

**FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA**

**TOMOMETRIA CAPACITIVA APLICADA À  
MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE ÁGUA EM  
ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

**FLORIANÓPOLIS  
2015**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

**TOMOMETRIA CAPACITIVA APLICADA À  
MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE ÁGUA EM  
ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

Tese submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas  
da Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a obtenção do título  
de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

**FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA**

Orientador: Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.

Florianópolis, Dezembro de 2015.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mota, Francisco Rafael Moreira da  
Tomometria capacitiva aplicada à medição de fração de água  
em escoamentos bifásicos / Francisco Rafael Moreira da  
Mota ; orientador, Daniel Juan Pagano - Florianópolis, SC,  
2015.  
178 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas.

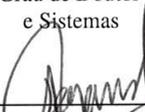
Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. tomometria. 3.  
sistema de medição. 4. fração volumétrica. 5. escoamento  
multifásico. I. Pagano, Daniel Juan. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

# TOMOMETRIA CAPACITIVA APLICADA À MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE ÁGUA EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

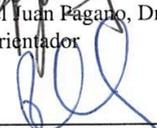
Francisco Rafael Moreira da Mota

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas



---

Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.  
Orientador



---

Prof. Rômulo Silva de Oliveira, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Banca Examinadora:



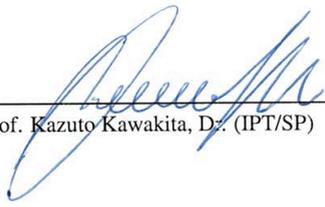
---

Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.  
Presidente



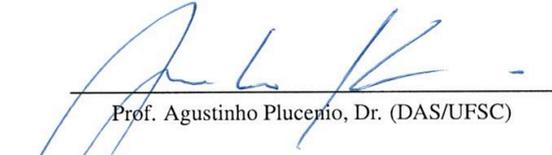
---

Prof. Marco José da Silva, Dr. (UTFPR)



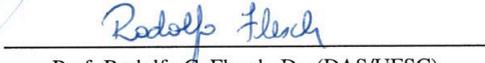
---

Prof. Kazuto Kawakita, Dr. (IPT/SP)



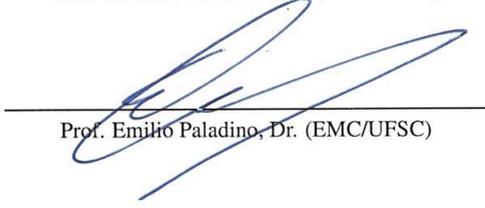
---

Prof. Agostinho Plucenio, Dr. (DAS/UFSC)



---

Prof. Rodolfo C. Flesch, Dr. (DAS/UFSC)



---

Prof. Emilio Paladino, Dr. (EMC/UFSC)



# AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A Força-Que-Nunca-Seca  
Vivente no infinito de cada e  
Todas as coisas.

A minha Mãe que sem  
Compreender o universo exato,  
Sempre disse o certo.

A Senbastián...  
Por ser...  
Por estar...  
E por permanecer.

A Agustinho Plucenio e a Daniel J. Pagano, meu Pai-Acadêmico,  
Por me ajudarem a trilhar  
O meu caminho em busca  
Do conhecimento.

Aos meus queridos Amigos-Companheiros-Colegas-Conhecidos  
Que, por vezes, perdem-se em meus pensamentos,  
Mas que sempre estarão em mim.

R A S E C S H A N A M G  
A V S A L G U O D L A I  
F A B I O T A M W I C L  
A N A S S E N A V N E X  
E D K I K A I R P E A P  
L R O N E J R C O N C N  
O E M A I I A E I E I O  
R F E T L N M L B G N S  
A E D U A R D O I A O B  
C J U L I A N H C H M O  
E Z I O E L E I N A D R



Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

# **TOMOMETRIA CAPACITIVA APLICADA À MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE ÁGUA EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

**Francisco Rafael Moreira da Mota**

Dezembro/2015

Orientador: Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.

Área de Concentração: Controle, Automação e Sistemas

Palavras-chave: Tomometria, tomografia elétrica capacitiva, eletrodos rotativos, algoritmos de reconstrução de imagem

Nesta tese é abordado o problema de medição de fração volumétrica de água em escoamentos estratificados de óleo e água utilizando técnicas capacitivas. A tomografia por capacitância elétrica (*Electrical Capacitance Tomography* - ECT) e estratégia de combinação de eletrodos serviram como base teórica fundamental para o desenvolvimento de uma nova técnica de medição denominada Tomometria Capacitiva Elétrica (*Electrical Capacitance Tomometry* - ECTM). O termo tomometria foi escolhido, pois o método é baseado em múltiplas medições ou medições (medida, *metria*) por partes (*tomo*). Tal técnica apresenta-se como uma solução para contornar alguns dos problemas referentes à medição de fração volumétrica em aplicações de tempo real. Inicialmente, é apresentada uma metodologia para o projeto do sensor com base no aumento da sensibilidade e um protótipo é construído. Posteriormente, uma série de simulações e experimentos estáticos e dinâmicos são realizados, confrontando os resultados com aqueles obtidos aplicando-se ECT.



Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in System and Automation Engineering.

# **CAPACITANCE TOMOMETRY APPLIED TO WATER VOLUME FRACTION MEASUREMENT IN TWO-PHASE FLOW**

**Francisco Rafael Moreira da Mota**

December/2015

Advisor: Prof. Daniel Juan Pagano, Dr.

Area of Concentration: Control, Automation and Systems

Key words: Tomometry, electrical capacitance tomography, rotating electrodes, image reconstruction algorithms

This thesis presents the problem of water volume fraction measurement in stratified oil-water two-phase flow using capacitance techniques. The electrical capacitance tomography (ECT) and the combining electrode strategy are used as theoretical tools for developing a new measurement technique named Electrical Capacitance Tomometry (ECTM). This technique comes up as a solution to overcome some problems related to volume fraction measurement in real-time applications. Initially, are presented a methodology for sensor design based on sensitivity optimization and a prototype sensor is built. Then, simulations and dynamic and static experiments are carried out, comparing the results with those obtained by applying ECT.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.1.1	Medição de Fração Volumétrica por Técnicas Capacitivas . . .	2
1.1.2	Estratégia de Combinação de Eletrodos . . . . .	4
1.2	Motivação e Objetivos . . . . .	5
1.3	Contribuições . . . . .	7
1.4	Organização da Tese . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Fundamentos de Sensores Capacitivos</b>	<b>9</b>
2.1	Introdução . . . . .	9
2.1.1	Tomografia Elétrica Capacitiva . . . . .	11
2.2	Conceitos Básicos . . . . .	12
2.2.1	Princípio Físico . . . . .	12
2.2.2	Campos do Tipo <i>Hard</i> e <i>Soft-field</i> . . . . .	16
2.2.3	Modelos de Normalização . . . . .	18
2.2.4	Mapas de Sensibilidade . . . . .	23
2.2.5	Parâmetros para Avaliação da Sensibilidade . . . . .	26
2.3	Projeto de Sensores . . . . .	28
2.3.1	Material e Espessura da Parede . . . . .	30
2.3.2	Configuração e Número de Eletrodos . . . . .	31
2.3.3	Comprimento Axial dos Eletrodos . . . . .	34
2.3.4	Eletrodos Internos ou Externos . . . . .	35
2.3.5	Malhas de Aterramento . . . . .	36

2.3.6	Eletrodos de Guarda . . . . .	37
2.3.7	Diâmetro do sensor . . . . .	38
2.4	Dependência do Padrão de Escoamento . . . . .	38
2.5	Efeito da Frequência do Sinal de Excitação, Temperatura e Condutividade dos Fluidos . . . . .	42
2.6	Circuitos para Medição de Capacitância . . . . .	45
2.6.1	Circuito de Carga e Descarga . . . . .	45
2.6.2	Circuito Baseado em CA . . . . .	45
2.7	Algoritmos para Reconstrução de Imagem . . . . .	47
2.7.1	Retro Projeção Linear . . . . .	48
2.7.2	Landweber Iterativo . . . . .	49
2.8	Considerações Finais . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Projeto do Sensor e Método de Medição Proposto</b>	<b>55</b>
3.1	Introdução . . . . .	55
3.2	Configuração Geral dos Sensor . . . . .	55
3.3	Capacitância entre Eletrodos . . . . .	57
3.4	Análise da Influência dos Parâmetros de Projeto sobre a Sensibilidade do Sensor . . . . .	59
3.4.1	Validação do Modelo . . . . .	59
3.4.2	Efeito da Parede do Duto Isolante . . . . .	61
3.4.3	Efeito do Comprimento Angular . . . . .	63
3.4.4	Efeito da Malha de Aterramento Axial . . . . .	66
3.4.5	Efeito da Malha de Aterramento Externa . . . . .	68
3.5	Método de Medição e Cálculo da Fração Volumétrica de Água . . . . .	71
3.6	Sistema de Medição Proposto . . . . .	72
3.6.1	Influência do Acoplamento Sensor-Tubulação . . . . .	73
3.6.2	Sensor Construído . . . . .	75
3.6.3	Módulo de Controle de Chaveamento e Medição . . . . .	78
3.6.4	DAQ e Implementação do Método de Medição . . . . .	80
3.7	Considerações Finais . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Resultados de Simulação</b>	<b>85</b>
4.1	Introdução . . . . .	85

4.2	Perfis de Capacitância . . . . .	85
4.3	Distribuição e Matriz de Sensibilidade . . . . .	87
4.4	Cálculo da Fração de Água em Esc. Estratificado Óleo-Água . . . . .	90
4.5	Dependência do Padrão de Escoamento . . . . .	99
4.6	Considerações Finais . . . . .	102
<b>5</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>107</b>
5.1	Introdução . . . . .	107
5.2	Experimentos Estáticos . . . . .	107
5.2.1	Procedimento Experimental . . . . .	107
5.3	Experimentos Dinâmicos . . . . .	110
5.3.1	Unidade Experimental de Escoamento Multifásico . . . . .	111
5.4	Considerações Finais . . . . .	112
<b>6</b>	<b>Conclusões e Sugestões</b>	<b>117</b>
<b>A</b>	<b>Perfis de Capacitância</b>	<b>121</b>
<b>B</b>	<b>Perfis de Capacitância Normalizadas</b>	<b>127</b>
<b>C</b>	<b>Imagens Reconstruídas</b>	<b>133</b>



# Lista de Figuras

1.1	Princípio da estratégia de combinação de eletrodos: duas possíveis combinações de eletrodos. Adaptado de Olmos <i>et al.</i> [37] . . . . .	5
2.1	Ilustração dos componentes de um sistema de medição capacitivo. Adaptado de Demori <i>et. al</i> [9] . . . . .	10
2.2	Capacitâncias medidas entre eletrodos para um sensor com 12 eletrodos.	16
2.3	Esquema representativo do comportamento do campo gerado usando-se sensores do tipo <i>soft-field</i> (a) e <i>hard-field</i> (b). . . . .	17
2.4	Representação do modelo em paralelo. Esquema da distribuição em paralelo (a) e distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico obtidas por simulação. . . . .	19
2.5	Representação do em modelo série. Esquema da distribuição em série (a) e distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico obtidas por simulação. . . . .	20
2.6	Representação do modelo de combinação em paralelo-série. Esquema da distribuição em paralelo-série (a) e distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico obtidas por simulação. . . . .	22
2.7	Capacitância normalizada obtida utilizando os modelos em paralelo, em série, em paralelo-série e de Maxwell. . . . .	22
2.8	Seção transversal de um sensor com 8 eletrodos dividida 856 píxeis. . . . .	24
2.9	Mapas de sensibilidade para um sensor com 12 eletrodos. Par 1-2 (a), par 1-3 (b), par 1-4 (c), par 1-5 (d), par 1-6 (e) e par 1-7 (f) . . . . .	27
2.10	Ilustração de uma configuração típica para sensores capacitivos . . . . .	29
2.11	Configuração dos eletrodos. (a) Placas planas, (b) Placas côncavas, (c) Placas côncavas escalonadas, (d) Helicoidal com 2 eletrodos, (e) Helicoidal multi eletrodos, (f) Placa côncava multi eletrodo, (g) Unidirecional, (h) Anéis e (i) Multi anéis. Adaptado de Sami <i>et al.</i> [45] e Kendoush e Sarkis [25] . . . . .	32

2.12	Efeito do comprimento dos eletrodos de placa côncava. Adaptado de Kendoushi e Sarkis [25] . . . . .	35
2.13	Malhas de aterramento e efeito da malha de aterramento final no campo elétrico . . . . .	36
2.14	Configuração e efeito dos eletrodos de guarda no campo elétrico. . . . .	37
2.15	Efeito do padrão de escoamento na medição da capacitância. Escoamento água/óleo nos padrões estratificado e anular . . . . .	39
2.16	Efeito do padrão de escoamento na medição da capacitância para diferentes posições dos eletrodos de placas côncavas. Escoamento gás/óleo (a) e gás-água (b) no padrão estratificado. $\Delta C_{av}$ representa a capacitância média, $\Delta C_{0^\circ}$ representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados horizontalmente e $\Delta C_{90^\circ}$ representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados verticalmente. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48] . . . . .	40
2.17	Efeito do padrão de escoamento na medição da capacitância para diferentes posições dos eletrodos helicoidais. Escoamento gás/óleo (a) e gás-água (b) no padrão estratificado. $\Delta C_{av}$ representa a capacitância média, $\Delta C_{0^\circ}$ representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados horizontalmente e $\Delta C_{90^\circ}$ representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados verticalmente. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48] . . . . .	40
2.18	Efeito do padrão de escoamento gás-óleo na medição da capacitância. (a) sensor de placas côncavas e (b) sensor helicoidal $180^\circ$ . Adaptado de Tollefsen e Hammer [48] . . . . .	41
2.19	Efeito do padrão de escoamento gás-água na medição da capacitância. (a) sensor de placas côncavas e (b) sensor helicoidal $180^\circ$ . $H$ representa os eletrodos posicionados horizontalmente e $V$ representa os eletrodos posicionados verticalmente. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48] . . . . .	41
2.20	Comparação da distribuição de sensibilidade. (a) sensor helicoidal, (b) sensor helicoidal com aterramento axial e (c) sensor de placas côncavas. Adaptado de Ye <i>et al.</i> [66] . . . . .	42
2.21	Ângulo de fase e impedância do sensor em função da frequência de oscilação do sinal de excitação. Adaptado de Elkon e Reskallah [15] . . . . .	43
2.22	Efeito da temperatura sobre a capacitância medida em escoamento monofásico de água. (a) sensor de placas côncavas e (b) sensor helicoidal. Adaptado de Elkon e Reskallah [15] . . . . .	44
2.23	Efeito da condutividade da água na capacitância medida em função da fração volumétrica de água (a) e da frequência de chaveamento do circuito de carga e descarga (b). Adaptado de Huang <i>et al.</i> [20] . . . . .	44

2.24	Circuito de medição por Carga/Descarga. (a) Circuito com capacitância parasita; (b) Sinal de Chaveamento. Adaptado de Yang [57] . . . . .	46
2.25	Circuito de medição baseado em CA. Adaptado de Yang [57] . . . . .	46
2.26	Reconstrução do escoamento laminar usando o algoritmo LBP. (a) imagem real, (b) imagem reconstruída e (c) vista 3D. . . . .	49
2.27	Reconstrução do escoamento laminar usando Landweber. (a) imagem real, (b) imagem reconstruída e (c) vista 3D. . . . .	53
3.1	Ilustração das vistas frontal e lateral de um sensor capacitivo com 4 eletrodos. . . . .	56
3.2	Comparação entre os valores de capacitância medidos por Flores <i>et al.</i> [17] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa $\epsilon = 1,7$ . $EQMN = 0,1920$ . . . . .	60
3.3	Comparação entre os valores de capacitância medidos por Flores <i>et al.</i> [17] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa $\epsilon = 1$ . $EQMN = 0,2248$ . . . . .	61
3.4	Comparação entre os valores de capacitância medidos por Alme <i>et al.</i> [2] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa $\epsilon = 2$ . $EQMN = 0,1142$ . . . . .	61
3.5	Comparação entre os valores de capacitância medidos por Alme <i>et al.</i> [2] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa $\epsilon = 1$ . $EQMN = 0,0690$ . . . . .	62
3.6	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a) $D_e = 1,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 5,0\text{mm}$ . $\theta = 150^\circ$ e $\phi = 15^\circ$ . . . . .	63
3.7	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a) $D_e = 1,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 5,0\text{mm}$ . $\theta = 80^\circ$ e $\phi = 4^\circ$ . . . . .	63
3.8	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a) $D_e = 1,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 5,0\text{mm}$ . $\theta = 40^\circ$ e $\phi = 1^\circ$ . . . . .	64
3.9	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a) $D_e = 1,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 5,0\text{mm}$ . $\theta = 25^\circ$ e $\phi = 1^\circ$ . . . . .	64
3.10	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a) $\theta = 30,0^\circ$ e $\phi = 148,0^\circ$ . (b) $\theta = 150,0^\circ$ e $\phi = 15,0^\circ$ . . . . .	65
3.11	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a) $\theta = 20,0^\circ$ e $\phi = 148,0^\circ$ . (b) $\theta = 80,0^\circ$ e $\phi = 68,0^\circ$ . . . . .	65
3.12	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a) $\theta = 10,0^\circ$ e $\phi = 33,0^\circ$ . (b) $\theta = 40,0^\circ$ e $\phi = 3,0^\circ$ . . . . .	66
3.13	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a) $\theta = 10,0^\circ$ e $\phi = 18,0^\circ$ . (b) $\theta = 25,0^\circ$ e $\phi = 3,0^\circ$ . . . . .	66

