UNIVERSIDADE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ISRAEL FRANK DOS SANTOS ALMEIDA

Estudo Prospectivo de Sonda Capacitiva não Intrusiva Duplosensor para Medir Fração Volumétrica *in situ* em Escoamentos Contendo Água, Óleo e Ar

São Carlos - SP 2006

ISRAEL FRANK DOS SANTOS ALMEIDA

Estudo Prospectivo de Sonda Capacitiva não Intrusiva Duplo-

sensor para Medir Fração Volumétrica in situ em Escoamentos

Contendo Água, Óleo e Ar

Dissertação apresentada à comissão de Pós Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Oscar Maurício Hernandez Rodriguez

Co-orientador: Paulo Seleghim Júnior

São Carlos - SP 2006

ISRAEL FRANK DOS SANTOS ALMEIDA

Estudo Prospectivo de Sonda Capacitiva não Intrusiva Duplosensor para Medir Fração Volumétrica *in situ* em Escoamentos Contendo Água, Óleo e Ar

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós

Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, como

requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Mecânica.

Banca Examinadora

Prof. Dr Oscar Maurício Hernandez Rodriguez Universidade São Paulo

Prof. Associado Paulo Seleghim Júnior Universidade São Paulo

Dr. Valdir Estevam Exploração e Produção – Petrobrás

São Carlos, 12 de dezembro de 2006

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por não deixar que as decepções, as derrotas e o desânimo fossem motivos para meu desestimulo. Transformando as adversidades em ferramentas necessárias para mostrar a estrada a seguir com coragem em busca de meu objetivo.

A minha esposa Nadjane Barroso Góis Almeida e minha filha Luana Letícia Góis Almeida pelo apoio, incentivo, compreensão e cumplicidade especialmente nos momentos difíceis dessa caminhada. Aos meus pais Raimundo Candido de Almeida, Maria Lúcia dos Santos Almeida e a meus irmãos Márcio César dos Santos Almeida e a Moisés dos Santos Almeida pelo suporte psicosocial e pela crença em meus ideais. A meus tios Nivaldo Amaral Goes e Vera Lúcia Barroso Goes que deram o amparo emocional necessário a minha família.

A todos os amigos conquistados durante o período desta pesquisa, especialmente a Rodrigo de Oliveira Preti, Ernesto Beck Júnior, Robson Alves de Oliveira, Raimundo Nonato Araújo dos Santos, Thales Henrique de Oliveira, Edmur Braga Martins, Edson Valentim Roberto, Roberto Prataviera, Roberto Lourenço, Ava Brandão, Daniel Barbosa, Marcelo Souza de Castro, Fabio Toshio Kanizawa, Elisabeth Maria Alves Alexandre, Ermano da Silveira, Gustavo Rodrigues de Souza, Fabio Henrique Salvador, Anderson Antônio Ubices de Moraes, Keyll Martins, Grazieli Luiza Costa Carosio, Analice Costacurta Brandi, Diego Oliveira de Mello, Renata Natsumi Haneda e Roberta Del Cole que foram companheiros, conselheiros e amigos durante minha passagem por suas vidas.

Finalmente sou grato especialmente a Jorge Nicolau dos Santos e a José Roberto Bogni por terem fundamental participação no desenvolvimento de várias etapas deste trabalho. Aos professores Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez, Paulo Seleghim Júnior, Antônio Moreira dos Santos, João Augusto de Lima Rocha e Ednildo Andrade Torres por terem compartilhado seu conhecimento, proporcionando a mim a ampliação dos limites da sabedoria.

Enfim a todos que direta ou indiretamente contribuíram ou não com uma parcela de compreensão e incentivo para que eu pudesse ter tranqüilidade e mantivesse renovada a vontade de concluir com êxito este trabalho.

criados. (autor desconhecido)

Os navios estão a salvo nos portos, mas não foi para ficarem ancorados que eles foram

Resumo

Almeida, I. F.S, Estudo Prospectivo de Sonda Capacitiva não Intrusiva Duplo-sensor para Medir Fração Volumétrica in situ em Escoamentos Contendo Água, Óleo e Ar, 2006, 162 f. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Paulo, 2006.

Sensores capacitivos são amplamente utilizados em vários sistemas de medida, tanto na indústria como em laboratórios de pesquisa. Estes dispositivos medem variadas grandezas físicas, como deslocamento, força, pressão, densidade e concentração de substâncias em escoamentos bifásicos, entre outros. Sua aplicação vêm sendo utilizada há algum tempo de forma relativamente elementar, necessitando ainda de estudos específicos para entender a fundo o fenômeno de transferência de carga. A sonda proposta neste trabalho visa melhorar a aquisição do sinal capacitivo e obter uma medida precisa de fração volumétrica em condições bifásicas e trifásicas. Portanto, é necessário um circuito transdutor que transmita de forma precisa a capacitância registrada entre os eletrodos dos sensores até uma central de aquisição. Neste trabalho buscamos desenvolver um modelo de sonda para medir frações volumétricas *in situ*. Para tanto, apresentamos as etapas de calibração dos sensores, através de válvulas de fechamento rápido, e validamos a técnica sob determinadas condições e variados padrões de escoamento. Dois sensores de geometrias distintas (anéis e hélices) foram utilizados na composição da sonda capacitiva não intrusiva. Propõe-se a solução do sistema linear para medição direta de fração volumétrica em escoamento trifásico.

Palavras-chave: Fração volumétrica *in situ*, Sonda capacitiva, Técnica não intrusiva, Escoamento multifásico, Capacitância.

Abstract

Almeida, I. F.S, Prospective Study of a Non-intrusive Double-sensor Capacitive Probe for *Insitu* Volumetric Fraction Measurements in Oil-water-air Flows, 2006, 162 f. Dissertation Master's Degree, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Paulo, 2006.

Capacitive sensors are widely employed in many measurement systems in both industry and laboratory activities. These devices measure several physical quantities such as displacement, forces, pressure, density and concentration of substances in two-phase flows. Their application in industry is still insipient, in part because specific studies are still necessary to properly understand the phenomenon of charge transfer. The goal of this research is the development of a non-intrusive double-sensor probe to on-line measurement of *in-situ* volumetric fractions in two and three-phase flows. Therefore, we present the calibration work, through quick-closing valves, and validation techniques under certain conditions and for different flows patterns. A transducer circuit to transmit the capacitance sign accurately from the sensors to the central acquisition was developed. Two sensors with different geometries (rings and helix) comprise the double-sensor capacitive probe. Finally, we propose the solution of a linear system for the direct measurement of *in-situ* volumetric fraction in threephase flow.

Keywords: *In-situ* volumetric fraction, Capacitive probe, Non-intrusive technique, Multiphase flow, Capacitance.

Índice de Figuras

FIGURA 1.1. PADRÕES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO	14
FIGURA 2.1. LINHAS DE CAMPO NUM CAPACITOR DE PLACAS PLANAS.	19
FIGURA 2.2.ESCOAMENTO BIFÁSICO.	22
FIGURA 2.3.ESCOAMENTO ESTRATIFICADO – ST (ALKAYA ET AL., 2000)	24
FIGURA 2.4. ESCOAMENTO ESTRATIFICADO COM MISTURA NA INTERFACE - ST & MI (ALKAYA ET AL., 2000)	24
FIGURA 2.5. DISPERSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA JUNTAMENTE COM UMA CAMADA DE ÁGUA BEM DEFINIDA – DO/V	w &
W (ALKAYA ET AL., 2000)	25
FIGURA 2.6.EMULSÃO DE ÓLEO EM ÁGUA – DO/W (ALKAYA ET AL., 2000)	25
FIGURA 2.7.DISPERSÃO DE ÁGUA EM ÓLEO E DE ÓLEO EM ÁGUA – DW/O & DO/W (ALKAYA ET AL., 2000)	25
FIGURA 2.8.EMULSÃO DE ÁGUA EM ÓLEO – DW/O (ALKAYA ET AL., 2000)	25
FIGURA 2.9. PADRÃO DE ESCOAMENTO COM INCLINAÇÃO ASCENDENTE DE 1º (ALKAYA ET AL., 2000)	26
FIGURA 2.10.PADRÃO DE ESCOAMENTO COM INCLINAÇÃO DESCENDENTE DE 1º (ALKAYA ET AL., 2000)	26
FIGURA 2.11.PADRÃO DE ESCOAMENTO COM INCLINAÇÃO ASCENDENTE DE 5º (ALKAYA ET AL., 2000)	27
FIGURA 2.12. PADRÃO DE ESCOAMENTO COM INCLINAÇÃO DESCENDENTE DE 5º (ALKAYA ET AL., 2000)	27
FIGURA 2.13.LINHA DE TESTE COM BYPASS (ODDIE ET AL., 2003)	29
FIGURA 2.14. ANÁLISE DO SINAL COLETADO NO ESCOAMENTO COM BOLHAS	33
FIGURA 2.15. SENSOR CAPACITIVO UTILIZADO NOS TESTES PARA DETECÇÃO DO PERFIL DA BOLHA	34
FIGURA 2.16. MODELOS DE CIRCUITOS COM PONTES ELÉTRICAS (HUANG ET AL. 1988)	40
FIGURA 2.17. CONFIGURAÇÃO DOS ELÉTRODOS (JAWOREK E KRUPA, 2004)	42
FIGURA 2.18.MEDIÇAO DOS PADROES DE ESCOAMENTO (JAWOREK E KRUPA, 2004)	44
FIGURA 2.19. VARIAÇÃO DE FREQUENCIA RELATIVA VS. PERCENTUAL DE BOLHAS DE GAS (JAWOREK E KRUP	Α,
2004)	44
FIGURA 2.20.FREQUENCIA RELATIVA VS. FRAÇÃO DE VAZIO (JAWOREK E KRUPA, 2004)	45
FIGURA 2.21.FREQUENCIA RELATIVA VS. EXCENTRICIDADE EM MILLIMETROS (JAWOREK E KRUPA, 2004)	40
FIGURA 2.22. CIRCUITO CAPACITIVO PADRAO (JAWOREK ET AL., 2004)	48 52
FIGURA 2.23.ESQUEMA DE UM EXPERIMENTO PARA INVESTIGAR UM INJETOR DE VAPOR SUPER CRITICO	32 52
FIGURA 2.24, SECAF – CIRCUITO OSCILADOR (SCHULLER ET AL., 2004).	55 56
FIGURA 2.2.5. VISTA DA SECÇAU TRANSVERSAL DU MEDIDUR (SCHULLER ET AL., 2004)	30 56
FIGURA 2.20. RESULTADOS OBTIDOS AUMENTANDO E DIMINUINDO A CONCENTRAÇÃO DE AGUA Figura 2.27 Esculema Simuli leicado dada Teste (Texssedolia e Tve 1000)	50 50
FIGURA 2.27. ESQUEMA SIMI ENTCADO FARA TESTE (TETSSEDOUA E TTE 1777)	60 60
FIGURA 2.201 ONTE RESISTIVA CALACITIVA (TETSSEDOUA E TTE 1777)	00 61
FIGURA 2.30 RELACIONAMENTO ENTRE A ALTURA E A ÁREA OCUPADA PELO LÍOUIDO (TEXSEDOU E TYE 19	01 999)
FIGURA 2.31.GEOMETRIA DOS ELETRODOS (TEYSSEDOU E TYE. 1999)	62
FIGURA 2.32. CARACTERÍSTICAS DO SENSOR DE TESTE (TOLLEFSEN AND HOMMER. 1998)	64
FIGURA 2.33.CÁLCULO DE INCERTEZA (TOLLEFSEN AND HAMMER, 1998)	65
FIGURA 2.34. LAYOUT DOS ELETRODOS DENTRO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (MENG ET AL., 2006)	67
FIGURA 3.1.INSTALAÇÃO DE TESTE DINÂMICO	72
FIGURA 3.2. FOTO DAS INSTALAÇÕES DO NETEF NA UNIVERSIDADE SÃO PAULO EM SÃO CARLOS	73
FIGURA 3.3.COMPRESSOR DE ALIMENTAÇÃO DE AR	74
FIGURA 3.4. TORRES DE RESFRIAMENTO DE AR	74
FIGURA 3.5. TANQUE ACUMULADOR DE AR	75
FIGURA 3.6. VARIADORES DE FREQÜÊNCIA PARA CONTROLE DE ÁGUA E DE ÓLEO	76
FIGURA 3.7.BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA	77
FIGURA 3.8.BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE ÓLEO	77
FIGURA 3.9. TANQUE DE PVC PARA ARMAZENAMENTO	78
FIGURA 3.10.SEPARADOR DE ÁGUA E ÓLEO	79
FIGURA 3.11.ESQUEMA DO SEPARADOR DE ÁGUA E ÓLEO	82
FIGURA 3.12.MEDIDORES DE VAZÃO	83
FIGURA 3.13.PRESSOSTATO DE SEGURANÇA	84
FIGURA 3.14. VÁLVULA DE CONTROLE PNEUMÁTICO DA VAZÃO DE AR	84
FIGURA 3.15.ESTAÇÃO DE TRABALHO REMOTO	85
FIGURA 3.16.MEDIDOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO	86
FIGURA 3.17.BY PASS DE SEGURANÇA	87

FIGURA 4.1.BANCADA DE TESTE ESTÁTICO	91
FIGURA 4.2.BANCADA DE TESTES	92
FIGURA 4.3. ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA	93
FIGURA 4.4.BLINDAGEM DE ALUMÍNIO	94
FIGURA 4.5. ANÁLISE DA FREQÜÊNCIA DE EXCITAÇÃO COM ÁGUA NA SONDA Nº 2	95
FIGURA 4.6. ANÁLISE DA FREQÜÊNCIA DE EXCITAÇÃO COM AR NA SONDA Nº 2	95
FIGURA 4.7. ANÁLISE DA FREQÜÊNCIA DE EXCITAÇÃO COM ÓLEO NA SONDA Nº2	96
FIGURA 4.8.SENSORES DE ANÉIS E HÉLICES	97
FIGURA 4.9. SENSOR DE DUPLAS HÉLICES COM TUBO DE VIDRO CHEIO – SENSOR 2	99
FIGURA 4.10.SENSOR DE ANÉIS DUPLOS COM TUBO DE VIDRO CHEIO – SENSOR 2	99
FIGURA 4.11.SENSOR DE HÉLICES Nº 2 COM ÁGUA E AR	.101
FIGURA 4.12.SENSOR DE ANÉIS Nº 2 COM ÁGUA E AR	.102
FIGURA 4.13. CIRCUITO CAPACITIVO COM PONTE RESISTIVA CAPACITIVA	.104
FIGURA 4.14.RELAÇÃO DE VOLTAGEM COM A CAPACITÂNCIA	.105
FIGURA 4.15. CIRCUITO CAPACITIVO COM PONTE CAPACITIVA E FONTES DE TENSÃO	.106
FIGURA 4.16. DIFERENÇAS BÁSICAS ENTRE OS CIRCUITOS TRANSDUTORES DE CAPACITÂNCIA	.106
FIGURA 4.17. PONTE CAPACITIVA COM FONTES DE TENSÃO	.107
FIGURA 4.18. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA VS. CAPACITÂNCIA; CALIBRAÇÃO DA SONDA Nº 2, SENSOR DE ANÉIS	.110
FIGURA 4.19. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA VS VOLTAGEM: REGIME ESTRATIFICADO COM O SENSOR DE HÉLICES Nº 2	111
FIGURA 4.20. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA VS VOLTAGEM: REGIME ESTRATIFICADO COM O SENSOR DE ANÉIS Nº 2	.112
FIGURA 4.21. PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS	.113
FIGURA 4.22.COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MÁSSICAS	.120
FIGURA 4.23. GRÁFICO E CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DA ÁGUA	.121
FIGURA 4.24. GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DO AR (14 M ³ /H)	.123
FIGURA 4.25.GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DO AR (40 M ³ /H)	.124
FIGURA 4.26GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DO AR (100 M ³ /H)	.125
FIGURA 4.27. GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO DA INCLINAÇÃO DAS LINHAS DE TESTE	.126
FIGURA 5.1. GRÁFICO COMPARATIVO COM DIVERSOS PADRÕES DE ESCOAMENTO NO SENSOR DE HÉLICES Nº2.	.129
FIGURA 5.2. GRÁFICO COMPARATIVO COM DIVERSOS PADRÕES DE ESCOAMENTO NO SENSOR DE ANÉIS Nº2	.129
FIGURA 5.3. SINAL DO PADRÃO PISTONADO EXTRAÍDO DO SENSOR DE ANÉIS Nº2	.131
FIGURA 5.4. RECONSTRUÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE ANÉIS Nº2 UTILIZANDO O CORTE SIMPLES	.132
FIGURA 5.5. RECONSTRUÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE ANÉIS Nº2 UTILIZANDO O CORTE DUPLO	.133
FIGURA 5.6. DERIVADA DO SINAL DO PADRÃO PISTONADO EXTRAÍDO DO SENSOR DE ANÉIS Nº2	.134
FIGURA 5.7. RECONSTRUÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE ANÉIS Nº2 UTILIZANDO A DERIVADA COM CORTE SIMP	LES
	.135
FIGURA 5.8. RECONSTRUÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE ANÉIS Nº2 UTILIZANDO A DERIVADA COM CORTE DUPI	20
	.136
FIGURA 5.9. RECONSTRUÇÃO DO SINAL DO SENSOR DE ANÉIS Nº2 UTILIZANDO O MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	.136
FIGURA 5.10. GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO NO REGIME PISTONADO COM O SENSOR DE ANÉIS Nº 2	.142
FIGURA 5.11. GRÁFICO DE CALIBRAÇÃO NO REGIME PISTONADO COM O SENSOR DE HÉLICES Nº 2	.142
FIGURA 5.12. EFEITO DE BORDA NA SEÇÃO DE TESTE ESTÁTICO	.144

Índice de Tabelas

TABELA 2.1. TESTE EXPERIMENTAL (ODDIE ET AL., 2003)	
TABELA 2.2. CAPACITÂNCIA SIMULADA TEORICAMENTE PARA UM ARRANJO TRIFÁSICO (MENG ET AL	2006)68
TABELA 3.1.RELAÇÃO DOS INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	72
TABELA 4.1.DIMENSÃO DAS PLACAS DE ORIFÍCIO	117
TABELA 4.2. DADOS PARA CALIBRAÇÃO DAS PLACAS DE ORIFÍCIO DA TUBULAÇÃO DE ÁGUA	119
TABELA 4.3.DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA DA ÁGUA	119
TABELA 4.4.DADOS DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DA ÁGUA	
TABELA 4.5DADOS DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DO AR (14 M ³ /H)	
TABELA 4.6. DADOS DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DO AR (40 M ³ /H)	123
TABELA 4.7. DADOS DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DO AR (100 M ³ /H)	124
TABELA 4.8. DADOS DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO	126
TABELA 5.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE TRATAMENTO DO SINAL PISTONADO NO SENSOR D	e Anéis n°2
	137
TABELA 5.2.COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE TRATAMENTO DO SINAL PISTONADO NO SENSOR	de Hélices
N°2	137
TABELA 5.3. FRAÇÕES DE FLUIDOS UTILIZADAS NO TESTE TRIFÁSICO ESTÁTICO	138
TABELA 5.4. CÁLCULO DE ERRO NO SENSOR DE ANÉIS Nº2	140
TABELA 5.5.CÁLCULO DE ERRO NO SENSOR DE HÉLICES Nº2	141
TABELA 5.6.ANÁLISE COM BASE NO SINAL DA DERIVADA UTILIZANDO O CORTE SIMPLES NO SENSO	r de Anéis
N°2	143
TABELA 5.7. ANÁLISE COM BASE NO SINAL DA DERIVADA UTILIZANDO O CORTE SIMPLES NO SENSOR	DE HÉLICES
N°2	144
TABELA 5.8 ERRO RELATIVO DO MODELO TRIFÁSICO	144

Capítulo 1 – Introdução	
Capítulo 2 – Revisão da Literatura	
2.1 Capacitância	18
2.2 Fração volumétrica	21
2.3 PADRÕES DE ESCOAMENTO	22
2.3.1 Padrões de escoamento água e óleo em tubulações levemente inclinadas 2.3.2 Estudo do escoamento bifásico e trifásico em tubulações inclinadas de grande diâmetro	22 28
2.4 TÉCNICAS DE MEDIDA E CALIBRAÇÃO	31
2.4.1 Técnica de medidas para escoamento multifásico 2.4.2 Perfil de velocidade num escoamento pistonado utilizando um sensor não intrusivo 2.4.3 Calibração capacitiva para medição da fração de vazio em escoamentos bifásicos	31 34 37
2.5 SENSORES CAPACITIVOS	38
 2.5.1 Transdutor eletrônico industrial para medir baixos valores de capacitância. 2.5.2 Fração volumétrica através do método de ressonância por radio freqüência. 2.5.3 Sensor capacitivo para a medida fração de vazio em escoamentos com água e vapor. 2.5.4 Medição da concentração de água utilizando um único elétrodo capacitivo. 2.5.5 Sistema capacitivo para detecção de um escoamento bifásico pistonado. 2.5.6 Sansora empeitivos para reducião da arros pas medidas dos concentraçãos do fasos 	38 41 47 52 57
2.5.6. Sensores capacitivos para reaução de erros nas medidas das concentrações de fases 2.5.7 Sensor multi-elétrodos para detecção de fase em processos de separação	67

Capítulo 3 – Descrição da Montagem Experimental 70

3.1 SISTEMA DE SUPRIMENTO DE AR	73
3.2 Sistema de suprimento de água	75
3.3 Sistema de suprimento de óleo	76
3.4 Separador de água e óleo	78
3.5 Instrumentos de medida comercial	81
3.6 Dispositivo de inclinação da tubulação	85

Capítulo 4 – Trabalho Experimental 89

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA SONDA CAPACITIVA	89
4.1.1 Determinação do Modelo Capacitivo 4.1.2 Determinação das Freqüências	
4.2 CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DOS SENSORES CAPACITIVOS	100
4.3 CIRCUITO CAPACITIVO	102
4.4 PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE SINAIS	112
4.5 EQUACIONAMENTO DOS SENSORES CAPACITIVOS PARA MEDIDAS TRIFÁSICAS	115

Sumário

4.6 AFERIÇÃO DOS MEDIDORES DE VAZÃO	117
4.6.1 Placas de orifício para vazão de água	
4.6.2 Placas de orifício para vazão do ar	
4.7 CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE ÂNGULOS	

Capítulo 5 – Tratamento dos Dados, Resultados e Discussão..... 127

5.1 Aplicação da Sonda Capacitiva para Medição de Fração Volumétrica <i>In Situ</i>	127
5.1.1. Medição Dinâmica de Fração Volumétrica em Diversos Padrões de Escoamento 5.1.2 Medição Dinâmica de Fração Volumétrica no Padrão Pistonado 5.1.3 Medidas Estáticas em Condicões Trifásicas	127 130 137
5.2 Erros e tolerâncias	139
Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Fut	uros 146
Anexo A – Gráficos do Analisador de Impedância	149
Anexo B – Gráficos com Tubo Cheio de Fluido	154
Anexo C – Gráficos de Calibração Bifásico	157
Apêndice A – Placas de Orifício para Fluidos Incompres	síveis. 160
Apêndice B – Placas de Orifício para Fluidos Compressív	veis 163
Referências Bibliográficas	164

Capítulo 1 – Introdução

A crescente evolução nas técnicas de extração e transporte de líquidos, freqüentemente esbarra em dificuldades que estão ligadas à caracterização das propriedades do escoamento. Sistemas simples de medição estão atualmente disponíveis no mercado, mas que não atendem totalmente a todas as situações requisitadas. Uma das principais dificuldades, no que diz respeito a este tipo de procedimento, está relacionada à medição de fração volumétrica de líquido em escoamentos multifásicos.

Num escoamento multifásico, dois ou mais fluidos imiscíveis coexistem dentro de uma mesma linha de transporte. Portanto, diferentes características das propriedades dos fluidos devem ser consideradas para se estabelecer uma técnica de medição mais apropriada. Configurações do tipo gás-sólido (leito fluidizado), gás-líquido (torres de resfriamento) e líquido-líquido (escoamento de óleo e água) estão presentes nos mais diversos tipos de setores, abrangendo indústrias metalúrgicas, petroquímicas, farmacêuticas, de refrigeração etc. Em analogia com as misturas gás-líquido, misturas compostas de líquidos podem ser agrupadas em três categorias conforme sua distribuição espacial (Bannwart et al., 2004): escoamento disperso (dispersões e emulsões), escoamento de fases separadas (estratificado e anular) e escoamento intermitente (pistonado ou slug-flow) conforme mostrado na Figura 1.1. A observação de um padrão de escoamento específico depende da variação das vazões dos fluidos envolvidos, características de transporte, pressões internas da tubulação, natureza dos fluidos etc. Técnicas de separação das fases, monitoramento com redes neurais, medições com raios-X ou gama, entre outras, são bastante utilizadas na detecção desses padrões ou para determinação das frações de fluido in situ. Esta é uma medida local, mas pode ser adquirida em vários trechos ao longo da tubulação visando estabelecer um valor global para a mesma. As técnicas existentes muitas vezes são de aplicação complexa, de alto custo ou requerem

cuidados especiais em sua manipulação. Todos esses fatores demonstram a necessidade de um dispositivo adequado para efetuar tais medidas, que seja viável economicamente, de fácil implementação e que garanta certa confiabilidade da medida feita.



