

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Flávio Tambellini

E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 30 / 07 / 99.

Luiz Felipe Moura
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Estudo Experimental e Numérico da Tomografia Elétrica Aplicada a Sistemas Bifásicos

Autor: **Flávio Tambellini**

Orientador: **Luiz Felipe Mendes de Moura**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS**

Estudo Experimental e Numérico da Tomografia Elétrica Aplicada a Sistemas Bifásicos

Autor: Flávio Tambellini

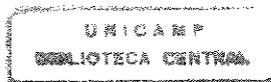
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1999
S.P.- Brasil



UNIDADE BC
 N.º CHAMADA:
TUNICAMP
T151e
 V. Ex.
 TOMBO BC/ 39684
 PROC. 229199
 C D
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA 02-12-99
 4.º CPD

CM-00137478-6

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

T151e Tambellini, Flávio
 Estudo experimental e numérico da tomografia elétrica aplicada a sistemas bifásicos / Flávio Tambellini.--
 Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Tomografia. 2. Escoamento bifásico. 3. Campos elétricos. 4. Circuitos eletrônicos. 5. Simulação (Computadores). I. Moura, Luiz Felipe Mendes de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

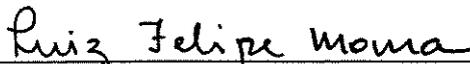
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDO**

TESE DE DOUTORADO

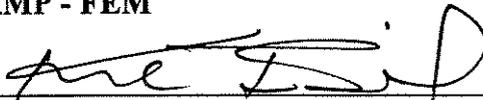
Estudo Experimental e Numérico da Tomografia Elétrica Aplicada a Sistemas Bifásicos

Autor: Flávio Tambellini

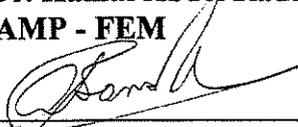
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura



**Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura, Presidente
UNICAMP - FEM**



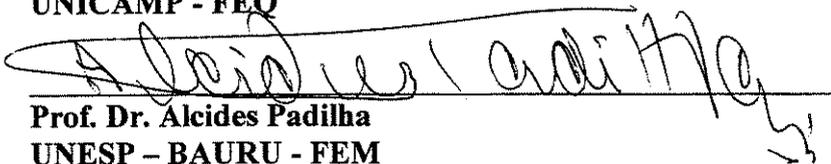
**Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail
UNICAMP - FEM**



**Prof. Dr. Antônio Carlos Bannwart
UNICAMP - FEM**



**Prof. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
UNICAMP - FEQ**



**Prof. Dr. Alcides Padilha
UNESP - BAURU - FEM**

Campinas, 30 de julho de 1999

Agradecimento Especial

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de uma pessoa muito especial, ao qual presto minha homenagem:

Ao meu orientador, Luiz Felipe Mendes de Moura, pelos conhecimentos transmitidos, pela troca de sabedoria, pela compreensão e paciência nos momentos difíceis, pelo despreendimento e confiança depositada para que eu pudesse concluir este trabalho. Agradeço por ter ampliado o meu caminho, adquirindo um conhecimento mais seguro para prosseguir nesta jornada da vida.

Obrigado por tudo o que aconteceu nestes momentos em que estivemos juntos.

Também gostaria de fazer um agradecimento especial para o professor Francisco Antônio Belo pela construção do circuito eletrônico, pela atenção dada para os procedimentos necessários para a execução dos testes experimentais.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Ao professor Petronio e Renato Pavanello pelas orientações e contribuições referentes ao método de elementos finitos.

Ao técnico Luiz Gama pela confecção do sensor utilizado nas medidas experimentais.

Aos técnicos Luiz Antônio Zanaga e Setembrino que contribuíram com idéias e soluções com os obstáculos encontrados durante todo o tempo dedicado à tese.

Ao desenhista Wilton Furquim, ao meu grande amigo Azamor e à minha amiga Graça pela confecção dos desenhos e na colaboração da tese.

À secretaria Cleusa pelos serviços prestados, no sentido de atender aos alunos nas necessidades do dia-a-dia e ao Eloy pela amizade durante todo esse tempo.

Ao pessoal do Sifem, que tem prestado serviço na área de informática, dando suporte e fazendo as manutenções necessárias para o bom funcionamento dos micros e estações de trabalho.

Aos meus pais pelo incentivo e carinho dados em todos os momentos da vida.

À minha família, Rodrigo e Maria do Carmo, pelo incentivo, carinho e compreensão dada para a conclusão deste trabalho.

A todos os professores e colegas do departamento que ajudaram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste trabalho.

À minha avó, Irma Lubrani Tambellini, (in memoriam) pelas orientações espirituais para eu seguir um caminho justo e bom.

“O homem que apenas crê e não procura refletir se esquece de que é alguém constantemente exposto à dúvida, seu mais íntimo inimigo, pois onde a fé domina, ali também a dúvida está sempre à espreita. Para o homem que pensa, porém, a dúvida é sempre bem recebida, pois ela lhe serve de preciosíssimo degrau para um conhecimento mais perfeito e mais seguro”

Carl Gustavo Jung

Resumo

Tambellini, Flávio, *Estudo Experimental e Numérico da Tomografia Aplicada a Sistemas Bifásicos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 205 p. Tese (Doutorado)

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma análise da tomografia de capacitância elétrica aplicada ao sistema bifásico, onde os componentes são ar e água, visando obter a reconstrução de imagem deste sistema. A tomografia de capacitância é constituída de um sensor com 8 eletrodos localizados em torno de um tubo de acrílico e um transdutor eletrônico baseado em corrente alternada, cuja frequência de excitação pode atingir até 16 MHz. Foi feita a calibração do transdutor eletrônico e esta comparada com as curvas teóricas. Testes experimentais e simulações numéricas foram realizados, sendo os resultados comparados para frações de líquido variando de 0,1 a 0,95. A imagem foi reconstruída usando o algoritmo de retro-projeção linear, juntamente com a utilização da técnica de filtro para melhorar a imagem reconstruída e com uma estimativa da fração de líquido, obtida a partir de uma correlação entre a fração de líquido volumétrica e as capacitâncias experimentais. As informações necessárias para o algoritmo são as medidas experimentais de capacitância, a fração de líquido estimada e a distribuição de sensibilidade, sendo esta última, obtida a partir de simulações numéricas. Os resultados são apresentados, as limitações descritas e propostas de melhoria para trabalhos futuros apresentadas.

Palavras Chave

Tomografia, Escoamento Bifásico, Campos Elétricos, Circuitos Eletrônicos, Simulação (Computadores).

Abstract

Tambellini, Flávio, *Experimental and Numerical Study of Electrical Tomography Applied to the Two-Phase Systems*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 205 p. Tese (Doutorado)

The main objective of this work is the analysis of the electrical capacitance tomography for imaging of two-phase system, where the components are water and air. The capacitance tomography is consists by a sensor built with eight electrodes around an insulating pipe. An electronic transducer based in alternated current was developed to support excitation frequency up to 16 MHz. The calibration of the electronic transducer was made and compared with the theoretical curves. Numerical and experimental tests were made and the results compared for liquid fractions ranging from 0,1 to 0,95. The image was reconstructed using the linear back projection algorithm. A filtering technique was applied to the algorithm to improve the image quality. A liquid fraction estimative was obtained from the correlation of volumetric liquid fraction and experimental capacitances. The necessary information to the algorithm are the experimental measurements of capacitance, the estimated liquid fraction and sensitivity distribution. The results are shown, the limitations are described and the improvement of this technique to the future works are indicated.

Keywords

Tomography, Two-Phase Flow, Electrical Fields, Electronic Circuits, Simulation (Computers).

Índice

| | |
|---|-----|
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de Tabelas | xiv |
| Nomenclatura | xv |
| | |
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 – Objetivo da Tese | 7 |
| 1.2 – Metodologia | 8 |
| | |
| 2 – REVISÃO DE LITERATURA | 9 |
| 2.1 – Técnicas de Tomografia em Escoamentos Multifásicos | 9 |
| 2.2 – Sistema de Tomografia de Capacitância | 15 |
| 2.3 – Circuitos Eletrônicos | 31 |
| 2.4 – Algoritmo de Reconstrução de Imagem | 39 |
| | |
| 3 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA | 45 |
| 3.1 – Princípios da Tomografia de Capacitância Elétrica | 45 |
| 3.2 – Objetivos e Etapas da Simulação Numérica | 47 |
| 3.3 – Discretização da Malha | 48 |
| 3.4 – Equação de Laplace e as Condições de Contorno | 51 |
| 3.5 – Cálculo da Capacitância através da Simulação Numérica – Método Direto | 54 |
| 3.5.1 – Simulação numérica de um sistema bifásico do tipo estratificado | 55 |
| 3.5.2 – Cálculo da distribuição de sensibilidade | 56 |
| 3.6 – Problema Inverso - Algoritmo de Reconstrução de Imagem | 58 |

| | |
|--|-----|
| 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 63 |
| 4.1 – Descrição do Experimento | 63 |
| 4.2 – Transdução Eletrônica da Tomografia Capacitiva | 66 |
| 4.3 – Calibração dos Transdutores | 74 |
| 4.4 – Comparação entre a Curva Teórica e a Curva de Calibração | 83 |
| 4.5 – Procedimento das Medidas | 86 |
| | |
| 5 – RESULTADOS | 92 |
| 5.1 – Análise da Repetibilidade dos Dados Experimentais | 93 |
| 5.2 – Escolha da Frequência | 95 |
| 5.3 – Soluções Analíticas e Numéricas | 96 |
| 5.4 – Simulação Numérica - Refinamento da Malha | 101 |
| 5.5 – Resultados da Simulação Numérica para Eletrodos Livres Flutuantes | 103 |
| 5.6 – Resultados Experimentais para Eletrodos Livres Flutuantes | 114 |
| 5.7 – Resultados para Eletrodos Livres Aterrados | 120 |
| 5.8 – Correlação entre as Capacitâncias Normalizadas e a Fração de Líquido | 123 |
| 5.9 – Reconstrução de Imagem | 125 |
| 5.9.1 – Comparação entre a imagem numérica, sem a técnica de filtro e com filtro | 128 |
| 5.9.2 – Apresentação das imagens reconstruídas utilizando a técnica de filtro | 134 |
| | |
| 6 – CONCLUSÃO | 141 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 145 |
| | |
| ANEXOS | |
| I – Programas para Gerar a Malha | 151 |
| II – Programas com Eletrodos Flutuantes | 161 |
| III – Programas com Eletrodos Aterrados | 171 |
| IV – Programas para o Cálculo da Distribuição de Sensibilidade | 179 |
| V – Calibração | 184 |

| | |
|--|-----|
| V.1 – Arquivos de entrada | 184 |
| V.2 – Propagação das incertezas para V_s/V_e | 188 |
| V.3 – Detalhes das curvas teóricas e experimentais | 190 |
| VI – Incerteza das Medidas Experimentais | 193 |
| VI.1 – Incerteza da capacitância normalizada das medidas experimentais | 193 |
| VI.2 – Incerteza da fração de líquido volumétrica | 194 |
| VII – Resultados da Simulação Numérica para Eletrodos Livres Aterrados | 196 |

Lista de Figuras

| | |
|--|-----|
| 1.1 – Sistema de tomografia com o uso de um sensor com 8 eletrodos | 3 |
| 2.1 – Representação esquemática da técnica de reconstrução: retro-projeção | 25 |
| 2.2 – Representação esquemática da técnica de reconstrução iterativa com o método dos elementos finitos | 25 |
| 2.3 – Representação esquemática da técnica de reconstrução: iterativa com linearização | 25 |
| 3.1 – Esquema geral da malha discretizada | 48 |
| 3.2 – Posicionamento dos 2 primeiros eletrodos na malha, sem escala | 50 |
| 3.3 – Esquema de eletrodos livres aterrados para um sensor com 8 eletrodos | 52 |
| 3.4 – Esquema de eletrodos livres flutuantes para um sensor com 8 eletrodos | 53 |
| 3.5 – Posicionamento e numeração dos setores do sensor | 61 |
| 4.1 – Esquema geral da bancada experimental | 63 |
| 4.2 – Disposição dos eletrodos no tubo | 64 |
| 4.3 – Detalhes do arranjo do sensor | 65 |
| 4.4 - Componentes da eletrônica de transdução capacitiva do tomógrafo | 67 |
| 4.5 – Sistema de transdução eletrônica | 69 |
| 4.6 – Diagrama de blocos dos circuitos eletrônicos | 70 |
| 4.7 - Diagrama geral das disposições de alimentação dos circuitos eletrônicos para transdução capacitiva | 70 |
| 4.8 – Fonte de tensão contínua | 71 |
| 4.9 – Gerador das senóides selecionado por chaves | 72 |
| 4.10 – Circuito da transdução eletrônica | 73 |
| 4.11 – Curva de calibração para frequência de 5 MHz | 75 |
| 4.12 – Curva de calibração para frequência de 11,5 MHz | 76 |
| 4.13 – Curva de calibração para frequência de 16,3 MHz | 77 |
| 4.14 - Distribuição dos resíduos para a frequência de 5 MHz | 79 |
| 4.15 - Distribuição dos resíduos para a frequência de 11,5 MHz | 79 |
| 4.16 - Distribuição dos resíduos para a frequência de 16,3 MHz | 80 |
| 4.17 – Curva teórica e experimental para a frequência de 5 MHz | 84 |
| 4.18 – Curva teórica e experimental para a frequência de 11,5 MHz | 84 |
| 4.19 – Curva teórica e experimental para a frequência de 16,3 MHz | 85 |
| 4.20 - Incertezas das capacitâncias normalizadas para a frequência de 5 MHz | 89 |
| 4.21 - Incertezas das capacitâncias normalizadas para a frequência de 11,5 MHz | 90 |
| 4.22 - Incertezas das capacitâncias normalizadas para a frequência de 16,3 MHz | 90 |
| 5.1 – Esquema de duas placas planas | 97 |
| 5.2 - Capacitância em função do número de elementos para o tubo cheio de ar e cheio de água | 101 |

| | |
|---|-----|
| 5.3 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 2\%$ | 104 |
| 5.4 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 5,5\%$ | 104 |
| 5.5 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 9,51\%$ | 105 |
| 5.6 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 14,51\%$ | 105 |
| 5.7 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 19,77\%$ | 106 |
| 5.8 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 25,52\%$ | 106 |
| 5.9 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 31,27\%$ | 107 |
| 5.10 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 37,79\%$ | 107 |
| 5.11 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 43,79\%$ | 108 |
| 5.12 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 50\%$ | 108 |
| 5.13 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 57,19\%$ | 109 |
| 5.14 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 62,46\%$ | 109 |
| 5.15 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 68,98\%$ | 110 |
| 5.16 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 74,97\%$ | 110 |
| 5.17 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 80,49\%$ | 111 |
| 5.18 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 85,99\%$ | 111 |
| 5.19 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 90,74\%$ | 112 |
| 5.20 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 94,75\%$ | 112 |
| 5.21 - Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 98,25\%$ | 113 |
| 5.22 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 9,51\%$ | 115 |
| 5.23 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 14,51\%$ | 116 |
| 5.24 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 25,52\%$ | 116 |
| 5.25 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 43,79\%$ | 117 |
| 5.26 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 50\%$ | 117 |
| 5.27 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 57,19\%$ | 118 |
| 5.28 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 62,46\%$ | 118 |
| 5.29 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 74,97\%$ | 119 |
| 5.30 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 85,99\%$ | 119 |
| 5.31 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 94,75\%$ | 120 |
| 5.32 - Capacitância numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 50\%$ | 121 |
| 5.33 – Gráfico da fração de líquido volumétrica em função da capacitância normalizada média | 124 |
| 5.34 – Gráfico da fração de líquido estimada e da fração de líquido volumétrica | 125 |
| 5.35 – Fator de ponderação | 126 |
| 5.36 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-2 | 126 |
| 5.37 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-3 | 127 |
| 5.38 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-4 | 127 |
| 5.39 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-5 | 128 |
| 5.40 – Imagem reconstruída obtida através da simulação numérica para fração de líquido de 25,52% | 129 |
| 5.41 – Imagem reconstruída sem a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 25,52% | 129 |
| 5.42 – Imagem reconstruída com a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 25,52% | 130 |
| 5.43 – Imagem reconstruída obtida através da simulação numérica para fração de | |

| | |
|---|-----|
| líquido de 50% | 130 |
| 5.44 – Imagem reconstruída sem a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 50% | 131 |
| 5.45 – Imagem reconstruída com a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 50% | 131 |
| 5.46 – Imagem reconstruída obtida através da simulação numérica para fração de líquido de 85,99% | 132 |
| 5.47 – Imagem reconstruída sem a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 85,99% | 133 |
| 5.48 – Imagem reconstruída com a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 85,99% | 133 |
| 5.49 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 9,51% | 134 |
| 5.50 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 14,51% | 135 |
| 5.51 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 25,52% | 135 |
| 5.52 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 43,79% | 136 |
| 5.53 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 50% | 136 |
| 5.54 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 57,19% | 137 |
| 5.55 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 62,46% | 137 |
| 5.56 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 74,97% | 138 |
| 5.57 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 85,99% | 138 |
| 5.58 – Imagem reconstruída para fração de líquido = 94,75% | 139 |
| V.1 – Curva teórica e experimental para a frequência de 5 MHz | 191 |
| V.2 – Curva teórica e experimental para a frequência de 11,5 MHz | 191 |
| V.3 – Curva teórica e experimental para a frequência de 16,3 MHz | 192 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| 4.1 – Incertezas das variáveis envolvidas na calibração | 74 |
| 4.2 – Soma quadrática da regressão e dos resíduos, média quadrática dos resíduos e coeficiente de determinação das curvas de calibração | 78 |
| 4.3 – Valores de MQ_{reg}/MQ_{res} , F e n para um intervalo de confiança de 95% | 80 |
| 4.4 – Incertezas da razão entre a voltagem de saída e de entrada | 81 |
| 4.5 – Valores da variável t de Student, do erro padrão e da incerteza da capacitância global | 83 |
| 4.6 – Incertezas primárias das variáveis envolvidas nas medidas experimentais | 88 |
| 4.7 – Incertezas médias e máximas das capacitâncias normalizadas das medidas experimentais para frequência de excitação, bem como os desvios padrões e os coeficientes de variação | 88 |
| 4.8 – Incerteza da fração de líquido volumétrica | 91 |
| 5.1 – Capacitâncias médias (pF) e desvios padrões para o tubo cheio de ar, para as 3 frequências de excitação | 93 |
| 5.2 – Capacitâncias médias (pF) e desvios padrões para o tubo cheio de água, para as 3 frequências de excitação | 94 |
| 5.3 – Coeficiente de variação, em porcentagem, para o tubo cheio de ar e cheio de água | 94 |
| 5.4 - Soluções analíticas e numéricas para placa plana, capacitância em pF | 97 |
| 5.5 – Soluções analíticas da capacitância (pF) para uma seção circular | 99 |
| 5.6 – Capacitância numérica (pF) para uma malha com 1152 elementos | 100 |
| 5.7 – Erro relativo entre a capacitância numérica e analítica, em porcentagem | 102 |
| 5.8 – Erro relativo (%) devido ao refinamento da malha | 114 |
| 5.9 – Comparação entre as capacitâncias numéricas e experimentais em pF | 120 |
| 5.10 – Comparação das capacitâncias experimentais (pF) entre eletrodos aterrados e flutuantes | 120 |
| 5.11 – Resultados da reconstrução de imagem | 140 |
| I.1 – Elemento de cada camada e de cada setor | 151 |
| I.2 – Nós de cada linha e de cada setor | 152 |
| I.3 – Elementos e nós pertencentes aos seus respectivos eletrodos, para um sensor com 8 eletrodos | 160 |
| I.4 – Nós da blindagem para cada setor, onde $V_{blind} = 0$ | 160 |

Nomenclatura

Letras Latinas

A_{elet} – área do eletrodo

A_j – área do eletrodo receptor

A_{pl} – área da placa

C - capacitância

$C_{i,j}$ – capacitância entre o par de eletrodos i - j

$C_{i,j}(k)$ – capacitância do k -ésimo elemento para o par de eletrodos i - j

$C_{i,j}^g$ - capacitância quando o tubo está cheio de ar, para o par de eletrodos i - j

$C_{i,j}^l$ - capacitância quando o tubo está cheio de água, para o par de eletrodos i - j

$C_{i,j}^m$ - capacitância medida experimentalmente para uma distribuição de ar e água

CV – coeficiente de variação

\overline{CV} - coeficiente de variação médio

d – distância entre as placas

D_{int} – diâmetro interno do tubo

DP – desvio padrão

\overline{DP} - desvio padrão médio

f_1 – frequência de excitação de 5 MHz

f_2 – frequência de excitação de 11,5 MHz

f_3 – frequência de excitação de 16,3 MHz

$G_{\text{stf}}(k)$ – nível de cinza do k -ésimo elemento sem a utilização da técnica filtro

G_{ctf} – nível de cinza do pixel com a utilização da técnica de filtro

K – permissividade relativa
 L_T – comprimento do tubo
 m – número de elementos na região interna
 MQ_{reg} – média quadrática da regressão
 MQ_{res} – média quadrática residual
 n – número de pontos da curva de calibração
 r – posição radial
 R_f – resistência de realimentação
 $S_{i,j}(k)$ – sensibilidade do k -ésimo elemento para o par de eletrodos i - j
 SQ_{reg} – soma quadrática da regressão
 SQ_{res} – soma quadrática residual
 V – potencial elétrico
 V_{blind} – potencial elétrico na blindagem
 V_e – voltagem no eletrodo emissor
 V_i – potencial elétrico no eletrodo emissor
 V_j – potencial elétrico no eletrodo receptor
 V_k – potencial elétrico nos eletrodos livres
 V_s – voltagem na saída do circuito diferenciador
 V_1 - volume de líquido dentro do tubo
 V_{tot} - volume total do tubo
 $W(k)$ – fator de ponderação do k -ésimo elemento
 w_{aj} – incerteza do ajuste dos pontos em relação à curva de calibração
 w_{Cap} – incerteza global da capacitância
 \bar{w}_{Cap} - incerteza global média da capacitância
 $w_{Vs/Ve}$ – incerteza da razão entre a voltagem de saída e de entrada
 $w_{Vs/Ve,máx}$ - incerteza máxima da razão entre a voltagem de saída e de entrada
 w_x – incerteza da variável V_s/V_e multiplicada pela derivada da curva de ajuste em relação à razão V_s/V_e
 w_y – incerteza da ponte RLC Minipa MX-1001, que mediu os valores dos capacitores
 \bar{w}_{Cap} - incerteza média global da capacitância

\bar{w}_{V_s / V_e} - incerteza média da razão entre a voltagem de saída e de entrada

$\bar{w}_{V_s / V_e} (\%)$ - incerteza média da razão entre a voltagem de saída e de entrada, em porcentagem

$w_{\beta_{vol}}$ - incerteza da fração de líquido volumétrica

$w_{\beta_{vol}} (\%)$ - incerteza da fração de líquido volumétrica, em porcentagem

\bar{w}_{λ} - incerteza média da capacitância normalizada

$\bar{w}_{\lambda, \text{máx}}$ - incerteza máxima da capacitância normalizada

\bar{X} - média geral de uma determinada propriedade

Letras Gregas

β_{ctf} – fração de líquido calculada com a utilização da técnica de filtro

β_{stf} – fração de líquido calculada sem a utilização da técnica de filtro

β_{est} – fração de líquido estimada a partir das capacitâncias experimentais

β_{vol} – fração de líquido volumétrica

Γ_{blind} - localização espacial da blindagem em uma região externa do sensor

Γ_i – localização espacial do eletrodo emissor em torno da superfície externa do sensor

Γ_j - localização espacial do eletrodo receptor em torno da superfície externa do sensor

Γ_k - localização espacial dos eletrodos livres em torno da superfície externa do sensor

ϵ - permissividade de um determinado meio

ϵ_0 – permissividade do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$)

θ - posição polar

\mathfrak{G}_r – derivada negativa do potencial elétrico na direção radial ($\mathfrak{G}_r = -dV/dr$)

$\lambda_{i,j}$ – capacitância normalizada experimental

$\bar{\lambda}$ - capacitância normalizada experimental média

$\mu(k)$ – fator de correção de área para o k-ésimo elemento

ω - frequência angular

Superescritos

g – refere-se ao componente gás (ar)

l – refere-se ao componente líquido (água)

m – refere-se à medida experimental

– - refere-se ao valor médio

– - refere-se à variável vetor

Subscritos

blind – refere-se à blindagem

ctf – com técnica de filtro

e – refere-se à voltagem de entrada

i – refere-se ao eletrodo emissor

j – refere-se ao eletrodo receptor

k – refere-se aos eletrodos livres

l – refere-se à quantidade de líquido (neste trabalho, água)

s – refere-se à voltagem de saída

stf – sem técnica de filtro

T – refere-se ao tubo

Capítulo 1

Introdução

A tomografia pode ser definida como a reconstrução da imagem da seção transversal de um objeto. Uma imagem da seção transversal é chamada de tomograma e o equipamento que proporciona a obtenção dessa imagem é dito tomógrafo.

As técnicas de reconstrução de imagem através da tomografia tiveram início por volta de 1930, tendo sido usadas primeiramente na medicina para diagnosticar problemas pulmonares, conforme Dickin et al. (1992). Com o advento do computador, modernas técnicas de tomografia computadorizada passaram a ser empregadas rotineiramente em diagnósticos de problemas de ordem funcional.

Grande parte das pessoas costuma, hoje em dia, associar a tomografia a um equipamento médico usado apenas na obtenção de imagens internas do corpo humano, mas a tomografia não está apenas associada à medicina.

O uso da técnica de reconstrução de imagem através da tomografia está se tornando bastante popular nos processos de engenharia. As técnicas tomográficas têm sido utilizadas em muitos outros círculos de ciência e de tecnologia, inclusive no controle de processos industriais. As imagens tomográficas dos processos industriais são de extrema importância, porque contribuem para a construção de equipamentos e auxiliam no monitoramento e controle dos processos.

A tomografia médica computadorizada usa como fonte de radiação os raios- γ e os raios-X, que são sensíveis à densidade. Esses raios são emitidos na direção do paciente, mais precisamente em pequenos intervalos angulares em torno da região na qual se quer diagnosticar, obtendo assim um conjunto de medidas. Com esse conjunto de medidas pode-se obter a imagem dessa região com o auxílio do computador.

Devido ao longo tempo de resposta, característicos dos detectores de radiação, e à grande sequência de movimentos mecânicos inerentes ao processo, a velocidade de obtenção de imagens tomográficas por meio dessas fontes não se adaptam aos processos industriais, pois o objeto no qual se deseja obter as medições, tal como em um escoamento multifásico, encontra-se em processo dinâmico variando no espaço e no tempo. Isto não ocorre com o corpo humano no interior do tomógrafo, que se comporta estaticamente. Este é o principal problema com medições em escoamentos multifásicos, onde a distribuição das fases e os perfis de velocidade variam significativamente no tempo e no espaço. Isto acontece, porque as fases podem se arranjar entre si de muitos modos diferentes, resultando nos conhecidos padrões de escoamento. Na década de 80 surgiu uma nova técnica denominada tomografia de processo, auxiliada por computador que permitiu a obtenção da reconstrução de imagem da seção transversal de um escoamento multifásico. Esta técnica tem aplicações industriais, onde é feito um monitoramento mais detalhado dos processos, sendo possível fazer um controle mais eficaz dos equipamentos. Isto abre novas possibilidades para produtos de melhor qualidade e um aumento na segurança da operação, conforme Reinecke & Mewes (1996).

A tomografia computadorizada pode ser dividida em três principais blocos: o sensor, o circuito eletrônico e o computador para a reconstrução, interpretação e disposição da imagem, conforme a Figura 1.1.

O sensor consiste em um conjunto de eletrodos simetricamente espaçados e montados ao redor de um tubo, possuindo no seu interior um o objeto destinado à obtenção das medidas. A Figura 1.1 mostra um sensor com 8 eletrodos distribuídos externamente ao tubo.

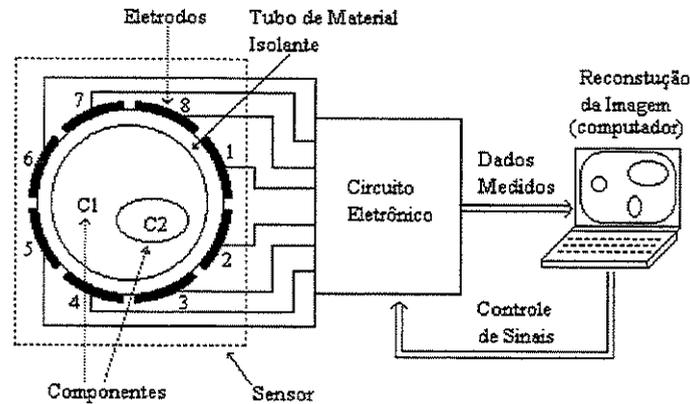


Figura 1.1 - Sistema de tomografia com o uso de um sensor com 8 eletrodos.

O circuito eletrônico mede a variação do parâmetro escolhido para todas as combinações de eletrodos. Os sinais do sensor são recebidos pelo circuito eletrônico, em seguida são amplificados, podendo ser filtrados, multiplexados, digitalizados e então enviados para o computador.

O sistema de computador tem duas funções principais: primeiro, ele controla as operações de medidas executadas pelo circuito eletrônico e segundo, ele usa os dados obtidos através das medidas para reconstruir as imagens tomográficas.

A técnica de tomografia é capaz de produzir uma grande quantidade de dados em relação aos parâmetros internos de interesse de diferentes processos de engenharia. Tais dados são extremamente úteis na melhoria do modelo e do projeto de muitos processos complexos, que apresentariam muitas dificuldades para compreendê-lo, caso fossem utilizadas outras técnicas de sensoriamento.

Métodos de tomografia podem ser usados, por exemplo, para fazer uma reconstrução da imagem da distribuição de concentração dos componentes e para detectar mudanças dinâmicas em processos multifásicos, que ajudariam na aproximação de modelagens empíricas e teóricas.

Quando comparada com a tomografia médica, a tomografia utilizada em processos industriais difere em dois aspectos. Primeiro, o número de sensores que pode ser ajustado em torno de um processo para fazer a reconstrução da imagem é frequentemente pequeno na tomografia de processo e conseqüentemente, o número de medidas é menor. A razão para isto é que, em contraste com a tomografia médica, no qual o paciente é colocado dentro do tomógrafo, a tomografia de processo deve ser conectada ao processo para a reconstrução da imagem. Segundo, as técnicas de sensoriamento usadas na tomografia médica frequentemente envolvem sensores do tipo campo duro (hard field). Um sistema de sensoriamento deste tipo produz um campo uniforme estreito, no qual a sensibilidade (variação do parâmetro de medida como consequência da variação do parâmetro de interesse) é independente da distribuição do parâmetro dentro do sensor. Muitas tomografias de processo são baseadas em sensores, cujos campos são suaves (soft field), tais como os sensores de capacitância. Este tipo de sensor gera um campo não homogêneo dependente da distribuição do parâmetro de interesse, conforme Isaksen (1996).

Diferentes técnicas de sensoriamento são úteis para as medições de tomografia. Cada método de sensoriamento tem um ou mais modos de se fazer a reconstrução da imagem a partir dos dados obtidos, conforme Xie et al. (1995). Esta imagem pode ser analisada qualitativamente ou quantitativamente, dependendo da necessidade específica da aplicação. A necessidade técnica de se obter uma informação através da técnica de tomografia pode influenciar na escolha do princípio de sensoriamento a ser usado. Essas necessidades técnicas envolvem aspectos tais como: resolução espacial e temporal do método de sensoriamento; processamento de dados para a reconstrução da imagem; custos; casualidades associadas com o método de sensoriamento; facilidade de implementação; calibrações; etc.

Para a caracterização de um processo ou monitoramento, a tomografia pode ser aplicada “on-line” ou “off-line”. A especificação do instrumento pode ser totalmente diferente para esses dois casos. Para as medidas “off-line”, o tempo de processamento dos dados e o tempo de reconstrução da imagem não precisam ser curtos, porém a resolução espacial requerida é normalmente alta devido à alta qualidade dos dados científicos. Para medidas “on-line”, o tempo de processamento dos dados e o tempo de reconstrução de imagem devem ser relativamente

curtos para se fazer o controle dinâmico, contudo a resolução espacial pode ser relativamente grosseira, pois os valores espaciais médios são suficientes, conforme Xie et al. (1995).

As técnicas de tomografia podem ser classificadas de acordo com o sensor do seguinte modo: tomografia de impedância elétrica, tomografia nucleônica, tomografia ótica e tomografia de ressonância magnética, conforme Dyakowski (1996). A tomografia de processo pode ser aplicada não somente à identificação dos vários padrões de escoamento e da interface entre as fases de um escoamento multifásico, mas também para medir parâmetros na micro-escala, conforme Dyakowski (1996). Por exemplo, a trajetória das partículas e suas velocidades, a distribuição do escoamento de líquido escorrendo em reatores (trickle bed reactors), o comportamento do ar no centro de um ciclone ou num misturador de pós podem ser medidos através do uso de várias técnicas tomográficas. O processo de tomografia pode também ser usado para medir a distribuição de velocidade numa fase dispersa ou a velocidade relativa entre as fases que estão escoando. Entretanto, a aplicação da tomografia de modo duplo (medição utilizando duas técnicas de sensoriamento, por exemplo tomografia de capacitância e tomografia de raios- γ) pode ser a base utilizada para medir a vazão mássica num sistema multifásico, por exemplo um escoamento de óleo, ar e água dentro de um tubo.

A tomografia elétrica é não intrusiva, apresenta uma alta resolução temporal (1 ms), baixo custo, não existe interferência da radiação e é de fácil implementação, conforme Xie et al. (1995). Os principais métodos são baseados na técnica de sensoriamento por capacitância, por resistência e por indutância. A tomografia de capacitância elétrica é mais adequada para processos que envolvem misturas isolantes de diferentes permissividades. A tomografia de resistência elétrica pode ser usada para investigar processos, onde a fase contínua é eletricamente condutora. Para processos que envolvem misturas ferromagnéticas e/ou materiais condutores, a tomografia por indutância elétrica pode ser selecionada. A tomografia, hoje em dia, tem uma grande aplicabilidade, pois tem um baixo custo, não interfere no escoamento, pode ser acompanhado num sistema “on-line” (alta velocidade) e é robusta, conforme Yang (1996).

As fontes de excitação (voltagem ou corrente) para o uso de sistemas de tomografia de capacitância, resistência e indutância elétrica são geralmente de baixa frequência (abaixo de 5

MHz), segundo Xie et al. (1995). Dessa forma, os sistemas de tomografia elétrica podem ser descritos principalmente pelas equações que governam o campo eletrostático, usualmente pela equação de Laplace. Para campos eletrostáticos, quando as linhas de fluxo cruzam a interface de dois meios com permissividades (ou condutividades) diferentes, elas são defletidas. Para a tomografia elétrica, o problema inverso (a partir das medidas elétricas do sensor, por exemplo as capacitâncias, deseja-se determinar a distribuição dos parâmetros constituintes, por exemplo as permissividades) não é linear. Algoritmos de reconstrução de imagem desenvolvidos para tomografia de raios-X, sendo lineares, não são aplicáveis e diferentes algoritmos têm sido desenvolvidos para tomografia elétrica. Tem-se desenvolvido uma variedade de algoritmos, não iterativos e iterativos. O algoritmo de retro-projeção linear (linear back projection - LBP) é um tipo de algoritmo não iterativo e qualitativo, conforme Xie et al. (1992). O algoritmo baseado no método de Newton-Raphson modificado, é um algoritmo iterativo e quantitativo, conforme Hua et al. (1991) citado por Xie et al. (1995).

O desenvolvimento de vários métodos de impedância elétrica utilizados para medir as propriedades dos escoamentos bifásicos é descrito por Ceccio & George (1996). Aplicações práticas de tomografia elétrica são apresentadas por Xie et al. (1995). Existe um potencial para aplicações da tomografia de processo na indústria, que são descritas por Huang, Xie, Salkeld et al. (1992). Aplicações da tomografia de capacitância têm sido apresentadas, principalmente na área de engenharia química, em particular para reatores e em sistemas de transporte com escoamento multifásico, conforme Reinecke & Mewes (1996).

A tomografia pode ser aplicada para sistemas de gás-líquido, que são encontrados numa variedade de equipamentos ou processos nas indústrias química e de petróleo, especialmente para sistemas de transporte em explorações marítimas. Os sistemas gás-sólido são encontrados no transporte de sólidos granulares (grãos), que é um processo bastante utilizado na indústria química, porém existe a dificuldade de obtenção da distribuição de porosidade no escoamento, que tem grandes influências em todas as variáveis do processo, apresentando uma grande sensibilidade a essa variação. O uso da tomografia de capacitância em sistemas gás-gás é relativamente novo e difícil, pois as permissividades relativas de diferentes gases puros estão próximas da unidade e as medidas sujeitas à influência dos ruídos. Adicionalmente, fases gasosas quase nunca estão

realmente separadas, tal que uma mistura geralmente se comporta de modo homogêneo. Num processo de combustão em que ocorre a ignição do gás e conseqüentemente a ionização dele, existe uma distinção significativa da permissividade em relação à vizinhança de ar ou combustível. A aplicação de tomografia num plano duplo (isto é, a utilização de dois sistemas de tomografia localizados em duas seções distintas de um tubo) é capaz de fornecer uma quantidade substancial de dados de um escoamento multifásico com variações temporal e espacial, oferecendo um novo método para medidas de distribuição de velocidade, conforme Dyakowski (1996).

A tomografia de capacitância é uma ferramenta poderosa para a reconstrução da imagem de sistemas multifásicos, tanto no âmbito da pesquisa científica como na indústria. A técnica tem sido desenvolvida rapidamente, onde fica evidente que um grande número de instituições está trabalhando com sistemas de tomografia de capacitância. Considerando a eletrônica do sensor, circuitos de medida de capacitância mais rápidos devem ser construídos. Para se obter uma resolução melhor da imagem, algoritmos de reconstrução de imagem devem ser aperfeiçoados.

1.1 - Objetivo da tese

O objetivo geral desta tese é o desenvolvimento de um sistema de tomografia de capacitância elétrica adequado ao estudo de escoamentos bifásicos. Neste trabalho, o sistema de tomografia será utilizado para a análise de meios estratificados onde os fluidos estão em repouso.

Outros objetivos são: construção e calibração do transdutor eletrônico para a realização dos testes experimentais, comparação entre a curva de calibração experimental e teórica, comparação entre resultados experimentais e numéricos, proposta de uma correlação entre a fração de líquido volumétrica para ser utilizada no algoritmo de reconstrução de imagem no cálculo da mesma, medidas de capacitância e aperfeiçoamento do algoritmo de reconstrução de imagem.

1.2 - Metodologia

O desenvolvimento do sistema de tomografia compreende as seguintes etapas: medidas de capacitância utilizando um transdutor eletrônico, simulações numéricas de meios bifásicos do tipo estratificado para comparar com os resultados experimentais, simulações numéricas para a construção do mapa de sensibilidade, que será usado no algoritmo de reconstrução de imagem e a reconstrução de imagem que utiliza as medidas experimentais de capacitância e o mapa de sensibilidade.

Nas medidas experimentais de capacitância, utilizou-se um transdutor eletrônico baseado em corrente alternada e imune às capacitâncias parasitas, com frequências de excitação de: 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz. Destas três frequências, uma foi escolhida para determinar as capacitâncias normalizadas em função dos pares de eletrodos para realizar as reconstruções de imagem.

Na simulação numérica, utilizou-se o pacote numérico de elementos finitos (ANSYS 5.4), para a determinação da capacitância entre cada par de eletrodos. Foi feita a análise do sensor com eletrodos livres aterrados e flutuantes, sendo discutido a vantagem de um em relação ao outro.

Os resultados experimentais são apresentados, sendo feita a comparação entre resultados com os eletrodos livres aterrados (quando o eletrodo emissor está a um potencial elétrico, V_i , e os outros eletrodos estão a um potencial zero) e com os flutuantes (quando o eletrodo emissor está a um potencial, V_i , o eletrodo emissor está a um potencial zero e os eletrodos restantes estão isolados eletricamente), sendo que neste trabalho optou-se por trabalhar preferencialmente com eletrodos livres flutuantes. Resultados teóricos são comparados com os resultados experimentais.

É apresentada uma função que correlaciona a fração de líquido volumétrica com os valores de capacitâncias normalizados, permitindo estimar a fração de líquido a partir das medidas experimentais de capacitância. Finalmente, os resultados da reconstrução de imagem, utilizando o algoritmo retro-projeção linear, com um filtro, são apresentados.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Nesta revisão da literatura, os assuntos podem ser agrupados em quatro categorias: a primeira que apresenta o estado da arte das técnicas de tomografia utilizadas em escoamentos multifásicos; a segunda que descreve o sistema de tomografia de capacitância elétrica; a terceira que apresenta os tipos de circuitos eletrônicos utilizados para medir as capacitâncias e a quarta que mostra alguns tipos de algoritmos de reconstrução de imagem.

2.1 – Técnicas de tomografia em escoamentos multifásicos

Dyakowski (1996) apresentou um resumo das técnicas de tomografia utilizadas nas medições em escoamentos multifásicos. Os resultados apresentados mostraram uma grande faixa de aplicações industriais, desde a química e nuclear até a alimentícia. Isto foi ilustrado por exemplos de aplicação dos vários sensores de tomografia para as medições de parâmetros geométricos ou cinemáticos dos escoamentos multifásicos.

As principais técnicas de tomografia apresentadas foram: tomografia de impedância elétrica, tomografia nucleônica, tomografia ótica e tomografia de ressonância magnética.

O objetivo da tomografia de impedância elétrica é reconstruir a imagem de uma distribuição de componentes, cuja as propriedades podem ser condutoras e/ou dielétricas, sendo isto feito através de sinais elétricos (potencial ou corrente elétrica). Eletrodos para sensoriamento da capacitância são usualmente instalados de modo não invasivo, com exceção nos leitos fluidizados.

Os sensores são geralmente feitos de cobre ou latão e têm uma área de vários cm^2 para se obter uma capacitância suficiente. Os eletrodos para sensoriamento resistivo podem ser menores.

As fontes para sistemas de tomografia de capacitância ou resistência elétrica geralmente são de baixa frequência (abaixo de 5 MHz). Devido ao número limitado de medidas e aos ruídos, utiliza-se o método da retro-projeção para se reconstruir a imagem. Adicionalmente, os campos elétricos utilizados são suaves, tal que os algoritmos de reconstrução mais complexos (por exemplo, os iterativos) podem ser necessários para reduzir a distorção da imagem e também deve ser feita uma compensação para aumentar a sensibilidade no centro do tubo.

As fontes de radiação nucleônica, tais como os raios-X e os raios- γ são altamente penetrantes, porque seus comprimentos de onda são extremamente pequenos comparados com o tamanho de um objeto dentro de um tubo. Os raios emitidos dessas fontes são capazes de atravessar um objeto sem se desviarem, porém a intensidade da radiação é atenuada. O grau de atenuação depende da composição (densidade) e do tamanho do objeto. Os algoritmos de reconstrução de imagem aplicados à tomografia nucleônica, exceto para a emissão de um simples fóton, são baseados na transformada de Fourier, na transformada de Randon ou em métodos algébricos diretos.

Os sensores têm que ter uma forte blindagem para que os raios sejam colimados e para garantir a segurança do método. A técnica nucleônica geralmente é lenta, mas as imagens são mais facilmente reconstruídas, quando comparadas com a tomografia elétrica. A tomografia nucleônica pode ser aplicada para estudar a micro-escala, característica dos escoamentos multifásicos.

A tomografia ótica é baseada na absorção, difração e reflexão/refração da luz e tem sido utilizada desde 1970. A tomografia ótica fornece uma qualidade de imagens melhor do que a dos raios-X.

A tomografia de ressonância magnética, primeiramente usada na medicina, é um método que serve para distinguir entre os estados da matéria de diferentes espécies químicas. O objeto é colocado no interior, onde os átomos, normalmente os prótons giram de forma desorganizada.

Quando expostos a um campo magnético, os prótons ficam alinhados. Uma vez alinhados, são submetidos a um sinal de rádio-frequência específico, fazendo com que os prótons mudem sua direção de 90°. Quando o sinal de rádio-frequência é desligado, os prótons retornam à posição de alinhamento original com o campo magnético e neste retorno, emitem um sinal que é recebido por uma antena (semelhante a uma antena de televisão), sinal este que é levado a um computador onde será feita a reconstrução de imagem do objeto. A maior limitação desta técnica é a incapacidade de estudar materiais ferromagnéticos e amostras que contenham quantidades significantes de espécies paramagnéticas.

Dyakowski (1996) apresenta a técnica ultra-sônica para medir a velocidade de um escoamento. A técnica ultra-sônica é baseada no tempo de vôo dos impulsos ultra-sônicos, que foram medidos entre dois transdutores ultra-sônicos, cada um atuando alternativamente como transmissor e receptor. O sistema de tomografia no modo duplo (dois sistemas de tomografia sendo utilizados, tomografia de capacitância e de raios- γ) servem para medir simultaneamente a distribuição de concentração das duas fases. Medidas de vazão mássica de um escoamento bifásico podem ser obtidas, trabalhando-se com dois transdutores deslocados de um certa distância.

O processo de tomografia fornece uma grande quantidade de dados, que pode ser usado para modelar escoamentos multifásicos mais complexos. Métodos estatísticos baseados na correlação cruzada ou no método do caos oferecem um caminho para descrever interações multifásicas complexas. Aplicações dos dados de tomografia, junto com as redes neurais ou lógica nebulosa abrem um novo caminho para o controle de escoamentos multifásicos em equipamentos industriais. As redes neurais parecem oferecer ferramentas promissoras para ajudar no desenvolvimento de medidores de vazão em escoamentos multifásicos.

Ceccio & George (1996) fizeram uma revisão dos vários desenvolvimentos dos métodos de uso de impedância elétrica em escoamentos multifásicos. Por causa dos componentes do escoamento multifásico exibirem diferentes propriedades elétricas, uma variedade de sensores têm sido desenvolvidos para estudar tais escoamentos através da medida de impedância nas regiões de interesse. Dispositivos não intrusivos são usados para medir as propriedades médias do

escoamento em questão, tal como a fração de vazio. Sensores locais têm sido desenvolvidos para medir uma variação pontual de uma certa propriedade do escoamento, incluindo espessura do filme de líquido em um escoamento anular, fração de vazio local em um escoamento disperso, tamanho de bolha e partícula e perfil de velocidade do escoamento. Os sensores de impedância são usualmente fáceis de serem construídos e manipulados e têm uma alta resposta de frequência. Contudo, a resolução espacial dos sensores é limitada e a calibração pode ser difícil devido à histerese. Atualmente, os pesquisadores estão usando campos elétricos para reconstruir a distribuição de impedância dentro de um volume de medida através da técnica de Tomografia de Impedância Elétrica. Este sistema emprega medidas de corrente e voltagem no contorno de um domínio para criar a representação de uma distribuição de impedância dentro do domínio, onde algumas suposições são feitas. A primeira suposição é que este domínio é assumido como tendo um resultado bidimensional, tendo-se o cuidado de fazer a guarda dos eletrodos. A segunda suposição comum é que a condutividade dentro do domínio pode ser assumida como um função discreta, sendo que alguns trabalhos consideram-na como função contínua. Uma terceira simplificação é que a voltagem no domínio é facilmente representada por modelos matemáticos. Os algoritmos de inversão da Tomografia de Impedância Elétrica são discutidos, entre eles, o método de retro-projeção linear sem e com a técnica de filtro, o método apresentado por Yorkey Webster & Tompkins (1987), onde analisa o erro quadrático da reconstrução do domínio, sendo que este último foi comparado com o método da perturbação de Kim, Webster & Tompkins (1983) citado por Ceccio & George (1996), com o método de retro-projeção linear iterativo e dupla restrição (double constraint) de Wexler, Fry & Neuman (1985) citado por Ceccio & George (1996). Sensores montados do tipo não intrusivos podem fazer medidas médias sobre o domínio do escoamento ou alguma medida local próxima do contorno. Exame minucioso da distribuição de fase local sobre o domínio total do escoamento requer a inserção de um sensor dentro do escoamento, sendo que esses sensores têm sido utilizados em diversas aplicações tais como estudos de cavitação e leitos fluidizados. Avaliação dos sinais dos sensores de impedância local devem ser influenciados por partículas em todas as áreas do campo elétrico e eles causam um distúrbio da fase e de outras propriedades do escoamento. A tomografia de impedância elétrica pode ser pensada como um método de impedância de uma ordem maior, pois significa que ela não é intrusiva para determinar a distribuição de fase do escoamento multifásico e também reconstrói a imagem a partir das medidas de corrente no contorno.

Em resumo, enquanto não existe um simples sensor de impedância que é universalmente aplicável às medidas de escoamento multifásico, existe um número de técnicas bem desenvolvidas, que providenciam informações específicas de certos escoamentos a um baixo custo e precisão razoável. Os sistemas de tomografia de impedância elétrica são técnicas bastante promissoras, sendo os sensores não intrusivos, onde pode-se medir globalmente as propriedades do escoamento multifásico.

Lemonier (1997) fez uma abordagem de duas técnicas de reconstrução de imagem, a ressonância magnética nuclear e a tomografia de impedância elétrica. Ele comenta que o progresso do modelamento multifásico multidimensional é retardado por um nível relativamente baixo de sofisticação das técnicas de medidas locais. Existe ainda o desafio de medir velocidade média local de cada fase e frações de vazio em escoamentos bifásicos, independentemente de fatores particulares dos escoamentos. Está claro que quase nenhum progresso tem sido feito recentemente, embora o potencial de certas técnicas de reconstrução de imagem médicas tenha sido analisado.

A técnica de ressonância magnética, apesar de ainda ser raramente utilizada em escoamentos bifásicos, apresenta uma nova perspectiva na dinâmica de escoamentos bifásicos. Neste trabalho é apresentado a transição gradual para a turbulência num escoamento monofásico de água, sendo que onde ocorre a transição existe um pico da distribuição de probabilidade em função da velocidade do escoamento. No escoamento de ar-água, a transição do regime de bolha para agitante ou pistonado é claramente visível. Quando cada fase é excitada separadamente, como é o caso de escoamentos de Freon-água, pode-se determinar separadamente a distribuição de velocidade de cada fase.

A tomografia de impedância elétrica, por outro lado, tem sido intensivamente estudada e parece ser difícil de ser implementada em escoamentos bifásicos. Ainda não está claro quando se tornará uma técnica madura para ser aplicada em um escoamento bifásico arbitrário. O método de detecção modifica o sinal recebido e esses métodos estão associados aos problemas de mal

condicionamento que geram artefatos. Por exemplo, para uma distribuição de condutividade, não existe sensibilidade no centro do domínio ou é muito baixa e a condutividade reconstruída é sensível ao ruído. Entretanto, existe um potencial da técnica de impedância elétrica para medir a velocidade das fases. A técnica de correlação providencia velocidade das ondas ou da interface que quase sempre difere da velocidade do material. Estes métodos requerem condições de operação controladas e parece ser difícil de ser usada fora de laboratórios. O avanço de instrumentos para medir a velocidade local de ambas as fases provavelmente permanece como um dos maiores desafios desta próxima década e é a chave de desenvolvimentos posteriores de modelagem multifásica multidimensional.

Dyakowski, Mann & Williams (1998) fizeram uma revisão dos métodos de tomografia e apresentaram as aplicações da tomografia elétrica. O objetivo da tomografia elétrica é fazer a reconstrução das propriedades condutoras e/ou dielétricas de um objeto a partir dos sinais de medidas elétricas provenientes dos eletrodos. O algoritmo de reconstrução de imagem para as duas técnicas é basicamente o mesmo. O algoritmo de retro-projeção linear calcula a distribuição de permissividade a partir das medidas de capacitância, sendo que este algoritmo aproxima o nível de cinza da distribuição de permissividade e as imagens obtidas são fortemente deformadas. Para melhorar a qualidade das imagens, uma segunda etapa deve ser adicionada ao algoritmo de retro-projeção linear, que consiste em assumir uma distribuição de permissividade, utilizar o método dos elementos finitos para calcular as capacitâncias e compará-las com as capacitâncias medidas, verificar o erro entre elas e se ele estiver maior do que uma certa tolerância repetir todo o processo até a convergência.

O objetivo é fazer a visualização do escoamento, sendo que isto depende do número de eletrodos (varia de 8 a 16), onde a velocidade do sistema de tomografia varia de 30 a 200 imagens por segundo. Deste modo, a velocidade permitirá caracterizar o comportamento dinâmico de vários regimes de escoamento (anular, estratificado, pistonado e bolhas). Conhecer os padrões de escoamento gás-sólido como função de suas vazões mássicas é importante no controle de processo de transporte pneumático. Os dados do sistema de tomografia podem ser utilizados para caracterizar a morfologia ou a estrutura do escoamento (tamanho de bolhas dentro de um leito

fluidizado) ou medir a distribuição de parâmetros contínuos (distribuição do campo de sólido ou gás). Em sistemas gás-líquido, a tomografia de resistência elétrica serve para reconstruir as propriedades condutoras de uma mistura de gás-líquido ou achar a interface entre as fases de gás e líquido, como exemplo, uma mistura de gás-líquido dentro de um tanque com uma pá rotativa.

O sistema atual (capacitância ou resistividade) possibilita a instalação de vários sensores em torno de um tanque ou de um tubo. O protocolo de medidas providencia até 100 imagens por segundo com resolução espacial de 1%. O sistema de tomografia pode ser aplicado para sistema gás-sólido e gás-líquido. A aplicação da perspectiva Euleriana possibilita a visualização de parâmetros globais (grandes bolhas ou pistões) e imagens tridimensionais podem ser construídas pelos dados de um sensor posicionado em vários planos. A aplicação futura da tomografia com redes neurais ou lógica nebulosa abriria um novo caminho para controlar os escoamentos multifásicos em equipamentos industriais.

2.2 – Sistema de tomografia de capacitância

Geraets & Borst (1988) desenvolveram um sensor de capacitância para medições de frações de vazio média no tempo em escoamentos bifásicos dentro de um tubo. A configuração do eletrodo foi constituída de um capacitor helicoidal, mais precisamente uma fita de cobre que foi enrolada num tubo de 50 mm de diâmetro interno. O eletrodo emissor fez três revoluções completas e o eletrodo receptor, duas. Foi feita uma blindagem através de eletrodos para fixar as capacitâncias parasitas e aproximar a solução analítica do eletrodo helicoidal. O tubo de acrílico foi colocado dentro do tubo de aço e preso por flanges. Os eletrodos de guarda foram colocados no início e no final do eletrodo receptor para eliminar os efeitos de borda e os eletrodos de guarda também foram conectados à blindagem. Este arranjo faz com que as medidas de capacitâncias sejam independentes do comprimento do cabo condutor e dos campos externos. A capacitância parasita entre o eletrodo emissor e a blindagem e a capacitância parasita entre o eletrodo emissor e o eletrodo de guarda são desviadas para uma fonte de baixa voltagem. Para configurações de escoamento anular e disperso, curvas de calibração teóricas são desenvolvidas. A espessura de parede do tubo dielétrico é um parâmetro importante para o dimensionamento do sensor. Curvas

experimentais do escoamento estratificado e anular são apresentadas. Para muitas situações práticas de escoamento, a fração de vazio média no tempo pôde ser determinada com uma precisão absoluta de $\pm 0,03$. Devido ao comprimento axial relativamente longo, não foi possível fazer medidas locais de fração de vazio e trabalhar com padrões mistos, como o escoamento intermitente e pistonado com bolha, onde a precisão é menor. Para o escoamento anular, a capacitância é praticamente independente da fração de vazio, quando ela é maior do que 0,8. O sinal de saída que varia no tempo é útil para a identificação do padrão do escoamento. O sensor é fácil de trabalhar com diâmetro interno superior a 15 mm e somente um medidor de capacitância padrão é necessário.

Huang et al. (1989) descreveram um sistema de tomografia de capacitância, onde foi feita a reconstrução de imagem do escoamento baseado nas capacitâncias dos sensores. Foram usados 8 eletrodos aterrados e localizados na parte externa do tubo, para fazer o sensoriamento do fluido dentro do tubo. As medidas foram efetuadas, utilizando um circuito do tipo carga/descarga, que trabalhou numa frequência de 2 MHz. A seção de teste foi composta de 8 eletrodos de latão montados em um tubo de acrílico de diâmetro interno de 76 mm e espessura de parede de 5 mm. Este sistema foi testado usando modelos físicos estáticos, simulando os padrões de distribuição típicos de um escoamento bifásico.

Para a reconstrução de imagem foi utilizado o algoritmo de retro-projeção e uma técnica de filtro simples. Os testes foram feitos com o tubo na horizontal, com areia em seu interior, simulando o escoamento estratificado. Foi feita uma simulação de escoamento anular 50%, deixando a parte central com ar e a região anular com areia e por último, foi realizada a simulação de um escoamento central, onde foi colocada a areia em seu centro e ar na região anular.