3.14	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a) $\theta = 150,0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ . (b) $\theta = 150,0^\circ$ e $\phi = 15,0^\circ$ . . . . .	67
3.15	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a) $\theta = 80,0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ . (b) $\theta = 80,0^\circ$ e $\phi = 4,0^\circ$ . . . . .	68
3.16	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a) $\theta = 40,0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ . (b) $\theta = 40,0^\circ$ e $\phi = 2,0^\circ$ . . . . .	68
3.17	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a) $\theta = 25,0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ . (b) $\theta = 25,0^\circ$ e $\phi = 2,0^\circ$ . . . . .	68
3.18	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a) $D_e = 7,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 12,0\text{mm}$ . $\theta = 150,0^\circ$ e $\phi = 15,0^\circ$ . . . . .	69
3.19	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a) $D_e = 2,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 12,0\text{mm}$ . $\theta = 80,0^\circ$ e $\phi = 4,0^\circ$ . . . . .	70
3.20	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a) $D_e = 2,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 12,0\text{mm}$ . $\theta = 40,0^\circ$ e $\phi = 1,0^\circ$ . . . . .	70
3.21	Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a) $D_e = 2,0\text{mm}$ e (b) $D_e = 12,0\text{mm}$ . $\theta = 25,0^\circ$ e $\phi = 1,0^\circ$ . . . . .	70
3.22	Duas diferentes combinações para o sistema ECTM. . . . .	71
3.23	Ilustração da técnica de medição implementada no sistema ECTM. . . . .	72
3.24	Ilustração do sistema de tomometria capacitiva elétrica. . . . .	73
3.25	Sistema ECTM. (1) sensor capacitivo, (2) computador, (3) módulo de aquisição e condicionamento de sinais, (4) gerador de onda senoidal e (5) módulo de controle de chaveamento e medição. . . . .	73
3.26	Influência do acoplamento sensor-tubulação e da variação de $L_2$ na capacitância medida. Duto isolante com comprimento de 1m. . . . .	74
3.27	Influência do acoplamento sensor-tubulação e da variação de $L_2$ na capacitância medida. Duto isolante com comprimento de 0,5m. . . . .	75
3.28	Influência do acoplamento sensor-tubulação e da variação de $L_2$ na capacitância medida. Duto isolante com comprimento de 0,3m. . . . .	75
3.29	Sensor desenvolvido. (a) Projeto CAD, (b) protótipo e (c) protótipo instalado na tubulação. . . . .	77
3.30	Diagrama para implementação do módulo de controle de chaveamento e medição. . . . .	78
3.31	Módulo de controle de chaveamento e medição. . . . .	79
3.32	Diagrama de blocos do sistema ECTM. . . . .	80
3.33	Implementação do sub-bloco de comando, medição e condicionamento no ambiente LabView-National Instruments. . . . .	81
3.34	Implementação do sub-bloco de cálculo das capacitâncias. . . . .	82

3.35	Implementação do sub-bloco de normalização das capacitâncias. . . . .	83
3.36	Implementação do algoritmo LBP. . . . .	83
3.37	Implementação do algoritmo de Landweber com valor inicial dado pelo algoritmo LBP. . . . .	84
4.1	Modelo numérico para avaliação do método ECTM. (a) geometria 2D , (b) malha 2D e (c) distribuição do campo elétrico para o sensor ECTM. . . . .	86
4.2	Valores de capacitância (em pF) para o sensor ECT. . . . .	86
4.3	Valores de capacitância para o sensor ECTM. . . . .	87
4.4	Distribuição de sensibilidade para o sensor ECT. Par de eletrodo adjacentes. . . . .	88
4.5	Distribuição de sensibilidade para o sensor ECT. Par de eletrodos opostos. . . . .	89
4.6	Distribuição de sensibilidade para o sensor ECTM. Configuração 1: eletrodos 1-6 como emissor e eletrodos 7-12 como receptor. . . . .	89
4.7	Matriz de sensibilidade para ECT. . . . .	90
4.8	Matriz de sensibilidade para o sensor ECTM. . . . .	90
4.9	Ilustração dos escoamentos utilizados para avaliação do desempenho do método ECTM. O escoamento para 0% de água não está representado, mas também foi utilizado na avaliação. . . . .	91
4.10	Perfil de capacitância obtido pelo método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações. . . . .	92
4.11	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações. . . . .	92
4.12	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações. . . . .	93
4.13	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações. . . . .	93
4.14	Perfil de permissividade normalizada obtido pelo método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações. . . . .	94
4.15	Perfil de permissividade normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações. . . . .	94
4.16	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações. . . . .	95
4.17	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações. . . . .	95

4.18	Fração volumétrica obtido pelos métodos ECT e ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água com diferentes números de iterações. . . . .	96
4.19	Capacitância média para frações de 0% a 100% de água utilizando o método ECTM. 3 iterações. . . . .	96
4.20	Capacitância média normalizada para frações de 0% a 100% de água utilizando o método ECTM com diferentes modelos de normalização. . . . .	97
4.21	Fração volumétrica de água calculada utilizando o método ECTM. 3 iterações. . . . .	97
4.22	Comparação entre os erros absolutos obtidos pelos métodos ECT e ECTM. 3 iterações . . . . .	98
4.23	Valores de fração volumétrica de água obtidos utilizando o método ECTM com diferentes modelos de normalização. . . . .	98
4.24	Diferentes distribuições de permissividade para 10% de fração de água. Distribuição em lâminas. . . . .	99
4.25	Diferentes distribuições de permissividade para 10% de fração de água. Distribuição em círculos. . . . .	100
4.26	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 10%. Distribuições representadas nas Fig. 4.24 . . . . .	100
4.27	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 10%. Distribuições representadas nas Fig. 4.25 . . . . .	101
4.28	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 20%. Distribuição em lâminas. . . . .	101
4.29	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 20%. Distribuição em círculos. . . . .	102
4.30	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 30%. Distribuição em lâminas. . . . .	102
4.31	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 30%. Distribuição em círculos. . . . .	103
4.32	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 40%. Distribuição em lâminas. . . . .	103
4.33	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 40%. Distribuição em círculos. . . . .	104
4.34	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 50%. Distribuição em lâminas. . . . .	104

4.35	Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 50%. Distribuição em círculos. . . . .	105
5.1	Montagem para realização dos experimentos estáticos. Sensor ETCM (1), Conector BNC (2), módulo de controle de chaveamento e medição (3) e gerador de função senoidal (4). . . . .	108
5.2	Valores de fração volumétrica de água medidos utilizando-se o sistema ECTM. Distribuição estratificada de óleo e água. . . . .	109
5.3	Erro absoluto referentes aos valores de fração de água medidos pelo sistema ECTM. Distribuição estratificada de óleo e água. . . . .	109
5.4	Software supervisor e identificação dos instrumentos e equipamentos da UEEM. . . . .	112
5.5	Montagem para realização dos experimentos dinâmicos. Sensor ETCM (1), Conector BNC (2), módulo de controle de chaveamento e medição (3) e gerador de função senoidal (4). . . . .	113
5.6	Valores de fração volumétrica de água obtidos experimentalmente. Escoamento estratificado de ar comprimido e água. . . . .	114
5.7	Erro absoluto referentes aos valores de fração de água medidos pelo sistema ECTM. Escoamento estratificado de ar comprimido e água. . . . .	114
5.8	Exemplo de valores de fração volumétrica de água medidos durante o experimento dinâmico. . . . .	115
A.1	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 0% de água. 3 iterações. . . . .	121
A.2	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 10% de água. 3 iterações. . . . .	122
A.3	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 20% de água. 3 iterações. . . . .	122
A.4	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 30% de água. 3 iterações. . . . .	123
A.5	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 40% de água. 3 iterações. . . . .	123
A.6	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações. . . . .	124
A.7	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 60% de água. 3 iterações. . . . .	124
A.8	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 70% de água. 3 iterações. . . . .	125

A.9	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 80% de água. 3 iterações. . . . .	125
A.10	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 90% de água. 3 iterações. . . . .	126
A.11	Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 100% de água. 3 iterações. . . . .	126
B.1	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 0% de água. 3 iterações. .	127
B.2	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 10% de água. 3 iterações.	128
B.3	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 20% de água. 3 iterações.	128
B.4	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 30% de água. 3 iterações.	129
B.5	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 40% de água. 3 iterações.	129
B.6	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.	130
B.7	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 60% de água. 3 iterações.	130
B.8	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 70% de água. 3 iterações.	131
B.9	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 80% de água. 3 iterações.	131
B.10	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 90% de água. 3 iterações.	132
B.11	Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 100% de água. 3 iterações.	132
C.1	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 0% de água. 3 iterações. . . . .	133
C.2	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 10% de água. 3 iterações. . . .	134
C.3	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 20% de água. 3 iterações. . . .	134
C.4	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 30% de água. 3 iterações. . . .	135

C.5	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 40% de água. 3 iterações. . . .	135
C.6	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações. . . .	136
C.7	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 60% de água. 3 iterações. . . .	136
C.8	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 70% de água. 3 iterações. . . .	137
C.9	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 80% de água. 3 iterações. . . .	137
C.10	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 90% de água. 3 iterações. . . .	138
C.11	Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 100% de água. 3 iterações. . . .	138



# Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros utilizados como base. . . . .	57
3.2	Possíveis medições de capacitância entre eletrodos. . . . .	58
3.3	Parâmetros utilizados para a validação do modelo. . . . .	60
3.4	Parâmetros utilizados como base para variação da espessura da parede. . . . .	62
3.5	Valores de $Sp$ para diferentes valores de espessura da parede do duto isolante. Diâmetros dados em milímetros . . . . .	62
3.6	Parâmetros utilizados como base para variação do comprimento angular ( $\theta$ ) do eletrodo. . . . .	64
3.7	Valores de $Sp$ para diferentes valores de comprimento angular ( $\theta$ ) dos eletrodos. . . . .	65
3.8	Parâmetros utilizados como base para variação do comprimento angular ( $\phi$ ) do eletrodo de aterramento axial. . . . .	66
3.9	Valores de $Sp$ para diferentes valores de comprimento angular ( $\phi$ ) dos eletrodos de aterramento axial. . . . .	67
3.10	Parâmetros utilizados como base para variação da malha de blindagem. . . . .	69
3.11	Valores de $Sp$ para diferentes valores de $D_e$ . Diâmetros dados em $mm$ . . . . .	69
3.12	Parâmetros selecionados para o sensor de medição de fração de água. Raios e comprimentos dados em milímetros . . . . .	77
3.13	Estado das chaves para a configuração na qual o grupo de eletrodos 1-6 está no modo emissor e o grupo de eletrodos 7-12 está no modo receptor . . . . .	79
3.14	Sequência de comando para controle das chaves e interconexão e modo emissor/receptor. Nível lógico: 0, nível baixo e 1, nível lógico alto. . . . .	81
3.15	Valores dos parâmetros utilizados no circuito de medição. . . . .	82

5.1	Características elétricas dos fluidos utilizados. Temperatura igual a $25^{\circ}C$ . . . . .	108
5.2	Valores de fração volumétrica e erro absoluto obtidos por simulação e experimento . . . . .	110
5.3	Características elétricas dos fluidos utilizados para os experimentos dinâmicos. Temperatura igual a $25^{\circ}C$ . . . . .	110
5.4	Valores de fração volumétrica e erro absoluto obtidos nos experimentos dinâmicos . . . . .	115

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ECT	:	<i>Electrical Capacitance Tomography, (Tomografia Capacitiva Elétrica)</i>
ECTM	:	<i>Electrical Capacitance Tomometry, (Tomométrica Capacitiva Elétrica)</i>
FEM	:	<i>Finite Element Method, (Método dos Elementos Finitos)</i>
CC	:	<i>Corrente Contínua</i>
CA	:	<i>Corrente Alternada</i>
LBP	:	<i>Linear Back Projection, (Retro Projeção Linear)</i>
SNR	:	<i>Signal to Noise Ratio, (Relação Sinal Ruído)</i>
UEEM	:	<i>Unidade Experimental de escoamento Multifásico</i>



# Lista de Símbolos

## Capítulo 1

- $\Theta$  : *fração volumétrica do componente de maior permissividade*  
 $P$  : *número total de píxeis*  
 $\hat{g}$  : *permissividade relativa normalizada estimada*  
 $\hat{g}^h$  : *permissividade relativa normalizada do componente de maior permissividade*  
 $M$  : *número de medições independentes*  
 $\lambda$  : *capacitância normalizada*  
 $\lambda^h$  : *capacitância normalizada do componente de maior permissividade*

## Capítulo 2

- $\mathbf{E}$  : *campo elétrico*  
 $\mathbf{H}$  : *campo magnético*  
 $\mathbf{B}$  : *fluxo magnético*  
 $\mathbf{D}$  : *densidade de fluxo elétrico*  
 $\mathbf{J}$  : *densidade de corrente*  
 $\rho$  : *cargas*  
 $\mu$  : *permeabilidade*  
 $\epsilon$  : *permissividade relativa*  
 $\epsilon_m$  : *permissividade relativa medida*  
 $\sigma$  : *condutividade*

$\phi$	: potencial elétrico
$\phi_e$	: potencial elétrico do eletrodo emissor
$\phi_r$	: potencial elétrico do eletrodo receptor
$\phi_b$	: potencial elétrico da blindagem
$\phi_g$	: potencial elétrico do eletrodo de guarda
$C$	: capacitância
$C^m$	: capacitância medida
$C^h$	: capacitância medida, sensor cheio com o material de mais alta permissividade relativa
$C^l$	: capacitância medida, sensor cheio com o material de mais baixa permissividade relativa
$q$	: carga no eletrodo
$u$	: diferença de potencial
$\Gamma$	: localização espacial dos eletrodos
$\Gamma_e$	: localização espacial dos eletrodos emissores
$\Gamma_r$	: localização espacial dos eletrodos receptores
$\Gamma_b$	: localização espacial da blindagem
$\Gamma_g$	: localização espacial dos eletrodos de guarda
$M$	: número de medições
$n$	: número de eletrodos
$\lambda$	: capacitância normalizada, modelo em paralelo
$\zeta$	: capacitância normalizada, modelo em série
$\phi$	: capacitância normalizada, modelo de Maxwell
$\delta$	: capacitância normalizada, modelo em série-paralelo
$\alpha$	: coeficiente do modelo de combinação
$\xi$	: função não linear
$s$	: sensibilidade do sensor
$S$	: matriz de sensibilidade
$g$	: vetor de permissividade relativa normalizada
$S_{i,j}$	: vetor de sensibilidade para o par de eletrodos $i, j$
$S_{i,j}^{avg}$	: sensibilidade média para o par de eletrodos $i, j$
$S_{i,j}^{dev}$	: desvio padrão para o par de eletrodos $i, j$
$Sp_{i,j}$	: parâmetro de avaliação da sensibilidade para o par de eletrodos $i, j$
$Sp$	: parâmetro de avaliação da sensibilidade global
$D_e$	: diâmetro externo
$L_e$	: comprimento do eletrodo
$V$	: tensão
$V_e, V_i$	: tensão de alimentação
$V_o$	: tensão de saída
$C_X$	: capacitância desconhecida

- $f$  : frequência de alimentação  
 $R_f$  : resistor de realimentação  
 $C_f$  : capacitor de realimentação  
 $K$  : ganho  
 $\mathbf{R}$  : matriz residual  
 $\mathbf{A}_0$  : aproximação inicial da inversa da matriz de sensibilidade  
 $\mathbf{I}$  : matriz identidade  
 $\delta_{max}$  : máximo autovalor do produto  $\mathbf{S}^T \mathbf{S}$

### Capítulo 3

- $\theta$  : comprimento angular dos eletrodos  
 $\phi$  : comprimento angular dos eletrodos de aterramento axial  
 $R_1$  : raio interno do duto  
 $R_2$  : raio externo do duto  
 $R_3$  : raio da blindagem  
 $L_1$  : comprimento dos eletrodos  
 $L_2$  : distância entre os eletrodos e o aterramento axial final  
 $L_3$  : comprimento dos eletrodos de aterramento axial final  
ER : chave de comutação emissor/receptor  
S : chave de combinação

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Escoamentos multifásicos são caracterizados pelo escoamento simultâneo de duas ou mais fases que permanecem separadas. Segundo Rosa [43], por fase subentende-se uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que encerra em seu interior um material com composição química homogênea, propriedades de transporte e de estado definíveis e que é separável por processos mecânicos. Esses escoamentos são geralmente classificados de acordo com as fases envolvidas: gás-líquido, gás-sólido, líquido-sólido, líquido-líquido. Na verdade, em situações reais, é frequente a ocorrência de múltiplas fases, tais como escoamentos de óleo-água-gás presentes na produção de petróleo.