Figura 1.1. Padrões de Escoamento Bifásico

Considerando que a maioria das reservas nacionais é de óleo pesado com alto grau de viscosidade, algumas técnicas de medidas precisas, e de certo modo simples, são um campo de pesquisa ainda pouco explorado historicamente. Dependendo de certas condições de exploração, as reservas podem se tornar inviáveis, do ponto de vista econômico, por apresentarem elevado custo de produção. Algumas alternativas de bombeamento vêm sendo desenvolvidas e testadas para reduzir o gasto de energia na exploração de campos com tais características. Bannwart *et al.* (2004) caracterizaram os tipos de padrões e levantaram mapas de escoamento para verificar em que condições é possível garantir a estabilidade dinâmica dos modelos existentes. O trabalho aponta para uma possível solução, pois induzindo um tipo de padrão de escoamento conhecido como anular (*core-flow*) é possível reduzir o consumo de energia com aumento significativo da produção de óleo pesado. Para garantir a estabilidade deste padrão é necessária uma monitoração contínua do processo, pois a interrupção deste

arranjo espacial torna a produção e o transporte menos eficiente do ponto de vista econômico. Fica claro, portanto, que se conseguimos medir as frações dos fluidos nas tubulações com precisão e rapidez, será mais fácil à detecção e o controle de qualquer tipo de padrão de escoamento.

O foco principal desse trabalho concentra-se em atender as dificuldades na detecção das frações de líquidos e gás em padrões de escoamento diversos, que se desenvolvem em tubulações, utilizando água, ar e óleo de forma combinada numa mesma linha de teste. Além disso, visa auxiliar a instrumentação multifásica no que diz respeito ao monitoramento e detecção de padrões que possam surgir na prática em linhas de produção e transporte de fluidos. Através da medição capacitiva, pretende-se explorar mais intimamente as leis que regem este princípio de medida, visando, de forma prospectiva, preencher uma lacuna existente no mercado, de um dispositivo que associe uma medição confiável, baixo custo e de fácil aplicação.

Dispositivos capacitivos podem resolver variados tipos de problemas de medida. Esses dispositivos podem vir ou não integrados em placas de circuito impresso ou em *microchips* e podem ser utilizados para medições de nível, em sensores de proximidade, microfones, entre outros. Um capacitor é constituído basicamente pelo arranjo de duas chapas de material condutor, onde devido à passagem de corrente elétrica ocorre o fenômeno transferência de carga de um condutor para o outro causando o desequilíbrio entre as mesmas. Essa transferência gera um campo elétrico com intensidade proporcional ao meio dielétrico que esse atravessa. A quantidade de carga por sua vez depende da diferença de potencial estabelecida entre as placas e da geometria do capacitor. Logo, capacitância é uma relação existente entre a tensão e a carga elétrica.

O princípio de medida capacitiva baseia-se na variação da permissividade elétrica do meio que separa suas placas. Este é um procedimento relativamente difundido para medir frações volumétricas *in situ* em escoamento bifásico líquido-líquido, líquido-gás e líquido-sólido. A técnica é interessante por ser de fácil construção, resistente do ponto de vista construtivo, à umidade e temperatura, sendo capaz de realizar medidas sem interferência direta no escoamento (não intrusivo). Algumas geometrias são comumente utilizadas, porém partindo de informações já existentes na literatura optamos preferencialmente por aquelas que apresentam melhores resultados independentemente dos padrões de escoamento que possam surgir.

Abouelwafa e Kendall (1980), Stott et al. (1985), Kendoush (1995) e Jaworek et al. (2003), apresentam esta técnica de forma a atender condições específicas ou apenas para estudar um único regime de escoamento. Nosso estudo visa construir, calibrar o sensor e efetuar medidas de fração volumétrica *in situ* em escoamentos bifásicos tipo água-ar, óleo-ar e óleo-água e trifásicos do tipo água-óleo-ar, qualquer que seja seu regime de escoamento. É importante esclarecer que para este tipo de procedimento foi possível detectar o padrão de escoamento na tubulação através de visualização e determinar as quantidades parciais de fluidos *in situ* (frações volumétricas) para qualquer condição, líquido-líquido e líquido-líquido-gás.

No segundo capítulo desta dissertação será apresentada uma revisão sintetizada da literatura, dando especial atenção aos trabalhos desenvolvidos mais recentemente e também aos mais clássicos. Descreveremos no terceiro capítulo toda instalação e equipamentos utilizados. Alguns deles assessoram o funcionamento do sistema de testes e foram projetados em caráter inicialmente experimental. Será dada atenção especial também à instrumentação comercial, justificando a sua utilização.

No quarto capítulo, iniciaremos tratando da metodologia experimental adotada, seguindo com a aferição de todos os instrumentos de medida que auxiliaram na validação do sensor capacitivo e a calibração estática realizada. Alguns equacionamentos pertinentes ao problema proposto serão abordados também nesta seção de forma preliminar. As técnicas utilizadas para aferição dos medidores, quando disponíveis, seguem instruções dadas em normas técnicas.

Os resultados alcançados serão apresentados no quinto capítulo de forma a estabelecer os erros sistemáticos ocorridos, técnicas utilizadas para tratamento dos resultados e limitações inerentes dos instrumentos de medida. Neste capítulo também, uma abordagem estatística é utilizada para melhor creditar a confiabilidade dos resultados. Finalmente, no sexto e ultimo capitulo será dado um parecer conclusivo sobre a técnica proposta, apontando para eventuais caminhos que possam ser seguidos em futuras pesquisas.

Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Apresentaremos neste capítulo uma revisão da bibliografia pesquisada a respeito do tema. Os artigos utilizados no levantamento bibliográfico foram retirados de revistas ou periódicos especializados, com a preocupação de contemplar principalmente o que há de mais recente em termos de pesquisa na área. Alguns dados bibliográficos estão mais direcionados para o estudo da natureza dos padrões de escoamento, outros propriamente com determinação da fração volumétrica através de técnicas capacitivas. A maior parte do material encontrado na literatura faz referência a escoamento do tipo gás-líquido ou gás-sólidos, havendo escassas referências às condições de escoamento com dois líquidos. Isso torna a nossa proposta de estudo, envolvendo mistura bifásica (líquido-líquido) e trifásica (líquido-líquido-gás) mais interessante do ponto de vista prospectivo.

2.1 Capacitância

Antes, porém alguns termos básicos para determinação da capacitância serão definidos. O modelo proposto serve para dar uma idéia de como se comporta a capacitância entre as placas de dois elétrodos planos. A Figura 2.1 mostra o esquema mais tradicional de um capacitor de placas paralelas planas. Este modelo elementar serve para demonstrar como algumas grandezas de natureza elétrica se comportam. Além disso, neste tipo de capacitor podemos verificar como as linhas de campo se apresentam e os efeitos causados pelas bordas das placas.

Algumas grandezas serão de interesse particular, tidas como a própria capacitância, a permissividade elétrica, tensão elétrica, campo elétrico, densidade de carga, etc. A seguir definimos cada uma delas:



Figura 2.1.Linhas de Campo num Capacitor de Placas Planas.

- Permissividade elétrica (ε) propriedade que um meio fluido qualquer tem de facilitar a passagem de cargas elétricas;
- Carga elétrica (q) desequilíbrio elétrico existente devido ao excesso ou falta de partículas carregadas negativamente que um corpo apresenta;
- Tensão elétrica (V) diferença de potencial elétrico (carga) estabelecido entre dois pontos distintos;
- Capacitância (*C*) razão entre a quantidade de carga (*q*) e a tensão elétrica (*V*);
- Campo elétrico (E) força exercida por uma carga elétrica puntiforme devido à interação eletrostática com outras cargas puntiformes;
- Densidade de carga (σ) razão entre a carga elétrica (q) e o volume onde ela está distribuída.

Partindo das grandezas definidas anteriormente podemos equacionar alguns termos como mostramos a seguir.

Considerando um campo elétrico uniforme contido no modelo de capacitor mostrado na Figura 2.1, a densidade de carga pode ser obtida pela Equação 2.1. Onde (q) é a quantidade de carga e (A) a área das placas.

O campo elétrico (*E*) e a tensão elétrica (*V*) podem ser obtidos pelas Equações 2.2 e 2.3 respectivamente, lembrando apenas que a grandeza (ε_0) é a permissividade obtida no vácuo.

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (2.1)$$
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$
$$V = \int E dl = E l \quad (2.3)$$

Desta forma a tensão pode também ser redefinida como mostra a Equação 2.4. Esta simplificação pode ser admitida, pois neste caso consideramos que a área das placas é muito maior que a distância entre elas. Esta consideração foi feita para poder desprezar os efeitos de borda existentes no modelo.

$$V = \frac{q.l}{A.\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

Para obtermos a capacitância no vácuo deste modelo basta dividir carga (*q*) pela Equação 2.4 e rearranjar, conforme segue na Equação 2.5.

$$C = \frac{A.\varepsilon_0}{l} \quad (2.5)$$

Com base na Equação 2.5 é possível visualizar que a permissividade é função linear da capacitância. Logo, se o meio é o responsável pela alteração da permissividade, descobrindo

sua capacitância é possível relacioná-la com o fluido que está presente entre duas placas de um capacitor.

Heerens (1986) fez uma revisão pertinente do assunto mostrando claramente os conceitos envolvidos, tipos de geometrias possíveis de serem projetadas, transdução do sinal e finalmente tratamento adequado dos efeitos indesejáveis nas medições capacitivas. Ele se fundamentou basicamente pela definição de capacitância dada por Maxwell em 1873. Mais tarde, Ellison *et al.* (1996) elaboraram um amplo estudo para determinar qual o melhor valor que pode ser admitido para a permissividade da água dentro uma faixa considerável de temperatura. O objetivo deles era montar uma base de dados e associá-la a um programa computacional. Conceitualmente, é comum representar a permissividade como função da temperatura. Em nosso caso, porém, a variação desta propriedade não foi admitida, pois as condições de medida estão limitadas a uma pequena faixa de temperatura.

2.2 Fração volumétrica

A medida de fração volumétrica é apenas uma relação entre o volume ocupado localmente por uma fase e o volume total da seção conforme mostra a Equação 2.6 e a Figura 2.2 a seguir.

$$\alpha_{a} = \frac{V_{a}}{V_{a} + V_{b}} = \frac{Q_{a}}{Q_{a} + Q_{b}} = \frac{Q_{a}}{Q} \quad (2.6)$$

A relação entre o volume ocupado e a vazão volumétrica mostrados acima na Equação 2.6 é válida apenas para o escoamento homogêneo, ou seja, quando não há deslizamento entre as fases. A fração volumétrica *in situ* ou *holdup* da fase é considerada muitas vezes como uma

grandeza local, isto é, num comprimento diferencial de tubo, portanto a Equação 2.6 serve apenas para determinar o *holdup* do fluido " α " em questão dentro de condições restritas.



onde:

- α_a fração volumétrica da substância "a";
- V_a volume da substância "a";
- V_b volume da substância "b";
- Q_a vazão volumétrica local da substância "a";
- Q_b vazão volumétrica local da substância "b".

Quando o deslizamento entre as fases é significativo não é possível medir a fração volumétrica *in situ* através da Equação 2.6, i.e., através das vazões de injeção, sendo necessária uma medida local média no tempo e no espaço (Hetsroni, 1982). Numa situação de escoamento em regime permanente e quando efeitos de borda podem ser desprezados, válvula de fechamento rápido tem sido largamente utilizada para o aprisionamento dos fluidos e medida da fração volumétrica *in situ* (Oddie *et al.*, 2003).

2.3 Padrões de escoamento

2.3.1 Padrões de escoamento água e óleo em tubulações levemente inclinadas.

A dinâmica do escoamento água e óleo têm muitos fatores que também influenciam sua configuração. Um importante parâmetro de projeto é o gradiente de pressão ao longo da tubulação, que depende do padrão de escoamento. Apenas poucos estudos envolvendo tubulações ligeiramente inclinadas (\pm 5°) são encontrados na literatura sobre o assunto. Alkaya et al. (2000), construíram uma tubulação para teste com duas polegadas de diâmetro em acrílico e simularam vários padrões de escoamento para testar seu comportamento.

Em misturas de água e óleo não há um número considerável de estudos de caráter elucidativo, como acontece em escoamentos com mistura de ar e água, por exemplo. Neste caso, há uma grande quantidade de informações referentes aos padrões de escoamento e queda de pressão. Alguns resultados significativos do ponto de vista mecanicista têm sido apresentados para os escoamentos gás-líquido, mas esta aplicação não pode ser frequentemente estendida para um sistema água e óleo.

Historicamente pouco foi feito com o objetivo de se obter experimentalmente dados que pudessem informar seguramente o padrão de escoamento e a perda de pressão num escoamento contendo água e óleo. Algumas tentativas de verificar as condições de inversão de fase num escoamento de água e óleo foram registradas até então. Segundo Alkaya et al. (2000) e Trallero (1997) há seis tipos de padrões básicos de escoamento que podem ser observados na prática em linhas horizontais contendo água-óleo. Os autores desenvolveram um novo modelo mecanicista baseado num escoamento de dois fluidos estratificado baseado na teoria da estabilidade linear. Para os padrões de escoamento dispersos realizaram um balanço de forças gravitacionais e de forças flutuantes turbulentas. Comparações feitas entre os modelos de Trallero (1997), dados próprios e de outros estudos, mostram que há uma boa concordância para escoamentos em linhas horizontais.

Inclinando uma tubulação contendo um escoamento de óleo e água, as força de equilíbrio, às quais os fluidos estão expostos, se modificam. A força da gravidade pode agora ser separada em suas componentes (normal e paralela ao eixo da tubulação). A componente normal da gravidade promove a segregação do fluido, semelhante para os casos de linhas horizontais. A componente axial por sua vez num fluxo ascendente faz com que a fase mais densa desacelere, enquanto que o contrário acontece num fluxo descente.

No estudo proposto por Alkaya et al. (2000) é relatado um experimento no qual foram utilizados dados de várias condições de escoamento, com vários ângulos de inclinação $(0, \pm 5, \pm 1, \pm 2, \pm 0;5)$, usando água e óleo mineral para identificar os efeitos da temperatura e da inclinação nos limites que dividem cada padrão de escoamento. Diferentes pesquisadores definiram vários padrões de escoamento envolvendo água e óleo. A seguir apresentamos a classificação proposta originalmente por Trallero (1995) e reapresentada por Alkaya et al (2000) nas Figuras 2.3 a 2.8.

As mesmas nomenclaturas são utilizadas nos vários estudos relacionados. Algumas condições devem ser observadas, tais como temperatura (35° C com <u>+</u> 12° C de tolerância) e a pressão de aproximadamente 20 psig.

LILITII	 LTLL	(The second sec	
		H	R
		H.	H
 	 	North Contraction	/

Figura 2.3.Escoamento Estratificado – ST (Alkaya et al., 2000)

personal contraction of the cont	P
<u> 2 40 9 40 00 00 0 00 0 000 000000000000</u>	(A DE COP

Figura 2.4.Escoamento Estratificado com Mistura na Interface – ST & MI (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.5.Dispersão de Óleo em Água Juntamente com uma Camada de Água bem Definida – Do/w & w (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.6.Emulsão de Óleo em Água – Do/w (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.7.Dispersão de Água em Óleo e de Óleo em Água – Dw/o & Do/w (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.8.Emulsão de Água em Óleo – Dw/o (Alkaya et al., 2000)

Quanto ao efeito da inclinação, mapas dos padrões foram obtidos para inclinações de 1°. Os resultados são apresentados em fluxo ascendente e descendente nas Figura s 2.9 e 2.10. Da mesma forma, as Figuras 2.11 e 2.12 mostram os resultados para inclinação de +/- 5°.

Quando analisamos o mapa do circuito ascendente, podemos observar que a região de escoamento estratificado encolhe com o aumento velocidade superficial do óleo. A inclinação não afeta o padrão de escoamento na região de transição para dispersão. A fronteira entre o escoamento estratificado (ST) e estratificado com mistura na interface (ST & MI) aumenta com o ângulo de inclinação. Quando o fluxo é inclinado descendentemente e comparado com o escoamento horizontal observa-se uma expansão da região de escoamento estratificado (ST), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquanto que a região onde há escoamento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquento estratificado com mistura na interface (ST & C), enquento estratificado com mistor estratificado estratificado estratificado estratificado estratificado estratificado estratificado estratificado estrato estratificado estratificado estratificado es

MI) encolhe em termos da velocidade superficial do óleo, mas não em termos da velocidade superficial da água.



Figura 2.9.Padrão de Escoamento com Inclinação Ascendente de 1º (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.10.Padrão de Escoamento com Inclinação Descendente de 1º (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.11.Padrão de Escoamento com Inclinação Ascendente de 5º (Alkaya et al., 2000)



Figura 2.12.Padrão de Escoamento com Inclinação Descendente de 5º (Alkaya et al., 2000)

Também neste caso (inclinação 1°) o escoamento com dispersão não muda. Com 5° de inclinação à região entre o escoamento estratificado com mistura na interface (ST & MI), e o estratificado (ST) desaparece. Para escoamento com baixa taxa de vazão e inclinação de 5°, observou-se que no circuito ascendente há principalmente água e no trecho descendente há

principalmente óleo. As ondas na interface também são bastante diferentes, tanto no trecho de subida quanto no de descida. O escoamento estratificado no sentido ascendente possuía ondas mais suaves com pequenas amplitudes, enquanto que no sentido descendente as amplitudes das ondas se tornaram maiores.

2.3.2 Estudo do escoamento bifásico e trifásico em tubulações inclinadas de grande diâmetro.

Uma modelagem precisa da formação dos padrões de escoamento é essencial para representar o comportamento dos reservatórios de petróleo. Simuladores que modelam o escoamento e o transporte de óleo, água e gás de reservatórios são normalmente aplicados com essa finalidade. Dentro do simulador é importante representar o acoplamento do reservatório com a tubulação de produção ou poço. Esta é uma modelagem bastante complicada por causa dos efeitos de entrada, que podem causar um impacto do reservatório dentro do tubo de produção. Em casos de longos trechos horizontais, o efeito do gradiente de pressão pode ser muito significativo, podendo causar prejuízos como perda de produção a longas distâncias. Pesquisas na área de escoamentos multifásicos têm sido bem difundidas, porém ainda há uma carência de estudos em linhas inclinadas e com diâmetros grandes.

As características dos escoamentos de óleo e água são diferentes de sistemas com uma mistura de gás e líquido. Num escoamento com óleo e água, a previsão da formação de emulsões necessita de um cálculo próprio para viscosidade da emulsão e para inversão de fase. Este fator causa um aumento ou diminuição súbita da perda de pressão e da viscosidade, tornando o problema mais complexo. No caso de escoamentos trifásicos, cada padrão é geralmente extremamente complicado, e os modelos de *wellbore* existentes atualmente não

são validos. Não há dados disponíveis na literatura que caracterizem o escoamento trifásico em tubulações inclinadas com grandes diâmetros.

Na indústria de petróleo, os escoamentos trifásicos são tratados freqüentemente como um tipo de escoamento líquido-gás simplesmente. Contudo, as condições sobre as quais isso acontece não são perfeitamente estabelecidas. Medições experimentais são necessárias para elucidar e expandir os modelos trifásicos existentes, melhorando assim a modelagem para esses sistemas em tubulações de grande diâmetro e inclinadas.

O trabalho proposto por Oddie et al. (2003) tenta complementar algumas lacunas existentes na pesquisa dos padrões de escoamento em linhas de grandes diâmetros. Sua pesquisa encontrou vários resultados para os padrões de escoamento em estado permanente. Comparando seu trabalho com resultados obtidos em condições similares, mas em tubulações de diâmetro pequeno, observa-se uma concordância razoável. Este trabalho, porém, busca a determinação de um modelo mais preciso para certas condições de escoamento. A Figura 1.13 ilustra a linha de teste experimental de seu trabalho.



Figura 2.13.Linha de Teste com Bypass (Oddie et al., 2003)

No esquema mostrado anteriormente na Figura 2.13, as válvulas de fechamento rápido da seção de teste encontram-se totalmente abertas durante o escoamento. Quando acionamos seu fechamento, há o redirecionamento do escoamento para a linha auxiliar de *bypass*. A seção de teste tem um comprimento total de 10,9 metros e diâmetro interno de 15,2 centímetros. Além destes equipamentos, alguns dispositivos para medir pressão, temperatura, inclinação, *holdup* de água (densímetro por raios gama), ar e óleo foram instalados na tubulação. Os testes foram executados para oito inclinações diferentes, a partir da vertical (92°, 90°, 88°, 80°, 70°, 45°, 5° e 0°), utilizando mistura bifásica de água e óleo ou água e nitrogênio e trifásica com água, óleo e nitrogênio. A Tabela 2.1 mostra a tabela de testes.

			Vazão de Água (m³/h)								
			2	10	40	100	130				
Água e Gás (112 TESTES)	70	5	OK	OK	OK	ОК					
	Água e Gás p (112 TESTES)	²azão de Gás (m³/h)	20	OK	OK	OK	OK	\ge			
			50	OK	OK	OK		\geq			
	F	100	OK	OK	OK		\geq				
Óleo e Água (72 TESTES)	Óleo	2	OK	OK			\geq				
	ão de ((m³/h)	ão de ((m ³ /h)	ão de ((m ³ /h)	ão de ((m³/h)	10	OK	OK	OK	OK	ОК	
	Vaz	40			OK	OK	\geq				
Óleo, Água e Gás (168 TESTES))leo	2	OK	OK	OK		5	Vaz			
	io de ((m ³ /h)	10	OK	OK			10	ão de (m³/h)			
	Vazî	40	OK	OK			50	Gás)			

Tabela 2.1. Teste Experimental (Oddie et al., 2003)

Os resultados dos testes mostram que alguns padrões de escoamento apresentam características diferentes quando estudados em linhas inclinadas com grande diâmetro. Porém, alguns autores argumentam que o escoamento trifásico pode ser modelado como um

escoamento bifásico, ainda que as propriedades físicas das fases líquidas sejam diferentes. Para isso, a condição de não deslizamento entre as fases líquidas deve ser adotada.

2.4 Técnicas de medida e calibração

2.4.1 Técnica de medidas para escoamento multifásico.

Algumas técnicas disponíveis obtêm a massa individual de cada uma das fases através da velocidade do escoamento. A dificuldade de efetuar este tipo de medida está ligada à ampla variação de arranjos que podemos encontrar dentro de uma tubulação. A maioria dos problemas na detecção das frações de fluido é função do grande número de parâmetros que caracterizam a dinâmica do escoamento. Segundo Rajan et al. (1993) é possível projetar e desenvolver um medidor que sirva para determinar as quantidades de fluido submetido a um único regime de escoamento, entretanto num escoamento multifásico é possível encontrar variados tipos de padrões. As técnicas de medição multifásica à disponíveis atualmente, podem ser categorizadas basicamente de duas formas: Intrusivos e não intrusivos, os modelos intrusivos são aqueles que exercem uma possível influência direta no escoamento, enquanto que os não intrusivos não afetam a dinâmica do escoamento. Neste caso, o modelo capacitivo encontra-se numa condição de destaque, pois apresenta alta sensibilidade, pode operar com diversos tipos de fluidos, não necessita de cuidados especiais durante a operação e tem um custo reduzido. Apenas alguns cuidados devem ser adotados na montagem do sensor, pois para evitar efeitos de capacitância parasita, inerente de cabos e conexões elétricas, devemos manter o mesmo isolado eletricamente através de uma blindagem e acoplado-lo a um circuito transdutor.

Numa tubulação relativamente extensa, o que teremos afinal é uma medida local das frações de fluido. Um mapeamento detalhado da distribuição axial da fração volumétrica pode ser obtido através da medição em vários trechos diferentes ao longo da mesma linha. Para o caso do escoamento em regime permanente, onde podemos desprezar efeitos de borda, o valor global do sinal medido deve girar em torno de um valor médio. Esta regra serve apenas para alguns padrões estáveis dinamicamente (anular, bolhas, estratificado, etc). Em padrões intermitentes, como o pistonado, um tratamento adequado deve ser adotado a fim de estabelecer esta média.

Zuber e Findlay (1965) propuseram um método para determinação da fração de fase num modelo contendo dois fluidos. Em seu modelo, além da distribuição espacial das fases, o deslocamento relativo entre as mesmas é considerado. Seus resultados mostraram como se comportam o perfil de velocidades, o transporte de propriedades termodinâmicas das fases, os efeitos causados pela geometria do tubo e os efeitos causados pelas condições de operação na média volumétrica das fases. Recentemente, Seleghim e Milioli (2001), com um estudo voltado para o escoamento com bolhas, utilizaram um sensor intrusivo para tentar determinar o tamanho médio das bolhas. Neste estudo, o sinal de resposta do medidor se comporta de forma similar a uma onda quadrada, que pode ser reconstruída de forma a obter o valor médio das frações devidas à passagem do pistão. Seleghim e Milioli (2001) utilizaram uma técnica de reconstrução utilizando a freqüência instantânea, através da transformada de Hilbert, para identificar a passagem das bolhas. A Figura 2.14 mostra como o sinal de resposta é reconstruído.

O gráfico apresentado na Figura 2.14a é exatamente a resposta filtrada obtida do medidor de fase. Na Figura 2.14b está representada a amplitude instantânea e na Figura 2.14c a freqüência instantânea do sinal já reconstruído. Para chegar a este resultado Seleghim e Milioli estabeleceram uma freqüência de corte que foi determinada através de um estudo probabilístico do sinal de resposta do sensor. Portanto este estudo só deve ser válido para um teste submetido às mesmas condições de medida.



Reis (2003), com seu estudo voltado para padrões pistonados, utilizou uma análise mais simples para verificar as frações de líquido com seu medidor de fase capacitivo. Sua técnica consiste em determinar o comprimento do pistão através do tempo de passagem do mesmo e sua velocidade. Desta forma é possível estabelecer um nível de corte do sinal que permita verificar com certa precisão a quantidade de pistões num intervalo de tempo qualquer. Para tanto é preciso obter um sinal relativamente bem definido, ou seja, o pistão deve ter seu contorno muito bem determinado. O sinal neste caso será reconstruído e empiricamente se estabelece um nível de corte que deve ser único para todas as condições de escoamento. A Figura 2.15 mostra a montagem feita para um sensor de placas côncavas que foi utilizado para este fim.