O protótipo teve um bom desempenho, apesar da resolução das imagens reconstruídas não ser boa, devido à limitação dos eletrodos. As capacitâncias absolutas foram independentes do diâmetro do tubo, mas dependentes do número de eletrodos e do seu comprimento na direção principal do escoamento, sendo que os eletrodos tiveram um comprimento de 110 mm (1,25 vezes o diâmetro do tubo), tendo uma capacitância padrão absoluta de 0,3 pF entre os pares opostos.

Existe possibilidade de aplicações industriais para a identificação do padrão de escoamento (bolha, pistonado, estratificado ou anular), mas para aplicações que requerem uma alta resolução, um sistema com 16 eletrodos e um circuito mais sofisticado são recomendados.

Xie, Plakowski & Beck (1989a) trabalharam com um sistema de tomografia de capacitância com 8 eletrodos para obter a imagem de um escoamento bifásico (escoamento com dois componentes), sendo que eles trabalharam com os seguintes regimes de escoamento: anular e estratificado. O sistema proposto foi constituído de um multiplexador que controlou a seleção das combinações das leituras dos pares de eletrodos, de um conversor de capacitância em voltagem e de dois circuitos de medidas imunes às capacitâncias parasitas, sendo estes desenvolvidos por Huang, Stott et al. (1988). Para o sistema com 8 eletrodos, existem 28 medidas independentes, nas quais foram enviadas, via conversor A/D (analógico/digital) para o computador, onde o algoritmo de reconstrução de imagem linear foi utilizado para reconstruir a distribuição dos componentes do escoamento bifásico.

O problema inverso, que é a obtenção da distribuição dos componentes a partir dos valores de capacitâncias dos pares de eletrodos, foi feito com a utilização do algoritmo de reconstrução de imagem retro-projeção juntamente com a técnica de filtro. Em geral, as imagens reconstruídas pareceram estar próximas dos escoamentos padrões (teóricos), principalmente para o anular e para o estratificado.

Neste trabalho utilizou-se uma técnica de filtro adaptativo para cada regime de escoamento, pensando na precisão de concentração do componente global, o que é aceitável, pois erros na distribuição do componente local na imagem reconstruída pode não ser aceitável (qualidade da imagem). O sistema de tomografia pode ser melhorado pelo aumento do número de eletrodos e pela utilização de um algoritmo de reconstrução de imagem iterativo.

Xie, Plakowski & Beck (1989b) descreveram um método para identificar os padrões de escoamento bifásico, utilizando o mesmo sistema de capacitância com 8 eletrodos, porém eles usaram um processamento de sinal mais simples do que aquele para a reconstrução de imagem.

Primeiramente, é preciso saber como é a resposta do sistema de capacitância com 8 eletrodos para alguns regimes de escoamento, basicamente para o anular e o estratificado. Então, uma simulação numérica através do método dos elementos finitos foi feita, atribuindo uma permissividade relativa 3 para os elementos da malha da zona sensível e o valor de 1 para o restante da malha. Os resultados foram apresentados em gráficos, sendo um deles a capacitância entre os pares de eletrodos em função da concentração de líquido e o outro, a capacitância relativa em função dos pares de eletrodos. Neste trabalho, a capacitância relativa é a diferença entre a capacitância medida e a capacitância do ar dividida pela capacitância do ar, para cada par de eletrodo.

Com o conjunto de medidas de capacitância obtido para cada padrão de escoamento e para diferentes concentrações, foi feita a normalização de cada vetor. Com o vetor normalizado, obteve-se o vetor impressão digital para cada regime de escoamento e para cada concentração de líquido, como sendo a média aritmética das 28 medidas das capacitâncias, que foram armazenadas na memória de um computador como banco de dados para ser feita uma comparação posterior.

Para dois vetores, um como um conjunto de capacitâncias normalizadas medidas e o outro como o vetor de impressão digital (vetor de referência), a identificação é realizada quando se obtém o menor erro relativo. Também foi feito um procedimento para estimar a concentração de líquido de modo análogo ao realizado para a identificação do regime de escoamento.

A técnica de impressão digital é mais simples e menos dispendiosa do que o método do algoritmo de reconstrução de imagem, porém a combinação dos dois métodos seria mais atrativo e eficiente. A técnica de impressão digital para cada tipo de escoamento e para cada concentração pode ser facilmente alocada na memória do computador para futuras comparações e o tempo computacional seria pequeno.

Fasching & Smith (1991) desenvolveram um novo sistema de reconstrução de imagem através de medidas de capacitância, o qual tem habilidade para providenciar em tempo real, o monitoramento tridimensional da densidade de um leito fluidizado. Inicialmente, o sistema foi desenvolvido para servir como uma ferramenta de alta velocidade para a reconstrução de imagem da densidade na pesquisa e desenvolvimento da fluidização. Posteriormente, verificou-se que também poderia ser utilizado em outras aplicações, tais como transferência de sólidos escoando dentro de um tubo, onde a variação da densidade do material dielétrico pode ser monitorada. O sistema de reconstrução de imagem através de medidas de capacitância usa 16 eletrodos, igualmente espaçados e circunferencialmente localizados para cada um dos 4 níveis igualmente espaçados ao longo do eixo principal do leito fluidizado como elementos de sensoriamento da densidade. O leito fluidizado tem um diâmetro interno de 6 polegadas (152,4 mm) de diâmetro interno e usa 32 eletrodos de aço inoxidável com 1 polegada (25,4 mm) de comprimento e 1/2 polegada (12,7 mm) de largura. O sistema eletrônico trabalhou com uma frequência de excitação de 400 kHz, utilizando os valores de deslocamento de corrente entre eletrodos, atualizados 100 vezes por segundo para pós processamento do comportamento do leito. As habilidades do sistema são demonstradas para esferas de plástico. O uso experimental do sistema por outros autores produziu valores de dimensões de bolhas e velocidade que foram consistentes com os valores estimados pela teoria aceita. A melhora da resolução do sistema pode ser obtida por dividir a seção do leito em um grande número de elementos (por exemplo, 200). Isto iria requerer um mínimo de 200 medidas de corrente para a determinação de 200 valores de densidade dos elementos. Duplicando o número de eletrodos, para cada nível, aumentaria o número de medidas. A duplicação de voltagem existente, a excitação, medidas de corrente e modificação do tempo de resposta do circuito, são fatores para uma melhora da capacidade do sistema. O volume do leito onde é feita a reconstrução de imagem pode ser aumentado pela adição de um ou mais conjuntos dos quatro níveis de eletrodos e de um número de circuitos eletrônicos correspondentes.

Huang, Xie, Salkeld et al. (1992) fizeram um trabalho utilizando a tomografia para melhorar a operação e projeto do manuseamento de processos de fluidos com vários componentes e também pela possibilidade de interação entre os diferentes componentes para a reconstrução de

imagem em tempo real, usando sensores não intrusivos. Informação sobre o regime de escoamento, vetor velocidade e distribuição dos componentes serão determinados a partir das imagens reconstruídas. Este sistema pode providenciar, para uma escoamento com vários componentes, informações e medidas relevantes às propriedades de transferência de calor/massa.

A necessidade da reconstrução de imagem através da tomografia na indústria é análogo à necessidade médica para fazer o rastreamento do corpo, no qual tem ocorrido um certo desenvolvimento com a ajuda de computadores. A idéia básica é instalar um número de sensores não intrusivos em torno de um tubo ou de um vaso para fazer a reconstrução da imagem. O sinal de saída do sensor depende das condições de contorno e da distribuição dos componentes dentro do tubo. A tomografia de processo providencia, por exemplo, identificação da distribuição de uma zona de mistura num reator, localização da interface num complexo processo de separação, medidas em escoamento bifásico dentro de um tubo, com possibilidades de se fazer medidas em escoamentos multifásicos.

O sistema tem sido utilizado com sucesso, no qual foi constituído de oito sensores de capacitância não intrusivos e um transdutor, cujos os detalhes se encontram em Huang, Plakowski et al. (1989), para a reconstrução de imagem de um escoamento de óleo e ar num tubo de diâmetro de 75 mm em tempo real. Para a reconstrução de imagem utilizou-se o algoritmo retro-projeção linear. Capacitâncias típicas da ordem de 1 pF puderam ser medidas com uma precisão de 1% de fundo de escala e na presença de 50 pF de capacitância parasita. Os dados foram obtidos num tempo de 2,5 ms.

Os resultados confirmam a possibilidade de uma reconstrução de imagem através da tomografia de alta velocidade para medir a distribuição dos componentes num processo onde existem vários componentes. Acredita-se que com o uso de todo o sistema, imagens podem ser obtidas na razão de 1000 quadros por segundo.

Trabalhos futuros deveriam analisar as limitações na resolução espacial e temporal de vários sensores, verificar as aplicações específicas de cada sensor, uma escala de cinza para misturas

ternárias ou quando um componente não preenche completamente um elemento e correções da distorção da imagem.

Khan & Abdullah (1993) fizeram simulações com um arranjo de vários eletrodos para a reconstrução de imagem de um escoamento, usando o método dos Elementos Finitos. Este arranjo de eletrodos forma o subsistema do sensor primário do sistema de tomografia de capacitância elétrica. Para este arranjo, 12 eletrodos foram montados simetricamente ao redor do tubo isolante, sendo a simulação realizada para uma seção do tubo (domínio bidimensional). Regiões radiais entre os eletrodos adjacentes foram isoladas para reduzir as altas capacitâncias entre os mesmos. Uma blindagem externa aterrada foi colocada para evitar campos externos. A região entre a superfície externa do tubo e a blindagem foi preenchida com um material dielétrico de permissividade relativa igual a 1, isolando os eletrodos da blindagem.

Os resultados são apresentados na forma da performance dos parâmetros do sensor em função de vários parâmetros geométricos. O desempenho dos parâmetros geométricos inclui as capacitâncias absoluta e normalizada, razão entre o máxima e mínima capacitância do sensor e a distribuição espacial de sensibilidade do sensor. Com o aumento do número de eletrodos, o ângulo entre eles diminui, reduzindo a capacitância absoluta e a razão entre a máxima e mínima capacitância também diminui. Fazer blindagem também contribui para a redução da razão entre a capacitância máxima e mínima. Em relação à blindagem radial, tanto a espessura (comprimento radial) como a largura dela influenciam numa distribuição mais uniforme da sensibilidade e esta na reconstrução da imagem. Estudos extensivos de simulações computacionais, onde utilizou-se o modelo de Elementos Finitos, levaram em consideração a variação dos parâmetros (ângulo dos eletrodos, blindagem externa, geometria da blindagem radial), geração e refinamento da malha. No caso do tipo de elementos discretizados, foi preferível utilizar elementos triangulares do que elementos quadrilaterais, pois onde existem rápidas mudanças do potencial ou das linhas de campo; a minimização do erro está associado ao tamanho e forma dos elementos e a saliência do resultado no papel é checado em relação ao uso efetivo e eficiente do método dos Elementos Finitos. Resultados detalhados para um protótipo de sensor específico são comparados com um protótipo experimental e houve um bom acordo entre os resultados. O número de elementos triangulares

utilizados para vários modelos de sistemas de eletrodos variou desde 9700 (cerca de 5100 nós) até 10000 (cerca 5300 nós). A resposta do sensor para vários regimes de escoamento, tais como o escoamento anular, estratificado e central (core flow), é apresentada e analisada para otimizar a sua performance, sendo posteriormente utilizada para a reconstrução da imagem.

Yang, Stott & Beck (1995) desenvolveram um sistema de tomografia de capacitância para reconstruir a imagem em escoamentos de óleo e ar em tubos. Os princípios da tomografia de capacitância elétrica são brevemente apresentados e dois sistemas de capacitância elétrica baseados em circuito de carga/descarga são descritos. Esses sistemas são: um sistema com 8 eletrodos e um com 12 eletrodos. O sistema com 8 eletrodos foi construído em 1988 e consiste de 3 unidade principais: um sensor de capacitância com 8 eletrodos, o circuito eletrônico e um computador para a reconstrução da imagem. O sistema com 12 eletrodos foi composto de um circuito carga/descarga diferencial de medida de capacitância e *Transputers* (processadores velozes para operação de medidas em paralelo).

O sensor foi composto de 8 placas de metal (comprimento axial de 10 cm) montadas na superfície externa do tubo. As medidas foram feitas em um tubo com 76,2 mm de diâmetro interno. Foi feita uma blindagem para isolar a influência do campo externo. Este circuito é linear, ou seja, o sinal de saída é proporcional à capacitância medida e as capacitâncias parasitas entre os eletrodos e o terra virtual não afetam as medidas.

Para o sistema com 12 eletrodos foi desenvolvido um circuito carga/descarga diferencial para medir as capacitâncias. As vantagens desse circuito em relação ao circuito do sistema com 8 eletrodos são: aumento das leituras dos pares de eletrodos independentes e conseqüentemente uma melhora na resolução da imagem e aumento na velocidade de reconstrução da imagem. O sistema de 12 eletrodos foi usado para visualizar a quantidade de óleo no tubo. O sensor foi montado a 152,4 cm do misturador, sendo que os 2 componentes foram óleo/ar ou óleo/água. O trabalho apresenta a passagem dos pistões de gás num escoamento de óleo, com intervalos de 80 ms.

O sistema baseado no transdutor produz imagens em tempo real através da utilização do processamento de dados paralelos. Apesar do sistema de transdução ser relativamente caro, todo o sistema é comercialmente viável. Dois sistemas de tomografia de capacitância posicionados a uma certa distância um do outro na direção principal do escoamento, foram utilizados para medir o perfil de velocidade de um escoamento de óleo/ar num tubo.

O circuito carga/descarga teve uma resolução de 0,3 fF, no qual é adequado para aplicações em tomografia de processo. O desempenho do circuito carga/descarga é limitado, porque em seu primeiro estágio produz um sinal de saída de corrente contínua, no qual está sujeito a um ruído e problemas de deriva. O circuito de corrente alternada teve um desempenho superior em relação ao circuito carga/descarga, sendo a resolução de 0,035 fF.

Reinecke & Mewes (1996) descreveram os princípios gerais da tomografia de capacitância e mostraram os recentes desenvolvimentos no projeto do sensor primário, no sensor eletrônico e no algoritmo de reconstrução de imagem. Tendências futuras são descritas e as aplicações na pesquisa e na indústria da tomografia de capacitância são dadas.

Os princípios gerais da tomografia de capacitância são discutidos, sendo que a capacitância entre dois eletrodos é uma função da permissividade dos componentes nas medições volumétricas, tão bem quanto função da distribuição deles, sendo isto usado como princípio de medida.

O problema com um grande número de eletrodos reduz o nível do sinal e os efeitos de borda se tornam relevantes. Esta desvantagem pode ser superada pelo uso de mais de um segmento de eletrodo na direção principal do escoamento.

A blindagem na direção axial é importante, pois permite um campo mais uniforme e evita os efeitos de borda no eletrodo receptor. São apresentados dois modos de se trabalhar, um dito aterrado, que consiste em fixar um certo potencial no eletrodo emissor e manter todos os outros potenciais iguais a zero. Neste modo, nos espaços existentes entre os eletrodos, não há campo elétrico na direção radial, só há campo elétrico através dos eletrodos que estão aterrados. Outro

modo de trabalho, é dito flutuante, é aquele em que o eletrodo emissor está a um certo potencial, o eletrodo receptor está a um potencial zero e os outros eletrodos estão isolados, que significa que não há campo elétrico (fluxo do potencial elétrico) através dos eletrodos. Este modo tem a vantagem de fornecer valores maiores de capacitância, pois o fluxo que sai do eletrodo emissor chega ao eletrodo receptor.

Reinecke & Mewes (1996) mostraram que alguns autores, tais como: Xie et al. (1992b) citado por Reinecke & Mewes (1996); Huang, Xie, Thorn et al. (1992) e Chan, Bozic & York (1994) citado por Reinecke & Mewes (1996), desenvolveram um circuito de medida baseado no princípio de transferência de carga, trabalhando com frequências de 1,25 ou 2,5 MHz. Resoluções típicas desta técnica são 0,3 a 0,1 fF com frequências de medidas de 1,1 kHz.

Reinecke e Mewes (1996) mostraram que Yang & Scott (1993) citado por Reinecke & Mewes (1996) desenvolveram um circuito de medida de capacitância baseado numa ponte de corrente alternada. Instrumentos comerciais deste tipo podem operar com frequências de medidas de 14 kHz com precisão de 0,5 fF. Neste tipo de circuito, a precisão da medida aumenta com o decréscimo da frequência de medida.

Também foram apresentadas três de técnicas de reconstrução de imagem: a técnica de reconstrução linear simplificada (algoritmo retro-projeção), mostrado na Figura 2.1; a técnica de reconstrução algébrica (ART), mostrado na Figura 2.2 e a técnica iterativa com linearização, conforme a Figura 2.3.

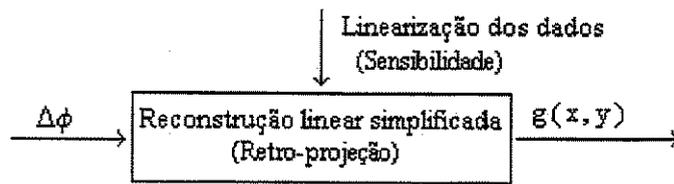


Figura 2.1 – Representação esquemática da técnica de reconstrução: retro-projeção.

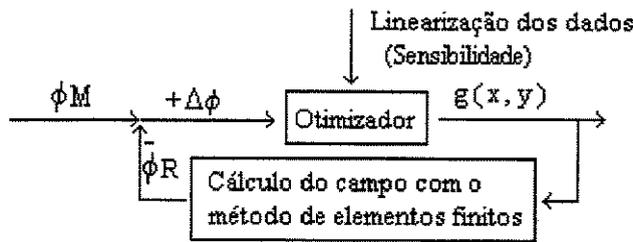


Figura 2.2 – Representação esquemática da técnica de reconstrução: iterativa com o método dos elementos finitos.

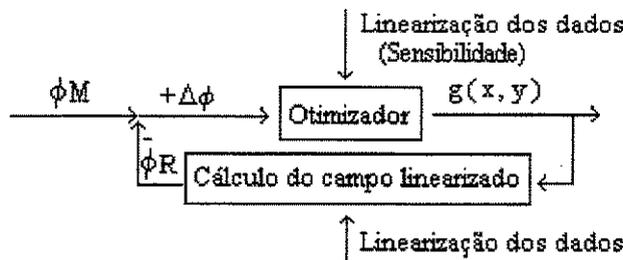


Figura 2.3 – Representação esquemática da técnica de reconstrução: iterativa com linearização.

Algumas aplicações são dadas, principalmente na área de engenharia química, em particular para reatores e em sistemas de transporte com escoamento multifásico. São mostradas as aplicações da tomografia de capacitância para sistemas gás-líquido, gás-sólido e gás-gás.

A tomografia de capacitância é uma ferramenta poderosa para a reconstrução da imagem de sistemas multifásicos, tanto na pesquisa como na indústria. A técnica é altamente desenvolvida, onde fica evidente que um grande número de instituições está trabalhando com sistemas de tomografia de capacitância. Considerando a eletrônica do sensor, circuitos de medida de capacitância mais rápidos devem ser construídos. Para se obter melhores resoluções da imagem, algoritmos de reconstrução devem ser aperfeiçoados.

Moura, Tambellini & Belo (1997) trabalharam com um sistema de tomografia elétrica para a reconstrução da imagem de um sistema bifásico, cujos os fluidos foram ar e água. Foi construído um sensor de capacitância com 8 eletrodos em um tubo de acrílico, tendo este um diâmetro externo de 60 mm e os eletrodos um comprimento axial de 60 mm, sendo eles construídos em 3 níveis na direção principal do escoamento.

O primeiro passo foi obter as leituras dos transdutores para uma dada distribuição de material, que é o problema direto, sendo que neste caso foi resolvido, utilizando-se o ANSYS (pacote numérico de elementos finitos).

O modelo de elementos finitos foi usado para calcular a distribuição de sensibilidade para o algoritmo de reconstrução de imagem, onde foram feitas algumas hipóteses simplificadoras. Neste modelo, 800 elementos representaram a região do escoamento e 168 elementos representaram a região da parede do tubo.

Para os resultados experimentais, as capacitâncias entre os pares de eletrodos foram medidas, utilizando-se uma ponte RLC (Minipa 1001). Este sistema foi testado para um sistema bifásico do tipo estratificado com concentração de líquido de 50%. Através das medidas

experimentais de capacitância e da distribuição de sensibilidade, a imagem do sistema foi reconstruída e melhorada com a utilização da técnica de filtro. O nível de corte, para estabelecer a interface líquido-gás, foi de 0,317 e o erro entre a fração de líquido estimada através das medidas de capacitância e a fração de líquido calculada no algoritmo de reconstrução de imagem, juntamente com a utilização da técnica de filtro foi menor do que 0,001.

Devido aos bons resultados, um segundo sensor foi construído e um novo medidor de capacitância, baseado em corrente alternada e imune às capacitâncias parasitas, foi desenvolvido. Este circuito baseado em corrente alternada, produz um sinal CA (corrente alternada) com magnitude proporcional à capacitância medida. A frequência de excitação esteve limitada de acordo com a largura de banda do amplificador operacional que era de 10 MHz. Este novo sistema foi testado, utilizando um sistema bifásico do tipo anular com concentração de líquido de 20,9%. Para este caso, o nível de corte foi de 0,734 e a diferença entre a fração de líquido estimada a partir das medidas de capacitâncias e a fração de líquido calculada no algoritmo de reconstrução de imagem, juntamente com a utilização da técnica de filtro foi menor do que 0,001.

Dados experimentais foram obtidos, utilizando-se um algoritmo de reconstrução de imagem linear juntamente com a técnica de filtro baseado num procedimento iterativo de corte, que foi utilizado para melhorar a qualidade da imagem.

Reinecke & Mewes (1997) descreveram o uso da tomografia de capacitância para fazer a reconstrução de imagem em escoamentos transientes em reatores (trickle-bed reactors). O reator teve um diâmetro interno de 120 mm e um comprimento total de 2000 mm. O reator foi preenchido com anéis e esferas de 10 mm de diâmetro hidráulico, sendo feitos de material cerâmico. Inicialmente, os resultados foram obtidos com um sistema de 12 eletrodos colocados em 3 planos na direção axial. O comprimento dos eletrodos foi de 75 mm e o comprimento dos 2 eletrodos de guarda foi de 100 mm. Foi colocada uma blindagem protegendo todos os eletrodos, evitando a influência de campos externos. Os resultados mostram as possibilidades da utilização da tomografia de capacitância, por exemplo na síntese de substâncias químicas e no tratamento de várias frações do petróleo. A tomografia de capacitância também permite fazer um exame mais

detalhado dos efeitos da dinâmica do fluido sobre um escoamento concorrente pulsante de gás e líquido. Para melhorar a resolução espacial e diminuir o ruído de um sensor com 12 eletrodos, foi desenvolvido um novo sensor com 16 eletrodos. As melhorias incluem o número total de segmentos do eletrodos, a blindagem axial do sensor, o potencial de eletrodos livres e número de medidas independentes por imagem, que aumenta.

Dentro dos tratados das possibilidades físicas da tomografia de capacitância como uma técnica de visualização (fluido de baixa condutividade e não condutores dentro de um vaso), este método de medida providencia uma técnica de reconstrução de imagem barata e rápida (120 quadros por segundo) para aplicação em laboratório. A vantagem dos eletrodos livres flutuantes em relação aos eletrodos livres aterrados é que a razão sinal-ruído aumenta e a linearidade do sensor é melhorada. Os eletrodos de medidas foram protegidos na direção axial e conduzidos por eletrodos de guarda, fornecendo uma distribuição de campo mais homogênea dentro de um volume de medida. Apesar de ser utilizada uma técnica iterativa para a reconstrução de imagem, algoritmos melhores devem ser desenvolvidos e o problema melhor orientado para a linearização do cálculo do campo elétrico tem que ser bem estudado.

Yang (1997) fez um trabalho baseado no sistema de tomografia de capacitância elétrica, que faz a reconstrução de imagem de uma seção do tubo usando os dados de capacitância medidos a partir dos sensores localizados na parede do tubo. Essas medidas de capacitância são afetadas pela parede do tubo e/ou pela capacitância externa entre os eletrodos. Então, foi analisado quatro tipos de montagem do sensor no tubo, que são: eletrodos externos com proteção radial, eletrodos internos sem proteção radial, eletrodos externos sem proteção radial e eletrodos internos com proteção radial. Então, obteve-se quatro métodos para calcular as capacitâncias internas entre os eletrodos. Foram apresentadas, em forma de tabela, as vantagens, os problemas encontrados e as aplicações de cada tipo de montagem do sensor no tubo.

Entre os quatro tipos, o sensor com eletrodos externos e proteção radial é mais usado. Foram feitos testes experimentais em um sensor com 8 eletrodos, sendo o diâmetro interno de 84 mm e o comprimento dos eletrodos de 10 cm. Os dois materiais utilizados foram os ar

(permissividade relativa = 1) e esferas de porcelana de 1 cm de diâmetro (permissividade relativa = 4,5). De todas as 28 leituras independentes, a capacitância dos pares adjacentes esteve em torno de 1,4 pF e dos pares opostos esteve em torno de 0,18 pF e como era esperado, a capacitância dos pares adjacentes foram maiores do que os dos pares opostos. Quando se calcula a capacitância normalizada das 28 leituras, obtém-se um desvio padrão de 18,5%, o que mostra a discrepância entre as capacitâncias normalizadas dos pares adjacentes e dos pares opostos. Para o modelo proposto, ou seja, sensor com eletrodos externos e proteção radial, as capacitâncias internas são proporcionais à permissividade relativa do material que preenche o sensor, sendo que o seu valor médio é de 1,8 com um desvio padrão de 2,3%, confirmando a validade deste tipo de sensor. Os modelos descritos são aplicáveis para todos os algoritmos de reconstrução de imagem, incluindo o algoritmo de retro-projeção linear, o iterativo e o de redes neurais.

Yang & Conway (1998) fizeram um trabalho alternativo, pois em geral os sistemas de tomografia de capacitância elétrica empregam o algoritmo de retro-projeção linear para reconstruir a imagem da seção de um tubo e o processamento para obter as imagens requer os mapas de sensibilidade para todos os pares de eletrodos. Usualmente, estes mapas de sensibilidade são obtidos por simulações numéricas, onde utiliza-se o método dos elementos finitos com uma precisão limitada pelos dados disponíveis da geometria do sensor. Foram feitas simulações para obter os mapas de sensibilidade para um sensor com 12 eletrodos, sendo que o tempo gasto foi de 50 horas.

O método alternativo encontrados por estes autores para a obtenção dos mapas de sensibilidade foi através de medidas físicas. Para isto foi construído um aparelho de teste de mapa de sensibilidade que constituiu de um ploter X-Y com um sensor, uma unidade de controle, um sensor de tomografia de capacitância elétrica, um sistema de aquisição de dados e um computador. O aparelho de teste de mapa de sensibilidade foi avaliado, utilizando-se um sensor de 48 mm de diâmetro com 12 eletrodos de latão de 5 cm de comprimento, no quais foram montados dentro de um tubo de plástico. Um tarugo circular de diâmetro de 6 mm (permissividade relativa de 2,6) foi utilizado como material de alta permissividade. A seção foi dividida em 52 elementos. O sistema de aquisição de dados foi calibrado, utilizando-se ar (permissividade relativa = 1) e esferas de

material plástico (permissividade relativa de 1,8). O sensor foi posicionado sobre cada elemento e 66 dados de capacitância normalizada foram obtidos. O mapa de sensibilidade para o par de eletrodos adjacentes 1-2 forneceu uma capacitância de 37,04 fF e para o par de eletrodos opostos 1-7 forneceu uma capacitância de 0,34 fF. Em geral, as capacitâncias são pequenas, menores do que 1 fF e na área central menores do que 0,1 fF. Portanto, o transdutor deve ser bastante sensível e ter um baixo ruído. Em princípio, os mapas de sensibilidade são mais precisos do que aqueles calculados por simulação numérica, onde alguns erros devem ser evitados, tais como: intervalo do passo do motor, tarugo do teste deveria ter a seção quadrada e não circular para evitar os espaços vazios. O aparelho de teste do mapa de sensibilidade pode ser usado para outros sensores de tomografia, tais como os sensores de tomografia de resistência elétrica e de tomografia de indutância eletromagnética.

Moura, Tambellini & Belo (1998) trabalharam com um sistema de tomografia de capacitância para a reconstrução de imagem de um sistema bifásico do tipo estratificado. Foi construído um sensor de capacitância com 8 eletrodos em torno do tubo, sendo o diâmetro interno do tubo igual a 53 mm, o diâmetro externo igual a 60 mm, sendo eles construídos em 3 passes na direção principal do escoamento e o ângulo do eletrodo igual a 40,9°.

O mapa de sensibilidade foi obtido através de simulação numérica, utilizando o método dos elementos finitos. Para a simulação numérica, o valor da permissividade relativa do gás foi 1, do líquido foi 80 e do acrílico foi 4. Isto é o método direto, pois a partir de uma distribuição de material, se consegue obter as capacitâncias entre os pares de eletrodos.

O problema inverso foi resolvido para se obter a distribuição das permissividade da mistura gás-líquido a partir dos valores de capacitância. Isto foi resolvido para 800 elementos triangulares discretizados. Foi utilizado o algoritmo de reconstrução de imagem baseado no método da retro-projeção linear, conforme Xie et al. (1989a).

Para os resultados experimentais, um sensor com 8 eletrodos foi construído, montado na superfície externa do tubo com um espaçamento de 2 mm entre eles e testado para o sistema

estratificado, sendo os fluidos ar e água. As capacitâncias entre os diferentes pares de eletrodos foram medidas por um circuito eletrônico baseado em corrente alternada e imune à capacitância parasita. Os testes foram realizados variando-se a concentração de líquido de 0,1 a 0,9.

A imagem do sistema estratificado foi reconstruída, onde foi utilizado um algoritmo de reconstrução de imagem linear mais a técnica de filtro. O nível de corte foi determinado quando a diferença entre a fração de líquido estimada das medidas de capacitância e a fração de líquido calculada pelo algoritmo tornou-se menor do que 0,001. Para a concentração de líquido de 50%, o nível de corte foi de 0,249.

A imagem reconstruída pareceu estar próxima do padrão teórico, porém algumas discrepâncias apareceram, principalmente para baixa concentração de líquido, provavelmente devido ao grande ângulo dos eletrodos (41°). Um sistema com 12 ou 16 eletrodos provavelmente daria uma melhor representação da imagem do escoamento com baixa concentração de líquido.

2.3 – Circuitos eletrônicos

Huang, Stott et al. (1988a) apresentaram as técnicas de transduções eletrônicas aplicadas ao estudo de misturas, que consistiu de circuitos especiais de medida de impedância elétrica, notadamente, de baixos valores de capacitância. É desejável, por razões de sensibilidade, efeitos de impurezas e derivas da resposta com as condições ambientais que as frequências sejam cada vez mais elevadas.

Huang, Stott et al. (1988) também fizeram a classificação dos métodos de medidas de capacitância em ressonante, oscilante, carga/descarga e ponte. O método ressonante é capaz de medir capacitância na frequência de até alguns megahertz. O método de dupla ressonância, denominado de método de Ichijo, é particularmente útil quando se mede a permissividade de materiais com grandes perdas resistivas. Utilizando este método, Masuda, Nishikawa & Ichijo (1980) citado por Huang, Stott et al. (1988) conseguiu uma resolução na medida da capacitância

com perdas tão baixa quanto 30Ω . Por se tratar de um método essencialmente manual é inadequado para transdução dinâmica. No método oscilante as frequências dependem de uma capacitância desconhecida. No método RC (circuitos cujas as frequências de oscilação dependem dos resistores e dos capacitores) estão os multivibradores, temporizadores, o casamento da frequência pela realimentação de uma malha de fase ("phase locked loop"). Algumas desvantagens deste método são: a pequena imunidade às capacitâncias de acoplagens, a frequência de oscilação é influenciada por uma condutância elétrica de desvio, baixa sensibilidade às pequenas variações de capacitância e pobre estabilidade em frequência. O método LC (circuitos cujas frequências de oscilação dependem dos indutores e dos capacitores) pode ser aplicado até frequências de alguns megahertz. Aplicando o princípio da realimentação a este método, Green & Cunliffe (1983) citado por Huang, Stott et al. (1988) não só mediram a capacitância, como mediram as flutuações de capacitância (típicas de escoamentos bifásicos) em frequências de 1 a 1000 Hz, com uma resolução de 0,01fF. A principal desvantagem desta técnica é que a capacitância de acoplagem é incluída na medida de capacitância. O método de carga e descarga é descrito em uma patente assinalado pela companhia "Endress and Hauser LTDA" (1984) citado por Huang, Stott et al. (1988), sendo muito utilizado como elemento transdutor do sistema de tomografia capacitiva. Resultados experimentais têm conseguido sua aplicação até 2 MHz. O método de ponte de corrente alternada tem uma longa história desde a ponte de Schering de 1920 até as pontes automáticas da década de oitenta, e é ainda reconhecido como o método mais exato e estável de medir capacitância. Uma transdução muito útil e precisa é baseada na razão dos ramos de transformadores. No estudo experimental da estabilidade com a temperatura de circuito deste tipo, foi mostrado por Huang (1986) citado por Huang, Stott et al. (1988) uma deriva equivalente a $0,0007\text{pF}/10^\circ\text{C}$, para um desbalanceamento de capacitância de 2 pF. Uma limitação deste método é a faixa de frequência, limitado a 30 kHz.

Em aplicações onde ambos eletrodos são flutuantes, isto é, não são aterrados, a capacitância entre eles pode ser determinada por técnica em que a medida independe das acoplagens dos eletrodos com outros elementos metálicos, circuitos denominados intrinsecamente imune às capacitâncias de acoplagens. Circuitos onde um dos eletrodos está aterrado pode ser utilizado com uma técnica de guarda ativa para compensar este tipo de erro.

O circuito utilizado no sistema de tomografia consiste de um sistema de transdução eletrônica para medida da permissividade de misturas cuja característica é ser intrinsicamente imune aos efeitos de impedâncias não envolvidas diretamente no problema, e que tem tido um bom comportamento em frequências bem acima de 5MHz.

Para medidas industriais de baixos valores de capacitância, métodos de medidas intrinsicamente imunes às capacitâncias parasitas deveriam ser usados. Quando um sensor está aterrado, o método de guarda ativa é útil para minimizar efeitos da capacitância parasita. Para medidas, usando frequências abaixo de 100 kHz, transdutor ponte de transformador é recomendado. Para medidas na região de frequência de 100 kHz a 5 MHz ou aquelas que requerem uma frequência de medida programável, o transdutor carga/descarga imune à capacitância parasita é recomendado. Acima de 5 MHz, osciladores LC ou métodos de ressonância deveriam ser usados.

O desenvolvimento dos circuitos de medida imunes à capacitância parasita, no qual podem operar estavelmente em altas frequências (acima de 5MHz) ainda é um problema não resolvido. Esta situação deve ser melhorada no futuro, quando a melhoria da performance dos componentes semicondutores (amplificadores operacionais, chaves FET, etc.) em altas frequências tornar-se-ão disponíveis.

A performance dos sistemas de medida de capacitância deve ser melhorada pelo uso de técnicas, tais como a auto-calibração e o balanceamento de ponte automática. Estas técnicas de medidas tendem ir em direção ao desenvolvimento das pontes automáticas e da ponte digital com chaveamento (switched-capacitor digital bridge). Transdutores de capacitância com chip integrado baseado nas técnicas de chaveamento poderão tornar-se comercialmente disponíveis em um futuro próximo.

Huang, Fielden et al. (1988) desenvolveram um novo dispositivo para medir capacitância absoluta baseado numa relação entre a transferência de carga, voltagem e capacitância, sendo descrita como uma função exponencial. Este circuito consiste de um par de chaves analógicas

CMOS e um amplificador integrador de corrente, resultando num transdutor de capacitância simples capaz de providenciar frequências de medidas programáveis variando desde 100 kHz até 5 MHz. Isto torna o transdutor adequado para fazer medições de concentração de componente em escoamento bifásico em processos que envolvem fluidos condutivos.

O projeto do circuito inicial foi feito através de um modelo matemático de transdutor. Análises paramétricas deste modelo são usadas para otimizar tanto a estabilidade como a sensibilidade do transdutor. O aumento da sensibilidade está relacionado com o aumento da razão entre a voltagem de saída e a voltagem de compensação do amplificador operacional. Para se obter uma sensibilidade adequada, valores suficientemente grandes da frequência, da voltagem de carga e da resistência de realimentação deveriam ser escolhidos. A escolha da frequência está sujeita à limitação prática da aplicação, sendo que se não existe nenhuma imposição, então deveria ser escolhida uma frequência entre 1 ou 2 MHz, embora frequências mais altas, cerca de 5 MHz causam um aumento da não linearidade do transdutor. A voltagem de carga tem sido aumentada até 15 V, que é o sinal máximo que a chave CMOS pode trabalhar. O aumento da resistência de realimentação está limitada pela condição de ter que ser muito menor do que a resistência do circuito para anular cada uma das derivas de cada um dos amplificadores. O valor da resistência de realimentação está usualmente entre 10-100 k Ω . Isto produz um transdutor com sensibilidade de 0,3-3 V/pF a uma frequência de 2 MHz. A estabilidade é atingida quando se consegue utilizar um oscilador de cristal com $\Delta f/f < 50$ PPM e resistores tendo uma alta estabilidade e precisão com $\Delta R/R < 50$ PPM. A voltagem de carga é o parâmetro mais crítico, desde que o regulador normal possa ter variações da ordem de 0,1% a 1% sob condições ambientais normais. O uso de dois amplificadores num pacote simples e integrado do tipo NE5530 ajuda a minimizar a deriva. Sobre um período de 12 horas, a sensibilidade de 0,5 V/pF e uma diferença de capacitância de 10 pF, a máxima deriva medida foi equivalente a uma variação de capacitância de entrada de 0,01 pF. Isto assegura que o transdutor tem uma discriminação melhor do que 0,01 pF num fundo de escala de 10 pF.

Em medidas de capacitância com uma placa aterrada, surge o problema da capacitância parasita. Um novo método de guarda ativa tem sido inventado, no qual reduz o efeito das

capacitâncias parasitas por um fator de 0,0025 quando se está operando a uma frequência de 1 MHz.

Huang, Xie, Thorn et al. (1992) desenvolveram um projeto de sensor eletrônico para um sistema de reconstrução de imagem através da técnica de tomografia baseado no sensor de capacitância elétrica. A performance do sensor eletrônico é de vital importância para o bom desempenho do sistema de reconstrução de imagem. Os problemas associados com o processo de medidas são discutidos e as soluções deles são apresentadas. O resultado teste mostrou que o projeto atual tem uma resolução de 0,3 fF (para um sistema de reconstrução de imagem com 12 eletrodos, de um escoamento de óleo-gás, representando 2% de fração de vazio para o gás no centro do tubo) com um nível de ruído baixo em torno de 0,08 fF (valor rms), uma grande faixa dinâmica de 76 dB, pois a menor capacitância detectável foi de 0,3 fF e a máxima capacitância aceitável foi de 2 pF e uma velocidade de aquisição de dados de 6600 medidas por segundo. Isto possibilitou utilizar um sensor com até 12 eletrodos num sistema com uma taxa de reconstrução de imagem máxima de 100 quadros por segundo e providenciou uma melhora na resolução da imagem sobre um sistema com 8 eletrodos, tendo uma área de eletrodo adequada para fornecer uma suficiente sensibilidade de medida.

Um problema associado com as medidas de capacitância no sistema de reconstrução de imagem é que os valores de capacitância e a sensibilidade para os diferentes pares de eletrodos são diferentes e para vencer este obstáculo, pode-se utilizar uma voltagem de referência programável para balancear os diferentes valores padrões das medidas (zeros) e um amplificador de ganho programável para satisfazer as diferentes sensibilidades.

A resolução das medidas do circuito é principalmente limitado pelo nível de ruído gerado pela voltagem no circuito. Existem algumas opções para melhorar a razão sinal-ruído, tais como: o uso de amplificador operacional, um incremento da frequência de excitação. Aumentando-se a frequência de 1,25 MHz para 1,5 MHz, a razão do sinal-ruído aumenta de 20%. Para este protótipo a frequência esteve limitada em 1,7 MHz. Outro fator que diminui o nível ruído é a diminuição da largura de banda do circuito eletrônico.

Deve-se levar em conta o comprimento do eletrodo para avaliar o efeito da média de uma propriedade ao longo da direção principal do escoamento. O circuito baseado no princípio de transferência de carga não satisfaz uma razão de sinal-ruído adequado, sendo que o circuito baseado na técnica de ponte de corrente alternada deve ser mais apropriado. Com uma ponte, o sinal de entrada da capacitância deveria ser modulada por uma onda senoidal e este passaria por um filtro de banda antes da demodulação, para reduzir a largura de banda do ruído aleatório. Filtros de bandas de ordem mais altas e demoduladores de fase podem ser implementados em processadores de sinal digital, pois fazem parte da unidade de reconstrução de imagem, reduzindo a complexidade da eletrônica do sensor.

Yang, Stott & Beck (1994) desenvolveram um circuito de medida de capacitância para um sistema de tomografia de capacitância elétrica, sendo que para esta aplicação, uma alta frequência de excitação é essencial para atingir uma alta sensibilidade, taxas rápidas de coletas de dados e reduzir o efeito de qualquer componente condutivo em paralelo com as medidas de capacitância. O circuito de medida de capacitância baseado em corrente alternada usa um amplificador operacional (OPA627 e OPA637) com um resistor de realimentação, que mede diretamente a admitância de uma capacitância desconhecida. Este tipo de circuito tem uma baixa deriva e um boa razão entre o sinal e o ruído. O circuito opera a uma alta frequência de 500 kHz, tendo a vantagem quando os materiais do processo não são puramente dielétricos, mas tem algum componente condutivo. A sensibilidade do circuito para a capacitância é proporcional à frequência de excitação, enquanto que a sensibilidade em relação à condutância é constante, então uma alta frequência aumenta a sensibilidade para a capacitância e reduz o efeito de qualquer condutância. Uma frequência de alta excitação tem sido possível pelo uso de novos métodos: um gerador de sinal digital de alta frequência, amplificadores de corrente alternada com parâmetros otimizados e um demodulador de fase utilizando chaves CMOS. Para o gerador de sinal foi utilizado um oscilador de cristal de 8 MHz. A sensibilidade do circuito de medida de capacitância foi de 2,36 V/pF. Os resultados foram obtidos para um sensor com 12 eletrodos, sendo que o menor resultado foi de 0,00267 pF (eletrodos opostos para o ar) e o maior resultado foi de 38,08 pF (eletrodos adjacentes para a água). Foi feita a calibração do circuito com óleo e ar, sendo que o

coeficiente de correlação foi de 0,99969 e o desvio quadrático médio foi de 0,035 fF, mostrando que tem uma boa linearidade e também tem uma boa estabilidade, porque depois de 2 horas, o desvio médio quadrático foi de 0,084 fF. Este circuito é melhor que o carga/descarga, pois este tem uma resolução de 0,3 fF, conforme Huang, Xie & Thorn (1992). Este circuito pode ser usado não somente para tomografia de processo, mas para transdutores de capacitância para serem utilizados na indústria.

Belo (1995) apresentou a modelagem e métodos experimentais para a validação da análise eletrônica aplicada aos escoamentos multifásicos. Ele baseou-se no comportamento da amostra em relação ao campo eletromagnético e de sua identificação através de uma transdução eletrônica. Organizou os fundamentos de resposta da matéria com o campo eletromagnético e, a partir destas, os princípios das células transdutoras.

A eletrônica de transdução consistiu de uma técnica de processamento eletrônico analógico bem integrada à unidade sensora de modo que permitiu a obtenção de resultados experimentais próximos dos valores calculados. Trabalhou-se com frequências altas, em torno de 10 MHz, comparadas com as utilizadas em trabalhos similares, geralmente em torno de 2 MHz. Uma técnica de guarda permitiu uma boa localização do campo de medidas da amostra. Foram desenvolvidos protótipos de laboratórios, propostos métodos de aferição e analisadas as respostas simuladas e reais de diversos tipos de escoamento bifásico gás-líquido. Os resultados obtidos apontaram para a viabilidade da utilização do método experimental proposto para a aplicação em um sistema de tomografia com processamento do tipo paralelo.

O tipo de circuito e os procedimentos para obtenção da eletrônica de transdução aliada à técnica da guarda eletrônica, propiciou um sistema fundamentado em modelos teóricos que se aproximaram bem dos resultados teóricos e experimentais, sendo estes resultados comparados entre si.

No comportamento das células não invasivas, os ensaios com guarda mostraram uma boa aproximação da formulação da análise eletrônica para os modelos multifásicos e o caso sem guardas ampliou certos erros.

A alta velocidade da tomografia capacitiva mostrou-se adequada ao acompanhamento dinâmico da interface de um escoamento bifásico em contraposição à velocidade da tomografia de raios X.

Yang (1996) apresentou dois circuitos de medidas de capacitância, que são os mais apropriados para o uso em sistemas de tomografia de capacitância, o circuito de carga/descarga e o circuito baseado em corrente alternada, isto por causa da imunidade deles em relação às capacitâncias parasitas.

O sensor foi composto de 12 eletrodos de 10 cm de comprimento, sendo que as capacitâncias para o tubo vazio (cheio de ar) variaram de 6,07 fF a 0,489 pF, enquanto que as capacitâncias para o tubo cheio de esferas de plástico com permissividade relativa de 2,6 variaram de 5,47 fF a 76,9 fF.

O circuito carga/descarga tem uma resolução de 0,3 fF, mede impedância, trabalha numa frequência de até 2,5 MHz e tem um custo baixo. As desvantagens deste circuito são: a injeção de carga da chave CMOS causa problema de capacitância de acoplamento, amplificadores de corrente contínua sofrem problemas de deriva e existe a perda de condutância.

O circuito baseado em corrente alternada tem uma resolução de 0,04 fF, mede impedância, capacitância e condutância e trabalha numa frequência de até 1 MHz, tem baixa deriva devido ao uso de amplificadores de corrente alternada e tem uma alta razão entre sinal e ruído. Tem a desvantagem de ser complicado e caro, especialmente para operações com altas frequências.

Para medir as variações precisas de capacitância, os valores dela (standing capacitance values) tem que ser compensados ou cancelados. Existem dois métodos que podem ser usados

para este propósito, a compensação com corrente contínua e a compensação de realimentação com corrente alternada. Um método alternativo consiste em usar um circuito de medida de capacitância com auto-balanceamento para medir os valores de capacitância absoluta com uma alta resolução.

Se um circuito de medida de capacitância carga/descarga é utilizado, o método da compensação com corrente contínua é recomendado. Se um circuito de medida baseado em corrente alternada é usado, o método da compensação com realimentação com corrente alternada é recomendado. Se uma alta resolução é requerida e uma velocidade lenta é permissível, o método de auto-balanceamento é recomendado.

2.4 – Algoritmo de reconstrução de imagem

Yorkey, Webster & Tompkins (1987) trabalharam no aperfeiçoamento do algoritmo de reconstrução de imagem através da tomografia de impedância elétrica, onde a convergência geralmente é garantida. O algoritmo é atrativo por várias razões. O método de Newton-Raphson varia com o modelo de elementos finitos das resistividades para ajustar um conjunto de medidas de voltagem pelo método dos mínimos quadrados. Dois procedimentos para o cálculo da matriz Jacobiana são expostos. Um é o padrão e o outro é baseado no teorema da compensação. O segundo procedimento é mais eficiente em termos computacionais e tem uma precisão igual ao primeiro. O mal condicionamento inerente na aproximação da matriz Hessiana do sistema linearizado é eliminado usando o método de Marquardt (1963) citado por Yorkey, Webster & Tompkins (1987). Resultados de simulações computacionais bidimensionais são comparados como outros algoritmos de reconstrução de imagem, nos quais são baseados nos métodos propostos por outros autores. O método de Newton-Raphson modificado providenciou, significativamente, melhores resultados do que qualquer outro método. Os algoritmos comparados foram o método da perturbação, equipotencial, equipotencial iterativo e dupla restrição (double constraint). O método de Newton-Raphson modificado convergiu para o menor erro, que foi de 0,01 com quatro iterações, enquanto que o método da compensação convergiu para o erro de 0,12 com 14 iterações, o método da perturbação ultrapassou as 20 iterações, sendo que o erro nesta

iteração estava em torno de 0,22 e o método da dupla restrição não tinha convergido para as 20 iterações, sendo que o erro na vigésima iteração estava em torno de 0,52.

O método dos elementos finitos resolve o problema direto, convergindo para a solução da equação de Laplace, se muitos elementos são usados. O método de Newton-Raphson modificado resolve o problema inverso por calcular a distribuição da resistividade que minimiza o erro quadrático entre as voltagens medidas daquelas calculadas pelo método dos elementos finitos. Este método de otimização é conhecido por convergir quadraticamente a um erro mínimo sob condições razoáveis. Portanto, ambas as fases da reconstrução são bem comportadas. Pode-se melhorar a eficiência de cálculo de duas maneiras. A primeira, o cálculo da matriz Jacobiana baseada no teorema da compensação é mais eficiente do que o método padrão e não tem perda na velocidade de convergência ou exatidão. A segunda, é que o método de Marquardt resolve o problema de mal condicionamento mais eficientemente do que os outros métodos. O método de Newton-Raphson que recalcula a matriz Jacobiana em cada iteração, converge mais rápido do que os outros métodos. Ainda deve-se melhorar a robustez do método de Newton-Raphson.

Isaksen e Nordtvedt (1993) desenvolveram um novo algoritmo de reconstrução de imagem para ser usado em um escoamento bifásico de óleo-gás dentro de um tubo. O sistema do sensor foi constituído de 8 eletrodos montados circunferencialmente na parte externa do tubo. Os eletrodos tinham 25 cm de comprimento e 7 μm de espessura, a parede do tubo tinha 4 mm de espessura, o ângulo entre dois eletrodos adjacentes foi de 10° , o raio interno do tubo foi de 41 mm e a blindagem teve um raio de 60 mm. As medidas de capacitância foram feitas por um analisador de impedância HP 4192 A LF. Para a simulação do regime estratificado, utilizou-se ar e óleo nas proporções de 0,25, 0,5 e 0,75. Para a simulação do regime anular, tanto concêntrico como excêntrico, foram utilizados tarugos de náilon e ar dentro do tubo para proporções de 0,38 e 0,67 em ambos os casos. Para o escoamento estratificado com uma interface a uma inclinação de 30° foi utilizado o náilon.

O novo algoritmo é composto basicamente por um modelo numérico do sistema do sensor e de uma rotina de otimização. Uma dada distribuição inicial de óleo e gás estimada dentro do tubo é baseada na informação obtida através do algoritmo retro-projeção linear. As capacitâncias calculadas através da simulação são comparadas com as capacitâncias medidas através do erro quadrático. Quando este erro é maior que um dado limite, as diferenças entre as capacitâncias simuladas e medidas tornam-se dados de entrada de um otimizador que irá sugerir uma modificação da distribuição de óleo e gás, então as capacitâncias são calculadas novamente através da simulação numérica e comparadas com as capacitâncias medidas e todo o processo se repete até à convergência. O desvio médio entre as capacitâncias medidas e numéricas esteve em torno de 4%. Neste novo algoritmo foi feita uma parametrização com 5 variáveis para representar a interface dos regimes de escoamento: anular e estratificado. Esta parametrização servirá para ajustar a melhor curva para uma dada distribuição de material, sendo utilizada no otimizador.

O algoritmo faz a reconstrução da imagem calculando os parâmetros que fornecem a menor discrepância entre as capacitâncias calculadas e medidas, sendo que para isso é utilizada uma rotina de otimização. Todos os regimes testados nesse trabalho têm sido reconstruídos com sucesso com o novo algoritmo e as imagens reconstruídas por este novo algoritmo são comparadas com as imagens reconstruídas pelo algoritmos de retro-projeção linear. O novo algoritmo tem sido testado usando os dados do sistema de imagem de capacitância, embora isto possa, em princípio, ser usado com outra técnica de reconstrução de imagem.

Isaksen (1996) fez uma análise das técnicas de reconstrução de imagem para a tomografia de capacitância, onde relatou que o maior problema é que a relação entre a quantidade medida (capacitância) e o parâmetro de interesse (distribuição da permissividade) não é linear. Entretanto, não é possível estabelecer uma expressão explícita, na qual relaciona a distribuição da permissividade relativa com a capacitância medida, pois elas são dependentes. Também deve ser levado em consideração que o número de medidas numa tomografia de capacitância é pequeno (geralmente menor que 100) comparado com a tomografia médica. Por estas razões, o primeiro algoritmo testado num sistema de tomografia de capacitância foi baseado num algoritmo de retro-projeção. Este algoritmo, no decorrer dos anos, tem sido bastante usado na tomografia de

capacitância. Outras técnicas, tais como os vários métodos iterativos, tabelas como banco de dados para reconstruir a imagem, algoritmos baseados em redes neurais, têm sido desenvolvidas e testadas.

Isaken (1996) descreveu o processo de tomografia de um modo geral, o modelo do sistema para a tomografia que foi baseado na equação de Poisson e descreveu as principais técnicas de reconstrução de imagem: retro-projeção (back-projection), reconstrução iterativa e reconstrução analítica.

O algoritmo de retro-projeção linear usa uma função análoga à média ponderada para calcular o grau de cinza dos elementos. A distribuição de sensibilidade calculada numericamente entraria como o peso na função e as capacitâncias normalizadas experimentais como a variável x . Uma maneira de melhorar o contraste entre a interface de gás e líquido, é aplicar alguma técnica de filtro para estimar o grau de cinza dos elementos. Foram apresentados os resultados de reconstrução de imagem para escoamentos dos padrões de bolhas e anular de um sistema com oito eletrodos, usando como componentes óleo e gás num tubo de diâmetro interno de 82 mm.

Os resultados mostraram que o principal obstáculo do algoritmo de retro-projeção linear é que ele mascara as transições numa distribuição da permissividade relativa. Uma outra maneira de melhorar a informação da distribuição da permissividade relativa é usar o algoritmo de retro-projeção linear num esquema iterativo.

O algoritmo utilizado num esquema iterativo consiste nas seguintes etapas: (1) calcular uma distribuição de imagem baseada na informação da sensibilidade uniforme. A técnica de filtro é aplicada para identificar a interface da distribuição de permissividade relativa. (2) Avaliação. Com esta distribuição obtida, calcula-se as capacitâncias (problema direto) resultando num conjunto de capacitâncias numéricas. Estas capacitâncias são comparadas com as capacitâncias experimentais e se a diferença for menor do que uma certa tolerância, então o algoritmo termina. (3) Caso contrário, corrige-se da distribuição de sensibilidade substituindo a intensidade do campo elétrico na equação da sensibilidade. (4) O algoritmo utiliza a distribuição de sensibilidade modificada e

repete o procedimento de reconstrução de imagem e calcula as capacitâncias numéricas novamente e utiliza a técnica de filtro. (5) Volta para (2).

O algoritmo baseado no modelo reconstrução (Model-based reconstruction - MOR) minimiza a diferença entre as capacitâncias estimadas e medidas, alterando a distribuição da permissividade relativa, sendo um dado de entrada para o modelo do sensor. Para isto, é preciso utilizar um simulador de capacitância e uma rotina de otimização, assumindo que a distribuição poderia ser descrita por n parâmetros.

As principais partes do algoritmo baseado no modelo de reconstrução são: (1) uma função que representa a distribuição de permissividade. (2) Capacitâncias numéricas são calculadas para uma dada construção do sensor. O modelo do sensor de capacitância é baseado na solução de elementos finitos. (3) Uma rotina de otimização minimiza o erro entre as capacitâncias simuladas e experimentais.

A técnica de reconstrução algébrica (ART) é baseada na minimização das diferenças entre as capacitâncias normalizadas calculadas e simuladas. O algoritmo calcula uma imagem inicial usando o algoritmo retro-projeção, então a imagem é melhorada num esquema iterativo, alterando a distribuição do meio como uma função da diferença entre as capacitâncias normalizadas calculadas e medidas e a informação da sensibilidade.

Em geral, poderia ser estabelecido que para melhorar a precisão na reconstrução, poderia incrementar o número de eletrodos, para aumentar o número de medidas e/ou melhorar o algoritmo de reconstrução de imagem, tal que mais informações seriam extraídas dos dados existentes. As imagens reconstruídas baseadas no algoritmo LBP podem ser melhoradas pelo aumento do número de eletrodos. Embora, as melhoras sejam limitadas, a qualidade de reconstrução realmente diminuirá no centro do tubo quando o número de eletrodos aumentar. A razão é que quando o número de eletrodos é aumentado, o tamanho dos eletrodos decresce e conseqüentemente a sensibilidade no centro do tubo (onde a intensidade do campo elétrico é a mais baixa) diminui. Isto significa que, para melhorar a imagem reconstruída, algoritmos novos e mais precisos devem ser desenvolvidos.

Os algoritmos como o LBP são rápidos, porém a resolução da imagem não é tão boa. Os algoritmos MOR e ART são mais precisos, mas precisam de uma intensidade computacional maior. O algoritmo escolhido teria uma aplicação mais específica, não sendo possível de ser usado de uma maneira geral.