No escoamento líquido-líquido (também chamado de sistema líquido-líquido), dois fluidos imiscíveis assumem diversas configurações (ou arranjos geométricos) dentro da tubulação devido à diferença de viscosidade e de densidade; essas configurações são denominadas padrões de escoamento. Os padrões diferenciam-se na distribuição espacial e na posição da interface, resultando em diferentes características de escoamento, tais como velocidade de escorregamento, fração volumétrica e gradientes de pressão. Esses arranjos dependem de variáveis como as vazões de cada fase, geometria e orientação (horizontal, vertical ou inclinado) do duto e propriedades físicas dos líquidos envolvidos [43].

Um importante parâmetro quando se estuda qualquer sistema multifásico é a fração volumétrica de fase, que é definida como a razão entre o

volume ocupado por uma fase específica (água ou óleo, por exemplo) e o volume total da mistura. É um parâmetro fundamental que aparece na maioria dos modelos de escoamento e frequentemente aplicado nos cálculos de queda de pressão e de vazão, em rotinas para identificação de padrão, no controle de processos em plantas de produção química, no transporte de misturas óleo-gás, em equipamentos de transferência de calor onde há mudança de fase e nos sistemas de resfriamento de reatores [13, 44].

Várias técnicas para a medição da fração volumétrica foram desenvolvidas e estão sendo utilizadas principalmente como parte integrante de medidores multifásicos para a indústria de petróleo, tais como técnicas baseadas em absorção radioativa (raios X e gama) e técnicas baseadas em impedância elétrica (resistiva e capacitiva).

### 1.1.1 Medição de Fração Volumétrica por Técnicas Capacitivas

O princípio dos métodos capacitivos baseia-se na diferença entre as constantes dielétricas (permissividades relativas) das fases no escoamento e na capacitância medida através do sensor que depende da fração volumétrica das fases. No entanto, como apontado por Ahmed [1], há alguns desafios na utilização das técnicas capacitivas. Por exemplo, a medição da capacitância é afetada pelo padrão de escoamento devido à não uniformidade do campo elétrico na região sensível do sensor. As medições são afetadas pelas mudanças nas propriedades elétricas dos fluidos devido à temperatura. Outro problema diz respeito ao ruído devido ao campo eletromagnético ao redor do sensor e às capacitâncias parasitas.

Diversos autores têm buscado a solução (ou ao menos a amenização) dos problemas acima citados. A influência do padrão de escoamento pode ser diminuída por meio da otimização do projeto do sensor. Merilo *et. al* [34] e Lucas e Simonian [30] propuseram utilizar sensores com eletrodos rotativos; Geraets e Borst [18] e Elkon e Rezkallah [15] utilizaram eletrodos helicoidais. Várias configurações diferentes de eletrodos para sensores capacitivos têm sido largamente investigadas, tais como eletrodos de placa plana, côncavo, helicoidal, helicoidal múltiplo, mas ainda há poucos estudos dirigidos à otimização do projeto ou, por exemplo, para aumentar a relação sinal-ruído dessas configurações. Outra proposta para solucionar os problemas encontrados na aplicação dos sensores capacitivos consiste na utilização dos sistemas de tomografia capacitiva elétrica [23].

## Tomografia Capacitiva Elétrica

Tomografia Capacitiva Elétrica (*Electrical Capacitance Tomography-ECT*) é uma técnica atualmente muito utilizada, na qual se analisa a distribuição de permissividade relativa que está associada a distribuição das fases em um escoamento multifásico, através da medição das capacitâncias de um sistema com eletrodos montados ao redor de um tubo não condutor. Os sistemas ECT são usados para se obterem imagens da distribuição de permissividade no interior do sensor para qualquer mistura de materiais com diferentes permissividades.

Flores *et. al* [17] definiram ECT como uma técnica que consiste em fixar um determinado número de eletrodos (geralmente 8, 12 ou 16 eletrodos) ao redor de um duto ou vaso feito de material isolante, contendo o processo que vai ser visualizado e, através do uso de uma ferramenta adequada (hardware para excitação, medição e tratamento de sinais), medir todos os valores de capacitâncias entre os pares de eletrodos. As medições obtidas dependem do valor da constante dielétrica (permissividade relativa) das diferentes fases ou componentes da mistura e do arranjo geométrico das mesmas (padrão de escoamento). O próximo passo é obter uma imagem da distribuição de permissividade relativa através das medidas de capacitância, por meio de um algoritmo adequado de reconstrução de imagem.

Em um sensor ECT típico, usa-se, geralmente, um grid quadrangular de  $32 \times 32$  pixels para amostrar a distribuição de permissividade relativa na seção transversal. Para um sensor de geometria circular, 812 pixels (por exemplo) são usados para discretizar a seção. O valor de cada pixel representa o valor normalizado da permissividade relativa desse pixel. No caso de uma mistura de dois materiais dielétricos, esses valores de permissividade estão relacionados com a fração volumétrica do material de mais alta permissividade naquele pixel.

A fração volumétrica sobre toda a seção transversal também pode ser obtida. Ela é definida como sendo a porcentagem do volume do sensor que está ocupada pelo material de mais alta permissividade.

Em ECT, a fração volumétrica pode ser obtida a partir dos valores normalizados de cada pixel na imagem reconstruída ou, diretamente, a partir das capacitâncias normalizadas medidas.

No caso do cálculo a partir dos pixels da imagem, a fração é calculada somando-se os valores de cada pixel da imagem dividido pelo seu respectivo valor quando o sensor está inteiramente ocupado pelo material de mais alta permissividade, ou seja:

$$\Theta = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \left( \frac{\hat{g}(i)}{\hat{g}^h(i)} \right) \quad (1.1)$$

em que  $\Theta$  representa a fração volumétrica do componente de maior permissividade,  $P$  representa o número total de pixeis,  $\hat{g}(i)$  representa o valor da permissividade relativa do  $i$ -ésimo pixel e  $\hat{g}^h(i)$  representa o valor da permissividade relativa do  $i$ -ésimo pixel quando o sensor está inteiramente ocupado pelo material de mais alta permissividade (normalmente,  $\hat{g}^h(i) = 1$ ).

No caso do cálculo a partir da medições de capacitância normalizada entre eletrodos, a fração volumétrica é obtida somando todos os valores de capacitância normalizada divididos pela capacitância normalizada medida para o sensor inteiramente ocupado pelo material de maior permissividade.

$$\Theta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\lambda(i)}{\lambda^h(i)} \right) \quad (1.2)$$

em que  $M$  representa o número de medições independentes de capacitância entre eletrodos,  $\lambda(i)$  representa a capacitância normalizada para um determinado par de eletrodos e  $\lambda^h(i)$  representa a capacitância normalizada do par de eletrodos quando o sensor se encontra completamente cheio de material de maior permissividade (normalmente  $\lambda^h(i) = 1$ ).

### 1.1.2 Estratégia de Combinação de Eletrodos

A estratégia de combinação de eletrodos (*Electrode Combining Strategy*), tal como apresentada por Polydorides [41, 42], consiste em uma configuração relativamente simples na qual um determinado número de pequenos eletrodos (denominados de seguimentos) são fixados à parede do duto isolante, cobrindo ao menos 80% da sua superfície. Invés de tratá-los da forma convencional (eletrodos individuais), eles são temporariamente interconectados (combinados) em grupos e usados como eletrodos emissores/receptores.

Na estratégia de combinação de eletrodos, um sensor ECT com um número maior de eletrodos é usado como sensor base; e dois ou mais eletrodos são interconectados formando um único eletrodo que será conectado ao circuito de medição [65]. Diferentemente do método tradicional em que o sinal de excitação é aplicado a apenas um eletrodo por vez, no método de combinação o sinal de excitação é aplicado simultaneamente a múltiplos eletrodos. Os demais eletrodos são usados como receptores, podendo estar interconectados ou não. Uma vez realizadas todas as possíveis medições, uma nova

combinação é feita e todas as novas possíveis medições são realizadas. Essa estratégia aumenta consideravelmente o número de medições independentes de capacitância [67].

Olmos *et al.* [37] usaram a estratégia de combinação em um sensor com 44 seguimentos de maneira a formar um sensor com apenas 4 eletrodos (combinação de 8 eletrodos menores); essa configuração, que tradicionalmente resultaria em apenas 6 medições independentes, ao se aplicar a estratégia de combinação passa a fornecer 66 medições independentes (mesmo número de medições independentes fornecida por um sensor com 12 eletrodos). Como pode ser visto na Fig. 1.1 depois que as 6 medições são realizadas na configuração (a), uma nova combinação é feita na configuração (b) considerando uma rotação de  $\theta$  graus no campo elétrico.

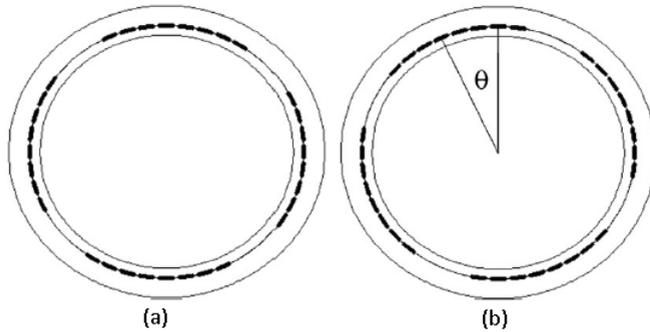


Figura 1.1: Princípio da estratégia de combinação de eletrodos: duas possíveis combinações de eletrodos. Adaptado de Olmos *et al.* [37]

Din *et al.* [11] usaram a estratégia de combinação de eletrodos para avaliar a influência de 7 tipos diferentes de configurações de excitação na distribuição do potencial elétrico em sensores ECT, buscando, dessa maneira, aumentar a sensibilidade na região central do duto. Os resultados obtidos apresentam um aumento de 16,6% (quando comparado com um sensor ECT com estratégia de medição tradicional) da sensibilidade na região central do sensor em questão.

## 1.2 Motivação e Objetivos

Atualmente, os métodos para medição de fração volumétrica utilizando técnicas capacitivas são classificados em dois tipos: métodos conven-

cionais (par de eletrodos ou múltiplos eletrodos) e métodos baseados em reconstrução de imagem (tomografia capacitiva, tomografia resistiva, tomografia eletromagnética e métodos duais que utilizam combinações das anteriores).

A aplicação da ECT para medição de fração volumétrica tem mostrado ótimos resultados. No entanto, ainda se apresenta como um desafio pelos seguintes motivos:

1. **efeito *soft field*** - o campo elétrico gerado sofre a influência da distribuição das fases, ou seja, o campo elétrico sofre uma distorção quando encontra uma interface ou material de permissividade relativa ou condutividade diferente. Isso faz com que a distribuição de sensibilidade na região de interesse (seção transversal do duto) não seja homogênea e caracterizada por alta sensibilidade próximo às paredes do duto e baixa próximo a região central da seção transversal;
2. **mal condicionamento** - a resposta do sensor ECT é dita mal condicionada, ou seja, matematicamente, pequenas variações nas entradas podem causar grandes variações na resposta do sistema, resultando em soluções instáveis. Em termos de solução do problema inverso, o mal condicionamento resulta em um sistema indeterminado, uma vez que o número de variáveis a ser determinadas (permissividade relativa de cada pixel) é maior que o número de medições de capacitância (variáveis conhecidas);
3. **número limitado de medições** - o número de eletrodos que compõem os sensores ECT são limitados; geralmente 8, 12 ou 16 eletrodos são usados. Com o aumento do número de eletrodos, teoricamente, há uma diminuição do mal condicionamento da solução (o número de medições, variáveis conhecidas, aumentam). No entanto, uma vez determinado o diâmetro do duto isolante, o aumento do número de eletrodos resulta em valores ainda menores de capacitância para serem medidos e uma diminuição da relação sinal-ruído;
4. **número de iterações** - os algoritmos de reconstrução utilizados em ECT podem ser diretos ou iterativos. O método Retro-Projeção Linear (*Linear Back Projection* - LBP) é o método direto mais utilizado, mas as imagens reconstruídas são de caráter qualitativo. Para uma melhor medição da fração volumétrica, os algoritmos iterativos são indicados. No entanto, um considerável número de iterações é necessário para a reconstrução fiel do escoamento, impossibilitando a utilização de tais algoritmo em aplicações de tempo real.

Dentro do contexto descrito anteriormente, tem-se por objetivo tratar o problema da medição de fração volumétrica de água em escoamentos bifásicos óleo-água e ar-água utilizando técnicas capacitivas. Para atingir este objetivo faz-se necessário: compreender os efeitos dos parâmetros de projeto na resposta do sensor; desenvolver um método de medição que contorne os problemas encontrados atualmente e construir um protótipo do sistema para validação do método de medição.

## 1.3 Contribuições

Com relação ao uso do ferramental teórico, pode-se destacar como contribuição deste trabalho a utilização da estratégia de combinação de eletrodos com um novo protocolo de excitação que contorna o problema devido à baixa relação sinal-ruído característica dos sensores ECT. Também destaca-se a utilização do algoritmo Landweber iterativo para a solução de um problema com número de variáveis conhecidas ainda menor que aqueles encontrados em aplicações de ECT.

Como principal contribuição, destaca-se o desenvolvimento de um novo método para a medição de fração volumétrica de água denominado Tomometria Capacitiva Elétrica (*Electrical Capacitance Tomometry* - ECTM). O termo tomometria, definido por Isaksen [21], foi escolhido, pois o método é baseado em múltiplas medições, ou medições (medida, *metria*) por partes (*tomo*).

## 1.4 Organização da Tese

O texto desta tese foi organizado da seguinte maneira:

- **Capítulo 2** - nesse capítulo são discutidos, além dos conceitos básicos, cada parâmetro de projeto separadamente, buscando, assim, o completo entendimento dos seus efeitos sobre a capacitância medida. São apresentados os tipos de circuitos que compõem o hardware para medição de capacitância. Também são apresentados os algoritmos de reconstrução LBP e Landweber, conceitos que formam a base teórica da proposta para medição da fração de água desenvolvida nesta tese;
- **Capítulo 3** - nesse capítulo o sistema ECTM é descrito. Inicialmente, apresenta-se o procedimento adotado na simulação numérica para aná-

lise dos efeitos dos parâmetros geométricos de projeto de sensores capacitivos e, a partir dos resultados de simulação, a construção do sensor. Depois, o método de medição e cálculo da fração volumétrica são apresentados, juntamente com os demais componentes do sistema;

- **Capítulo 4** - nesse capítulo apresentam-se uma série de resultados baseados em simulações realizadas utilizando-se os softwares COMSOL Multiphysics e Matlab. Como a base teórica-prática para o desenvolvimento do método ECTM é a tomografia capacitiva elétrica, os resultados apresentados, sempre que possível, são comparados com aqueles obtidos utilizando o método ECT tradicional com 12 eletrodos;
- **Capítulo 5** - nesse capítulo são apresentados os resultados referentes aos experimentos estáticos e dinâmicos para a validação dos resultados de simulação apresentados no Capítulo 4 e avaliação do funcionamento do sistema ECTM frente a situações reais;
- **Capítulo 6** - nesse capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros;
- **Apêndice A** - nesse apêndice são apresentados os perfis de capacitância referentes aos resultados obtidos no Capítulo 4;
- **Apêndice B** - nesse apêndice são apresentados os perfis de capacitância normalizada referentes aos resultados obtidos no Capítulo 4;
- **Apêndice C** - nesse apêndice são apresentadas as imagens de distribuição de permissividade relativa referentes aos resultados obtidos no Capítulo 4.

