Ultrasônicas e de Visualização - Tese de doutorado*. PhD thesis, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Filho, J. S. C., Faccini, J. L. H., Lamy, C. A., e Su, J. (2009). Measurement of velocity and shape of elongated bubble in a horizontal two-phase gas-liquid flow using a high speed ultrasonic system. *20th International Congress of Mechanical Engineering - Gramado, RG, Brasil*.
- Fossa, M., Guglielmini, G., e Marchitto, A. (2003). Intermittent flow parameters from void fraction. *Flow Measurement and Instrumentation*, 14:161–168.
- Freire, A. P. S., Ilha, A., e Colaço, M. J. (1998). *Anais da I Escola de Primavera em Transição e Turbulência-Tomo 1*. Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica.
- Freire, A. P. S., Ilha, A., e Colaço, M. J. (2006). *Anais da V Escola de Primavera em Transição e Turbulência-Tomo 1*. Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica.
- Heywood, N.I., R. J. (1979). Tslug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: determination of liquid hold-up by γ -ray absorption. *Chem. Eng. Sci.*, 34:17–30.
- Hulburt, E.T., H. T. (2002). Prediction of the transition from stratified to slug and plug flow for long pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 28:707–729.
- Lioumbas, J. S., Paras, S. V., e Karabelas, A. J. (2005). Co-current stratified gas-liquid downflow - influence of the liquid flow field on interfacial structure. *International Journal of Multiphase Flow*, 31:869 – 896.

- Manolis, I. G. (1995). *High Pressure Gas-Liquid Slug Flow*. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK.
- Massignan, J. P. D., A. L. V. R. N.-J. F. (2010). 2º encontro brasileiro sobre ebulição, condensação e escoamentos multifásicos. *Review Of Scientific Instruments*.
- Nepomuceno, L. X. (1980). *Tecnologia Ultra-sônica*. Edgar Blücher.
- Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., e Davidson, J. F. (1962). Two phase flow in vertical tubes. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 40:61–68.
- Nydal, O. J., Pintus, S., e Andreussi, P. (1992). Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 18:439–453.
- Rosa, E. S. (1989). Necessary conditions for the existence of stable slugs. *Thermal Engineering*, 15:151–160.
- Taitel, Y. e Dukler, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22:47–55.
- Weber, M. E. (1981). Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes. *Canadian Journal of Chemical*, 90:398–399.
- Woods, B. D., Hurlburt, E. T., e Hanratty, T. J. (2000). Mechanism of slug formation in downwardly inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 26:977–998.
- Zukoski, E. E. (1966). Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, 25:821–837.