2.4.2 Perfil de velocidade num escoamento pistonado utilizando um sensor não intrusivo.

Reis e Goldstein (2005) realizaram um teste em regime pistonado utilizando sensores capacitivos para determinar o perfil da bolha durante a passagem do pistão e a velocidade média do mesmo.

Podemos observar na Figura 2.15 que são utilizados em seu modelo dois eletrodos sensores, sendo que num deles é registrado o comprimento e o perfil do pistão ou a camada de líquido e no seguinte registra-se o tempo de passagem do mesmo.



(Reis e Goldstein, 2005)

O terceiro eletrodo mostrado na Figura 2.15 serve basicamente para evitar distorções do campo elétrico próximo a sua extremidade. Reis e Goldstein (2005) calibraram este sistema utilizando um micrômetro com escala variando de 25 a 50 milímetros com precisão de 0,01
milímetros. Neste caso uma correlação geométrica a partir da medida da altura do líquido em repouso foi feita para determinar a fração de vazio. Os autores observaram que para uma altura de líquido muito pequena, havia uma mudança no comportamento linear da medida que foi também confirmada através de sua simulação utilizando métodos de elemento finitos. Uma possível solução é indicada em Reis (2003), pois tal fenômeno esta relacionado à geometria do sensor, que pode ser melhorada se a largura do sensor for aumentada.

Reis e Goldstein (2005) propuseram em outro trabalho ajustar também o efeito causado pela mudança de temperatura no sinal do sensor. Neste caso eles utilizaram um sensor de hélices para determinar a fração volumétrica de ar. O que se sabe é que uma variação de 10° C de temperatura pode variar a resposta deste tipo de medidor em até 4% devido à alteração que a permissividade do líquido sofre. Na etapa de calibração a fração volumétrica é uma função da tensão de saída. Se considerarmos V_o como a tensão de saída e T_o a temperatura no momento da medida, quando a temperatura variar, a resposta em termos de tensão se altera, portanto, é necessário um método que corrija V em V_o . A função de calibração mostrada na Equação 2.7, pode apresentar valores distintos de fração de vazio, pois para condições diferentes de temperatura os valores registrados de tensão serão alterados. Os valores T_o e V_o são a temperatura de referência e a tensão de saída respectivamente.

$$\alpha(T_{o}) = f(V_{o})$$
 (2.7)

Se o circuito transdutor for ajustado para liberar uma tensão (*V*) qualquer para uma determinada condição de escoamento, é necessário garantir que nenhuma mudança de temperatura significativa seja registrada. Yang et al. (1994) e Reis (2003), observaram que a resposta do circuito transdutor de capacitância tinha uma correlação linear com a tensão. A

mesma dependência linear pode ser observada entre a capacitância e a permissividade dielétrica, logo a Equação 2.8 é sugerida:

$$\varepsilon_l(T) = A.exp(B.T)$$
 (2.8)

A expressão ilustrada na Equação 2.8 pode ser utilizada para a temperatura da água variando de zero a 100° C. O coeficiente *A* da Equação 2.8 foi obtido experimentalmente variando a temperatura 23° até 45° C. Reis e Goldstein (2005) sugerem que algumas dificuldades de aplicação do método descrito estão relacionadas à necessidade de um método interativo para a solução do problema. Porém, como o relacionamento entre a fração volumétrica e a tensão é quase sempre linear, um método de solução direta pode ser utilizado. Reis e Goldstein (2005) sugerem que a expressão mostrada na Equação 2.9 pode ser utilizada para obter diretamente o valor de V_o .

$$V_o = \frac{V - \pm [(1 - b_o)][\varepsilon(T) - \varepsilon(T_o)]}{1 - \pm b_1[\varepsilon(T) - \varepsilon(T_o)]} \quad (2.9)$$

*V*_o – *Tensão de Referência quando a Temperatura for igual a T*_o;

- V Tensão Registrada;
- *T_o Temperatura de Referência;*
- T Temperatura Registrada do Escoamento;
- *α Fração Volumétrica;*
- b_0 Coeficiente Polinomial de Ordem Zero;
- *b*₁ *Coeficiente Polinomial de Primeira Ordem;*
- ε Permissividade do Meio.

2.4.3 Calibração capacitiva para medição da fração de vazio em escoamentos bifásicos.

Duarte e Prata (2002) apresentaram uma metodologia utilizada na calibração de sensores aplicados à medição de fração de vazio num escoamento bifásico. A geometria adotada é determinante para que o medidor apresente imunidade ao regime de escoamento e uma boa linearidade. Quatro técnicas de calibração são apresentadas em seu trabalho, de forma que, dependendo de sua característica, sua utilização pode ser limitada. Quando é possível a construção de um *bypass* em um trecho de tubulação, a utilização de válvulas de fechamento rápido possibilita o aprisionamento dos fluidos que escoam na tubulação. Esta técnica, segundo Duarte e Prata (2002), para ser aplicada verticalmente necessita de uma separação rápida dos fluidos e funciona bem em tubulações horizontais se o efeito gravitacional for um agente separador eficiente. Outra limitação esta relacionada ao diâmetro da tubulação utilizada para os testes, visto que em casos de pequenos diâmetros o fechamento não muito instantâneo pode acarretar distúrbios no escoamento. Esta técnica normalmente esta associada a tubulações transparentes com uma escala graduada acoplada na tubulação para identificação do nível do fluido.

Outro método analisado por Duarte e Prata (2002) é a utilização de sensor ultra-sônico para determinar a fração de vazio. A vantagem neste caso esta relacionada com o fato de não ser necessária à utilização de tubos transparentes. Estes sensores são normalmente portáteis o que facilita sua utilização em locais distintos.

Uma técnica pouco utilizada, mas bastante interessante, é a utilização de moldes que simulam os diversos regimes de escoamento para calibrar os sensores. A única preocupação neste caso é utilizar materiais que tenham características dielétricas semelhantes às do fluido que escoa na linha de teste. Qualquer que seja o método utilizado para realizar as calibrações

estáticas, segundo Duarte e Prata (2002), devemos sempre estar atentos aos efeitos aleatórios e sistemáticos que podem emergir sobre os resultados finais. Ma et al. (1991) encontraram uma diferença de até 20% entre as calibrações estáticas e dinâmicas. A não linearidade normalmente esta presente quando há a variação do regime de escoamento. Nesse caso, o sensor capacitivo pode responder de forma diferente se o padrão de escoamento for modificado. Esta é uma característica que esta diretamente ligada à distribuição uniforme do campo elétrico formado. O mesmo pode privilegiar certas regiões da tubulação proporcionando erros relacionados à distribuição espacial das fases.

2.5 Sensores capacitivos

2.5.1 Transdutor eletrônico industrial para medir baixos valores de capacitância.

Neste trabalho, devido à natureza da própria pesquisa, uma revisão apropriada deve ser feita em busca de soluções de medidores para aplicação industrial. Huang et al. (1988) utilizaram métodos de medição capacitiva para uma escala variando de 0,1 a 10pF. Modelos utilizando ressonância, osciladores, carga e descarga e alguns tipos de pontes elétricas foram pesquisados para atingir o grau de precisão desejado. Buscou-se também com esse estudo, a minimização dos efeitos de borda do sensor atenuando os ruídos sem causar prejuízo na resolução do sinal. O método utilizando a ressonância, é capaz de medir dentro uma vasta gama de freqüência não só o sinal de um sensor capacitivo, como também as capacitâncias parasitas que a ele estão associadas. Este método segundo Huang et al. (1998) é mais apropriado para medidas das propriedades dielétricas dos materiais feitas em laboratórios.

O método utilizando oscilação LC ou RC, por outro lado, depende muito da natureza da capacitância que será medida. Este é o método mais popularmente utilizado, porém é

influenciado por desvios da condutividade. O circuito com um oscilador RC é mais indicado em medidas onde é necessária uma resolução melhor que 0,01pF. No caso do circuito LC há a possibilidade do ajuste de freqüência, mas um medidor utilizando este tipo de circuito sofre influência forte, devido ao efeito de perda do sinal capacitivo que este insere na medida.

O método de carga e descarga funciona carregando o circuito com uma capacitância desconhecida através de um interruptor, e em seguida descarregando-o e medindo sua carga. Esta operação é feita a certa freqüência que é controlada por um contador de tempo. Medindo a tensão de saída e conhecendo a resistência do mesmo, após a descarga, é possível saber como se relaciona o sinal de entrada e de saída. Este modelo tem muitas vantagens, tais como redução dos efeitos causados pela variação de freqüência, tensão de entrada e resistência. A carga do circuito é normalmente amplificada sendo que sua saída depende apenas da diferença de potencial elétrico. Finalmente a medida da capacitância quase não é afetada pelos componentes instalados em paralelo ao circuito. Entretanto este modelo é limitado, pois melhorando sua estabilidade haverá uma perda relacionada às variações de capacitância do circuito.

O circuito com pontes é muito utilizado em medidores convencionais. Pode se apresentar de diversas formas como mostra a Figura 2.16. a seguir. Este método é reconhecidamente a forma mais precisa de se registrar a variação de capacitância, onde o desequilíbrio da ponte se relaciona diretamente com o valor medido. Desta forma o equilíbrio é atingido quando Z_x se iguala a Z_r no caso dos circuitos a, b e c ilustrados a seguir. Baxter (1997) indica que para os tipos de ponte formadas por capacitores, a natureza física dos mesmos, deve ser idêntica a fim de evitar interferência externa de temperatura e da umidade. Contudo deve-se se buscar o modelo mais adequado para o tipo de medida que se deseja realizar.



Figura 2.16.Modelos de Circuitos com Pontes Elétricas (Huang et al. 1988)

O trabalho publicado por Beck et al. (1990), avaliou a aplicação do método capacitivo num conversor pneumático com pequenas partículas sólidas. Em seu trabalho o relacionamento existente entre o número de partículas e a resposta do sensor se comporta de forma linear, porém neste caso as dimensões médias dos sólidos variaram 1 milímetro até 100 milímetros. Os sólidos observados no teste experimental são partículas de PVC e a concentração deles variou de 0,05% a 0,3% dentro do conversor. Desta forma ficou clara a possibilidade de medida capacitiva voltada para detecção de sólidos em condições inferiores a 0,3% de concentração sendo que a resposta do sensor independe da velocidade das mesmas.

Marioli et al. (1991) e Marioli et al. (1992), mais tarde desenvolveram um circuito capaz de medir pequenas variações de capacitância, utilizando um conversor de corrente tensão, dois medidores de fase, e um filtro passa baixa. O filtro passa baixa é ajustado para uma freqüência de corte, de tal forma que qualquer valor acima deste limite é descartado. A proposta de seu trabalho esta voltada para medir valores com resolução da ordem de fentofarad. Tais medidas devem ser isentas de ruído e os efeitos de capacitâncias parasitas não devem interferir no sinal lido. Para evitar esses efeitos um circuito transdutor adequado deve ser utilizado de forma a ajustar a voltagem ou a corrente. Como a capacitância varia com o meio ambiente, algumas configurações de circuitos não são interessantes já que a resistência do meio é imposta pelo material que o permeia. O seu modelo opera a uma freqüência alta de 10 MHz com sensibilidade aproximada de 3,3 mV/fF, adequada para medir variações de capacitância de até 15 pF. O sinal de corrente que entra no circuito é convertido em tensão e os sinais de capacitância são obtidos por dois detectores de fase com sinais de referência deslocados de 90°. Os sinais passam por um filtro passa baixa com freqüência de corte de 10 Hz e retornam realimentando o circuito. O circuito proposto por Marioli *et al.* (1992) mede as variações dinâmicas mencionadas e permite superar problemas devidos à variação do meio ambiente.

2.5.2 Fração volumétrica através do método de ressonância por radio freqüência.

Algumas técnicas para medição de escoamentos bifásicos *in situ* do tipo gás-líquido utilizam modelos geométricos conhecidos de sensor, que são normalmente montados em volta de um material com características dielétricas. A finalidade desta montagem é contornar dificuldades na determinação da fração de gás e líquido existentes nas linhas.

O procedimento adotado por Jaworek e Krupa (2004) utiliza medidas de ressonância em radio freqüência (RF) para determinar a razão de gás ou líquido existente. O sensor utilizado está conectado a um circuito com um oscilador de referência ajustado para a freqüência de 80 MHz. Neste caso, a variação da capacitância entre as placas do sensor altera a freqüência do oscilador e desta forma o sinal medido pode ser relacionado com a fração de líquido ou gás. Em seu modelo foi necessário o ajuste da freqüência de referência para superar a baixa resistividade do líquido utilizado.

Cinco montagens diferentes foram testadas antes de calibrar experimentalmente seu sensor. A seguir (Figura 2.17) temos os detalhes construtivos de cada sensor que foi utilizado por Jaworek e Krupa (2004).

- Elétrodos de placas cilíndricas com altura de 50 mm e espaçamento de 5 mm entre eles (Figura 2.17a);
- Dois pares de elétrodos em tiras com mesma altura (Figura 2.17b);
- Três pares de elétrodos em tiras com mesma altura (Figura 2.17c);
- Dois anéis de elétrodos de 10 mm de largura posicionados na tubulação espaçados 2 mm um do outro (Figura 2.17d);
- Elétrodos de dupla hélice feitos com tiras de 5 mm envolta na tubulação numa altura total de 50 mm (Figura 2.17e).



Figura 2.17.Configuração dos Elétrodos (Jaworek e Krupa, 2004)

As variações relativas de capacitância para as linhas completamente cheias de água e completamente vazias foram determinadas para cada uma das configurações a uma baixa freqüência (1kHz) utilizando um circuito oscilador em ponte. Em seu experimento, Jaworek e

Krupa (2004), após o ajuste da freqüência de referência no oscilador, conectaram o sensor de placas côncavas no circuito e mediram as variações de freqüência. A partir das medidas feitas com seu circuito, Jaworek e Krupa (2004) observaram que o sensor de placas côncavas (Figura 2.17a) é o mais sensível, pois com este tipo se consegue a maior variação de freqüência do circuito. Nos tipos de múltiplas tiras cilíndricas o efeito da variação da freqüência é menor se comparado ao primeiro tipo. Os elétrodos de anéis duplos possuem menor variação no valor da capacitância e menor sensibilidade devido a pouca intensidade do campo elétrico que se concentra principalmente no espaçamento entre os elétrodos. O sensor com elétrodos de dupla hélice, apesar de sua capacitância ser a maior, a variação da freqüência se mostrou menor que o tipo com placas.

Neste experimento o diâmetro interno e externo utilizado foram de 32 milímetros, e 40 milímetros, respectivamente. As medidas de capacitância dos sensores foram quase locais, pois a determinação do percentual das fases não se restringe à secção transversal da tubulação e sim dentro de certo volume.

Duas medidas foram executadas com o sensor de placas côncavas, num escoamento com bolhas injetadas na parte de baixo e num escoamento anular, simulado com uma fina parede de vidro (PMMA)¹ colocada entre os fluidos, conforme mostrado na Figura 2.18.

Os resultados das medições para os padrões de escoamento com bolhas e anular (Figura 2.18) são mostrados nas Figuras 2.19 e 2.20 respectivamente.

¹PMMA é a sigla para polimetilmetacrilato material da tubulação colocada concentricamente a tubulação de vidro no experimento citado.



Figura 2.18. Medição dos Padrões de Escoamento (Jaworek e Krupa, 2004)



Figura 2.19. Variação de Freqüência Relativa vs. Percentual de Bolhas de Gás (Jaworek e Krupa, 2004)

A quantidade média de gás dentro da linha foi medida considerando o nível de água encontrado dentro do cilindro onde foram montados os eletrodos. Um período longo de integração na medida da freqüência é necessário no escoamento do tipo bolhas, visando obter um valor médio do percentual de gás. O gráfico da Figura 2.19 mostra o período de integração de 1 segundo. Observe que para uma baixa concentração de gás (fração de vazio) a curva pode ser aproximada por uma linha reta como mostra a Figura 2.19.

O escoamento anular, mostrado na Figura 2.18, foi utilizado para simular uma situação com maior concentração de gás na linha. O gráfico da Figura 2.20 mostra bem o seu

comportamento. Nele podemos verificar que os desvios de freqüência não se comportam linearmente em relação ao percentual de gás na linha. A freqüência do sistema utilizado variou entre 80 MHz, com a linha vazia, e 76 MHz com a linha completamente cheia de água. Na Figura 2.20 a curva teórica foi determinada a partir da Equação 2.10 mostrada a seguir. As capacitâncias não puderam ser exatamente determinadas devido à complexa geometria descrita pelos campos compreendidos entre os elétrodos. A diferença observada entre os dados experimentais e teóricos pode ter sido causada pela perda de capacitância e certamente pelo efeito da condutância da água nos desvios de freqüência, que são difíceis de estimar.



Figura 2.20.Freqüência Relativa vs. Fração de Vazio (Jaworek e Krupa, 2004)

$$\frac{\Delta f}{f_{max} - f_o} = \frac{f_g - f}{f_g - f_l} \qquad (2.10)$$

- f_g freqüência com a tubulação cheia de gás;
- f_l freqüência com a tubulação cheia de líquido;
- f-freqüência do circuito ressonante.

A curva teórica descrita pela linha continua na Figura 2.20 foi obtida através da Equação 2.10, levantada para uma altura de elétrodos igual a 20 milímetros. A constante dielétrica da tubulação foi assumida como sendo ε_g =3,5.

Os efeitos de excentricidade da linha de vidro sobre a variação de freqüência também foram testados. Neste caso os desvios registrados foram menores que 0,2%, quando a tubulação de vidro foi fechada. A Figura 2.21 mostra como a tubulação interna de PMMA foi deslocada para medir este efeito.



Figura 2.21.Freqüência Relativa vs. Excentricidade em Milímetros (Jaworek e Krupa, 2004)

Os sensores são muito sensíveis mesmo para bolhas pequenas. Os desvios de freqüência podem ser medidos com uma precisão de 10⁻⁵ ou mais. A precisão do método de medida é limitada pela variação nas propriedades do líquido, principalmente permissividade, quando o líquido muda de temperatura. A freqüência relativa muda devido à variação de permissividade que pode ser estimada a partir da Equação 2.10. Uma mudança de mais ou menos 2% na freqüência é acarretada quando a temperatura muda em torno de 10° C. Para este tipo de procedimento o sensor deve ser recalibrado na temperatura de operação.

2.5.3 Sensor capacitivo para a medida fração de vazio em escoamentos com água e vapor.

Esta técnica foi posteriormente proposta por Jaworek *et al.* (2004) para executar medidas capacitivas de fração de vazio (fração volumétrica de gás) no bocal de injeção de vapor de uma turbina.

O principio de medição utiliza o mesmo circuito elétrico descrito anteriormente no item 2.5.2. A medida da fração de vazio é quase local, ou seja, sua determinação compreende uma seção transversal de tubo de comprimento igual ao dos eletrodos do sensor. Os limites do volume medido não podem ser precisamente determinados devido a efeitos de borda dos elétrodos. Desta forma para minimizar estes efeitos seriam necessários construir sensores com elétrodos tão pequenos quanto possível, isto acarretaria, porém, numa perda de sensibilidade do instrumento.

Para obter uma elevada sensibilidade na medida em alguns casos a técnica utilizada é a instalação de fios paralelos dentro da tubulação. Os fios esticados têm sua condutividade afetada pelo deslocamento do fluido, sendo esta perturbação medida para obtenção da fração volumétrica. Este princípio de medida é mais eficiente em padrões de escoamento do tipo pistonado e com bolhas. O método apresenta algumas desvantagens, como a interferência do fio na mudança do padrão de escoamento e a possibilidade do mesmo, dependendo de sua posição, não transpassar inteiramente uma bolha de gás que escoa.

Técnicas de medições capacitivas não intrusivas são mais recomendáveis. Sua montagem consiste na instalação de elétrodos nas paredes da tubulação, os quais registrarão valores de

capacitância dentro de uma escala determinada 0,1 a 10pF, por exemplo. O sinal que será captado é proporcional à fração volumétrica e pode depender também do padrão de escoamento. Porém este tipo de medida não informa qual o padrão de escoamento que se desenvolve dentro da tubulação. As medidas de capacitância de um sensor capacitivo completamente cheio de líquido condutor, como a água, são dificultadas por causa da resistência equivalente do líquido que normalmente é baixa. Sendo assim, se a fase contínua da mistura for liquida e tiver essas características, a mesma estará conectada em paralelo com o capacitor. Para baixas freqüências devido a pouca resistência haverá um curto circuito no capacitor. Para eliminar este efeito Jaworek *et al.* (2004) efetuou suas medidas com seu circuito ajustado a uma alta freqüência.

O sensor deve ser protegido com uma blindagem especial para minimizar distorções devido a objetos externos e campos eletromagnéticos. As dimensões da proteção devem ser tão grandes quanto possível a fim minimizar a dispersão da capacitância e interferência de ruídos. O circuito a seguir, Figura 2.22, ilustra teoricamente como se comporta o modelo de referência que foi alvo do estudo de Jaworek *et al.* (2004).



Figura 2.22. Circuito Capacitivo Padrão (Jaworek et al., 2004)

- *C_e Capacitância de referência;*
- $2C_w$ Capacitância parasitas;
- R_{eq} Resistência equivalente do líquido (desprezível);
- C_c Perda capacitiva inerente do circuito (desprezível).

Desta forma obtemos à capacitância equivalente pela Equação 2.11.

$$C = \frac{C_e C_w}{C_e + C_w} \qquad (2.11)$$

A variação da capacitância causada pela mudança de percentual da fase são medidas pelo método de freqüência, onde os elétrodos são conectados como um capacitor no circuito ressonante LC operando como um circuito oscilador de radio freqüência (*RF*). O oscilador RF é muito sensível à variação de capacitância, causando desvios de freqüência.

É importante salientar que a capacitância C_e esta diretamente ligada à permissividade relativa (ε) do meio compreendido entre os elétrodos, i.e., o efeito da permissividade ou constante dielétrica em um meio composto por duas substâncias imiscíveis dielétricas com propriedades elétricas diferentes.

A capacitância equivalente do fluido certamente pode ser representada como uma função da permissividade do meio (ε_e) como mostra a Equação 2.12.

$$C_e = C_{eq} f(\varepsilon)$$
 (2.12)

ε – Permissividade relativa do meio;

 C_{eq} – Capacitância equivalente quando $\alpha = 1$ (tubulação sem água dentro).

A freqüência angular de ressonância do oscilador (ω) é dada pela Equação 2.13.

$$\omega^2 = \frac{l}{LC} \quad \textbf{(2.13)}$$

L – *Indutância do circuito ressonante;*

C – Capacitância total do circuito.

Dentre os modelos mencionados anteriormente somente o com placas paralelas resulta em valores satisfatórios, enquanto que ajustes feitos pela aproximação da permissividade resultam em valores totalmente inconsistentes. Para valores pequenos de alfa ($\alpha \leq 0,2$), a capacitância para vazio com bolhas esféricas e vazio com bolhas cilíndricas dá resultados similares ao da curva obtida em função da fração de vazio. Neste caso, porém, faremos à aproximação da permissividade através da Equação 2.14.

$$\varepsilon_e = \alpha_g \varepsilon_g + \alpha_L \varepsilon_L \quad (2.14)$$

 $\alpha_g e \alpha^2 - Fração de gás e líquido na mistura, respectivamente;$

- ε_g Permissividade do gás na mistura;
- ε_L Permissividade do líquido na mistura.

Logo a capacitância equivalente é dada pela Equação 2.15.

² A soma das frações alfa deve ser igual a 1 (um).

$$C_e = C_e \left(\alpha_g + \varepsilon_l \left(l - \alpha_g \right) \right)$$
 (2.15)

A fração volumétrica (α) é dada pela razão entre a área transversal do vazio (superfície ocupada pelo vapor) e a área da secção transversal da tubulação. As características do sensor foram definidas para medir a resposta em freqüência do oscilador para diferentes porcentagens de vazio. Este tipo de sensor capacitivo foi usado para medir a fração volumétrica numa secção transversal selecionada de um injetor de vapor supercrítico. O injetor de vapor usa a energia cinética do vapor para succionar a água e é composto por um difusor, uma câmara de mistura e um bocal de vapor. Sensores foram colocados antes e após do orifício onde passa o vapor (*throat*) entrando água e vapor e saindo somente água após o bocal conforme mostra a Figura 2.23.

Em oito pontos entre a câmara de mistura e o difusor foram medidas as frações volumétricas existentes entre a água e o vapor, este cuidado foi tomado, pois com a mudança de temperatura da água muda também suas propriedades (condutividade e permissividade). Os desvios de freqüência foram medidos por um sistema processador, e convertido em um sinal digital que foi armazenado e processado por um computador. Este programa originalmente foi feito para medir e controlar dados de processo.

O modelo capacitivo não se comporta de forma linear para altas frações de gás, e a calibração é necessária para determinação da relação entre os desvios de freqüência e da fração de vácuo. Os desvios de freqüência foram determinados pela comparação continua da freqüência gerada com a freqüência de referência.



Figura 2.23.Esquema de um Experimento para Investigar um Injetor de Vapor Super Crítico. (Jaworek e Krupa, 2004)

2.5.4 Medição da concentração de água utilizando um único elétrodo capacitivo.

Schüller *et al.* (2004), desenvolveram um novo método de medir concentração de água num escoamento disperso. Este método chamado de SeCaP³ funciona trabalhando com um oscilador a aproximadamente 20 MHz.