Nos desenvolvimentos futuros, espera-se resultados em algoritmos LBP mais rápidos com um procedimento de corte mais efetivo. Isto reduziria a necessidade de potência computacional e diminuiria o tempo de reconstrução, fazendo estas técnicas serem amplamente aplicáveis. Neste desenvolvimento, será de vital importância que futuras aplicações incluam comparações de algoritmos propostos em relação às técnicas existentes, tais como o LBP e que as melhoras sejam quantificadas.

Capítulo 3

Simulação Numérica

3.1 – Princípios da tomografia de capacitância elétrica

Sendo a tomografia de capacitância elétrica baseada nas medidas de capacitância, vários eletrodos, em geral 8, 12 ou 16 são montados circunferencialmente e igualmente espaçados em torno de um tubo de material isolante, na parte externa ou na parte interna, onde são feitas as medidas de capacitância, a partir da combinação de cada par de eletrodos.

Um sensor com n eletrodos fornece uma combinação de $n*(n-1)/2$ leituras independentes, sendo que para um sensor com 8 eletrodos, são obtidas 28 medidas independentes de capacitância. Durante o procedimento de medida, um eletrodo é selecionado como o eletrodo emissor, aquele que emite um sinal e um outro é selecionado como eletrodo receptor, aquele que recebe o sinal. Eletrodos livres são todos os eletrodos, exceto o eletrodo emissor e o eletrodo receptor. Eles (eletrodos livres) podem estar aterrados ao potencial de terra virtual do circuito de medida ou podem estar flutuando, ou seja, quando não há fluxo de potencial elétrico através deles.

Definido o número de eletrodos, o tamanho do tubo e conseqüentemente a geometria do sensor, a determinação das capacitâncias pode ser feita por simulação numérica, onde geralmente utiliza-se um pacote numérico de elementos finitos, ou através de medições experimentais de capacitância com um transdutor (circuito eletrônico). Esta etapa é conhecida como o método direto, pois a partir de uma distribuição dos componentes dentro de um domínio, obtém-se os valores de capacitância, seja através da simulação numérica ou através das medidas experimentais.

Os valores das capacitâncias, entre cada par de eletrodos, podem ser obtidos através da solução da equação do campo eletrostático. Para um domínio bidimensional tem-se:

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 K(x, y) \nabla V(x, y)] = 0 \quad (3.1)$$

onde:

$V(x, y)$ é o potencial eletrostático bidimensional;

$K(x, y)$ é a distribuição da permissividade relativa no plano bidimensional e

ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$).

Depois de determinar o potencial elétrico, a capacitância entre cada par de eletrodos, i - j , pode ser determinada, resolvendo-se a seguinte equação:

$$C_{i,j} = \frac{\epsilon_0}{(V_i - V_j)} \int_{(x,y) \in A_j} K(x, y) \nabla \vec{V}_i(x, y) \cdot d\vec{A}_j \quad (3.2)$$

onde:

$V_i(x, y)$ é a distribuição do potencial eletrostático quando o eletrodo i é o eletrodo emissor;

\vec{A}_j é o vetor normal à área do eletrodo receptor;

V_i é o potencial elétrico no eletrodo emissor;

V_j é o potencial elétrico no eletrodo receptor e

$C_{i,j}$ é a capacitância entre o par de eletrodos i - j .

Para o cálculo da distribuição de sensibilidade das capacitâncias ou mapa de sensibilidade, existem dois métodos principais: por meio de medidas experimentais ou por simulação numérica, usando-se o método de elementos finitos. Sabe-se que existem dificuldades práticas com o método experimental, tais como a necessidade de um transdutor bastante sensível para detectar uma pequena variação de permissividade de um elemento, a imprecisão na localização do elemento

dentro do tubo e o grande número de medidas necessárias. Então, a distribuição de sensibilidade é geralmente determinada pelo uso de um pacote numérico, que resolve a equação de Laplace.

O problema inverso é a obtenção da imagem reconstruída a partir das medidas experimentais de capacitância e da distribuição de sensibilidade das capacitâncias. O problema inverso é baseado no algoritmo de reconstrução de imagem e para resolvê-lo alguma aproximação é necessária, pois geralmente o número de parâmetros desconhecidos (relacionado com o número de elementos discretizados na simulação numérica) é maior do que o número parâmetros conhecidos (medidas experimentais de capacitância). Sendo o sistema indeterminado, utiliza-se alguma informação do sistema, no caso a distribuição de sensibilidade de capacitância. Com isto, é possível fazer a reconstrução de imagem de um sistema bifásico.

3.2 – Objetivos e etapas da simulação numérica

Os objetivos da simulação numérica são: obter os valores da capacitância entre os pares de eletrodos, por meio de um pacote de simulação numérica, para comparar com os resultados experimentais; verificar a convergência dos resultados numéricos, para as capacitâncias entre os pares de eletrodos para o tubo cheio de ar e cheio de água, fazendo o refinamento da malha e gerar a distribuição de sensibilidade que será utilizada no algoritmo de reconstrução de imagem.

As etapas da simulação numérica são:

- discretização da malha ;
- definição da geometria do problema a ser estudado;
- resolução da equação de Laplace (equação que governa o campo eletrostático bidimensional) e definição das condições de contorno;
- cálculo da capacitância através de simulação numérica para uma dada distribuição de material e
- cálculo da distribuição de sensibilidade que será utilizada no algoritmo de reconstrução de imagem juntamente com as medidas experimentais de capacitância para a reconstrução da imagem.

3.3 – Discretização da malha

Na simulação numérica utilizou-se a seguinte malha, conforme a Figura 3.1. A seção do tubo foi dividida em 8 setores, consequentemente o sensor foi composto de 8 eletrodos, no que resultou em 1 eletrodo em cada setor.

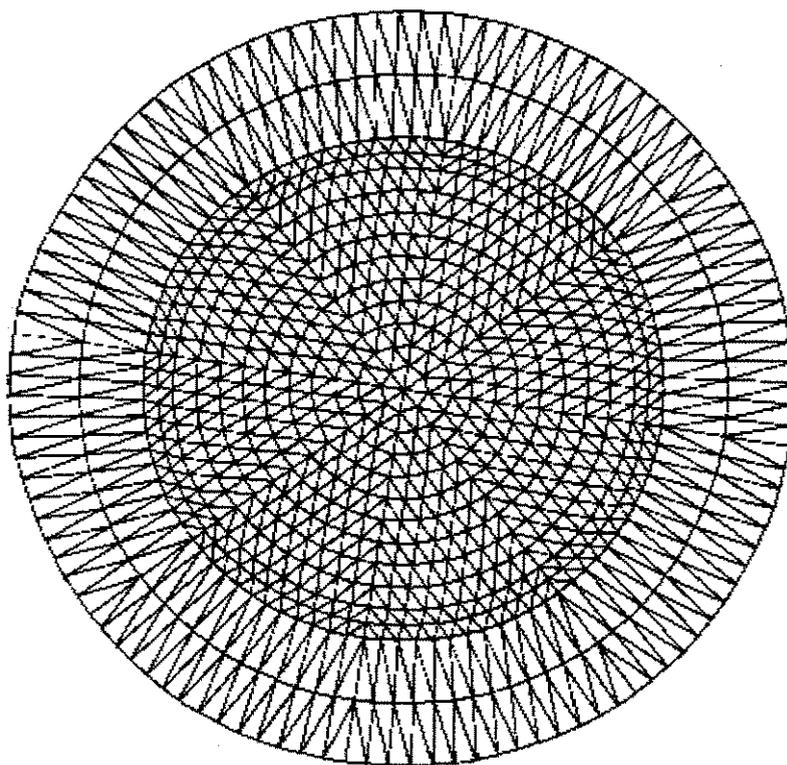


Figura 3.1 – Esquema geral da malha discretizada.

Para a geração da malha no ANSYS, só foi preciso fazer a discretização do primeiro setor, pois a discretização dos outros setores foi feita automaticamente por rotação, devido à simetria da malha. Neste trabalho utilizou-se elementos triangulares de três nós.

A malha foi dividida em três regiões: a região interna, onde está o sistema bifásico; a região do tubo, onde está situada a parede do tubo e a região externa, que compreende a região entre a parede externa do tubo e a blindagem. A região interna foi constituída pelos seguintes materiais:

ar, água ou ar-água; a região do tubo foi constituída pelo acrílico e a região externa foi constituída pelo ar.

O domínio foi dividido em camadas, que é o número de divisões ao longo do eixo radial, onde se encontram os elementos triangulares discretizados. A região interna foi dividida em 10 camadas, a região do tubo em 2 camadas e a região externa em 2 camadas, totalizando um total de 14 camadas, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

A Figura 3.2 traz, para os dois primeiros setores, o posicionamento dos eletrodos na malha, sendo que para os outros seis setores, o posicionamento é análogo a esses dois primeiros eletrodos. A Figura 3.2 não está em escala.

A Tabela I.1 que se encontra n Anexo I traz, para uma seção de tubo dividido em 8 setores, os elementos pertencentes às suas respectivas camadas e a Tabela I.2 que se encontra no Anexo I traz os nós pertencentes às suas respectivas linhas.

Para os 8 setores tem-se 800 elementos representando a região interna, 352 elementos representando a região do tubo e 416 elementos representando a região externa.

Para gerar a malha no ANSYS, é preciso entrar com os seguintes arquivos de dados: MALHA1.PRE, COORD1.DAT e CONET1.DAT. O arquivo MALHA1.PRE é o arquivo de entrada do número de elementos do primeiro setor, do número de nós do primeiro setor, do ângulo do setor, do número de setores, dos tipos de materiais utilizados, do sistema de coordenadas, que neste caso é cilíndrico. O arquivo MALHA1.PRE é responsável pela geração da malha, sendo que ele necessita dos arquivos: COORD1.DAT e CONET1.DAT.

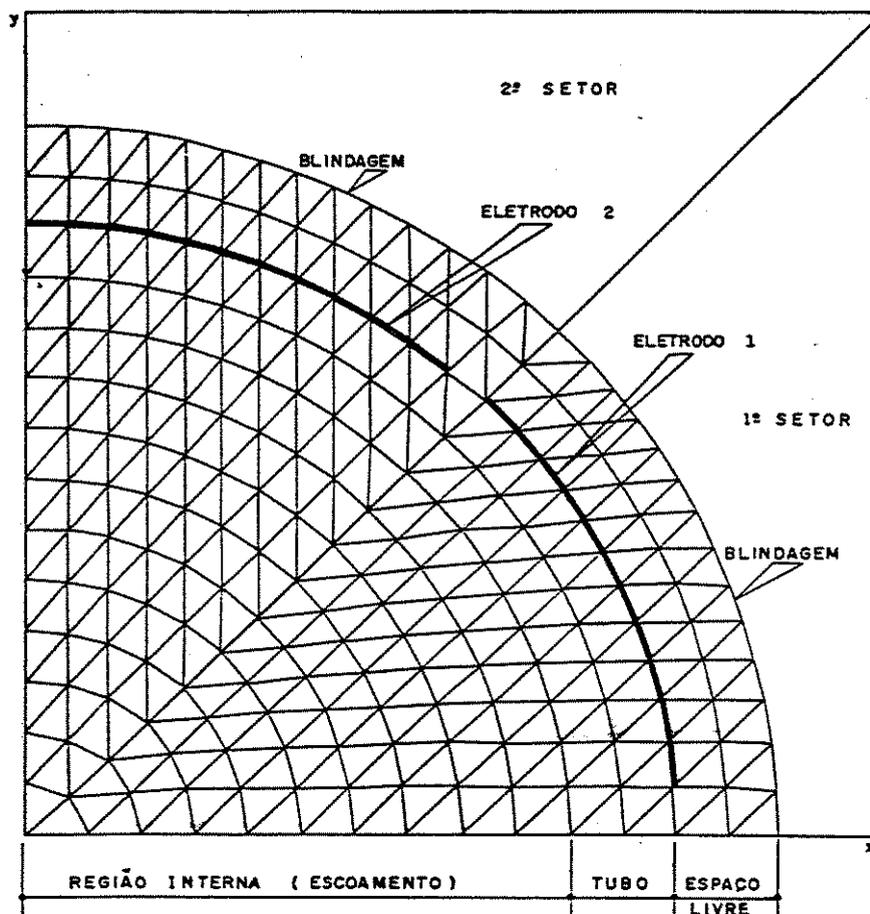


Figura 3.2 – Posicionamento dos 2 primeiros eletrodos na malha, sem escala.

O arquivo COORD1.DAT é o arquivo de coordenadas dos nós, do tipo (x, y) somente do primeiro setor, visto que as outras coordenadas saem por rotação e o arquivo CONET1.DAT é o arquivo de tabela de conectividade, relacionando os elementos com os seus respectivos nós. Este arquivo também define que materiais pertencem a quais elementos, inicialmente.

Os dados de entrada para a geração da malha são:

Raio interno do tubo = 26,35 mm;

Raio externo do tubo = 30 mm ou

Espessura do tubo = 3,65 mm;

Raio da blindagem = 45 mm;

Número de setores = 8;

Ângulo do eletrodo = 41,25°;

Permissividade relativa do ar = 1;
Permissividade relativa da água = 80 e
Permissividade relativa do acrílico = 3.

Na geração da malha, todos os elementos da região interna e da região externa foram considerados como ar e os da região do tubo como acrílico.

O Anexo I traz os arquivos MALHA1.PRE, COORD1.DAT e CONET1.DAT, que são os arquivos de entrada, bem como os comandos de linha para serem executados no ANSYS. No final dos arquivos, alguns comandos são esclarecidos, para a compreensão de como construir os arquivos de entrada. O Anexo I também traz os elementos e os nós pertencentes aos eletrodos de cada setor.

3.4 – Equação de Laplace e as condições de contorno

Recordando, o campo eletrostático bidimensional é representado pela equação de Laplace, conforme a Equação 3.1:

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 K(x, y) \nabla V(x, y)] = 0 \quad (3.1)$$

De posse da equação diferencial, é necessário impor as condições de contorno para a resolução do problema, sendo que existem dois modos distintos de impor as condições de contorno, um modo é quando os eletrodos livres estão aterrados e o outro modo é quando os eletrodos livres estão flutuando.

Eletrodos livres aterrados são aqueles que estão a um potencial zero. Neste caso, o eletrodo emissor está a um potencial V_i , o eletrodo receptor está a um potencial $V_j = 0$ e todos os outros, exceto o eletrodo emissor e receptor, estão a um potencial zero. Por exemplo, se fosse escolhido o eletrodo 1 como o emissor e o eletrodo 4 como o receptor, todos os outros restantes (2, 3, 5, 6, 7, e 8) estariam aterrados, ou seja, a um potencial zero, conforme pode ser visto na Figura 3.3.

Eletrodos livres flutuantes, como o próprio nome diz, são aqueles que flutuam, a condição imposta é a condição de derivada nula na direção radial na região onde estão os eletrodos, ou seja não há fluxo de potencial elétrico. Neste caso, o eletrodo emissor está a um potencial V_i e o eletrodo receptor está a um potencial V_j e todos os outros eletrodos, exceto o emissor e o receptor, estão na condição de derivada nula na direção radial. Por exemplo, se fosse escolhido o par 3 – 7, o eletrodo emissor seria o 3, o eletrodo receptor seria o 7 e os eletrodos livres seriam os outros restantes (1, 2, 4, 5, 6 e 8), não havendo fluxo de potencial elétrico (derivada nula) através deles, conforme pode ser visto na Figura 3.4.

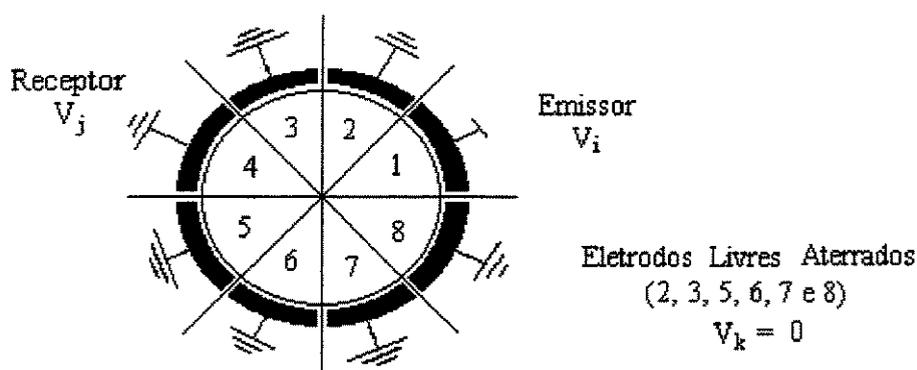


Figura 3.3 – Esquema de eletrodos livres aterrados para um sensor com 8 eletrodos.

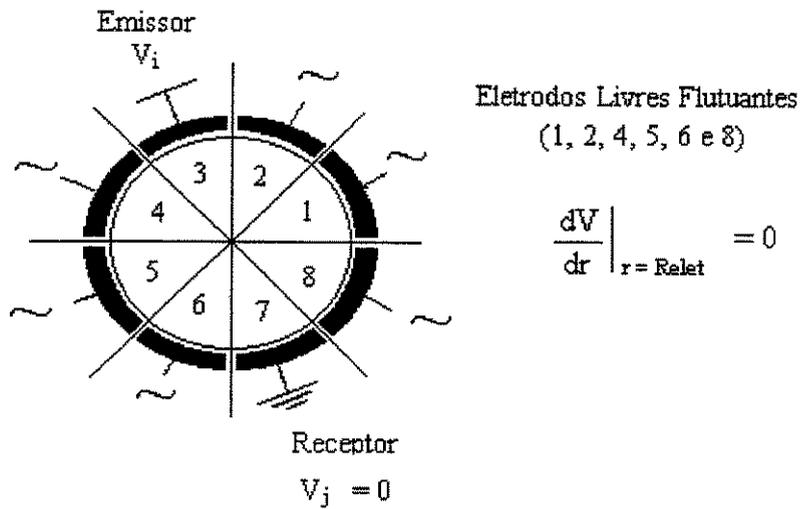


Figura 3.4 - Esquema de eletrodos livres flutuantes para um sensor com 8 eletrodos.

As condições de contorno, para o caso de eletrodos livres aterrados, quando o eletrodo i é o eletrodo emissor e o eletrodo j é o eletrodo receptor, são:

$$\begin{aligned} V_i &= 1, & (x, y) &\in \Gamma_i \\ V_j &= 0, & (x, y) &\in \Gamma_j \quad (j \neq i) \\ V_k &= 0, & (x, y) &\in \Gamma_k \quad (k \neq j \neq i) \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde:

Γ_i representa a localização espacial do eletrodo emissor em torno da superfície externa do sensor;

Γ_j representa a localização espacial do eletrodo receptor em torno da superfície externa do sensor e

Γ_k representa a localização espacial dos eletrodos livres em torno da superfície externa do sensor.

As condições de contorno, para o caso de eletrodos livres flutuantes, quando o eletrodo i é o eletrodo emissor e o eletrodo j é o eletrodo receptor, são:

$$\begin{aligned} V_i &= 1 & , & (x, y) \in \Gamma_i \\ V_j &= 0 & , & (x, y) \in \Gamma_j \quad (j \neq i) \\ \frac{dV}{dr} \Big|_{r=R_{elet}} &= 0 & , & (x, y) \in \Gamma_k \quad (k \neq j \neq i) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Independentemente dos eletrodos livres serem flutuantes ou aterrados, pode-se ter dois casos: sem blindagem ou com blindagem. Para o caso sem blindagem, nenhuma condição é imposta, mas para o caso com blindagem é imposta a seguinte condição:

$$V_{blind} = 0 \quad , \quad (x, y) \in \Gamma_{blind} \quad (3.5)$$

onde:

V_{blind} é o potencial elétrico na blindagem e

Γ_{blind} representa a localização espacial da blindagem em uma região externa ao sensor.

A Tabela I.4, que se encontra no Anexo I, traz os nós para cada setor, onde o potencial elétrico é zero, lembrando que isto só é válido para o sistema com 8 eletrodos.

3.5 – Cálculo da capacitância através da simulação numérica – método direto

Definida a geometria do problema e impostas as condições de contorno, faz-se a geração da malha. O próximo passo é a resolução numérica do potencial elétrico em cada nó utilizando a equação de Laplace, e posteriormente o cálculo numérico da capacitância para cada par de eletrodos i - j . Lembrando que utilizou-se um pacote de elementos finitos, ANSYS 5.4, para resolver numericamente a equação de Laplace em coordenadas cilíndricas. Este cálculo é feito da seguinte maneira: primeiro é feito o produto do fluxo do potencial elétrico no centróide pela permissividade relativa do elemento em questão, então é feita a soma na direção circunferencial de

cada produto, para todos os elementos adjacentes ao eletrodo. Feita esta soma, multiplica-se pela área do eletrodo e pela permissividade elétrica do vácuo e divide-se pela diferença de potencial entre o eletrodo emissor e receptor, conforme a Equação 3.6:

$$C_{i,j} = \frac{\epsilon_0 \cdot A_j}{(V_i - V_j)} \cdot \frac{\sum K(x,y) \cdot \vartheta(x,y)}{N_{\text{elet}}} \quad (3.6)$$

onde:

$\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$; $V_i = 1$; $V_j = 0$; $N_{\text{elet}} = 11$;

A_j é a área do eletrodo receptor ($A_j = 0,0013 \text{ m}^2$) e

$\vartheta(x,y)$ é a derivada negativa do potencial elétrico na direção radial ($\vartheta(x,y) = -dV/dr$), que na verdade é o campo elétrico;

Este é o procedimento para calcular as capacitâncias dos pares de eletrodos, tanto para a simulação de um sistema bifásico como para a determinação da distribuição de sensibilidade, que é o processo direto.

3.5.1 Simulação numérica de um sistema bifásico do tipo estratificado

Para o sensor com 8 eletrodos, para o caso do tubo cheio de ar ou cheio de água, são feitas 7 simulações numéricas para cada caso, que correspondem aos pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7 e 1-8.

Para uma dada fração de líquido, é necessário fazer 28 simulações numéricas (as 28 combinações), que correspondem aos pares de eletrodos: 1-2, 1-3, ..., 1-7, 1-8, 2-3, 2-4, ..., 2-7, 2-8, 3-4, ..., 6-7, 6-8 e 7-8. Seja para o caso de eletrodos livres flutuantes ou aterrados.

Nesta tese trabalhou-se com eletrodos flutuantes e para o tubo cheio só de ar ou cheio só de água, foram calculadas as capacitâncias dos pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, sendo que os pares de eletrodos adjacentes receberam o valor da capacitância do par 1-2, os pares de eletrodos

separado por um eletrodo receberam o valor da capacitância do par 1-3, os pares de eletrodos separados por dois eletrodos receberam o valor da capacitância do par 1-4 e os pares opostos receberam o valor da capacitância do par 1-5.

O Anexo II traz os arquivos de entrada, para o caso de eletrodos livres flutuantes e com blindagem, para o tubo cheio só de ar e cheio só de água, para os pares de eletrodos 1-2 e 1-5. Este Anexo também traz os arquivos de entrada, para o sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido 50%, para os seguintes pares de eletrodos: 1-2, 2-3 e 7-8.

No final do Anexo II se encontram as linhas de comando para os arquivos de entrada serem executados no ANSYS.

O Anexo III traz os arquivos de entrada, para o caso de eletrodos livres aterrados e com blindagem, para o tubo cheio de ar e cheio de água. Ele também traz os arquivos de entrada, para fração de líquido 50%, para os eletrodos emissores 1 e 8.

3.5.2 – Cálculo da distribuição de sensibilidade

Neste trabalho utilizou-se o método dos elementos finitos para calcular a capacitâncias entre os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, necessários para obter a distribuição de sensibilidade, pois para os outros 24 pares de eletrodos, isto é obtido por simetria. Trabalhou-se com eletrodos flutuantes e foram calculadas as capacitâncias dos pares de eletrodos 1-2, 2-1, 1-3, 3-1, 1-4, 4-1, 1-5 e 5-1, sendo que os pares de eletrodos adjacentes receberam o valor da capacitância média entre os pares 1-2 e 2-1, os pares de eletrodos separado por um eletrodo receberam o valor da capacitância média entre os pares 1-3 e 3-1, os pares de eletrodos separados por dois eletrodos receberam o valor da capacitância média entre os pares 1-4 e 4-1 e os pares opostos receberam o valor da capacitância média entre os pares 1-5 e 5-1. Lembrando que o primeiro dígito se refere ao eletrodo emissor e o segundo dígito se refere ao eletrodo receptor.

A sensibilidade do k-ésimo pixel (menor divisão – se refere a um elemento finito triangular) na região interna pode ser determinada por considerá-lo como a permissividade relativa da água e todos os outros como a permissividade relativa do ar, sendo isto válido só para os pixels na região interna (região do sistema bifásico). Neste trabalho existem 800 elementos finitos na região interna, 352 elementos finitos na região do tubo e 416 elementos na região externa. A distribuição de sensibilidade para cada par de eletrodos i-j é definida como:

$$S_{i,j}(k) = \frac{\mu(k)[C_{i,j}(k) - C_{i,j}^g]}{C_{i,j}^l - C_{i,j}^g} \quad (3.7)$$

onde:

$C_{i,j}(k)$ é a capacitância do k-ésimo elemento para o par de eletrodos i-j;

$C_{i,j}^g$ é a capacitância quando o tubo está cheio de ar, para o par de eletrodos i-j;

$C_{i,j}^l$ é a capacitância quando o tubo está cheio de água, para o par de eletrodos i-j;

$\mu(k)$ é o fator de correção de área para o k-ésimo elemento e

$S_{i,j}(k)$ é a sensibilidade do k-ésimo elemento para o par de eletrodos i-j.

O fator de correção de área, $\mu(k)$, é a área do k-ésimo elemento dividida pela área média (área total dividida pelo número de elementos), sendo que uma área maior fornecerá uma sensibilidade maior para o elemento e vice-versa.

Pela própria simetria do sensor, somente 4 distribuições de sensibilidade precisam ser calculadas. Elas são $S_{1,2}$ (distribuição de sensibilidade de um par eletrodos adjacentes), $S_{1,3}$ (é aquele em que o par de eletrodos está separado por um eletrodo), $S_{1,4}$ (é aquele em que o par de eletrodos está separado por dois eletrodos) e $S_{1,5}$ (é o par, cujos os eletrodos são diametralmente opostos). Isto reduz significativamente o tempo computacional, pois as outras 24 distribuições de sensibilidade podem ser obtidas por rotação de $S_{i,j}$ no sentido anti-horário pelos seguintes graus: 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315° .

No Anexo IV encontram-se os arquivos SENSA12.SOL, SENSA13.SOL, SENSA14.SOL, SENSA15.SOL e SENSH15.SOL, que são os arquivos de entrada para o cálculo da capacitância, sendo os 4 primeiros arquivos para o primeiro setor, para os respectivos pares de eletrodos: 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5. O quinto arquivo se refere ao oitavo setor para o par de eletrodos 1-5. Isto é para o caso de eletrodos flutuantes e com blindagem. Neste caso é necessário realizar 32 simulações numéricas, pois são 4 referentes aos pares de eletrodos vezes 8 referentes ao número de setores.

3.6 – Problema inverso – algoritmo de reconstrução de imagem

O problema inverso é a obtenção da distribuição das permissividades relativas de um meio qualquer, a partir dos valores de capacitância medidos experimentalmente, que na verdade, é calcular o inverso da Equação 1.2.

Como não existe uma solução analítica para resolver o problema inverso para a tomografia de capacitância, algumas aproximações são necessárias. Note que o número de incógnitas no sistema (800 pixéis) é maior do que o número de parâmetros conhecidos (28 medidas experimentais de capacitância). Então o sistema é indeterminado, sendo necessário algum conhecimento, a priori, tal como a distribuição de sensibilidade de capacitância, que deverá ser fornecida para resolver o problema.

Neste trabalho, o algoritmo de reconstrução de imagem se baseou no método de retro-projeção linear, conforme Xie et al. (1989a). A imagem reconstruída pode ser representada pelo nível de cinza do pixel, usado para aproximar a distribuição da permissividade relativa. O nível de cinza do k-ésimo elemento é determinado de acordo com as seguintes equações:

$$G(k) = W(k) \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \lambda_{i,j} S_{i,j}(k) \quad (3.8)$$

$$W(k) = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{i,j}(k) \right)^{-1} \quad (3.9)$$

onde:

$\lambda_{i,j}$ é a capacitância normalizada experimental;
 $W(k)$ é o fator de ponderação do k-ésimo elemento;
 $G(k)$ é o nível de cinza do k-ésimo elemento e
 $S_{i,j}(k)$ é a sensibilidade calculada na Equação 3.7.

A capacitância normalizada experimental, $\lambda_{i,j}$, é definida como:

$$\lambda_{i,j} = \frac{C_{i,j}^m - C_{i,j}^g}{C_{i,j}^l - C_{i,j}^g} \quad (3.10)$$

onde:

$C_{i,j}^m$ é a capacitância medida experimentalmente para uma distribuição de ar e água;

$C_{i,j}^g$ é a capacitância medida experimentalmente para o tubo cheio de ar;

$C_{i,j}^l$ é a capacitância medida experimentalmente para o tubo cheio de água;

i é o índice da posição do eletrodo emissor e

j é o índice da posição do eletrodo receptor.

Note que $W(k)$ é um fator de ponderação usado para compensar os efeitos de uma distribuição de sensibilidade não uniforme ao longo da seção do tubo sobre os valores de níveis de cinza. Geralmente, a sensibilidade no centro do tubo é baixa e na região próxima à parede do tubo é alta.

Para um sistema linear o nível de cinza deveria situar-se dentro de um intervalo entre 0 e 1, ou seja, $0 \leq G(k) \leq 1$. Desde que o sistema de tomografia exibe uma não linearidade, tanto a capacitância experimental normalizada, $\lambda_{i,j}$, como o nível de cinza, $G(k)$, podem ter valores maiores do que 1 (overshooting) ou valores menores do que 0 (undershooting).

Neste trabalho foi utilizada a técnica de filtro, cujo o objetivo é estabelecer um nível de corte para identificar o que é líquido e o que é gás. O algoritmo de retro-projeção linear fornece uma variação suave de nível de cinza desde o componente gás (nível baixo) até o componente líquido

(nível alto), então a técnica de filtro estabelece um local (ou linha) para identificar a interface entre o líquido e o gás. A técnica de filtro necessita de alguma informação da fração de líquido volumétrica, que pode ser estimada através das capacitâncias experimentais normalizadas.

Tem sido observado que o nível de corte depende da distribuição do sistema bifásico (permissividade relativa) e da concentração de líquido. Para estabelecer um nível de corte satisfatório, algum conhecimento do padrão do sistema bifásico deve ser introduzido. O procedimento para controlar o nível de corte é baseado numa estimativa da fração de líquido, β_{est} , sendo que Moura, Tambellini & Belo (1998) propuseram, para o sistema estratificado, a seguinte equação:

$$\beta_{est} = \frac{\lambda_{1,4} + \lambda_{4,8}}{2} \quad (3.11)$$

onde:

$\lambda_{1,4}$ é a capacitância experimental normalizada entre o par de eletrodos 1 e 4 e

$\lambda_{4,8}$ é a capacitância experimental normalizada entre o par de eletrodos 4 e 8.

A Figura 3.5 mostra o posicionamento e a numeração dos setores no sensor no trabalho de Moura, Tambellini & Belo (1998), para a identificação dos índices usados na Equação 3.11.

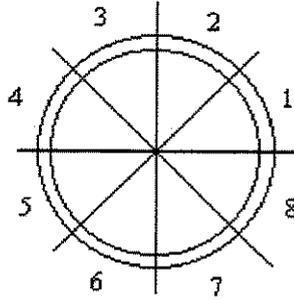


Figura 3.5 – Posicionamento e numeração dos setores no sensor

Neste trabalho optou-se por trabalhar com uma estimativa da fração de líquido ajustada por um polinômio em função da capacitância experimental normalizada média. Esta última é dada por:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{28} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \lambda_{i,j} \quad (3.12)$$

onde: $\bar{\lambda}$ é a capacitância normalizada experimental média.

A estimativa da fração de líquido, β_{est} , em função da capacitância experimental normalizada média, através de um polinômio do terceiro grau, fica:

$$\beta_{est} = a_0 + a_1 \bar{\lambda} + a_2 \bar{\lambda}^2 + a_3 \bar{\lambda}^3 \quad (3.13)$$

Como o sistema é designado para reconstruir somente a imagem de um sistema com dois componentes, os níveis de cinza do pixel após o corte, $G_{ctf}(k)$ têm somente dois valores, 0 ou 1. O valor é 0 quando o ar predomina e é 1 quando a água predomina. Claro que a transição não é abrupta, mas suave. Então faz-se o seguinte procedimento de corte:

$$G_{ctf}(k) = \begin{cases} 0 & \text{se } G_{stf}(k) < trsh \\ 1 & \text{se } G_{stf}(k) \geq trsh \end{cases} \quad (3.14)$$

onde:

trsh é o nível de corte, que está situado entre 0 e 1;

$G_{stf}(k)$ é o valor do nível de cinza no k-ésimo pixel sem a utilização da técnica de filtro e

$G_{ctf}(k)$ é o valor de 0 ou 1 no k-ésimo pixel após a utilização da técnica de filtro.

A fração de líquido calculada com a utilização da técnica de filtro, β_{ctf} , é dada por:

$$\beta_{ctf} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m G_{ctf}(k) \quad (3.15)$$

onde m representa o número de elementos na região interna.

O método de reconstrução de imagem consiste nas seguintes etapas:

- 1 – Cálculo da sensibilidade para cada elemento (problema direto);
- 2 – Cálculo da capacitância experimental normalizada média;
- 3 – Estimativa da fração de líquido a partir da capacitância experimental normalizada média;
- 4 – Variação do nível de corte desde 0 até 1 com um passo de 0,1;
- 5 – Cálculo do fator de ponderação através da Equação 3.9 e do nível de cinza através da Equação 3.8 para cada elemento para a posição i (nível de corte = 0; 0,1; 0,2; ... ; 0,9) e i+1 (nível de corte igual a 0,1; 0,2; 0,3; ... ;1)
- 6 – Verificar se o resultado está dentro de cada intervalo (0 e 0,1) ou (0,1 e 0,2) ou (0,2 e 0,3) ou ... ou (0,9 e 1).
 - 6.1 – Em caso negativo, incrementa-se o passo e volta para 5;
 - 6.2 – Em caso afirmativo, utiliza-se o método da secante até a convergência do resultado e
- 7 – Apresentação da solução final.

Capítulo 4

Procedimento Experimental

4.1 – Descrição do experimento

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de tomografia de capacitância para determinar a posição da interface em sistemas bifásicos do tipo estratificado, sendo os componentes ar e água. Os componentes básicos do sistema de tomografia são: o sensor de capacitância e o sistema eletrônico. A Figura 4.1 mostra o esquema geral da bancada experimental com a fonte de alimentação, o gerador de frequência, os transdutores eletrônicos (o emissor e o receptor), o sensor (tubo) e os multímetros.

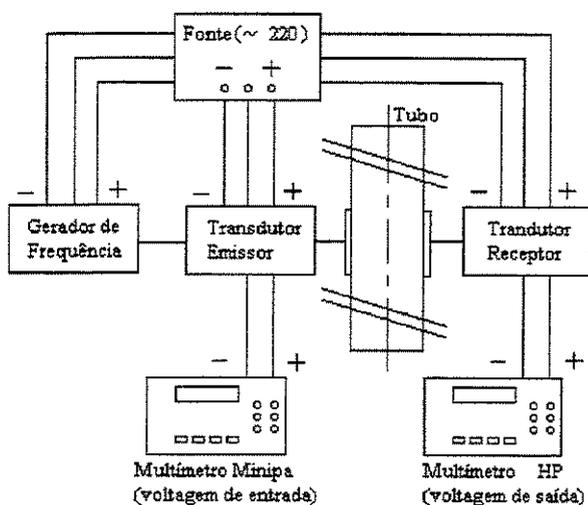


Figura 4.1 – Esquema geral da bancada experimental.

O sensor de capacitância foi construído a partir de um tubo de acrílico com 52,7 mm de diâmetro interno e 60 mm de diâmetro externo. Oito eletrodos de cobre com comprimento axial de 60 mm foram montados na periferia externa do tubo. O espaçamento na direção azimutal (ou polar) entre dois eletrodos adjacentes foi de 2 mm, conduzindo a um ângulo do eletrodo de $41,2^\circ$. Na direção axial do tubo

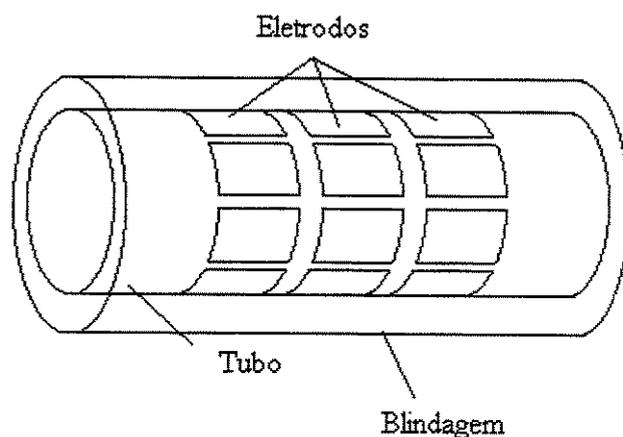


Figura 4.2 – Disposição dos eletrodos no tubo.

foram montados três conjuntos de eletrodos e uma blindagem, conforme pode ser visto na Figura 4.2. Nesta direção, o espaçamento entre os eletrodos também foi de 2 mm. A Figura 4.2 mostra a disposição dos eletrodos no tubo, tendo um total de 24 eletrodos.

A Figura 4.3 mostra os detalhes do arranjo do sensor, sendo ele composto pelos seguintes elementos:

- (1) Blindagem;
- (2) Parede do tubo;
- (3) Eletrodos emissores;
- (4) Eletrodo receptor;
- (5) Eletrodos de guarda longitudinal e
- (6) Linhas de campo.

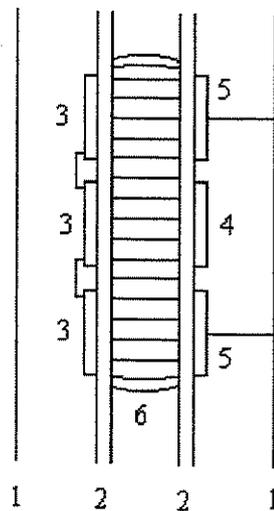


Figura 4.3 – Detalhes do arranjo dos sensor.

A blindagem (1) serve para impedir a influência de campos externos. Os eletrodos emissores (3) foram ligados entre si, ampliando a área de emissão do campo. O eletrodo receptor (4), por sua vez, ficou isolado, para que recebesse só a parte uniforme do campo. Os eletrodos de guarda longitudinal (5) foram conectados à blindagem (1), sendo que eles estiveram ao mesmo potencial da terra. Então o campo foi emitido a partir dos três eletrodos emissores, chegando ao eletrodo receptor (4) e aos eletrodos de guarda longitudinal (5). Como o efeito de borda só aconteceu nas extremidades externas dos eletrodos de guarda longitudinal, ficou garantida a uniformidade do campo no eletrodo receptor.

O sistema eletrônico foi composto pela fonte de alimentação, pelo gerador de frequência, pelo transdutor emissor, pelo transdutor receptor e pelos multímetros, que mediram as voltagens de entrada (transdutor emissor) e de saída (transdutor receptor).

O gerador de sinais senoidais dispunha de 3 frequências de excitação: 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz, que puderam ser selecionadas através de chaves.

O transdutor emissor foi excitado pelo gerador de frequência, sendo responsável pela emissão do sinal. O transdutor emissor foi conectado ao eletrodo emissor e ao gerador de frequência por cabos coaxiais. O transdutor receptor foi conectado ao eletrodo receptor com um fio de comprimento de 25 mm, para que a capacitância parasita fosse a menor possível.

4.2 - Transdução eletrônica da tomografia capacitiva

A transdução eletrônica utilizada para medir a capacitância consiste de um sistema de alta sensibilidade e tempo de resposta muito pequeno, comparativamente aos circuitos eletrônicos com aplicações similares. Seu princípio de funcionamento baseia-se em uma concepção de medidas precisas de pequenas capacitâncias elétricas, acrescido à característica de ser intrinsecamente imune à capacitância de acoplagem e indutâncias induzidas. São utilizados amplificadores operacionais especiais, de alta taxa de trânsito ("slew rate") e alta banda passante, concatenados com técnicas de trabalho em alta frequência. Foram ensaiados circuitos com os amplificadores operacionais OPA621, OPA678, OPA676, OPA642 e OPA643, fabricados pela BURR-BROWN. O melhor desempenho, praticamente, se deu com o OPA621, sem entretanto serem descartados os demais componentes. A seguir será descrito o circuito utilizado, baseado no OPA621.

O circuito utilizado no sistema de tomografia consiste de uma transdução eletrônica para medida da permissividade de misturas, cuja característica é ser intrinsecamente imune aos efeitos de impedâncias não envolvidas diretamente no problema e que tem tido um bom comportamento em frequências acima de 5 MHz.

A Figura 4.4 representa o sistema eletrônico utilizado, onde podem ser vistos os seguintes elementos:

- (1) Eletrodo da célula sensora, emissor do sinal elétrico, denominado eletrodo emissor;
- (2) Eletrodo da célula sensora, receptor do sinal elétrico, denominado eletrodo receptor;
- (3) Injetor de sinal, para ser aplicado no eletrodo emissor;
- (4) Medidor do sinal elétrico do eletrodo emissor;
- (5) Amplificador operacional;

- (6) Impedância de realimentação;
- (7) Medidor do sinal elétrico da saída do amplificador operacional;
- (8) e (9) Placas metálicas formando as guardas do eletrodo sensor;
- (10) e (11) Paredes do tubo de acrílico;
- (12) Ambiente contendo a amostra e
- (13) Linhas de campo elétrico.

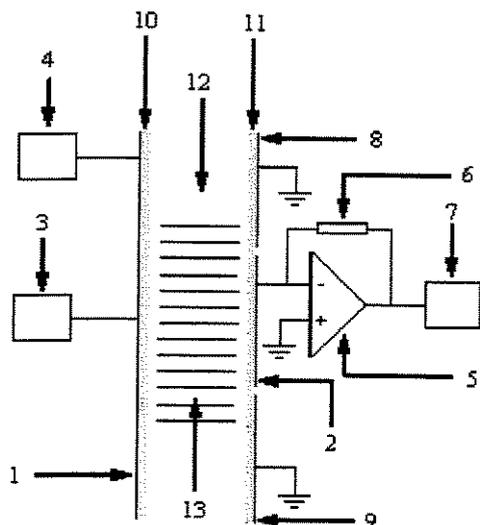


Figura 4.4 - Componentes da eletrônica de transdução capacitiva do tomógrafo.

Os eletrodos (1) e (2) com as paredes do tubo de acrílico (10) e (11) constituem o sensor onde a amostra é inserida (12). Um sinal elétrico alternado é aplicado no eletrodo emissor (1) pelo injetor de sinal elétrico (3). Este sinal passa por um conversor alternado/contínuo e é feita a media por um medidor de sinal contínuo. O eletrodo receptor de sinal (2) é ligado diretamente ao amplificador operacional com fio muito curto, de maneira que quase não haja indutância elétrica na frequência utilizada. O amplificador operacional (5) e a impedância de realimentação formam um diferenciador, que relacionam a capacitância entre os eletrodos com os sinais do eletrodo emissor (4) e o sinal de saída deste processador, medido por um multímetro (7).

O eletrodo receptor (2) é ligado à entrada inversora do amplificador operacional, um terra virtual. Portanto, não há formação de capacitâncias de acoplagens com peças metálicas com potencial elétrico do terra, como a carcaça, elementos metálicos de montagem, suporte e planos

de terras. A conexão deste eletrodo está diretamente ligado à entrada inversora do amplificador operacional, através de um fio metálico curto, que elimina praticamente as indutâncias induzidas que possam ser incorporadas à impedância na entrada do diferenciador. As guardas (8) e (9) são aterradas e isoladas eletricamente do eletrodo receptor (2) por um espaço muito pequeno. Devido aos valores dos potenciais elétricos do eletrodo receptor (2) e das guardas (8) e (9) serem praticamente os mesmos, as linhas de campo elétrico são paralelas e normais ao eletrodo receptor, como representado pelas linhas (13), eliminando-se os efeitos de bordas.

A capacitância devido ao meio entre os eletrodos, medida pela formação de cargas no eletrodo receptor, será devida somente ao sinal elétrico do eletrodo emissor (o eletrodo receptor está aproximadamente com o mesmo valor do potencial de terra, não formando cargas de acoplagens com demais elementos metálicos aterrados e não é caminho de desvios de cargas fluindo para o terra, por não ser um terra verdadeiro). O valor da impedância elétrica está relacionado com a polarização do meio, dependendo da geometria formada pelos eletrodos. As guardas aterradas, adjacentes ao eletrodo receptor, faz com que o campo elétrico se comporte paralelo e ortogonalmente aos eletrodos até uma certa distância da borda do eletrodo receptor. Como as guardas (embora aterradas e no mesmo valor do potencial do eletrodo receptor) estão isoladas eletricamente do eletrodo receptor, as cargas elétricas do eletrodo receptor serão devido somente ao meio entre a região deste eletrodo e a região correspondente do eletrodo emissor. Como o circuito eletrônico diferenciador apresenta-se imune às capacitâncias de acoplagens e indutâncias induzidas, as medidas serão verdadeiramente realizadas nos eletrodos, fornecendo a capacitância de um volume bem determinado.

A Figura 4.5 mostra os detalhes do esquema simplificado do sensor, do sensor com circuito eletrônico, das linhas de campo elétrico e do esquema simplificado do circuito eletrônico. A capacitância está relacionada com a disposição geométrica dos eletrodos e as permissividades relativas dos componentes internos aos eletrodos. Para um sinal senoidal aplicado diretamente ao eletrodo emissor, a resposta teórica (para um amplificador operacional especial de alta banda passante e alta taxa de trânsito) é dada por:

$$\frac{V_s}{V_e} = \omega R_f C \quad (4.1)$$

onde:

V_s é a voltagem na saída do circuito eletrônico diferenciador;

V_e é a voltagem no eletrodo emissor;

ω é a frequência angular ($2\pi f$, onde f é a frequência da senóide);

R_f = é a resistência de realimentação ($R_f = 5600 \Omega$) e

C = é a capacitância elétrica formada.

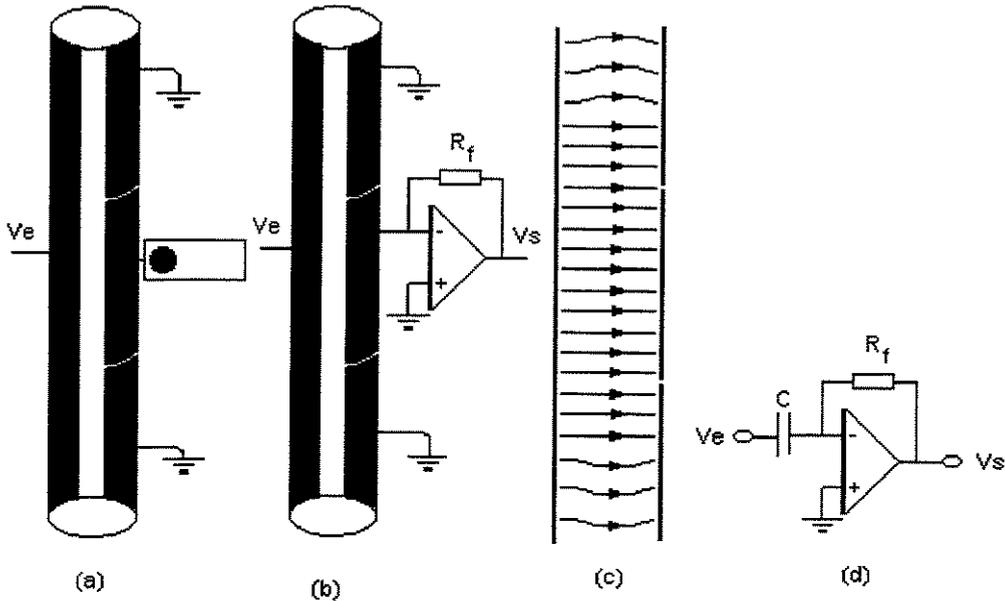


Figura 4.5 - Sistema de transdução eletrônica. (a) Esquema simplificado do sensor com o sinal de entrada e de saída. (b) Sensor com amplificador operacional. (c) Linhas de campo elétrico formadas dentro do tubo. (d) Esquema simplificado do circuito eletrônico.

A Figura 4.6 mostra o diagrama de bloco da transdução eletrônica envolvendo os conversores de medida de sinal alternado para contínuo. No eletrodo emissor e na saída do diferenciador. A vantagem de se trabalhar com sinais contínuos, é que não há necessidade de calcular o valor eficaz de um sinal alternado e no caso deste trabalho, como se trabalha com medidas de voltagem de ordem de até 10 mV, ou seja mede-se valores baixos, isto se consegue mais facilmente com instrumentos que medem valores de sinais contínuos.

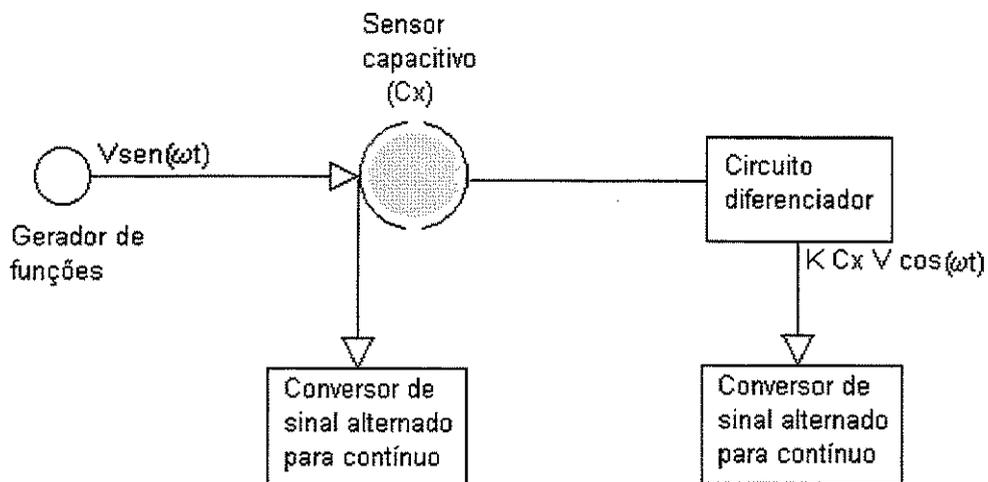


Figura 4.6 - Diagrama de blocos dos circuitos eletrônicos.

No sistema utilizado, a disposição da alimentação das unidades é mostrada na Figura 4.7. O sinal da rede é convertido para um sinal contínuo que será levado aos reguladores de tensão nas placas do gerador de sinal senoidal e do circuito diferenciador mais seus conversores. Nesta configuração houve uma diminuição de ruído de frequências altas.

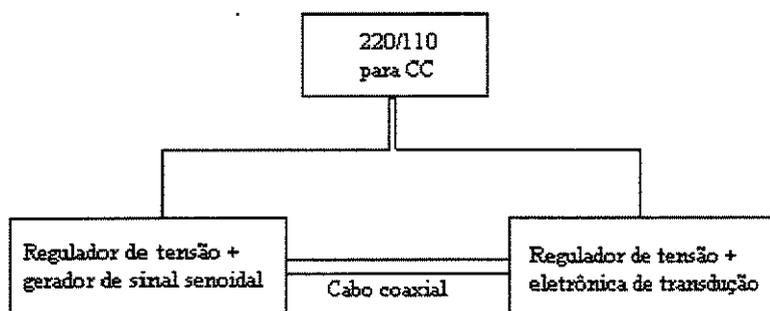


Figura 4.7 - Diagrama geral das disposições de alimentação dos circuitos eletrônicos para transdução capacitiva.

A Figura 4.8 mostra a fonte para alimentar os circuitos oscilador e de transdução. O valor de tensão eficaz (rms), que está em torno de 21,2 V, irá gerar um sinal contínuo de 30 V, que servirá para as entradas dos reguladores de tensão.

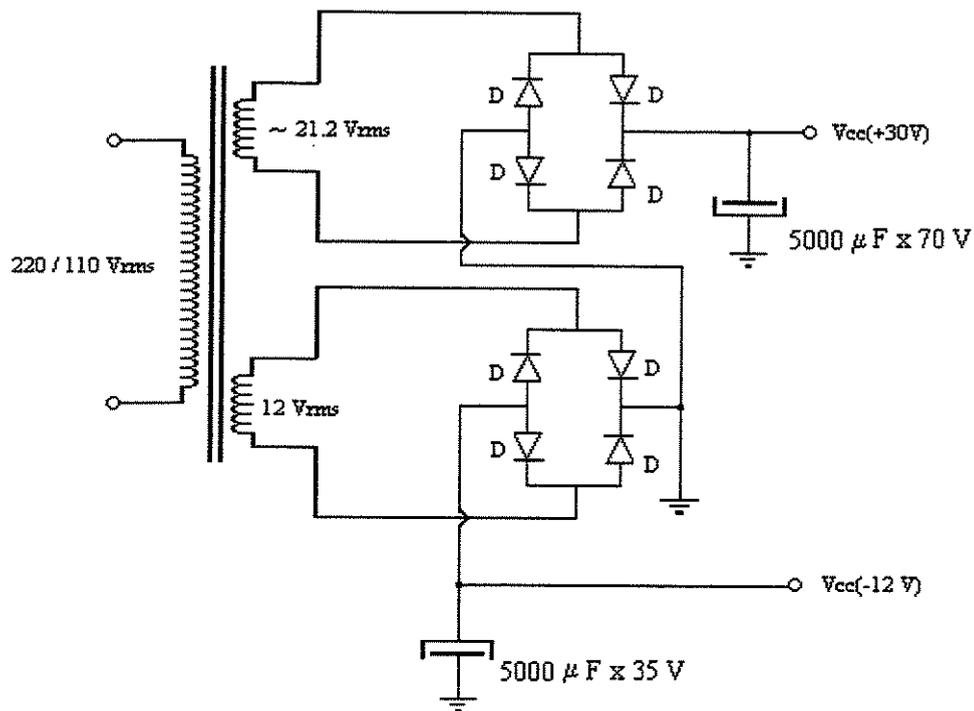


Figura 4.8 - Fonte de tensão contínua.

A Figura 4.9 mostra o circuito oscilador, cujas frequências são selecionadas por chaves. As frequências dos cristais Cr1, Cr2 e Cr3 são de 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz. D é um dissipador de calor de alumínio colocado junto aos reguladores de tensão (LM7824, LM7805 e LM7905). O transistor do oscilador foi o 2N2369.

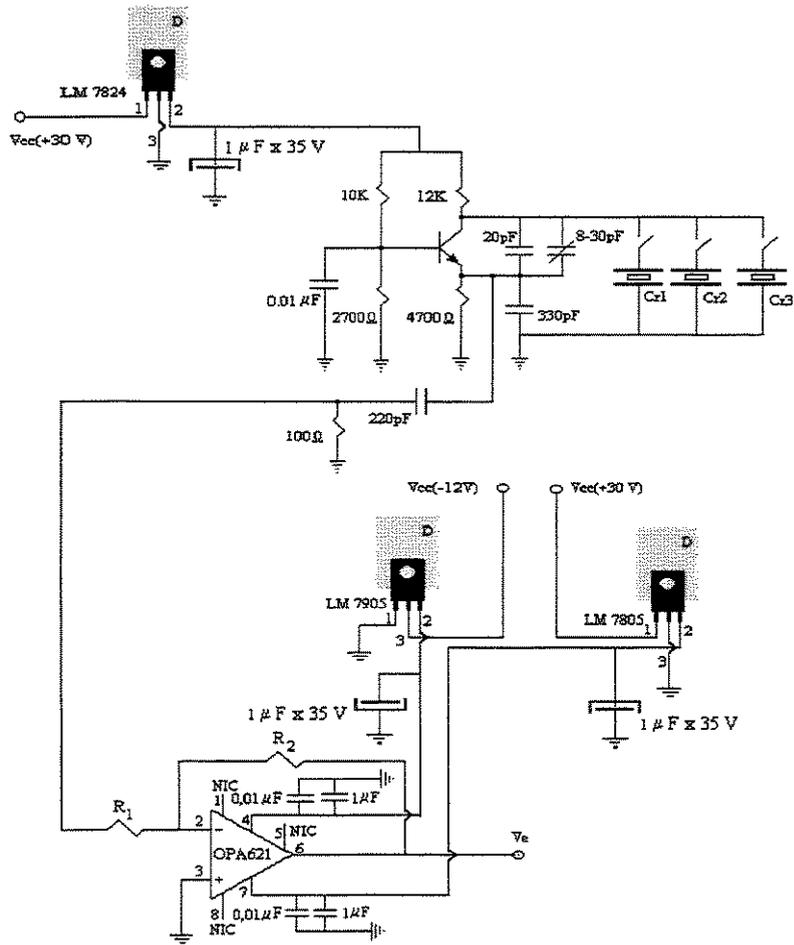


Figura 4.9 - Gerador das senóides selecionados por chaves.