## Capítulo 2

# Fundamentos de Sensores Capacitivos

### 2.1 Introdução

Em escoamentos multifásicos, as frações volumétricas de cada fase são consideradas parâmetros primários de projeto. Muitos esforços têm sido aplicados para o desenvolvimento (ou aprimoramento) de novas técnicas para a medição de tais parâmetros. Dentre as diversas técnicas disponíveis, as técnicas baseadas em impedância elétrica têm ocupado lugar de destaque, uma vez que são relativamente simples, de baixo custo quando comparadas com as demais técnicas e apresentam robustez frente aos mais variados processos industriais [1] [48] [66] [35].

A impedância elétrica de uma mistura bifásica depende da fração volumétrica de cada fase, desde que essas apresentem diferentes valores de permissividade relativa ou condutividade elétrica. Dependendo de tais características e da configuração dos elementos sensores, a impedância pode ser governada pela condutância, pela capacitância ou por ambas. Caso seja adotada uma configuração não-intrusiva e não-invasiva, ou seja, os eletrodos são fixados externamente ao duto, dá-se preferência ao predomínio da capacitância.

A capacitância medida entre dois eletrodos é função do dielétrico e da distância entre eles e também da área da superfície de cada eletrodo. Entende-se por dielétrico o material isolante que retém parte da energia requerida para

o estabelecimento do campo elétrico através dele quando o campo é removido. A propriedade característica dos dielétricos é a permissividade elétrica, que é a capacidade do dielétrico em permitir o adensamento do fluxo de campo elétrico. A constante dielétrica, ou permissividade, relativa é a relação entre a capacitância observada quando o dielétrico é o material estudado e a capacitância observada quando o dielétrico é o vácuo. O caráter elétrico capacitivo surge, então, ao se aproximar dois materiais condutores (eletrodos), isolados entre si por um dielétrico. A capacitância é, portanto, a capacidade desse conjunto de armazenar cargas elétricas [13].

A Fig. 2.1 representa uma configuração típica de um sensor capacitivo para a medição da fração volumétrica. O sistema é composto basicamente por três módulos: a seção de teste (região do duto na qual são fixados os eletrodos), o circuito de excitação e medição e o módulo de aquisição e visualização das medições.

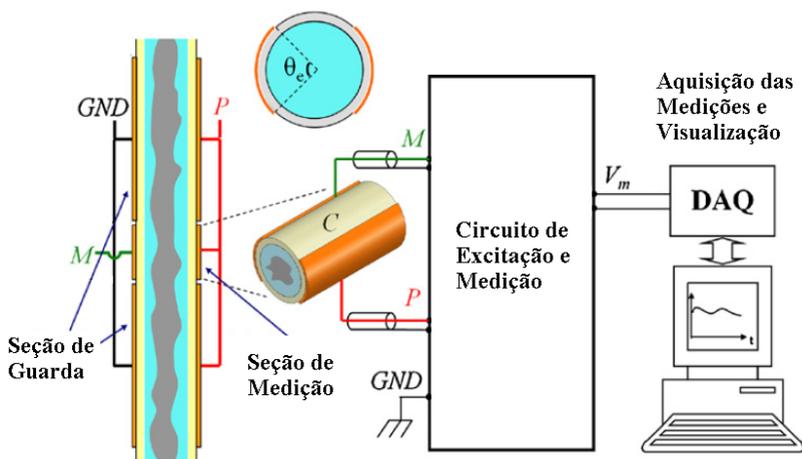


Figura 2.1: Ilustração dos componentes de um sistema de medição capacitivo. Adaptado de Demori *et. al*[9]

Ao se tratar de sensores capacitivos, basta uma rápida leitura das numerosas publicações sobre o tema para notar quanto as medições da capacitância são diretamente afetadas pelos diversos parâmetros de projeto e operacionais. O número, tipo, largura e comprimento dos eletrodos de emissão e recepção, a espessura e o tipo de material da parede do duto, o uso e configuração dos eletrodos de guarda, o uso e configuração da blindagem externa, a frequência do sinal de excitação e, principalmente, o padrão de escoamento

observado devem ser avaliados na etapa de projeto do sensor [53] [59].

Dessa maneira, nas próximas seções deste capítulo serão discutidos, além dos conceitos básicos, cada parâmetro de projeto separadamente, buscando, assim, o completo entendimento dos seus efeitos sobre a capacitância medida. Serão apresentados os tipos de circuitos que compõem o hardware para medição de capacitância. Também serão apresentados os algoritmos de reconstrução LBP e Landweber, conceitos que formam a base teórica da proposta para medição da fração de água desenvolvida nesta tese.

### 2.1.1 Tomografia Elétrica Capacitiva

O termo *Tomografia de Processo Industrial* (TPI) se refere a toda gama de técnicas de visualização não-invasiva. O objetivo da TPI é obter imagens seccionais de processos industriais dinâmicos, para então serem utilizadas para monitoramento, verificação de modelos e para aplicações de controle inteligente. Há diversos tipos de sistemas de tomografia, tais como, tomografia elétrica, ultrassônica, radioativa, micro-ondas e ótica [23].

Um grande número de técnicas envolvendo a medição de propriedades elétricas têm recebido considerável atenção: Tomografia Capacitiva (ECT - *Electrical Capacitance Tomography*), Tomografia Resistiva (ERT - *Electrical Resistance Tomography*) e Tomografia Eletromagnética (EMT - *Electromagnetic Tomography*). A principal desvantagem dessas técnicas é a baixa resolução espacial da imagem resultante, pois ao contrário da tomografia de raio-x, por exemplo, o campo elétrico não pode ser confinado em um feixe direto entre o transmissor e o receptor, dando-lhe uma característica não linear típica de técnicas do tipo *soft-field*.

A ECT, em especial, vem sendo empregada com sucesso na visualização de processos industriais contendo materiais dielétricos. Tem como base a medição das variações de capacitância causada pela variação na distribuição dos materiais dielétricos na região observada (por exemplo, a seção transversal de um duto). As medições são tomadas a partir de múltiplos eletrodos (geralmente 8 ou 12 eletrodos) alocados ao redor do duto ou equipamento do processo em questão. A distribuição de permissividade relativa na seção transversal é reconstruída a partir dessas medições usando-se um algoritmo de reconstrução. A ECT é considerada como tomografia do tipo *soft-field* e requer, geralmente, algoritmos de reconstrução complexos devido à relação não linear entre as capacitâncias medidas e a distribuição de permissividade relativa. No entanto, os sistemas ECT apresentam algumas vantagens sobre as demais técnicas: não usam fontes radioativas, têm uma resposta rápida, apre-

sentam baixo custo de fabricação, manutenção e instalação, são não-intrusivas e não-invasivas e podem suportar condições de alta temperatura e pressão.

Um sistema ECT é basicamente composto pelos mesmos módulos que compõem os demais sensores capacitivos, Fig. 2.1. A principal diferença é o número de eletrodos utilizados (8 a 16 eletrodos).

## 2.2 Conceitos Básicos

### 2.2.1 Princípio Físico

Como qualquer outro sistema elétrico, as equações que descrevem o fenômeno físico em um sensor capacitivo são dadas pelas equações de Maxwell [16].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.4)$$

em que  $\mathbf{E}$  representa o campo elétrico em  $\text{Vm}^{-1}$ ,  $\mathbf{H}$  representa o campo magnético em  $\text{Am}^{-1}$ ,  $\mathbf{B}$  representa o fluxo magnético em  $\text{Vm}^{-2}$  e  $\mathbf{D}$  representa a densidade de fluxo elétrico em  $\text{Cm}^{-2}$ . A Eq. 2.1 representa a lei de Faraday de indução e descreve a interação entre um campo elétrico e um campo magnético variável. A Eq. 2.2 é chamada de lei circuital de Ampère e descreve que as fontes dos campos magnéticos são correntes elétricas dadas pela densidade de corrente  $\mathbf{J}$  em  $\text{Am}^{-2}$  e pelo deslocamento variável de corrente. A Eq. 2.3 é, algumas vezes, referida como lei de Gauss do magnetismo e expressa a inseparabilidade dos polos magnéticos, ou seja, a inexistência de polos magnéticos isolados (monopolos magnéticos). A Eq. 2.4 representa a lei de Gauss e expressa que as cargas  $\rho$  [C] são o termo fonte para o campo elétrico. As Eqs. 2.1 - 2.4 são estendidas para as equações constitutivas 2.5 e 2.6.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

em que  $\mu$  representa a permeabilidade magnética e  $\epsilon$  a permissividade dielétrica. A permeabilidade  $\mu$  é dada pelo produto  $\mu = \mu_0\mu_r$ , em que  $\mu_0$  representa a permeabilidade absoluta dada por  $4\pi \times 10^{-7} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$  e  $\mu_r$  representa a permeabilidade relativa (adimensional). Similarmente,  $\epsilon$  é dada pelo produto  $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ , sendo que  $\epsilon_0$  representa a permissividade absoluta dada por  $8,854 \times 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$  e  $\epsilon_r$  representa a permissividade relativa (adimensional). Além disso,

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (2.7)$$

descreve a interação entre a densidade de corrente,  $\mathbf{J}$ , e o campo elétrico,  $\mathbf{E}$ , em um meio condutivo em que  $\sigma$  representa a condutividade em  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ . A Eq. 2.7 é denominada como lei de Ohm.

### Simplificações para Sistemas Capacitivos

Embora a maioria dos efeitos que ocorrem em um sensor capacitivo ser descrita pelas equações de Maxwell, tipicamente algumas simplificações são feitas para se obter equações diferenciais mais simples. As principais considerações são [36]:

- todas as cargas estão permanentemente fixas no espaço, ou se elas se movem, fazem-no como um escoamento estacionário em um circuito (de forma que  $\rho$  e  $\mathbf{J}$  são constantes no tempo). Nestas circunstâncias, todos os termos das equações de Maxwell que são derivadas temporais desaparecem e, desta maneira, não há interconexão entre o campo elétrico e o campo magnético;
- a condutividade do material é pequena;
- não há cargas livres presentes. Nos problemas eletrostáticos, se as cargas são confinadas nas superfícies dos condutores ou isolantes, não há cargas livres no material. Ou seja,  $\rho = 0$ .

Uma vez aplicadas as devidas simplificações às equações de Maxwell, as equações do campo eletrostático são dadas por:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.9)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.10)$$

expressando, assim, que o rotacional do campo elétrico é zero. Portanto,  $E$  pode ser descrito como o gradiente de um potencial escalar. Ou seja:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (2.11)$$

em que  $\phi$  é o potencial escalar elétrico, dado em Volts. A principal tarefa da eletrostática é encontrar a distribuição de potencial elétrico  $\phi$  e a intensidade do campo elétrico  $\mathbf{E}$  em cada ponto do campo, dadas as cargas ou potenciais dos corpos carregados. Utilizando a tensão ou a distribuição da intensidade do campo elétrico, quantidades integrais como capacitância, energia ou forças podem ser determinadas.

Substituindo as Eqs. 2.10 e 2.11 na Eq. 2.9, tem-se que

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = 0 \quad (2.12)$$

que é a já conhecida equação diferencial eletrostática. Existem vários métodos para resolver a Eq. 2.12, no entanto o método mais utilizado é o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* - FEM). No FEM, a região sob análise é subdividida em pequenas regiões denominadas de elementos, os quais, na maioria dos casos, são triângulos (para problemas 2D) e tetraedros (para problemas 3D). A distribuição desconhecida do potencial elétrico dentro dos elementos é aproximada por polinômios, montando-se matrizes locais com os valores nodais desconhecidos de potencial elétrico. As matrizes locais são, então, agrupadas em uma matriz global, válida para toda a região analisada. As incógnitas nesta matriz são os valores nodais dos potenciais elétricos na região. Resolvendo o sistema, que é linear quando materiais lineares são utilizados; ou não linear quando materiais não lineares são utilizados, obtêm-se a distribuição de potencial elétrico desconhecida. Usando os valores nodais de potencial elétrico, a intensidade do campo elétrico pode ser encontrado para cada elemento e, assim, várias quantidades como a capacitância, energia elétrica, força entre os eletrodos, etc, podem ser determinadas. Aumentando-se o número de nós na região, ou seja, o número de elementos, são obtidas soluções mais precisas do problema e a distribuição aproximada de potencial elétrico será mais próxima da distribuição real.

### Cálculo da Capacitância

A capacitância é definida pela razão entre o valor absoluto da carga  $q$  em um dos eletrodos e o valor absoluto da diferença de potencial  $u$  entre os eletrodos de um capacitor.

$$C = \frac{q}{u} = \frac{q}{\phi_e - \phi_r} \quad (2.13)$$

em que  $\phi_e$  e  $\phi_r$  representam o potencial elétrico no eletrodo emissor e no eletrodo receptor, respectivamente.

Para a equação diferencial parcial, Eq. 2.12, as condições de contorno para quando os valores de potencial elétrico dos eletrodos são conhecidos são dadas por condições de contorno do tipo Dirchlet

$$\Gamma_e = \phi_e = V_e \quad (2.14)$$

$$\Gamma_r = \phi_r = 0 \quad (2.15)$$

$$\Gamma_b = \phi_b = 0 \quad (2.16)$$

$$\Gamma_g = \phi_g = 0 \quad (2.17)$$

em que  $\Gamma_e$ ,  $\Gamma_r$ ,  $\Gamma_b$ ,  $\Gamma_g$  e  $V_e$  representam a localização espacial dos eletrodos transmissores, dos receptores, da blindagem, dos eletrodos de guarda e a tensão no eletrodo emissor, respectivamente.  $\phi_e$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_b$  e  $\phi_g$  representam o potencial elétrico dos eletrodos emissores, receptores, da blindagem e dos eletrodos de guarda, respectivamente. Assim, a capacitância entre eletrodos é calculada usando a lei de Gauss

$$C = -\frac{1}{u} \iint_{\Gamma} \epsilon \nabla \phi d\Gamma \quad (2.18)$$

em que  $\epsilon$  representa a distribuição de permissividade na região sensitiva (seção transversal do duto, por exemplo),  $u$  representa a diferença de potencial entre o par de eletrodos,  $\phi$  representa a distribuição de potencial e  $\Gamma$  representa a superfície do eletrodo.

Tipicamente, sensores capacitivos aplicados à tomografia (ECT) são constituídos por 8, 12 ou 16 eletrodos, resultando assim em

$$M = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.19)$$

em que  $M$  e  $n$  representam o número de medições independentes de capaci-

tância e o número de eletrodos, respectivamente. A Fig. 2.2 representa os 66 valores de capacitância entre os eletrodos de um sensor com 12 eletrodos.

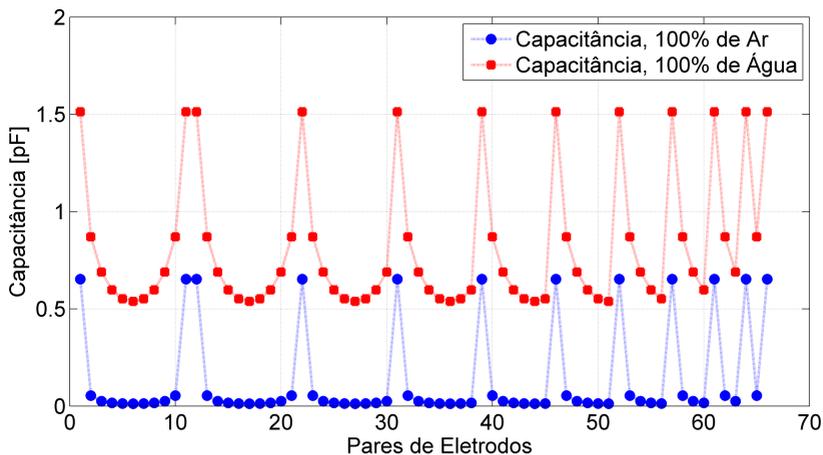


Figura 2.2: Capacitâncias medidas entre eletrodos para um sensor com 12 eletrodos.