Tradicionalmente, medidas de capacitância são executadas utilizando um par de elétrodos, porém neste experimento Schüller *et al.*(2004) desenvolveram uma técnica que utiliza somente um eletrodo para medir a fração volumétrica em uma dispersão de água e óleo. Em seu modelo, com um único elétrodo, o curto circuito causado pela presença continua de água é atenuado. Os resultados apresentados são referentes a medições feitas de conteúdo de água em materiais sólidos, ou de dispersão de água e óleo. A técnica esta baseada na medida da

³ Single Electrode Capacitance Probe

capacitância utilizando o efeito de constante dielétrica com o auxilio da freqüência de um oscilador.

A sigla mencionada (SeCaP – single electrode capacitance probe) indica a utilização de um componente que utiliza somente um eletrodo ativo exposto ao volume que será medido. A Figura 2.24 mostra o circuito oscilador básico utilizado.



Figura 2.24.SeCaP – Circuito Oscilador (Schüller et al., 2004)

O oscilador opera a uma freqüência de aproximadamente 20 MHz e o fluido na vizinhança do capacitor causa efeitos de oscilação na freqüência do circuito. Esta variação na freqüência está relacionada à mudança equivalente na permissividade elétrica da mistura. Se houver uma quantidade de gás presente nas adjacências do capacitor, nenhuma alteração da freqüência será observada, enquanto que se houver água pura a redução e bastante significativa.

A freqüência do oscilador (ω) depende da indutância da bobina do oscilador do circuito (L) e da capacitância média localizada próxima ao eletrodo (C). Assim temos a seguinte relação mostrada na Equação 2.16.

$$\omega \propto \frac{l}{\sqrt{LC}}$$
 (2.16)

A mudança da capacitância média fora do elétrodo esta relacionada à mudança da freqüência de operação do oscilador. Como vemos na Equação 2.17.

$$\Delta C_m \alpha \frac{l}{\Delta \omega^2 L} \quad (2.17)$$

A capacitância esta relacionada à permissividade elétrica (ɛ) conforme a Equação 2.18.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot A}{l} \quad (2.18)$$

 ε_0 – Permissividade Dielétrica no Vácuo;

- ε Permissividade Dielétrica do Meio;
- A Área da Placa do Capacitor;
- *l* Distância entre as Placas do Capacitor.

Desta forma estabelecemos a relação de proporcionalidade existente entre a capacitância e a permissividade dielétrica. A capacitância nas proximidades do elétrodo (*C*) inclui todas as capacitâncias que influenciam ou contribuem para mudança da freqüência (componentes do circuito, impedância média, etc.). O valor da capacitância (*C*) representa um valor médio que foi calculado. O comprimento do elétrodo é muito pequeno se comparado ao comprimento de onda do oscilador. Logo, a impedância do elétrodo é muito alta. A escala de medida do

capacitor depende da área do elétrodo, da espessura do material (cerâmica) e de sua forma. Medidas de aproximadamente 50 pF foram obtidas com este instrumento, chegando a 22 pF com ar e aproximadamente 27 pF com água.

Este sistema foi inicialmente utilizado para determinar o nível de líquido em separadores, montando uma série de elétrodos em uma sonda vertical. Um sensor transversal também foi testado, e os resultados do sinal da sonda são correlacionados com a concentração da água na amostra de teste. Com um único eletrodo transversal foi possível detectar até mesmo ondas, do padrão de escoamento pistonado, e condições transientes na linha de fluxo. As sondas foram testadas em condições diferentes de concentração de água e o valor do sinal se mostrou basicamente linear. Conseqüentemente, com apenas dois pontos, se torna possível encontrar o valor da concentração da mistura. A vantagem em utilizar um único elétrodo é que neste caso não haverá curto circuito quando houver escoamento contínuo de água. Sua escala abrange medidas contendo de 0% até 100% de água e cada leitura é feita apenas por um único eletrodo. A Figura 2.25 mostra a vista transversal do instrumento de medida utilizado (WCM – Water Cut Meter).

O material cerâmico serve para isolar eletricamente, além de possuir uma propriedade hidrofóbica, que permite que o óleo molhe melhor sua superfície. O teste executado com este dispositivo foi realizado primeiramente com 100% de óleo aumentando gradativamente a quantidade de água na mistura.

Em seguida, adotou-se o mesmo procedimento, utilizando inicialmente somente água. A Figura 2.26 mostra o gráfico com alguns resultados preliminares



Figura 2.25.Vista da Secção Transversal do Medidor (Schüller et al., 2004)



Figura 2.26.Resultados Obtidos Aumentando e Diminuindo a Concentração de Água (Schüller et al. – 2004)

O gráfico da Figura 2.26 mostra uma clara correlação entre o sinal do medidor e a quantidade de água presente até o aumento de aproximadamente 70%. A partir deste ponto há uma inversão de fase, pois a emulsão não é mais estável devido à alta viscosidade do óleo. Mesmo assim as medidas deste instrumento mantêm registro satisfatório. O grande problema para este dispositivo esta na limitação dos padrões de escoamento em que pode ser aplicado.

2.5.5 Sistema capacitivo para detecção de um escoamento bifásico pistonado.

Quando um gás escoa sobre a superfície de um líquido com alta velocidade relativa, numa tubulação horizontal ou quase horizontal, surgem instabilidades hidrodinâmicas na interface entre o gás e o líquido. Neste caso ondas com grandes amplitudes podem ser formadas, e se as amplitudes dessas ondas forem grandes o bastante, elas podem eventualmente formar bolhas de gás separadas por tampões de líquido. A formação do escoamento pistonado, em escoamentos bifásicos é amplamente investigada e vários trabalhos com essa diretriz aparecem na literatura. Para muitos desses estudos, porém, a propagação da velocidade, caracterização do tamanho da onda e a freqüência dos pistões são parâmetros chaves, ainda requeridos.

Muitas técnicas têm sido desenvolvidas para medir as quantidades de líquido e gás numa mistura bifásica, ou seja, determinando uma média local das frações de fluido. Tais técnicas são baseadas principalmente na determinação das diferenças entre as propriedades físicas das fases. Aparentemente, em sua maioria as técnicas disponíveis não caracterizam satisfatoriamente padrões de escoamento do tipo Pistonado.

Capacitores com fitas helicoidais têm sido propostos por Alboulewala e Kendall (1980) e algumas condições são recomendáveis para a utilização deste tipo de dispositivo. A utilização de fontes com altas freqüências de excitação pode introduzir instabilidade, tornando o sistema muito sensível à perda de capacitância e efeitos de proximidade.

Na maioria das técnicas os elétrodos são presos em uma secção de teste da tubulação o que dificulta sua calibração, já que isto limita sua mobilidade para outros locais depois de

instalados. Então, a meta principal do trabalho de Teyssedou and Tye (1999), consistiu em desenvolver uma técnica de medida de filme do líquido que satisfizesse as seguintes exigências:

- Deixar uma espessura considerável de filme de líquido ou gás, quando a linha estiver completamente cheia de água;
- Ter uma resposta de tempo rápida para verificar mudanças repentinas na propagação das ondas;
- Permitir que o padrão de escoamento esteja localizado em qualquer lugar ao longo da secção de teste;
- 4. Obter uma resposta linear para fração de vazio até 70%;
- 5. Não ser sensível à estrutura da seção de teste (blindagem).

Para atender estas exigências, um modelo com elétrodos de placas côncavas foi desenvolvido a fim de determinar a fração de vazio. Segundo a Equação 2.18, que relaciona a capacitância com a área das placas, distância entre elas, permissividade do meio e permissividade no vácuo, é possível verificar sua linearidade. Sendo assim, para uma mistura de ar e água, por exemplo, haverá considerável diferença entre suas permissividades, sendo possível assim utilizar um capacitor para medir a fração de vazio. O principal inconveniente deste tipo de sensor é que ele requer uma escala de medida para os valores de capacitância muito pequenos. Além disso, o campo elétrico gerado entre os eletrodos é facilmente afetado pela presença das estruturas em sua vizinhança, causando interferência nas medidas. Na Figura 2.27 mostramos um esquema simplificado deste tipo de aparato⁴.

⁴ A sigla LPF (Low Pass Filter) indica a presença de um filtro passa baixa.



Figura 2.27.Esquema Simplificado para Teste (Teyssedoua e Tye 1999)

Uma revisão das diferentes técnicas utilizadas para medir capacitância foi feita por Huang (1988). A técnica de oscilação LC é bem apropriada, pois permite a realização de medidas de fração de vazio em escoamento bifásico com alta sensibilidade. Para tanto é necessária a utilização de um oscilador de alta freqüência bem estável, pois o aumento da freqüência contribui para também aumentar as perdas capacitivas. Teyssedou e Tye (1999) propuseram um circuito diferente buscando melhorar a sensibilidade e diminuir o efeito de perda capacitiva. A técnica ponte resistiva capacitiva em T utiliza também uma filtragem passa baixa e um instrumento amplificador. As principais vantagens deste modelo são:

- 1. Sensibilidade relativamente alta;
- 2. O capacitor tem um lado aterrado;
- 3. A saída não é sensível à variação da freqüência da fonte;
- 4. Suporta alta taxa de ruído.

A Figura 2.28 mostra em detalhes como se compõe o circuito.



Figura 2.28.Ponte Resistiva Capacitiva (Teyssedoua e Tye 1999)

- *E_i Tensão de Excitação;*
- E₀ Tensão de Saída;
- $D_1 e D_2 Diodos;$
- C_0 Capacitor Conhecido;
- C_x Capacitor de Medida;
- R_L Carga do Dispositivo Medidor;
- $R_1 e R_2 Resistências.$

A ponte mostrada anteriormente é acoplada a um circuito para detecção do padrão bifásico pistonado. Este gera uma freqüência estável de 1 MHz através de um oscilador senoidal. Para evitar qualquer efeito de carregamento e obter a impedância correta, o oscilador deve ser acoplado ao circuito da Figura 2.28 através de um amplificador diferencial de freqüência. Na saída do circuito ponte deve ser acoplado um filtro passa baixa completando o circuito com um amplificador de sinal.

Os elétrodos utilizados no experimento possuem uma espessura de 0,06 mm, feitos em alumínio. Embora fosse permitido movê-los ao longo da secção, o colar plástico foi cortado

em dois pedaços simétricos. Dessa forma, foi possível encontrar o arranjo adequado requerido sem afetar a capacidade de detecção da espessura do filme de líquido.



Para a configuração dos elétrodos mostrada na Figura 2.29, é possível notar que o próprio eletrodo faz a blindagem do dispositivo, agindo como uma gaiola de faraday. A capacitância da água pode ser calculada através da Equação 2.19.

$$C_w = \varepsilon_0 . \varepsilon . \delta . (\frac{\theta}{2})$$
 (2.19)

δ – Largura dos Elétrodos;

 θ – Ângulo formado entre o plano vertical simétrico e o ponto onde a superfície do líquido toca a parede.

Para uma melhor idéia de como determinar o ângulo teta (θ) a Figura 2.30 ilustra bem com é feita sua medida.



Figura 2.30.Relacionamento entre a Altura e a Área Ocupada pelo Líquido (Teyssedou e Tye, 1999)



Figura 2.31.Geometria dos Eletrodos (Teyssedou e Tye, 1999)

A capacitância que corresponde à porção do espaço preenchido pelo ar pode ser calculada usando a Equação 2.20.

$$C_{g} = \varepsilon_{0} \delta \frac{(\pi - \theta)}{2} \quad (2.20)$$

2.5.6. Sensores capacitivos para redução de erros nas medidas das concentrações de fases.

Hammer et al. (1989), em busca de um medidor adequado para determinação das frações de líquido, utilizaram um sensor de hélices. Eles detectaram que este tipo de medidor apresentava uma repetibilidade muito boa da medida e, inicialmente, testaram esta configuração usando um ângulo de rotação das hélices de 180°. Segundo eles, a modelagem teórica e os testes experimentais demonstram que este modelo de sensor é pouco dependente da variação do regime de escoamento, desta forma, a medida de fração volumétrica deve ser adquirida de maneira mais confiável. Eles testaram seu modelo inicial numa linha de produção de óleo pesado onde, segundo seus resultados preliminares, as superfícies helicoidais com 180° e 360° de giro são menos dependentes do padrão de escoamento.

Outras configurações geométricas de sensores já vêm sendo aplicadas em medições de fração de vazio. Sensores do tipo anéis e hélice são os que demonstram maior utilidade à este propósito, porém não devemos descartar a utilização do sensor tipo placas côncavas, pois este apesar de apresentar dependência do padrão de escoamento possui a melhor sensibilidade já testada. Mais recentemente, Tollefsen e Hammer (1998) elaboraram um estudo elucidativo, com a intenção de encontrar dimensões ideais que aperfeiçoassem e aumentassem a precisão das medidas desses sensores.

Este trabalho, como em outros, demonstrou que, apesar da boa sensibilidade, o sensor de placas côncavas possui uma dependência forte da distribuição espacial das fases, portanto testes com elétrodos a 0°, 90°, 180° e 360° foram executados em busca de melhores resultados. Tollefsen e Hammer (1998) mostraram ainda que a geometria dos sensores juntamente com parâmetros de projeto tais como comprimento do sensor, espessura do elétrodo, permissividade da camada isolante, distância entre os elétrodos, tipo de blindagem, etc., são parâmetros importantes para investigar as soluções analíticas das equações de Poisson que são

dadas tridimensionalmente. O método de elementos finitos foi utilizado para determinar a solução dessas equações, devido à complicada distribuição espacial de alguns padrões de escoamento. A Figura 2.32 mostra as dimensões utilizadas para teste dos sensores.



Figura 2.32.Características do Sensor de Teste (Tollefsen and Hommer, 1998)

Na Figura 2.33 podemos verificar que o ângulo das hélices é representado pela letra W e variou de zero a 360°. No teste realizado, a fração de vazio foi de aproximadamente 70% do volume total da seção contendo ar e glicerol, o ângulo entre os eletrodos utilizado foi de 60°, seu comprimento 25 cm e diâmetro interno de 82 mm. Os gráficos na figura a seguir (Figura 2.33) mostram como se comporta o cálculo de incerteza quando avaliamos os diferentes ângulos.

Tollefsen e Hammer (1998) concluíram que os sensores testados podem ser utilizados para determinar as frações volumétricas em misturas contendo dois fluidos com diferentes valores de permissividade relativa. Entretanto, a relação existente entre as frações dos componentes e a permissividade da mistura é altamente dependente da distribuição espacial das fases. Somente se a mistura analisada for homogênea é que é possível obter um resultado com alguma precisão. Os cálculos teóricos e práticos de seu experimento indicam que a dependência do regime pode ser reduzida se for utilizado um sensor de hélices com eletrodos dispostos a 180°. Este tipo de sensor consequentemente é mais robusto para variações no escoamento.



Figura 2.33.Cálculo de Incerteza (Tollefsen and Hammer, 1998)

Chun e Sung (1986) elaboram um estudo para avaliar os efeitos da geometria, tamanho e materiais dos eletrodos. O padrão de escoamento e a posição dos eletrodos em relação ao escoamento também foram observados. Eles verificaram ainda que os sensores de placas côncavas apresentam um sinal mais forte entre os modelos estudados, e que seu comprimento não exerce influencia sobre a sua curva de calibração. Seu posicionamento é importante do ponto de vista da distribuição espacial das fases, sendo que no caso de alguns tipos de padrões de escoamento nenhum efeito pode ser registrado. Quanto ao material para construção dos sensores, não há mudança significante para medida da fração de fluido.

Num trabalho mais recente Xie et al. (1990) utilizaram o método de elementos finitos para verificar a uniformidade do campo que se forma entre as placas côncavas de um sensor. Neste caso, os parâmetros que mais afetam a o desempenho do medidor estão relacionado com a blindagem utilizada, a permissividade do meio dielétrico, a espessura da parede do tubo e ao ângulo de montagem dos eletrodos. Dois tipos de padrões foram avaliados em seu trabalho (anular e estratificado). O regime estratificado foi analisado variando basicamente o posicionamento dos eletrodos de forma a obter cinco condições distintas. Ele conclui que o desempenho do sensor utilizado para medir um regime bifásico pode ser qualitativamente expresso por três parâmetros: uniformidade do campo elétrico formado pelos eletrodos, erro associado à linearidade da medida e variação máxima de capacitância devida à disposição geométrica dos fluidos (padrões de escoamento). Alguns destes estão diretamente relacionados com o comportamento não linear do campo eletrostático, sendo assim quanto menor os parâmetros ligados à variação do campo elétrico e ao erro relacionado à linearidade da medida menos dependente o instrumento será do regime de escoamento.

Mais tarde, Geraets e Borst (1998) utilizaram um sensor helicoidal para medir frações de vazio numa tubulação de acrílico com diferentes tipos de padrões de escoamento. Para cada um dos quatro tipos de regime testados, verifica-se na literatura que a configuração de hélices tem demonstrado melhores resultados, porém em regimes intermitentes de escoamento a resposta obtida sofre certa variação causando resultados imprecisos. Sua pesquisa avaliou também a influência exercida pela espessura da parede do material dielétrico, onde o sensor foi montado, tratando separadamente regiões transversais distintas ao longo do sensor. No padrão anular, Geraets e Borst (1998) detectaram que as linhas de campo preferencialmente atravessam a região do anel formado no escoamento, em detrimento da região central do tubo, porém o sensor tem um comportamento axial uniforme desde que sua blindagem seja eficiente o bastante para inibir os efeitos de borda. Neste caso quando um líquido com baixo valor de permissividade for utilizado, os resultados teóricos e experimentais das curvas de calibração são mais lineares e menos dependentes da espessura da parede do tubo dielétrico. Em todas as

condições de teste deve ser escolhida uma espessura ótima da parede do tubo e quanto mais uniforme for a distribuição das fases menor é a influência na medida da fração de vazio.

2.5.7 Sensor multi-elétrodos para detecção de fase em processos de separação.

Modelos específicos de sondas foram desenvolvidos com objetivos especiais de medida. Meng et al. (2006) validaram um tipo de sonda montada numa base cilíndrica, que utiliza o princípio capacitivo para auxiliar no processo monitoração da separação de misturas contendo água-óleo-gás.

A interface da mistura dentro de um dispositivo de separação é de difícil visualização. Portanto, uma técnica utilizando uma configuração segmentada de eletrodos é proposta em seu trabalho. Os eletrodos neste caso são embutidos numa estrutura de material dielétrico e envolvidos por uma lâmina que faz a blindagem do dispositivo. A Figura 2.34 mostra os dois tipos de montagem proposto por Meng et al. (2006).



Figura 2.34.Layout dos Eletrodos dentro das Placas de Circuito Impresso (Meng et al., 2006)

Como podemos ver na Figura 2.34, dois tipos de elétrodos foram usados, ambos para tentar determinar o nível de água num separador contendo água, óleo e gás. Neste procedimento a

interface entre os fluidos é limitada por uma camada de emulsão e espuma que dificulta a identificação visual.

No trabalho de Meng et al. uma análise tridimensional, baseada na técnica da teoria de elementos finitos, foi utilizada para tentar desvendar o comportamento do campo elétrico que se formava entre os elétrodos. A Equação 2.21 mostra a modelagem feita para uma abordagem deste tipo.

$$\nabla (\varepsilon_0 \varepsilon \nabla \varphi) = 0 \quad (2.21)$$

		Medida de Capacitância (pF)			
Elétrodos	Medidor A	Medidor B			
1	0,282634	0,282634	_		
2	0,283716	0,283716			
3	0,283821	0,283821			
4	0,286037	0,286037			
5	0,617917	0,617917			
6	0,620525	0,620525			
7	0,620412	0,620412			
8	0,620545	0,620545			
9	0,620111	0,620109			
10	0,630140	0,630138			
11	3,012792	3,012789			
12	2,970962	2,970959			
13	2,965267	2,965265			
14	2,963957	2,963956			
15	2,948383	2,948381			
16	2,779158	2,779157			

 Madida da Canasitância (mE)

Os termos ε_0 e ε se referem à permissividade elétrica no vácuo e permissividade relativa respectivamente, e φ caracteriza a distribuição do potencial elétrico. Tanto o potencial elétrico quanto a permissividade relativa são tratados tridimensionalmente neste modelo. Os resultados da Tabela 2.2 mostram como se comportam analiticamente os elétrodos do sensor. A interface dos líquidos para o modelo acima se encontram entre os elétrodos 4/5 e 10/11. Note que nestes pontos há um aumento significativo da capacitância registrada pelo medidor, sendo que na interface entre a água e o óleo ocorre uma variação maior da medida. Isto ocorre principalmente pela grande diferença existente entre as permissividades destes líquidos. Estes resultados obtiveram uma boa concordância com os valores experimentais e o comportamento do campo elétrico se mantém através da seção transversal praticamente constante se forem consideradas as médias.

Capítulo 3 – Descrição da Montagem Experimental

Nesta seção apresentaremos detalhadamente a descrição dos equipamentos, software e instalações utilizados. Alguns equipamentos foram desenvolvidos, comprados, projetados, calibrados e construídos durante a pesquisa outros foram aproveitados de uma estrutura de testes já existente no laboratório. Cada um deles será apresentado neste capítulo para poder melhor caracterizar as instalações de laboratório que foram utilizadas.

Os testes experimentais necessários foram executados na Universidade São Paulo, unidade localizada na cidade de São Carlos (EESC - USP). Os recursos físicos do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) do departamento de Engenharia Mecânica serviram de suporte para execução dos testes necessários a pesquisa.

O NETeF dispõe em suas instalações de três tubulações horizontais em acrílico com três diâmetros diferentes. O comprimento total das linhas é de 12 metros, projetadas para gerarem diversos tipos de padrões de escoamento do tipo gás-líquido, líquido-líquido ou gás-líquido-líquido. Além dessas tubulações em acrílico foi montada uma tubulação em vidro borossilicato que posteriormente será utilizada para escoamentos do tipo líquido-líquido e líquido-líquido-gás, contendo água, ar e óleo. Para realização dos testes outros equipamentos foram utilizados para monitorar e gerar os padrões de escoamento necessários. Dentre eles podemos citar:

- Separador de água e óleo com capacidade de 2200 litros;
- Estrutura para elevação da tubulação de teste;
- Instrumentação para medir inclinação da tubulação de teste;
- Dispositivos de segurança para calibração e controle dos instrumentos de medida (válvulas, pressostato, sensores, etc.);
- Linha adicional em vidro com diâmetro interno de 26 mm;
- Linha auxiliar de *by pass*;
- Válvulas solenóides para corte rápido de fluxo;
- Dimensionamento e instalação de uma bomba com cavidades progressivas para óleo e água;
- Instalação de termopares;
- Calibração dos medidores de vazão (placas de orifício).

A tubulação de teste foi projetada para gerar diversos padrões de escoamentos, com velocidades máximas de mistura ar-água da ordem de 11 m/s. A tubulação de vidro, com 26 milímetros de diâmetro interno, foi testada a uma pressão interna constante de 400 KPa. Água foi utilizada para os testes de escoamento a temperatura ambiente de aproximadamente 27° C. Os valores de densidade e viscosidade adotados são ρ_w =1000 Kg/m³ e μ_w =0,001 Pa.s respectivamente. O ar atmosférico foi utilizado para geração de padrões bifásicos com água e ar.

As linhas de teste tiveram que ser elevadas três metros acima do solo, pois na montagem anterior esta ficaria abaixo do nível do separador impedindo que o escoamento chegasse ao mesmo por gravidade. Com a elevação das linhas de teste se tornou possível realizar escoamentos ascendentes e descendentes numa inclinação máxima de 30° para ambos os casos. A Figura 3.1 mostra esquematicamente como funciona nossa instalação para teste dinâmico. A Tabela 3.1 serve como legenda do esquema de teste utilizado durante a calibração dinâmica dos instrumentos.



Figura 3.1.Instalação de Teste Dinâmico

Equipamentos e Instrumentos de Teste			
本	Válvula de Esfera	Ø	Pressostato
	Compressor de Ar	Ø	Termopar
	Bomba de Óleo	•	Medidor Diferencial de Pressão
	Bomba de Água	-8-	Placa de Orifício
AD	Válvula Solenóide	-	Sensor Capacitivo
A	Válvula Pneumática	MGL	Misturador de Gás-Líquido

Ainda, para a Figura 3.1, temos que:

- RO Reservatório de Óleo
- RW Reservatório de Água
- SGL Separador de Gás-Líquido
- SLL Separador de Líquido-Líquido
- RA Resfriador de Ar (Torre de Resfriamento)

Para uma melhor visualização do sistema, a Figura 3.2 mostra as instalações do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos (NETeF-EESC-USP).



Figura 3.2. Foto das Instalações do NETeF na Universidade São Paulo em São Carlos

3.1 Sistema de suprimento de ar

Um compressor Worthington de 60 CV centrífugo é responsável pelo suprimento de ar para o sistema, como mostra a Figura 3.3. Operando com uma velocidade de ate 40 m/s e pressão de saída de 700 KPa. O compressor alimenta um reservatório de ar que equaliza a variação de pressão do sistema, evitando assim variações de pressão inconvenientes para testes em regime permanente.



Figura 3.3.Compressor de Alimentação de Ar

O ar ao sair do compressor é refrigerado por três torres de resfriamento (Figura 3.4), seguindo por uma ramificação de três vias contendo uma válvula de controle pneumático em cada. Esse sistema de válvulas é responsável pelo controle pneumático da vazão de ar que chega às linhas de teste.



Figura 3.4. Torres de Resfriamento de Ar

O tanque acumulador mostrado na Figura 3.5 serve como "pulmão" do sistema, evitando uma eventual pulsação de ar, mantendo constante a pressão da linha.