A Figura 4.10 mostra o diferenciador com seus conversores de sinal alternado para contínuo. Os diodos dos conversores de sinal alternado para contínuo são do tipo Schottky, BAT 82. Este circuito conversor tem um comportamento melhor que os convencionais, devido à eliminação do problema de taxa de trânsito. O diodo Schottky também contribui para a melhoria devido, principalmente, ao seu tempo muito pequeno da taxa de recuperação. Na Figura 4.10, R_f e R_f^* são as resistências de realimentação e possuem o mesmo valor, que é de 5600Ω .

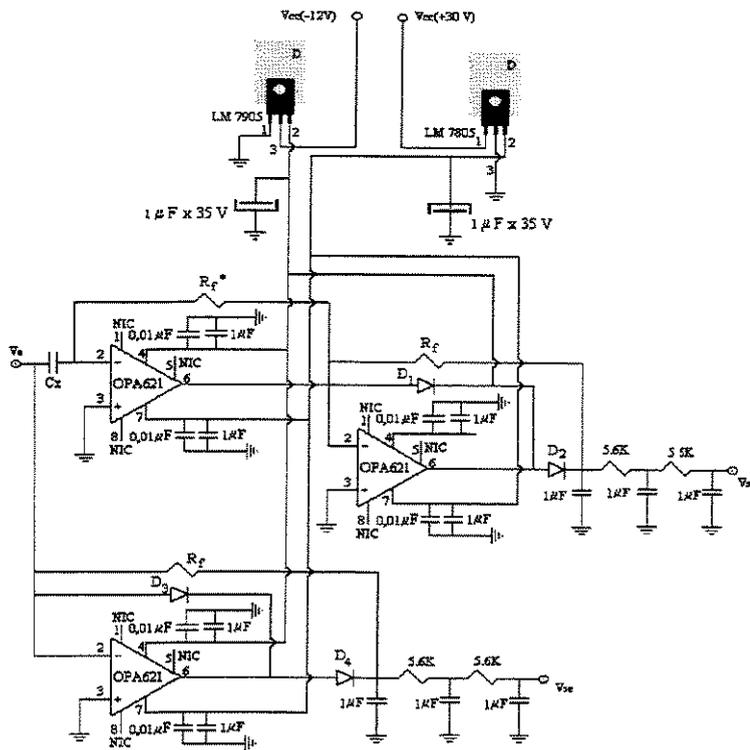


Figura 4.10 - Circuito da transdução eletrônica.

4.3 – Calibração dos transdutores

A capacitância teórica é diretamente proporcional à razão entre a voltagem de saída e a voltagem de entrada, conforme a Equação 4.1, tendo um comportamento linear. Mais a frente será visto que o circuito tem um comportamento linear, quando se faz uma calibração experimental. Para medir a voltagem de entrada do transdutor emissor, utilizou-se o multímetro digital Minipa ET-2000 e para medir a voltagem de saída do transdutor receptor, utilizou-se o multímetro digital HP 34401A. Os transdutores foram calibrados com capacitores variando de 0,3 pF até 15 pF. Comercialmente, tem-se capacitores de 1 pF em diante, então para valores intermediários ou menores do que 1 pF, foram feitas associações em série, em paralelo, ou em ambos os casos. Os capacitores foram medidos por uma ponte RLC Minipa MX-1001. Lembrando que foram feitas calibrações referentes às 3 frequências de excitação em dois momentos diferentes, sendo que os pontos foram colocados em um só gráfico, para cada frequência de excitação. É preciso levar em consideração as incertezas das capacitâncias dos capacitores, da voltagem de entrada e da voltagem de saída dos multímetros que são mostradas na Tabela 4.1. Para facilitar a compreensão dos termos, f_1 será a frequência de 5 MHz, f_2 será a frequência de 11,5 MHz e f_3 será a frequência de 16,3 MHz. A voltagem de saída será V_s e a voltagem de entrada será V_e .

Tabela 4.1 – Incertezas das variáveis envolvidas na calibração .

| Variável | Incerteza |
|--|--------------|
| Capacitância (pF) | $\pm 0,05$ |
| Voltagem de Entrada para f_1 (V) | $\pm 0,0005$ |
| Voltagem de Entrada para f_2 e f_3 (V) | $\pm 0,005$ |
| Voltagem de Saída (V) | $\pm 0,0005$ |

A calibração dos transdutores foi feita, soldando-se um fio do capacitor ao transdutor emissor e o outro fio do capacitor ao transdutor receptor. Então, anotou-se a voltagem de entrada e a voltagem de saída referente ao capacitor que estava ali soldado. Da Figura 4.11 à 4.13 são apresentadas as curvas de calibração para as 3 frequências de excitação.

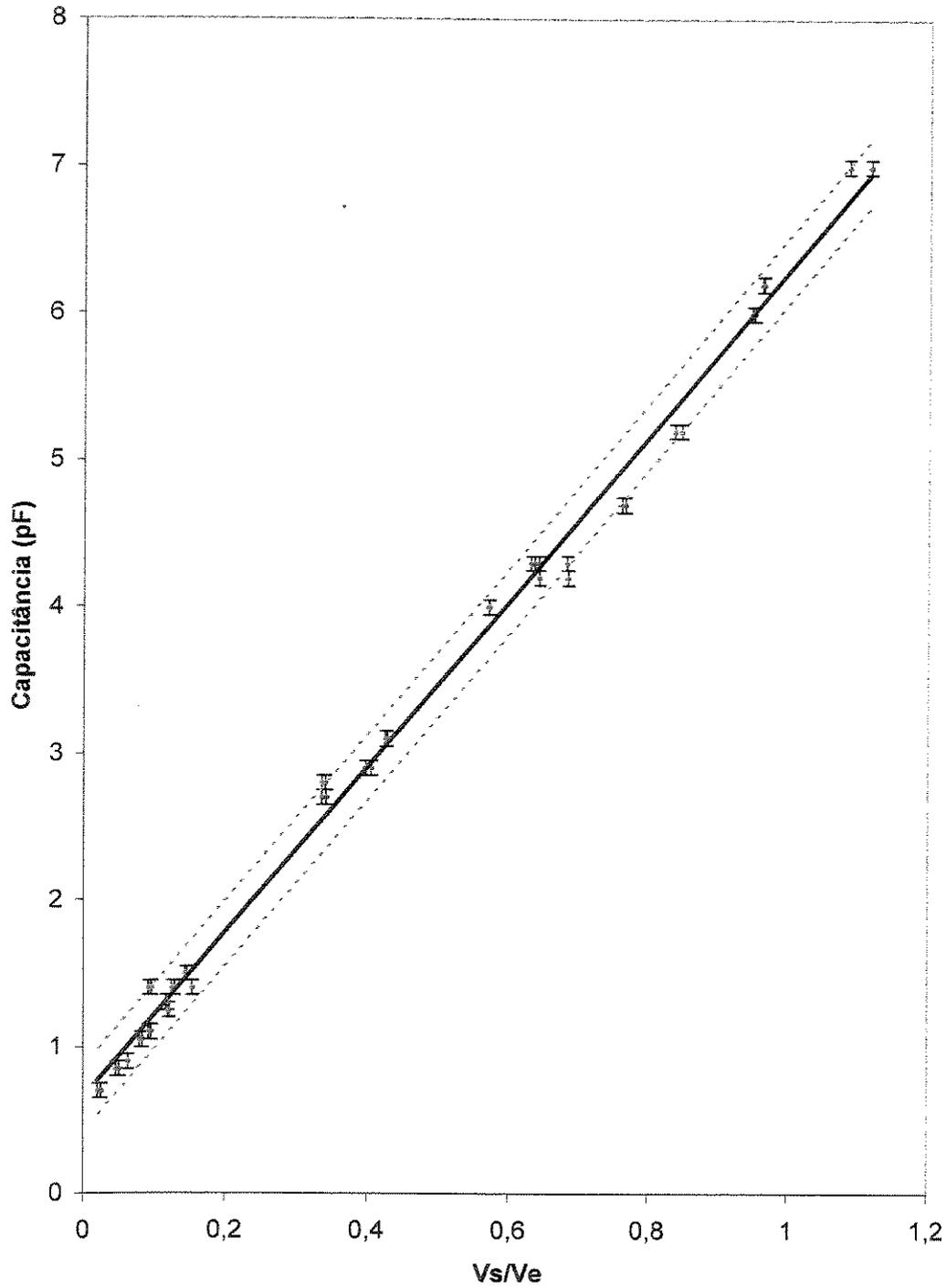


Figura 4.11 – Curva de calibração para a frequência de 5 MHz.

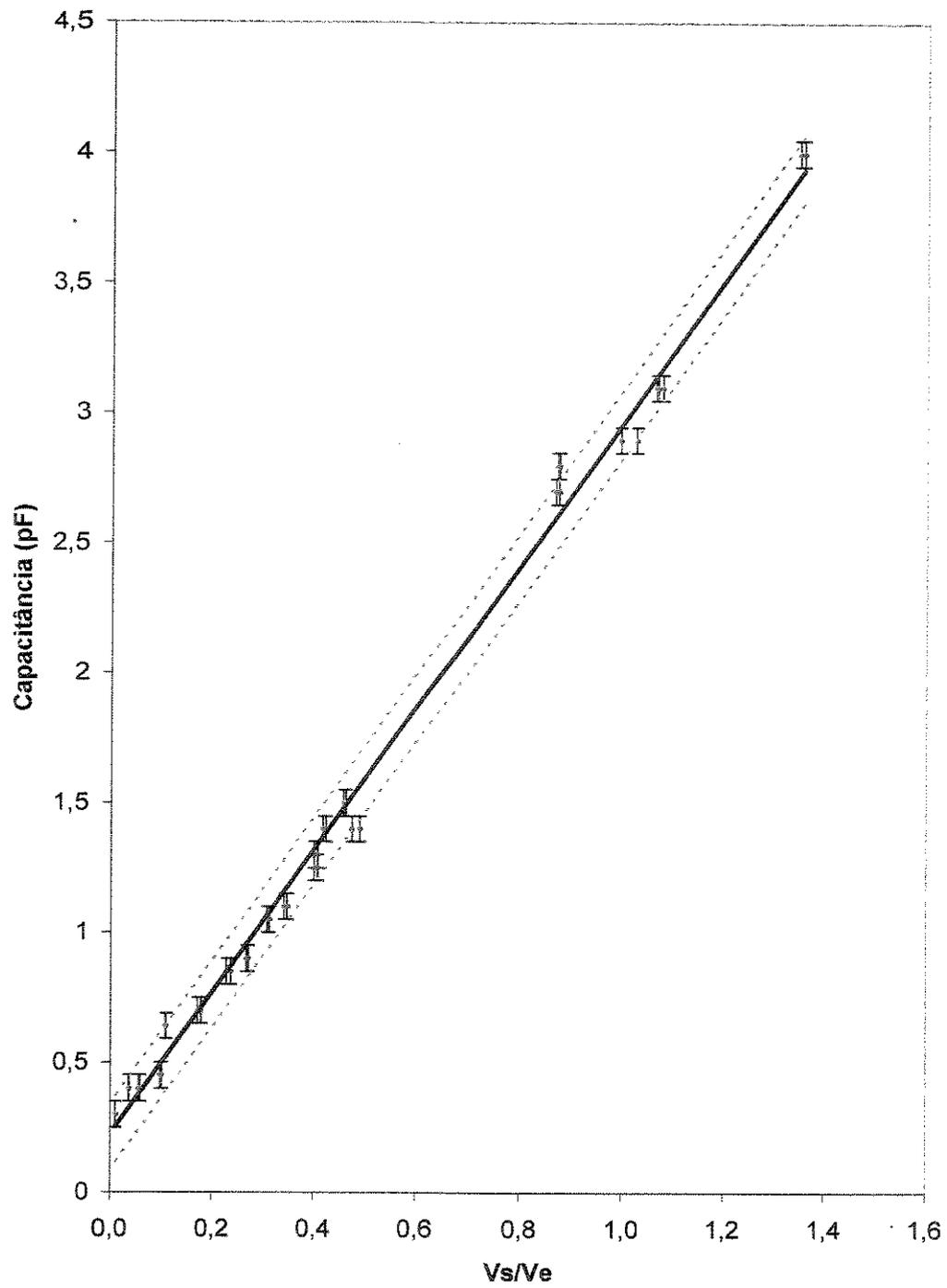


Figura 4.12 – Curva de calibração para a frequência de 11,5 MHz.

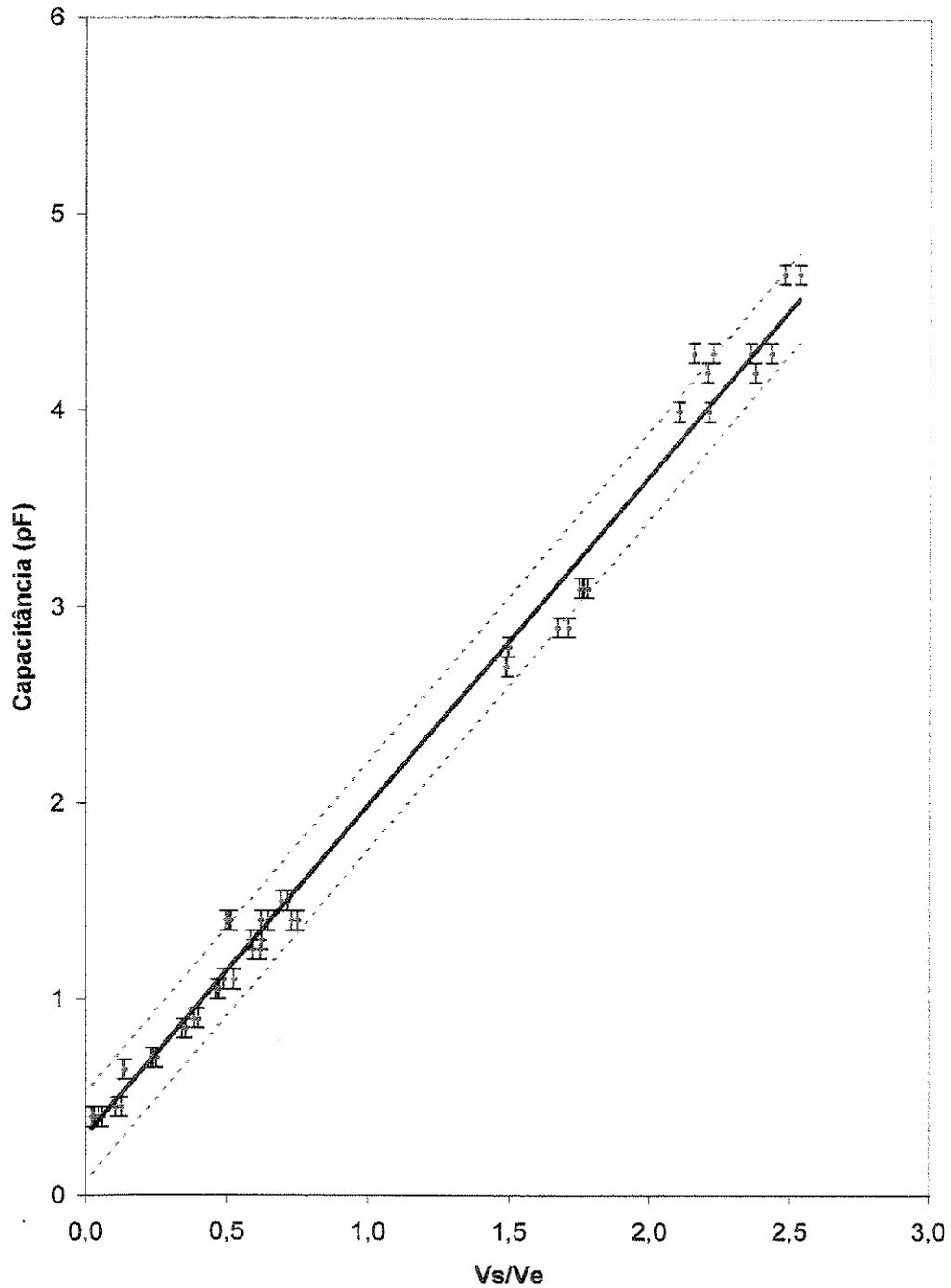


Figura 4.13 – Curva de calibração para a frequência de 16,3 MHz.

A seguir, são apresentadas as curvas de calibração utilizadas para converter a razão da voltagem de saída sobre a voltagem de entrada em capacitância. Tanto a voltagem de entrada como a voltagem de saída são dadas em volts e a capacitância é dada em picoFarad.

$$C = 5,64085 \cdot (V_s/V_e) + 0,654273 \quad (4.2)$$

$$C = 2,73837 \cdot (V_s/V_e) + 0,220763 \quad (4.3)$$

$$C = 1,68792 \cdot (V_s/V_e) + 0,302405 \quad (4.4)$$

A Equação 4.2 é para a frequência de 5 MHz, a Equação 4.3 é para a frequência de 11,5 MHz e a Equação 4.4 é para a frequência de 16,3 MHz.

A Tabela 4.2 mostra, para as curvas de calibração, a soma quadrática da regressão e dos resíduos, a média quadrática dos resíduos e o coeficiente de determinação, para as 3 frequências de excitação. O Anexo V traz a propagação das incertezas referente à razão entre a voltagem de saída e de entrada.

Tabela 4.2 – Soma quadrática da regressão e dos resíduos, média quadrática dos resíduos e coeficiente de determinação das curvas de calibração.

| Frequência | Soma quadrática da regressão | Soma quadrática dos resíduos | Média quadrática dos resíduos | Coefficiente de determinação |
|------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| f_1 | 191,46 | 0,960 | 0,0178 | 0,995 |
| f_2 | 49,54 | 0,260 | 0,00591 | 0,995 |
| f_3 | 102,15 | 0,991 | 0,0184 | 0,990 |

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a distribuição dos resíduos para as 3 frequências de excitação, onde percebe-se que não há um padrão de distribuição, garantindo que o modelo linear representa bem a relação entre a capacitância e a razão da voltagem de saída sobre a voltagem de entrada, conforme Bruns, Barros Neto & Scarmínio (1996).

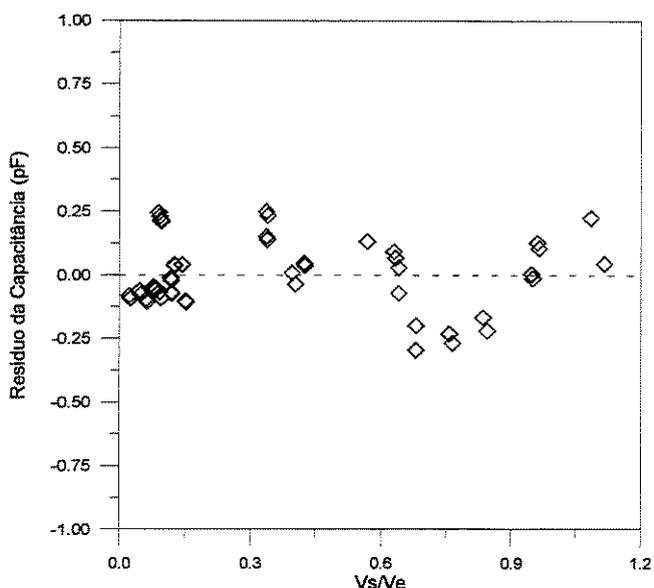


Figura 4.14 – Distribuição dos resíduos para a frequência de 5 MHz.

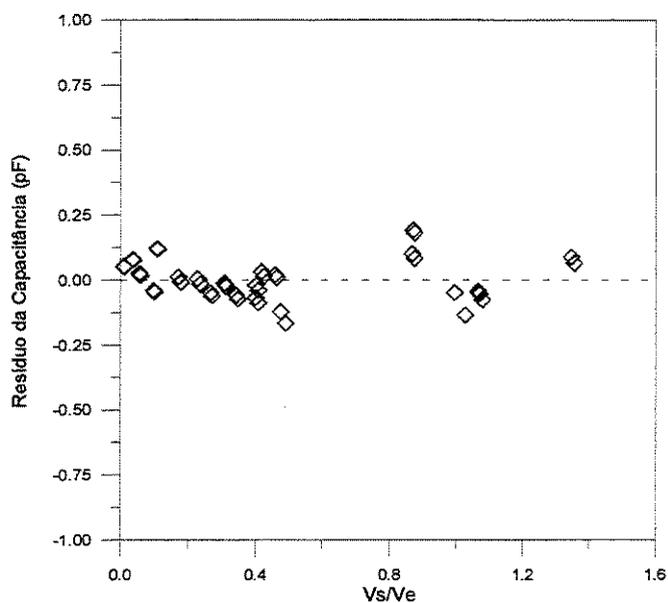


Figura 4.15 – Distribuição dos resíduos para a frequência de 11,5 MHz.

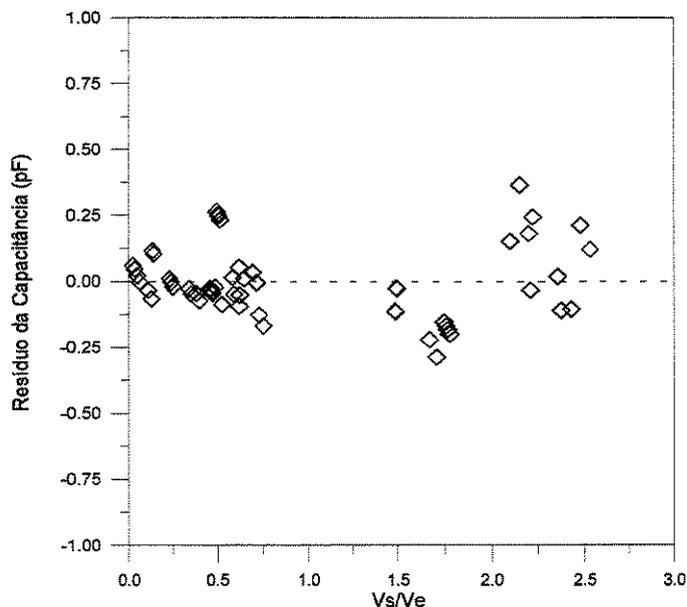


Figura 4.16 – Distribuição dos resíduos para a frequência de 16,3 MHz.

Visto que, uma função linear representa bem a relação entre a capacitância e a razão entre a voltagem de saída e de entrada, agora será verificada se a função linear é altamente significativa e se ela é útil para fazer previsões. Para saber se a equação é altamente significativa, é preciso verificar se a razão entre as médias quadrática devido à regressão e quadrática residual é pelo menos de 4 a 5 vezes o valor de F encontrado em tabelas estatísticas, conforme Bruns, Barros Neto & Scarmínio (1996). A Tabela 4.3 traz os valores da razão entre a média quadrática devido à regressão e a média quadrática residual, o valor de F e o número de pontos utilizados, onde percebe-se que se pode fazer previsões com as curvas de calibração. O valor de F foi escolhido para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.3 – Valores de MQ_{reg}/MQ_{res} , F e n para um intervalo de confiança de 95%.

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|---------------------|-------|-------|-------|
| MQ_{reg}/MQ_{res} | 10756 | 8382 | 5552 |
| $F_{1,n-2}$ | 4,02 | 4,06 | 4,02 |
| n | 56 | 46 | 56 |

onde:

MQ_{reg} é a média quadrática da regressão ($MQ_{reg} = SQ_{reg}$);

MQ_{res} é a média quadrática residual ($MQ_{res} = SQ_{res}/(n-2)$);

SQ_{reg} é a soma quadrática da regressão;

SQ_{res} é a soma quadrática residual e

n é o número de pontos da curva de calibração.

A Tabela 4.1 apresenta as incertezas primárias das curvas de calibração, ou seja, as incertezas da voltagem de entrada, da voltagem de saída e da capacitância dos capacitores. A Tabela 4.4 traz as incertezas médias e máximas da razão entre a voltagem de saída e de entrada.

Tabela 4.4 – Incertezas da razão entre a voltagem de saída e de entrada .

| Incertezas | Frequência 5 MHz | Frequência 11,5 MHz | Frequência 16,3 MHz |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| \bar{w}_{V_s/V_e} | $8,157 \cdot 10^{-4}$ | $1,126 \cdot 10^{-3}$ | $6,277 \cdot 10^{-4}$ |
| $w_{V_s/V_e,max}$ | $2,317 \cdot 10^{-3}$ | $3,194 \cdot 10^{-3}$ | $1,218 \cdot 10^{-3}$ |
| $\bar{w}_{V_s/V_e} (\%)$ | 0,301 | 0,372 | 0,176 |

onde:

\bar{w}_{V_s/V_e} é a incerteza média da razão entre a voltagem de saída e de entrada;

$w_{V_s/V_e,max}$ é a incerteza máxima da razão entre a voltagem de saída e de entrada e

$\bar{w}_{V_s/V_e} (\%)$ é a incerteza média da razão entre a voltagem de saída e de entrada, em porcentagem.

A incerteza global da capacitância, w_{Cap} , para uma medida é calculada, conforme Orlando (1998), seguindo os padrões da Rede Brasileira de Calibração. Então a incerteza foi calculada através da seguinte equação:

$$w_{Cap}^2 = w_y^2 + w_{aj}^2 + w_x^2 \quad (4.5)$$

onde:

w_y é a incerteza da ponte RLC Minipa MX-1001, que mediu os valores dos capacitores, conforme pode ser visto na Tabela 4.1.

w_{aj} é a incerteza do ajuste dos pontos em relação à curva de calibração e

w_x é incerteza da variável V_s/V_e multiplicada pela derivada da curva de ajuste em relação à razão V_s/V_e .

Para várias medidas calcula-se a incerteza média global da capacitância, \bar{w}_{Cap} , de acordo com a seguinte equação:

$$\bar{w}_{Cap} = \sqrt{\frac{w_{Cap,1}^2 + w_{Cap,2}^2 + \dots + w_{Cap,n}^2}{n}} \quad (4.6)$$

onde: $w_{Cap,1}$; $w_{Cap,2}$; ...; $w_{Cap,n}$ são as capacitâncias globais dos n pontos da curva de calibração.

A incerteza do ajuste dos pontos em relação à curva de calibração levou em conta a variável t de Student, o erro padrão e o intervalo de confiança sendo que ela pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$w_{aj} = (\text{variável } t \text{ de Student}) \cdot (\text{erro padrão}) \quad (4.7)$$

A variável t de Student foi obtida através de tabelas estatísticas, o erro padrão foi calculado, extraído-se a raiz quadrada da média quadrática dos resíduos e o intervalo de confiança, adotado neste trabalho, foi de 90%. A variável t de Student é função de $(n-2)$ pontos e do intervalo de confiança, sendo que a Tabela 4.5 apresenta os valores da variável t de Student, do erro padrão e da incerteza do ajuste e da capacitância global. O número de pontos utilizados para a calibração se encontra na Tabela 4.3.

Tabela 4.5 – Valores da variável t de Student, do erro padrão e da incerteza do ajuste e da capacitância, em pF.

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|-----------------|-------|-------|-------|
| t de Student | 1,675 | 1,681 | 1,675 |
| Erro padrão | 0,133 | 0,077 | 0,135 |
| w_{aj} | 0,223 | 0,129 | 0,227 |
| \bar{w}_{Cap} | 0,229 | 0,139 | 0,232 |

A incerteza global da capacitância foi considerada como a média, conforme a Tabela 4.5, pois elas forneceram os mesmos valores para cada ponto da curva de calibração. Verifica-se através da Tabela 4.5 que a incerteza do ajuste é a principal causa da incerteza global. Ela é pelo menos 93% da incerteza global.

4.4 – Comparação entre a curva teórica e a curva de calibração

A Equação 4.1 representa a curva teórica, sendo a capacitância a ser medida em função da razão entre a voltagem de saída e a voltagem de entrada. Ela tem como constantes as frequências de excitação utilizadas, a resistência de realimentação que é de 5600 Ω . As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 mostram as curvas teóricas e as curvas de calibração juntamente com os pontos experimentais para as 3 frequências de excitação. Os valores dos coeficientes angulares das curvas teóricas foram: 5,684; 2,481 e 1,748 para as frequências de 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz, respectivamente.

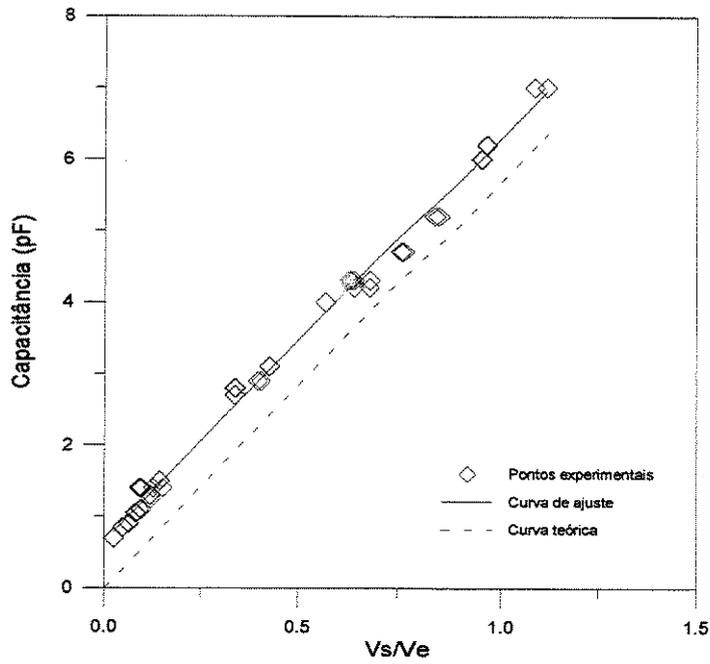


Figura 4.17 – Curva teórica e experimental para a frequência de 5 MHz.

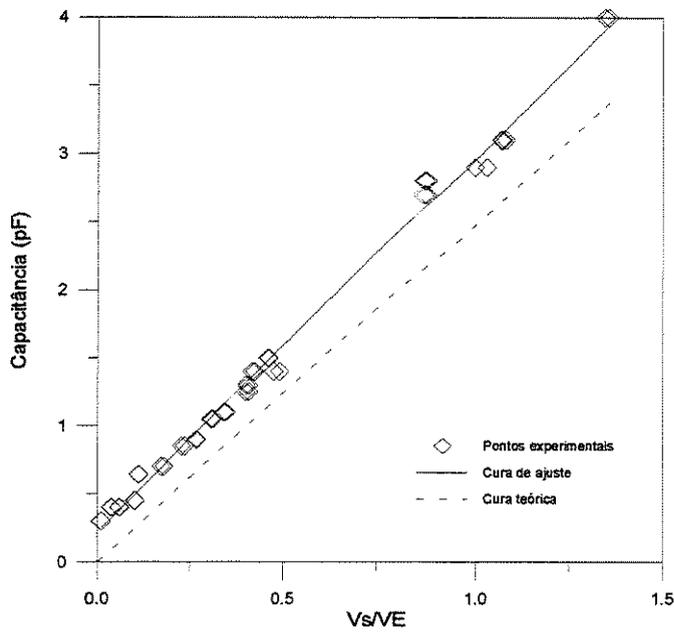


Figura 4.18 – Curva teórica e experimental para a frequência de 11,5 MHz.

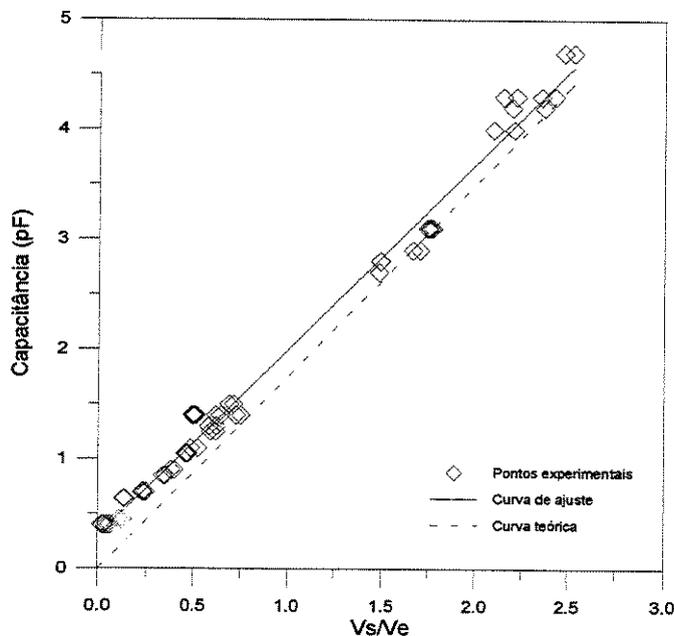


Figura 4.19 – Curva teórica e experimental para a frequência de 16,3 MHz.

A análise foi feita para as três frequências, onde a capacitância variou de 0 a 4 pF e a razão entre a voltagem de saída e de entrada variou de 0 a 1,5. Isto foi feito, pois é uma região comum aos três gráficos e análise pôde ser feita na mesma base, sendo que estas curvas se encontram no Anexo V e correspondem as Figuras V.1, V.2 e V.3. Apesar das curvas experimentais não serem paralelas às curvas teóricas, a curva experimental que esteve mais próxima da curva teórica foi a curva correspondente à frequência de 11,5 MHz, em seguida veio a curva correspondente à frequência de 16,3 MHz e por último ficou a curva correspondente à frequência de 5 MHz. Esta diferença entre a curva teórica e experimental ocorre porque os componentes eletrônicos, principalmente os amplificadores não são ideais, existem impurezas associadas a eles. Este é um dos motivos pelo qual existe uma diferença entre as curvas.

4.5 – Procedimento das medidas

Para um sistema de tomografia com 8 eletrodos, sabe-se que existem 28 leituras independentes das capacitâncias para um dada distribuição de ar e água e 4 leituras independentes para o tubo cheio de ar ou cheio de água.

O testes foram feitos para os eletrodos livres flutuantes e com blindagem, sendo realizados 10 testes para as seguintes frações de líquido volumétricas: 0,0951; 0,1451; 0,2552; 0,4379; 0,5; 0,5719; 0,6246; 0,7497; 0,8599 e 0,9475. Para eletrodos livres aterrados foram feitas medidas experimentais somente para fração de líquido igual a 0,5. Antes de se iniciar cada teste para o sistema bifásico do tipo estratificado, foram feitos os testes com o tubo cheio de ar e com o tubo cheio de água. Nos testes realizados foram anotados os valores medidos da fração de líquido volumétrica, da voltagem de entrada e da voltagem de saída.

Na prática, para o tubo cheio de ar ou cheio de água, foram feitas 7 medidas, correspondentes aos pares de eletrodos: 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7 e 1-8.

Para o tubo cheio de ar ou de água, os pares de eletrodos adjacentes ($i, i+1$), receberam o valor da média aritmética entre o par de eletrodos 1-2 e 1-8, os eletrodos separados por um eletrododo ($i, i+2$) receberam o valor da média aritmética entre o par de eletrodos 1-3 e 1-7, os eletrodos separados por dois eletrodos ($i, i+3$) receberam o valor da média aritmética entre o par de eletrodos 1-4 e 1-6 e os pares de eletrodos diametralmente opostos ($i, i+4$) receberam o valor do par de eletrodos 1-5. Lembrando que i significa o eletrodo emissor e j significa o eletrodo receptor.

Para o sistema bifásico do tipo estratificado foram feitas 56 medidas experimentais, correspondentes aos pares de eletrodos: 1-2, 1-3, ..., 1-8, 2-3, 2-4, ..2-8, 2-1, 3-4, 3-5, ..3-8, 3-1, 3-2, ..., 7-8, 8-1, ..8-7. Lembrando que o primeiro dígito se refere ao eletrodo emissor e o segundo dígito ao eletrodo receptor, por exemplo, o par 3-5 significa que o 3 é o eletrodo emissor e o 5 é o eletrodo receptor. Por exemplo, para os pares de eletrodos 2-7 e 7-2 foi feita a média aritmética, ficando o par 2-7 com o valor da média aritmética entre os pares 2-7 e 7-2. Então, para

as 28 combinações do pares de eletrodos, foram feitas duas medidas experimentais para cada combinação.

Foram medidos os valores da voltagem de entrada, da voltagem de saída e do volume de líquido, então calculou-se a razão entre a voltagem de saída e de entrada e o valor da capacitância obtido através das curvas de calibração. Foram selecionadas as frequências de 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz. As curvas de calibração são referentes às Equações 4.2, 4.3 e 4.4.

Calculadas as capacitâncias para os pares de eletrodos referente ao tubo cheio de ar, cheio de água e para o sistema bifásico do tipo estratificado através das Equações 4.2, 4.3 e 4.4, calculou-se a capacitância normalizada experimental, $\lambda_{i,j}$, conforme a Equação 3.10.

$$\lambda_{i,j} = \frac{C_{i,j}^m - C_{i,j}^g}{C_{i,j}^l - C_{i,j}^g} \quad (3.10)$$

Este é o procedimento para o cálculo das capacitâncias normalizadas experimentais em função dos pares de eletrodos, para cada fração de líquido volumétrica.

Para o cálculo da fração de líquido volumétrica, β_{vol} , mediu-se o comprimento e o diâmetro interno do tubo e o volume de líquido dentro do tubo, sendo utilizada a seguinte equação:

$$\beta_{vol} = \frac{V_1}{V_{tot}} = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot D_{int}^2 \cdot L_T} \quad (4.8)$$

onde:

V_1 é o volume de líquido dentro do tubo;

V_{tot} é o volume total do tubo ($V_{tot} = 654,38 \text{ cm}^3$);

D_{int} é o diâmetro interno do tubo ($D_{int} = 52,7 \text{ mm}$) e

L_T é o comprimento do tubo ($L_T = 300 \text{ mm}$).

A Tabela 4.6 mostra as incertezas primárias envolvidas nas medidas de volume de líquido, do diâmetro do tubo, do comprimento do tubo, da voltagem de entrada e da voltagem de saída.

Tabela 4.6 – Incertezas primárias das variáveis envolvidas nas medidas experimentais.

| Variável | Incerteza |
|--|--------------|
| Volume de líquido (ml) | $\pm 0,5$ |
| Diâmetro do tubo (mm) | $\pm 0,025$ |
| Comprimento do tubo (mm) | $\pm 0,5$ |
| Voltagem de Entrada para f_2 e f_3 (V) | $\pm 0,005$ |
| Voltagem de Entrada para f_4 (V) | $\pm 0,0005$ |
| Voltagem de Saída (V) | $\pm 0,0005$ |

O cálculo da propagação das incertezas da capacitância normalizada e da fração de líquido volumétrica, para as medidas feitas, estão no Anexo VI.

As incertezas médias e máximas das capacitâncias normalizadas das medidas experimentais para cada frequência de excitação, bem como o seu desvio padrão e o seu coeficiente de variação se encontram na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Incertezas médias e máximas das medidas experimentais para cada frequência de excitação, bem como os desvios padrões e os coeficientes de variação.

| | f_2 | f_3 | f_4 |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| \bar{w}_λ | 0,142 | 0,099 | 0,141 |
| $w_{\lambda, \text{máx}}$ | 0,213 | 0,185 | 0,236 |
| DP | 0,026 | 0,025 | 0,029 |
| CV(%) | 18,3 | 25,3 | 20,6 |

onde:

\bar{w}_λ é a incerteza média da capacitância normalizada;

$\bar{w}_{\lambda, \text{máx}}$ é a incerteza máxima da capacitância normalizada;

DP é o desvio padrão amostral e

CV (%) é o coeficiente de variação.

As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 mostram as incertezas das capacitâncias normalizadas em função da fração de líquido volumétrica para cada frequência de excitação.

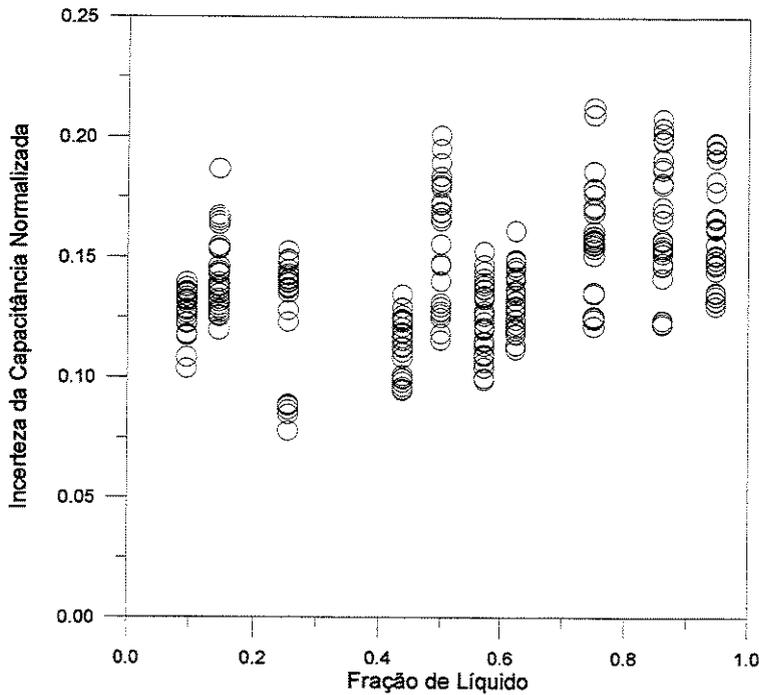


Figura 4.20 – Incertezas das capacitâncias normalizadas para a frequência de 5 MHz.

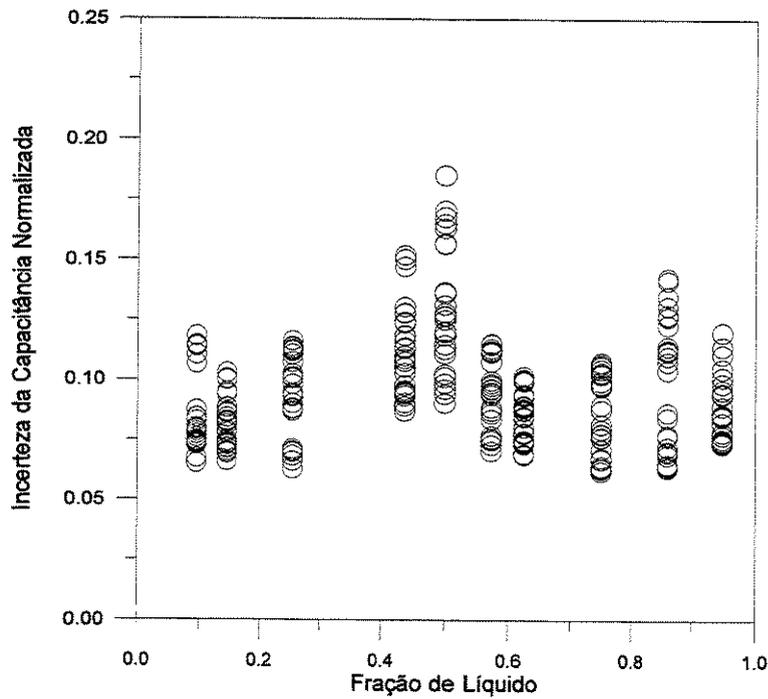


Figura 4.21 – Incertezas das capacitâncias normalizadas para a frequência de 11,5 MHz.

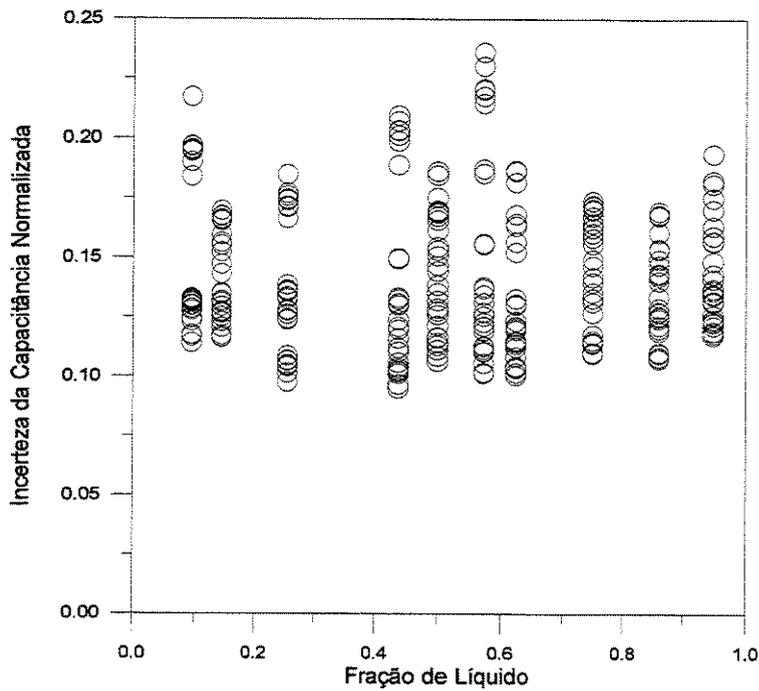


Figura 4.22 – Incertezas das capacitâncias normalizadas para a frequência de 16,3 MHz.

As incertezas das frações de líquido volumétricas se encontram na Tabela 4.8, tanto o seu valor absoluto como o seu valor relativo.

Tabela 4.8 – Incerteza da fração de líquido volumétrica.

| β_{vol} | $w_{\beta vol} (cm^3)$ | $w_{\beta vol} (\%)$ |
|---------------|------------------------|----------------------|
| 0,0951 | 0,0001977 | 0,2079 |
| 0,1451 | 0,0002886 | 0,1989 |
| 0,2552 | 0,0004954 | 0,1941 |
| 0,4379 | 0,0008433 | 0,1926 |
| 0,5000 | 0,0009619 | 0,1924 |
| 0,5719 | 0,0010990 | 0,1922 |
| 0,6246 | 0,0012000 | 0,1921 |
| 0,7497 | 0,0014400 | 0,1921 |
| 0,8599 | 0,0016510 | 0,1920 |
| 0,9475 | 0,0018190 | 0,1920 |

Através da Tabela 4.8 pode-se perceber que a incerteza volumétrica absoluta é influenciada pela fração de líquido volumétrica, porém a incerteza da fração de líquido volumétrica relativa se mantém praticamente constante.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo é feita uma análise da repetibilidade dos dados experimentais, a escolha da frequência de excitação, uma comparação entre algumas soluções analíticas com soluções numéricas, a apresentação dos resultados da simulação numérica e dos testes experimentais, uma análise das funções que correlacionam a fração de líquido volumétrica com as capacitâncias experimentais normalizadas e finalmente é feita a apresentação dos gráficos da reconstrução de imagem para um sistema bifásico do tipo estratificado, sendo os componentes ar e água.

Os dados experimentais das medidas de capacitância com o tubo cheio de ar e cheio de água, para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4, e 1-5, sendo os eletrodos livres flutuantes são apresentados. Esses dados foram utilizados junto com algumas ferramentas estatísticas para analisar a repetibilidade do transdutor nas três frequências de excitação (5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz). Após esta análise, é feita a escolha da frequência de excitação levando em consideração o melhor ajuste da curva de calibração, a menor incerteza na curva de calibração, a menor incerteza da capacitância normalizada, a menor diferença entre a curva teórica e experimental e a repetibilidade das medidas de capacitância para o tubo cheio de ar e cheio de água.

Foram feitas simulações numéricas para analisar o comportamento da capacitância em função do número de elementos na malha. Estas simulações foram realizadas para o tubo cheio de ar e cheio de água, para o caso de eletrodos livres flutuantes. Em seguida são apresentados os resultados numéricos para o sistema bifásico do tipo estratificado com fração de líquido volumétrica variando de 2% a 98%, para o caso de eletrodos livres flutuantes. Os resultados experimentais são apresentados apenas para a frequência de excitação escolhida.

Para o caso de eletrodos livres aterrados foi feita somente uma simulação e um teste experimental com fração de líquido volumétrica de 50%, sendo estes resultados comparados com os resultados dos eletrodos livres flutuantes.

5.1 – Análise da repetibilidade dos dados experimentais

Como foram feitos 10 testes experimentais, então tem-se 10 valores de capacitância para cada par de eletrodos e para cada frequência, tanto para a água como para o ar. A Tabela 5.1 mostra os resultados das capacitâncias médias e dos desvios padrões para o tubo cheio de ar, para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, para as 3 frequências de excitação e a Tabela 5.2 mostra os resultados das capacitâncias médias e dos desvios padrões para o tubo cheio de água, para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, para as 3 frequências de excitação. Foi aplicado o critério de Chauvenet para o cálculo da média e do desvio padrão para as capacitâncias absolutas de cada par de eletrodos e de cada frequência de excitação.

Tabela 5.1 – Capacitâncias médias (pF) e desvios padrões (pF) para o tubo cheio de ar, para as 3 frequências de excitação.

| Par de Eletrodos | Média | | | Desvio Padrão | | |
|------------------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | f_1 | f_2 | f_3 | f_1 | f_2 | f_3 |
| 1-2 | 1,97 | 2,27 | 2,09 | 0,09 | 0,19 | 0,12 |
| 1-3 | 0,97 | 1,24 | 0,90 | 0,13 | 0,31 | 0,14 |
| 1-4 | 0,76 | 0,98 | 0,63 | 0,09 | 0,35 | 0,12 |
| 1-5 | 0,72 | 0,88 | 0,57 | 0,08 | 0,34 | 0,13 |

Tabela 5.2 – Capacitâncias médias (pF) e desvios padrões (pF) para o tubo cheio de água, para as 3 frequências de excitação.

| Par de Eletrodos | Média | | | Desvio Padrão | | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | f ₁ | f ₂ | f ₃ | f ₁ | f ₂ | f ₃ |
| 1-2 | 3,99 | 4,00 | 3,86 | 0,28 | 0,06 | 0,10 |
| 1-3 | 3,18 | 3,42 | 3,30 | 0,23 | 0,04 | 0,12 |
| 1-4 | 3,27 | 3,35 | 3,33 | 0,37 | 0,04 | 0,07 |
| 1-5 | 2,84 | 2,90 | 2,94 | 0,29 | 0,07 | 0,11 |

A Tabela 5.3 apresenta os coeficientes de variação, que é o desvio padrão dividido pela média, das medidas experimentais do tubo cheio de ar e cheio de água.

Tabela 5.3 – Coeficiente de variação, em porcentagem, para o tubo cheio de ar e cheio de água.

| Par de Eletrodos | Ar | | | Água | | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | f ₁ | f ₂ | f ₃ | f ₁ | f ₂ | f ₃ |
| 1-2 | 4,67 | 8,48 | 5,52 | 7,10 | 1,60 | 2,67 |
| 1-3 | 13,39 | 25,18 | 15,89 | 7,17 | 1,14 | 3,60 |
| 1-4 | 11,56 | 35,50 | 19,36 | 11,22 | 1,29 | 1,98 |
| 1-5 | 10,40 | 38,17 | 22,83 | 10,24 | 2,52 | 3,64 |

O cálculo do coeficiente de variação médio, \overline{CV} , é dado por:

$$\overline{CV} = \overline{S} / \overline{X} \quad (5.1)$$

onde o desvio padrão médio, \overline{S} , é dado por:

$$\overline{S} = \left[\frac{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2}{n} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

e a média geral, \overline{X} , é dada por:

$$\overline{X} = \frac{\overline{X}_1 + \overline{X}_2 + \dots + \overline{X}_n}{n} \quad (5.3)$$

O cálculo do coeficiente de variação médio obtido através da Equação 5.1, inclui as medidas de capacitâncias médias das Tabelas 5.1 e 5.2, referindo-se aos pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, para o tubo cheio de ar e cheio de água, para cada frequência. Para a frequência f_1 (5 MHz), o coeficiente de variação médio foi de 9,99%, para a frequência f_2 (11,5 MHz), o coeficiente de variação médio foi de 9,21% e para a frequência f_3 (16,3 MHz), o coeficiente de variação foi de 5,23%. Portanto, para todo o conjunto de dados, a frequência que apresenta menor dispersão relativa dos dados, incluindo os casos com o tubo cheio de ar e de água, é a frequência de 16,3 MHz, que significou uma melhor repetibilidade das medidas, vindo seguido da frequência de 11,5 Mhz e da frequência de 5 MHz.

5.2 – Escolha da frequência

A escolha da frequência envolve a incerteza devido à calibração, o coeficiente de determinação, a incerteza das capacitâncias experimentais normalizadas, a diferença entre a curva teórica e a curva de calibração experimental e a repetibilidade das medidas com o tubo cheio de ar e cheio de água. Esta escolha será feita entre as frequências de 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz.

A menor incerteza de calibração foi de 0,139 pF e o menor erro padrão foi de 0,077 pF, correspondente à frequência de 11,5 MHz, conforme a Tabela 4.5. O coeficiente de determinação foi de 0,995, para as frequências de 5 MHz e 11,3 MHz, conforme a Tabela 4.2. Em relação à capacitância normalizada, as menores incertezas média e máxima ocorreram para a frequência de 11,5 MHz. Analisando as Figuras VI.1, VI.2 e VI.3 do Anexo VI, que correspondem as curvas teóricas e experimentais, visualmente percebe-se que a curva experimental mais próxima da curva teórica, para o domínio em questão, correspondeu à frequência de 11,5 MHz, seguida da frequência de 16 MHz e por último ficou a frequência de 5 MHz. Em relação à repetibilidade, calculando o coeficiente de variação geral, ou seja, para os 4 pares de eletrodos e para o tubo cheio de ar e de água, para cada frequência, a melhor repetibilidade, de um modo geral, foi para a frequência de 16,3 Mhz, cujo o coeficiente de variação foi de 5,23% e para as frequências de 11,5 MHz e 5 Mhz, os coeficientes de variação foram de 9,21% e 9,99%, respectivamente.

A escolha da frequência deve levar em conta todos os aspectos apontados acima, sendo que o que tem maior significado é o que está relacionado com a calibração do instrumento, pois é partir deste ponto que todas as medidas serão efetuadas e todo o processo derivado. Em geral, a frequência de 11,5 MHz teve os melhores desempenhos referentes ao ajuste da curva de calibração, a incerteza da capacitância devido ao ajuste, à incerteza das capacitâncias normalizadas e da menor diferença entre a curva teórica e experimental. Em relação à repetibilidade, a frequência de 16,3 MHz teve o melhor desempenho. Visto que todo o processo depende da curva de calibração, a frequência escolhida para a apresentação dos resultados será a de 11,5 MHz.

5.3 - Soluções analíticas e numéricas

Para o caso do sensor com eletrodos livres flutuantes, onde existem condições de contorno mistas, ainda não se conseguiu encontrar uma solução analítica. Partindo dessa limitação, primeiramente foram verificados os resultados da simulação numérica para eletrodos de placas planas, cuja a solução analítica é simples. Uma segunda etapa consistiu em fazer uma discussão de uma aproximação do caso de eletrodos livres aterrados.

Para o caso de eletrodos de placas planas paralelas, a solução analítica é dada por:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A_{pl}}{d} \quad (5.4)$$

onde:

C é a capacitância entre as placas;

ε é a permissividade do meio entre as placas;

d é a distância entre as placas e

A_{pl} é a área da placa.

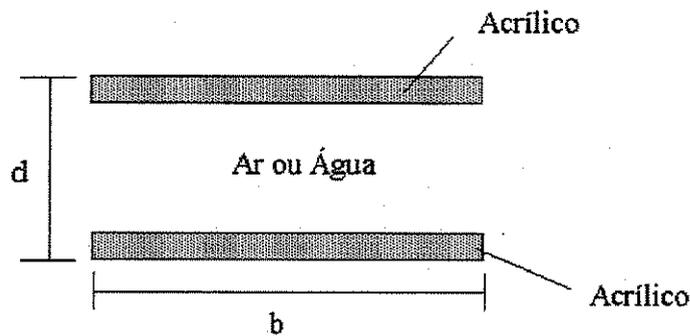


Figura 5.1 – Esquema de duas placas planas

Onde: b é o comprimento da placa.

As dimensões adotadas, conforme a Figura 5.1, foram o comprimento da placa de 21,6 mm, profundidade da placa de 60 mm e uma distância entre as placas de 60 mm. Foram colocados em série três materiais, o acrílico com espessura de 4 mm, o ar ou a água com espessura de 52 mm e outro acrílico com 4 mm de espessura. A permissividade relativa do acrílico foi de 3, a do ar foi de 1 e a da água foi de 80. A permissividade absoluta do vácuo é de 8,854 pF/m. A Tabela 5.4 fornece os resultados com ar e água, tanto para a solução analítica como para a solução numérica para uma malha com 300 elementos triangulares de 3 nós, havendo concordância entre os resultados. Para o cálculo da capacitância equivalente do meio, é só fazer a soma dos inversos das capacitâncias individuais.

Tabela 5.4 – Soluções analíticas e numéricas para placa plana, capacitância em pF.

| | Solução analítica | Solução Numérica |
|------|-------------------|------------------|
| Ar | 0,2099 | 0,2099 |
| Água | 3,4597 | 3,4597 |

A solução analítica para eletrodos aterrados, ou seja onde um eletrodo está a um potencial $V_i = 1$ e os outros 7 eletrodos estão a um potencial zero, ainda não foi encontrada. Neste caso, existe um espaçamento entre os eletrodos e neste espaçamento não existe fluxo de potencial elétrico, tornando a solução mais complicada. Para simplificar isto, geralmente se considera uma região com potencial com um certo valor (geralmente 1) e toda região restante com potencial zero. A região seria o local onde estão localizados os eletrodos, ou seja uma região com eletrodo com potencial 1 e toda a região restante com eletrodo com potencial zero que é a conhecida condição de primeira espécie.