### 2.2.2 Campos do Tipo *Hard* e *Soft-field*

Os diversos tipos de sistemas aplicados à medições das propriedades de escoamentos multifásicos diferenciam-se principalmente pelos tipos de sensores e princípios físicos utilizados nas medições. Quanto aos tipos de campos gerados pelos sinais, os sensores usados podem ser classificados em sensores do tipo *hard-field* e *soft-field*.

Nos sensores do tipo *hard-field*, tais como os de origem nucleônica (raio-X, raio gama), o campo gerado pela radiação não é afetado pela natureza do material que se encontra na região sensível do sensor. No entanto, com sensores *soft-field*, tais como os usados em técnicas de impedância elétrica (capacitância, indutância e condutância), o campo elétrico sofre a influência da distribuição das fases, ou seja, o campo elétrico sofre uma distorção quando encontra uma interface ou material de permissividade relativa ou condutividade diferente, tal como representado na Fig. 2.3.

Com sensores do tipo *hard-field*, a determinação matemática da quantidade medida é fácil de ser obtida, uma vez que a operação de integração ocorre ao longo de um caminho conhecido, Eq. 2.20. Já com os sensores do tipo *soft-field*, a determinação da quantidade medida é difícil de ser obtida,

pois não se conhece o caminho, já que as linhas de campo sofrem distorções quando se deparam com meios de permissividades relativas diferentes, Eq. 2.21.

$$\Phi_M = \int_s g(x,y) d\bar{S} \quad (2.20)$$

$$\Phi_M = \iint_{A[g(x,y)], A_0} g(x,y) d\bar{A} \quad (2.21)$$

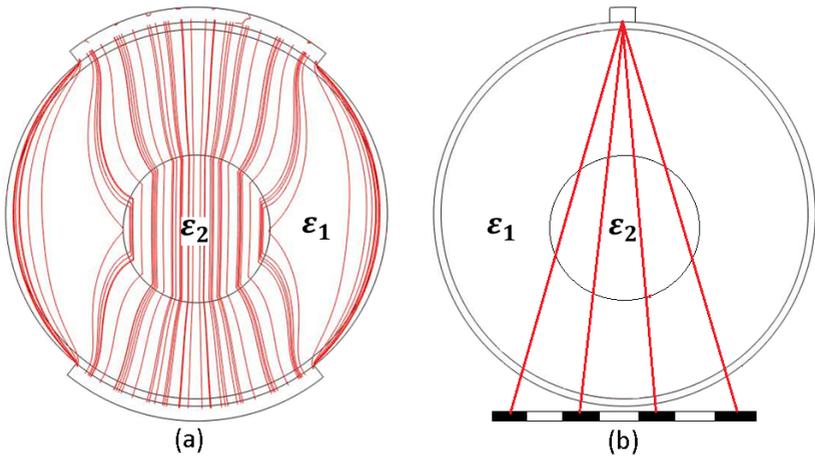


Figura 2.3: Esquema representativo do comportamento do campo gerado usando-se sensores do tipo *soft-field* (a) e *hard-field* (b).

### 2.2.3 Modelos de Normalização

Dyakowski *et al.* [14], no artigo de revisão sobre a aplicação da tecnologia ECT, apontaram a necessidade de dar a devida atenção à relação entre a fração volumétrica e a permissividade relativa do material dielétrico observado. O modelo de Maxwell [31] para a permissividade relativa de uma mistura foi o primeiro a relacionar essas quantidades.

Uma vez que o valor da capacitância é função da permissividade relativa da mistura (ou escoamento) observada, a escolha do modelo para o cálculo da permissividade relativa influencia diretamente nos valores estimados de fração volumétrica a partir das medições realizadas utilizando sensores capacitivos. Desta forma, as capacitâncias medidas são geralmente normalizadas utilizando diferentes modelos de permissividade relativa. Os modelos de normalização mais utilizados são o modelo em paralelo, o modelo em série e o modelo de Maxwell.

McKeen e Pugsley [32] avaliaram a influência do modelo de permissividade sobre as imagens obtidas utilizando ECT. Os modelos estudados foram o modelo em paralelo, o modelo em série e o modelo de Maxwell. Eles concluíram que, para as imagens reconstruídas utilizando-se algoritmos iterativos, não há evidências que os modelos não lineares (modelo em série e modelo de Maxwell) possam fornecer resultados melhores que aqueles obtidos com o modelo em paralelo.

Talib et al. [47] aplicaram, juntamente com algoritmos de rede neural, o modelo em paralelo e o modelo em série para realizar o reconhecimento dos padrões de escoamento gás-óleo. Da mesma forma que McKeen e Pugsley, eles concluíram que os melhores resultados foram aqueles obtidos com o modelo em paralelo.

#### Modelo de Distribuição em Paralelo

O modelo paralelo, Fig.2.4, assume que a distribuição do material é paralela e a capacitância medida é, portanto, o resultado da associação em paralelo das capacitâncias  $C^l$  e  $C^h$ . Assumindo que  $\lambda$  representa a fração (área ocupada) do material de maior permissividade relativa e que o comprimento dos eletrodos é unitário, tem-se

$$C^m = (1 - \lambda)C^l + \lambda C^h \quad (2.22)$$

Isolando  $\lambda$ , também denominada de capacitância normalizada, obtêm-se uma relação linear entre capacitância medida e a fração do material de

maior permissividade relativa [60].

$$\lambda = \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} \quad (2.23)$$

em que  $C^m$  representa a capacitância medida,  $C^l$  representa a capacitância quando a região sensível (região entre os eletrodos) se encontra inteiramente ocupada pelo material de menor permissividade relativa e  $C^h$  representa a capacitância quando a região sensível se encontra inteiramente ocupada pelo material de maior permissividade relativa.

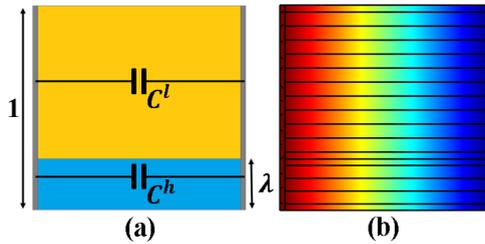


Figura 2.4: Representação do modelo em paralelo. Esquema da distribuição em paralelo (a) e distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico obtidas por simulação.

### Modelo de Distribuição em Série

Yang e Byars [60], por outro lado, propuseram um método alternativo de normalização no qual assume-se que a distribuição do material é em série, Fig. 2.5. Desta forma, a capacitância medida é, portanto, o resultado da associação em série das capacitâncias  $C^l$  e  $C^h$ .

$$C^m = \frac{(1 - \zeta)C^l \cdot \zeta C^h}{(1 - \zeta)C^l + \zeta C^h} \quad (2.24)$$

Manipulando a Eq. 2.24, obtêm-se

$$C^m = \frac{1}{\zeta/C^h + (1 - \zeta)/C^l} \quad (2.25)$$

Isolando  $\zeta$ , tem-se que a capacitância normalizada, é expressa como

uma função não linear da capacitância entre os eletrodos. Ou seja

$$\zeta = \frac{1/C^m - 1/C^l}{1/C^h - 1/C^l} \quad (2.26)$$

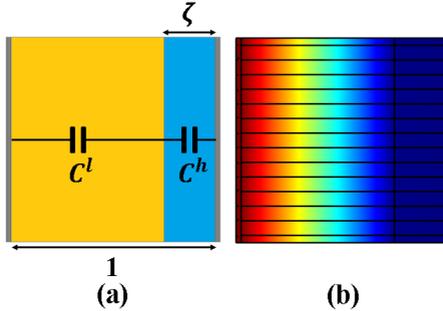


Figura 2.5: Representação do em modelo série. Esquema da distribuição em série (a) e distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico obtidas por simulação.

Yang e Byars [60] utilizaram o modelo de distribuição em série para reconstruir imagens de objetos localizados próximos à parede do sensor e também na região central. Os resultados obtidos apresentaram melhorias tanto na qualidade da imagem reconstruída quanto nos valores de fração volumétrica estimados utilizando o algoritmo de retroprojeção linear.

### Modelo de Maxwell

Maxwell [31] desenvolveu um modelo para a permissividade relativa da mistura considerando que partículas de um determinado material com permissividade relativa  $\epsilon_2$ , com fração volumétrica,  $\phi$ , menor que 0,2, estão uniformemente distribuídas em um meio com permissividade relativa  $\epsilon_1$ . Tal como apresentado por Bolton *et al.* [6], o modelo de Maxwell pode ser expresso como

$$\epsilon_m = \epsilon_1 \cdot \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2 + 2\phi(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2 - \phi(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (2.27)$$

Considerando-se gotas de água ( $\epsilon^h$ ) dispersa em óleo contínuo ( $\epsilon^l$ ), a Eq. 2.27 pode ser reescrita como

$$\varepsilon^m = \varepsilon^l \cdot \frac{2\varepsilon^l + \varepsilon^h + 2\phi(\varepsilon^h - \varepsilon^l)}{2\varepsilon^l + \varepsilon^h - \phi(\varepsilon^h - \varepsilon^l)} \quad (2.28)$$

Isolando  $\phi$ , obtêm-se

$$\phi = \frac{(\varepsilon^m - \varepsilon^l)(2\varepsilon^l + \varepsilon^h)}{(\varepsilon^h - \varepsilon^l)(2\varepsilon^l + \varepsilon^m)} = \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} \cdot \frac{2C^l + C^h}{2C^l + C^m} \quad (2.29)$$

Em princípio, o modelo de Maxwell é válido somente para valores baixos de  $\phi$  e também para misturas de componentes com valores próximos permissividades relativas[32].

### Modelo de Distribuição em Paralelo-Série

Dong e Guo [12] apresentaram um modelo de normalização baseado na combinação dos modelos em paralelo e em série, Fig. 2.6. Para os autores, o modelo em série e em paralelo são válidos apenas quando a distribuição (série ou paralela) é mantida ao longo de toda a região sensitiva (ver as Figs. 2.4 e 2.5). Tal consideração torna-se difícil de ser verificada quando os sensores são compostos por quatro ou mais eletrodos, pois alguns pares de eletrodos podem estar sujeitos somente à distribuição em paralelo ou a distribuição em série; e outros podem estar sujeitos à uma combinação destas. Desta forma, a capacitância normalizada ( $\delta$ ) entre um determinado par de eletrodo pode ser dada por

$$\delta = \alpha \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} + (1 - \alpha) \frac{1/C^m - 1/C^l}{1/C^h - 1/C^l} = \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} \frac{C^h - \alpha(C^h - C^m)}{C^m} \quad (2.30)$$

em que  $\alpha$  é denominado de coeficiente do modelo de combinação. Quando  $\alpha = 1$ , o modelo se torna o modelo de distribuição em paralelo. Quando  $\alpha = 0$ , o modelo se torna o modelo de distribuição em série. Quanto menor o valor de  $\alpha$  mais não linear é o comportamento do modelo. Os autores ainda deduziram, por meio da minimização do erro entre as capacitâncias medidas e aquelas estimadas pelo algoritmo de reconstrução de imagem, um valor ótimo para o coeficiente de combinação. Os resultados obtidos apresentam uma considerável melhoria na qualidade das imagens reconstruídas quando comparadas com aquelas obtidas utilizando-se o modelo em paralelo ou em série separadamente.

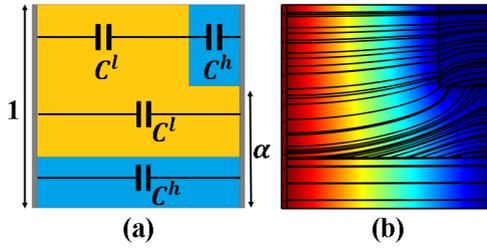


Figura 2.6: Representação do modelo de combinação em paralelo-série. Esquema da distribuição em paralelo-série (a) e distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico obtidas por simulação (b).

A visualização da resposta dos modelos (paralelo, série, Maxwell e paralelo-série) pode ser observada na Fig. 2.7 em que as capacitâncias medidas com valores entre 1 e 2 pF são normalizadas entre 0 e 1. Como pode ser observado, com exceção do modelo em paralelo, os demais modelos apresentam um comportamento não linear. Os modelos em paralelo e em série podem ser considerados como modelos de extremidade; ou seja, os modelos com comportamento não linear, que geralmente são de alguma forma uma combinação dos modelos em paralelo e em série, apresentaram valores entre aqueles obtidos pelos modelos de extremidade.

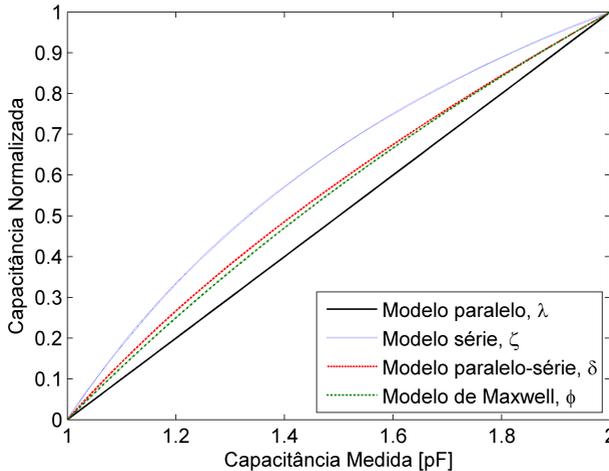


Figura 2.7: Capacitância normalizada obtida utilizando os modelos em paralelo, em série, em paralelo-série e de Maxwell.

### 2.2.4 Mapas de Sensibilidade

A capacitância entre os eletrodos pode ser considerada como um funcional da distribuição da permissividade. Ou seja,

$$C = \xi(\epsilon) \quad (2.31)$$

em que  $\xi$  representa uma função não linear; e  $C$  representa os valores de capacitância. Diferenciado a Eq.2.31, a variação na capacitância em resposta a uma perturbação da distribuição de permissividade é dada por:

$$\Delta C = \frac{d\xi}{d\epsilon}(\Delta\epsilon) + O((\Delta\epsilon)^2) \quad (2.32)$$

em que  $\frac{d\xi}{d\epsilon}$  representa a sensibilidade da capacitância versus a distribuição de permissividade e  $O((\Delta\epsilon)^2)$  representa o termo  $(\Delta\epsilon)^2$  e os termos de ordem superior. Em aplicações ECT, a perturbação  $\Delta\epsilon$  é geralmente pequena e os termos de ordem superior são desprezados. Assim, a Eq. 2.32 pode ser simplificada para a forma linear

$$\Delta C = s\Delta\epsilon \quad (2.33)$$

em que  $s = \frac{d\xi}{d\epsilon}(\Delta\epsilon)$  representa a sensibilidade do sensor capacitivo às variações na distribuição de permissividade.

A equação 2.33 deve ser discretizada para ser implementada. Para visualizar a distribuição de permissividade, a região sensível é dividida em  $N$  pequenas áreas (ou píxeis), Fig. 2.8. Considerando um sensor com  $M$  medições de capacitância independente, tem-se  $M$  equações na forma da Eq. 2.33 (mapas de sensibilidade). A forma linearizada e discretizada da equação 2.33 pode ser expressa como

$$\Delta \mathbf{C} = \mathbf{J}\Delta\epsilon \quad (2.34)$$

em que  $\Delta \mathbf{C} \in \mathbb{R}^M$ ,  $\Delta\epsilon \in \mathbb{R}^N$  e  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{M \times N}$  representa a matriz Jacobiana ou matriz de distribuição de sensibilidade formada pelos  $M$  mapas de sensibilidade. A Eq. 2.34 pode ser representada em termos de valores normalizados, ou seja

$$\lambda = \mathbf{S}\mathbf{g} \quad (2.35)$$

em que  $\lambda$  representa o vetor de capacitância normalizada,  $\mathbf{S}$  representa a matriz Jacobiana (matriz de distribuição de sensibilidade) de capacitância normalizada com respeito à distribuição permissividade normalizada e  $\mathbf{g}$  repre-

senta o vetor de permissividade normalizada.