Figura 3.5. Tanque Acumulador de Ar

Conforme pode ser visto na Figura 3.1, as linhas de ar possuem três ramificações com uma válvula de acionamento pneumático em cada uma delas. A principal função dessas válvulas é controlar a vazão de ar que sai para linha de teste. A quantidade de ar é medida através de medidores de vazão tipo placas de orifício, que estão localizados a jusante. As três ramificações possuem vazões nominais de 14 m³/h, 40 m³/h e 100 m³/h, sendo possível através delas o ajuste fino da vazão do ar que entra no sistema.

3.2 Sistema de suprimento de água

A água será bombeada por uma bomba centrífuga, modelo NDS10 (fabricante EBERLE) com 10 CV de potência, de um tanque de PVC, passando por uma tubulação em PVC até atingir a linha de teste em vidro. O sistema possui ainda um variador de freqüência de 7,5 kW para o controle da rotação da vazão de água e outro de 15 kW para o controle da vazão de óleo. A Figura 3.6 (a) e (b) mostra respectivamente os variadores de 7,5 kW e 15 kW. Estes controladores são acionados remotamente via sistema CAN que libera um sinal de corrente de 4 a 20 mA, utilizando um programa em plataforma LabView ®.



Figura 3.6. Variadores de Freqüência para Controle de Água e de Óleo

A água sai do tanque e segue para linha de teste depois a linha passa por um tanque para separação de gás e, então, entra no separador de líquidos. Por fim, entra novamente no tanque de PVC que esta ligado a seção de teste. A Figura 3.7 mostra a bomba centrífuga usada para a movimentação de água.

3.3 Sistema de suprimento de óleo

Uma moto bomba de cavidades progressivas modelo 2WHT 53/F, fabricante Weatherford com potência de 10 CV, foi instalada para o bombeamento de óleo (Figura 3.8). As bombas instaladas no sistema foram projetadas para atender uma perda máxima de pressão da ordem de 10 bar e uma vazão máxima de 12,6 m³/h, sempre trabalhando afogadas em relação aos seus respectivos reservatórios.



Figura 3.7.Bomba de Alimentação de Água



Figura 3.8.Bomba de Alimentação de Óleo

O sistema de suprimento de óleo é bastante semelhante ao de água e simetricamente colocado ao lado do mesmo. O óleo escolhido, do fabricante Shell, tem propriedades similares às do petróleo brasileiro (viscosidade 100 mPa.s e densidade 860 kg/m³). Essa característica se torna importante para a simulação do transporte de líquido numa situação real. O óleo segue um circuito fechado similar ao da água, retornando no final do processo para um tanque próprio de PVC. A Figura 3.9 mostra um dos tanques de armazenamento.



Figura 3.9. Tanque de PVC para Armazenamento

3.4 Separador de água e óleo

Um separador de água e óleo de placas coalescentes foi projetado para otimizar o funcionamento do sistema no que diz respeito à separação de líquidos. A capacidade do mesmo é de 2200 litros, onde metade do conteúdo será preenchido por água e o restante por óleo. O sistema de separação encontra-se posicionado de forma a garantir o fluxo transversal através das placas e suas dimensões foram especificadas para se encaixar no espaço físico disponível do laboratório. Testes com material oleofílico e hidrofílico foram realizados a fim de garantir o melhor desempenho possível do equipamento. Dessa forma, esperamos ter um equipamento que separe em linha a água do óleo e vice versa. O revestimento interno das placas foi feito com uma resina especial a base de poliéster para melhorar sua afinidade com a água e repulsão ao óleo em uma das faces. Fenômeno recíproco deve ocorrer na face oposta da mesma. O separador está dividindo em três câmaras; a primeira, na entrada, possui quatro chicanas para regularizar o escoamento da mistura antes deste chegar até as placas separadoras. Na segunda câmara, onde ocorre efetivamente a separação, encontram-se as placas corrugadas que realizam a separação dos fluidos. A terceira câmara serve apenas para

armazenar os volumes de água e óleo, que retornam por gravidade para os tanques de armazenamento. A Figura 3.10 mostra o separador de óleo que foi projetado.



Figura 3.10.Separador de Água e Óleo

Alguns parâmetros importantes foram considerados para a construção do separador de água e óleo, entre os quais destacamos a área superficial das placas, vazão de entrada do separador, densidades do óleo e da água, viscosidade do óleo, velocidade de subida das bolhas e inclinação das placas. Todos os aspectos utilizados para seu dimensionamento foram retirados da norma API-1581 (2003). A área das placas pôde ser determinada através da Equação 3.1.

$$A_{pl} = \eta \cdot \frac{Q_e}{U_r \cdot \cos\theta} \qquad (3.1)$$

- A_{pl} Área total de todas as placas;
- Q_e Vazão na entrada do separador;
- U_t Velocidade de subida das gotas;

$\theta - \hat{A}$ ngulo das placas;

η – *Coeficiente de segurança*.

A velocidade de ascensão das bolhas na mistura de óleo e água deve ser considerada para determinação da área das placas. O cálculo para obter tal grandeza é feito com base na lei de Stokes para escoamentos com o número de Reynolds muito baixo. Consideremos o comportamento de uma gota de óleo similar ao de uma esfera de raio (R) movendo-se através de um fluido com uma velocidade constante. Então, sobre esta gota existe uma força de resistência (F) exercida pelo fluido, cujo módulo depende da viscosidade (μ) do fluido, do raio (R) da gota e do módulo de sua velocidade (U_i). A única maneira pela qual estas grandezas podem ser combinadas para que o resultado tenha dimensão de força é fazendo o produto delas. Através da análise física deste problema, Stokes descobriu que o módulo da força de resistência do fluido sobre a esfera se escreve conforme mostramos na Equação 3.2.

$$F_a = 6.\pi . R.\mu . U_t \qquad (3.2)$$

Onde F_a é a força de arrasto viscoso exercido pelo fluido sobre o deslocamento da gota de óleo. Para uma esfera deslocando-se com velocidade terminal U_t , a equação de movimento da partícula reduz-se ao balanço entre forças de arrasto e empuxo:

$$6.\pi.R.\mu.U_{t} = \frac{4.\pi.R^{3}}{3}.[g.(\rho_{w} - \rho_{o})]$$

resultando na Equação (3.3):

$$U_{t} = \frac{g.(\rho_{w} - \rho_{o}).D^{2}}{18.\mu_{o}}$$
 (3.3)

onde:

g – Aceleração da gravidade;

 $\rho_w e \rho_o$ – Densidades da água e do óleo respectivamente;

 μ_o – Densidade do óleo;

D – Diâmetro médio das gotas de óleo;

a qual é aplicada na Equação (3.1).

A separação dos fluidos água e óleo acontece principalmente na câmara que contêm as placas de separação coalescentes. O princípio de separação consiste em facilitar a aglutinação (coalescência) das bolhas de água e óleo que se encontram misturadas numa dispersão homogênea, formando bolhas cada vez maiores e aumentando assim sua velocidade de ascensão ou descenso (Equação 3.3). Estas bolhas se separam naturalmente devido à diferença de densidade entre os fluidos. Na última câmara a mistura já estratificada em duas fases bem definidas, com o óleo sobre a água, é direcionada, cada fase movimentada para seu respectivo reservatório por duas saídas próprias; conforme mostra a Figura 3.11, a seguir.

3.5 Instrumentos de medida comercial

Alguns periféricos encontram-se instalados na estrutura montada para os testes dinâmicos (sensores de pressão diferencial, pressostato, medidores de vazão, válvulas solenóides, etc.), que servem para auxiliar o monitoramento do escoamento.

Os medidores de vazão de ar são do tipo placas de orifício. Estes geram um diferencial de pressão mensurável entre a placa e através dele pode-se estimar a vazão na seção, pela determinação da velocidade superficial.



Figura 3.11.Esquema do Separador de Água e Óleo

Este dispositivo oferece alta confiabilidade, porém agrega algumas desvantagens, como aumento da perda de carga, restrita faixa de medição (3x), desgaste dos componentes da placa, etc. A medida do diferencial de pressão é indicada num transmissor digital SMAR com pressão nominal 2300 psi com variação máxima de 12,5 a 500 milibar que, além de registrar, manda um sinal de 4 a 20 mA para uma estação de trabalho. Outro medidor similar foi utilizado na linha de 40 m³/h para a aferição da placa de orifício, com uma variação máxima de pressão de 1,25 a 50 milibar e pressão nominal máxima é de 1050 psi. Estes medidores medem a queda de pressão na placa, que serve como referência para regular a abertura das válvulas de passagem de ar. Na Figura 3.12 está indicado o local de instalação das placas de orifício de água e ar. Maiores detalhes sobre sua aferição serão dados no apêndice A e B desta dissertação.

2) Transdutores de Pressão

Alguns medidores de pressão foram instalados na linha de suprimento de ar e na tubulação de teste.



Figura 3.12. Medidores de Vazão

Os transdutores são do fabricante Danfoss, tem escala de 1 a 12 bar e servem para auxiliar principalmente na aferição das placas de orifício do ar. Na linha que sai do misturador de fluidos foi instalado, além de transdutores, um pressostato para garantir que a pressão da tubulação de teste não ultrapasse 200 KPa (Figura 3.13), sendo que para efeito de teste a mesma resistiu até 400 KPa. Os transdutores desta linha tem escala que varia de 0 a 1 bar. Ainda na mesma estrutura de teste encontra-se instalado um transdutor diferencial de pressão da Novus que serve para auxiliar na determinação da inclinação. Maiores detalhes sobre o mesmo serão dados posteriormente.

3) Controladores de Vazão de Ar

Três válvulas pneumáticas Valtek (Figura 3.14) controlam a injeção de ar no sistema, cada uma instalada em uma ramificação diferente de ar. O controle das válvulas é feito remotamente por uma estação de trabalho PXI-1042 (Figura 3.15) da *National Instruments*®, ou manualmente através de controladores da SMAR (AM01P). As três válvulas instaladas mandam um sinal padronizado de 4 a 20 mA para a placa de aquisição de sinais para o controle remoto. Elas têm diferentes valores nominais de vazão de ar (14, 40 e 100 m³/h) dependendo da ramificação.



Figura 3.13.Pressostato de Segurança



Figura 3.14. Válvula de Controle Pneumático da Vazão de Ar

Todos os dados coletados durante os testes dinâmicos chegam a uma placa de aquisição modelo SCB-100 da *National Instruments*®. A mesma tem uma velocidade de 200 KHz e uma resolução de medida de 4096 pontos ou 12 bits, podendo ser amplificada em até 50 vezes. Possui 24 portas digitais e 8 entradas diferenciais e 2 saídas analógicas. As portas digitais foram utilizadas somente para o acionamento das válvulas de corte rápido e as entradas diferenciais analógicas foram utilizadas para ligar toda instrumentação. Os atuadores que controlam as vazões de água, ar e óleo são acionados via sistema CAN de baixa freqüência.



Figura 3.15. Estação de Trabalho Remoto

3.6 Dispositivo de inclinação da tubulação

Para determinar a inclinação, alguns dispositivos tiveram que ser adaptados para executar medidas precisas e confiáveis. A medida da inclinação de nossa tubulação de testes foi feita utilizando um transdutor de pressão diferencial da Novus. Este instrumento nos garante uma precisão aproximada de 0,5°. Este medidor é capaz de medir inclinações de -30° a +30°, através do sinal de tensão enviado por um transdutor de pressão diferencial mostrado na Figura 3.16. A calibração foi feita com a ajuda de um medidor de nível de precisão Mitutoyo, colocado na linha de teste a partir da posição 0°. A partir do marco inicial zero da linha, registramos a cada grau de inclinação o valor de tensão, levantando assim uma curva de

calibração para o sensor. O mesmo funciona registrando a pressão diferencial entre as extremidades da linha de teste. Para isso, em seus pontos de tomada de pressão conectamos uma tubulação cheia de água, medindo a coluna de líquido e relacionando-a ao desnível da estrutura.



Figura 3.16. Medidor Diferencial de Pressão

Detalhes mais precisos sobre a calibração das válvulas, do sistema de aquisição de sinais e da calibração dos sensores serão abordados no capítulo 4 desta dissertação.

3.3.7 Tubulação de By Pass e Sistema de Aprisionamento de Fluido

Para executar a calibração dinâmica dos sensores capacitivos, um sistema de *by pass* foi construído. O *by pass* viabilizou a aplicação das válvulas de fechamento rápido. Estes testes serviram principalmente para comparar, avaliar e determinar a precisão de nossa medida de fração volumétrica. Na verdade, esse procedimento serviu principalmente para parametrizar as medidas de fundo de escala de nosso instrumento.

Durante a medição, nenhum líquido deveria penetrar na seção de teste, logo, um conjunto de válvulas de acionamento rápido foi montado no circuito. Estas válvulas devem ser

estanques, de acionamento rápido e garantir pouca influência no desenvolvimento do escoamento. A montagem de três sondas capacitivas ao longo do trecho de teste tem como objetivo a obtenção de valores de frações volumétricas *in situ* em posições distintas da tubulação. Desta forma podemos calcular uma média global se necessário ou avaliar o comprimento de desenvolvimento do escoamento bifásico.



Figura 3.17.By Pass de Segurança

A Figura 3.17 mostra o esquema montado para utilização do by *pass*. Num escoamento em regime permanente as válvulas solenóides número V1 e V2 encontram-se abertas permitindo a passagem livre de fluido pela seção de teste. Este aspecto é peculiar, pois garante certo nível de segurança ao circuito. A válvula na linha auxiliar de *by pass* (V3) deve manter-se totalmente fechada, impedindo o desvio de fluido. Para isso esta deve se manter energizada juntamente com a V2 que é normal fechada. Energizando V1 e desenergizando V2 e V3 simultaneamente fechamos a linha de teste e abrimos a passagem para o *by pass*, fazendo com que todo o escoamento se desloque pela válvula V3. Caso alguma falha ocorra na abertura das válvulas, uma sobre pressão será imposta à linha de suprimento. Este aumento de pressão aciona o pressostato mostrado na Figura 3.13. O mesmo está instalado na saída da tubulação do misturador e manda um sinal para o sistema de aquisição que desarma o funcionamento

das bombas. No momento da abertura da válvula solenóide V3 as válvulas V1 e V2 devem permanecer fechadas, evitando o retorno do fluido para linha principal.

•

Capítulo 4 – Trabalho Experimental

Neste capítulo apresentaremos a metodologia utilizada na calibração dos instrumentos de medida (sensores, transdutores, etc.) e suas respectivas limitações. Todos os medidores foram calibrados ou aferidos de forma confiável, mas não foi possível realizar algumas medidas por limitações existentes na própria faixa de medida da instrumentação.

4.1 Caracterização da Sonda Capacitiva

Como descrevemos no primeiro capítulo desta dissertação, o princípio de medida que envolve a determinação da fração volumétrica *in situ* está baseada na correlação existente entre a variação de capacitância e permissividade elétrica do fluido. Para encontrar valores estáveis de sinal que pudessem ser identificados, alguns estudos e testes foram executados até a determinação do modelo final de sensor e freqüência ideal para a excitação do circuito.

4.1.1 Determinação do Modelo Capacitivo

Os modelos ou configurações de sensores propostos neste trabalho foram publicados por Abuoelwafa e Kendall (1980). Eles tentaram avaliar as características individuais de várias configurações, identificando qual a melhor opção para medir fração de líquido com razoável sensibilidade. As características básicas necessárias para o nosso sensor devem ser atendidas para assim validar a técnica proposta neste trabalho. O instrumento deve ter uma boa sensibilidade, ser capaz de medir frações em escoamento líquido-gás e líquido-líquido-gás, ser relativamente imune ao padrão de escoamento, de fácil construção e não intrusivo ou invasivo. Para atender todas as exigências apresentadas, três tipos de configurações foram testados.

No primeiro modelo de sensor foram utilizados dois anéis de cobre numa tubulação de acrílico. Para o espaçamento dos anéis foi preservada a distância de um diâmetro, sendo que a mesma medida foi utilizada também na largura do mesmo. O segundo tipo de sensor foi construído na forma de duas hélices envolvendo a tubulação num ângulo total de 180°. Esta foi cortada em tiras na mesma largura de um diâmetro, seccionadas em forma de paralelogramo com ângulo interno de 60° e com altura de 78 milímetros, aproximadamente. Um terceiro tipo foi construído no formato placas côncavas, possuindo dimensões semelhantes aos dois primeiros, preservando um diâmetro em sua largura e quatro em seu comprimento. Os sensores do tipo dupla hélice, placas côncavas e anéis duplos foram avaliados em condições semelhantes, a fim de obter um resultado mais adequado para o problema de detecção da fração de fase. Os três tipos possuem características diferentes em termos de precisão e imunidade ao padrão de escoamento. As diferenças existentes entre os três modelos estudados estão relacionadas intrinsecamente com o campo elétrico que é formado em cada um deles. Para alcançar resultados melhores e confiáveis, optamos pela utilização de mais de uma configuração, fazendo testes de bancada ou estáticos com modelos bifásicos primeiramente. Na segunda etapa de testes, realizamos medidas trifásicas para poder avaliar e chegar a um modelo instrumental definitivo.

Iniciamos os testes estáticos numa bancada (Figura 4.1) com tubo completamente cheio com cada um dos fluidos (água, ar e óleo). Observamos que para estas condições de medida o posicionamento do sensor em relação ao plano horizontal não interfere na leitura registrada de capacitância, pois neste caso o fluido atravessa toda extensão do campo elétrico que se forma.

Após a coleta dos dados com tubo cheio, tentamos determinar em que faixas de freqüência melhor se comportam os três tipos de sensores propostos. Para definir as freqüências de excitação do sensor, determinamos os pontos onde a capacitância possuía menor dispersão de sinal. Nessas regiões é possível medir a resposta do sensor com mais clareza, evitando assim a interferência das faixas de freqüência de áudio ou ruído de qualquer outra natureza. Em seguida partimos para a calibração estática, primeiramente em tubulação de acrílico e posteriormente em tubulação de vidro. Finalmente, iniciamos a calibração dinâmica gerando alguns padrões de escoamento conforme permitiam nossas instalações. As etapas do trabalho de calibração serão descritas em detalhes mais adiante no decorrer desta dissertação.



Figura 4.1.Bancada de Teste Estático em Acrílico

A Figura 4.1 mostra a bancada de testes estáticos. Nesta bancada foi utilizada a tubulação confeccionada em acrílico com aproximadamente 300 milímetros de comprimento e diâmetro interno com 30 milímetros. O acrílico possui propriedades oleofílicas, o que dificultava a limpeza do tubo e retardava os testes. Com essa montagem experimental realizamos alguns testes estáticos e confirmamos que o sensor do tipo placas côncavas sofria interferência forte do arranjo espacial das fases. Como pretendemos gerar diversos regimes de escoamentos na tubulação de teste, apesar desse ser o modelo com maior sensibilidade, sua utilização foi descartada.

A bancada de teste apresentada a seguir (Figura 4.2) consiste de um tubo de vidro borossilicato com o comprimento de 1500 milímetros e 26 milímetros de diâmetro interno. O vidro borosilicato foi escolhido devido às suas propriedades oleofóbicas, o que facilitava a limpeza dos tubos. Foram montadas três bancadas de teste idênticas com um conjunto de dois sensores (anéis e hélices) em cada. Depois da construção e da calibração estática, esses trechos de tubulação foram distribuídos ao longo da linha de testes dinâmicos. Durante a montagem, tomamos o cuidado de preservar sempre uma distância aproximada de 20 diâmetros entre os dois sensores em cada trecho de tubulação. Esta distância foi determinada com o objetivo de evitar interferência entre os sinais gerados e entre os campos elétricos dos dois sensores.



Figura 4.2. Bancada de Testes em Vidro Borossilicato

4.1.2 Determinação das Freqüências

Para escolher a faixa de freqüência mais adequada para nosso sensor, um analisador de impedância *Agilent 4294A Precision* foi utilizado, conforme mostra a Figura 4.3 a seguir.

As primeiras medidas foram feitas numa escala crescente de freqüência com incremento de 10 KHz. Iniciamos a leitura a 100 Hz e aumentamos a freqüência até atingir 100 KHz. Os resultados mostraram que em algumas faixas de freqüência o sinal de capacitância é mais limpo ou menos susceptível a ruídos.



Figura 4.3. Analisador de Impedância

Em determinadas faixas de freqüência havia uma dispersão considerável do sinal, logo buscamos definir faixas onde para os três fluidos houvesse um sinal bem condicionado. Para garantir uma calibração confiável escolhemos inicialmente as freqüências de 15 KHz e 60 KHz, pois em todos os modelos de sensores estudados sempre nestes pontos as leituras variaram pouco. Durante os testes estáticos, algumas dificuldades foram encontradas na repetibilidade das medidas. Posteriormente, percebemos que isto ocorria devido às imperfeições encontradas na superfície de nossa blindagem inicial que causava interferência no sinal medido. No primeiro modelo de blindagem utilizamos papel alumínio comum para isolar o sensor. A blindagem consistia em envolver o sensor com uma camada espessa de fita isolante seguida por uma camada de papel alumínio. Como proteção da camada de alumínio, utilizamos uma outra camada de fita isolante envolvendo-a e evitando assim danos ou rompimentos da blindagem. Este tipo de isolamento se mostrou ineficiente quando submetido a algumas condições de umidade ambiental. Neste caso, a resistência elétrica do material não era suficientemente grande para manter um isolamento eficiente entre as duas camadas. Posteriormente, foi testada uma blindagem rígida em chapa de alumínio que promovia, segundo observações feitas em laboratório, melhor isolamento, sendo que neste caso o

isolante presente entre o sensor e a chapa da blindagem é o próprio ar que preenche o espaço existente (gaiola de Faraday – Figura 4.4).



Figura 4.4.Blindagem de Alumínio

As Figuras 4.5 a 4.7 a seguir mostram gráficos coletados através do analisador de impedância com as seções cheias de fluido para cada par de sensores. Esta análise foi feita na condição estática e serviu principalmente para determinar a freqüência de excitação de cada sensor.

Em cada gráfico podemos observar, destacado em vermelho, o valor de capacitância registrado. Porém, este valor é instantâneo, podendo haver uma pequena variação no tempo. Consideramos essa variação desprezível, pois é da ordem de meio picofarad na maioria dos casos. Em cada teste, as frações volumétricas foram medidas simultaneamente para cada par de sensores. Isto possibilitou medidas de frações em ambas as condições bifásicas e trifásicas. Sempre que nos referirmos ao conjunto formado por um par de sensores (anéis e helicoidal) utilizaremos termo sonda capacitiva.

Nos gráficos das Figuras 4.5 a 4.7 notamos que quase não há alteração nos valores de capacitância com a freqüência registrados por cada sensor, logo qualquer freqüência dentro da

faixa analisada poderia ser eventualmente usada. Inicialmente, optamos por excitar cada sensor a uma freqüência diferente, mas depois de alguns testes verificamos que uma só excitação seria mais conveniente.



Figura 4.5. Análise da Freqüência de Excitação com Água na Sonda nº 2



Figura 4.6. Análise da Freqüência de Excitação com Ar na Sonda nº 2



Figura 4.7. Análise da Freqüência de Excitação com Óleo na Sonda nº2

Observamos também que há pouca mudança no valor da medida do sensor de anéis quando avaliamos óleo e o ar. O que se espera é que a pequena diferença observada no sinal capacitivo para esses dois fluidos seja mensurável no sensor de hélice, mais sensível de acordo com a literatura e como verificado em nossos experimentos (Figuras 4.5 a 4.7).

4.1.3. Caracterização dos Sensores Capacitivos

Os testes iniciais foram realizados visando caracterizar o comportamento dos sensores propostos. Utilizamos primeiramente seções de tubo em acrílico e numa segunda etapa repetimos os mesmos testes em tubulação de vidro. Como o acrílico possui muita afinidade com o óleo (oleofílico), optamos por utilizar tubulações de vidro borossilicato, evitando assim aderência do mesmo nas paredes da tubulação.

Os sensores de dupla hélice e anéis duplos, utilizados nos testes estáticos, apresentam características mais adequadas para execução de nossas medidas. As dimensões finais utilizadas nas seções de vidro foram semelhantes ao modelo em acrílico, como já descrito anteriormente. A Figura 4.8 mostra os sensores utilizados.



Figura 4.8. Sensores de Anéis e Hélices

O material utilizado para construir os sensores e realizar medidas está listado a seguir:

- Tubo de vidro (diâmetro interno 26 mm e comprimento 1500 mm);
- Fita adesiva de cobre 3M (espessura 0,05 mm e largura 10 mm);
- Blindagem em chapa de alumínio;
- Abraçadeiras de plástico;
- Conectores tipo BNC (12 pares);
- Cabos de cobre coaxial.

Ar atmosférico representou o gás dentro do sensor, além de água a temperatura ambiente e óleo mineral Shell Vítrea 100 com densidade 860 kg/m³ e viscosidade 0,1 Pa.s. Em cada tubo de vidro foi instalado um sensor de anéis e um de hélices a uma distância mínima de 300 milímetros da extremidade. Esta montagem definida como sonda capacitiva foi utilizada na

bancada de testes para calibração estática e posteriormente montada em definitivo na linha de escoamento dinâmico (gangorra). O modelo de sensor de anéis duplos é o menos sensível entre os dois sensores, logo as leituras feitas com tubo cheio de óleo e posteriormente com ar somente não apresentaram valores muito distintos de capacitância. Isso ocorre devido à proximidade entre os valores de permissividade elétrica existente entre estes dois fluidos (ε_w =80, ε_o =4 e ε_a =1). O sensor de hélices, por outro lado, consegue estabelecer uma diferença razoável na medida de capacitância para o ar e o óleo, demonstrando ser um pouco melhor em termos de sensibilidade. O sensor de hélices possui características intermediárias, entre o sensor de anéis e de placas côncavas, em termos de sensibilidade e imunidade aos padrões de escoamento, o que possibilitaria uma medida confiável de fração volumétrica numa mistura de ar e óleo. As Figuras 4.5 a 4.7 mostram as leituras feitas com ambos os sensores para tubo cheio de água ou óleo ou ar.