A solução analítica do potencial eletrostático bidimensional que é governado pela equação de Laplace, onde se tem uma condição de primeira espécie, sendo que constituído somente por um componente, ou ar ou água, é dada por:

$$\frac{V(r, \theta)}{V_0} = \frac{\theta_1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^n \frac{\text{sen}(n\theta_1) \cos(n\theta)}{n} \quad (5.5)$$

onde:

$V(r, \theta)$ é o potencial elétrico num ponto dentro do domínio (dentro do tubo);

V_0 é o potencial do eletrodo emissor ($V_0 = 1$ V);

θ_1 é o semi-ângulo do eletrodo emissor (neste caso, os eletrodos emissor e os receptores têm o mesmo semi-ângulo, $\theta_1 = 20,6^\circ$);

θ é a posição polar de onde se deseja calcular o potencial elétrico;

r é a posição radial de onde se deseja calcular o potencial elétrico e

R é o raio do tubo, que coincide com a localização dos eletrodos ($R = 0,03$ m)

Na simulação numérica quando se impõe o valor de 1 para todos os nós do eletrodo emissor, considerando a região dentro do tubo preenchida com ar, o resultado numérico quando comparado com a solução analítica, fornece um erro relativo médio do potencial elétrico de 10% para todos os nós do domínio. Fazendo a mesma simulação, só que agora impondo o valor de 0,5 nos nós extremos do eletrodo emissor, o resultado numérico quando comparado com a solução analítica, fornece um erro relativo médio dos potenciais elétricos de 0,13%. Lembrando que, para

ambos os casos, a malha foi discretizada em 1152 elementos triangulares (800 elementos da região interna e 352 elementos da parede do tubo), tendo 542 nós. O erro de 10% é alto, pois ocorre o fenômeno de Gibbs, onde a solução analítica aproxima para a média aritmética quando existe uma descontinuidade na definição da função de contorno e isto não só altera o resultado próximo à descontinuidade como o resultado dentro de todo o domínio, o que não acontece na segunda situação, pois a função deixa de ser descontínua.

Foram calculadas as soluções analíticas para o tubo cheio de ar e cheio de água, conforme Belo (1995) e simulações numéricas foram realizadas para as mesmas situações. O caso foi com parede (tubo de acrílico) e sem blindagem. Só foi considerado o resultado interno (o campo externo não foi levado em consideração, porque a solução analítica só fornece o resultado para a região interna). Foram simuladas duas situações: uma com o valor de 1 nos nós das extremidades do eletrodo emissor e a outra com o valor de 0,5 nos nós das extremidades do eletrodo emissor. A Tabela 5.5 traz os resultados das capacitâncias calculadas através da solução analítica, conforme Belo (1995) para uma seção circular preenchida com ar ou água, para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5.

Tabela 5.5 - Soluções analíticas da capacitância (pF) para uma seção circular.

| Par de eletrodos | Ar | Água |
|------------------|--------|-------|
| 1-2 | 0,713 | 1,293 |
| 1-3 | 0,0508 | 0,853 |
| 1-4 | 0,0268 | 0,746 |
| 1-5 | 0,0224 | 0,717 |

A Tabela 5.6 mostra os resultados da simulação numérica da capacitância entre os pares de eletrodos, para uma malha com 1152 elementos, que corresponde a zero nó entre os eletrodos adjacentes. O resultados são apresentados para o caso de impor 1 e 0,5 nos nós extremos do eletrodo emissor.

Tabela 5.6 – Capacitância numérica (pF) para uma malha com 1152 elementos.

| Par de eletrodos | V = 1 nos nós extremos | | V = 0,5 nos nós extremos | |
|------------------|------------------------|-------|--------------------------|-------|
| | Ar | Água | Ar | Água |
| 1-2 | 1,047 | 1,556 | 0,815 | 1,356 |
| 1-3 | 0,0582 | 0,966 | 0,0528 | 0,885 |
| 1-4 | 0,0306 | 0,845 | 0,0280 | 0,774 |
| 1-5 | 0,0257 | 0,812 | 0,0235 | 0,744 |

A Tabela 5.7 mostra os erros relativos da simulação numérica em relação à solução analítica para os dois casos: 1 e 0,5 nos nós extremos do eletrodo emissor.

Tabela 5.7 – Erro relativo entre a capacitância numérica e analítica, em porcentagem.

| Par de eletrodos | V = 1 nos nós extremos | | V = 0,5 nos nós extremos | |
|------------------|------------------------|------|--------------------------|------|
| | Ar | Água | Ar | Água |
| 1-2 | 46,8 | 20,3 | 14,3 | 4,9 |
| 1-3 | 14,6 | 13,2 | 3,9 | 3,8 |
| 1-4 | 14,2 | 13,3 | 4,5 | 3,8 |
| 1-5 | 14,7 | 13,3 | 4,9 | 3,8 |

Em geral, quando se coloca o valor de 0,5 nos nós das extremidades do eletrodo emissor, o erro diminui, o que já era esperado, pois tenta-se fazer com que uma função descontínua seja aproximadamente contínua. Quando se tem uma função descontínua, a sua derivada também irá divergir no local, como aconteceu com as capacitâncias do par de eletrodos 1-2, onde se teve um erro relativo de 46,8 % para o ar e de 20,3 % para a água.

5.4 – Simulação numérica – refinamento da malha

O refinamento da malha foi realizado no intuito de verificar a convergência dos resultados, visto que uma solução analítica ainda não foi encontrada para a geometria do sensor, devido à complexidade do problema. Foram realizadas simulações numéricas para o tubo cheio de ar e para o tubo cheio de água, sendo obtidas as soluções das capacitâncias para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5. Foi feito o refinamento da malha, trabalhando-se com 1568, 6272, 14112 e 25080 elementos. A Figura 5.2 mostra o comportamento da capacitância com o tubo cheio de ar e cheio de água em função do número de elementos. Estes resultados são para o caso de eletrodos flutuantes, simulando o caso experimental.

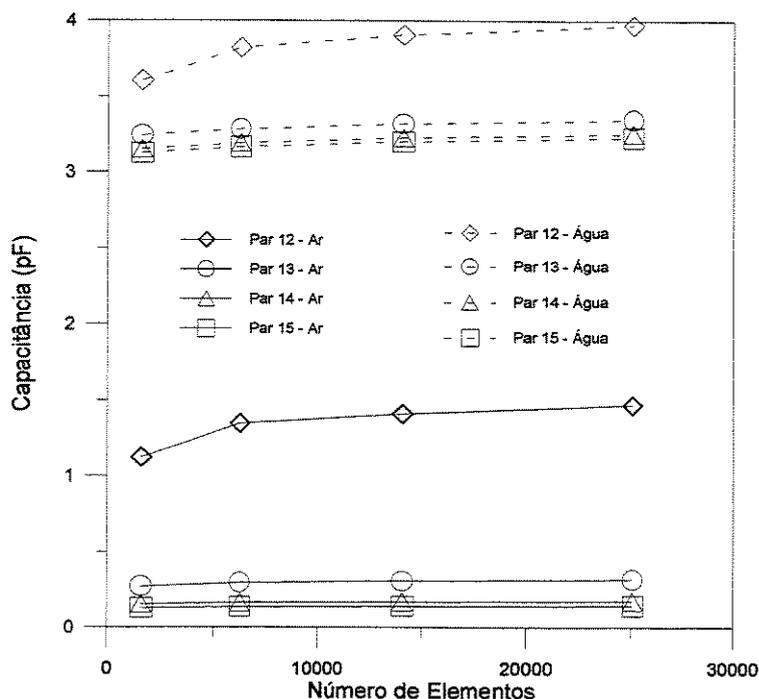


Figura 5.2 – Capacitância em função do número de elementos da malha para o tubo cheio de ar e cheio de água.

Na Figuras 5.2 percebe-se claramente a convergência das curvas em direção a um valor, isto fica mais evidente para os pares de eletrodos 1-5, 1-4, e 1-3. Para o par de eletrodos 1-2, a convergência é mais lenta, pois existe um número menor de nós entre os eletrodos para fazer a interpolação.

A Tabela 5.8 mostra o erro relativo em porcentagem devido ao refinamento da malha, para cada par de eletrodos. A nomenclatura da Tabela 5.8 é a seguinte, M1 é a malha com 1568 elementos, M2 é a malha com 6272 elementos, M3 é a malha com 14112 elementos e M4 é a malha com 25080 elementos. No cálculo do erro relativo, os valores da M4 foram considerados como os mais precisos.

Tabela 5.8 – Erro relativo em porcentagem devido ao refinamento da malha.

| Par de Eletrodos | Ar | | | Água | | |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Erro-M1 | Erro-M2 | Erro-M3 | Erro-M1 | Erro-M2 | Erro-M3 |
| 1-2 | 23,50 | 8,31 | 4,02 | 9,22 | 3,75 | 1,64 |
| 1-3 | 14,83 | 6,63 | 3,16 | 3,11 | 1,91 | 0,81 |
| 1-4 | 11,49 | 5,17 | 2,30 | 3,16 | 1,94 | 0,80 |
| 1-5 | 11,03 | 5,52 | 2,07 | 3,16 | 1,92 | 0,81 |

Observa-se na Tabela 5.8 que o erro relativo diminui com o refinamento da malha, o que pode ser visualizado na Figura 5.2. Para o par de eletrodos 1-2, o erro é maior devido ao problema da derivada na região entre os eletrodos onde existem poucos pontos para a interpolação. Para o caso do ar, o fluxo do potencial elétrico tende a ir pela parede do tubo de acrílico, o que já não acontece com o tubo cheio de água, onde o fluxo é mais direcionado para dentro do tubo, devido a grande permissividade da água. Não foi possível fazer uma malha mais refinada devido à capacidade limitada da memória do computador.

5.5 – Resultados da simulação numérica para eletrodos livres flutuantes

Foi feita a simulação numérica de um meio estratificado em um tubo horizontal para os componentes ar-água. Na simulação variou-se a fração de líquido de 2% até 98%, sendo feito um total de 19 simulações numéricas. Foram feitas as simulações numéricas para eletrodos livres flutuantes para a malha com 1568 elementos.

A malha foi dividida em elementos triangulares finitos. Na região interna teve 800 elementos, então o meio estratificado, para uma dada fração de líquido foi representado, traçando-se uma linha reta para identificar a fração de líquido teórica. Para os elementos abaixo desta linha, foram considerados como água, recebendo o valor da permissividade relativa dela. Para os elementos acima da linha reta, foram considerados como ar, recebendo o valor da permissividade relativa dele. Para os elementos que foram cortados pela linha, procedeu-se da seguinte forma: para o elemento que tivesse a maior porcentagem de área abaixo da linha, foi considerado como água e para o elemento que tivesse a maior porcentagem de área acima da linha, foi considerado como ar. A interface entre o ar e a água teve a forma de dente de serra, devido à discretização da malha, conforme a Figura 3.1.

Para os gráficos da simulação numérica, que tem como variável, o par de eletrodos no eixo x, a nomenclatura é a seguinte: no eixo x, o valor 1 se refere ao par de eletrodos 1-2, o valor 2 se refere ao par de eletrodos 1-3, o valor 3 se refere ao par de eletrodos 1-4, o valor 4 se refere ao par de eletrodos 1-5, o valor 5 se refere ao par de eletrodos 1-6, o valor 6 se refere ao par de eletrodos 1-7, o valor 7 se refere ao par de eletrodos 1-8, o valor 9 se refere ao par de eletrodos 2-3 e assim sucessivamente, até o valor 26 que se refere ao par de eletrodos 6-7, o valor 27 se refere ao par de eletrodos 6-8 e o valor 28 se refere ao par de eletrodos 7-8. No eixo das ordenadas estão as capacitâncias normalizadas.

Da Figura 5.3 à Figura 5.21 estão os gráficos dos valores numéricos da capacitância normalizada em função do pares de eletrodos, para cada fração de líquido.

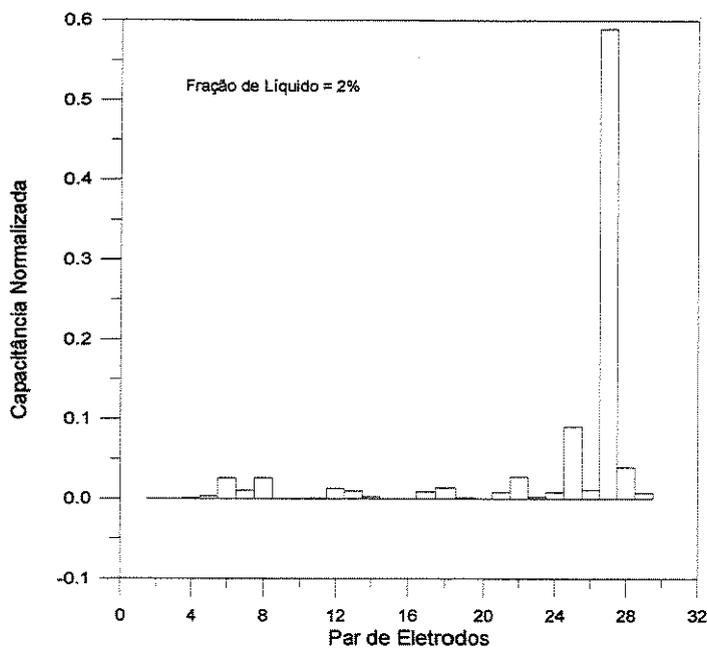


Figura 5.3 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 2\%$.

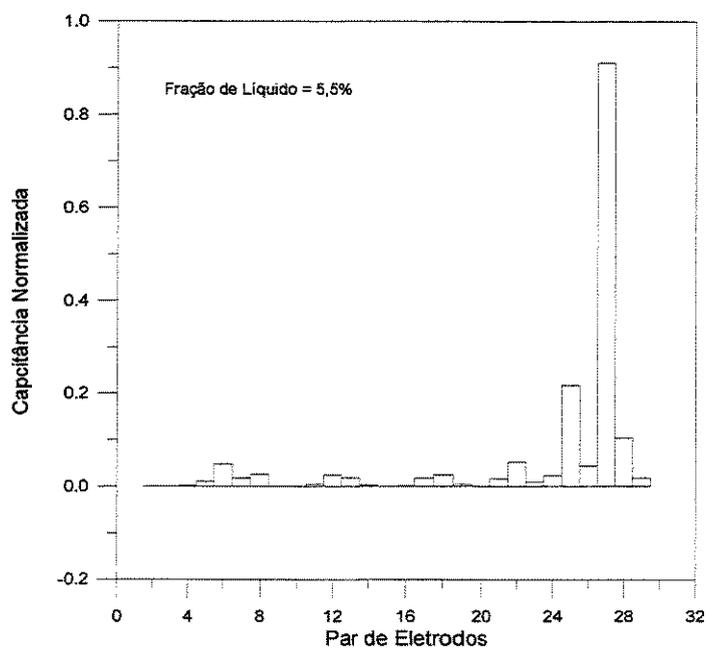


Figura 5.4 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 5,5\%$.

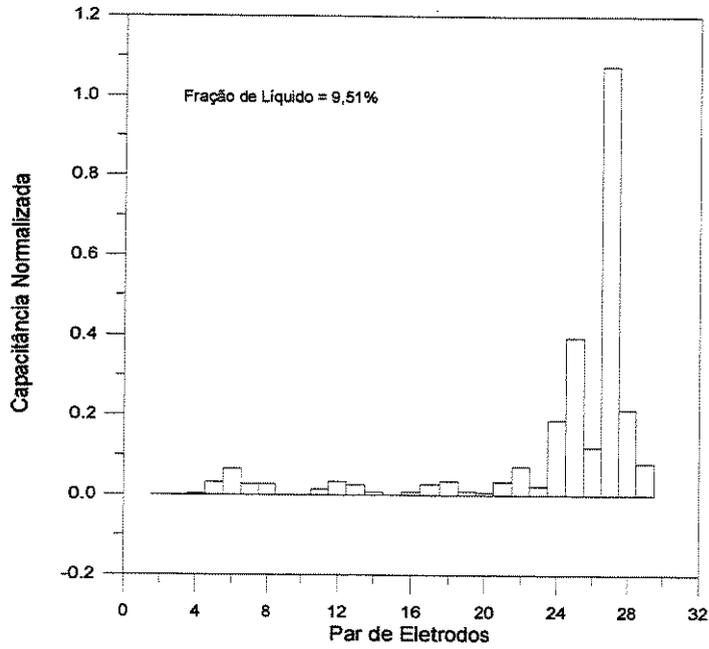


Figura 5.5 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 9,51\%$.

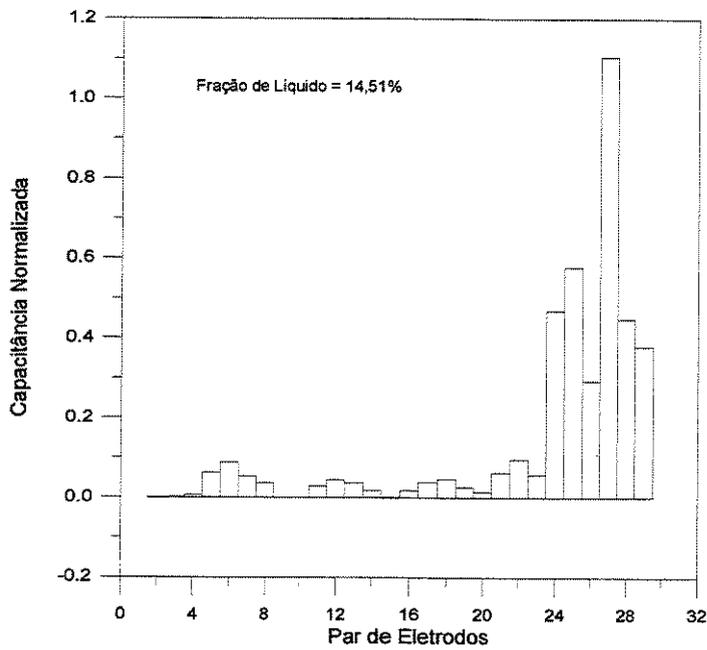


Figura 5.6 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 14,51\%$.

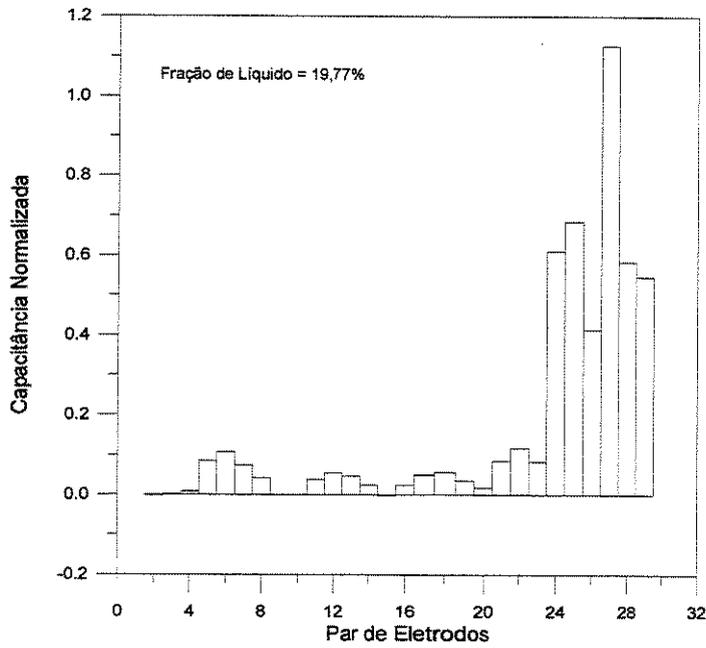


Figura 5.7 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 19,77\%$.

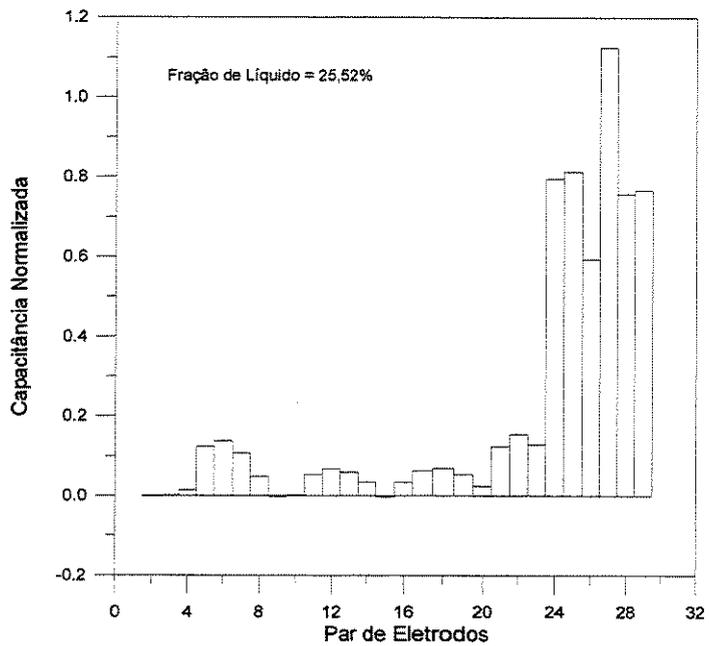


Figura 5.8 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 25,52\%$.

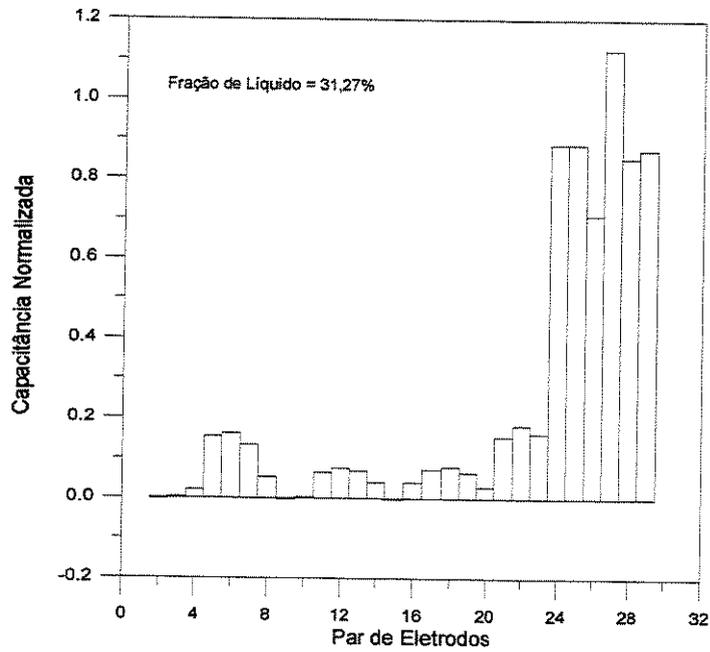


Figura 5.9 – Capacitância numérica normalizada $\beta_{vol} = 31,27\%$.

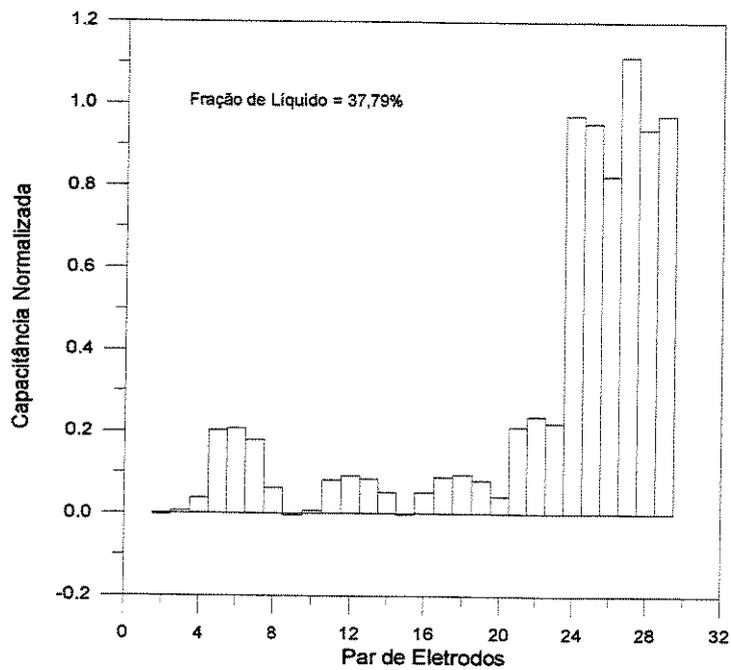


Figura 5.10 – Capacitância numérica normalizada $\beta_{vol} = 37,79\%$.

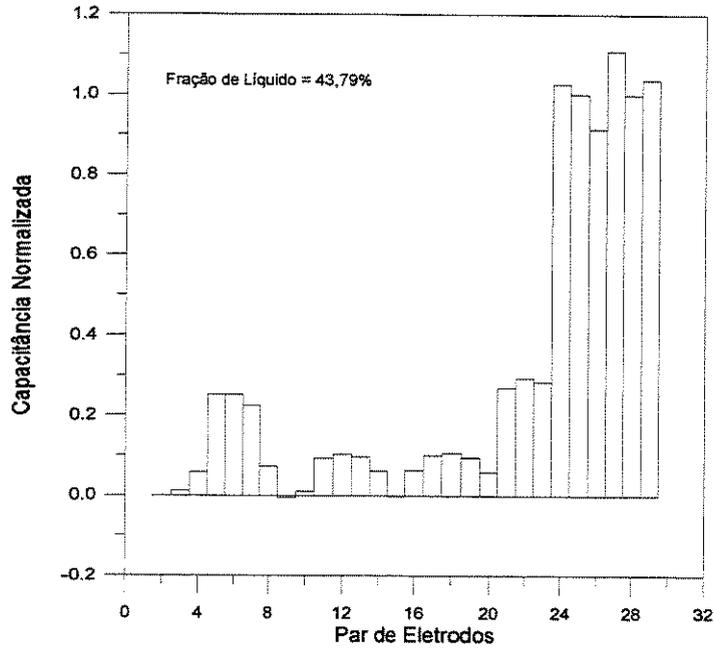


Figura 5.11 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 43,79\%$.

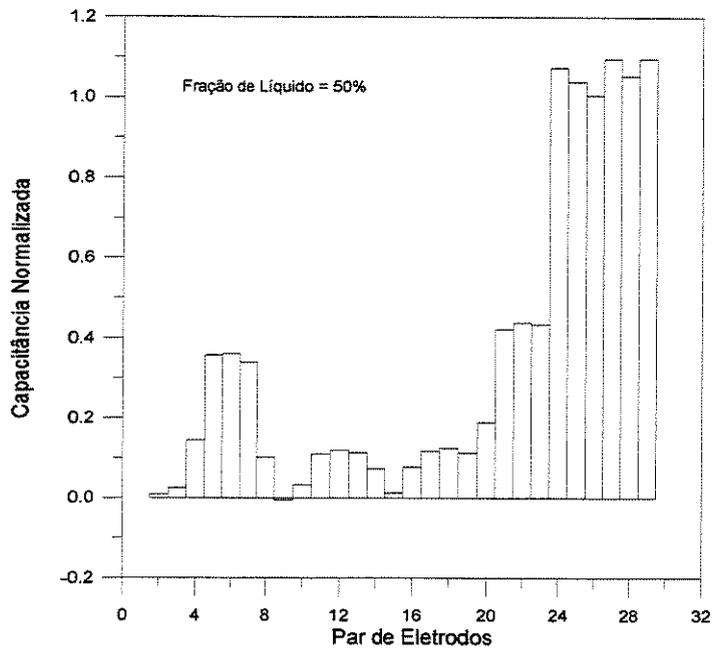


Figura 5.12 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 50\%$.

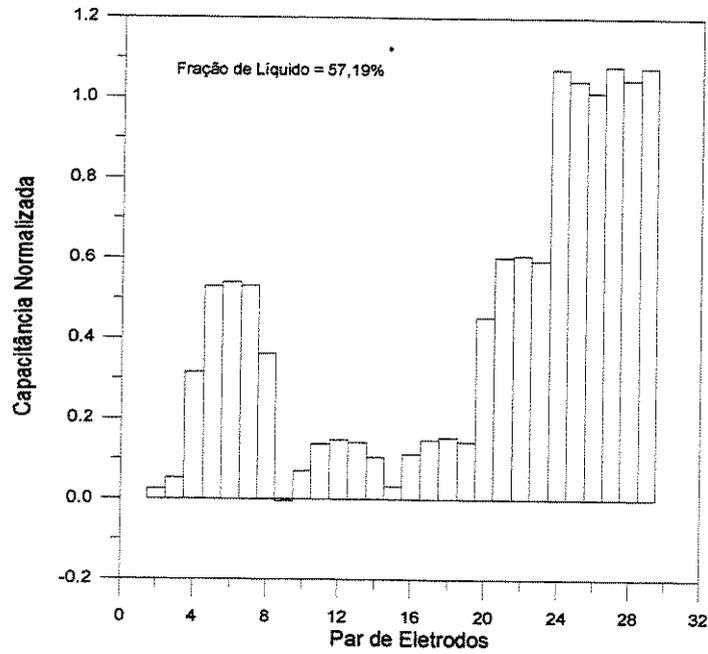


Figura 5.13 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 57,19\%$.

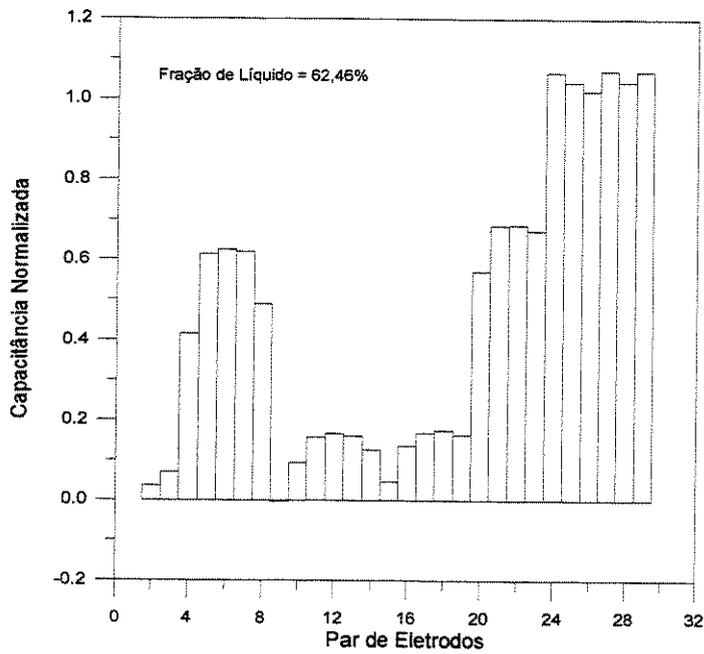


Figura 5.14 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 62,46\%$.

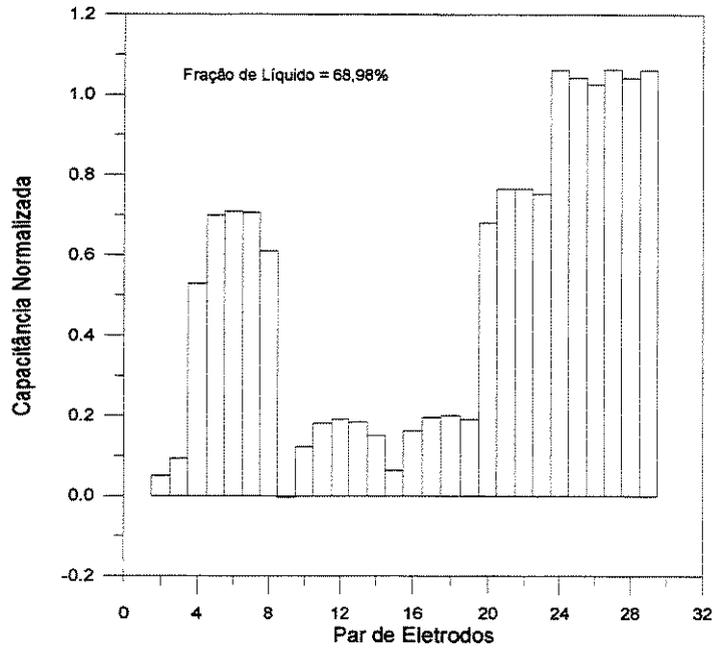


Figura 5.15 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 68,98\%$.

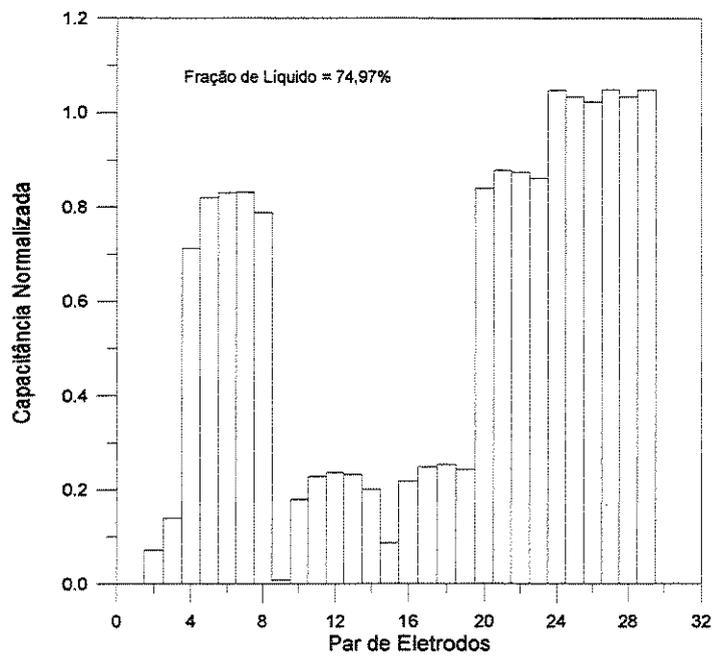


Figura 5.16 – Capacitância numérica normalizada $\beta_{vol} = 74,97\%$.

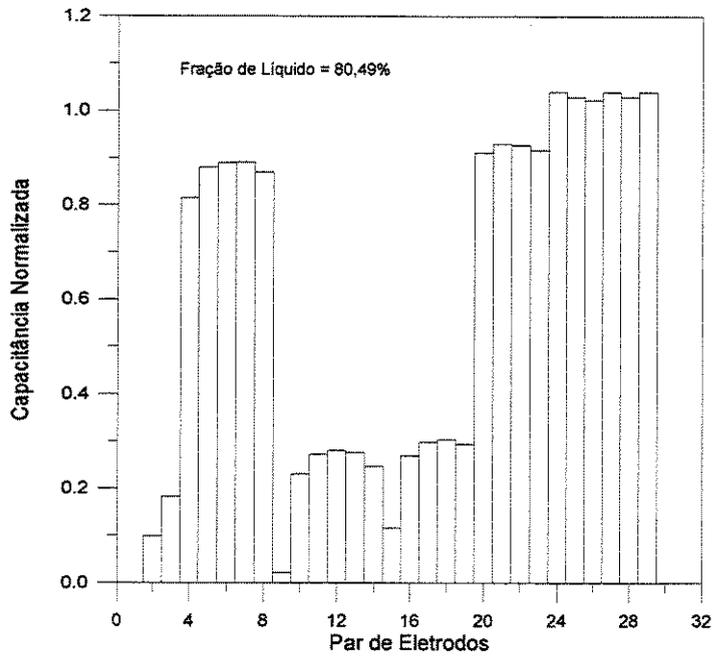


Figura 5.17 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 80,49\%$.

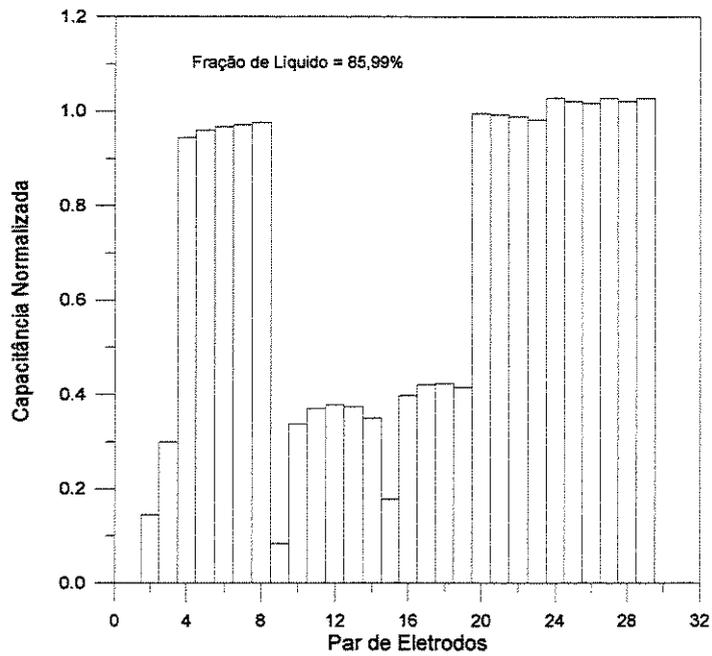


Figura 5.18 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 85,99\%$.

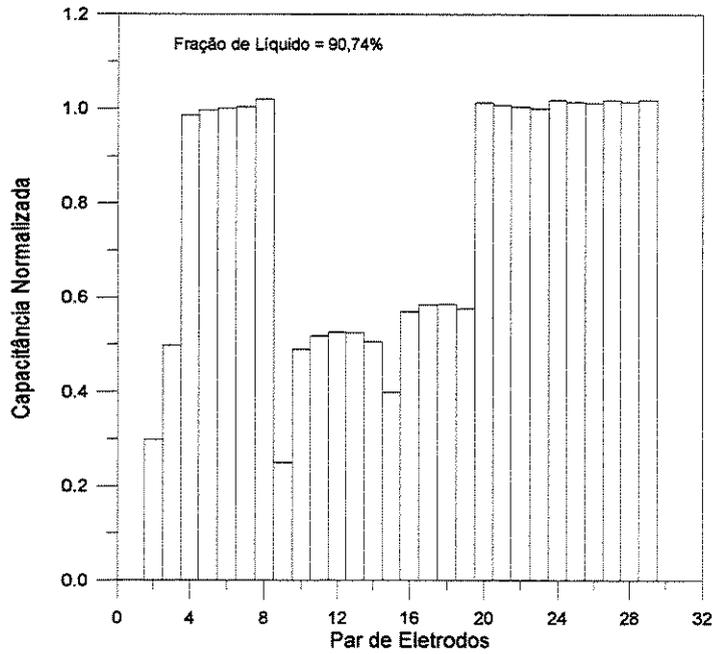


Figura 5.19 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 90,74\%$.

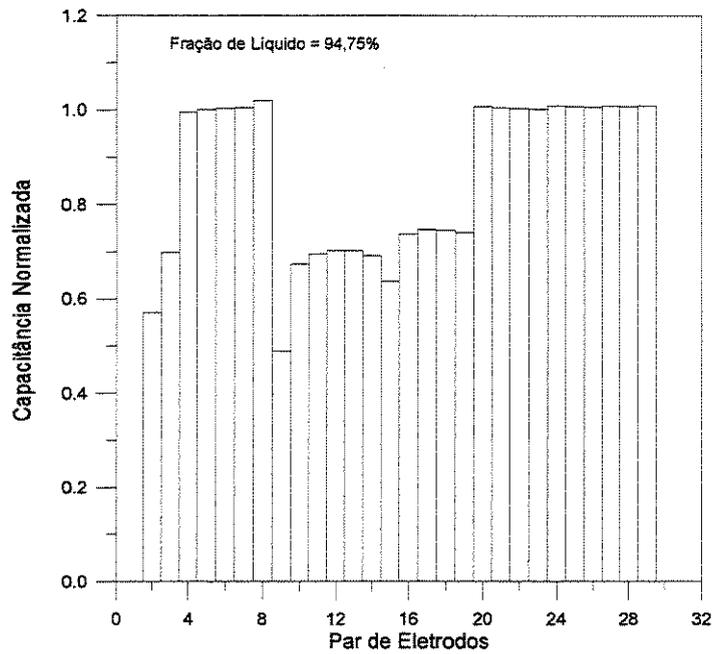


Figura 5.20 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 94,75\%$.

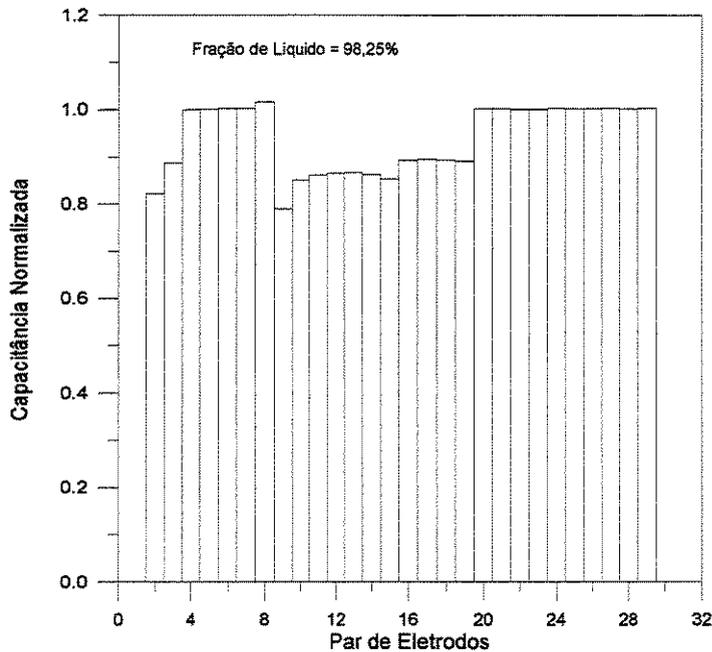


Figura 5.21 – Capacitância numérica normalizada para $\beta_{vol} = 98,25\%$.

Da Figura 5.3 à Figura 5.21 é mostrado o comportamento das capacitâncias normalizadas para cada par de eletrodos em função da fração de líquido e percebe-se claramente que quanto maior a quantidade de água, ou seja, maior o nível da mesma, as capacitâncias normalizadas aumentam gradativamente, o que pode ser visto claramente na Figura 5.3, onde só o par 6-7 tem uma influência da alta permissividade da água, enquanto que na Figura 5.21, praticamente todos os pares de eletrodos tem uma capacitância normalizada praticamente uniforme, onde a função que calcula a capacitância normalizada tende para o valor unitário.

O Anexo VII traz os resultados da simulação numérica para o caso de eletrodos aterrados, para a fração de líquido de 2%, 5,5%, 9,51%, 14,51%, 19,77%, 25,525, 31,27%, 37,79%, 43,79%, 50%, 57,19%, 62,46%, 68,98%, 74,97%, 80,49%, 85,99%, 90,74%, 94,75% e 98%.

5.6 – Resultados experimentais

Foram feitos testes para 10 frações de líquido diferentes, sendo elas: 9,51%, 14,51%, 25,52%, 43,79%, 50%, 57,19%, 62,46%, 74,97%, 85,99% e 94,75%. O sistema de tomografia com 8 eletrodos, para cada fração de líquido, forneceu 56 arranjos de leituras dos pares de eletrodos. Por exemplo, para o cálculo da capacitância do par de eletrodos 1-4, ou seja onde o eletrodo emissor é o 1 e o eletrodo receptor é o 4, procedeu-se da seguinte maneira: foi feita a medida da capacitância do par 1-4 e do par 4-1, então tirou-se a média aritmética das duas leituras e o valor foi atribuído ao par 1-4. Com isso, obteve-se 28 combinações dos pares de eletrodos, conforme já foi explicado no quinto capítulo.

A Tabela 5.9 mostra os valores de capacitância da simulação numérica para a malha com 1568 elementos e os valores experimentais da capacitância. Estes valores são apresentados para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, tanto para o tubo cheio de ar como para o tubo cheio de água, sendo os eletrodos livres flutuantes.

Tabela 5.9 – Comparação entre as capacitâncias numéricas e experimentais em pF.

| Par de Eletrodos | Valores Numéricos | | Valores Experimentais | |
|------------------|-------------------|------|-----------------------|------|
| | Ar | Água | Ar | Água |
| 1-2 | 1,12 | 3,61 | 2,27 | 4,00 |
| 1-3 | 0,27 | 3,24 | 1,24 | 3,42 |
| 1-4 | 0,15 | 3,15 | 0,98 | 3,35 |
| 1-5 | 0,13 | 3,13 | 0,88 | 2,90 |

Os valores experimentais das capacitâncias para o ar foram bem maiores do que os valores numéricos para o ar, conforme a Tabela 5.9 e os valores experimentais das capacitâncias para a água estiveram mais próximos dos valores numéricos. Uma das possíveis causas da discrepância entre os resultados para o ar, pode estar no fator da calibração estar limitada a um limiar do instrumento de 0,3 pF diminuindo a precisão quando se trabalha com valores baixos de capacitância. O erro da capacitância para o ar para o par 1-2 reside no fato de existem poucos nós para a interpolação para a obtenção de um resultado numérico mais seguro. As capacitâncias para

a água estiveram mais próximas, pois na calibração do instrumento, já estava trabalhando com capacitâncias mais elevadas, diminuindo o erro relativo na determinação da mesma.

Da Figura 5.22 à Figura 5.31 estão os gráficos da capacitância normalizada em função dos pares de eletrodos, para cada fração de líquido.

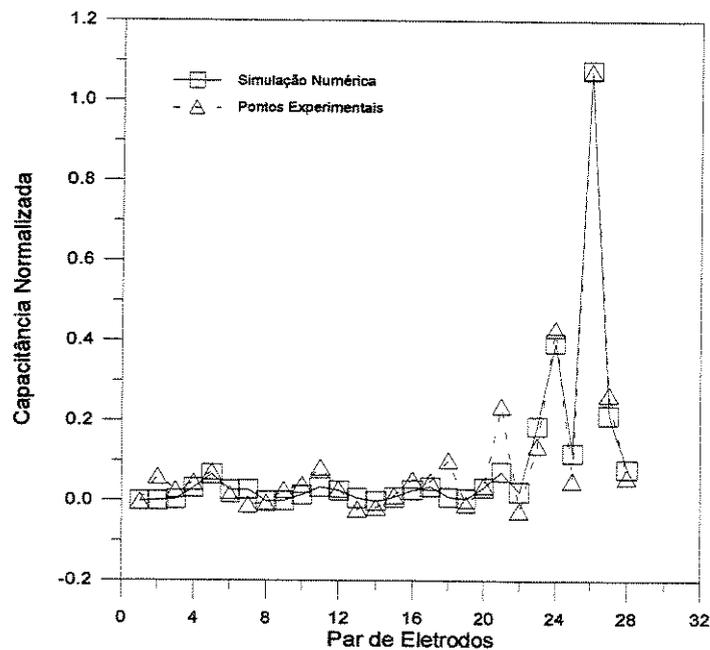


Figura 5.22 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 9,51\%$.

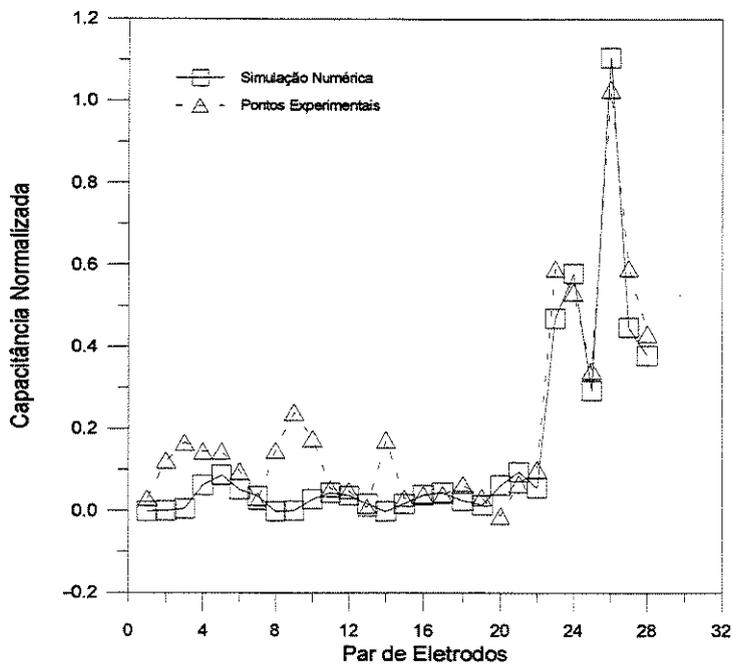


Figura 5.23 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 14,51\%$.

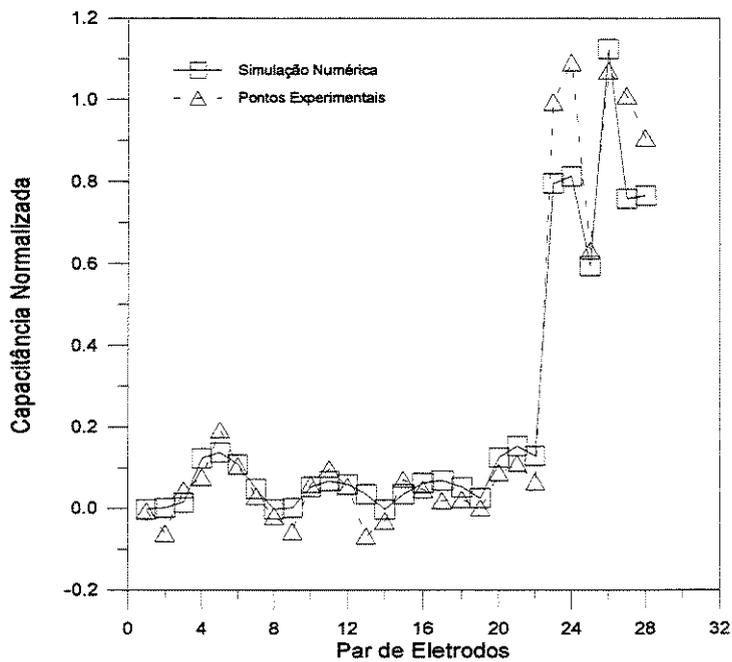


Figura 5.24 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 25,52\%$.

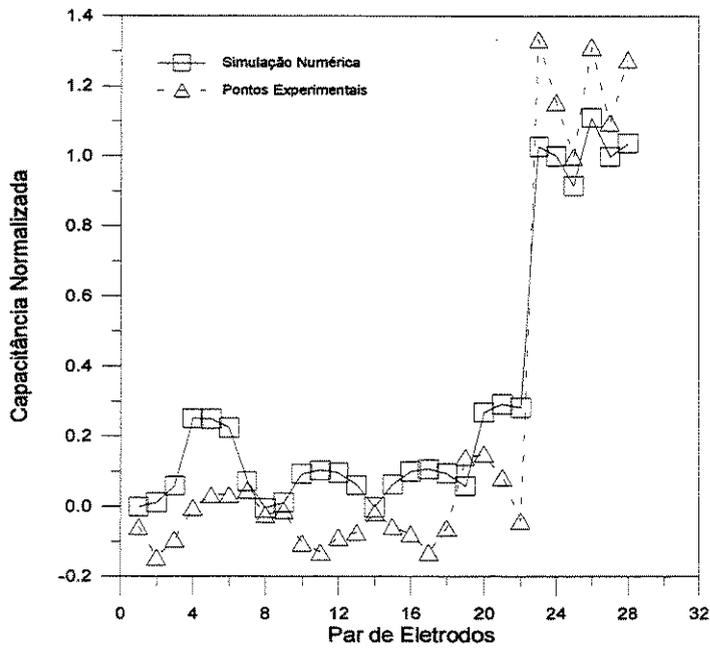


Figura 5.25 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 43,79\%$.

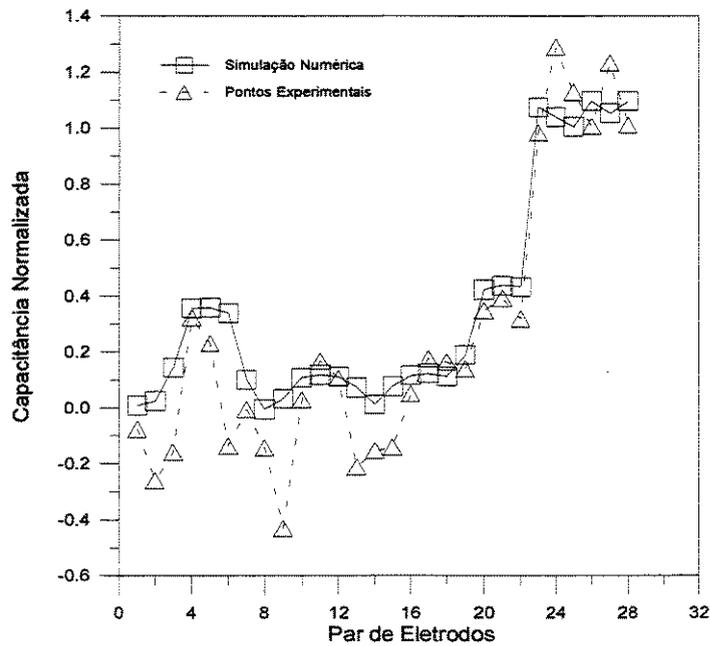


Figura 5.26 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 50\%$.

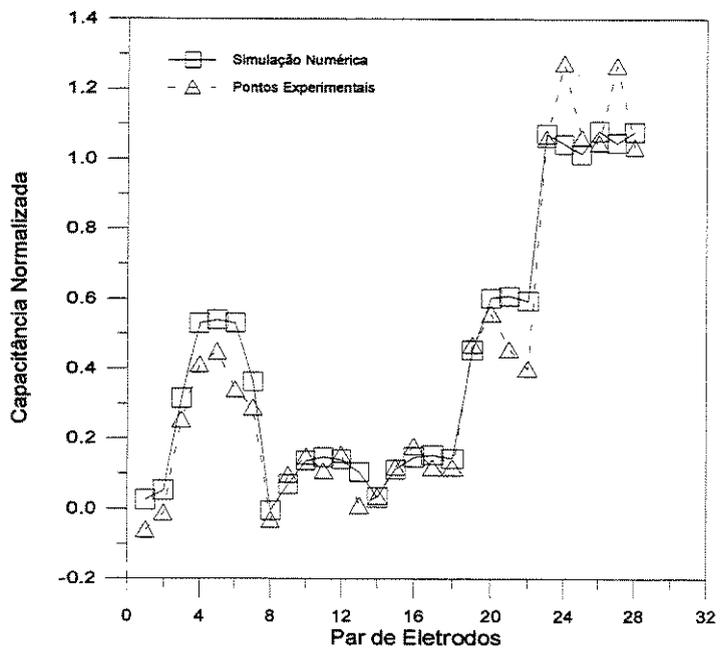


Figura 5.27 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 57,19\%$.

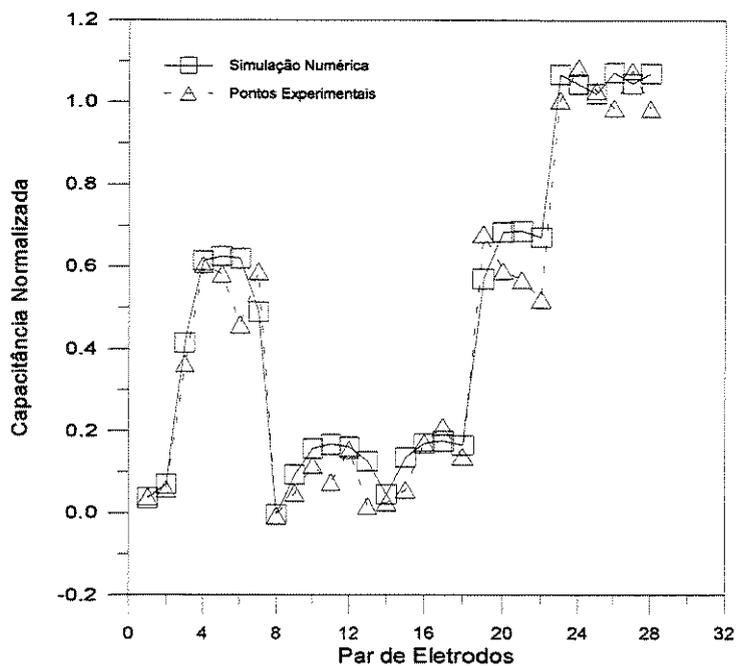


Figura 5.28 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 62,46\%$.

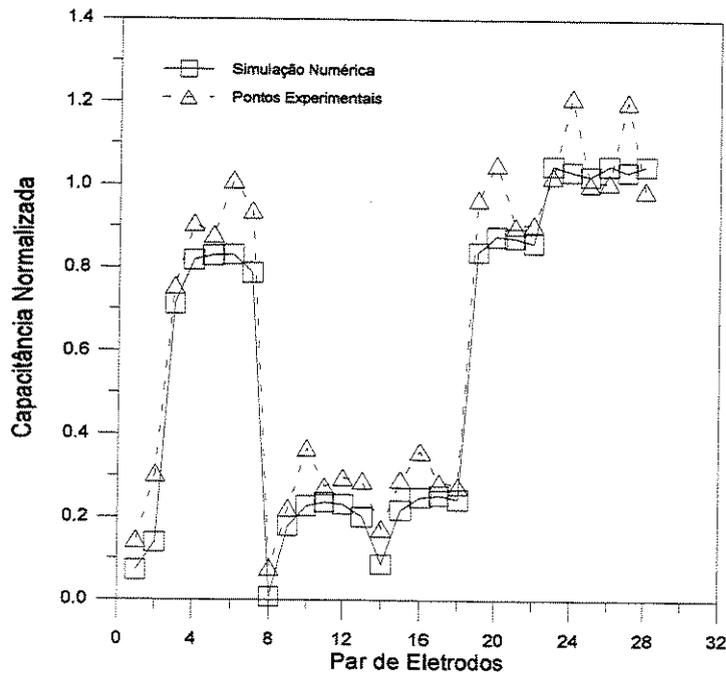


Figura 5.29 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 74,97\%$.