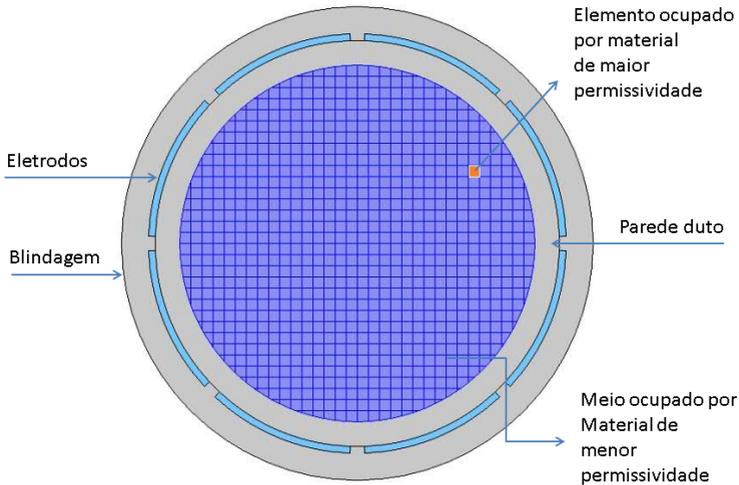


Figura 2.8: Seção transversal de um sensor com 8 eletrodos dividida 856 pixels.

A sensibilidade à variação de permissividade normalizada de um dos píxeis para cada um dos  $M$  pares de eletrodos pode ser obtida através de métodos numéricos ou experimentais. Numericamente, a sensibilidade à variação de permissividade relativa de um pixel para um determinado par de eletrodos é obtida da seguinte maneira [4, 5]:

1. primeiramente, discretiza-se toda a região sensível em pequenas áreas, também denominado de píxeis, veja Fig. 2.8;
2. admite-se, inicialmente, que todos os píxeis da região sensível estão ocupados pelo material de menor permissividade relativa;
3. em seguida, seleciona-se apenas um pixel e varia-se sua permissividade relativa fazendo com que ele assumo o valor da permissividade relativa igual a do material de maior permissividade relativa na mistura (no escoamento), enquanto o restante dos píxeis permanecem com a permissividade relativa igual a do material de menor permissividade relativa;
4. calcula-se os  $M$  valores de capacitância para esse pixel nessas condições;

5. em seguida, esse pixel volta a ter a permissividade relativa mais baixa (retornado-se a condição inicial, passo 2) para se selecionar outro pixel, elevar a sua permissividade relativa e calcular os  $M$  valores de capacitância;
6. repete-se o laço composto pelos passos de 3 - 5 , sempre utilizando um novo pixel, até que todos os píxeis tenham seu valor de permissividade relativa alterado e forem obtidas as  $M$  medidas de capacitância.

Os mapas de sensibilidade mostram como se distribuí os valores de capacitância de todos os píxeis da região sensível do sensor para cada um dos  $M$  pares de eletrodos. Esses mapas são construídos plotando-se os valores de capacitâncias normalizadas de cada um dos píxeis em um sistema de eixos tridimensional onde o eixo  $z$  representa esse valor [4]. Os mapas de sensibilidade sempre se referem a dois componentes de um escoamento bifásico, como por exemplo, água-gás, água-óleo, óleo-gás.

Uma vez realizadas todas as medidas de capacitância de todos os píxeis da região sensível para cada um dos pares de eletrodos, para se obter os mapas de sensibilidade o passo seguinte será normalizar esses valores de capacitância, ou seja

$$S_{i,j}(p) = \mu(p) \cdot \frac{C_{i,j}^m(p) - C_{i,j}^l}{C_{i,j}^h - C_{i,j}^l} \cdot \frac{1}{\epsilon^h - \epsilon^l} = \mu(p) \cdot C_N(p) \cdot \frac{1}{\epsilon^h - \epsilon^l} \quad (2.36)$$

em que:

- $\epsilon^h$  e  $\epsilon^l$  representam os valores de permissividade relativa para o material de maior permissividade relativa ( $h$ ) e de menor permissividade relativa ( $l$ );
- $i, j$  representam o eletrodo emissor e o eletrodo receptor, respectivamente;
- $S_{i,j}(p)$  representa a sensibilidade do pixel  $p$  para o par de eletrodos  $i, j$ ;
- $\mu(p)$  representa o fator de ponderação (área do pixel/área média dos píxeis);
- $C_{i,j}^m(p)$  representa a capacitância do pixel  $p$  para o par de eletrodos  $i, j$ ;
- $C_{i,j}^l$  representa a capacitância do par de eletrodos  $i, j$  quando a região sensível se encontra inteiramente ocupada pelo material de menor permissividade relativa;

- $C_{i,j}^h$  representa a capacitância do par de eletrodos  $i, j$  quando a região sensível se encontra inteiramente ocupada pelo material de maior permissividade relativa;
- $C_N(p)$  representa a capacitância normalizada do pixel  $p$  para o par de eletrodos  $i, j$ .

Desta maneira, pode-se dizer que um mapa de sensibilidade para um determinado par de eletrodos é um conjunto de valores numéricos que mostra a influência que cada pixel da região sensível tem sobre o valor da capacitância deste determinado par de eletrodos quando o valor da permissividade relativa de cada um dos pixels da região sensível é alterado de um valor mínimo para um valor máximo enquanto todos os demais pixels permanecem com o valor da mínima permissividade relativa [4]. Na Fig. 2.9 podem-se observar os mapas de sensibilidade para os pares de eletrodos 1-2 (a), 1-3 (b), 1-4 (c), 1-5 (d), 1-6 (e) e 1-7 (f) para um sensor com 12 eletrodos. Como pode-se observar, considerando-se um par de eletrodos particular, a sensibilidade em diferentes posições entre eles pode variar drasticamente, i.e. a distribuição de sensibilidade não é uniforme, e existem regiões onde a sensibilidade é negativa.

A não uniformidade da distribuição fica ainda mais visível quando comparados dois pares distintos de eletrodos, por exemplo o pares 1-2 (eletrodos adjacentes) e 1-7 (eletrodos opostos) de um sensor com 12 eletrodos, Fig. 2.9(a) e Fig. 2.9(f), respectivamente. A capacitância para o par adjacente é aproximadamente 10 vezes maior que a capacitância para o par oposto.

### 2.2.5 Parâmetros para Avaliação da Sensibilidade

Seguindo os conceitos de média, desvio padrão e coeficiente de variação utilizados na análise estatística, pode-se avaliar a distribuição da sensibilidade dos sensores capacitivos por meio dos seguintes parâmetros

$$S_{i,j}^{avg} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P S_{i,j}(p) \quad (2.37)$$

$$S_{i,j}^{dev} = \left( \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (S_{i,j}(p) - S_{i,j}^{avg})^2 \right)^{1/2} \quad (2.38)$$

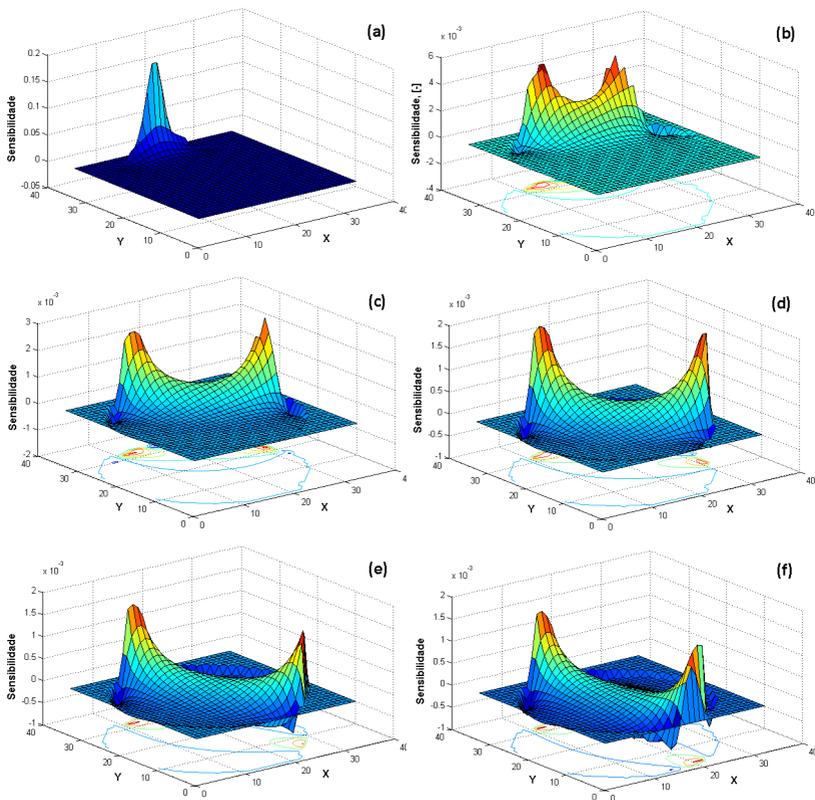


Figura 2.9: Mapas de sensibilidade para um sensor com 12 eletrodos. Par 1-2 (a), par 1-3 (b), par 1-4 (c), par 1-5 (d), par 1-6 (e) e par 1-7 (f)

$$Sp_{i,j} = \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} \quad (2.39)$$

$$Sp = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n Sp_{i,j} \quad (2.40)$$

em que:

- $Sp$  (*Sensitivity Variation Parameter*) representa o grau de homogeneidade da distribuição da sensibilidade do sensor;

- $i, j$  representam o eletrodo emissor e o eletrodo receptor, respectivamente;
- $S_{i,j}(p)$  representa a sensibilidade do pixel  $p$  para o par de eletrodos  $i, j$ ;
- $P$  representa o número total de píxeis na seção transversal;
- $M$  e  $n$  representam o número de medições independentes e o número de eletrodos, respectivamente.

Quanto menor o valor de  $Sp$  melhor será a homogeneidade do campo de sensibilidade do sensor.

Para auxiliar a análise do desempenho dos sensores capacitivos, pode-se ainda utilizar os parâmetros  $\Delta C_{i,j}$  e  $\Delta C'_{i,j}$ . O parâmetro  $\Delta C_{i,j}$  representa a variação de capacitância do sistema, ou seja, a diferença entre os valores de capacitância obtidos quando o sensor está completamente ocupado pelo material de mais alta permissividade ( $C_{i,j}^h$ ) e quando o sensor está completamente ocupado pelo material de mais baixa permissividade ( $C_{i,j}^l$ ).

$$\Delta C_{i,j} = C_{i,j}^h - C_{i,j}^l \quad (2.41)$$

O parâmetro  $\Delta C'_{i,j}$  é usado como um indicador da sensibilidade global do sistema; é o somatório da variação de capacitância causada pela mudança do material (de maior para menor permissividade) em cada um dos píxeis da seção transversal, ou seja

$$\Delta C'_{i,j} = \Delta C_{i,j} S_{i,i}^{avg} \quad (2.42)$$

Assim como no trabalho de Xie *et al.* [53], esse parâmetro pode ser utilizado para avaliar a linearidade do sistema. Uma vez que, se o sistema é linear, o princípio de superposição pode ser aplicado e os valores de  $\Delta C_{i,j}$  e  $\Delta C'_{i,j}$  devem ser iguais.

## 2.3 Projeto de Sensores

Até o momento, a etapa do projeto de um sensor capacitivo tem se mostrado decisiva para a correta aplicação e obtenção de melhores resultados. Para tanto, diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo da influência de cada parâmetro de projeto no desempenho do sensor. A Fig. 2.10 ilustra os principais parâmetros de um sensor capacitivo. Sami *et al.* [45] avaliaram

o efeito do padrão de escoamento para diversas configurações de eletrodos. Xie *et al.* [53] analisaram a influência de parâmetros como a espessura e o material da parede do duto, a blindagem externa e comprimento angular dos eletrodos sobre a distribuição de sensibilidade de um sensor capacitivo composto por dois eletrodos côncavos. Yang [58] analisou e comparou a caracterização de sensores ECT com eletrodos internos e externos e também avaliou o efeitos do aterramento radial. Tollefsen e Hammer [48] avaliaram a influência da distribuição das fases em sensores com eletrodos côncavos e helicoidais, buscando, assim, reduzir os erros na medição da fração volumétrica. Yang e Liu [61] estudaram as características de sensores ECT com seção transversal quadrada. Jaworski e Bolton [24] apresentaram um sensor para medir dielétricos de alta permissividade e também discutiram o efeito da espessura da parede do duto sobre o valor da capacitância medida. Peng *et al.* [40] investigaram o efeito do comprimento dos eletrodos de medição e de guarda sobre a distribuição da sensibilidade e sugeriram que esse comprimento deve ser maior ou igual ao diâmetro do duto. Alme e Mylvaganam [2] discutiram os critérios de projeto para sensores ECT quanto a direção (radial ou axial) em que se deseja obter melhor resolução da imagem reconstruída. Olmos *et al.* [38] estudaram os efeitos do tamanho dos eletrodos de medição, de guarda e o arranjo da malha de aterramento em um sensor ECT com 12 eletrodos. Recentemente, Yang [56, 59] revisou alguns pontos chaves para o projeto de sensores ECT, incluindo o número de eletrodos, a diferença entre eletrodos internos e externos, a influência da espessura da parede do duto, eletrodos de guarda e malha de aterramento.

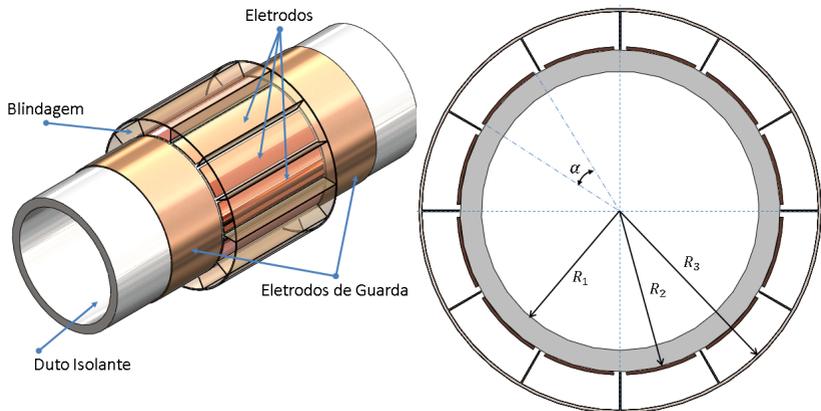


Figura 2.10: Ilustração de uma configuração típica para sensores capacitivos

Devido aos valores de capacitância medidos serem muito pequenos (tipicamente na faixa de 0,01 pF a 10 pF) todos os parâmetros de projeto de sensores capacitivos têm influência na performance global do sistema. Com base no trabalho de Yang [56], as seções 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6 e 2.3.7 são dedicados a abordar tais influências e, assim, buscar trilhar uma metodologia a ser aplicada ao projeto de sensores capacitivos para a determinação das frações volumétricas em escoamentos multifásicos.

### 2.3.1 Material e Espessura da Parede

Em muitas aplicações práticas os sensores capacitivos são instalados de maneira não-invasiva e não-intrusiva, ou seja, os eletrodos são fixados externamente ao duto. Desta maneira, parte da seção de medição (parte da tubulação onde será instalado o sensor) deve ser composto por um material isolante. Caso contrário, o campo elétrico tenderia a se concentrar no material condutor (metal, por exemplo), impedindo que as linhas de campo elétrico percorra o meio multifásico devido ao fenômeno de proteção eletromagnética (blindagem) [25]. Portanto, tanto a permissividade relativa do material quanto a espessura do duto influenciam na distribuição de sensibilidade do sensor.

Ao avaliarem o efeito da permissividade da parede sobre a distribuição da sensibilidade de um sensor com dois eletrodos, Kendoush e Sarkis [25] observaram que quanto maior a diferença entre a permissividade da parede e a permissividade do material observado maior será o efeito negativo desse parâmetro, aumentando a não uniformidade da distribuição da sensibilidade.

A espessura da parede do duto isolante também influencia na distribuição de sensibilidade. Uma parede espessa pode ocasionar diminuição da capacitância entre eletrodos, mesmo quando a permissividade na seção sensível aumentar, principalmente quando consideradas aplicações de ECT. No entanto, deve-se respaldar que a espessura da parede do duto é, geralmente, um parâmetro não ajustável, mas sim estipulado pelas características do processo a ser observado, tais como, pressão e temperatura.

Kendoush e Sarkis [26] analisaram, por meio do parâmetro  $Sp$ , a influência da espessura da parede isolante. Eles constataram que, para sensores com eletrodos caracterizados por ângulos ( $\alpha$ ) menores que  $100^\circ$ , o valor de  $Sp$  decresce com o aumento da espessura, melhorando a homogeneidade e linearidade do sistema.