Note nas Figuras 4.9 e 4.10 que os valores de capacitância registrados no sensor de hélices duplas para o tubo completamente cheio de ar e de óleo são distintos, enquanto que quase não há diferença na medida feita com o sensor de anéis duplos. Este comportamento se repete nos três sensores e demonstra claramente que para medidas bifásicas ar-óleo o sensor de anéis é insatisfatório. É possível observar também que para cada geometria de sensor (hélices ou aneis) os três sensores testados registraram valores de capacitância bastante próximos para cada um dos três fluidos testados. A pequena diferença observada entre os valores de capacitância se deve provavelmente a eventuais diferenças construtivas dos sensores.

Após a verificação de tais comportamentos definimos duas freqüências de excitação para os sensores. Utilizamos um indutor de 15 KHz nos sensores de anéis e outro de 60 KHz nos sensores de hélices.



Figura 4.9. Sensor de Duplas Hélices com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 2



Figura 4.10.Sensor de Anéis Duplos com Tubo de Vidro Cheio - Sensor 2

Mais tarde, durante os testes dinâmicos na seção de teste, esse procedimento se mostrou ineficiente, pois ao verificar o sinal de tensão liberado pelo circuito do sensor observamos que o sensor de anéis captava ruídos oriundos do indutor do sensor de hélices. Nossa primeira idéia foi tentar resolver o problema colocando um filtro passa faixa para eliminar o ruído no

sensor de hélices. Entretanto, verificamos (Figuras 4.5 a 4.7) que a freqüência de excitação de 60 KHz também poderia ser utilizada para o modelo de anéis. Portanto, optamos por excitar todo o sistema a uma só freqüência, 60 KHz. Esta foi a maneira mais rápida e eficiente de resolver este impasse, pois a colocação do filtro levaria mais tempo para ser aplicada.

Alguns cuidados foram tomados durante a coleta dos dados de calibração, a fim de evitar erros de leitura. Conforme previsto, a posição do sensor de hélices deveria ser mantida quando o mesmo estivesse cheio com dois ou mais fluidos. A importância deste procedimento se deve a distribuição do campo elétrico dentro dos sensores, pois no sensor de hélices provavelmente ainda há uma forte influência do posicionamento radial e translacional.

Outra conclusão importante é (Figuras 4.9 e 4.10) que podemos considerar o comportamento do ar e do óleo dentro da mesma tubulação similar ao de um pseudo-fluido único quando observamos o sinal do sensor de anéis. Sendo assim, com a combinação dos dois sensores estaríamos buscando um instrumento novo que pudesse determinar a fração volumétrica numa mistura trifásica. A idéia é obter a fração de água com o sensor de anéis, já que este não diferencia a presença das frações do óleo e do ar. Em contrapartida, determinamos as frações de óleo e ar com o sensor de hélices, pois o mesmo, sendo mais sensível, apresentou uma ligeira mudança de comportamento nos testes estáticos com óleo e ar. Um equacionamento adequado será mostrado mais adiante no decorrer deste trabalho, pois antes de propor uma formulação necessitamos detectar a linearidade da resposta de instrumentação proposta.

4.2 Calibração estática dos sensores capacitivos

Nesta seção é detalhada a calibração estática de bancada realizada no tubo de vidro borosilicato. Os sensores capacitivos utilizados (anéis e hélices) foram inicialmente testados estaticamente. Para os testes foi utilizando o analisador de impedância *Agilent 4294A Precision* (Figura 4.3). Este equipamento foi ajustado para registrar 801 pontos, varrendo várias faixas de freqüência de 10 Hz até 100 kHz. As frações volumétricas *in situ* foram simuladas através do prévio conhecimento dos volumes dos fluidos que preenchiam o tubo. Naturalmente, estas frações de fluidos foram as mesmas utilizadas na calibração dos sensores. Registramos a capacitância para diferentes frações e levantamos os gráficos de calibração. Apenas um par de circuitos transdutor foi utilizado para medida, e este foi instalado na sonda número dois.



Figura 4.11.Sensor de Hélices nº 2 com Água e Ar



Figura 4.12.Sensor de Anéis nº 2 com Água e Ar

Observando os gráficos (Figura s 4.11 e 4.12) podemos verificar que em uma determinada faixa de fração volumétrica o instrumento tem um comportamento que pode ser considerado linear. Nota-se que isto acontece nas três sondas analisadas entre 20 e 80% de concentração de líquido. Estes resultados foram obtidos na bancada de teste estático com o analisador de impedância

4.3 Circuito capacitivo

Para realizar as medidas de fração volumétrica dinamicamente um circuito transdutor de sinal se faz necessário. Inicialmente, utilizamos um circuito elétrico que foi idealizado de forma robusta com ajuste da tensão de saída utilizando uma ponte capacitiva resistiva. Da

forma como o mesmo funciona, podemos garantir uma maior credibilidade da leitura e menor influência externa na captação de ruídos. Os circuitos foram instalados próximos aos sensores e protegidos por uma caixa de metal que funciona como blindagem.

Foram testados dois tipos de circuito em ponte para realizar as medidas de capacitância. O primeiro circuito funciona como um capacímetro e libera um sinal de tensão a partir de uma ponte resistiva de capacitores. O capacitor de referência neste caso é o próprio sensor que com a passagem do fluido varia seu valor de capacitância. A ponte é equilibrada por outro capacitor que é do tipo cerâmico de valor fixo discreto. A capacitância deste deve ter o mesmo valor encontrado quando realizamos os testes estáticos com ar presente na tubulação. Alguns resistores de valores predefinidos também fazem parte desta ponte, que esta mostrada em destaque na Figura 4.13.

Como podemos observar, o circuito esta dividido em cinco partes que tem funções distintas. A primeira parte do circuito é onde se faz a excitação do sensor capacitivo na freqüência que determinamos nos testes estáticos (60 KHz). A ponte capacitiva, representada em destaque cinza, solta um sinal de tensão variável que depende da fração de fluido dentro da tubulação. O sensor capacitivo está representado por C_x na Figura 4.13, sendo que o capacitor *C* foi determinado com base nos valores de capacitância medidos para tubo cheio de ar. Como o sensor capacitivo varia sua capacitância de acordo com as frações de fluidos presentes na linha, o sinal de tensão liberado entre os pontos A e B também variam. Desta forma, a ponte se equilibra quando o sensor estiver completamente cheio de ar soltando zero de tensão. O mesmo não acontece quando começamos a escoar água dentro da linha, pois se ajustarmos o potenciômetro R_7 , com o tubo completamente cheio de água o sinal de tensão

entre os pontos A e B deve variar entre zero e cinco volts. Os resistores R_3 e R_4 possuem valores correspondentes aos valores de impedância reativa do capacitor *C*.



Figura 4.13. Circuito Capacitivo com Ponte Resistiva Capacitiva

A fase seguinte de amplificação⁵ do sinal ocorre logo na seqüência do circuito, sendo que o ganho do amplificador é ajustado pelo potenciômetro R_7 como já foi dito antes. O sinal até este ponto do circuito é uma senóide que será retificada e transformada num sinal de tensão continua. Finalmente, temos um filtro passa baixa⁶ instalado no final do circuito para eliminar ruídos que possam perturbar o sinal.

Devemos salientar que o sinal de tensão liberado pelo circuito não é diretamente proporcional à capacitância de nosso sensor, pois estas duas grandezas não possuem relação linear entre si. O gráfico da Figura 4.14, a seguir, mostra o comportamento da tensão em relação à capacitância.

⁵ A amplificação realizada foi de duzentas vezes o valor do sinal

⁶ A freqüência de corte do filtro passa baixa é de com 100 Hz

Note que segundo o gráfico (Figura 4.14), a capacitância pode variar de 0,5 pF até aproximadamente 20 pF. Ou seja, para obter uma precisão da medida é necessário utilizar todo o intervalo disponível de variação da medida.



Figura 4.14. Relação de Voltagem com a Capacitância

Isso indica que se pode medir qualquer fração dentro deste intervalo, mas se o mesmo não for grande o suficiente haverá uma perda de precisão da medida, ficando esta comprometida. Esse foi o maior problema encontrado com circuito mostrado na Figura 4.13, pois o capacitor utilizado para equilibrar a ponte não zerava completamente o circuito. Por conta disto, o nosso intervalo de variação não era suficiente para medir qualquer fração de líquido. Além disso, o primeiro modelo era de difícil ajuste, pois o sensor capacitivo mudava sua resposta de acordo com a variação da temperatura ambiente e não temos disponível comercialmente valores de capacitores pequenos o suficiente para ajustar o equilíbrio da ponte e consequentemente o fundo de escala.

O modelo mostrado na Figura 4.15 é de fácil equacionamento, pois sua solução sempre é um valor real. Isso acontece, porque o sinal de tensão da entrada do circuito sai em fase com o sinal de tensão da ponte. Este circuito funciona com duas fontes de tensão defasadas entre si e suas diferenças básicas são apresentadas na Figura 4.16.

As principais diferenças existentes entre os dois modelos de circuito estão ilustradas na Figura 4.16.



Figura 4.15. Circuito Capacitivo com Ponte Capacitiva e Fontes de Tensão



Figura 4.16.Diferenças Básicas entre os Circuitos Transdutores de Capacitância
Como já mencionado, a diferença básica esta na configuração da ponte. O modelo mais recente de circuito tem duas fontes de tensão defasadas acopladas à ponte. Após a etapa de excitação, há uma pré-amplificação, seguindo normalmente as etapas seguintes (retificação e filtragem do sinal). Neste modelo, o capacitor de referência é ajustável, pois no primeiro circuito, com a utilização de um capacitor discreto, nem sempre a ponte era zerada perfeitamente. Os filtros tem a mesma freqüência de corte, mas no segundo modelo após essa filtragem de sinal há ainda uma última amplificação. Nesta etapa, com o auxilio de dois potenciômetros é possível zerar a ponte com o sensor cheio de água e ajustar o fundo de escala do medidor (5 volts) com o sensor cheio de água. O ajuste do zero no primeiro modelo se deve em grande parte também ao efeito causado pelas capacitâncias parasitas, pois os cabos, o vidro e outros componentes construtivos interferem fortemente no valor equivalente do capacitor. Por todos esses motivos, optamos pelo uso do segundo modelo de circuito.

O equacionamento pertinente à ponte deve ser feito para melhor dispor dos valores de tensão lidos pelo circuito. Portanto, utilizando a lei de Kirchhoff podemos simplificar nosso modelo considerando apenas nossa ponte (Figura 4.17).



Figura 4.17.Ponte Capacitiva com Fontes de Tensão

A reatância capacitiva dos capacitores $C_x \in C_f$ podem ser dadas da forma a seguir:

$$X_{C_x} = \frac{1}{2\pi . f. C_x. j}$$
 ou $X_{C_f} = \frac{1}{2\pi . f. C_f. j}$

 C_x – Capacitância do Sensor;

- C_f Capacitância de Referência ajustável;
- f Freqüência de Excitação;
- j Unidade Imaginária;
- *i Corrente Elétrica*.

O sentido da corrente elétrica da ponte está indicada na Figura 4.17. Seguindo esta consideração podemos estabelecer uma relação entre a tensão e a capacitância do circuito da seguinte forma:

$$i = \frac{2V}{\frac{1}{2\pi . f. C_x. j} + \frac{1}{2\pi . f. C_f. j}}$$
(4.1)
$$V_{out} = V - i. X_{c_x}$$
(4.2)

Substituindo a Equação 4.1 na Equação 4.2 vem:

$$V_{out} = V - \frac{2V}{\frac{1}{2\pi . f . C_x . j} + \frac{1}{2\pi . f . C_f . j}} \cdot \frac{1}{2\pi . f . C_x . j}$$
$$V_{out} = V - \frac{2VC_f}{C_f + C_x}$$
$$\frac{V_{out}}{V} = 1 - \frac{2C_f}{C_f + C_x}$$
$$C_x = \frac{2VC_f}{V - V_{out}} - C_f \qquad (4.3)$$

A Equação 4.3 mostra como se relaciona a tensão de saída do circuito transdutor e a capacitância do sensor instalado na linha. A tensão (V) é a referência da ponte que foi ajustada para 5 volts e a tensão (V_{out}) é o valor liberado pelo circuito antes da amplificação inicial.

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram basicamente as funções da fração volumétrica da água com a tensão do circuito e com a capacitância resp. Nota-se na Figura 4.18 que para uma pequena variação de capacitância há uma grande variação da fração volumétrica da água. De 1 a 4 pF, no sensor de anéis, há uma tendência linear de comportamento e podemos variar a fração volumétrica em até 85% dentro dessa faixa. A partir deste ponto o incremento na variação da capacitância é pequeno. Fenômeno similar ocorre também com o sensor de hélices, só que neste caso há uma translação do gráfico (3 a 8 pF). Como o sinal do circuito transdutor é dado em tensão, para uma melhor avaliação construímos gráficos similares de fração de água em função da voltagem de saída. Porém, como a relação existente entre tensão

e capacitância não é linear os resultados se apresentam conforme mostram as Figuras 4.19 e 4.20.

O gráfico da Fig 4.18 foi levantado estaticamente utilizando várias frações de líquido diferentes na linha de teste dinâmica (Figura 3.2). Foram feitas medidas com o sensor de hélices, pois desta forma é possível avaliar a região linear mais precisamente. O mesmo foi feito nas Figuras 4.19 e 4.20, a seguir. Ou seja, em ambos os casos houve o travamento das válvulas de fechamento rápido da tubulação de teste, esgotamento da linha gradativamente e registro do sinal medido pelos sensores. Alguns cuidados com a inclinação, tempo de medida e salvamento dos resultados foram observados. Vale também salientar que o líquido esgotado da linha de teste foi retirado e medido com uma proveta graduada.



Figura 4.18. Fração volumétrica vs. capacitância; calibração da Sonda nº 2, Sensor de Anéis

O mesmo comportamento relativamente linear se verifica no sensor de anéis, sempre na região acima de 15% e abaixo de 85% de fração de líquido. Isso implica que nesta região a variação da fração de líquido é proporcional à tensão de saída do circuito. Naturalmente, com o equacionamento da curva podemos determinar teoricamente qualquer fração de líquido neste tipo de escoamento. Estes resultados poderiam ser avaliados de forma mais precisa através da comparação com um modelo matemático apropriado. Isso não foi possível porque a maioria dos modelos disponíveis na literatura se baseia na medição das vazões dos fluidos para a estimativa das frações volumétricas. Na região linear, devido a limitações experimentais, não foi possível medir as vazões dos dois líquidos simultaneamente, pois como será demonstrado no item 4.6 deste capítulo algumas limitações nos limites de vazão são impostas pelos medidores utilizados.



Figura 4.19. Fração volumétrica vs voltagem: regime estratificado com o sensor de hélices nº 2



Figura 4.20. Fração volumétrica vs voltagem: regime estratificado com o sensor de anéis nº 2

Normalmente, para executar as médias de fração volumétrica foi preciso produzir vazões de gás muito pequenas (padrão estratificado e com bolhas) ou muito grandes (padrão pistonado e anular) fugindo sempre das faixas de medida do instrumento. O que temos, porém, são medidas isoladas, ou de líquido ou de gás, dependendo das condições do escoamento. Como a medida de vazão não foi registrada para os padrões de escoamento que foram gerados, nos limitamos apenas a observar o momento em que o regime requerido de escoamento se apresentava na tubulação de teste, não importando nenhum outro fator de medida (inclinação, pressão da linha, vazão, etc.) que não fosse tensão liberada pelo circuito e o tempo total de aquisição.

4.4 Programa para aquisição e tratamento de sinais

Três programas foram utilizados em plataforma *LabView*® e cada um deles cumpriu um papel específico. Os mesmos foram feitos pelo suporte técnico do laboratório e modificados

conforme nossas necessidades. O primeiro foi utilizado para realizar as medidas das variáveis relacionadas ao escoamento. Este programa também serviu para o salvamento dos dados para futuras considerações. A Figura 4.21 mostra o painel de controle decorrente do programa citado.

A freqüência de aquisição dos sinais utilizada foi de 200 Hz, tirando médias a cada 50 pontos medidos e gravando a leitura durante um minuto para o padrão pistonado e 20 segundos para os outros padrões de escoamento. Como pode ser visto na Figura 4.21, o programa foi idealizado para registrar também as pressões no início e final da linha, as vazões de água, óleo e ar, as temperaturas das linhas de fluido, a inclinação da linha de teste e as tensões do circuito transdutor. Algumas medidas, no entanto, não foram aproveitadas, pois dependiam intrinsecamente das faixas dos respectivos medidores.



Figura 4.21. Programa de Aquisição de Sinais

O segundo programa utilizado para tratamento do sinal serviu principalmente para tratar e reconstruir o sinal do padrão de escoamento pistonado. Esse procedimento foi necessário, pois nesse padrão a fração volumétrica não é determinada de forma trivial, necessitando de um tratamento que é feito dentro de seu período de aquisição. A expressão a seguir mostra como devemos obter a fração de líquido num padrão pistonado bifásico contendo água e ar.

$$\overline{\alpha}_{liq} = \frac{l}{T} \int_{T} \alpha_{liq} dt \quad (4.4)$$

T - Período total de aquisição do sinal; $<math>\alpha_{liq} - Fração volumétrica (média espacial);$ $\overline{\alpha}_{liq} - Fração volumétrica (média temporal);$ dt - Tempo total de tubo cheio de líquido.

Especificamente no padrão pistonado, um tratamento adequado para leitura do sensor deve ser adotado. Nesse caso, o sinal médio no espaço do sensor a cada passagem do pistão de líquido irá se elevar até um valor máximo (tubo cheio de líquido) sendo intercalado por valores intermediários de tensão referente à fração de gás existente na linha. Para calcular a fração de líquido devemos somar o tempo total da tubulação cheia de líquido e dividir-lo pelo tempo de aquisição do sinal. Em suma, após a aplicação de médias espacial e temporal esse resultado é considerado a fração de líquido da linha.

Como o sinal do sensor varia abruptamente entre a condição cheia de líquido e parcialmente cheia de líquido (estratificado) espera-se um sinal próximo ao de uma onda quadrada para calcular as frações. Isso não acontece na prática, pois as bolhas de ar vêm

carregadas de gotículas da água e vice versa. Portanto, é preciso reconstruir o sinal de forma a obter uma resposta melhor que possa ser tratada com mais coerência. No capítulo 5 detalharemos as técnicas utilizadas para reconstrução do sinal.

O terceiro programa foi utilizado apenas para simular o comportamento do campo elétrico entre os elétrodos (sensores). Algumas simulações feitas mostraram uma nítida preferência do fluxo de carga pelo meio aquoso em detrimento do meio gasoso. O campo elétrico no sensor de anéis é mais intenso no meio da tubulação enquanto que no sensor de hélices há uma maior intensidade próxima as paredes do tubo.

Não foi possível gerar figuras a partir deste programa por limitação de hardware, porém este serviu para uma avaliação qualitativa do sinal de resposta dos sensores. O programa foi desenvolvido numa biblioteca de funções em C, que construía e resolvia a equação diferencial de Laplace em meio não homogêneo para cada nó de uma malha tridimensional em coordenadas cilíndricas, por meio do método das diferenças finitas.

Para visualização dos resultados obtidos, foi desenvolvido em linguagem C++ um software que construía um espaço tridimensional formado por elementos geométricos primitivos com cor e transparência próprias para representar os elementos que compuseram o cálculo (blindagem, eletrodos, canos, fluidos) e os resultados do cálculo (vetores campo elétrico e potenciais elétricos), tanto tridimensionalmente quanto em corte.

4.5 Equacionamento dos sensores capacitivos para medidas trifásicas.

Os sensores capacitivos utilizados na determinação das frações volumétricas de água, ar e óleo, antes da avaliação dinâmica, foram calibrados estaticamente numa seção de teste, como mencionado no capítulo anterior. Algumas configurações básicas foram analisadas (fitas helicoidais, anéis paralelos e chapas côncavas) nesta etapa e para cada um dos modelos analisados verificamos que existem restrições que impedem sua ampla utilização. Ou seja, suas características variam relativamente conforme o tipo de arranjo espacial do fluido. As geometrias que apresentaram melhores resultados foram do tipo helicoidal e anéis. Utilizaremos estes dois modelos de sensores em paralelo na composição da sonda capacitiva não intrusiva, pois um dos propósitos fundamentais deste trabalho é a medição em linha da fração volumétrica em escoamentos trifásicos. Esta associação funcionará simultaneamente com o sensor de anéis determinando a fração de água existente e o sensor de hélices com o papel somente de determinar as frações de óleo e de ar.

Este é um problema, em tese, bem posto, que pode ser resolvido através de um sistema linear de três equações e três incógnitas. Para tanto, é preciso verificar a linearidade do instrumento numa faixa suficientemente abrangente, que permita medições submetidas a diferentes variações de frações de fluido. O sistema de equações disposto abaixo mostra mais claramente como deve ser abordado o problema.

$$\begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_w \\ a_o \\ a_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{he} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

 α_w – Fração volumétrica da água;

 α_o – Fração volumétrica do óleo;

 α_a – Fração volumétrica do ar;

V_{an} – Tensão de saída no sensor de anéis;

V_{he} – Tensão de saída no sensor de hélices.

Nota-se que a primeira equação do sistema de equações (4.5) pode ser resolvida através da resposta de saída do sensor de anéis. Analogamente para a segunda equação. A terceira equação é simplesmente a equação da conservação da massa. Os coeficientes da matriz podem ser obtidos experimentalmente, sendo que para o sistema ter solução única é necessário que os mesmo sejam diferentes entre si. O que se espera é que os coeficientes B e C tenham valores próximos, já que o sensor de anéis não possui sensibilidade suficiente para diferenciar com precisão as quantidades de óleo e ar. Para validar nosso sistema, realizamos testes trifásicos em caráter estático para obter os coeficientes que satisfazem as equações

4.6 Aferição dos Medidores de Vazão

As placas de orifício foram montadas na tubulação seguindo a norma ASME MFC-3M-1989. As dimensões de cada uma delas é mostrada na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1.Dimensão das Placas de Orifício					
Placa	s de Orifício				
Localização da Placa Diâmetros do Diâmetros do Orifício (mm) Tubo (mm					
Linha de Ar (14 m ³ /h)	12,60	41,50			
Linha de Ar (40 m ³ /h)	21,30	41,50			
Linha de Ar (100 m ³ /h)	33,20	41,50			
Linha de Água	35,50	44,00			
Linha de Óleo	35,40	44,00			

4.6.1 Placas de orifício para vazão de água

Um tanque separador de gás e líquido foi colocado no final do circuito de teste para separar o ar e a água, o qual serve também para medir a vazão mássica do líquido escoante. Com o auxilio de uma balança digital medimos de forma confiável a vazão mássica de água para várias condições de vazão. O separador líquido-gás aloja os fluidos que saem da tubulação de teste e acumula-os sobre a balança. Nas tubulações que o ligam ao circuito de teste, um sistema de válvulas restringe sua entrada e saída. O ar que entrar junto com a água, escapa por uma saída superior. Os líquidos, quando abrimos as válvulas de bloqueio do sistema, seguem para o separador de água e óleo via tubulação.

O procedimento de calibração consiste em aumentar gradativamente a vazão da bomba de água e registrar o tempo e a massa de líquido que entrou no separador gás-líquido. Com o auxilio da balança digital e cronômetro a vazão mássica do líquido pode ser calculada. Isto é feito na linha com somente um dos líquidos escoando. Medimos simultaneamente o tempo de escoamento, o peso do líquido escoante (água), o diferencial de pressão da placa e o sinal de tensão do transdutor de pressão. Cada medida foi feita com vazões diferentes, aumentando-a gradativamente. Para aumentar a vazão da água é preciso variar a rotação da bomba com o auxilio do variador de freqüência. O critério utilizado neste caso foi aumentar a rotação gradativamente, variando a freqüência dentro de uma faixa adequada de vazão que permita a medida. O controle de todo processo de aferição foi feito por um sistema de aquisições de sinais gerenciado pelo software *LabView*.

O diâmetro interno da tubulação onde se encontram instaladas as placas é de 2 polegadas. Os dados coletados durante a calibração estão apresentados na Tabela 4.2. Foram registradas as massas de líquido na balança dentro do intervalo de tempo que o mesmo escoou. Os valores de tensão e a pressão diferencial do transdutor de pressão foram registrados paralelamente.

Para melhor entender como é feito o cálculo de calibração, devemos entender como funciona o método de medida. A placa de orifício é um dispositivo que impõe uma perda de carga numa linha de deslocamento de fluido. Esta perda faz com que seja gerado um diferencial a montante e a jusante da mesma, que pode ser medido e relacionado à vazão existente a linha. Maiores detalhes no apêndice A.

Em nosso caso determinamos de forma interativa o valor de C_d , de forma que pudemos determinar com precisão satisfatória os valores de vazão. A Tabela 4.3 mostra os resultados encontrados para as vazões teóricas e reais, considerando coeficiente de descarga encontrado.

Tabela 4.2.Daulos para v	Calibração das Flacas de Offi	icio da Tubulação de Agua
Vazão Mássica Real (kg/s)	Diferencial de Pressão (Pa)	Tensão de Saída do Tansdutor (Volts)
0,271	230	1,026
0,694	540	1,051
1,122	1160	1,100
1,533	2000	1,167
1,933	3350	1,257
2,316	4410	1,363
2,710	5960	1,486
3,073	7930	1,630
3,429	9910	1,780

Tabela 4.2.Dados para Calibração das Plaças de Orifício da Tubulação de Água

Tabela 4.3.Determinação do Coeficiente de Descarga da Água

Coeficiente de Descarga (C_d)	Vazão Mássica Teórica (kg/s)	Vazão Mássica Real (kg/s)
0,628	0,546	0,271
0,621	0,828	0,694
0,616	1,205	1,122
0,614	1,576	1,533
0,612	2,034	1,933
0,611	2,330	2,316
0,610	2,705	2,710
0,610	3,116	3,073
0,609	3,480	3,429

A Figura 4.24 mostra que o modelo teórico apresenta uma boa concordância com o resultado medido real, portanto é possível afirmar que a curva levantada representa com certa precisão a vazão de água do sistema. Os resultados porém devem ser relacionados com a tensão liberada pelo transdutor diferencial de tensão a Tabela 4.4 mostra os dados e a Figura 4.25 mostra o gráfico final de calibração.