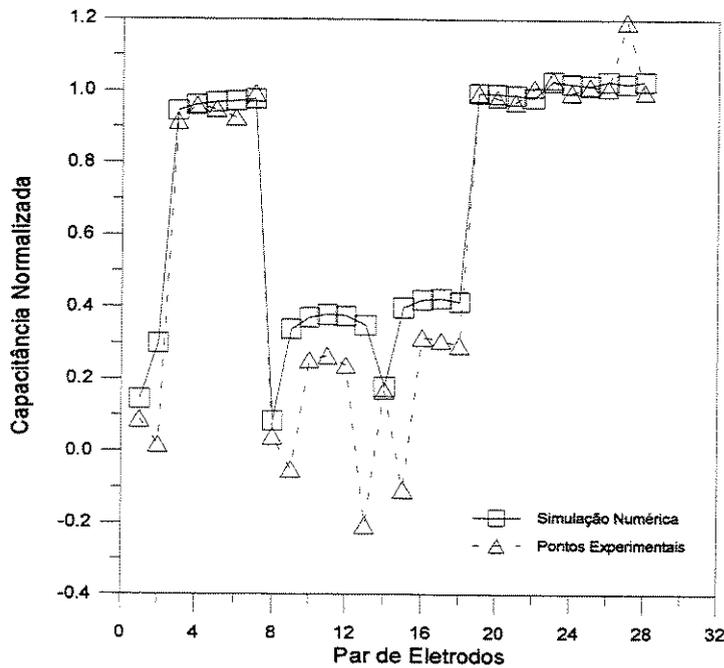


Figura 5.30 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 85,99\%$.

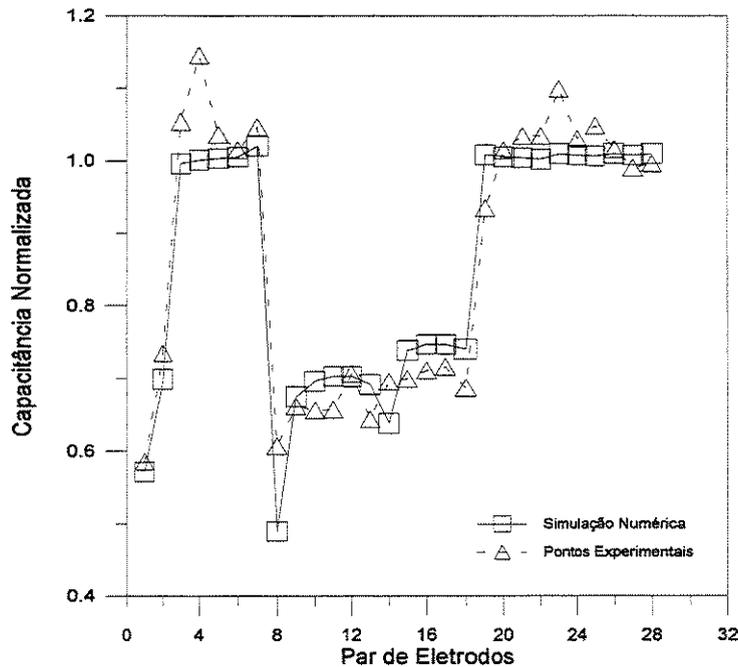


Figura 5.31 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 94,75\%$.

5.7 - Resultados para eletrodos livres aterrados

Para o caso de eletrodos aterrados, só foi feita uma simulação numérica e um teste experimental para a situação de fração de líquido de 50%. Antes da apresentação dos gráficos da simulação numérica e dos testes experimentais, será feita uma comparação entre os resultados experimentais de eletrodos flutuantes e aterrados para o tubo cheio de ar e cheio de água, para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, conforme a Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Comparação das capacitâncias experimentais (pF) entre eletrodos aterrados e flutuantes.

| Par de Eletrodos | Eletrodos Aterrados | | Eletrodos Flutuantes | |
|------------------|---------------------|------|----------------------|------|
| | Ar | Água | Ar | Água |
| 1-2 | 2,05 | 2,29 | 2,27 | 4,00 |
| 1-3 | 0,78 | 1,54 | 1,24 | 3,42 |
| 1-4 | 0,70 | 1,45 | 0,98 | 3,35 |
| 1-5 | 0,59 | 1,45 | 0,88 | 2,90 |

Através dos resultados da Tabela 5.10, pode-se verificar que a razão entre o maior valor da capacitância da água e o menor valor da capacitância do ar ficou sendo de 3,86 para o caso de eletrodos aterrados e 4,53 para o caso de eletrodos flutuantes. Isto mostra que se pode trabalhar em ambos os modos, com eletrodos aterrados e com eletrodos flutuantes, pois a diferença entre os dois resultados foi pequena. Talvez uma pequena vantagem, seria porque os valores da capacitância, para o caso de eletrodos flutuantes, são um pouco maiores do que os valores das capacitâncias, para o caso de eletrodos aterrados.

A Figura 5.33 mostra as capacitâncias normalizadas numéricas e experimentais para fração de líquido de 50% em função dos pares de eletrodos, para a frequência de 11,5 MHz .

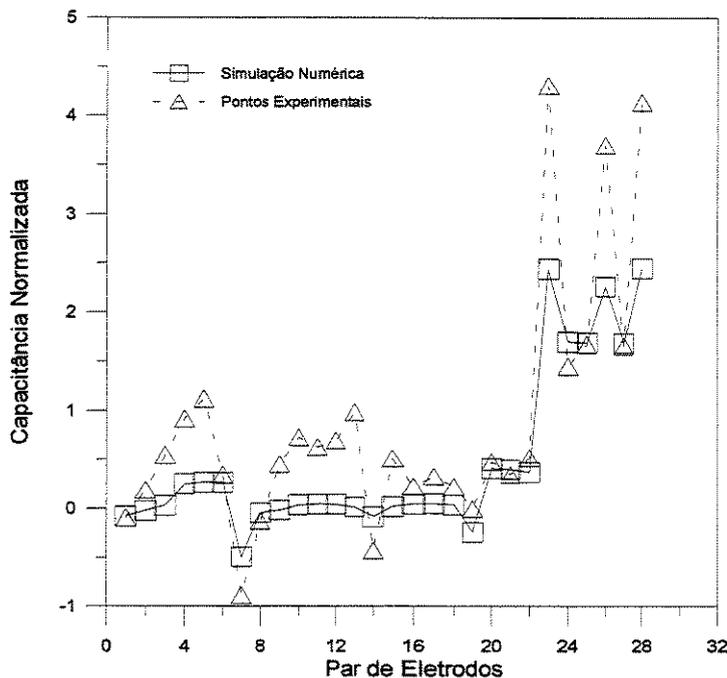


Figura 5.32 – Capacitâncias numérica e experimental normalizadas para $\beta_{vol} = 50\%$.

Tendo como referencial as simulações numéricas tanto para o caso de eletrodos flutuantes como para o caso de eletrodos aterrados, calculando a média dos erros absolutos entre as capacitâncias normalizadas experimentais e numéricas para os 28 pares de eletrodos, para o caso de fração de líquido de 50%, tem-se um erro absoluto médio de 0,480 para o caso de eletrodos aterrados e um erro absoluto médio de 0,146 para o caso de eletrodos flutuantes.

Comparando os resultados da capacitância normalizada para eletrodos flutuantes, conforme a Figura 5.26, com os resultados da capacitância normalizada para eletrodos aterrados, conforme a Figura 5.32, percebe-se que a variação da capacitância normalizada para eletrodos flutuantes vai de $-0,5$ a $1,3$ e para eletrodos aterrados vai de -1 a $4,5$. Em ambos os casos a capacitância normalizada é maior quando os eletrodos emissores estão em contato com a água (pares 5-6, 5-7, 5-8, 6-7, 6-8 e 7-8). Isto mostrou, para este caso particular de fração de líquido de 50%, que a capacitância normalizada experimental, para o caso de eletrodos flutuantes, se aproximou mais do intervalo entre 0 e 1. Essa aproximação decorre do fato dos eletrodos livres serem flutuantes e todo o campo elétrico sair do eletrodo emissor e terminar no eletrodo flutuante. Para o caso de eletrodos aterrados, o campo elétrico parte do eletrodo emissor e termina nos outros 7 eletrodos que se comportariam como receptores. Os maiores valores da capacitância experimental, para o caso de eletrodos livres aterrados, ocorrem para os pares de eletrodos 5-6, 6-7 e 7-8, que são os pares adjacentes estando os eletrodos emissores em contato com a água, onde o campo elétrico flui preferencialmente para os pares adjacentes devido ao gradiente do potencial elétrico ser maior nesta região e também por ocorrer uma deflexão do campo elétrico na interface do ar e da água.

5.8 – Correlação entre as capacitâncias normalizadas e a fração de líquido

Neste trabalho estimou-se a fração de líquido a partir dos valores experimentais das capacitâncias normalizadas para ser utilizada no algoritmo de reconstrução de imagem junto com a técnica de filtro para poder determinar o local da interface e calcular a fração de líquido através do próprio algoritmo. A função relacionou a fração de líquido volumétrica com a média aritmética das capacitâncias experimentais normalizadas dos pares de eletrodos adjacentes e opostos. A média aritmética desta capacitâncias normalizadas experimentais, $\bar{\lambda}$, dos pares adjacentes e opostos, é dada por:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{12} \left(\sum_{i=1}^7 \lambda_{i,i+1} + \lambda_{1,8} + \sum_{i=1}^4 \lambda_{i,i+4} \right) \quad (5.6)$$

Para o conjunto de resultados experimentais, obteve-se a seguinte expressão polinomial do quarto grau:

$$\beta_{\text{est}} = 0,000682484 - 0,15527 \cdot \bar{\lambda} + 7,91608 \cdot \bar{\lambda}^2 - 12,6932 \cdot \bar{\lambda}^3 + 5,94615 \cdot \bar{\lambda}^4 \quad (5.7)$$

onde β_{est} é a fração de líquido volumétrica estimada através da Equação 5.7.

A Figura 5.33 mostra os gráficos da fração de líquido volumétrica em função das capacitância, bem como a curva de ajuste.

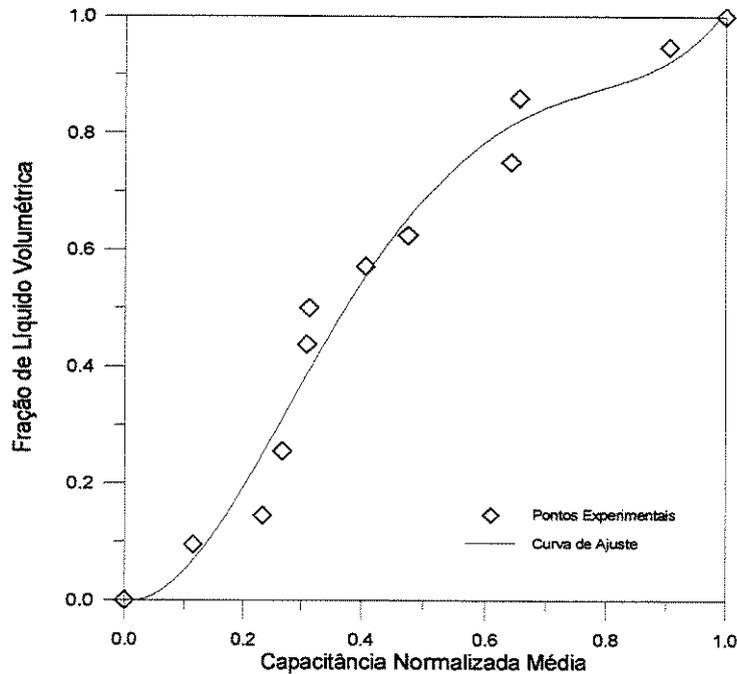


Figura 5.33 – Gráfico da fração de líquido volumétrica em função da capacitância normalizada média.

A Equação 5.7 serve para estimar a fração de líquido volumétrica a partir das capacitâncias normalizadas, sendo utilizada no algoritmo de reconstrução de imagem para estimar a fração de líquido volumétrica, utilizando como um dos dados de entrada as capacitâncias normalizadas experimentais, sendo que a convergência do algoritmo ocorrerá em torno do valor da fração de líquido volumétrica estimada pela função. O ajuste da curva forneceu um coeficiente de determinação de 0,9710 e uma soma quadrática dos resíduos de 0,0366518.

A Figura 5.34 mostra o comportamento da fração de líquido estimada em função do fração de líquido volumétrica.

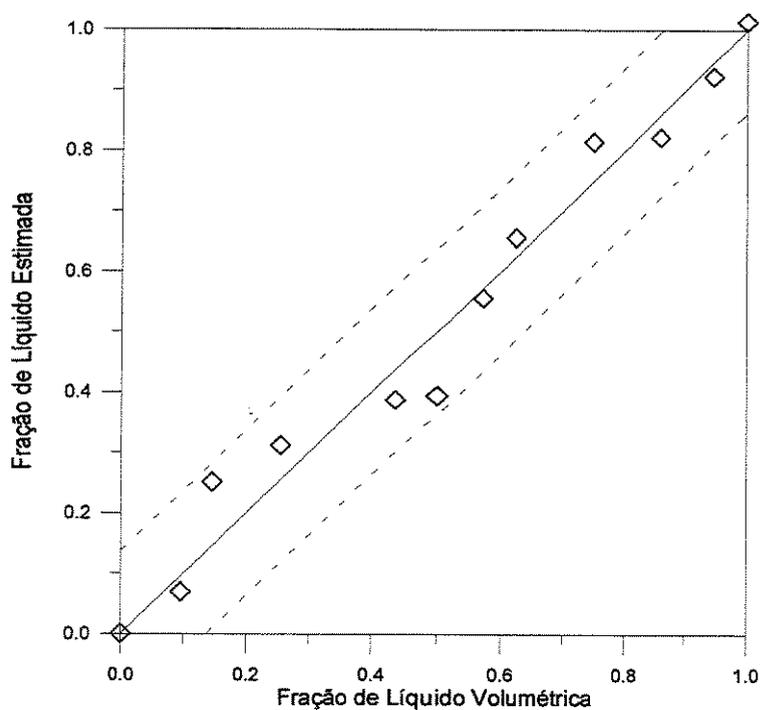


Figura 5.34 – Gráfico da fração de líquido estimada e da fração de líquido volumétrica.

5.9 – Reconstrução de imagem

Esta seção traz os resultados da reconstrução de imagem do meio estratificado, sendo os componentes ar e água. No processo de reconstrução de imagem, trabalhou-se com o algoritmo de reconstrução retro-projeção linear que utiliza como dados de entrada a distribuição de sensibilidade e as capacitâncias normalizadas experimentais para se obter a imagem reconstruída do sistema bifásico do tipo estratificado. Uma correlação da estimativa da fração de líquido volumétrica obtida das capacitâncias experimentais normalizadas é utilizada juntamente com a técnica de filtro para definir a interface.

Antes de iniciar a apresentação dos gráficos de reconstrução de imagem, será apresentado o gráfico do fator de ponderação e da distribuição de sensibilidade para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5.

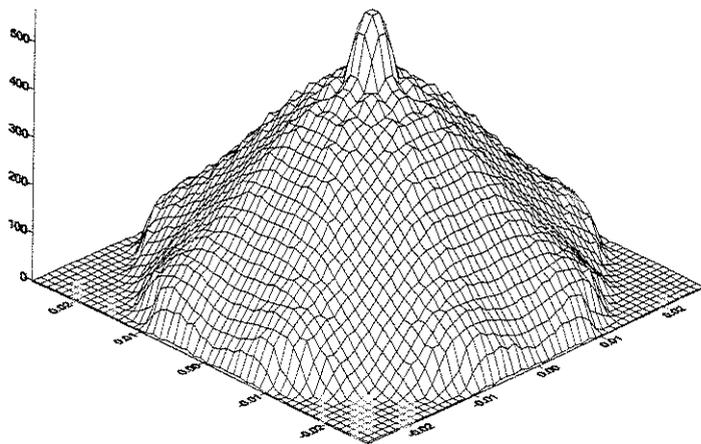


Figura 5.35 – Fator de Ponderação.

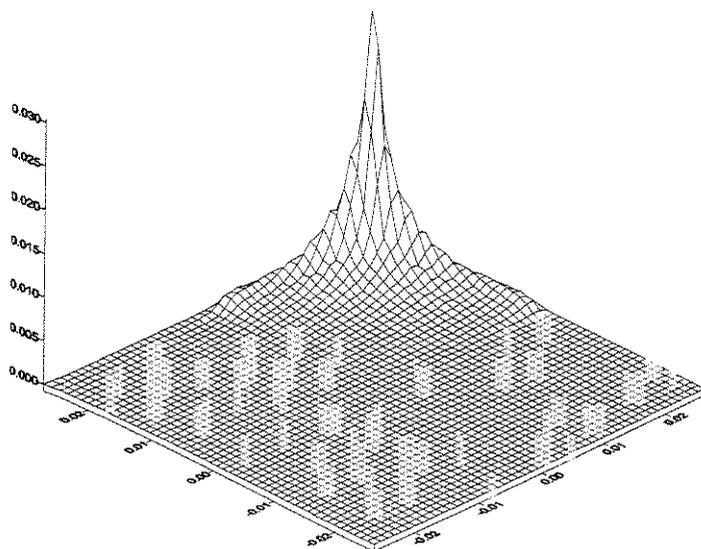


Figura 5.36 – Distribuição da sensibilidade para o par de eletrodos 1-2.

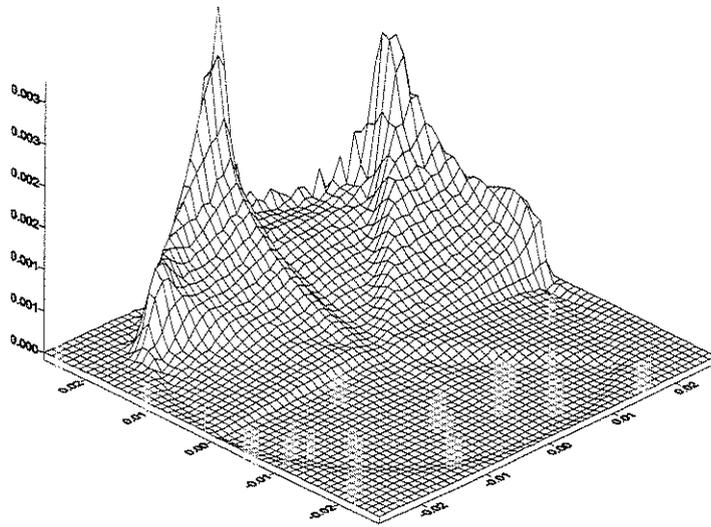


Figura 5.37 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-3.

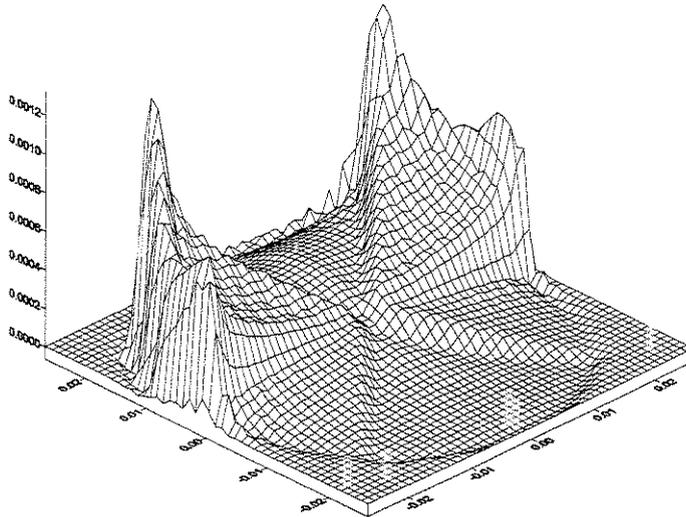


Figura 5.38 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-4.

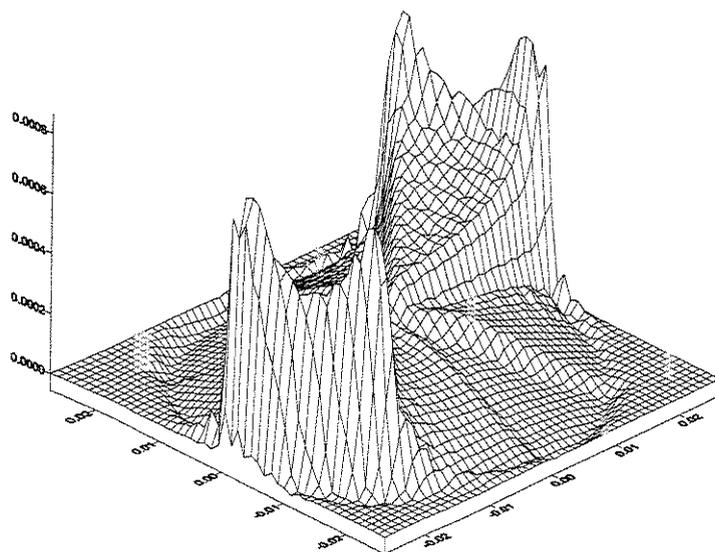


Figura 5.39 – Distribuição de sensibilidade para o par de eletrodos 1-5.

Os gráficos de distribuição de sensibilidade dão a idéia de como varia a capacitância normalizada, quando um elemento tem a permissividade da água e todos os outros a permissividade do ar, ou seja, seria a variação da leitura de um instrumento medindo a capacitância entre um par de eletrodos, quando existe uma variação de permissividade num pixel.

5.9.1 – Comparação entre a imagem teórica, sem a técnica de filtro e com filtro

A Figura 5.40 mostra a imagem teórica do sistema bifásico do tipo estratificado para a fração de líquido de 25,52%. Imagem teórica significa que os valores das capacitâncias utilizados no algoritmo de reconstrução de imagem foram obtidos por meio de simulações numéricas e que se aplicou a técnica de filtro, utilizando o valor da fração de líquido volumétrica como parâmetro para definir a interface. As Figuras 5.41 e 5.42 mostram as reconstruções de imagem, para fração de líquido de 25,52%, obtidas através dos testes experimentais para o caso sem a utilização da técnica de filtro e com a utilização da técnica de filtro, respectivamente.

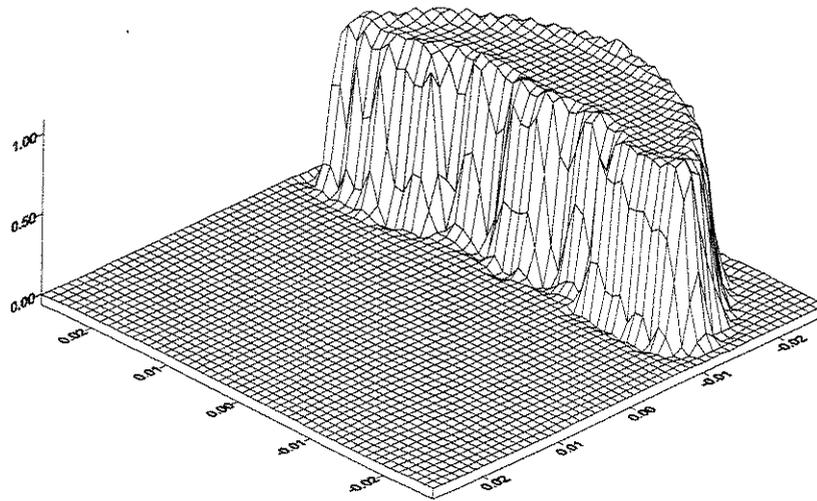


Figura 5.40 - Reconstrução de imagem teórica obtida através de simulação numérica para fração de líquido de 25,52%.

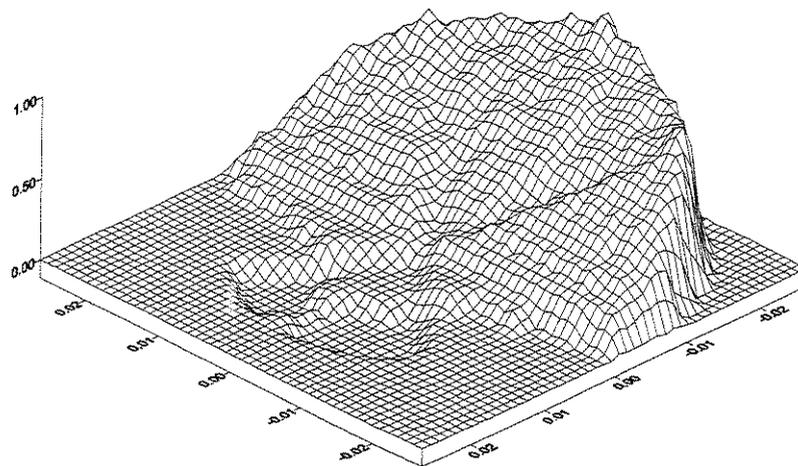


Figura 5.41 - Reconstrução de imagem obtida sem a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 25,52%.

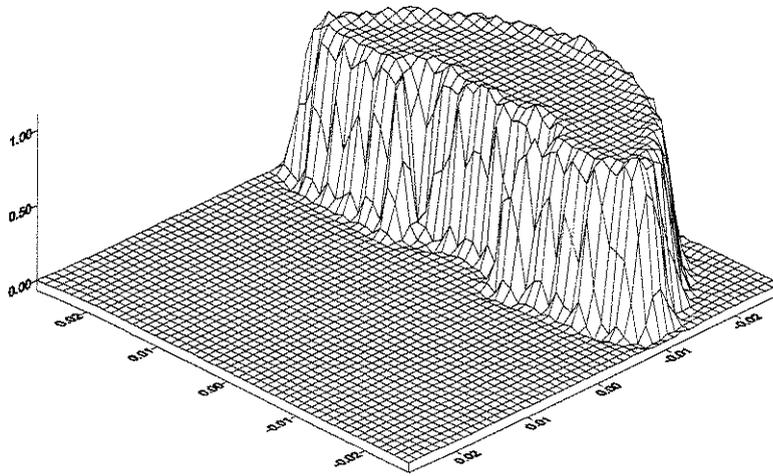


Figura 5.42 - Reconstrução de imagem obtida com a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 25,52%.

A Figura 5.43 mostra a imagem teórica do sistema bifásico do tipo estratificado para a fração de líquido de 50%. As Figuras 5.44 e 5.45 mostram as reconstruções de imagem, para fração de líquido de 50%, obtidas através dos testes experimentais para o caso sem a utilização da técnica de filtro e com a utilização da técnica de filtro, respectivamente.

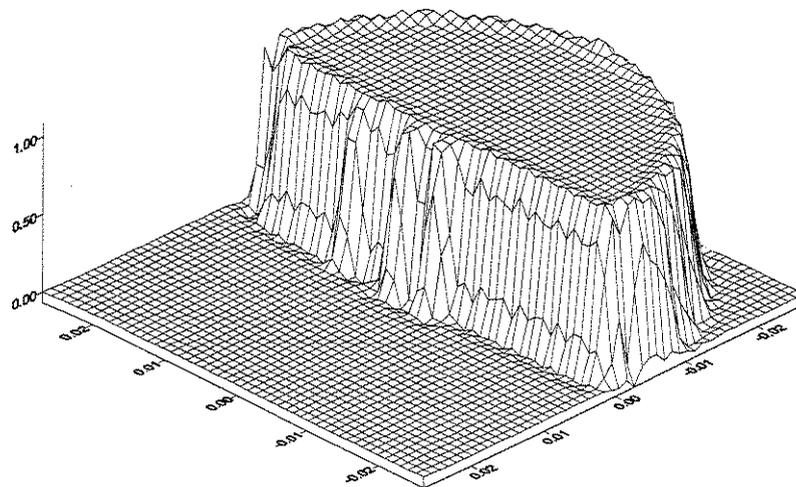


Figura 5.43 - Reconstrução de imagem obtida através de simulação numérica para fração de líquido de 50%.

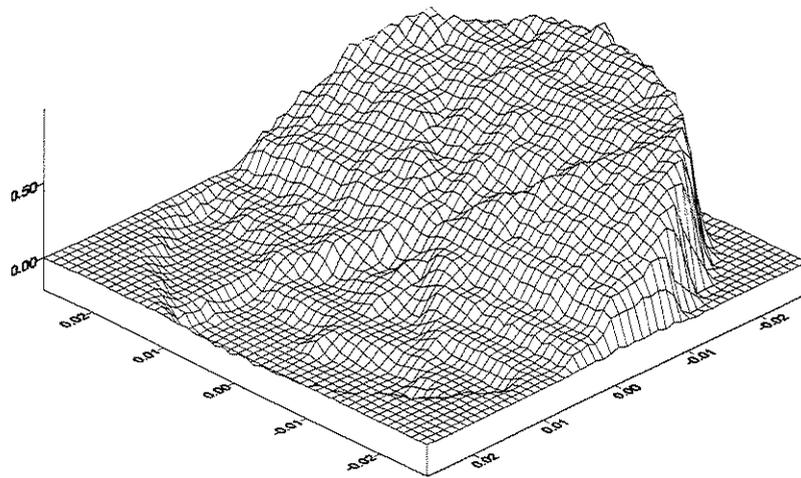


Figura 5.44 - Reconstrução de imagem obtida sem a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 50%.

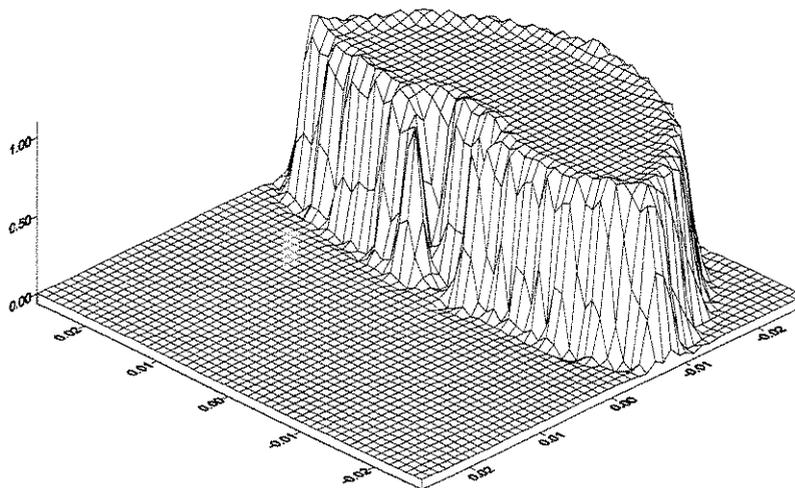


Figura 5.45 - Reconstrução de imagem obtida com a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 50%.

A Figura 5.46 mostra a imagem teórica do sistema bifásico do tipo estratificado para a fração de líquido de 85,99%. As Figuras 5.47 e 5.48 mostram as reconstruções de imagem, para fração de líquido de 85,99%, obtidas através dos testes experimentais para o caso sem a utilização da técnica de filtro e com a utilização da técnica de filtro, respectivamente.

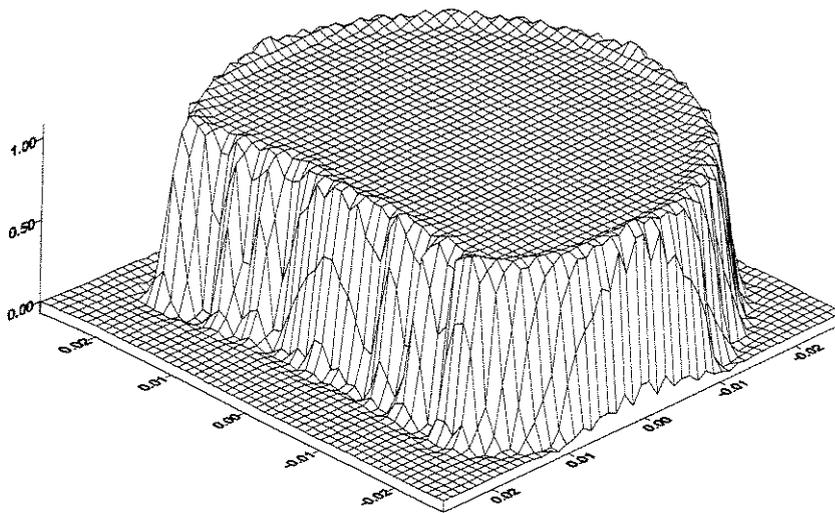


Figura 5.46 - Reconstrução de imagem obtida através de simulação numérica para fração de líquido de 85,99%.

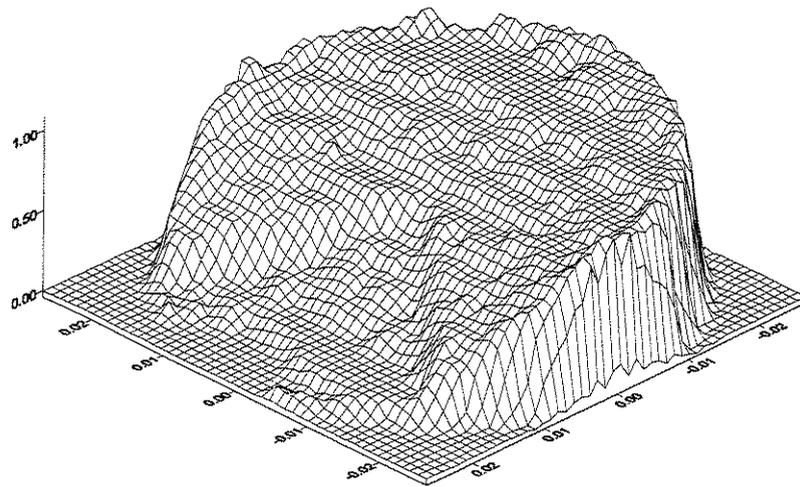


Figura 5.47 - Reconstrução de imagem obtida sem a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 85,99%.

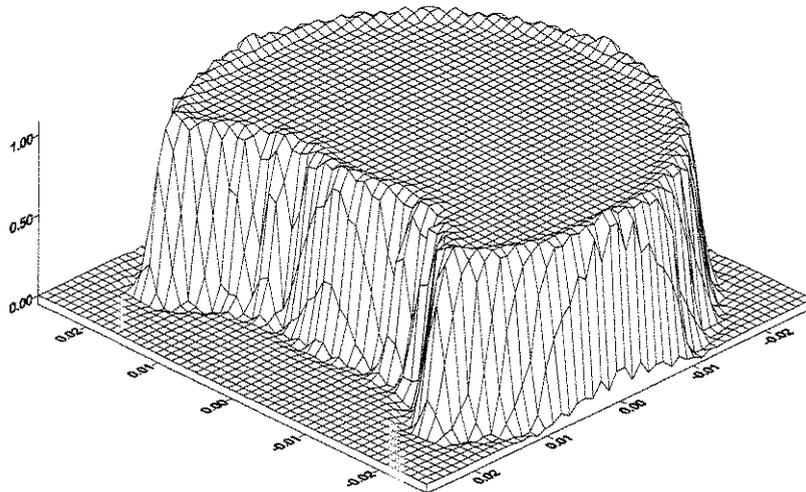


Figura 5.48 - Reconstrução de imagem obtida com a utilização da técnica de filtro para fração de líquido de 85,99%.

Através das Figuras 5.41, 5.44 e 5.47 observa-se o comportamento teórico. Através das imagens teóricas, observa-se que a interface não é linear, isto devido à discretização da malha ainda ser um pouco grosseira. Também percebe-se a grande diferença quando se aplica a técnica de filtro, pois a interface fica bem definida, o que não acontece quando não se utiliza a técnica de filtro.

5.9.2 – Apresentação das imagens reconstruídas utilizando a técnica de filtro

Os gráficos de reconstrução de imagem foram obtidos para as mesmas frações de líquido dos testes experimentais, sendo utilizado o algoritmo de retro-projeção linear juntamente com a técnica de filtro. Nas Figuras 5.49 à 5.58 estão os gráficos de reconstrução de imagem, onde são utilizadas as capacitâncias experimentais e a distribuição de sensibilidade com 800 elementos na região interna (local onde se encontra o meio bifásico) como dados de entrada do algoritmo de retro-projeção linear juntamente com a técnica de filtro, na qual utiliza uma estimativa da fração de líquido.

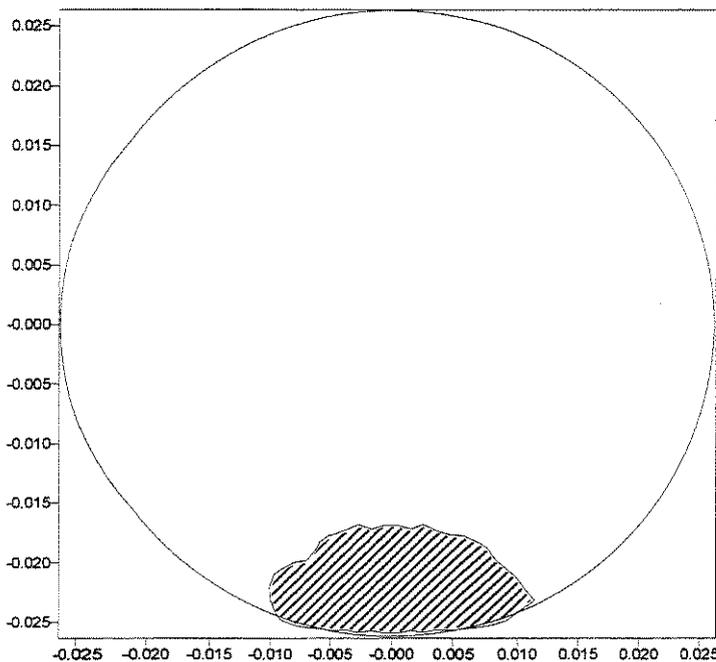


Figura 5.49 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 9,51%.

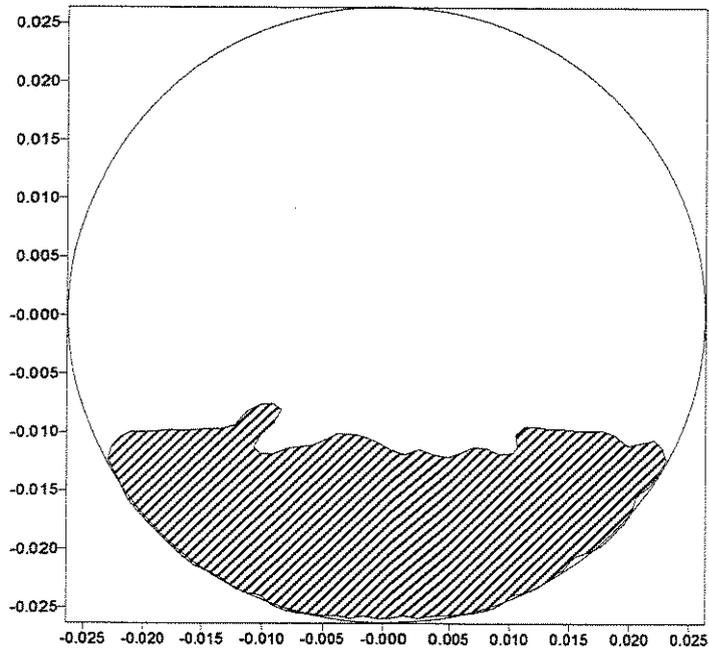


Figura 5.50 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 14,51%.

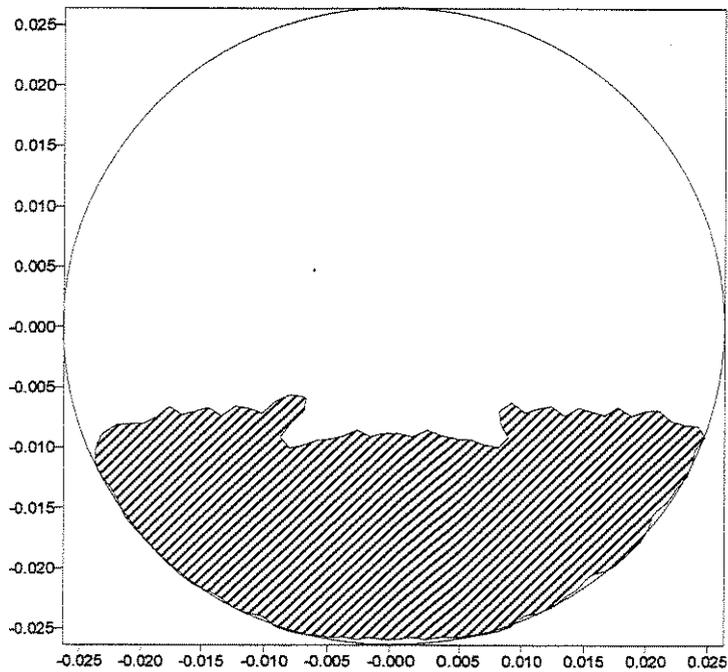


Figura 5.51 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 25,52%.

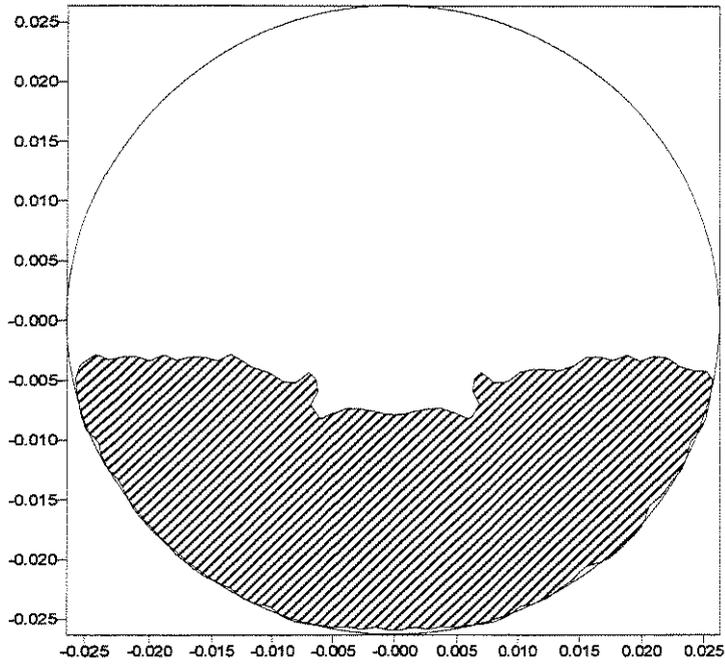


Figura 5.52 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 43,79%.

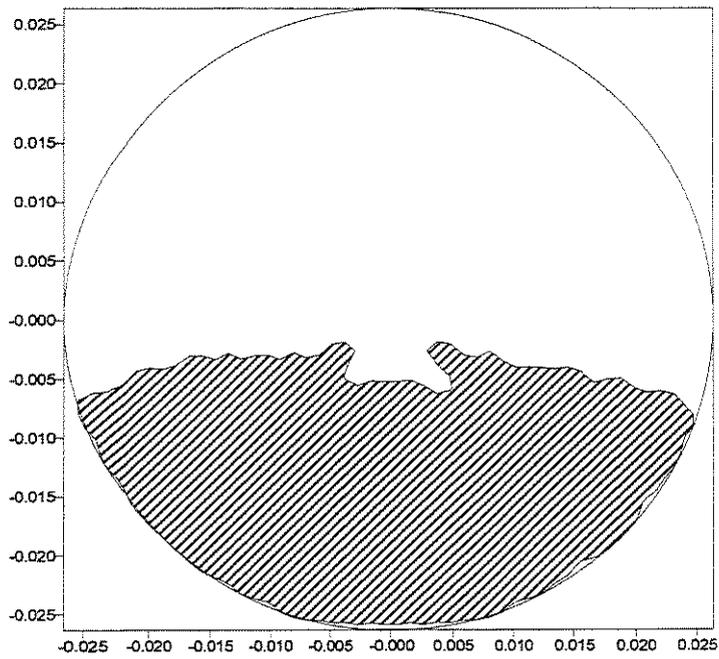


Figura 5.53 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 50%.

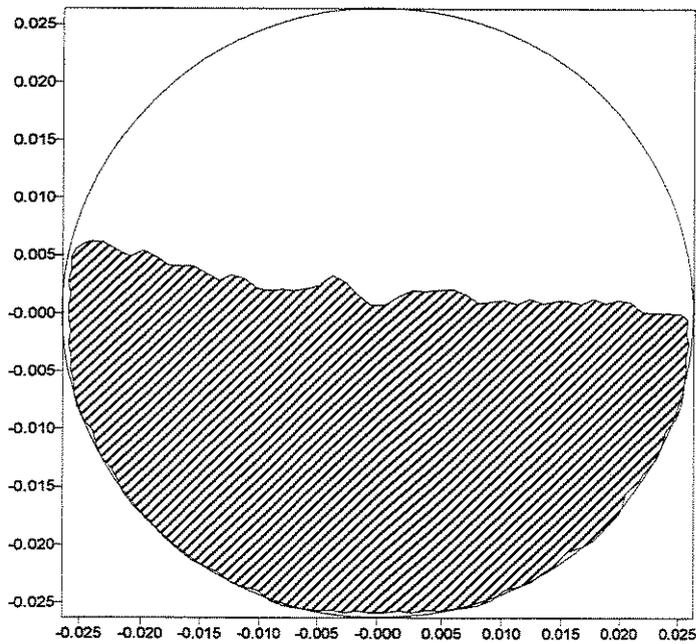


Figura 5.54 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 57,19%.

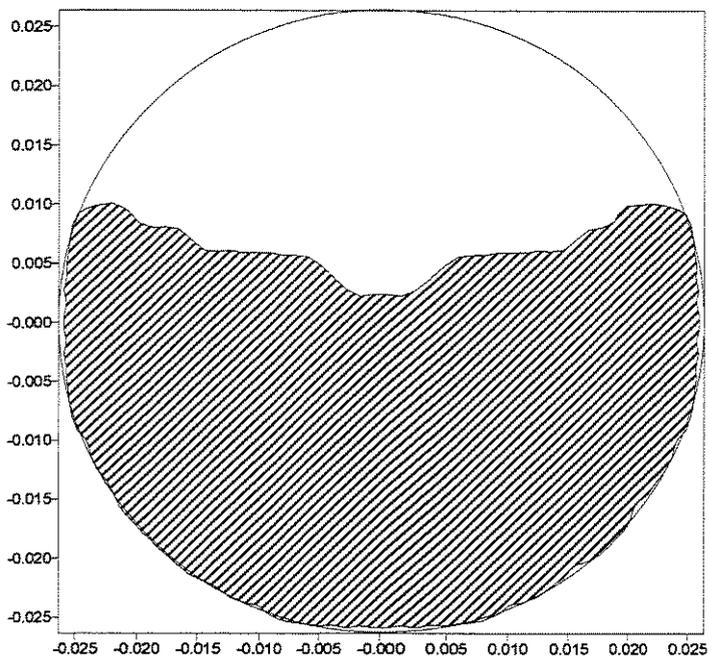


Figura 5.55 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 62,46%.

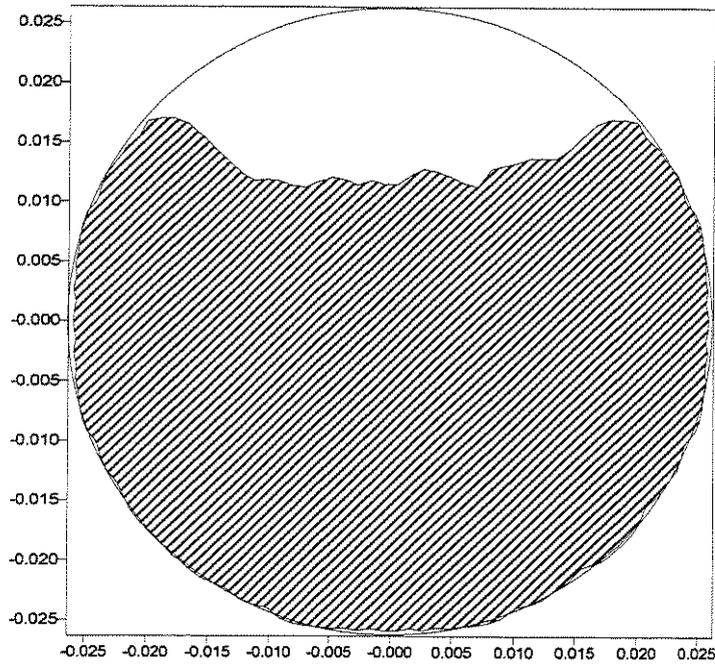


Figura 5.56 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 74,97%.

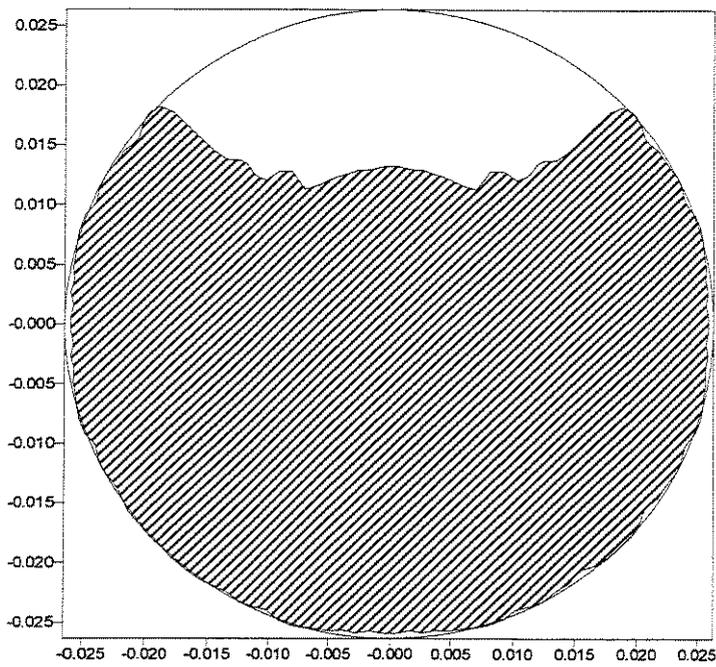


Figura 5.57 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 85,99%.

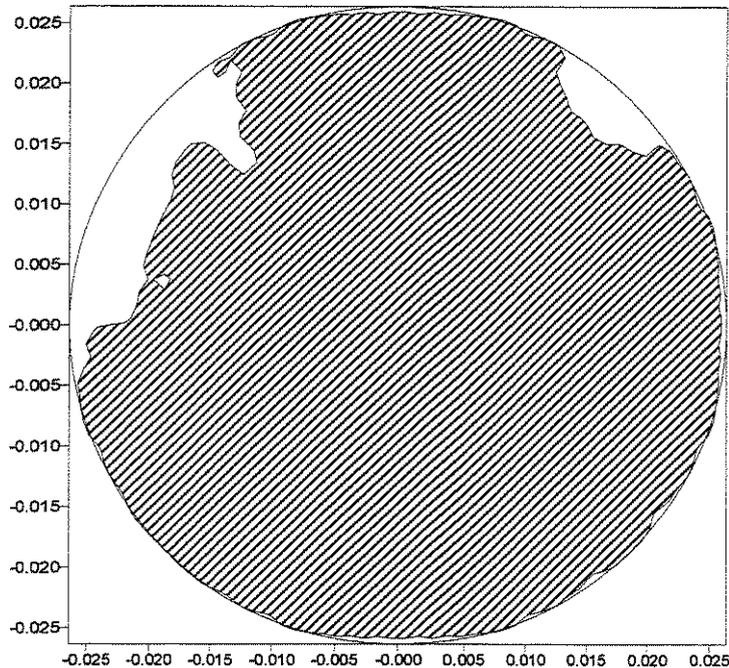


Figura 5.58 - Reconstrução de imagem para fração de líquido de 94,75%.

Teoricamente, a interface do sistema bifásico do tipo estratificado deveria ser uma linha reta, sendo que isto não ocorreu devido à imprecisão das medidas experimentais, devido à utilização de uma malha relativamente grosseira, pois foi utilizada uma malha com 800 elementos na região interna, para o cálculo da distribuição de sensibilidade e também porque utilizou-se um algoritmo simples e o sensor foi composto de 8 eletrodos. Um sensor com 16 eletrodos fornece 120 leituras independentes de capacitância, melhorando a resolução do sistema, no momento de fazer a reconstrução da imagem.

A Tabela 5.11 apresenta resultados da reconstrução de imagem, mostrando a fração de líquido volumétrica medida, a fração de líquido estimada, a fração de líquido calculada com a utilização de técnica de filtro, a fração de líquido calculada sem a técnica de filtro, o erro relativo entre a fração de líquido com a técnica de filtro e sem a técnica de filtro e o nível de corte.

Tabela 5.11 - Resultados da reconstrução de imagem.

| β_{vol} | β_{est} | β_{ctf} | β_{stf} | Erro relativo (%) | trsh |
|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------|
| 0,0951 | 0,070 | 0,070 | 0,103 | 47,1 | 0,377 |
| 0,1451 | 0,252 | 0,253 | 0,199 | 21,3 | 0,275 |
| 0,2552 | 0,312 | 0,313 | 0,239 | 23,6 | 0,367 |
| 0,4379 | 0,388 | 0,388 | 0,244 | 37,1 | 0,275 |
| 0,5 | 0,394 | 0,395 | 0,266 | 32,7 | 0,370 |
| 0,5719 | 0,556 | 0,555 | 0,409 | 26,3 | 0,306 |
| 0,6246 | 0,656 | 0,656 | 0,440 | 32,9 | 0,290 |
| 0,7497 | 0,815 | 0,815 | 0,648 | 20,5 | 0,292 |
| 0,8599 | 0,823 | 0,823 | 0,594 | 27,8 | 0,168 |
| 0,9475 | 0,923 | 0,923 | 0,861 | 6,72 | 0,762 |

onde:

β_{stf} é a fração de líquido calculada sem a técnica de filtro.

Através da Tabela 5.11, observa-se que o cálculo da fração de líquido juntamente com a utilização da técnica de filtro é um valor igual ao da fração de líquido estimada pela função que correlaciona a fração de líquido volumétrica com as capacitâncias normalizadas. A fração de líquido estimada por esta correlação, juntamente com a técnica de filtro é que vai determinar o que é líquido e o que é gás, definindo uma interface, sendo importante encontrar uma boa correlação entre a fração de líquido volumétrica e as capacitâncias experimentais. O desvio médio absoluto da fração de líquido com a utilização da técnica de filtro em relação à fração de líquido volumétrica foi de 0,052 e o desvio médio absoluto da fração de líquido sem a utilização da técnica de filtro em relação à fração de líquido volumétrica foi de 0,131, justificando a utilização da técnica de filtro para o cálculo da fração de líquido volumétrica. Evidente que uma função que correlaciona mal a fração de líquido volumétrica em relação as capacitâncias normalizadas, irá afastar o valor da fração de líquido calculada pelo algoritmo de reconstrução de imagem em relação ao verdadeiro valor da fração de líquido volumétrica.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de tomografia de capacitância para fazer a reconstrução de imagem de um sistema bifásico do tipo estratificado, sendo os componentes ar e água. O desenvolvimento deste sistema foi constituído de um transdutor para a obtenção das medidas de capacitância. Fez-se um estudo, através de simulações numéricas para comparar com os resultados experimentais. O algoritmo de reconstrução de imagem utilizado foi o retro-projeção linear.

Um dos pontos a ser analisado é a calibração do transdutor de capacitância. Foi feita a calibração utilizando capacitores comerciais que foram medidos com uma ponte RLC da Minipa. Tendo as capacitâncias dos capacitores, utilizou-se o transdutor de capacitância para medir as voltagens de entrada e de saída por meio de multímetros. Esta calibração foi feita para 3 frequências de excitação testadas, a de 5 MHz, a de 11,5 MHz e a de 16,3 MHz. De posse desses dados, levantou-se a curva de calibração, calculou-se o coeficiente de determinação, o erro residual e a incerteza global da capacitância. No cálculo da capacitância global levou-se em consideração a incerteza da razão da voltagem de saída e de entrada, a incerteza da ponte RLC da Minipa e a incerteza do ajuste dos pontos. Esta última foi a que teve a maior contribuição na incerteza global, em torno de 96 %. As incertezas globais foram de 0,229 pF, 0,139 pF e 0,232 pF para as frequências de 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz, respectivamente.

Na escolha da frequência de excitação (5 MHz, 11,5 MHz ou 16,3 MHz), levou-se em consideração o ajuste da curva de calibração, a incerteza da calibração, as incertezas das

capacitâncias normalizadas e foi feita uma comparação da curva teórica com a curva experimental. Para estes casos, a frequência de 11,5 MHz teve o melhor desempenho, com uma incerteza global menor e uma curva experimental mais próxima da curva teórica. Com relação à repetibilidade dos dados, foram feitos testes tanto para o tubo cheio de ar como para o tubo cheio de água, para as três frequências de excitação, em dias diferentes. Estas medidas foram feitas para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5. Para tirar uma conclusão sobre a repetibilidade, calculou-se a média das capacitâncias, os seus desvios padrões e consequentemente os seus coeficientes de variação. Como as médias foram diferentes, analisou-se o coeficiente de variação, onde constatou-se que a frequência de 16 MHz foi a que teve a menor dispersão dos resultados da capacitância absoluta tanto para o tubo cheio de ar como para o tubo cheio de água, com um coeficiente de variação de 5,23%, e as frequências de 5 MHz e 11,5 MHz tiveram um coeficiente de variação de 9,99% e 9,21%, respectivamente. A opção foi feita pela frequência de 11,5 MHz, pois a curva de calibração foi o ponto de partida para a apresentação dos resultados de capacitância normalizada e para as imagens reconstruídas.