Daoye *et al.* [8] investigaram o efeito da espessura da parede sobre a capacitância medida entre eletrodos e sobre a imagem reconstruída por um sensor ECT com oito eletrodos. Os autores observaram que a influência da es-

pequena diminuiu com a distância entre os eletrodos, ou seja, o par de eletrodos 1-2 (eletrodos adjacentes) sofre maior influência do que o par 1-5 (eletrodos opostos). Ao avaliarem a fidelidade da imagem reconstruída considerando-se os padrões de escoamento anular, *core-flow* e estratificado, concluíram que para sensores com paredes mais finas, os padrões de escoamento anular e *core-flow* foram melhor reconstruídos; já, quando considerados sensores com paredes mais espessas, o padrão de escoamento estratificado foi melhor reconstruído.

Mei [33], assim como Kendoush e Sarkis [26], também avaliou o comportamento do parâmetro  $\Delta C_{i,j}$ , observando que, tal como o  $Sp$ , seu valor cresce com o aumento da espessura do duto isolante. Para sistemas ECT, esse comportamento é prejudicial à fidelidade da imagem reconstruída; pois, ao se considerar eletrodos caracterizados por  $\alpha$  pequeno, observa-se que o mapa de sensibilidade para os eletrodos adjacentes (1-2, 2-3 e 3-4 por exemplo) apresenta uma região de sensibilidade negativa (valores de  $S_{i,j}(p)$  menor que zero). No entanto, para sensores compostos por dois ou quatro eletrodos, tal como no trabalho de Kendoush e Sarkis [26], e caracterizados por  $\alpha$  máximo entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , o que se observa é uma melhoria no mapa de sensibilidade que, diferente do caso ECT, não apresenta região negativa.

### 2.3.2 Configuração e Número de Eletrodos

Ao se tratar da configuração (forma e maneira como estão dispostos interno ou externamente ao duto) dos eletrodos, as técnicas capacitivas são as que apresentam a maior variedade. Na Fig. 2.11 podem-se observar algumas configurações já discutidas, teórica e experimentalmente, na literatura.

Sami *et al.* [45] analisaram a resposta de seis diferentes configurações (Fig. 2.11 (a)-(f)) para os padrões escoamento estratificado e de golfadas. Eles concluíram que a melhor configuração para aplicações práticas, quando analisada a linearidade da relação entre fração volumétrica e capacitância, é a helicoidal com dois eletrodos.

Kendoush e Sarkis [25] analisaram o desempenho de cinco diferentes configurações (Fig. 2.11 (a), (b), (d),(g) e (h)) para padrões de escoamento anular e *core-flow*. Eles observaram que as configurações helicoidal e unidirecional apresentam baixa sensibilidade ( $\Delta C_{i,j} < 0,5\text{pF}$ ), atestando não serem apropriados para determinar com precisão a fração volumétrica da água.

Kuo *et al.* [27] avaliaram o desempenho de sensores com eletrodos na forma de anel e de placas côncavas, Fig. 2.11 (h) e (b), respectivamente. Quando avaliados considerando-se o padrão anular, o sensor tipo anel apre-

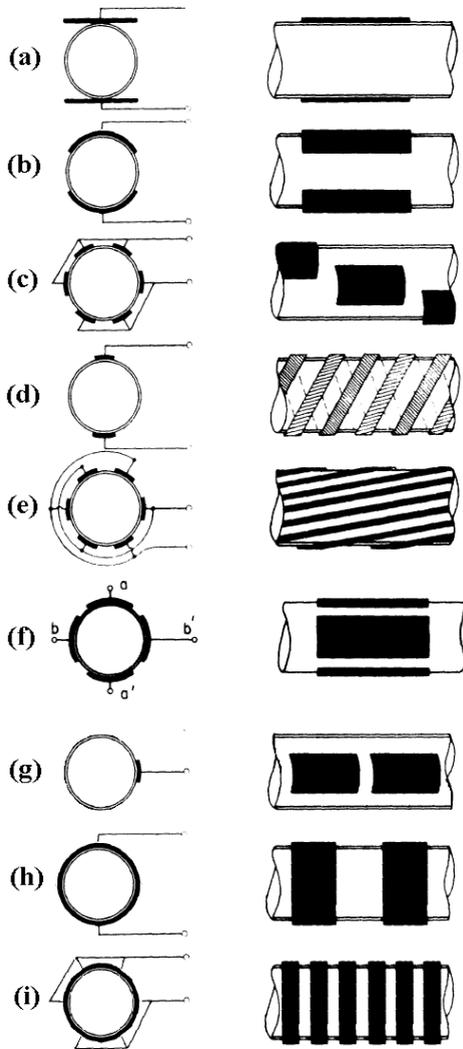


Figura 2.11: Configuração dos eletrodos. (a) Placas planas, (b) Placas côncavas, (c) Placas côncavas escalonadas, (d) Helicoidal com 2 eletrodos, (e) Helicoidal multi eletrodos, (f) Placa côncava multi eletrodo, (g) Unidirecional, (h) Anéis e (i) Multi anéis. Adaptado de Sami *et al.* [45] e Kendoush e Sarkis [25]

sentou um erro relativo menor que o sensor com placas côncavas.

Quando um sensor capacitivo é projetado, o número de eletrodos precisa ser determinado primeiro. Com a redução do número de eletrodos são esperados os seguintes benefícios, Yang [56]:

- ter um hardware simplificado com menor número de canais;
- menor número de autovalores na matriz de sensibilidade, diminuindo a dificuldade em resolver o problema inverso na reconstrução da imagem, no caso de aplicações em ECT;
- uma rápida aquisição dos dados, devido à redução no número de capacitâncias independentes;
- o comprimento axial dos eletrodos pode ser reduzido devido ao aumento no ângulo de cobertura de cada eletrodo,  $\alpha$ .

Por outro lado, em ECT, reduzindo-se o número de eletrodos, a qualidade da imagem também será diminuída devido ao menor número de medições independentes.

Obviamente, com o aumento do número de eletrodos, o número de medições independentes também aumenta resultando, assim, numa melhor resolução da imagem reconstruída e redução da dependência do sensor quanto aos diferentes padrões de escoamento. No entanto, um grande número de eletrodos resultará nas seguintes dificuldades:

- maior complexidade e alto custo do hardware;
- menores valores de capacitâncias medidas;
- maior número de autovalores na matriz de sensibilidade, causando maior dificuldade na resolução do problema inverso para a reconstrução, no caso de aplicações ECT;
- lenta taxa de aquisição de dados, pois há um número maior de medições a serem realizadas.

Peng *et al.* [39] investigaram o efeito do número de eletrodos na resolução da imagem reconstruída comparando resultados obtidos a partir de sensores com 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 32 eletrodos. Eles observaram que a sensibilidade entre eletrodos adjacentes não varia significativamente com o aumento do número de eletrodos. Já para os pares opostos, o efeito causado pelo aumento do número de eletrodos é claramente observado, ocasionando

uma considerável diminuição da sensibilidade. Eles também comprovaram que para sensores com mais de 12 eletrodos não se observa considerável melhoria na qualidade na imagem.

### 2.3.3 Comprimento Axial dos Eletrodos

O comprimento dos eletrodos é limitado por dois fatores: o efeito de borda e a medida de baixas capacitâncias.

O efeito de borda somente pode ser ignorado quando o comprimento do sensor é muito maior que o diâmetro do sensor. Nesta condição, o valor da capacitância medida é proporcional apenas ao comprimento do sensor. Por outro lado, um aumento no comprimento não é a melhor saída para se detectar pequenos objetos com um sinal de grande cobertura. Assim, conclui-se que, com um pequeno comprimento em relação ao diâmetro do sensor, os efeitos de borda não podem ser simplificados e o problema de reconstrução de imagem não pode ser tratado apenas como 2D.

A medida de pequenas capacitâncias apresenta, ainda hoje, um grande desafio e, como foi mencionado, as capacitâncias têm uma ordem de grandeza muito baixa, alguns femto Farads (fF) para um sensor com eletrodos de 10 cm de comprimento. Em consequência, quanto mais se diminuir o comprimento do eletrodo, menor será o valor da capacitância a ser medido. Uma prática comum é escolher o comprimento do sensor como sendo o dobro de seu diâmetro.

Para verificar o efeito do comprimento dos eletrodos ( $L_e$ ) de placas côncavas, Kendoushi e Sarkis [25] realizaram medidas de fração de vazio (fração volumétrica de gás) em um duto de 5cm de diâmetro externo,  $D_e$ , com eletrodos de 2,5cm, 5cm, 7,5cm e 10cm de comprimento. De acordo com a Fig. 2.12, pode-se observar que o menor erro relativo percentual é obtida para  $L_e/D_e > 1$ .

Para esta característica, Peng *et al.* [40] constataram que, para um comprimento de até a metade do diâmetro do sensor, o eletrodo apresenta um bom comportamento e pode ser calculado pelo método 2D e que abaixo deste valor a distribuição de sensibilidade apresentará distorções. No entanto, Xie *et al.* [53], Yan *et al.* [54], Yang [59] e Yang [56] concordam que a melhor maneira de se evitar os efeitos de borda é utilizar eletrodos com comprimento, no mínimo, duas vezes maior que o diâmetro do duto isolante.

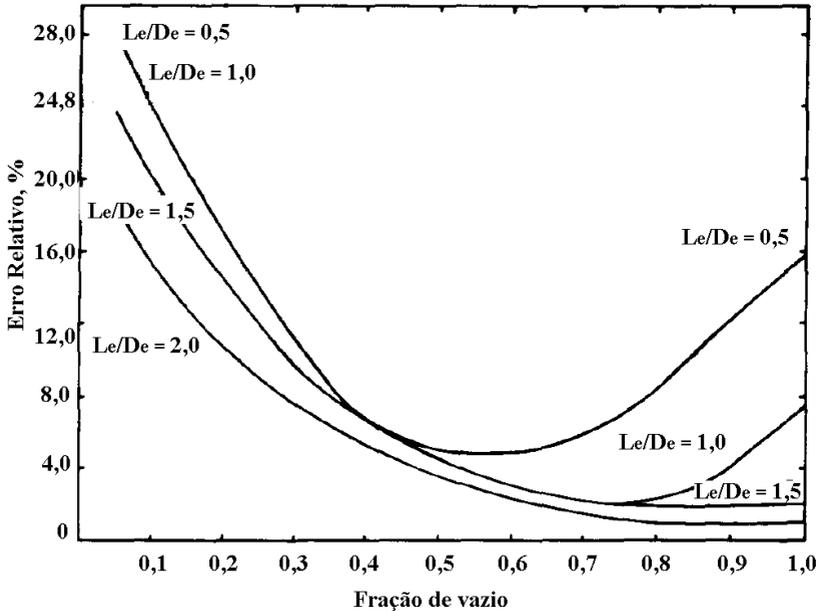


Figura 2.12: Efeito do comprimento dos eletrodos de placa côncava. Adaptado de Kendoushi e Sarkis [25]

### 2.3.4 Eletrodos Internos ou Externos

Dependendo da aplicação, os eletrodos podem ser fixados externa ou internamente ao duto isolante. A primeira opção é a mais usual, sendo também, do ponto de vista da construção, o arranjo mais simples. Por não estar em contato com o fluido, essa configuração é dita não invasiva e não intrusiva, característica muito desejada na indústria. No entanto, os sensores com eletrodos externos podem apresentar considerável não linearidade em suas respostas para os materiais dielétricos introduzidos em seu interior. Este efeito, como foi discutido na subseção 2.3.1, é causado pela presença da parede que introduz uma capacitância em série com a capacitância interna a ser calculada.

Os eletrodos podem ser montados na superfície interna do tubo isolante. Nesse caso, a parede do duto não mais afeta a medição, mas outros problemas ocorrem como erosão, contaminação do meio, medição invasivo e alto custo de construção.

### 2.3.5 Malhas de Aterramento

De acordo com a Fig. 2.13, as malhas de aterramento podem ser:

- externa: é de crucial importância para se evitar interferências de ruídos externos;
- finalização axial: normalmente são colocadas duas malhas uma de cada lado ao longo do eletrodo para se reduzir interferências na extensão do tubo, porém este tipo de aterramento causa uma atenuação do sinal. Por isso, para muitas aplicações este tipo de aterramento não é utilizado.
- axial: o aterramento axial é utilizado para reduzir a capacitância residual (parasita) entre dois eletrodos adjacentes e não apresenta nenhum aspecto negativo do ponto de vista da medida, sendo que a parte mais difícil está em sua construção mecânica.

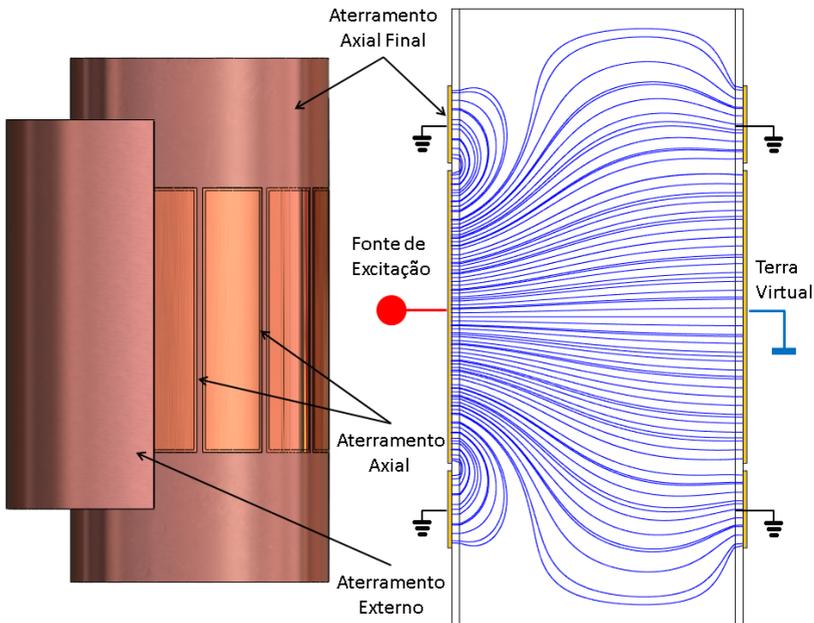


Figura 2.13: Malhas de aterramento e efeito da malha de aterramento final no campo elétrico

### 2.3.6 Eletrodos de Guarda

Os eletrodos de guarda, propostos inicialmente por Maxwell em 1873 [31], seriam uma divisão do comprimento do eletrodo em três partes, sendo que, o eletrodo com potencial alto receberia alimentação nas três partes e o eletrodo receptor seria somente a parte central, com as outras duas partes ligadas a um referencial aterrado, Fig. 2.14.

Peng *et al.* [40] também realizaram estudos sobre o comprimento dos eletrodos de guarda e constataram que, para esta característica, não houve variação na distribuição de sensibilidades para um comprimento variando desde quatro vezes até a metade do diâmetro do sensor. Embora não tenham apresentado resultados para valores mais baixos, os autores salientam que esse seria um limite mínimo para o comprimento dos eletrodos de guarda.

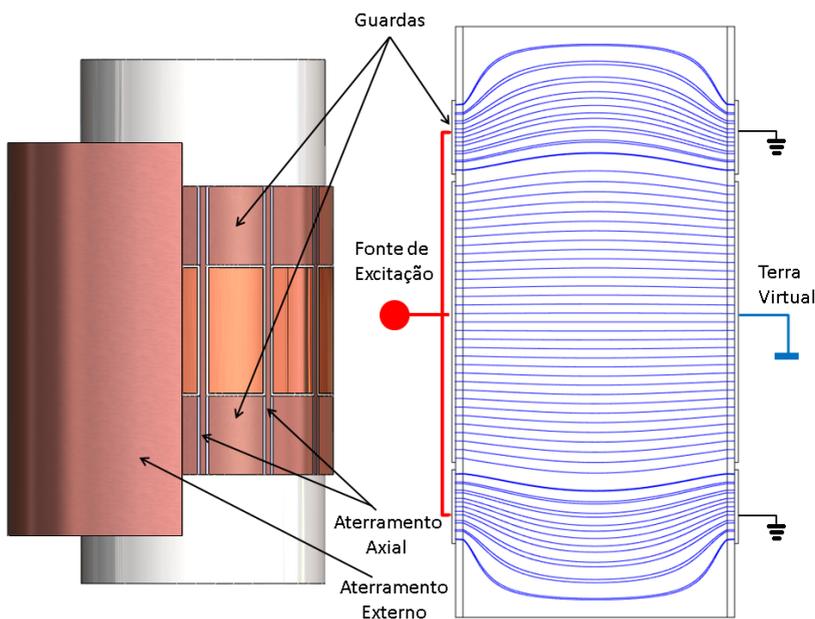


Figura 2.14: Configuração e efeito dos eletrodos de guarda no campo elétrico.