Figura 4.22. Comparação das Vazões Mássicas

Tabela 4.4.Dados de Cali	Tabela 4.4.Dados de Calibração da Placa de Orifício da Água				
Tensão de Saída (volts)	Vazão Mássica Real (kg/s)				
1,026	0,271				
1,051	0,694				
1,100	1,122				
1,167	1,533				
1,257	1,933				
1,363	2,316				
1,486	2,710				
1,630	3,073				
1,780	3,429				

4.6.2 Placas de orifício para vazão do ar

A calibração das placas de orifício das linhas de suprimento de ar foi realizada seguindo critério semelhante ao da água. Neste caso, porém, não houve possibilidade de comparar os resultados medidos com a calibração experimental. A norma ASME MFC-3M-1989 foi aplicada para o levantamento da curva teórica.



Figura 4.23. Gráfico e Calibração da Placa de Orifício da Água

O equacionamento aplicado no item anterior (apêndice A) foi utilizado para calibração do ar, só que neste caso um ajuste de compressibilidade foi adotado. Maiores detalhes no apêndice B.

A Tabela 4.5 mostra, para a válvula com vazão nominal de 14 m³/h, a abertura das válvulas de ar, a tensão registrada no trandutor, a temperatura medida, a pressão a montante da placa, a variação de pressão registrada e o valor calculado da vazão mássica.

Podemos notar, através dos dados da Tabela 4.5, que nenhuma vazão de ar pôde ser medida com uma abertura de válvula menor que 15%, o que limitou a faixa de medida deste dispositivo. A Figura 4.26 mostra a curva de calibração deste instrumento.

A Tabela 4.6 mostra, para a válvula com vazão nominal de 40 m³/h a tensão registrada no trandutor, a temperatura medida, a pressão a montante da placa, a variação de pressão registrada e o valor calculado da vazão mássica.

Iuot	Tabela 4.3Dados de Cambração da Traca de Orincio do Ar (14 m /h)						
Abertura da Válvula (%)	Tensão do Transdutor Diferencial (volts)	Temperatura do Ar (K)	Pressão a Montante da Placa (Pa)	Variação de Pressão (Pa)	Vazão Mássica Calculada (m³/h)		
15	1,033	298,18	106590	490	7,65		
20	1,044	298,31	108030	670	8,87		
25	1,058	298,2	108580	830	9,83		
30	1,072	297,15	110010	980	10,58		
35	1,086	297,58	111110	1160	11,45		
40	1,086	297,65	111090	1170	11,50		
45	1,103	297,65	112440	1360	12,31		
50	1,117	299,85	113890	1540	13,05		
55	1,131	297,45	114890	1730	13,71		
60	1,146	297,65	115730	1920	14,38		
65	1,146	297,95	115490	1920	14,40		
70	1,16	298,45	116500	2090	14,97		
75	1,174	298,75	116840	2270	15,57		
80	1,189	299,05	117740	2450	16,11		
85	1,209	299,35	118460	2700	16,86		
90	1,209	299,65	118470	2700	16,87		
95	1,263	299,75	119960	3390	18,74		
100	1,404	300,18	127140	5160	22,36		

Tabela 4.5Dados de Calibração da Placa de Orifício do Ar (14 m³/h)

A Figura 4.27 mostra a curva de calibração da placa de orifício da linha de ar de 40 m³/h. Podemos notar que a limitação da medida é maior para esta placa que só mede vazões a partir de uma abertura de 60%, sendo que neste caso a máxima vazão medida é menor que a vazão nominal da linha. A Tabela 4.7 mostra, para a válvula com vazão nominal de 100 m³/h a abertura das válvulas de ar, a tensão registrada no transdutor, a temperatura medida, a pressão a montante da placa, a variação de pressão registrada e o valor calculado da vazão mássica.

A Figura 4.28 mostra a curva de calibração da linha de ar com vazão nominal de 100m³/h. Podemos notar que mesmo com a válvula totalmente aberta a maior vazão medida é de 57 m³/h. não é possível medir com este dispositivo vazões inferiores a 24 m³/h.



Figura 4.24. Gráfico de Calibração da Placa de Orifício do Ar (14 m³/h)

Abertura da Válvula (%)	Tensão do Transdutor Diferencial (volts)	Temperatura do Ar (K)	Pressão a Montante da Placa (Pa)	Variação de Pressão (kPa)	Vazão Mássica Calculada (m³/h)	
60	0,986	295,21	109350	125,89	11,48	
65	0,984	295,28	109300	125,79	11,48	
70	1,299	295,25	107960	228,46	15,46	
75	1,825	295,35	113350	401,38	19,89	
80	2,594	295,42	118710	653,16	24,68	
85	3,705	295,36	124600	1018,28	29,96	
90	3,704	295,42	124200	1018,28	30,01	
95	3,831	295,46	124620	1059,72	30,55	

Tabela 4.6.Dados de Calibração da Placa de Orifício do Ar (40 m3/h)

Observamos que, para medir a vazão, a válvula da linha de 100 m3/h deve ser mantida aberta em mais de 50% e menos que 95%. A variação de tensão neste caso é a menor, pois o trandutor SMAR LD301 (12,5 a 500 milibar) utilizado tinha uma precisão inferior ao da válvula de 40 m³/h.



Figura 4.25. Gráfico de Calibração da Placa de Orifício do Ar (40 m3/h)

Tabela 4.7.Dados de Cambração da Flaca de Ormicio do Ar (100 mº/n)						
Tensão do		Pressão a	Variação	Vazão		
Transdutor	Temperatura	Montante	de	Mássica		
Diferencial	do Ar (K)	da Placa	Pressão	Calculada		
(volts)		(Pa)	(kPa)	(m³/h)		
1,002	303,25	131560	80	24,41		
1,009	301,25	139540	170	33,96		
1,015	301,22	154610	250	38,87		
1,015	301,05	154680	250	38,85		
1,026	300,95	172590	390	45,65		
1,043	300,95	200420	590	51,83		
1,062	300,95	244150	840	55,79		
1,074	300,85	282020	1010	56,80		
1,074	300,25	281550	990	56,23		
1,078	300,05	288280	1050	57,18		
	Tensão do Transdutor Diferencial (volts) 1,002 1,009 1,015 1,026 1,043 1,062 1,074 1,078	Tensão do Temperatura Diferencial Temperatura 0.002 303,25 1,002 303,25 1,009 301,25 1,015 301,22 1,015 301,05 1,026 300,95 1,043 300,95 1,074 300,25 1,074 300,05	Tensão do Transdutor Temperatura do Ar (K) Pressão a Montante da Placa (Pa) 1,002 303,25 131560 1,009 301,25 139540 1,015 301,22 154610 1,026 300,95 172590 1,043 300,95 200420 1,062 300,95 244150 1,074 300,25 281550 1,078 300,05 288280	Tensão do Transdutor Temperatura do Ar (K) Pressão a Montante da Placa Variação Pressão (valts) 1,002 303,25 131560 80 1,009 301,25 139540 170 1,015 301,22 154610 250 1,015 301,05 154680 250 1,026 300,95 200420 590 1,062 300,95 244150 840 1,074 300,25 281550 990 1,078 300,05 288280 1050		



Figura 4.26Gráfico de Calibração da Placa de Orifício do Ar (100 m³/h)

4.7 Calibração do medidor de ângulos

O medidor de pressão diferencial foi adaptado para medir a inclinação da tubulação. Este medidor registra a pressão diferencial da coluna de líquido gerada pela inclinação da tubulação de testes.

Para calibrar este dispositivo com o auxilio de um goniômetro da Mitutoyo (0,5° de precisão) ajustamos zero graus de inclinação e lentamente inclinamos o sistema. Para atenuar a histerese do instrumento desnivelamos em aproximadamente 50 centímetros os dutos de água. Este fenômeno está associado ao comportamento não linear do medidor no valor próximo de zero, no qual, a resposta resultante (voltagem) é retardada em relação à esperada (inclinação). A Tabela 4.8 mostra os resultados levantados para a curva de calibração do instrumento.

Inclinação (graus)	Tensão do Transdutor Diferencial (volts)
0	1,678
1	1,707
2	1,742
3	1,772
4	1,806
5	1,838
10	2,007
15	2,177
20	2,342
25	2,482
30	2,637

Tabela 4.8.Dados de Calibração do Transdutor Diferencial de Pressão



Figura 4.27.Gráfico de Calibração da Inclinação das Linhas de Teste

Capítulo 5 – Tratamento dos Dados, Resultados e Discussão.

Neste capítulo são comparados os resultados obtidos estaticamente com as medidas que foram obtidas dinamicamente no oleoduto piloto. Algumas limitações foram impostas em nossa avaliação final por conta principalmente da estreita faixa de medida de vazões, necessária para gerar alguns padrões de escoamento. Essas vazões não foram medidas, mas para validar nossa instrumentação é necessário apenas comparar os valores lidos pela sonda capacitiva com as medidas reais obtidas através da técnica de válvulas de fechamento rápido. O mesmo foi feito com a inclinação da tubulação, que não foi considerada, já que nossa busca primordial é apenas aferir os resultados dinâmicos com os estáticos.

5.1 Aplicação da Sonda Capacitiva para Medição de Fração Volumétrica *In* Situ

Os resultados a seguir são comparações entre as medidas feitas estaticamente com os valores dinâmicos, ambos obtidos na seção de teste do oleoduto piloto (Figura 3.2) em escoamento bifásico ar-água. Para cada padrão de escoamento gerado foi obtida uma média temporal do sinal médio espacial fornecido pela sonda capacitiva num intervalo de tempo de 20 segundos. O padrão pistonado foi tratado de forma diferenciada, tendo sido testadas diversas técnicas de reconstrução do sinal.

5.1.1. Medição Dinâmica de Fração Volumétrica em Diversos Padrões de Escoamento

As medidas estáticas são, naturalmente, referentes ao padrão de escoamento estratificado. Consideramos como referência a curva estática. Através da comparação entre os valores obtidos estaticamente para o padrão estratificado e valores obtidos dinamicamente para o mesmo padrão estratificado e demais padrões gás-líquido é possível inferir quanto à sensibilidade e independência (imunidade) do sensor ao padrão de escoamento.

Para os testes dinâmicos foram gerados vários padrões de escoamento diferentes na linha de teste e foi verificado em que condições de escoamento há uma melhor resposta dos sensores. Os padrões gerados foram: bolhas, estratificado, anular e pistonado. Exceto para este último, cujos dados não foram expostos graficamente juntamente com os demais padrões, em cada escoamento foi considerada uma média temporal da medida num intervalo de tempo de 20 segundos. O período de aquisição foi marcado a partir do momento em que o escoamento entrou em regime permanente. Para os padrões dispersos ou paralelos de fases separadas, como havia pouca variação no sinal do sensor, o valor de tensão lido na saída do circuito era quase uma constante. A cada medida feita foi verificado também o ajuste do circuito para tubulação completamente cheia de água e de ar. Estes testes foram repetidos diversas vezes para avaliar a confiabilidade da medida. A Figura 5.1 a seguir mostra uma comparação entre os valores estáticos e dinâmicos levantados para o sensor de hélices.

Nota-se que o sensor de hélices não apresentou resultados satisfatórios para o padrão anular. Isso indica que o sinal de resposta do sensor sofre forte interferência do arranjo geométrico das fases. Um fenômeno que posteriormente poderia ser investigado é a relação provável entre a permissividade elétrica do meio e a densidade do gás escoante. Neste experimento foi observado que em condições de altas variações de pressão do gás, havia um aumento considerável no sinal de tensão na saída do circuito transdutor. Isso aconteceu principalmente no padrão anular e pistonado. A seguir, na Figura 5.2, podemos observar os mesmos pontos medidos no sensor de anéis.



Figura 5.1.Gráfico Comparativo com Diversos Padrões de Escoamento no Sensor de Hélices nº2



Figura 5.2. Gráfico Comparativo com Diversos Padrões de Escoamento no Sensor de Anéis nº2

O sensor de anéis, embora tenha um sinal mais fraco do campo elétrico, se mostrou menos suscetível ao padrão de escoamento. O mesmo comportamento em relação ao padrão anular pôde ser observado também neste sensor, ainda que menos intenso. Como a linearidade deste instrumento está aparentemente limitada a uma região (10% a 80%), é possível que nesta faixa as medidas sejam mais ajustáveis à curva estática, porém não conseguimos gerar os regimes listados nos gráficos anteriores por limitações experimentais. A região onde se concentram os pontos do padrão de bolhas, apesar de se apresentar fora da faixa linear, nos dá uma boa idéia quantitativa das frações que podemos encontrar. Isso acontece em ambos os sensores, conforme pode ser visto nas Figuras 5.1 e5.2.

5.1.2 Medição Dinâmica de Fração Volumétrica no Padrão Pistonado

O padrão pistonado, por ser um padrão de escoamento intermitente, foi tratado de forma diferenciada para a determinação da fração volumétrica. Neste tipo de arranjo espacial o sinal liberado pelo circuito transdutor sofre variações extremas, registrando valores de tensão referentes à tubulação cheia e parcialmente cheia de líquido. Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de uma técnica para reconstruir o sinal e assim determinar as frações volumétricas medidas. As técnicas que serão descritas a seguir foram implementadas num programa em plataforma *LabView*® de forma a obter diretamente o valor da fração volumétrica dentro do intervalo total de aquisição do sinal. Cinco técnicas diferentes foram testadas de forma empírica, buscando um critério único que pudesse ser adotado para a determinação de todas as frações de fluido registradas. Demonstraremos cada uma delas com o intuito de avaliar qualitativamente qual o melhor modelo.

A Figura 5.3 mostra o sinal original do padrão pistonado retirado num pequeno intervalo de tempo (16 segundos). Nesta seção apresentaremos todos os métodos utilizados relacionando-os sempre com o valor de capacitância. Para tanto, tomaremos como exemplo o sinal de capacitância extraído do circuito transdutor do sensor de anéis número dois. Embora a capacitância não seja propriamente o sinal liberado pelo circuito transdutor isso pouco tem influência na demonstração da técnica, pois o objetivo principal neste caso é apresentar os critérios abordados para o ajuste do valor real da fração de líquido e do sinal medido pelo sensor.



Figura 5.3. Sinal do Padrão Pistonado Extraído do Sensor de Anéis nº2

A primeira técnica consiste na adoção de um nível de corte baseado no valor médio do sinal extraído. Consideramos que acima do limite de corte temos tubo cheio de água e abaixo do mesmo temos somente ar. Posteriormente, podemos utilizar a Equação 4.4 para determinar a fração de líquido. O primeiro critério definido para determinação do limite de corte foi o valor médio do sinal medido. Este limite, dependendo da forma como for estabelecido, pode fornecer um ajuste melhor em alguns casos e não tão bom em outros. A Figura 5.4 mostra a reconstrução do sinal da Figura 5.3 utilizando a técnica descrita.

O valor de fração volumétrica expresso na Figura 5.4 (32,36%) é o resultado obtido aplicando a técnica de corte médio simples. Neste caso um erro sistemático está invariavelmente sendo embutido no resultado final, pois através deste método consideramos implicitamente regiões cheias de líquido e regiões totalmente secas dentro da mesma tubulação.



Figura 5.4. Reconstrução do Sinal do Sensor de Anéis nº2 Utilizando o Corte Simples

Na prática o que ocorre é que o valor registrado pelo sensor nas regiões de vale se refere a uma condição de tubulação parcialmente cheia isso implica na necessidade de uma avaliação mais refinada do nível adequado de corte que deve ser adotado. A técnica apresentada a seguir, na Figura 5.5, apresenta certas diferenças em relação à primeira avaliação. Nesse caso, dois níveis de corte se estabelecem a partir do sinal original medido.

Este modelo tem algumas vantagens em relação ao modelo anterior, pois em regiões onde o pistão sofre forte interferência das bolhas de ar que o acompanham há uma eficiente reconstrução do sinal. A análise funciona da seguinte maneira, acima do limite superior o programa considera a tubulação completamente cheia de líquido e abaixo do limite inferior completamente cheia de gás. Este procedimento evita estabelecer uma determinação grosseira do nível de corte adequado que deve ser adotado.



Figura 5.5. Reconstrução do Sinal do Sensor de Anéis nº2 Utilizando o Corte Duplo

As técnicas seguintes foram aplicadas utilizando a derivada do sinal original do sensor. Neste caso, estabeleceremos também níveis de corte do sinal visando uma determinação mais precisa da fração de líquido. A Figura 5.6 mostra a derivada do sinal coletado.

O intervalo compreendido entre o pico superior e o pico inferior é justamente o momento da passagem do pistão de água. Visualizando o gráfico a seguir podemos ver claramente o intervalo de tempo entre a passagem de dois pistões. Ou seja, para uma interpretação coerente da medida podemos concluir que uma derivada positiva indica o inicio da passagem do pistão e a derivada negativa o final. A Figura 5.7 mostra a reconstrução do sinal baseado no sinal derivado.



Figura 5.6. Derivada do Sinal do Padrão Pistonado Extraído do Sensor de Anéis nº2

Nesta avaliação é possível notar que há uma onda quadrada com freqüência maior que o modelo de corte simples do sinal. Isto ocorre porque as pequenas perturbações em torno do zero são computadas como linha cheia de água ou cheia de ar inferindo um erro considerável na medida. Por conta disso, o valor medido da fração de líquido (48,84%) é superior ao valor calculado utilizando o corte simples.

O mesmo sinal derivado foi utilizado também estabelecendo dois níveis de corte (superior e inferior), espera-se com isso eliminar as perturbações existentes em torno do zero e encontrar resultados mais coerentes de concentração de líquido. A Figura 5.8 mostra como fica o sinal reconstruído baseado nesta técnica.

Este método, como em todos os outros, necessita de um ajuste fino dos níveis de corte do sinal, pois em nosso caso a quantidade de ruídos inerentes do próprio escoamento dificulta uma determinação clara dos mesmos.



Figura 5.7. Reconstrução do Sinal do Sensor de Anéis nº2 Utilizando a Derivada com Corte Simples

A última técnica utilizada apresentou resultados muito discordantes do valor real medido. Sua metodologia é estritamente gráfica, portanto iremos descrevê-la de forma rápida e sucinta. O princípio utilizado foi a integração do sinal original, gerando uma área que deve servir como referência para determinação da fração volumétrica teórica. A Figura 5.9 mostra a área abaixo do gráfico, que representa o sinal original. O mesmo está delimitado por um retângulo que deve ser utilizado como base para o calculo da fração de líquido. Neste caso toda região representada em azul é computada como cheia de água e o resto do polígono seria a representação do ar. Dividindo a área em azul pela área total do retângulo teremos a fração de líquido; analogamente para determinação da fração de gás o mesmo procedimento deve ser adotado.

O grande problema neste caso é estabelecer os limites superiores e inferiores do sinal de forma que possamos determinar a região que será delimitada por essa área. Inicialmente, adotamos como critério o maior valor de sinal registrado e o menor valor, mas mesmo assim não foi possível alcançar valores coerentes. As Tabs. 5.1 e 5.2 a seguir mostram alguns dos

resultados encontrados após a avaliação criteriosa de cada método utilizando os sensores de anéis e hélices, respectivamente.



Figura 5.8. Reconstrução do Sinal do Sensor de Anéis nº2 Utilizando a Derivada com Corte Duplo



Figura 5.9.Reconstrução do Sinal do Sensor de Anéis nº2 Utilizando o Método de Integração

Levando-se em conta os resultados expostos nas Tabelas. 5.1 e 5.2, podemos observar que o melhor método é o da derivada com corte único simples. Neste caso, a variável analisada foi a tensão de saída e não a capacitância, que foi utilizada somente para demonstrar a técnica. O

limite de corte determinado para o sensor de anéis, depois de algumas tentativas empíricas, foi -1,5 volts do valor médio de aquisição, que no caso da derivada é zero. No caso do sensor de hélices o corte foi feito a -0,5 volts do mesmo valor. Uma análise mais detalhada dos erros será apresentada no final deste capítulo.

Tabela 5.1.Comparação entre os Métodos de Tratamento do Sinal Pistonado no Sensor de Anéis nº2					
Fração Real	Met. Simples c/ 1 Limite	Met. Simples c/ 2 Limites	Met. Deriv. c/ 1 Limite (-1,5 Volt)	Met. Deriv. c/ 2 Limites (+/- 6 volts)	Método da Integral
57,85%	57,2514%	50,47%	57,80%	60,24%	79,72%
56,00%	59,4823%	53,45%	51,89%	53,97%	73,60%
53,23%	61,289%	58,71%	47,80%	47,84%	70,53%
47,08%	58,74%	60,93%	43,26%	41,35%	66,82%
43,54%	52,38%	54,53%	42,47%	36,18%	60,82%
38,46%	46,74%	48,71%	41,15%	28,89%	53,26%
42,00%	46,64%	47,98%	42,85%	32,34%	54,25%

Tabela 5.2.Comparação entre os Métodos de Tratamento do Sinal Pistonado no Sensor de Hélices nº2

Fração Real	Met. Simples c/ 1 Limite	Met. Simples c/ 2 Limites	Met. Deriv. c/ 1 Limite (-0,5 Volt)	Met. Deriv. c/ 2 Limites (+/- 6 volts)	Método da Integral
57,85%	55,40%	78,22%	56,50%	40,58%	84,73%
56,00%	48,97%	57,65%	53,24%	50,69%	43,20%
53,23%	50,03%	58,48%	49,69%	54,78%	58,79%
47,08%	51,99%	64,72%	46,49%	45,75%	59,76%
43,54%	54,68%	69,80%	42,00%	43,94%	64,79%
38,46%	54,92%	63,28%	38,33%	26,24%	56,14%
42,00%	53,23%	60,66%	41,84%	27,08%	54,72%

5.1.3 Medidas Estáticas em Condições Trifásicas

Sabemos que o sistema linear proposto no capítulo 4 para cálculo de fração volumétrica em escoamento trifásico pode ser aplicado somente na faixa onde há uma relação linear entre o sinal capacitivo e fração volumétrica. De acordo com nossos experimentos bifásicos, isso ocorre aproximadamente entre 20% e 80% de fração de líquido na tubulação. Para a

verificação do modelo proposto, realizamos alguns testes trifásicos estáticos. Estes serviram para avaliar o desempenho da sonda em condições que simulam um escoamento trifásico óleo-água-ar estratificado. A Tabela 5.3 mostra a proporção (frações) dos fluidos utilizados nesse teste.

Através dos testes trifásicos é possível notar que em nenhuma das medidas o valor da fração de um dos fluidos foi menor que 20%; esse cuidado foi tomado para garantir leituras numa região linear. O procedimento de teste foi o mesmo adotado durante a calibração estática. Utilizamos o analisador de impedância, pois o nosso circuito transdutor não se mostrou suficientemente preciso em algumas medidas. Utilizando a capacitância medida no sensor e com base nas medidas anteriores feitas em condições bifásicas (líquido-líquido e gás-líquido) calculamos de forma inversa os coeficientes da matriz do modelo trifásico mostrado na Equação 4.5. Sendo assim, nosso modelo fica ajustado da seguinte maneira.

Fração de Água (%)	Fração de Ar (%)	Fração de Óleo (%)	Capacitância Sensor de Anéis (nF)	Capacitância Sensor de Hélices (nF)
20	60	20	7,07998	9,02017
30	50	20	7,35967	9,16232
30	40	30	7,45001	9,26998
30	30	40	7,55078	9,38412
40	20	40	7,82519	9,52667

Tabela 5.3.Frações de Fluidos Utilizadas no Teste Trifásico Estático

$$\begin{bmatrix} 9,08943 & 7,30088 & 6,34533 \\ 9,93837 & 9,62187 & 8,51287 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_w \\ a_o \\ a_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{an} \\ C_{he} \\ 1 \end{bmatrix}$$

A ordem de grandeza dos valores dos coeficientes mostrados na matriz anterior é de picofarad. Este sistema de equações utiliza o sinal de capacitância e não de tensão para o calculo das frações. Isso ocorre porque com o analisador de impedância só é possível ler esta grandeza. Utilizando a Equação 4.3 poderiamos estimar teoricamente o valor de tensão que

seria registrado na saída do circuito transdutor. Observe que numa condição trifásica a variação máxima de capacitância é em torno de 0,7 pF e ocorre no sensor de anéis. Isso implica que para efetuar esta medida necessitariamos de um medidor bastante sensível e preciso que garantisse o resultado da leitura, pois caso contrário poderemos incorrer num erro numérico.

5.2 Erros e tolerâncias

Observamos que a qualidade dos resultados, *i.e.*, da curva de calibração levantada, depende do padrão de escoamento. Para cada situação experimental adotada durante a calibração foi feita uma análise de erro de forma a demonstrar o grau de confiabilidade da medida e avaliar a técnica proposta. As Tabelas 5.4 e 5.5 mostram os erros associados às medidas considerando os padrões anular, bolhas e estratificado calculados para os dois modelos de sensores. As comparações destes dados, *i.e.*, os erros relativos, foram feitas com base nas curvas de calibração propostas nas Figura s 5.1 e 5.2. A equação a seguir mostra como foi calculado o erro para todas as análises de resultados que foram feitas.

$$Erro = \frac{\sqrt{(x - \overline{x})^2}}{\overline{x}}.100$$

Através dos dados das Tabelas. 5.4 e 5.5 observamos que há uma boa concordância quantitativa dos resultados dinâmicos quando nos referimos aos padrões estratificado e bolhas. Para o padrão de escoamento anular, por sua vez, o nosso medidor capacitivo oferece leituras que fogem completamente do valor obtido via válvulas de fechamento rápido.