Foram feitas simulações numéricas do sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido variando de 2% até 98%. Estas simulações serviram para comparar com os resultados experimentais. Como não foi encontrada a solução analítica, simulações numéricas foram realizadas, fazendo-se o refinamento da malha, tanto para o tubo cheio de ar como cheio de água. Observou-se uma tendência de convergência, mas era preciso refinar mais a malha, o que não foi possível devido à limitação de memória do computador. A convergência foi mais lenta para o par 1-2, devido ao menor número de nós para interpolação entre os dois eletrodos adjacentes. Em geral os resultados experimentais, para o tubo cheio de ar, foram superiores ao da simulação numérica, tendo como referência a malha utilizada nas simulações numéricas, mas para o tubo cheio de água, o erro relativo médio foi de 7,5%, conforme pode ser visto na Tabela 5.9 na página 114.

Tanto nas simulações numéricas como na parte experimental, as capacitâncias normalizadas, para o caso de eletrodos flutuantes, praticamente estiveram dentro da faixa de -0,4 e 1,4. Para o caso de eletrodos aterrados, as capacitâncias normalizadas variaram de -1 a 4,5, ou seja, uma variação bem maior. Isto tem como consequência uma reconstrução de imagem de pior qualidade, visto que, se trabalha com algoritmos lineares.

Comparando as capacitâncias experimentais dos pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, para o tubo cheio de ar ou cheio de água, tanto para o caso de eletrodos aterrados como para o caso de eletrodos flutuantes, observou-se que estes últimos forneceram valores mais elevados de capacitância absoluta para o tubo cheio de água e que com o tubo cheio de ar, os valores foram praticamente os mesmos. A razão entre o maior valor da capacitância sobre o menor valor da capacitância foi praticamente igual para ambos os casos, sendo de 3,86 para eletrodos aterrados e de 4,53 para eletrodos flutuantes.

Na parte de reconstrução de imagem, escolheu-se uma função para correlacionar a fração de líquido volumétrica em função das capacitâncias normalizadas através de um polinômio. Foi utilizada a média aritmética dos pares de eletrodos adjacentes e opostos. Isto facilitou o trabalho da estimativa de fração de líquido como dado de entrada no algoritmo de reconstrução de imagem para o posicionamento da interface. A técnica de filtro deve ser utilizada, pois fornece resultados melhores tanto da posição da interface quanto da fração de líquido.

Para trabalhos futuros poderia ser investigada uma solução analítica para as condições de contorno apropriadas, pois este resultado poderia ser confrontado com os resultados da simulação numérica, visto que os resultados da simulação numérica convergem assintoticamente.

Fazer simulações numéricas, variando parâmetros, tais como espessura da parede, distanciamento da blindagem, outros tipos de componentes, para investigar a influência deles nas medidas de capacitância e fazer uma análise da razão entre o valor máximo e mínimo de capacitância no intuito de escolher um sensor otimizado. Adaptar o tipo de malha para cada padrão de escoamento no intuito de melhorar os resultados numéricos para uma dada distribuição e aumentar a qualidade da distribuição de sensibilidade.

Utilizar sensores com 12 ou 16 eletrodos e avaliar a capacitância, principalmente para os eletrodos opostos, onde fica mais difícil de detectar alguma variação da mesma.

Pode-se tentar trabalhar com algoritmos iterativos na incumbência de melhorar os resultados da reconstrução de imagem e melhorar principalmente a qualidade da interface.

Para trabalhos futuros poderiam ser investigados outros amplificadores operacionais para melhoria dos resultados. Aprimorar o procedimento de calibração, pois o maior peso da incerteza está no ajuste da curva de calibração.

Referências Bibliográficas

- Belo, F. A. *Aplicação da análise eletrônica ao estudo de escoamentos multifásicos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. 260 p. Tese (Doutorado).
- Bruns, E. R., Barros Neto, B., Scarminio, I. S. *Planejamento e otimização de experimentos*. 2.ed., Editora da Unicamp, 1996. Cap. 5: Como construir modelos empíricos, p.133-186.
- Ceccio, S. L., George, D. L. A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering.*, v.118, n.2, p.391-399, 1996.
- Chan P. K., Bozic, M., York, T. A. Custom integrated circuits for tomographic imaging systems. Proc. European Concerted Action on Process Tomography, Oporto, 1994, p.123-134 apud Reinecke, N., Mewes, D. Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Measurement Science & Technology*, v.7, p.233-246, 1996.
- Dickin, F. J. et al. Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications. In: IEE Proceedings – G, February, 1992, v.139, n.1, p72-82.
- Dyakowski, T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement. *Measurement Science and Technology*, v.7, p.343-353, 1996.
- Dyakowski, T., Mann, R., Williams, R. A. Application of electrical tomography for multiphase flow measurements. In: International Conference on Multiphase Flow, 3, Lyon, France, June 8-12, 1998, p.1-8.

- Endress and Hauser Ltda. On a capacitance comparator measuring circuit, Patent 84087, 1984 apud Huang, S. M., Stott., A. L. et al. Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, v.21, p.242-250, 1988.
- Fasching, G. E., Smith Jr., N. S. A capacitive system for three-dimensional imaging of fluidized beds. *Rev. Sci. Instrum.*, v. 62, n.9, p.2243-2251, September 1991.
- Geraets, J. J. M., Borst, J. C. A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification. *International Journal of Multiphase Flow*, v.4, n.3, p.305-320, 1988.
- Green, R. G., Cunliffe, J. M. Measurement 1 (4) 110-5, 1983 apud Huang, S. M., Stott., A. L. et al. Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, v.21, p.242-250, 1988.
- Holman, J. P. *Experimental methods for engineers*.6.ed., New York: McGraw-Hill, 1994. Cap. 3: Analysis of experimental data, p.45-113.
- Hua, P. et al. Iterative reconstruction methods using regularization and optimal current patterns in electrical impedance tomography. *IEEE Trans. Med. Imag.*, v.10, 1991, p.621-628 apud Xie, C. G. et al. Electrical tomography techniques for process engineering applications. *The Chemical Engineering Journal*, v.56, p.127-133, 1995.
- Huang S. M. *Capacitance transducers for concentration measurement in multicomponent flow process*. Manchester University of England, 1986. PhD Thesis apud Huang, S. M., Stott., A. L. et al. Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, v.21, p.242-250, 1988.

- Huang, S. M. Fielden, J. et al. A new capacitance transducer for industrial applications. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, v.21, p. 251-256, 1988.
- Huang, S. M., Stott., A. L. et al. Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, v.21, p.242-250, 1988.
- Huang, S. M. et al. Tomographic imaging of two-component flow using capacitance sensors. *Journal Phys. E Sci. Instrum.*, v.22, p.173-177, 1989.
- Huang, S. M., Xie, C. G. Salkeld J. A. et al. Process tomography for identification, design and measurement in industrial systems. *Powder Technology*, v.69, p.85-92, 1992.
- Huang, S. M., Xie, C. G., Thorn, R. et al. Design of sensor electronics for electrical capacitance tomography. *IEE Proceedings-G*, v.139, n.1, February 1992, p.83-88.
- Isaken, Ø. A review reconstruction techniques for capacitance tomography. *Measurement Science and Technology*, v.7, p.1325-337, 1996.
- Isaken, Ø., Nordtvedt, J. E. A new reconstruction algorithm for process tomography. *Meas. Sci. Technol.*, v.4, p.1464-1475, 1993.
- Khan, S. H., Abdullah, F. Finite element modelling of multielectrode capacitive system for flow imaging, *IEE Proceedings-G*, v.140, n.3, p.216-222, June 1993.
- Kim Y., Webster, J. G., Tompkins, W. J. Electrical impedance imaging of the thorax, *Journal of Microwave Power*, v.18, p.245-257, 1983 apud Ceccio, S. L., George, D. L. A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering.*, v.118, n.2, p.391-399, 1996.

- Lemonnier, H. Multiphase instrumentation: the keystone of multidimensional multiphase flow modeling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.15, p.154-162, 1997.
- Marquardt B. W. An algorithm for least-square estimation of non-linear parameters. *SIAM J. appl. Math.*, v.11, p.431-441, 1963 apud Yorkey, T. J., Webster J. G., Tompkins, W. J. Comparing reconstruction algorithms for electrical impedance tomography. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, v.BME-34, n.11, p.843-852. November 1987.
- Masuda, Y., Nishikawa, M., Ichijo, B. New methods of measuring capacitance and resistance of very high loss materials at high frequencies. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-29, p.28-36 apud Huang, S. M., Stott., A. L. et al. Electronic transducer for industrial measurement of low value capacitances. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, v.21, p.242-250, 1988.
- Moura, L. F. M., Tambellini, F., Belo, F. A. Two-phase flow using 8-electrode electrical capacitance sensor. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 14, Bauru, SP, 1997. p1-9.
- Moura, L. F. M., Tambellini, F., Belo, F. A. Electrical capacitance tomography of a horizontal two-phase flow, In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA, USA, (ASME-HTD-v.361-5), 1998, p.239-246.
- Orlando, Alcir de Faro. *Metrologia para a qualidade industrial*. Rio de Janeiro: Departamento Engenharia Mecânica – Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, novembro 1998. 27 p. (Curso ministrado no Encontro Nacional de Ciências Térmicas)
- Reinecke, N., Mewes, D. Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Measurement Science & Technology*, v.7, p.233-246, 1996.
- Reinecke N., Mewes, D. Multielectrode capacitance sensors for the visualization of transient two-phase flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.15, p.253-266, 1997.

- Wexler, A., Fry, B., Neuman, M. R. Impedance computed tomography algorithm and system. *Applied Optics*, v.24, p.3985-3992, 1985 apud Ceccio, S. L., George, D. L. A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering*, v.118, n.2, p.391-399, 1996.
- Xie, C. G., Plaskowski, A., Beck, M. S. 8-Electrode capacitance system for two-component flow identification. part 1: tomographic flow imaging. *IEE Proceedings*, v.136, Pt. A, n.4, p.173-183. July 1989(a).
- Xie, C. G., Plaskowski, A., Beck, M. S., 8-Electrode capacitance system for two-component flow identification. part 2: tomographic flow imaging., *IEE Proceedings*, v.136, Pt. A, n. 4, p. 184-190. July 1989(b).
- Xie, C. G. et al. Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors. *IEE Proceedings-G*, v.139, n.1, February 1992(a), p.89-98.
- Xie, C. G. et al. Transputer-based electrical capacitance tomography for real-time imaging of oilfield flow pipelines. *Proc. European Concerted Action on Process Tomography*, Manchester, 1992, p.295-308 apud Reinecke, N., Mewes, D. Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Measurement Science & Technology*, v.7, p.233-246, 1996.
- Xie, C. G. et al. Electrical tomography techniques for process engineering applications. *The Chemical Engineering Journal*, v.56, p.127-133, 1995.
- Yang, W. Q., Stott, A. L. and Beck, M. S. High frequency and high resolution capacitance measuring circuit for process tomography. *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*, v.141, n.3, p.215-219. June 1994.

- Yang, W. Q., Stott, A. L., Beck, M. S. Development of capacitance tomographic imaging system for oil pipeline measurement. *Review of Scientific Instruments*, v.66, n.8, p.4326-4332. August 1995.
- Yang, W. Q. Hardware design of electrical capacitance tomography systems. *Measurement Science and Technology*, v.7, p.225-232, 1996.
- Yang, W. Q., Scott, A. L. Tomographic techniques for process design and operation (CEC Brite Euram Computational Mechanics Publications), 1993 apud Reinecke, N., Mewes, D. Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Measurement Science & Technology*, v.7, p.233-246, 1996.
- Yang, W. Q. Modelling of capacitance tomography sensors. *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, v.144, n.5, p.203-208. September 1997.
- Yang, W. Q., Conway, W. F. Measurement of sensitivity distributions of capacitance tomography sensors. *Review of Scientific Instruments*, v.69, n.1, p.233-236. January 1998.
- Yorkey, T. J., Webster J. G., Tompkins, W. J. Comparing reconstruction algorithms for electrical impedance tomography. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, v.BME-34, n.11, p.843-852. November 1987.

Anexo I

Programas para Gerar a Malha

A simulação numérica constituiu na geração de resultados através da utilização de um pacote numérico, baseado no método de elementos finitos, sendo que neste trabalho utilizou-se o ANSYS 5.4. Para a utilização do ANSYS é preciso gerar a malha juntamente com as coordenadas dos nós e o arquivo de conectividade, que dá informação dos nós pertencentes a cada elemento. Neste trabalho foi feita a simulação para o sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido variando de 2% até 98%, incluindo os casos em que o tubo estava cheio de ar e depois cheio de água. A Tabela I.1 traz, para uma seção de tubo dividido em 8 setores, os elementos pertencentes às suas respectivas camadas e a Tabela I.2 traz os nós pertencentes às suas respectivas linhas.

Tabela I.1 – Elementos de cada camada e de cada setor.

| Camada | Setor 1 | Setor 2 | Setor 3 | Setor 4 |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1 | 197 | 393 | 589 |
| 2 | 2 – 4 | 198 – 200 | 394 – 396 | 590 – 592 |
| 3 | 5 – 9 | 201 – 205 | 397 – 401 | 593 – 597 |
| 4 | 10 – 16 | 206 – 212 | 402 – 408 | 598 – 604 |
| 5 | 17 – 25 | 213 – 221 | 409 – 417 | 605 – 613 |
| 6 | 26 – 36 | 222 – 232 | 418 – 428 | 614 – 624 |
| 7 | 37 – 49 | 233 – 245 | 429 – 441 | 625 – 637 |
| 8 | 50 – 64 | 246 – 260 | 442 – 456 | 638 – 652 |
| 9 | 65 – 81 | 261 – 277 | 457 – 473 | 653 – 669 |
| 10 | 82 – 100 | 278 – 296 | 474 – 492 | 670 – 688 |
| 11 | 101 – 121 | 297 – 317 | 493 – 513 | 689 – 709 |
| 12 | 122 – 144 | 318 – 340 | 514 – 536 | 710 – 732 |
| 13 | 145 – 169 | 341 – 365 | 537 – 561 | 733 – 757 |
| 14 | 170 – 196 | 366 – 392 | 562 – 588 | 758 – 784 |

continuação da Tabela I.1.

| Camada | Setor 5 | Setor 6 | Setor 7 | Setor 8 |
|--------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 785 | 981 | 1177 | 1373 |
| 2 | 786 – 788 | 982 – 984 | 1178 – 1180 | 1374 – 1376 |
| 3 | 789 – 793 | 985 – 989 | 1181 – 1185 | 1377 – 1381 |
| 4 | 794 – 800 | 990 – 996 | 1186 – 1192 | 1382 – 1388 |
| 5 | 801 – 809 | 997 – 1005 | 1193 – 1201 | 1389 – 1397 |
| 6 | 810 – 820 | 1006 – 1016 | 1202 – 1212 | 1398 – 1408 |
| 7 | 821 – 833 | 1017 – 1029 | 1213 – 1225 | 1409 – 421 |
| 8 | 834 – 848 | 1030 – 1044 | 1226 – 1240 | 1422 – 1436 |
| 9 | 849 – 865 | 1045 – 1061 | 1241 – 1257 | 1437 – 1453 |
| 10 | 866 – 884 | 1062 – 1080 | 1258 – 1276 | 1454 – 1472 |
| 11 | 885 – 905 | 1081 – 1101 | 1277 – 1297 | 1473 – 1493 |
| 12 | 906 – 928 | 1102 – 1124 | 1298 – 1320 | 1494 – 1516 |
| 13 | 929 – 953 | 1125 – 1149 | 1321 – 1345 | 1517 – 1541 |
| 14 | 954 – 980 | 1150 – 1176 | 1346 – 1372 | 1542 – 1568 |

Tabela I.2 – Nós de cada linha e de cada setor.

| Linha | Setor 1 | Setor 2 | Setor 3 | Setor 4 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 2 e 3 | 3 e 121 | 121 e 226 | 226 e 331 |
| 2 | 4 – 6 | 6, 122 e 123 | 123, 227 e 228 | 228, 332 e 333 |
| 3 | 7 – 10 | 10, 124 – 126 | 126, 229 – 231 | 231, 334 – 336 |
| 4 | 11 – 15 | 15, 127 – 130 | 130, 232 – 235 | 235, 337 – 340 |
| 5 | 16 – 21 | 21, 131 – 135 | 135, 236 – 240 | 240, 341 – 345 |
| 6 | 22 – 28 | 28, 136 – 141 | 141, 241 – 246 | 246, 346 – 351 |
| 7 | 29 – 36 | 36, 142 – 148 | 148, 247 – 253 | 253, 352 – 358 |
| 8 | 37 – 45 | 45, 149 – 156 | 156, 254 – 261 | 261, 359 – 366 |
| 9 | 46 – 55 | 55, 157 – 165 | 165, 262 – 270 | 270, 367 – 375 |
| 10 | 56 – 66 | 66, 166 – 175 | 175, 271 – 280 | 280, 376 – 385 |
| 11 | 67 – 78 | 78, 176 – 186 | 186, 281 – 291 | 291, 386 – 396 |
| 12 | 79 – 91 | 91, 187 – 198 | 198, 292 – 303 | 303, 397 – 408 |
| 13 | 92 – 105 | 105, 199 – 211 | 211, 304 – 316 | 316, 409 – 421 |
| 14 | 106 – 120 | 120, 212 – 225 | 225, 317 – 330 | 330, 422 – 435 |

continuação da Tabela I.2.

| Linha | Setor 5 | Setor 6 | Setor 7 | Setor 8 |
|-------|----------------|----------------|----------------|---------------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 331 e 436 | 436 e 541 | 541 e 646 | 646 e 2 |
| 2 | 333, 437 e 438 | 438, 542 e 543 | 543, 647 e 648 | 648, 751 e 4 |
| 3 | 336, 439 – 441 | 441, 544 – 546 | 546, 649 – 651 | 651, 752, 753 e 7 |
| 4 | 340, 442 – 445 | 445, 547 – 550 | 550, 652 – 655 | 655, 754 – 756, 11 |
| 5 | 345, 446 – 450 | 450, 551 – 555 | 555, 656 – 660 | 660, 757 – 760, 16 |
| 6 | 351, 451 – 456 | 456, 556 – 561 | 561, 661 – 666 | 666, 761 – 765, 22 |
| 7 | 358, 457 – 463 | 463, 562 – 568 | 568, 667 – 673 | 673, 766 – 771, 29 |
| 8 | 366, 464 – 471 | 471, 569 – 576 | 576, 674 – 681 | 681, 772 – 778, 37 |
| 9 | 375, 472 – 480 | 480, 577 – 585 | 585, 682 – 690 | 690, 779 – 786, 46 |
| 10 | 385, 481 – 490 | 490, 586 – 595 | 595, 691 – 700 | 700, 787 – 795, 56 |
| 11 | 396, 491 – 501 | 501, 596 – 606 | 606, 701 – 711 | 711, 796 – 805, 67 |
| 12 | 408, 502 – 513 | 513, 607 – 618 | 618, 712 – 723 | 723, 806 – 816, 79 |
| 13 | 421, 514 – 526 | 526, 619 – 631 | 631, 724 – 736 | 736, 817 – 828, 92 |
| 14 | 435, 527 – 540 | 540, 632 – 645 | 645, 737 – 750 | 750, 829 – 841, 106 |

Este é o arquivo MALHA1.PRE que gera a malha, no qual solicita os arquivos COORD1.DAT e CONET1.DAT.

```

/filman,malha1
/units,si
/prep7
et,1,plane35
mp,kxx,1,1
mp,kxx,2,80
mp,kxx,3,3
/input,coord1,dat
/input,conet1,dat
csys,1
ngen,8,120,1,120,1,,45
egen,8,120,1,196,1
nrotat,all
nummrg,node
numcomp,all
fini

```

O comando *prep7* é um pré-processador geral para definir os tipos de elementos

O comando *csys,1* significa que a malha será gerada em coordenadas cilíndricas, apesar das coordenadas estarem no sistema cartesiano.

O comando *ngen,8,120,1,120,1,,45* gera os nós para os outros setores, sendo que o número 8 representa o número de setores; o número 120 representa o número total de nós no primeiro setor e o número 45 é o ângulo do setor.

O comando *egen,8,120,1,196,1* gera os elementos para os outros setores, sendo que o número 8 representa o número de setores; o número 120 representa o número total de nós no primeiro setor e o número 196 representa o número total de elementos no primeiro setor.

O arquivo COORD1.DAT é:

| | | | | | | |
|---|---|----|---|------------------|---|------------------|
| N | , | 1 | , | .000000000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 2 | , | .002635000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 3 | , | .00186322636843 | , | .00186322636843 |
| N | , | 4 | , | .005270000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 5 | , | .00486884513633 | , | .00201674168856 |
| N | , | 6 | , | .00372645273685 | , | .00372645273685 |
| N | , | 7 | , | .007905000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 8 | , | .00763564365682 | , | .00204596455154 |
| N | , | 9 | , | .00684593081692 | , | .003952500000000 |
| N | , | 10 | , | .00558967910528 | , | .00558967910528 |
| N | , | 11 | , | .010540000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 12 | , | .01033747685545 | , | .00205625199405 |
| N | , | 13 | , | .00973769027267 | , | .00403348337713 |
| N | , | 14 | , | .00876368971367 | , | .00585571025603 |
| N | , | 15 | , | .00745290547371 | , | .00745290547371 |
| N | , | 16 | , | .013175000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 17 | , | .01301279388734 | , | .00206102407691 |
| N | , | 18 | , | .01253016960219 | , | .00407129890089 |
| N | , | 19 | , | .01173901095618 | , | .00598132483407 |
| N | , | 20 | , | .01065879890089 | , | .00774407069895 |
| N | , | 21 | , | .00931613184213 | , | .00931613184213 |
| N | , | 22 | , | .015810000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 23 | , | .01567474325832 | , | .00206361909900 |
| N | , | 24 | , | .01527128731363 | , | .00409192910307 |
| N | , | 25 | , | .01460653540900 | , | .00605022506569 |
| N | , | 26 | , | .01369186163383 | , | .007905000000000 |
| N | , | 27 | , | .01254291631000 | , | .00962451819263 |
| N | , | 28 | , | .01117935821056 | , | .01117935821056 |
| N | , | 29 | , | .018445000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 30 | , | .01832902171148 | , | .00206518476173 |
| N | , | 31 | , | .01798254534019 | , | .00410439862682 |
| N | , | 32 | , | .01740992802754 | , | .00609199729776 |
| N | , | 33 | , | .01661837076846 | , | .00800298556802 |
| N | , | 34 | , | .01561782785477 | , | .00981333165133 |
| N | , | 35 | , | .01442088169412 | , | .01150026939528 |
| N | , | 36 | , | .01304258457899 | , | .01304258457899 |
| N | , | 37 | , | .021080000000000 | , | .000000000000000 |
| N | , | 38 | , | .02097849403825 | , | .00206620131815 |
| N | , | 39 | , | .02067495371090 | , | .00411250398810 |

| | | | | | | |
|---|---|-----|---|-----------------|---|-----------------|
| N | , | 40 | , | .02017230227723 | , | .00611920099652 |
| N | , | 41 | , | .01947538054534 | , | .00806696675426 |
| N | , | 42 | , | .01859090025246 | , | .00993704321229 |
| N | , | 43 | , | .01752737942734 | , | .01171142051205 |
| N | , | 44 | , | .01629506035689 | , | .01337301043017 |
| N | , | 45 | , | .01490581094741 | , | .01490581094741 |
| N | , | 46 | , | .02371500000000 | , | .00000000000000 |
| N | , | 47 | , | .02362475726525 | , | .00206689843926 |
| N | , | 48 | , | .02335471586268 | , | .00411806653337 |
| N | , | 49 | , | .02290693097045 | , | .00613789365461 |
| N | , | 50 | , | .02228481050194 | , | .00811100769897 |
| N | , | 51 | , | .02149308916957 | , | .01002239207718 |
| N | , | 52 | , | .02053779245075 | , | .01185750000000 |
| N | , | 53 | , | .01942619073031 | , | .01360236518807 |
| N | , | 54 | , | .01816674396857 | , | .01524370816372 |
| N | , | 55 | , | .01676903731584 | , | .01676903731584 |
| N | , | 56 | , | .02635000000000 | , | .00000000000000 |
| N | , | 57 | , | .02626877174387 | , | .00206739717243 |
| N | , | 58 | , | .02602558777468 | , | .00412204815381 |
| N | , | 59 | , | .02562194740248 | , | .00615128533760 |
| N | , | 60 | , | .02506033920438 | , | .00814259780178 |
| N | , | 61 | , | .02434422568167 | , | .01008370844282 |
| N | , | 62 | , | .02347802191236 | , | .01196264966814 |
| N | , | 63 | , | .02246706833073 | , | .01376783718027 |
| N | , | 64 | , | .02131759780178 | , | .01548814139791 |
| N | , | 65 | , | .02003669719356 | , | .01711295607350 |
| N | , | 66 | , | .01863226368427 | , | .01863226368427 |
| N | , | 67 | , | .02817500000000 | , | .00000000000000 |
| N | , | 68 | , | .02810321332914 | , | .00200998148664 |
| N | , | 69 | , | .02788821912500 | , | .00400972056835 |
| N | , | 70 | , | .02753111294874 | , | .00598902703316 |
| N | , | 71 | , | .02703371453159 | , | .00793781478901 |
| N | , | 72 | , | .02639855850187 | , | .00984615326020 |
| N | , | 73 | , | .02562888146911 | , | .01170431799133 |
| N | , | 74 | , | .02472860553106 | , | .01350284020084 |
| N | , | 75 | , | .02370231828752 | , | .01523255503181 |
| N | , | 76 | , | .02255524946304 | , | .01688464825396 |
| N | , | 77 | , | .02129324425743 | , | .01845070117891 |
| N | , | 78 | , | .01992273355993 | , | .01992273355993 |
| N | , | 79 | , | .03000000000000 | , | .00000000000000 |
| N | , | 80 | , | .02993576769716 | , | .00196209387690 |
| N | , | 81 | , | .02974334584121 | , | .00391578576660 |
| N | , | 82 | , | .02942355841210 | , | .00585270966048 |
| N | , | 83 | , | .02897777478867 | , | .00776457135308 |
| N | , | 84 | , | .02840790388485 | , | .00964318395909 |
| N | , | 85 | , | .02771638597534 | , | .01148050297095 |
| N | , | 86 | , | .02690618224598 | , | .01326866070657 |
| N | , | 87 | , | .02598076211353 | , | .01500000000000 |
| N | , | 88 | , | .02494408836908 | , | .01666710699059 |
| N | , | 89 | , | .02380060020874 | , | .01826284287026 |
| N | , | 90 | , | .02255519422437 | , | .01978037445300 |
| N | , | 91 | , | .02121320343560 | , | .02121320343560 |
| N | , | 92 | , | .03750000000000 | , | .00000000000000 |
| N | , | 93 | , | .03743158328337 | , | .00226419365334 |
| N | , | 94 | , | .03722658277868 | , | .00452012550957 |
| N | , | 95 | , | .03688574651052 | , | .00675956391802 |
| N | , | 96 | , | .03641031815348 | , | .00897433741078 |
| N | , | 97 | , | .03580203249407 | , | .01115636451957 |
| N | , | 98 | , | .03506310910070 | , | .01329768326410 |
| N | , | 99 | , | .03419624422470 | , | .01539048020448 |
| N | , | 100 | , | .03320460096200 | , | .01742711895164 |

| | | | | | | |
|---|---|-----|---|-----------------|---|-----------------|
| N | , | 101 | , | .03209179771130 | , | .01940016803166 |
| N | , | 102 | , | .03086189497101 | , | .02130242800242 |
| N | , | 103 | , | .02951938052284 | , | .02312695772357 |
| N | , | 104 | , | .02806915305642 | , | .02486709968403 |
| N | , | 105 | , | .02651650429450 | , | .02651650429450 |
| N | , | 106 | , | .04500000000000 | , | .00000000000000 |
| N | , | 107 | , | .04492920667580 | , | .00252317012567 |
| N | , | 108 | , | .04471704944520 | , | .00503840142465 |
| N | , | 109 | , | .04436419583332 | , | .00753778004871 |
| N | , | 110 | , | .04387175604818 | , | .01001344202803 |
| N | , | 111 | , | .04324127948753 | , | .01245759801412 |
| N | , | 112 | , | .04247474986388 | , | .01486255778798 |
| N | , | 113 | , | .04157457896301 | , | .01722075445643 |
| N | , | 114 | , | .04054359905561 | , | .01952476826029 |
| N | , | 115 | , | .03938505398589 | , | .02176734991974 |
| N | , | 116 | , | .03810258896527 | , | .02394144344319 |
| N | , | 117 | , | .03670023910317 | , | .02604020832809 |
| N | , | 118 | , | .03518241671106 | , | .02805704108364 |
| N | , | 119 | , | .03355389741974 | , | .02998559600784 |
| N | , | 120 | , | .03181980515339 | , | .03181980515339 |

O arquivo CONET1.DAT é:

mat, 1

| | | | | | | |
|---|---|----|---|----|---|----|
| E | , | 1 | , | 2 | , | 3 |
| E | , | 2 | , | 4 | , | 5 |
| E | , | 2 | , | 5 | , | 3 |
| E | , | 3 | , | 5 | , | 6 |
| E | , | 4 | , | 7 | , | 8 |
| E | , | 4 | , | 8 | , | 5 |
| E | , | 5 | , | 8 | , | 9 |
| E | , | 5 | , | 9 | , | 6 |
| E | , | 6 | , | 9 | , | 10 |
| E | , | 7 | , | 11 | , | 12 |
| E | , | 7 | , | 12 | , | 8 |
| E | , | 8 | , | 12 | , | 13 |
| E | , | 8 | , | 13 | , | 9 |
| E | , | 9 | , | 13 | , | 14 |
| E | , | 9 | , | 14 | , | 10 |
| E | , | 10 | , | 14 | , | 15 |
| E | , | 11 | , | 16 | , | 17 |
| E | , | 11 | , | 17 | , | 12 |
| E | , | 12 | , | 17 | , | 18 |
| E | , | 12 | , | 18 | , | 13 |
| E | , | 13 | , | 18 | , | 19 |
| E | , | 13 | , | 19 | , | 14 |
| E | , | 14 | , | 19 | , | 20 |
| E | , | 14 | , | 20 | , | 15 |
| E | , | 15 | , | 20 | , | 21 |
| E | , | 16 | , | 22 | , | 23 |
| E | , | 16 | , | 23 | , | 17 |
| E | , | 17 | , | 23 | , | 24 |
| E | , | 17 | , | 24 | , | 18 |
| E | , | 18 | , | 24 | , | 25 |
| E | , | 18 | , | 25 | , | 19 |

| | | | | | | |
|---|---|----|---|----|---|----|
| E | , | 19 | , | 25 | , | 26 |
| E | , | 19 | , | 26 | , | 20 |
| E | , | 20 | , | 26 | , | 27 |
| E | , | 20 | , | 27 | , | 21 |
| E | , | 21 | , | 27 | , | 28 |
| E | , | 22 | , | 29 | , | 30 |
| E | , | 22 | , | 30 | , | 23 |
| E | , | 23 | , | 30 | , | 31 |
| E | , | 23 | , | 31 | , | 24 |
| E | , | 24 | , | 31 | , | 32 |
| E | , | 24 | , | 32 | , | 25 |
| E | , | 25 | , | 32 | , | 33 |
| E | , | 25 | , | 33 | , | 26 |
| E | , | 26 | , | 33 | , | 34 |
| E | , | 26 | , | 34 | , | 27 |
| E | , | 27 | , | 34 | , | 35 |
| E | , | 27 | , | 35 | , | 28 |
| E | , | 28 | , | 35 | , | 36 |
| E | , | 29 | , | 37 | , | 38 |
| E | , | 29 | , | 38 | , | 30 |
| E | , | 30 | , | 38 | , | 39 |
| E | , | 30 | , | 39 | , | 31 |
| E | , | 31 | , | 39 | , | 40 |
| E | , | 31 | , | 40 | , | 32 |
| E | , | 32 | , | 40 | , | 41 |
| E | , | 32 | , | 41 | , | 33 |
| E | , | 33 | , | 41 | , | 42 |
| E | , | 33 | , | 42 | , | 34 |
| E | , | 34 | , | 42 | , | 43 |
| E | , | 34 | , | 43 | , | 35 |
| E | , | 35 | , | 43 | , | 44 |
| E | , | 35 | , | 44 | , | 36 |
| E | , | 36 | , | 44 | , | 45 |
| E | , | 37 | , | 46 | , | 47 |
| E | , | 37 | , | 47 | , | 38 |
| E | , | 38 | , | 47 | , | 48 |
| E | , | 38 | , | 48 | , | 39 |
| E | , | 39 | , | 48 | , | 49 |
| E | , | 39 | , | 49 | , | 40 |
| E | , | 40 | , | 49 | , | 50 |
| E | , | 40 | , | 50 | , | 41 |
| E | , | 41 | , | 50 | , | 51 |
| E | , | 41 | , | 51 | , | 42 |
| E | , | 42 | , | 51 | , | 52 |
| E | , | 42 | , | 52 | , | 43 |
| E | , | 43 | , | 52 | , | 53 |
| E | , | 43 | , | 53 | , | 44 |
| E | , | 44 | , | 53 | , | 54 |
| E | , | 44 | , | 54 | , | 45 |
| E | , | 45 | , | 54 | , | 55 |
| E | , | 46 | , | 56 | , | 57 |
| E | , | 46 | , | 57 | , | 47 |
| E | , | 47 | , | 57 | , | 58 |
| E | , | 47 | , | 58 | , | 48 |
| E | , | 48 | , | 58 | , | 59 |
| E | , | 48 | , | 59 | , | 49 |
| E | , | 49 | , | 59 | , | 60 |
| E | , | 49 | , | 60 | , | 50 |
| E | , | 50 | , | 60 | , | 61 |
| E | , | 50 | , | 61 | , | 51 |
| E | , | 51 | , | 61 | , | 62 |

| | | | | | | | |
|--------|---|---|----|---|----|---|----|
| | E | , | 51 | , | 62 | , | 52 |
| | E | , | 52 | , | 62 | , | 63 |
| | E | , | 52 | , | 63 | , | 53 |
| | E | , | 53 | , | 63 | , | 64 |
| | E | , | 53 | , | 64 | , | 54 |
| | E | , | 54 | , | 64 | , | 65 |
| | E | , | 54 | , | 65 | , | 55 |
| | E | , | 55 | , | 65 | , | 66 |
| mat, 3 | | | | | | | |
| | E | , | 56 | , | 67 | , | 68 |
| | E | , | 56 | , | 68 | , | 57 |
| | E | , | 57 | , | 68 | , | 69 |
| | E | , | 57 | , | 69 | , | 58 |
| | E | , | 58 | , | 69 | , | 70 |
| | E | , | 58 | , | 70 | , | 59 |
| | E | , | 59 | , | 70 | , | 71 |
| | E | , | 59 | , | 71 | , | 60 |
| | E | , | 60 | , | 71 | , | 72 |
| | E | , | 60 | , | 72 | , | 61 |
| | E | , | 61 | , | 72 | , | 73 |
| | E | , | 61 | , | 73 | , | 62 |
| | E | , | 62 | , | 73 | , | 74 |
| | E | , | 62 | , | 74 | , | 63 |
| | E | , | 63 | , | 74 | , | 75 |
| | E | , | 63 | , | 75 | , | 64 |
| | E | , | 64 | , | 75 | , | 76 |
| | E | , | 64 | , | 76 | , | 65 |
| | E | , | 65 | , | 76 | , | 77 |
| | E | , | 65 | , | 77 | , | 66 |
| | E | , | 66 | , | 77 | , | 78 |
| | E | , | 67 | , | 79 | , | 80 |
| | E | , | 67 | , | 80 | , | 68 |
| | E | , | 68 | , | 80 | , | 81 |
| | E | , | 68 | , | 81 | , | 69 |
| | E | , | 69 | , | 81 | , | 82 |
| | E | , | 69 | , | 82 | , | 70 |
| | E | , | 70 | , | 82 | , | 83 |
| | E | , | 70 | , | 83 | , | 71 |
| | E | , | 71 | , | 83 | , | 84 |
| | E | , | 71 | , | 84 | , | 72 |
| | E | , | 72 | , | 84 | , | 85 |
| | E | , | 72 | , | 85 | , | 73 |
| | E | , | 73 | , | 85 | , | 86 |
| | E | , | 73 | , | 86 | , | 74 |
| | E | , | 74 | , | 86 | , | 87 |
| | E | , | 74 | , | 87 | , | 75 |
| | E | , | 75 | , | 87 | , | 88 |
| | E | , | 75 | , | 88 | , | 76 |
| | E | , | 76 | , | 88 | , | 89 |
| | E | , | 76 | , | 89 | , | 77 |
| | E | , | 77 | , | 89 | , | 90 |
| | E | , | 77 | , | 90 | , | 78 |
| | E | , | 78 | , | 90 | , | 91 |
| mat, 1 | | | | | | | |
| | E | , | 79 | , | 92 | , | 93 |
| | E | , | 79 | , | 93 | , | 80 |
| | E | , | 80 | , | 93 | , | 94 |
| | E | , | 80 | , | 94 | , | 81 |
| | E | , | 81 | , | 94 | , | 95 |
| | E | , | 81 | , | 95 | , | 82 |
| | E | , | 82 | , | 95 | , | 96 |

| | | | | | | |
|---|---|-----|---|-----|---|-----|
| E | , | 82 | , | 96 | , | 83 |
| E | , | 83 | , | 96 | , | 97 |
| E | , | 83 | , | 97 | , | 84 |
| E | , | 84 | , | 97 | , | 98 |
| E | , | 84 | , | 98 | , | 85 |
| E | , | 85 | , | 98 | , | 99 |
| E | , | 85 | , | 99 | , | 86 |
| E | , | 86 | , | 99 | , | 100 |
| E | , | 86 | , | 100 | , | 87 |
| E | , | 87 | , | 100 | , | 101 |
| E | , | 87 | , | 101 | , | 88 |
| E | , | 88 | , | 101 | , | 102 |
| E | , | 88 | , | 102 | , | 89 |
| E | , | 89 | , | 102 | , | 103 |
| E | , | 89 | , | 103 | , | 90 |
| E | , | 90 | , | 103 | , | 104 |
| E | , | 90 | , | 104 | , | 91 |
| E | , | 91 | , | 104 | , | 105 |
| E | , | 92 | , | 106 | , | 107 |
| E | , | 92 | , | 107 | , | 93 |
| E | , | 93 | , | 107 | , | 108 |
| E | , | 93 | , | 108 | , | 94 |
| E | , | 94 | , | 108 | , | 109 |
| E | , | 94 | , | 109 | , | 95 |
| E | , | 95 | , | 109 | , | 110 |
| E | , | 95 | , | 110 | , | 96 |
| E | , | 96 | , | 110 | , | 111 |
| E | , | 96 | , | 111 | , | 97 |
| E | , | 97 | , | 111 | , | 112 |
| E | , | 97 | , | 112 | , | 98 |
| E | , | 98 | , | 112 | , | 113 |
| E | , | 98 | , | 113 | , | 99 |
| E | , | 99 | , | 113 | , | 114 |
| E | , | 99 | , | 114 | , | 100 |
| E | , | 100 | , | 114 | , | 115 |
| E | , | 100 | , | 115 | , | 101 |
| E | , | 101 | , | 115 | , | 116 |
| E | , | 101 | , | 116 | , | 102 |
| E | , | 102 | , | 116 | , | 117 |
| E | , | 102 | , | 117 | , | 103 |
| E | , | 103 | , | 117 | , | 118 |
| E | , | 103 | , | 118 | , | 104 |
| E | , | 104 | , | 118 | , | 119 |
| E | , | 104 | , | 119 | , | 105 |
| E | , | 105 | , | 119 | , | 120 |

A Tabela I.3 traz, para um sensor com 8 eletrodos, os elementos e os nós pertencentes aos seus respectivos eletrodos.

Tabela I.3 – Elementos e nós pertencentes aos seus respectivos eletrodos, para um sensor com 8 eletrodos.

| Eletrodo | Nós | Elementos Adjacentes Internamente ao Eletrodo | Elementos Adjacentes Externamente ao Eletrodo |
|----------|---------------|---|---|
| 1 | 80 – 91 | 124 – 144 | 148 – 168 |
| 2 | 187 – 198 | 320 – 340 | 344 – 364 |
| 3 | 292 – 303 | 516 – 536 | 540 – 560 |
| 4 | 397 – 408 | 712 – 732 | 736 – 756 |
| 5 | 502 – 513 | 908 – 928 | 932 – 952 |
| 6 | 607 – 618 | 1104 – 1124 | 1128 – 1148 |
| 7 | 712 – 723 | 1300 – 1320 | 1324 – 1344 |
| 8 | 806 – 816, 79 | 1496 – 1516 | 1520 – 1540 |

Nos nós são impostas as condições de contorno e nos elementos adjacentes ao eletrodo, tanto internamente como externamente, são calculados os fluxos dos potenciais elétricos, sendo isto feito no centróide do elemento e na direção radial.

A Tabela I.4 traz, para um sensor com 8 eletrodos, os nós da blindagem, onde é imposta a condição de potencial elétrico igual a zero.

Tabela I.4 – Nós da blindagem para cada setor, onde $V_{\text{blind}} = 0$.

| Setor | Nós |
|-------|-----------|
| 1 | 106 – 120 |
| 2 | 212 – 225 |
| 3 | 317 – 330 |
| 4 | 422 – 435 |
| 5 | 527 – 540 |
| 6 | 632 – 645 |
| 7 | 737 – 750 |
| 8 | 829 – 841 |

Anexo II

Programas com Eletrodos Flutuantes

Este Anexo traz alguns arquivos de entrada para serem executados no ANSYS, bem como algumas explicações de alguns comandos utilizados.

O arquivo GAS12.SOL é o arquivo que simula o caso do tubo cheio de ar e com blindagem, calculando a soma do produto do fluxo do potencial elétrico pela permissividade relativa do par de eletrodos 1-2. Neste caso, o eletrodo emissor é o 1 e o eletrodo receptor é o 2.

```
/solu
d, 80,temp,1,, 91
d,187,temp,0,,198

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,,2
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,gas12,dat
*status,capgas
```

```
/output  
fini
```

O comando *solu* obtém a solução. O comando *solve* resolve as equações simultâneas, que são geradas pelo método dos elementos finitos. Os resultados da solução são: (a) valores nos pontos nodais, no qual formam a solução primária e (b) os valores derivados, no qual formam a solução dos elementos, que é geralmente calculada nos pontos de integração dos nós.

O comando *solve* não constrói a matriz global, mas resolve as matrizes dos elementos individualmente e lê o grau de liberdade para um elemento. O programa elimina qualquer grau de liberdade que possa ser expresso em função dos outros graus de liberdade, sendo que esse processo se repete para todos os elementos até que todos os graus de liberdade tenham sido eliminados e a matriz triangularizada do lado esquerdo esteja pronta.

O programa calcula a solução nos pontos nodais através da substituição para trás e usa as matrizes dos elementos individuais para calcular a solução dos elementos.

O comando *post1* é pós-processador geral que mostra os resultados do modelo inteiro ou de parte selecionada.

O comando *rsys,1* indica que o sistema de coordenadas é cilíndrico.

O comando *esel,s,elem,320,340,2* seleciona um conjunto de elementos após a resolução, sendo que neste caso, os elementos selecionados vão do elemento 320 ao elemento 340 variando de 2 em 2 elementos.

O comando *etable,cxy,tf,x* preenche uma tabela com os valores calculados, onde *cxy* é o rótulo dado ao que se deseja calcular, *tf* é o componente do fluxo térmico ou o vetor soma, neste caso o fluxo do potencial elétrico e *x* é a componente na direção radial, se estivesse em coordenadas cartesianas, seria a componente na direção *x*.

O comando *ssum* faz a soma dos valores calculados, dos elementos selecionados.

O comando *output,gas12,dat* é o comando que direciona o resultado (fluxo do potencial elétrico) num arquivo de saída de nome GAS12.DAT.

O comando *esel,s,elem,320,340,2* seleciona os elementos adjacentes ao eletrodo 2, na parte interna e o comando *esel,s,elem,344,364,2* seleciona os elementos adjacentes ao eletrodo 2, na parte externa.

O comando *d,80,temp,1,,91* é o comando que impõe a condição de contorno no primeiro eletrodo (emissor) com potencial elétrico igual a 1 e o comando *d,187,temp,0,,198* é o comando que impõe a condição de contorno no segundo eletrodo (receptor) com potencial elétrico igual a 0.

Os seguintes comandos:

d,106,temp,0,,120

d,212,temp,0,,225

d,317,temp,0,,330

d,422,temp,0,,435

d,527,temp,0,,540

d,632,temp,0,,645

d,737,temp,0,,750

d,829,temp,0,,841

impõem a condição de contorno na blindagem com potencial elétrico igual a 0.

Para gerar os resultados, os seguintes comandos devem ser fornecidos no ANSYS, trabalhando-se no modo interativo:

/input,malha1,pre

/input,g12,sol

/exit

Após o final de cada linha de comando aperta-se a tecla *enter*, lembrando que no ANSYS, o ponto é substituído por vírgula, por exemplo: *gas12,sol*.

O arquivo GAS15.SOL é análogo ao arquivo GAS12.SOL, só que neste caso é para o par de eletrodos 1-5. Neste caso, o eletrodo emissor é o 1 e o eletrodo receptor é o 5.

```
/solu
d, 80,temp,1,, 91
d,502,temp,0,, 513

d,106,temp,0,, 120
d,212,temp,0,, 225
d,317,temp,0,, 330
d,422,temp,0,, 435
d,527,temp,0,, 540
d,632,temp,0,, 645
d,737,temp,0,, 750
d,829,temp,0,, 841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,, 2
rsys,1
esel,s,elem,, 908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,, item,cxy
esel,s,elem,, 932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,, item,cxy
esel,all
/output,gas15,dat
*status,capgas
/output
fini
```

O arquivo LIQ12.SOL é o arquivo que simula o caso do tubo cheio de ar e com blindagem, calculando a soma do produto do fluxo do potencial elétrico pela permissividade relativa do par de eletrodos 1-2. Neste caso, o eletrodo emissor é o 1 e o eletrodo receptor é o 2.

```
/prep7
*do, conta, 1, 100
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 197, 296
emodif, conta, mat, 2
*enddo
```

```

*do,conta,393,492
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,589,688
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini

/solu
d,80,temp,1,,91
d,187,temp,0,,198

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,,8
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,liq12,dat
*status,capgas
/output
fini

```

O comando *emodif* modifica a permissividade relativa dos materiais, neste caso de ar para água.

O arquivo LIQ15.SOL é análogo ao arquivo LIQ12.SOL, só que neste caso é para o par de eletrodos 1-5. Neste caso, o eletrodo emissor é o 1 e o eletrodo receptor é o 5.

```
/prep7
*do, conta, 1, 100
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 197, 296
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 393, 492
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 589, 688
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 785, 884
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 981, 1080
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 1177, 1276
emodif, conta, mat, 2
*enddo
*do, conta, 1373, 1472
emodif, conta, mat, 2
*enddo
fini

/solu
d, 80, temp, 1, , 91
d, 502, temp, 0, , 513

d, 106, temp, 0, , 120
d, 212, temp, 0, , 225
d, 317, temp, 0, , 330
d, 422, temp, 0, , 435
d, 527, temp, 0, , 540
d, 632, temp, 0, , 645
d, 737, temp, 0, , 750
d, 829, temp, 0, , 841

solve
fini

/post1
*dim, capgas, , 8
rsys, 1
esel, s, elem, , 908, 928, 2
etable, cxy, tf, x
ssum
*get, capgas(1), ssum, , item, cxy
esel, s, elem, , 932, 952, 2
etable, cxy, tf, x
ssum
*get, capgas(2), ssum, , item, cxy
esel, all
```

```

/output,liq15,dat
*status,capgas
/output
fini

```

Os próximos 3 arquivos simulam um sistema bifásico do tipo estratificado com fração de líquido de 50%, para os pares de eletrodos 1-2, 2-3 e 7-8.

O arquivo E5012.SOL é o arquivo que simula um sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido de 50% e com blindagem, para o par de eletrodos 1-2.

```

/prep7
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini

/solu
d,80,temp,1,,91
d,187,temp,0,,198

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,,8
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,all

```

```
/output,e5012,dat
*status,capgas
/output
fini
```

O arquivo E5023.SOL é o arquivo que simula o sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido de 50% e com blindagem, para o par de eletrodos 2-3.

```
/prep7
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini

/solu
d,187,temp,1,,198
d,292,temp,0,,303

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,,8
rsys,1
esel,s,elem,,516,536,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,540,560,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,e5023,dat
*status,capgas
/output
fini
```

O arquivo E5078.SOL é o arquivo que simula o sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido de 50% e com blindagem, para o par de eletrodos 7-8.

```
/prep7
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini

/solu
d,79,temp,0
d,712,temp,1,,723

d,806,temp,0,,816
d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,,8
rsys,1
esel,s,elem,,1496,1516,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1520,1540,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,e5078,dot
*status,capgas
/output
fini
```

As linhas de comando, para executar os arquivos de entrada no ANSYS, são análogas as usadas para o arquivo GAS12.SOL, por exemplo para este último arquivo, E5078.SOL, tem-se as seguintes linhas de comando:

```
/input,malhal,pre
```

```
/input,e5078,sol
```

```
/exit
```

Anexo III

Programas com Eletrodos Aterrados

Este Anexo traz alguns arquivos de entrada para serem executados no ANSYS, para o caso de eletrodos aterrados.

O arquivo GAS.SOL é o arquivo que simula o caso com o tubo cheio de ar e com blindagem. Neste caso o eletrodo emissor é o eletrodo 1 e todos os outros eletrodos (2 a 8) estão a um potencial zero.

```
/solu
d, 79,temp,0
d, 80,temp,1,, 91
d,187,temp,0,, 198
d,292,temp,0,, 303
d,397,temp,0,, 408
d,502,temp,0,, 513
d,607,temp,0,, 618
d,712,temp,0,, 723
d,806,temp,0,, 816

d,106,temp,0,, 120
d,212,temp,0,, 225
d,317,temp,0,, 330
d,422,temp,0,, 435
d,527,temp,0,, 540
d,632,temp,0,, 645
d,737,temp,0,, 750
d,829,temp,0,, 841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,, 8
rsys,1
esel,s,elem,, 320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
```

```

*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,516,536,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,712,732,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(3),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(5),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,540,560,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(6),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,736,756,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(7),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(8),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,gas,dat
*status,capgas
/output
fini

```

O arquivo LIQ.SOL é o arquivo que simula o caso com o tubo cheio de água e com blindagem. Neste caso o eletrodo emissor é o eletrodo 1 e todos os outros eletrodos (2 a 8) estão a um potencial zero.

```

/prep7
*do,conta,1,100
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,197,296
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,393,492
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,589,688
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2

```

```

*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini
/solu

d, 79,temp,0
d, 80,temp,1,, 91
d,187,temp,0,,198
d,292,temp,0,,303
d,397,temp,0,,408
d,502,temp,0,,513
d,607,temp,0,,618
d,712,temp,0,,723
d,806,temp,0,,816

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini

/post1
*dim,capgas,,8
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,516,536,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,712,732,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(3),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(5),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,540,560,2
etable,cxy,tf,x
ssum

```

```

*get,capgas (6),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,736,756,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas (7),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas (8),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,liq,dat
*status,capgas
/output
fini

```

Os próximos 2 arquivos simulam um sistema bifásico do tipo estratificado com fração de líquido de 50%, para os eletrodos emissores 1 e 8, respectivamente.

O arquivo E50A.SOL é o arquivo que simula o sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido de 50% e com blindagem para o eletrodo emissor 1.

```

/prep7
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini

```

```

/solu

```

```

d,79,temp,0
d,80,temp,1,,91
d,187,temp,0,,198
d,292,temp,0,,303
d,397,temp,0,,408
d,502,temp,0,,513
d,607,temp,0,,618
d,712,temp,0,,723
d,806,temp,0,,816

```

```

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540

```

```
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841
```

```
solve
fini
```

```
/post1
*dim,capgas,,14
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,516,536,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,712,732,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(3),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1104,1124,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(5),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1300,1320,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(6),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1496,1516,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(7),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(8),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,540,560,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(9),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,736,756,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(10),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(11),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1128,1148,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(12),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1324,1344,2
etable,cxy,tf,x
ssum
```

```

*get,capgas(13),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1520,1540,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(14),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,e50a,dat
*status,capgas
/output
fini

```

O arquivo E50H.SOL é o arquivo que simula o sistema bifásico do tipo estratificado, com fração de líquido de 50% e com blindagem para o eletrodo emissor 8.

```

/prep7
*do,conta,785,884
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,981,1080
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1177,1276
emodif,conta,mat,2
*enddo
*do,conta,1373,1472
emodif,conta,mat,2
*enddo
fini

```

```

/solu

```

```

d,79,temp,1
d,80,temp,0,,91
d,187,temp,0,,198
d,292,temp,0,,303
d,397,temp,0,,408
d,502,temp,0,,513
d,607,temp,0,,618
d,712,temp,0,,723
d,806,temp,1,,816

```

```

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

```

```

solve
fini

```

```

/post1
*dim,capgas,,14
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2

```

```

etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(1),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,516,536,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(2),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,712,732,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(3),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1104,1124,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(5),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1300,1320,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(6),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1496,1516,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(7),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(8),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,540,560,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(9),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,736,756,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(10),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(11),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1128,1148,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(12),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1324,1344,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(13),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,1520,1540,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,capgas(14),ssum,,item,cxy
esel,all
/output,e50h,dat
*status,capgas
/output
fini

```

As linhas de comando, para executar os arquivos de entrada no ANSYS, são análogas àquelas feitas para o arquivo GAS12.SOL, no Anexo II. Por exemplo, para este último arquivo, E50H.SOL, tem-se as seguintes linhas de comando:

```
/input,malha1,pre
```

```
/input,e50h,sol
```

```
/exit
```

Para executar os arquivos sem blindagem, é só eliminar as condições de contorno da blindagem, que significa eliminar as linhas de comando correspondentes.

Anexo IV

Programas para o Cálculo da Distribuição de Sensibilidade

Este Anexo traz alguns arquivos de entrada para serem executados no ANSYS, para o caso de eletrodos flutuantes e com blindagem.

O arquivo SENSEA12.SOL se refere ao primeiro setor para o par de eletrodos 1-2.

```
*dim,sensit,,1000,5
*do,conta,1,100
/prep7
emodif,conta,mat,2
fini
/solu
d,80,temp,1,,91
d,187,temp,0,,198

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini
/prep7
emodif,conta,mat,1
fini
/post1
rsys,0
*set,sensit(conta,1),conta
*get,sensit(conta,2),elem,conta,cent,x
*get,sensit(conta,3),elem,conta,cent,y
rsys,1
esel,s,elem,,320,340,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,344,364,2
```

```

etable, cxy, tf, x
ssum
*get, sensit (conta, 5), ssum, , item, cxy
esel, all
fini
*enddo
/output, sensal2, dat
*stat, sensit, 1, 100, 1, 5
/output

```

O arquivo SENSA13.SOL se refere ao primeiro setor para o par de eletrodos 1-3.

```

*dim, sensit, , 1000, 5
*do, conta, 1, 100
/prep7
emodif, conta, mat, 2
fini
/solu
d, 80, temp, 1, , 91
d, 292, temp, 0, , 303

d, 106, temp, 0, , 120
d, 212, temp, 0, , 225
d, 317, temp, 0, , 330
d, 422, temp, 0, , 435
d, 527, temp, 0, , 540
d, 632, temp, 0, , 645
d, 737, temp, 0, , 750
d, 829, temp, 0, , 841

solve
fini
/prep7
emodif, conta, mat, 1
fini
/post1
rsys, 0
*set, sensit (conta, 1), conta
*get, sensit (conta, 2), elem, conta, cent, x
*get, sensit (conta, 3), elem, conta, cent, y
rsys, 1
esel, s, elem, , 516, 536, 2
etable, cxy, tf, x
ssum
*get, sensit (conta, 4), ssum, , item, cxy
esel, s, elem, , 540, 560, 2
etable, cxy, tf, x
ssum
*get, sensit (conta, 5), ssum, , item, cxy
esel, all
fini
*enddo
/output, sensal3, dat
*stat, sensit, 1, 100, 1, 5
/output

```

O arquivo SENSEA14.SOL se refere ao primeiro setor para o par de eletrodos 1-4.

```
*dim,sensit,,1000,5
*do,conta,1,100
/prep7
emodif,conta,mat,2
fini
/solu
d,80,temp,1,,91
d,397,temp,0,,408

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini
/prep7
emodif,conta,mat,1
fini
/post1
rsys,0
*set,sensit(conta,1),conta
*get,sensit(conta,2),elem,conta,cent,x
*get,sensit(conta,3),elem,conta,cent,y
rsys,1
esel,s,elem,,712,732,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,736,756,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,5),ssum,,item,cxy
esel,all
fini
*enddo
/output,sensa14,dat
*stat,sensit,1,100,1,5
/output
```

O arquivo SENSA15.SOL se refere ao primeiro setor para o par de eletrodos 1-5.

```
*dim,sensit,,1000,5
*do,conta,1,100
/prep7
emodif,conta,mat,2
fini
/solu
d,80,temp,1,,91
d,502,temp,0,,513

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841

solve
fini
/prep7
emodif,conta,mat,1
fini
/post1
rsys,0
*set,sensit(conta,1),conta
*get,sensit(conta,2),elem,conta,cent,x
*get,sensit(conta,3),elem,conta,cent,y
rsys,1
esel,s,elem,,908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,5),ssum,,item,cxy
esel,all
fini
*enddo
/output,sensa15,dat
*stat,sensit,1,100,1,5
/output
```

O arquivo SENS15.SOL se refere ao oitavo setor para o par de eletrodos 1-5.

```
*dim,sensit,,1600,5
*do,conta,1373,1472
/prep7
emodif,conta,mat,2
fini
/solu
d,80,temp,1,,91
d,502,temp,0,,513

d,106,temp,0,,120
d,212,temp,0,,225
d,317,temp,0,,330
d,422,temp,0,,435
d,527,temp,0,,540
d,632,temp,0,,645
d,737,temp,0,,750
d,829,temp,0,,841
solve
fini
/prep7
emodif,conta,mat,1
fini
/post1
rsys,0
*set,sensit(conta,1),conta
*get,sensit(conta,2),elem,conta,cent,x
*get,sensit(conta,3),elem,conta,cent,y
rsys,1
esel,s,elem,,908,928,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,4),ssum,,item,cxy
esel,s,elem,,932,952,2
etable,cxy,tf,x
ssum
*get,sensit(conta,5),ssum,,item,cxy
esel,all
fini
*enddo
/output,sensh15,dat
*stat,sensit,1373,1472,1,5
/output
```

Anexo V

Calibração

V.1 – Arquivos de entrada

Este Anexo traz os arquivos de entrada, onde foi feito o ajuste dos pontos por meio de um regressão linear. Os valores da voltagem de entrada estão na primeira coluna, os valores da voltagem de saída estão na segunda coluna, os valores da capacitância estão na terceira coluna e os valores da voltagem relativa estão na quarta coluna. A calibração foi feita para as três frequências de excitação. O arquivo F1.ENT traz o conjunto de dados para a frequência de 5 MHz, o arquivo F2.ENT traz o conjunto de dados para a frequência de 11,5 MHz e o arquivo F3.ENT traz o conjunto de dados para a frequência de 16,3 MHz. As voltagens de entrada e de saída estão em Volts, a capacitância em picoFarad e lembrando que a razão entre a voltagem de saída pela voltagem de entrada é adimensional.

O arquivo F1.ENT é:

| Ve (V) | Vs (V) | C (pF) | Vs/Ve (adim.) |
|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 2.42 | 0.0592 | 0.7 | 2.446281E-2 |
| 2.42 | 0.0548 | 0.7 | 2.264463E-2 |
| 2.42 | 0.1108 | 0.85 | 4.578512E-2 |
| 2.42 | 0.147 | 0.9 | 0.0607438 |
| 2.42 | 0.19 | 1.05 | 7.851239E-2 |
| 2.41 | 0.19 | 1.05 | 7.883817E-2 |
| 2.42 | 0.22 | 1.1 | 9.090909E-2 |
| 2.42 | 0.287 | 1.25 | 0.118595 |
| 2.42 | 0.282 | 1.3 | 0.1165289 |
| 2.42 | 0.366 | 1.4 | 0.1512397 |
| 2.42 | 0.304 | 1.4 | 0.1256198 |
| 2.42 | 0.23 | 1.4 | 9.504132E-2 |

| | | | |
|------|---------|------|-------------|
| 2.42 | 0.215 | 1.4 | 8.884297E-2 |
| 2.42 | 0.345 | 1.5 | 0.142562 |
| 2.42 | 0.813 | 2.7 | 0.3359504 |
| 2.42 | 0.814 | 2.8 | 0.3363636 |
| 2.42 | 0.96 | 2.9 | 0.3966942 |
| 2.43 | 1.033 | 3.1 | 0.4251029 |
| 2.42 | 1.031 | 3.1 | 0.426033 |
| 2.42 | 1.379 | 4 | 0.5698346 |
| 2.43 | 1.655 | 4.2 | 0.6810699 |
| 2.43 | 1.531 | 4.3 | 0.6300411 |
| 2.42 | 1.552 | 4.3 | 0.6413223 |
| 2.42 | 1.835 | 4.7 | 0.7582645 |
| 2.42 | 2.022 | 5.2 | 0.8355372 |
| 2.42 | 2.292 | 6 | 0.9471074 |
| 2.42 | 2.334 | 6.2 | 0.9644628 |
| 2.42 | 2.703 | 7 | 1.116942 |
| 2.43 | 0.0604 | 0.7 | 2.485597E-2 |
| 2.43 | 0.06028 | 0.7 | 2.480658E-2 |
| 2.43 | 0.1173 | 0.85 | 0.0482716 |
| 2.43 | 0.152 | 0.9 | 6.255144E-2 |
| 2.43 | 0.197 | 1.05 | 8.106995E-2 |
| 2.43 | 0.194 | 1.05 | 7.983539E-2 |
| 2.43 | 0.231 | 1.1 | 9.506173E-2 |
| 2.44 | 0.288 | 1.25 | 0.1180328 |
| 2.44 | 0.288 | 1.3 | 0.1180328 |
| 2.43 | 0.365 | 1.4 | 0.1502058 |
| 2.44 | 0.305 | 1.4 | 0.125 |
| 2.44 | 0.229 | 1.4 | 9.385246E-2 |
| 2.44 | 0.223 | 1.4 | 9.139344E-2 |
| 2.44 | 0.349 | 1.5 | 0.1430328 |
| 2.44 | 0.825 | 2.7 | 0.3381147 |
| 2.45 | 0.831 | 2.8 | 0.3391837 |
| 2.45 | 0.991 | 2.9 | 0.4044898 |
| 2.44 | 1.039 | 3.1 | 0.4258197 |
| 2.45 | 1.046 | 3.1 | 0.4269388 |
| 2.45 | 1.396 | 4 | 0.5697959 |
| 2.45 | 1.571 | 4.2 | 0.6412244 |
| 2.45 | 1.554 | 4.3 | 0.6342857 |
| 2.45 | 1.67 | 4.3 | 0.6816326 |
| 2.45 | 1.874 | 4.7 | 0.7648979 |
| 2.45 | 2.07 | 5.2 | 0.8448979 |
| 2.44 | 2.318 | 6 | 0.95 |
| 2.44 | 2.344 | 6.2 | 0.9606557 |
| 2.44 | 2.648 | 7 | 1.085246 |

O arquivo F2.ENT é:

| Ve (V) | Vs (V) | C (pF) | Vs/Ve (adim.) |
|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 2.12 | 0.0211 | 0.3 | 9.95283E-3 |
| 2.11 | 0.124 | 0.4 | 5.876777E-2 |
| 2.11 | 0.0758 | 0.4 | 3.592417E-2 |
| 2.11 | 0.207 | 0.45 | 9.810427E-2 |
| 2.12 | 0.23 | 0.64 | 0.1084906 |
| 2.11 | 0.375 | 0.7 | 0.1777251 |
| 2.12 | 0.362 | 0.7 | 0.1707547 |

| | | | |
|------|--------|------|-------------|
| 2.12 | 0.483 | 0.85 | 0.2278302 |
| 2.11 | 0.562 | 0.9 | 0.2663507 |
| 2.09 | 0.644 | 1.05 | 0.308134 |
| 2.08 | 0.639 | 1.05 | 0.3072115 |
| 2.09 | 0.716 | 1.1 | 0.3425837 |
| 2.11 | 0.861 | 1.25 | 0.4080569 |
| 2.1 | 0.857 | 1.3 | 0.4080952 |
| 2.1 | 1.032 | 1.4 | 0.4914286 |
| 2.11 | 0.897 | 1.4 | 0.4251185 |
| 2.12 | 0.983 | 1.5 | 0.4636793 |
| 2.13 | 1.85 | 2.7 | 0.8685446 |
| 2.12 | 1.848 | 2.8 | 0.8716982 |
| 2.13 | 2.122 | 2.9 | 0.9962441 |
| 2.13 | 2.273 | 3.1 | 1.067136 |
| 2.13 | 2.281 | 3.1 | 1.070892 |
| 2.13 | 2.89 | 4 | 1.356807 |
| 2.12 | 0.0216 | 0.3 | 1.018868E-2 |
| 2.13 | 0.1192 | 0.4 | 5.596244E-2 |
| 2.14 | 0.0797 | 0.4 | 3.724299E-2 |
| 2.14 | 0.215 | 0.45 | 0.1004673 |
| 2.15 | 0.236 | 0.64 | 0.1097674 |
| 2.14 | 0.382 | 0.7 | 0.1785047 |
| 2.14 | 0.382 | 0.7 | 0.1785047 |
| 2.15 | 0.506 | 0.85 | 0.2353488 |
| 2.15 | 0.581 | 0.9 | 0.2702325 |
| 2.15 | 0.671 | 1.05 | 0.312093 |
| 2.15 | 0.668 | 1.05 | 0.3106976 |
| 2.15 | 0.748 | 1.1 | 0.347907 |
| 2.16 | 0.866 | 1.25 | 0.4009259 |
| 2.16 | 0.867 | 1.3 | 0.4013889 |
| 2.15 | 1.022 | 1.4 | 0.4753488 |
| 2.15 | 0.9 | 1.4 | 0.4186046 |
| 2.16 | 0.993 | 1.5 | 0.4597222 |
| 2.16 | 1.89 | 2.7 | 0.8749999 |
| 2.17 | 1.9 | 2.8 | 0.875576 |
| 2.17 | 2.231 | 2.9 | 1.028111 |
| 2.17 | 2.318 | 3.1 | 1.068203 |
| 2.17 | 2.342 | 3.1 | 1.079263 |
| 2.17 | 2.925 | 4 | 1.347926 |

O arquivo F3.ENT é:

| Ve (V) | Vs (V) | C (pF) | Vs/Ve (adim.) |
|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 1.208 | 0.0546 | 0.4 | 4.519868E-2 |
| 1.235 | 0.0272 | 0.4 | 2.202429E-2 |
| 1.188 | 0.128 | 0.45 | 0.1077441 |
| 1.23 | 0.162 | 0.64 | 0.1317073 |
| 1.2 | 0.285 | 0.7 | 0.2375 |
| 1.225 | 0.282 | 0.7 | 0.2302041 |
| 1.39 | 0.49 | 0.85 | 0.352518 |
| 1.175 | 0.448 | 0.9 | 0.3812766 |
| 1.28 | 0.602 | 1.05 | 0.4703125 |
| 1.205 | 0.552 | 1.05 | 0.4580913 |
| 1.15 | 0.558 | 1.1 | 0.4852174 |
| 1.121 | 0.661 | 1.25 | 0.5896521 |

| | | | |
|-------|--------|------|-------------|
| 1.11 | 0.646 | 1.3 | 0.581982 |
| 1.125 | 0.816 | 1.4 | 0.7253333 |
| 1.129 | 0.698 | 1.4 | 0.6182463 |
| 1.22 | 0.614 | 1.4 | 0.5032787 |
| 1.18 | 0.582 | 1.4 | 0.4932204 |
| 1.17 | 0.807 | 1.5 | 0.6897436 |
| 1.24 | 1.844 | 2.7 | 1.487097 |
| 1.213 | 1.813 | 2.8 | 1.494641 |
| 1.242 | 2.072 | 2.9 | 1.668277 |
| 1.285 | 2.244 | 3.1 | 1.746304 |
| 1.252 | 2.209 | 3.1 | 1.764377 |
| 1.254 | 2.632 | 4 | 2.098884 |
| 1.3 | 2.859 | 4.2 | 2.199231 |
| 1.28 | 2.752 | 4.3 | 2.15 |
| 1.235 | 2.743 | 4.3 | 2.221053 |
| 1.142 | 2.829 | 4.7 | 2.477233 |
| 1.273 | 0.0755 | 0.4 | 5.930872E-2 |
| 1.275 | 0.0393 | 0.4 | 3.082353E-2 |
| 1.27 | 0.161 | 0.45 | 0.1267717 |
| 1.269 | 0.176 | 0.64 | 0.1386919 |
| 1.272 | 0.315 | 0.7 | 0.2476415 |
| 1.273 | 0.316 | 0.7 | 0.2482325 |
| 1.268 | 0.432 | 0.85 | 0.340694 |
| 1.254 | 0.498 | 0.9 | 0.3971292 |
| 1.244 | 0.582 | 1.05 | 0.4678457 |
| 1.222 | 0.564 | 1.05 | 0.4615385 |
| 1.233 | 0.646 | 1.1 | 0.5239254 |
| 1.224 | 0.755 | 1.25 | 0.6168301 |
| 1.209 | 0.751 | 1.3 | 0.6211745 |
| 1.251 | 0.938 | 1.4 | 0.7498001 |
| 1.225 | 0.789 | 1.4 | 0.6440816 |
| 1.207 | 0.618 | 1.4 | 0.5120132 |
| 1.2 | 0.6 | 1.4 | 0.5 |
| 1.182 | 0.842 | 1.5 | 0.7123519 |
| 1.14 | 1.694 | 2.7 | 1.485965 |
| 1.108 | 1.654 | 2.8 | 1.49278 |
| 1.065 | 1.818 | 2.9 | 1.707042 |
| 1.139 | 2 | 3.1 | 1.755926 |
| 1.145 | 2.032 | 3.1 | 1.774673 |
| 1.115 | 2.462 | 4 | 2.208072 |
| 1.1 | 2.609 | 4.2 | 2.371818 |
| 1.102 | 2.595 | 4.3 | 2.35481 |
| 1.116 | 2.71 | 4.3 | 2.428315 |
| 1.117 | 2.827 | 4.7 | 2.530886 |

V.2 - Propagação das incertezas para V_s/V_e

Os processos de medidas envolvem conceitos que devem ser claramente indicados através de uma terminologia bem estabelecida. Então, de acordo com o Vocabulário de Termos Legais Fundamentais e Gerais de Metrologia, elaborado pelo INMETRO, serão definidos alguns termos.

Resultado: valor de uma grandeza obtido por medição. Uma expressão completa do resultado de uma medição compreende também a incerteza de medição e os valores de referência das grandezas que influem sobre o valor da grandeza a medir ou sobre o instrumento de medir.

Indicação: valor de uma grandeza a ser medida fornecido por um instrumento de medir. A indicação é expressa em unidades da grandeza medida.

Exatidão: grau de concordância entre o resultado da medição e o valor verdadeiro convencional da grandeza medida. O uso do termo precisão no lugar de exatidão deve ser evitado.

Repetibilidade: graus de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições de utilização e em intervalo de tempo curto entre medições. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em termos da dispersão dos resultados.

Reprodutibilidade: grau de concordância entre os resultados das medições de uma mesma grandeza, onde as medições individuais são efetuadas variando-se uma ou mais das seguintes condições: método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e tempo. Para que uma expressão de reprodutibilidade seja obtida é necessário especificar as condições que foram alteradas.

Incerteza: estimativa caracterizando a faixa de valores dentro da qual se encontra o verdadeiro valor da grandeza medida. A incerteza da medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e caracterizados por um desvio padrão experimental. A estimativa dos outros componentes somente pode ser avaliada com base na experiência ou em outras informações.

Para avaliar as incertezas aleatórias de um resultado desejado, baseado nas incertezas das medidas primárias, foi utilizado o procedimento descrito por Holman (1994). Supondo que um resultado, R , seja função das variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_n . Então:

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{V.1})$$

Sendo w_R a incerteza do resultado e w_1, w_2, \dots, w_n as incertezas das variáveis independentes, se as incertezas das variáveis independentes são todas de mesma desigualdade, então a incerteza do resultado desejado, ou seja, a propagação da incerteza, é dada por:

$$w_R = \pm \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{V.2})$$

A incerteza da razão entre a voltagem de saída e de entrada, calculada conforme a Equação V.2, é dada por:

$$w_{V_s/V_e} = \pm \left\{ \left[\left(\frac{\partial R(V_e, V_s)}{\partial V_s} \right) \cdot w_{V_s} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial R(V_e, V_s)}{\partial V_e} \right) \cdot w_{V_e} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{V.3})$$

onde:

w_{V_e} é a incerteza da voltagem de entrada;

w_{V_s} é a incerteza da voltagem de saída;

w_{V_s/V_e} é a incerteza da razão entre a voltagem de saída e de entrada e

$R(V_e, V_s)$ é a função que relaciona a voltagem de entrada e de saída.

A função que relaciona a voltagem de entrada e de saída é dada pela seguinte expressão:

$$R(V_e, V_s) = \frac{V_s}{V_e} \quad (\text{V.4})$$

A derivada da Equação V.4 em relação à voltagem de saída é dada por:

$$\frac{\partial R(V_e, V_s)}{\partial V_s} = \frac{1}{V_e} \quad (V.5)$$

A derivada da Equação V.4 em relação à voltagem de entrada é dada por:

$$\frac{\partial V_r}{\partial V_e} = - \frac{V_s}{V_e^2} \quad (V.6)$$

Substituindo as Equações V.6 e V.5 em V.3 e simplificando, tem-se a incerteza da razão de V_s/V_e :

$$w_{V_s/V_e} = \pm \left\{ \left[\left(\frac{1}{V_e} \right) \cdot w_{V_s} \right]^2 + \left[\left(- \frac{V_s}{V_e^2} \right) \cdot w_{V_e} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (V.7)$$

V.3 – Detalhes das curvas teóricas e experimentais

Esta seção traz os detalhes da comparação entre as curvas teóricas e das curvas experimentais de calibração para as frequências de 5 MHz, 11,5 MHz e 16,3 MHz. O eixo das abscissas vai de 0 a 0,6 e o eixo das ordenadas vai de 0 a 4, sendo isto feito para poder visualizar melhor o comportamento da curva experimental em relação à curva teórica sob os mesmos parâmetros.

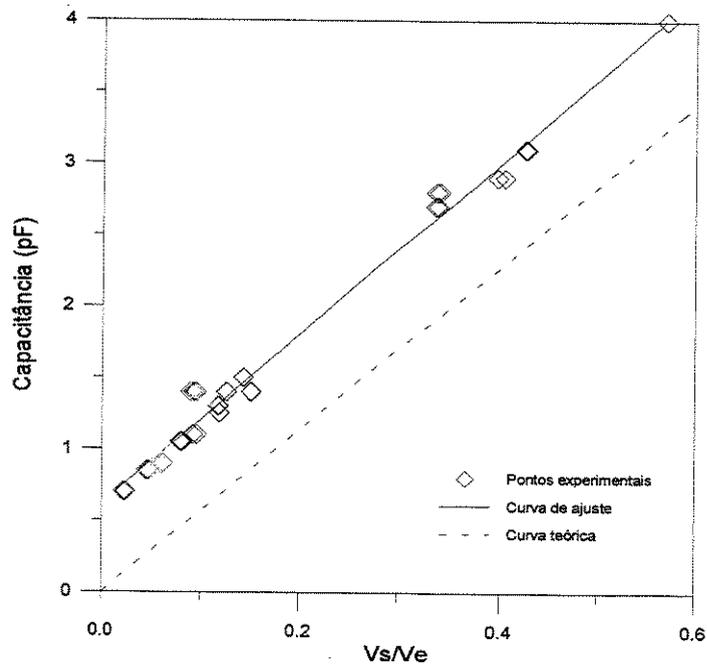


Figura V.1 – Curva teórica e experimental para a frequência de 5 MHz.

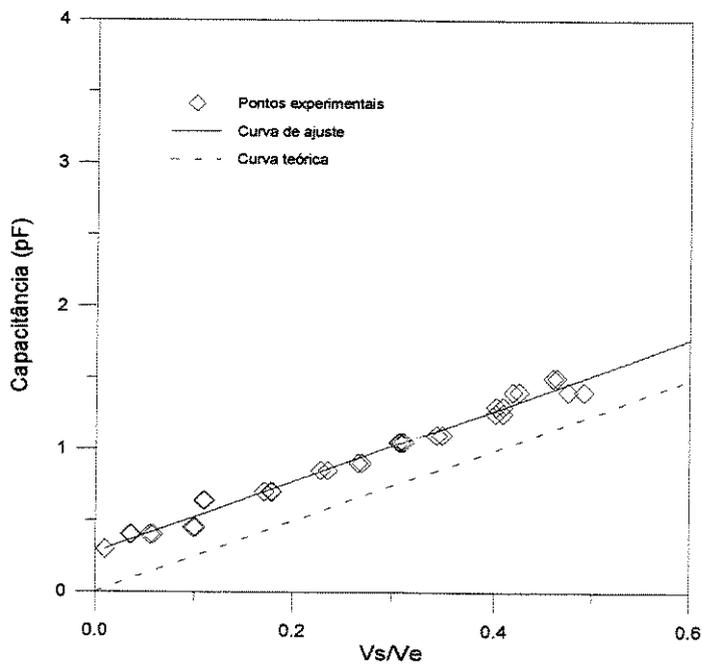


Figura V.2 – Curva teórica e experimental para a frequência de 11,5 MHz.

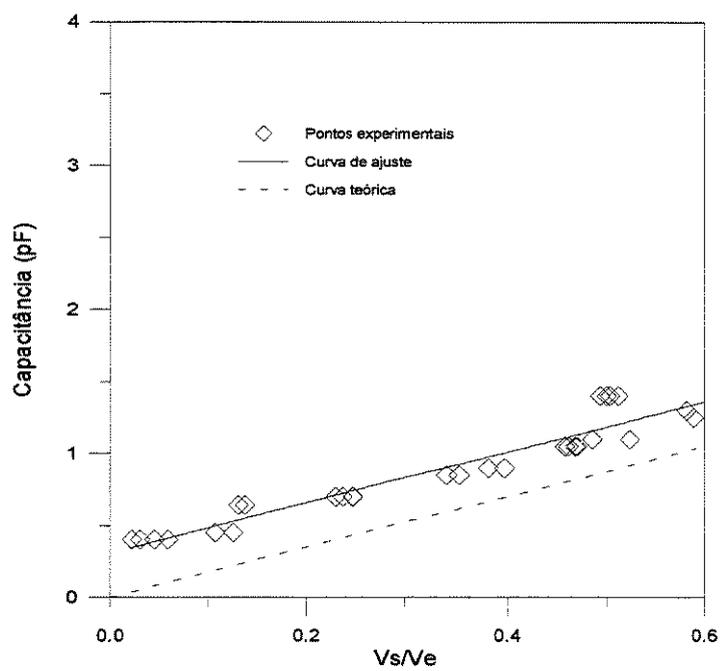


Figura V.3 – Curva teórica e experimental para a frequência de 16,3 MHz.

Anexo VI

Incerteza das Medidas Experimentais

Neste anexo são apresentadas as expressões analíticas para o cálculo das incertezas da capacitância normalizada para as medidas feitas e da fração de líquido volumétrica.

VI.1 – Incerteza da capacitância normalizada das medidas experimentais

A incerteza da capacitância é fornecida pela Tabela 5.5 e a capacitância normalizada é dada pela Equação 4.5, então a incerteza da capacitância normalizada é dada pela seguinte expressão:

$$w_{\lambda} = \pm \left\{ \left[\left(\frac{\partial \lambda}{\partial C_m} \right) \cdot \bar{w}_{\text{Cap}} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial \lambda}{\partial C_g} \right) \cdot \bar{w}_{\text{Cap}} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial \lambda}{\partial C_l} \right) \cdot \bar{w}_{\text{Cap}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{VI.1})$$

A derivada da capacitância normalizada em relação à capacitância medida é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial C_m} = \frac{1}{C_l - C_g} \quad (\text{VI.2})$$

A derivada da capacitância normalizada em relação à capacitância do gás é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial C_g} = \frac{C_m - C_l}{(C_l - C_g)^2} \quad (\text{VI.3})$$

A derivada da capacitância normalizada em relação à capacitância do líquido é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial C_l} = -\frac{C_m - C_g}{(C_l - C_g)^2} \quad (\text{VI.4})$$

Substituindo as Equações VI.2, VI.3 e VI.4 em VI.1, tem-se a incerteza das capacitâncias normalizadas das medidas experimentais:

$$w_\lambda = \pm \bar{w}_{\text{Cap}} \left\{ \left[\frac{1}{C_l - C_g} \right]^2 + \left[\frac{C_m - C_l}{(C_l - C_g)^2} \right]^2 + \left[\frac{C_m - C_g}{(C_l - C_g)^2} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{VI.5})$$

VI.2 – Incerteza da fração de líquido volumétrica

A incerteza da fração de líquido volumétrica leva em consideração a incerteza na medida do diâmetro do tubo, na medida do comprimento dele e da quantidade de volume de líquido inserido dentro do tubo. A Equação 4.8 traz a relação da fração de líquido volumétrica com o volume de líquido e com o diâmetro interno e comprimento do tubo.

$$\beta_{\text{vol}} = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot D_{\text{int}}^2 \cdot L_T} \quad (4.8)$$

Utilizando a Equação V.2, então a incerteza da fração volumétrica, $w_{\beta_{\text{vol}}}$, fica:

$$w_{\beta_{\text{vol}}} = \left\{ \left[\left(\frac{\partial \beta_{\text{vol}}}{\partial V_1} \right) \cdot w_{V_1} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial \beta_{\text{vol}}}{\partial D_{\text{int}}} \right) \cdot w_{D_{\text{int}}} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial \beta_{\text{vol}}}{\partial L_T} \right) \cdot w_{L_T} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{VI.6})$$

Resolvendo as derivadas parciais e substituindo na Equação VI.6, tem-se:

$$w_{\beta vol} = \frac{4}{\pi \cdot D_{int}^2 \cdot L_T} \left[(w_{V_1})^2 + \left(\frac{V_1 \cdot w_{L_T}}{L_T} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot V_1 \cdot w_{D_{int}}}{D_{int}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (VI.7)$$

onde:

w_{V_1} é a incerteza do volume de líquido dentro do tubo;

w_{L_T} é a incerteza do comprimento do tubo e

$w_{D_{int}}$ é a incerteza do diâmetro interno do tubo.

Anexo VII

Resultados da Simulação Numérica para Eletrodos Livres Aterrados

Da Figura VII.1 até a Figura VII.19 estão os gráficos da simulação numérica da capacitância normalizada em função dos pares de eletrodos, para cada fração de líquido. Estes gráficos são para eletrodos livres aterrados.

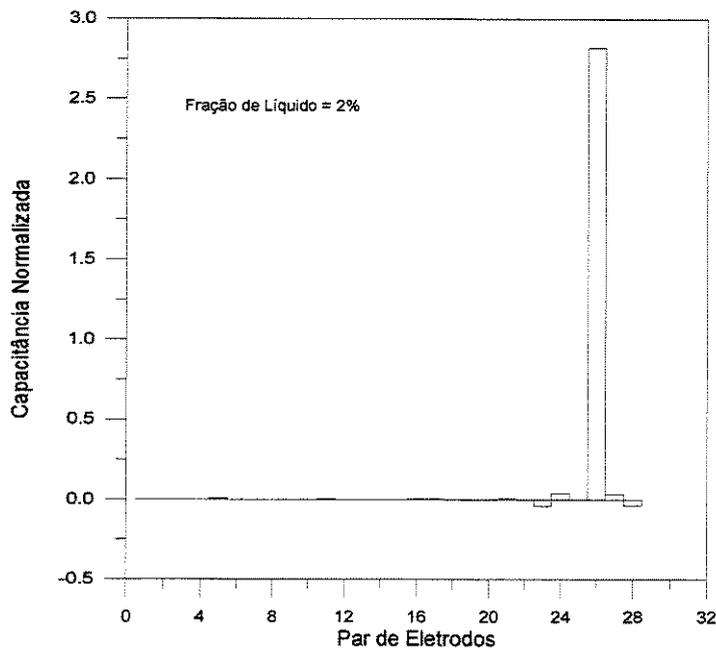


Figura VII.1 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 2\%$.

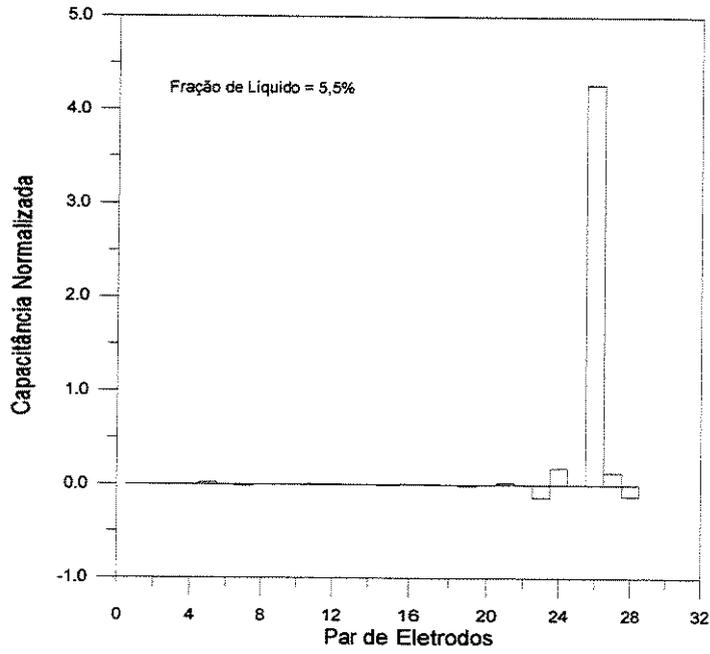


Figura VII.2 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 5,5\%$.

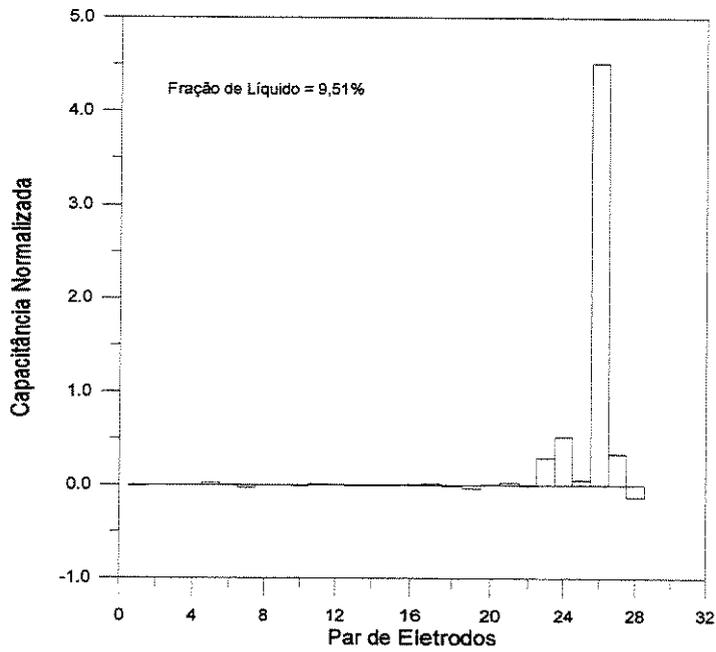


Figura VII.3 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 9,51\%$.

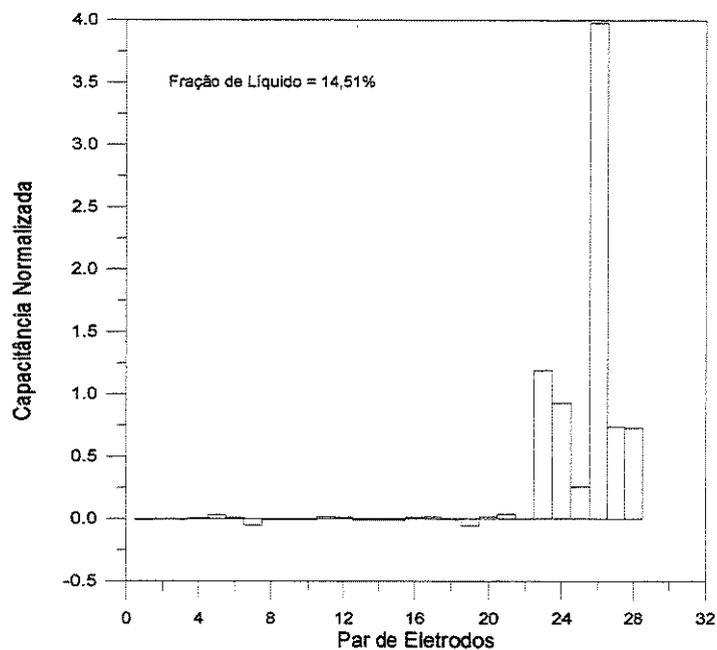


Figura VII.4 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 14,51\%$.

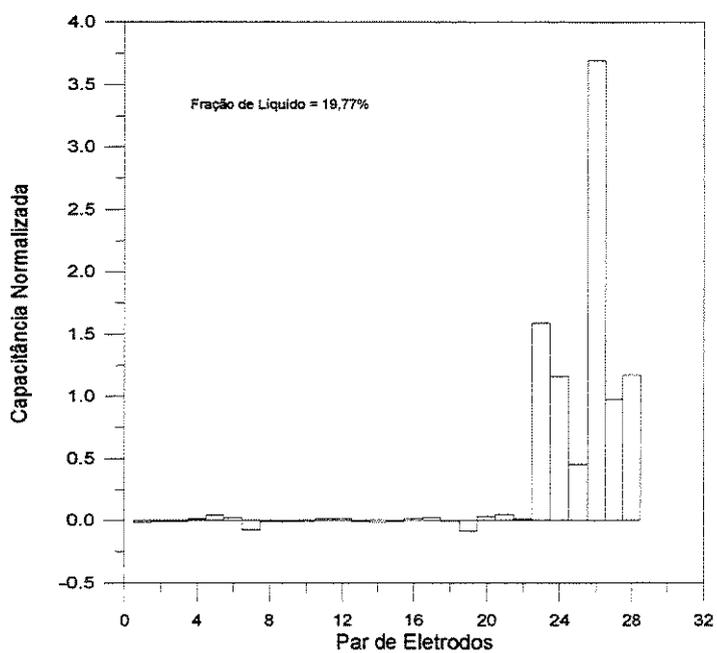


Figura VII.5 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 19,77\%$.

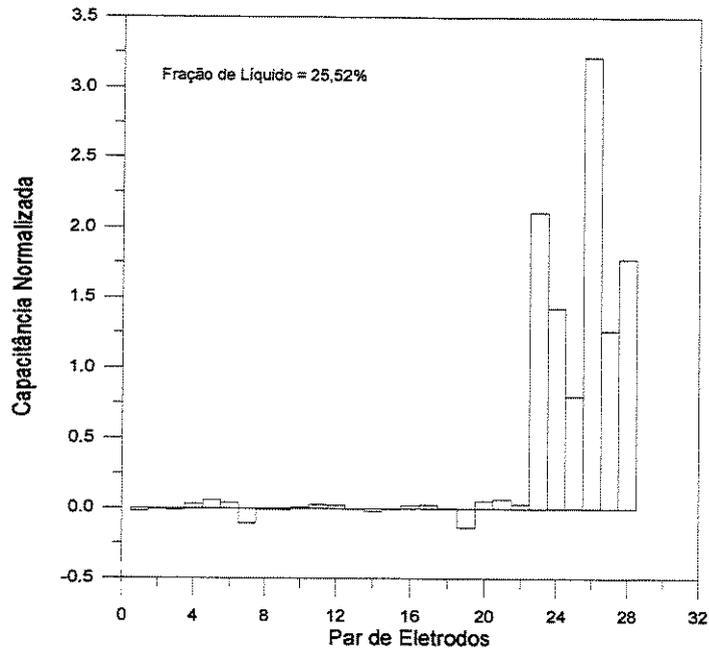


Figura VII.6 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 25,52\%$.

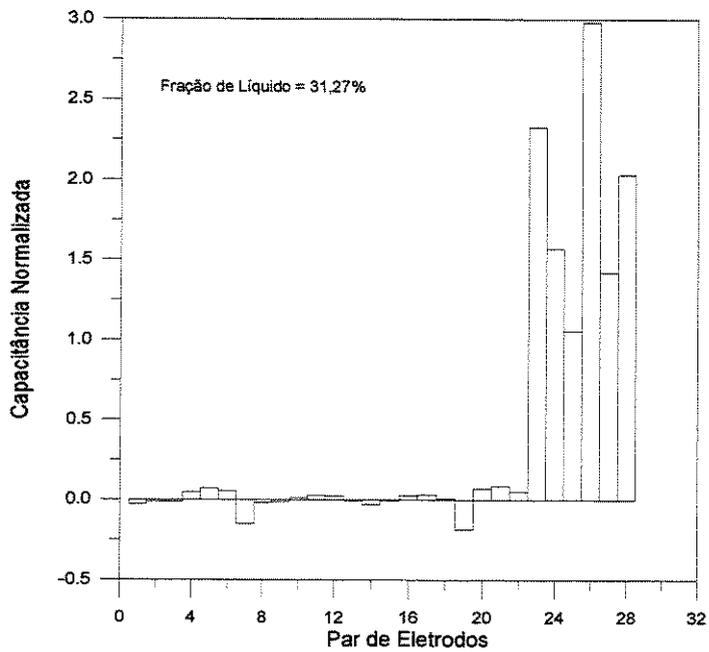


Figura VII.7 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 31,27\%$.

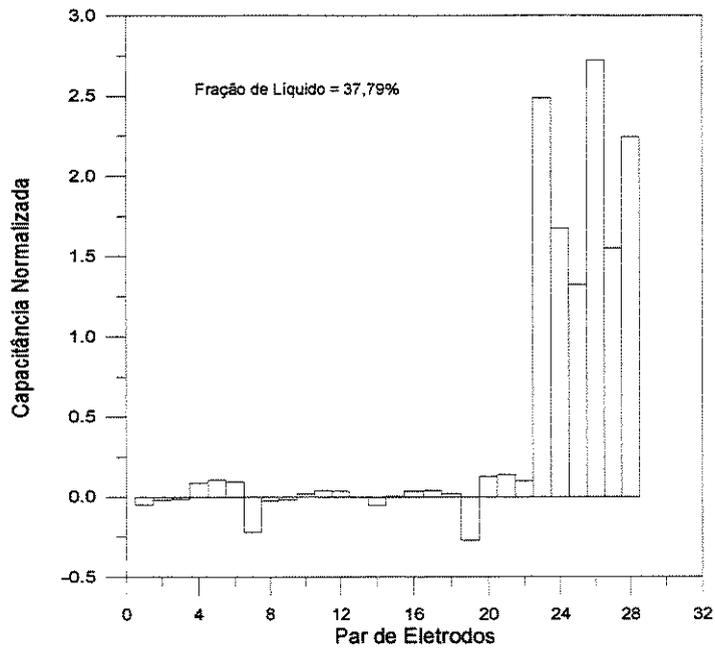


Figura VII.8 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 37,79\%$.

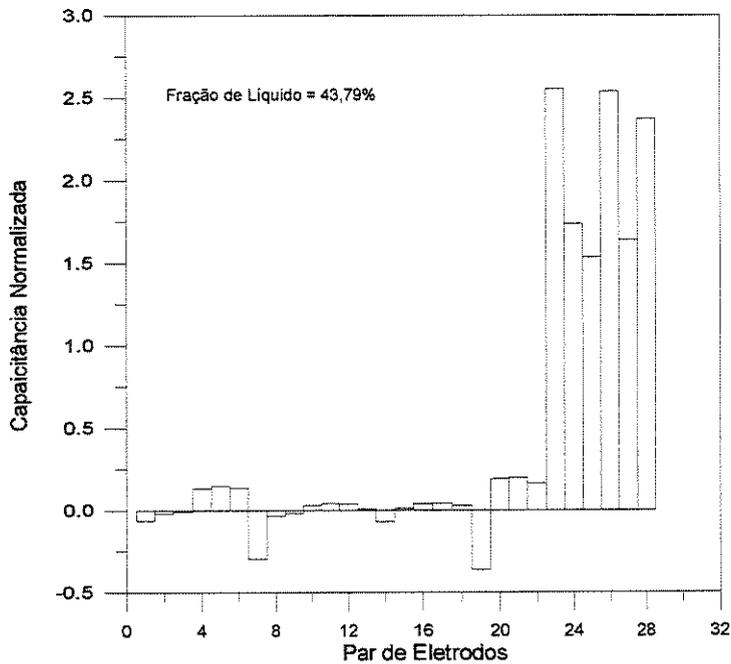


Figura VII.9 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 43,79\%$.

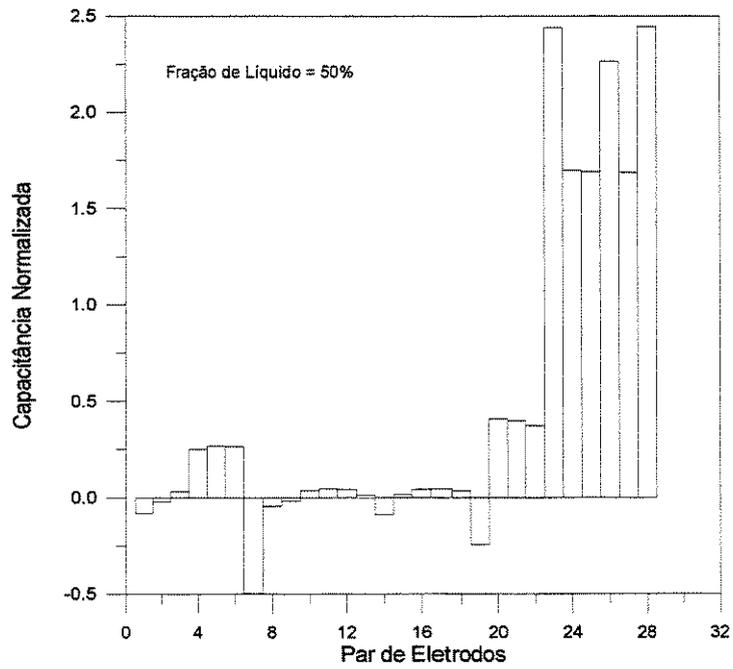


Figura VII.10 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 50\%$.

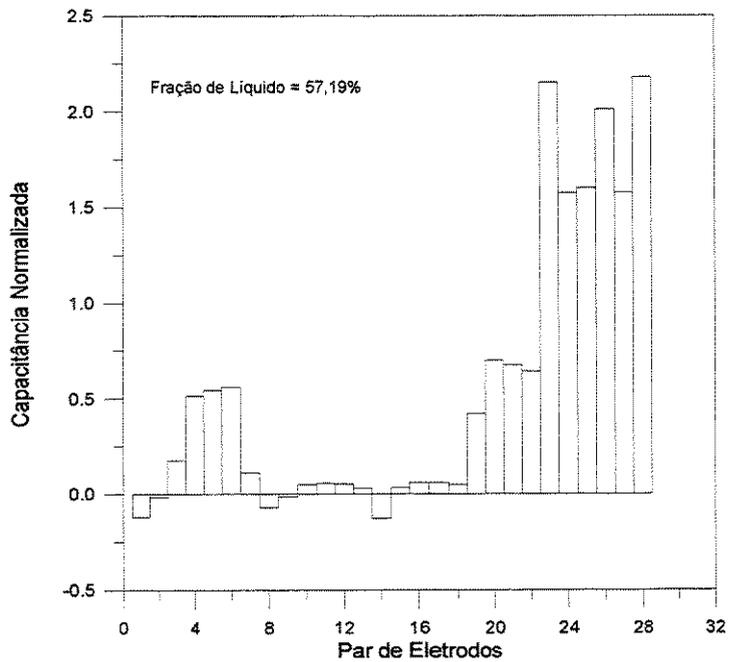


Figura VII.11 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 57,19\%$.

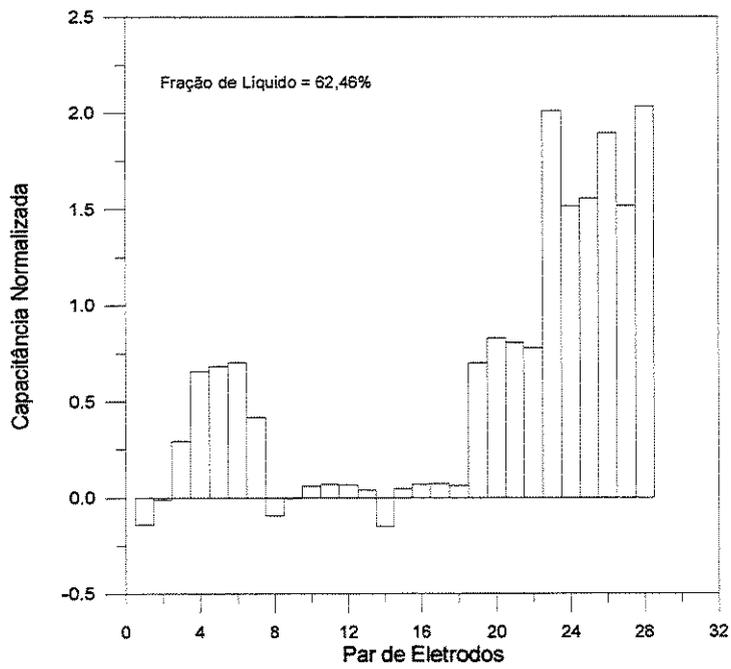


Figura VII.12 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 62,46\%$.

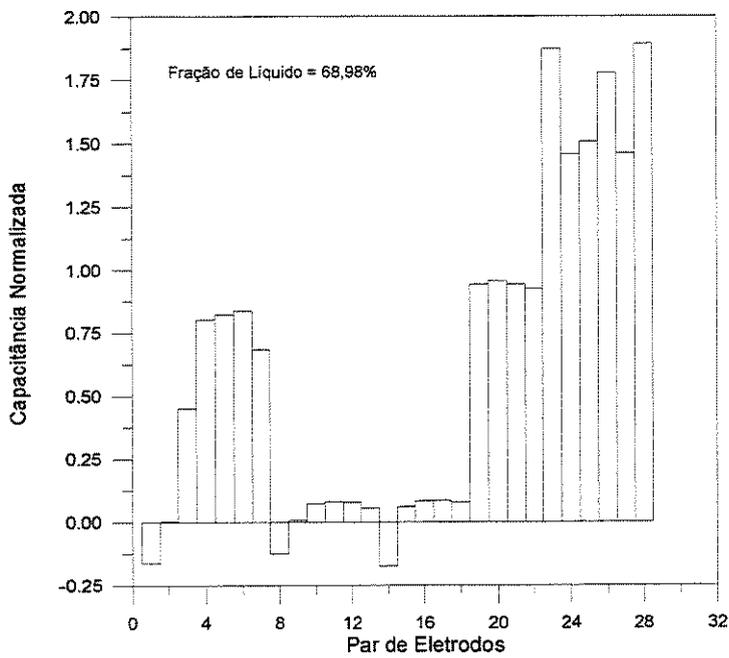


Figura VII.13 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 68,98\%$.

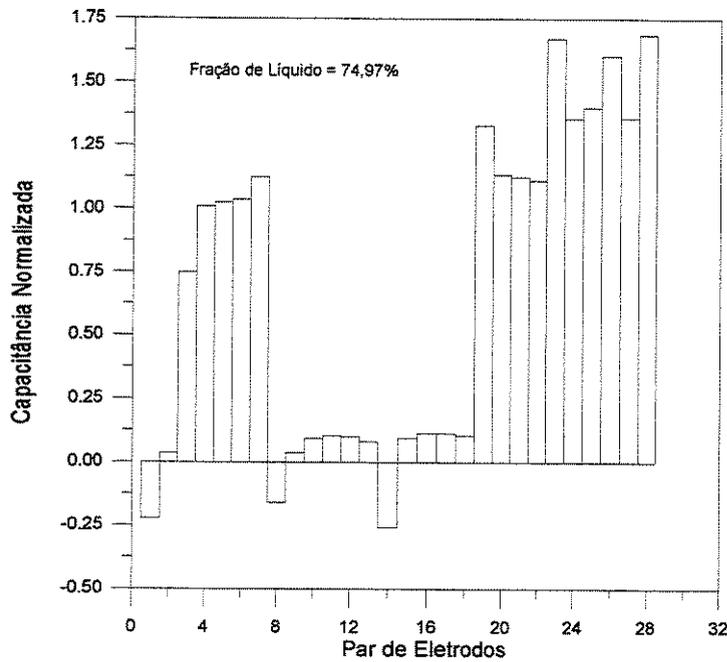


Figura VII.14 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 74,97\%$.

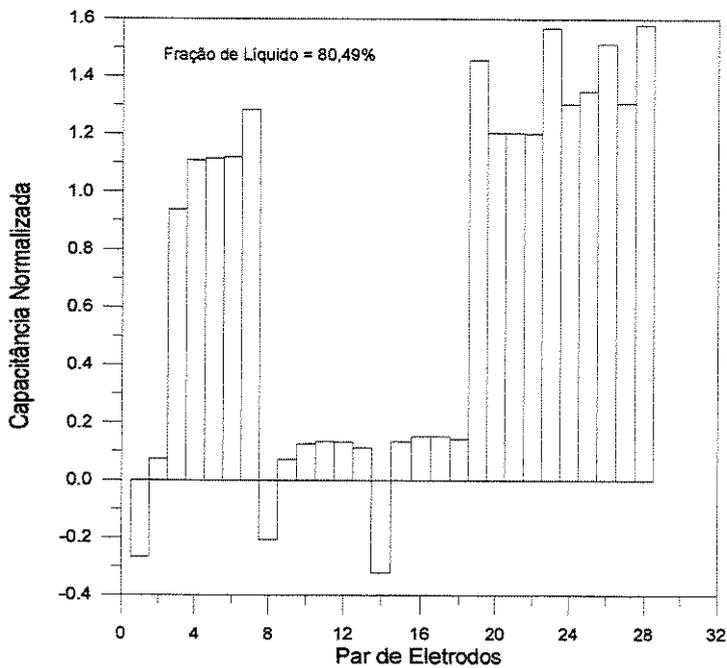


Figura VII.15 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 80,49\%$.

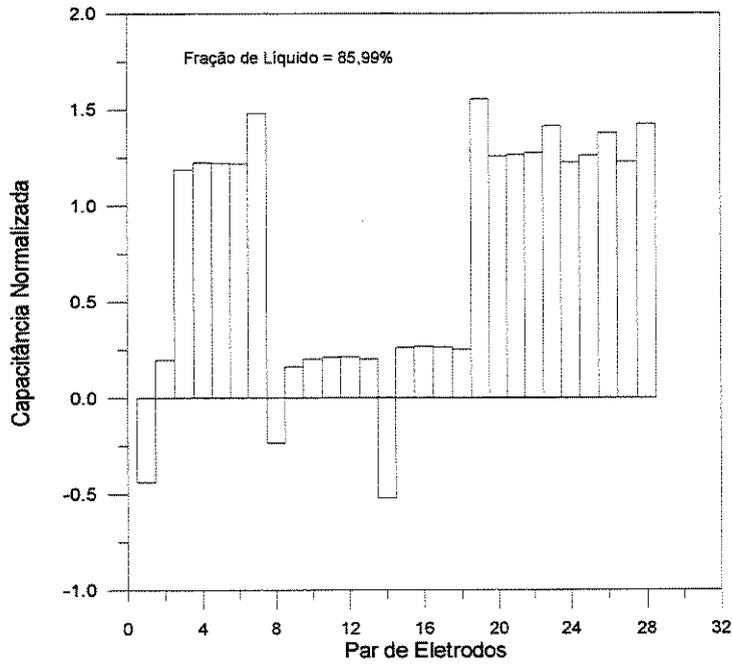


Figura VII.16 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 85,99\%$.

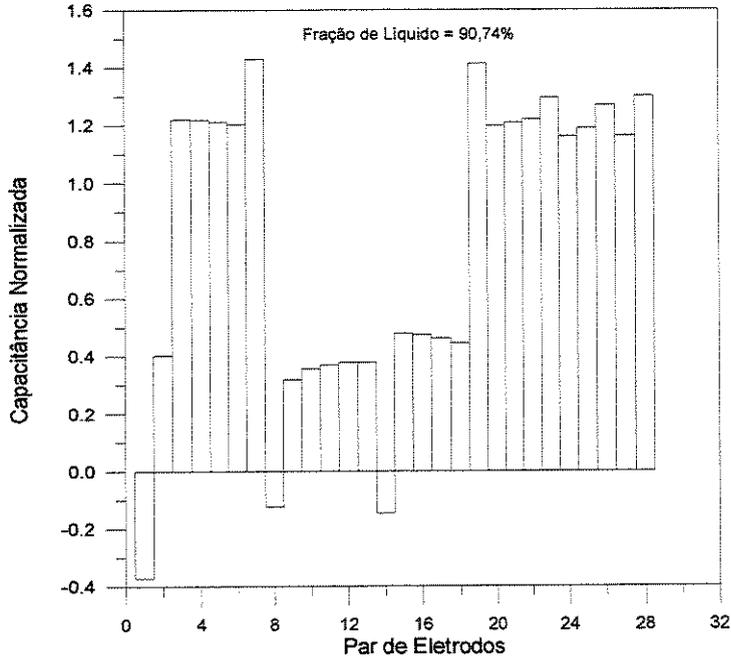


Figura VII.17 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 90,74\%$.

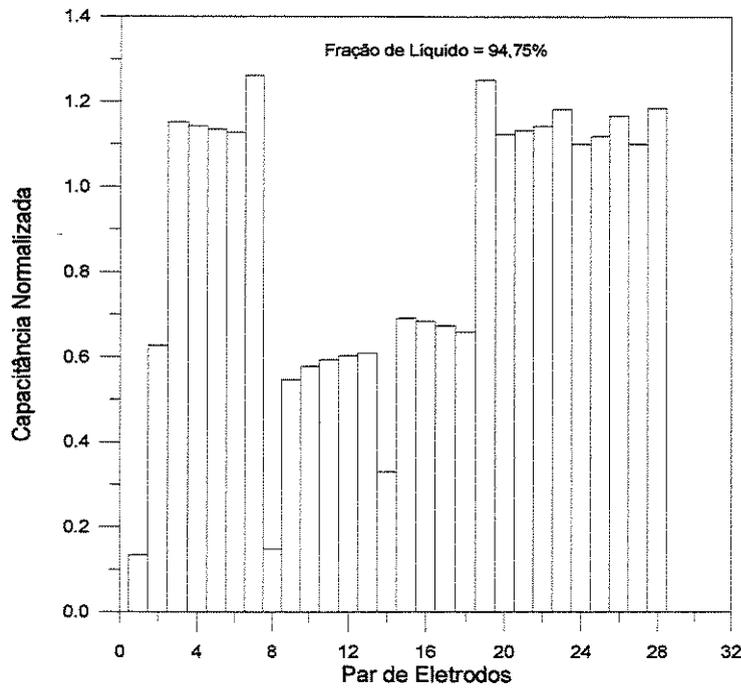


Figura VII.18 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 94,75\%$.

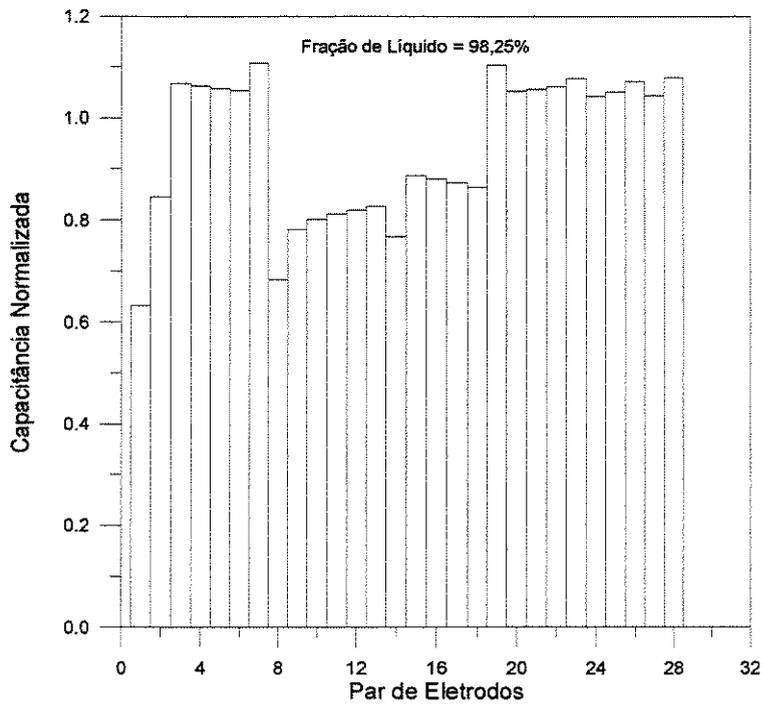


Figura VII.19 – Capacitância normalizada para $\beta_{vol} = 98,25\%$.