A seguir apresentaremos os pontos atribuídos ao padrão de escoamento pistonado. O gráfico do mesmo foi levantado utilizando a técnica de reconstrução do sinal através da sua derivada com corte simples. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram como cada sensor se comporta.

Os pontos da Figura 5.10 são mostrados na Tabela 5.6. Nela podemos comparar quantitativamente o valor medido pelo circuito transdutor após o tratamento de seu sinal de resposta e o resultado real medido com a proveta. É possível observar que na região circulada, abaixo de 25% de fração de água, a técnica não funciona perfeitamente, resultando num erro muito grande. A mesma análise foi feita considerando o sensor de hélices na Figura 5.11 a seguir.

	Tensão (volts)	Fração Volumétrica (%)	Cálculo da Fração com a Equação de Calibração (SENSOR DE ANÉIS)	ERRO (%)
00	0,19	4,31	4,09	5,35
CAI	0,30	6,31	7,21	12,50
IFI	0,32	6,46	7,70	16,15
AT	0,28	8,00	6,68	19,75
TR	0,58	15,77	15,05	4,77
ES	5,04	100,00	94,67	5,63
	5,04	81,00	94,63	14,40
IAS	5,09	81,00	93,92	13,76
ILH	5,04	82,00	94,67	13,38
BC	5,16	90,00	92,84	3,06
	5,07	94,00	94,29	0,30
	0,97	2,46	26,55	90,74
	1,01	3,08	27,71	88,89
	1,02	3,38	27,96	87,91
	1,11	3,54	30,74	88,49
¥	1,11	3,85	30,53	87,39
JLA	1,84	6,00	52,44	88,56
N	1,76	6,00	50,26	88,06
•	1,18	7,69	32,86	76,60
	2,34	8,46	66,79	87,33
	2,33	9,38	66,28	85,85
	3,23	17,38	87,15	80,06
	3,32	17,84	88,80	79,91

Tabela 5.4.Cálculo de Erro no Sensor de Anéis nº2

Em ambos os casos, embora a comparação global dos resultados estáticos e dinâmicos se ajustem, em alguns casos um comportamento errôneo é observado. Esse comportamento pode ser visto nos gráficos na região limitada pelo circulo (Figuras 5.10 e 5.11). Nessa região foi observada experimentalmente transição para o padrão anular. Desta forma, fica claro que o método utilizado nesta região não está bem ajustado, já que foi desenvolvido para padrão de escoamento pistonado. Nas Tabelas. 5.6 e 5.7 são feitas análises de erro com base na nas medidas volumétricas da proveta e do circuito transdutor.

	Tensão (volts)	Fração Volumétrica (%)	Cálculo da Fração com a Equação de Calibração (SENSOR DE HÉLICES)	ERRO (%)
ESTRATIFICADO	0,80	4,31	4,73	8,92
	0,96	6,31	7,57	16,68
	0,88	6,46	6,09	6,00
	1,00	8,00	8,53	6,26
	1,23	15,77	14,21	11,02
	5,01	100	88,59	12,88
BOLHAS	5,02	81,00	88,23	8,19
	5,01	81,00	88,64	8,62
	5,02	82,00	88,22	7,05
	5,12	90,00	84,12	6,99
	5,05	94,00	87,15	7,86
ANULAR	4,27	2,46	102,71	97,61
	4,28	3,08	102,69	97,00
	4,30	3,38	102,63	96,71
	4,09	3,54	102,34	96,54
	4,08	3,85	102,26	96,24
	4,72	6,00	97,37	93,84
	4,65	6,00	98,95	93,94
	4,19	7,69	102,71	92,51
	4,92	8,46	91,90	90,80
	4,88	9,38	93,17	89,93
	5,05	17,38	87,30	80,09
	5,06	17,84	86,71	79,43

Tabela 5.5.Cálculo de Erro no Sensor de Hélices nº2



Figura 5.10. Gráfico de Calibração no Regime Pistonado com o Sensor de Anéis nº 2



Figura 5.11. Gráfico de Calibração no Regime Pistonado com o Sensor de Hélices nº 2

Observamos também um provável princípio de transição para o padrão bolhas para frações de líquido superiores a 70%. As regiões de transição, em nosso caso, encontram-se abaixo de 20% e acima de 70% de fração de água, considerando sempre as razões de vazões de ar e água impostas na tubulação. Os demais pontos traçados nos gráficos (Figuras 5.10 e 5.11) possuem uma leve tendência ascendente, logo seria possível neste trecho levantar uma curva de calibração.
Fração Real	Tensão Média (volts)	Método da Derivada com Corte Simples	ERRO(%)
11,08%	2,71	46,45%	319,23
13,23%	3,08	45,22%	241,76
15,85%	3,26	45,43%	186,64
18,46%	2,35	47,20%	155,71
24,92%	2,77	42,06%	68,77
38,46%	3,34	41,15%	7,00
42,00%	3,44	42,85%	2,03
42,46%	4,18	41,56%	2,12
42,61%	3,99	44,56%	4,58
43,54%	3,88	42,47%	2,47
46,31%	3,77	43,82%	5,39
47,08%	4,13	43,26%	8,11
49,23%	4,58	47,94%	2,63
51,69%	4,58	48,58%	6,01
53,23%	4,67	47,80%	10,19
54,61%	4,77	59,57%	9,08
54,77%	4,66	52,72%	3,75
56,00%	4,79	51,89%	7,35
57,85%	4,97	57,80%	0,08
69,23%	4,73	50,25%	27,42
71,38%	4,76	49,71%	30,35

Tabela 5.6. Análise com Base no Sinal da Derivada Utilizando o Corte Simples no Sensor de Anéis nº2 para o Padrão Pistonado(corte -1,5 volts)

Uma análise de erro também foi feita para avaliar o grau de precisão de nossa sonda na determinação das frações num modelo trifásico. A Tabela 5.8 mostra o erro relativo da medida (o leitor deve se referir também à Tabela 5.3).

Notamos que o erro relativo associado à medida é muito pequeno, o que, em princípio, valida a sonda duplo-sensor proposta para medições de fração volumétrica em escoamento trifásico. Porém, no primeiro caso o erro se evidenciou devido à falta de estabilidade na acomodação das fases e por conta dos efeitos de borda. A Figura 5.12 mostra o efeito causado entre a superfície de óleo e a superfície da tampa da tubulação de teste.

Fração Real	Tensão Média (volts)	Método da Derivada com Corte Simples	ERRO(%)
11,08%	5,33	49,00%	342,27
13,23%	5,35	48,83%	269,05
15,85%	5,45	48,89%	208,42
18,46%	4,04	41,66%	125,68
24,92%	4,40	34,55%	38,63
38,46%	4,73	38,33%	0,35
42,00%	4,74	41,84%	0,39
42,46%	5,05	42,47%	0,02
42,61%	4,72	42,41%	0,47
43,54%	4,96	42,00%	3,54
46,31%	4,53	42,74%	7,70
47,08%	5,05	46,49%	1,25
49,23%	5,25	49,23%	0,01
51,69%	5,25	49,51%	4,22
53,23%	5,29	49,69%	6,64
54,61%	5,30	55,76%	2,11
54,77%	5,30	53,42%	2,47
56,00%	5,32	53,24%	4,93
57,85%	5,33	56,50%	2,34
69,23%	4,87	52,41%	24,30
71,38%	4,90	51,65%	27,64

Tabela 5.7. Análise com Base no Sinal da Derivada Utilizando o Corte Simples no Sensor de Hélices nº2 para o Padrão Pistonado (corte -0,5 volts)

Tabela 5.8 Erro Relativo do Modelo Trifásico

	Erro da Água	Erro do Óleo	Erro do Ar
1° Medida	1,813E-02	2,511E-02	2,326E-03
2° Medida	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
3° Medida	5,238E-03	3,005E-03	6,183E-03
4° Medida	1,953E-04	1,883E-04	5,574E-05
5° Medida	2,197E-04	2,824E-04	1,254E-04



Figura 5.12. Efeito de Borda na Seção de Teste Estático

Para atenuar os efeitos de borda utilizamos uma seção de teste com comprimento maior (1500 milímetros). Porém, foi difícil obter duas camadas líquidas uniformes dentro da tubulação de teste. Isto acontece porque a camada de água é muito fina inicialmente e o óleo tende a envolve-la numa bolha. O mesmo acontece com o ar na medida em que as frações de água e óleo aumentam dentro da tubulação.

Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base em todo material apresentado nesta dissertação é possível avaliar e concluir de forma consistente as vantagens e limitações da instrumentação que estamos propondo. Os sensores propostos são muito suscetíveis a mudanças de temperatura e umidade; isso faz com que seja necessário o ajuste do circuito transdutor a cada variação da temperatura ambiente. O circuito transdutor, por sua vez, excetuando a ponte capacitiva, não apresentou limitações dessa natureza. Para resolver este inconveniente seria necessária a utilização de um capacitor acoplado ao circuito fisicamente idêntico ao modelo de nosso sensor utilizado na linha de teste. Assim ambos variariam suas propriedades de forma semelhante, evitando a interferência de fatores externos. Uma avaliação pertinente poderia ser feita para verificar qual a variação máxima possível de temperatura que pode ser admitida sem que haja perda de precisão da leitura do sensor.

O sensor de anéis tem uma resposta mais rápida e menos intensa sendo mais imune a mudanças no padrão de escoamento. Já o sensor de hélices é relativamente sensível ao padrão, porém forma um campo elétrico mais intenso. Em ambos os sensores é possível medir padrões de escoamento estratificado com boa precisão; isso não acontece em padrões de escoamento anular ou pistonado. Uma das possíveis explicações é a variação significativa da pressão interna do ar escoante. Este fenômeno pode ser explicado fisicamente por uma possível dependência entre a densidade do ar e a permissividade elétrica. Para a utilização comercial desta técnica uma solução viável seria a utilização de curvas de calibração diferentes para cada padrão observado nos testes, evitando assim o efeito causado pela dependência do padrão. Os piores resultados alcançados foram obtidos no padrão anular, pois neste arranjo espacial há uma tendência do campo elétrico fluir em torno do anel de líquido,

que tem maior permissividade durante o escoamento. Os outros regimes de escoamento, embora com erros associados menores, requerem um circuito transdutor eficiente e com boa precisão. O tratamento dos resultados do padrão pistonado pode ser melhorado, porém para não fugir do escopo deste trabalho está pesquisa foi pouco aprofundada. Observamos que as regiões onde os pontos do padrão pistonado não se ajustavam correspondiam justamente a regiões de transição. Neste caso uma análise somente quantitativa seria ineficiente para caracterizar a confiabilidade da medida. A linearidade do medidor concentra-se principalmente numa faixa de fração volumétrica (20 a 80% de liquido), pois não há uma relação linear entre a voltagem e a permissividade elétrica.

O modelo trifásico, em caráter prospectivo, pode ser aplicado dentro da região onde o sinal de tensão se comporte de maneira linear em relação à variação de fração volumétrica. Para isso, a sensibilidade e precisão do medidor utilizado são os fatores mais importantes que devem ser observados. O equipamento utilizado para medir composições trifásicas tem uma precisão boa para este tipo de medida, mas sua utilização deve ser justificada economicamente, pois somente conseguimos medir tais frações em condições controladas de laboratório. Um método mais apropriado neste caso deve ser determinado para o levantamento dos coeficientes que satisfaçam sistema linear proposto.

As medidas podem apresentar valores incoerentes se não for observado o posicionamento do sensor de hélices e a inclinação da tubulação onde esta sendo feita a medida. Efeitos de borda neste caso podem interferir fortemente no resultado da medida, já que o óleo que utilizamos era bastante viscoso. Este efeito tende a se atenuar quando as frações de líquido aumentam, porém, para a calibração, é de bom sensor deixar que a composição descanse tempo suficiente para que as fases se acomodem uniformemente ao longo da seção. Outra forma de evitar esses efeitos é utilizar uma seção de calibração tão extensa quanto possível.

Esta pesquisa se mostrou eficiente do ponto de vista elucidativo, pois indica caminhos possíveis a serem seguidos em direção a um modelo capacitivo mais adequado para resolver os problemas práticos ainda existentes. Com este intuito listamos a seguir algumas sugestões possíveis para trabalhos futuros:

- Estudar teoricamente o comportamento do campo elétrico de forma a definir mais claramente os seus limites, buscando sempre de um modelo de geometria capacitiva que tenha uma configuração mais eficiente do ponto de vista da qualidade do sinal;
- Verificar de forma prática em que faixas de variação de temperatura há pouca ou nenhuma influência no sinal de capacitância do sensor;
- Desenvolver uma metodologia de tratamento dos sinais do padrão de escoamento pistonado avaliando as possíveis limitações dos modelos propostos neste trabalho;
- Desenvolver um circuito transdutor mais preciso e mais robusto do ponto de vista construtivo, visto que em alguns dos circuitos utilizados identificamos defeitos devidos à forma de confecção de suas trilhas;
- Avaliar a possibilidade da adoção de um modelo capacitivo em função do padrão de escoamento, *i.e.*, a aplicação de uma curva de calibração para cada padrão de escoamento detectado.
- 6. Estudo do relacionamento existente entre a densidade do ar e sua permissividade elétrica, pois este fenômeno pode ser pouco intenso numa linha de teste limitada experimentalmente, mas pode ter forte influência, por exemplo, em condições de transporte contínuo a longa distância de óleo pesado e gás.



Anexo A – Gráficos do Analisador de Impedância

Análise da Freqüência de Excitação com Água na Sonda nº 1



Análise da Freqüência de Excitação com Água na Sonda nº 2



Análise da Freqüência de Excitação com Água na Sonda nº 3



Análise da Freqüência de Excitação com Ar na Sonda nº 1



Análise da Freqüência de Excitação com Ar na Sonda nº 2



Análise da Freqüência de Excitação com Ar na Sonda nº 3



Análise da Freqüência de Excitação com Óleo na Sonda nº 1



Análise da Freqüência de Excitação com Óleo na Sonda nº2



Análise da Freqüência de Excitação com Óleo na Sonda nº 3



Anexo B – Gráficos com Tubo Cheio de Fluido

Sensor de Duplas Hélices com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 1



Sensor de Anéis Duplos com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 1



Sensor de Duplas Hélices com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 2



Sensor de Anéis Duplos com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 2



Sensor de Duplas Hélices com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 3



Sensor de Anéis Duplos com Tubo de Vidro Cheio – Sensor 3



Anexo C – Gráficos de Calibração Bifásico

Sensor de Hélices nº 1 com Água e Ar



Sensor de Anéis nº 1 com Água e Ar



Sensor de Hélices nº 2 com Água e Ar



Sensor de Anéis nº 2 com Água e Ar



Sensor de Hélices nº 3 com Água e Ar



Sensor de Anéis nº 3 com Água e Ar

Apêndice A – Placas de Orifício para Fluidos Incompressíveis

Considerando um escoamento laminar em regime permanente, podemos aplicar a equação de Bernoulli.

$$P_{1} + \frac{u_{1}^{2} \cdot \rho}{2} = P_{2} + \frac{u_{2}^{2} \cdot \rho}{2}$$
$$u_{2}^{2} - u_{1}^{2} = (P_{1} - P_{2}) \cdot \frac{2}{\rho} \qquad (4.6)$$

- u_1 velocidade a montante da placa;
- u_2 velocidade a jusante da placa;
- P_1 pressão a montante da placa;
- P₂ pressão a jusante da placa.

Se considerarmos o escoamento incompressível a vazão é constante em toda linha e da equação da continuidade temos:

$$u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2$$

 $u_1 = \frac{u_2 \cdot A_2}{A_1}$ (4.7)

Substituindo a Eq. 4.7 em 4.6 temos:

$$u_{2}^{2} - u_{2}^{2} \cdot (\frac{A_{2}}{A_{1}})^{2} = (P_{1} - P_{2}) \cdot \frac{2}{\rho}$$
$$u_{2}^{2} [1 - (\frac{A_{2}}{A_{1}})^{2}] = (P_{1} - P_{2}) \cdot \frac{2}{\rho}$$

$$u_{2} = \sqrt{\frac{2(P_{1} - P_{2})}{\rho . [1 - (\frac{A_{2}}{A_{1}})^{2}]}}$$

Como o produto da vazão (Q) e da densidade (ρ) resulta a vazão mássica (m) é válida a Eq. 4.8.

$$\dot{m} = Q.\rho = \frac{A_2.\sqrt{2.\rho.(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - (\frac{A_2}{A_1})^2}}$$
(4.8)

Segundo a norma ASME MFC-3M-1989, no equacionamento desenvolvido acima deve ser incorporado mais um termo, que caracteriza o escoamento turbulento. Este termo é denominado coeficiente de descarga (C_d), logo a Eq. 4.9 é que realmente deve ser utilizada para o calculo de vazões neste dispositivo. A área A_f corresponde ao orifício da placa, $A_I e A_2$ estão relacionados ao diâmetro da tubulação onde se coleta as pressões.

$$\dot{m} = C_d \cdot \frac{A_f \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - (\frac{A_2}{A_1})^2}}$$
$$\dot{m} = C_d \cdot \frac{A_f \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - (\beta)^4}} \qquad (4.9)$$

O coeficiente de descarga pode ser teoricamente calculado através da Eq. 4.10 a seguir, o beta (β) neste caso é somente uma razão de diâmetros elevado ao quadrado.

$$C_{d} = 0,5959 + 0,0312.\beta^{2,1} - 0,184.\beta^{8} + 91,71.\beta^{2,5}.(\frac{4.m}{\pi.\mu.D_{1}})$$
(4.10)

•

- μ viscosidade dinâmica do fluido;
- $D_l Di \hat{a}metro interno da tubulação.$

Apêndice B – Placas de Orifício para Fluidos Compressíveis

Em termos gerais um termo de expansão (E) deve ser utilizado e a Eq.4.9 fica modificada na forma da Eq. 4.11.

$$\dot{m} = C_d \cdot E \cdot \frac{A_f \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - (\beta)^4}} \qquad (4.11)$$

O fator de expansão (*E*), é definido segundo a norma ASME MFC-3M-1989, conforme mostra a Eq. 4.12.

$$E = 1 - \frac{(0,41+0,35.\beta^4).\Delta P}{K.P_1}$$
 (4.12)

O módulo de elasticidade volumétrica (K) pode ser obtido pela razão entre os calores específicos a pressão e a volume constante. A pressão (P_1) deve ser medida a montante da placa de orifício e a densidade do ar deve ser calculada considerando o seu comportamento como o de um gás perfeito como mostra a Eq. 4.13.

$$\rho = \frac{P_1}{R.T_1} \quad \textbf{(4.13)}$$

Referências Bibliográficas

ABOUELWAFA, M.S.A.; KENDALL, E.J.M. (1980). The Use of capacitance sensors for phase percentage determination in multiphase pipelines. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v.IM-29, n.1, p.24-27.

ALKAYA, B.; JAYAWARDERNA, S.S.; BRILL, J.P. (2000). Oil-water flow patterns in slightly inclined pipes. **Energy for the New Millenium**, v.14, n.17, p.1-8.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (1990). **Design and operation of oil-water separators**. Tacoma: Tacoma Public Works Environmental Service. (Publication 421). Disponível em:<http://www.ci.tacoma.wa.us/environmentalservices/>. Acesso em: dia Jan. 2006.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (1989). MFC-3M-1989: Measurement of fluid in pipes using orifice nozzle and venture. New York: ASME.

ARIRACHAKARAN, S. (1983). An Experimental study of two-phase oil-water flow in horizontal pipes. Ph.D.Thesis - The University of Tulsa, Tulsa, 1983.

BAXTER, L.K. (1997). Capacitive sensors: design and applications. New York: IEEE.

BANNWART, A.C. et al. (2004). Flow pattern in heavy crude oil-water flow. **Transactions** of the ASME, New York: v.126, n. , p.184-189.

BECK, M.S. et al. (1990). Capacitance measurement applied to a pneumatic conveyor with very low solids loading. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v.1, n.7, p.561-564, July.

CHUN, M.H.; SUNG, C.K. (1986). Parametric effects on the void measurement by capacitance transducer. International Journal of Multiphase Flow, Oxford, v.12, n.4, p.627-640, July/Aug.

DUARTE, L.G.C.; PRATA, A.T. (2002). Capacitive sensor calibration for measurement void fraction in two phase flows. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL ENGINEERING AND SCIENCES, 9., 2002, Caxambu. **Proceedings...** Caxambu: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas. CIT02-0714.

ELLISON, W.J.; LAMKAOUCHI, K.; MOREAU, J.M. (1996). Water – a dielectric reference. Journal of Molecular Liquids, Amsterdam, v.68, n.1/2, p.171-279, Apr.

GERAETS, J.J.; BORST, J.C. (1988). A Capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v.14, n.3, p.305-320, May/June.

HAMMER, E.A.; TOLLEFSEN, J.; OLSVIK, K. (1989). Capacitance transducers for nonintrusive measurement of water in crude oil. **Flow Measurement and Instrumentation**, New York, v.1, n.1, p.51-58, Oct. HEERENS, W.C. (1986). Application of capacitance techniques in sensor design. Journal of Physics E - scientific instruments, Bristol, v.19, n.11, p.896-906, Nov.

HUANG, S.M. et al. (1988). Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. Journal of Physics E - scientific instruments, Bristol, v.21, n.3, p.242-250, Mar.

JAWOREK, A.; KRUPA, A. (2004). Gas/liquid ration measurements by rf resonance sensor. **Sensors and Actuators A**: physical, Amsterdam, v.113, n.2, p.133-139, July.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; TRELA, M. (2003). Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam. **Flow Measurement and Instrumentation**, New York, v.15, n.5/6, p.317-324, Oct./Dec.

KENDOUSH, A.A.; SARKIS, Z.A. (1995). Improving the accuracy of the capacitance method for void fraction measurement. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v.11, n.4, p.321-326, Nov.

MA, Y.P.; CHUNG, N.M.; PEI, B.S. (1991). Two simplified methods to determination void fraction for two-phase flow. **Nuclear Technology**, Vienna, v.94, n. , p.124-133.

MARIOLI, D.; SARDINI, E.; TARONI, A. (1991). Measurement of small capacitance variations. **IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement**, New York, v.40, n.2, p.426-428, Apr.

_____. (1993). High-accuracy measurement techniques for capacitance transducers. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v.4, n.3, p.337-343, Mar.

MENG, G.; JAWORSKI, A.J.; KIMBER, J.C.S. (2006). A multi-electrode capacitance probe for phase detection in oil-water separation processes: design, modeling and validation. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v.17, n.4, p.881-894, Apr.

ODDIE, G. et al. (2003). Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes. **International Journal Multiphase Flow**, Oxford, v.29, n.4, p.527-558, Apr.

RAJAN, V.S.; RIDLEY, R.K.; RAFA, K.G. (1993). Multiphase flow measurement techniques. Journal of Energy Resources Technology, New York, v.115, n.3, p.151-161, Sept.

REIS, E. (2003). Study of pressure drop and phases distribution of the horizontal airwater slug flow in pipelines with "T" branch arms. Ph.D.Thesis – University of Campinas, Campinas, 2003.

REIS, E.; GOLDSTEIN, L. (2005). A non-intrusive probe for bubble profile and velocity measurement in horizontal slug flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, New York, v.16, n.4, p.229-2398, Aug.

REIS, E.; GOLDSTEIN, L. (2005). A procedure for correcting for the effect of fluid flow temperature variation on the response of capacitive void fraction meters. **Flow Measurement and Instrumentation**, New York, v.16, n.4, p.267-274, Aug.

SELEGHIM JÚNIOR, P.; MILIOLI, F.E. (2001). Improving the determination of bubble size histograms by wavelet de-noising techniques. **Powder Technology**, Lausanne, v.115, n.2, p.114-123, Apr.

SCHULLER, R.B. et al. (2004). Measurement of water concentration in oil/water dispersions with a circular single-electrode capacitance probe. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v.53, n.5, p.1378-1383, Oct.

STOTT, A.L.; GREEN, R.G.; SERAJ, K. (1985). Comparasion of the use of internal and external electrodes for the measurement of the capacitance and conductance of fluids in pipes. **Science and Instrumentation**, v.18, n.7, p.587-592.

TEYSSEDOU, A.; TYE, P. (1999). A capacitive two-phase flow slug detection system. **Review of Scientific Instruments**, Rochester, v.70, n.10, p.3942-3948, Oct.

TOLLEFSEN, J.; HAMMER, E.A. (1998). Capacitance sensor design for reducing errors in phase concentration measurements. **Flow Measurement and Instrumentation**, New York, v.9, n.1, p.25-32, Mar.

TRALLERO, J.L.; SARICA, C.; BRILL, J.P. (1997). A Study of oil/water flow patterns in horizontal pipes. Society of Petroleum Engineers. p.165-172.

XIE, C.G. et al. (1990). Design of capacitance electrodes for concentration measurement of two-phase flow. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v.1, n.1, p.65-78, Jan.

YANG, W.Q.; BECK, M.S. (1994). High frequency and high resolution capacitance measuring circuit for process tomography. **IEE Proceedings G** - circuits devices systems, New York, v.141, n.3, p.215-219, June.

ZUBER, N.; FINDLAY, J.A. (1965). Averange volumetric concentration in two-phase flow systems. **Journal of Heat Transfer**, New York, v.87, n.4, p.453-468, Nov.