### 2.3.7 Diâmetro do sensor

Como discutido anteriormente, com a ausência do efeito de borda o valor da capacitância não é afetado pela variação no diâmetro do sensor, mas sim pelo comprimento do eletrodo que tem influência direta na medida da capacitância. Como o valor da capacitância medida é limitado pelo sistema de medição, deve-se avaliar a relação entre diâmetro do sensor e comprimento dos eletrodos.

## 2.4 Dependência do Padrão de Escoamento

O princípio das técnicas capacitivas é baseado na diferença de permissividade relativa (constante dielétrica) das fases no escoamento; e a capacitância medida entre os eletrodos é dependente da fração volumétrica das mesmas. No entanto, uma determinada fração volumétrica pode se distribuir de diferentes maneiras ao longo da seção transversal, dando origem, assim, a diferentes padrões de escoamento. Desta maneira, os sensores capacitivos podem responder de forma diferente para um mesmo valor de fração de vazão de acordo com o regime de escoamento predominante.

Isso acontece, principalmente, pelo fato de que o campo elétrico não é uniforme na maioria dos casos, fazendo com que as regiões de uma seção do escoamento contribuam diferentemente para o cálculo da capacitância total de acordo com a sua geometria [1, 13]. Na Fig. 2.18 pode-se observar claramente o efeito do padrão de escoamento (estratificado e anular) sobre a capacitância medida para um mesmo valor de fração volumétrica de óleo para um sensor com duas placas côncavas.

Uma maneira de se prevenir ou anemizar os efeitos da dependência do padrão de escoamento é otimizar o projeto do sensor para se obter um campo elétrico uniforme. Por exemplo, a escolha do tipo, comprimento e largura dos eletrodos podem ser decisivos na obtenção de um campo elétrico uniforme.

Hammer *et al* [19], por exemplo, compararam a dependência dos sensores capacitivos de placas côncavas e dos sensores capacitivos helicoidais quanto aos padrões estratificado e anular para o escoamento de água-óleo. segundo os autores, o uso da configuração helicoidal pode melhorar significativamente a homogeneidade do campo elétrico e prevenir os efeitos do padrão de escoamento.

Assim como Hammer *et al.* [19], Tollefsen e Hammer [48] investigaram a dependência dos sensores helicoidais e de placas côncavas para os

padrões anular, de golfadas e estratificado para escoamentos gás-água e gás-óleo. Em seus experimentos, eles constataram que o uso de eletrodos helicoidais reduz a máxima incerteza de medição de fração de 9% (para eletrodos de placas côncavas) para 5%. As Figs 2.16 e 2.17 representam o comportamento do sensor de placas côncavas e helicoidal, respectivamente, para o padrão estratificado em função do posicionamento dos eletrodos na superfície externa do duto isolante.

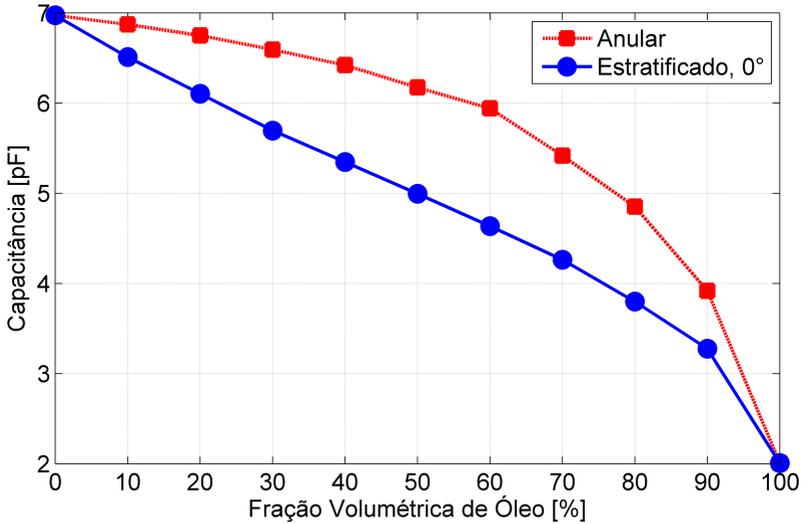


Figura 2.15: Efeito do padrão de escoamento na medição da capacitância. Escoamento água/óleo nos padrões estratificado e anular

As Figs 2.18 e 2.19 representam o comportamento do sensor de placas côncavas e helicoidal para os padrões estratificado, anular, de golfada e bolha para escoamento gás-óleo e gás-água, respectivamente.

Ye *et al.* [66] avaliaram a uniformidade do campo de sensibilidade para duas configurações de eletrodos helicoidais e uma de placas côncavas (quatro eletrodos). As configurações helicoidais (hélice dupla) tinham valores de passo diferentes (22mm e 44mm) e uma delas também possuía eletrodos de aterramento axial. A Fig. 2.20 ilustra a distribuição de sensibilidade dos sensores utilizados pelos autores. Ao se observar a figura, fica claro que a distribuição mais uniforme é aquela obtida com o uso do sensor helicoidal com aterramento axial (Fig. 2.20(b)). Tal melhoria foi atribuída à redução na diferença de sensibilidade entre as regiões central e as próximas à parede do duto causada pelo uso da malha de aterramento. No entanto, deve-se ficar atento

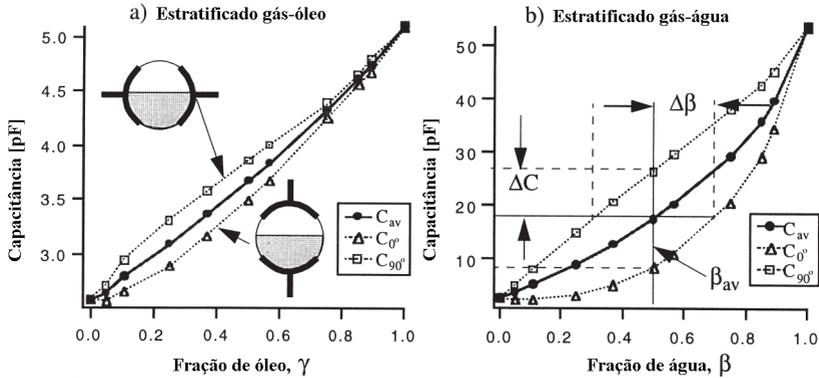


Figura 2.16: Efeito do padrão de escoamento na medição da capacitância para diferentes posições dos eletrodos de placas côncavas. Escoamento gás/óleo (a) e gás-água (b) no padrão estratificado.  $\Delta C_{av}$  representa a capacitância média,  $\Delta C_{0^\circ}$  representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados horizontalmente e  $\Delta C_{90^\circ}$  representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados verticalmente. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48]

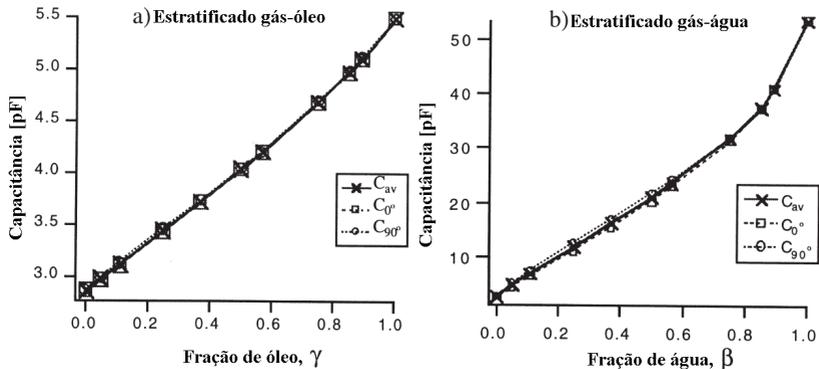


Figura 2.17: Efeito do padrão de escoamento na medição da capacitância para diferentes posições dos eletrodos helicoidais. Escoamento gás/óleo (a) e gás-água (b) no padrão estratificado.  $\Delta C_{av}$  representa a capacitância média,  $\Delta C_{0^\circ}$  representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados horizontalmente e  $\Delta C_{90^\circ}$  representa a capacitância medida para os eletrodos posicionados verticalmente. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48]

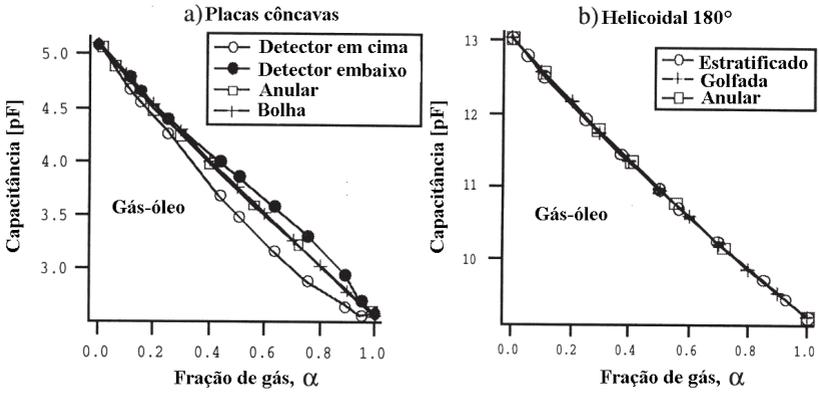


Figura 2.18: Efeito do padrão de escoamento gás-óleo na medição da capacitância. (a) sensor de placas côncavas e (b) sensor helicoidal 180°. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48]

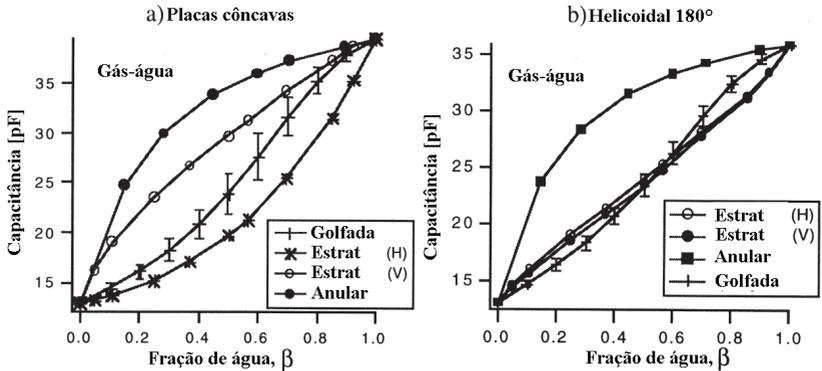


Figura 2.19: Efeito do padrão de escoamento gás-água na medição da capacitância. (a) sensor de placas côncavas e (b) sensor helicoidal 180°. *H* representa os eletrodos posicionados horizontalmente e *V* representa os eletrodos posicionados verticalmente. Adaptado de Tollefsen e Hammer [48]

ao fato de que a distribuição obtida para o sensor de quatro placas côncavas (Fig. 2.20(c)) foi obtida usando-se parâmetros de projeto não otimizados; ou seja a uniformidade do mapa de sensibilidade poderia ser melhorada se considerados parâmetros geométricos otimizados.

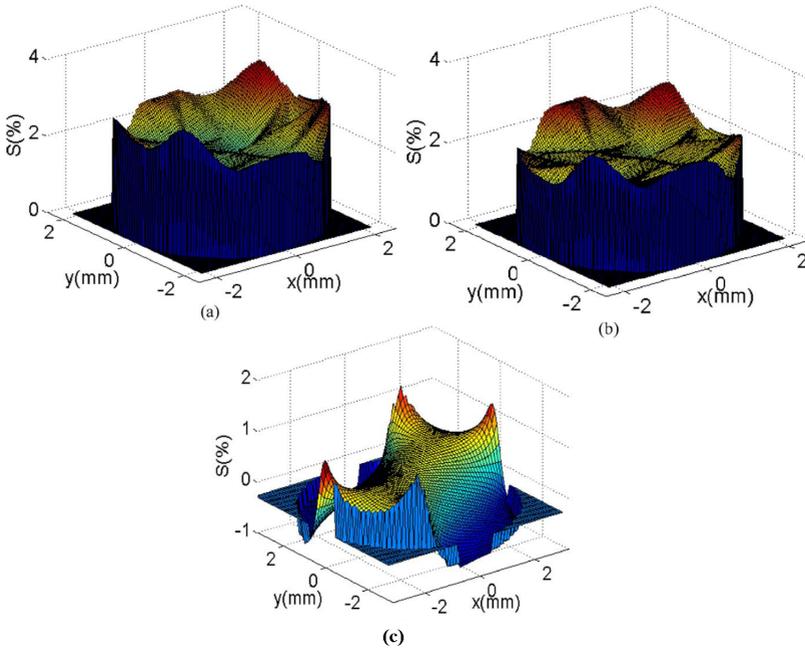


Figura 2.20: Comparação da distribuição de sensibilidade. (a) sensor helicoidal, (b) sensor helicoidal com aterramento axial e (c) sensor de placas côncavas. Adaptado de Ye *et al.* [66]

## 2.5 Efeito da Frequência do Sinal de Excitação, Temperatura e Condutividade dos Fluidos

A escolha correta da frequência do sinal de excitação de um medidor de impedância pode caracterizar qual modo, capacitivo ou resistivo, irá prevalecer. Na maioria dos trabalhos já publicados a frequência de excitação do sinal utilizado é de 1MHz, sendo recomendada a frequência mínima de 500kHz para manter o domínio do efeito capacitivo sobre o resistivo na impedância medida.

Elkow et al.[15] examinaram os efeitos provocados pela mudança da frequência de oscilação do sinal de excitação na capacitância medida em uma faixa de 10kHz a 1MHz; e constataram que o uso de frequências mais elevadas proporciona um domínio da capacitância e minimiza o efeito da condutância, ou seja, mantém o efeito da resistência pequeno relativamente ao

da capacitância. De fato, ao se observar a Fig. 2.21, para uma frequência de 1MHz o ângulo de fase correspondente é de  $89^\circ$ , valor este muito próximo ao de um circuito puramente capacitivo em que a corrente está  $90^\circ$  adiantada em relação à tensão.

Outro fator que deve ser avaliado é a temperatura dos fluidos que compõem o escoamento, uma vez que a constante dielétrica da(s) fase(s) líquida(s) diminui com o aumento da temperatura. Elkon e Reskallah [15] investigaram também o efeito da temperatura sobre a capacitância medida para um sensor de placas côncavas e helicoidal em escoamento monofásico de água. Segundo os autores, e de acordo com a Fig. 2.22, a capacitância aumenta como o aumento da temperatura para o sensor de placas côncavas. Já para o sensor com eletrodos helicoidais, ocorre o contrário. Os autores atribuíram tal diferença não somente ao tipo de eletrodos utilizados, mas principalmente ao tipo de material da parede do duto isolante: para o sensor helicoidal eles utilizaram um duto de acrílico e para o sensor de placas côncavas, resina/fibra de vidro.

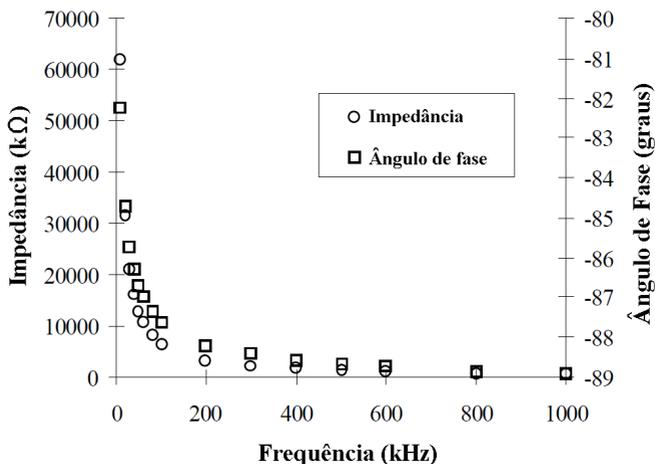


Figura 2.21: Ângulo de fase e impedância do sensor em função da frequência de oscilação do sinal de excitação. Adaptado de Elkon e Reskallah [15]

Além da frequência do sinal e da temperatura, a condutividade das fases é outro fator que influencia diretamente no desempenho dos sensores de impedância. Para sensores não-invasivos o efeito se torna ainda mais evidente, como mostram Huang *et al.* [20]. Eles investigaram o efeito da condutividade da água em um escoamento disperso de água em óleo considerando sensores invasivos e não-invasivos com circuito de medição de capacitância

baseado em carga e descarga. Como pode ser observado na Fig. 2.23, a capacitância normalizada aumenta com o aumento da salinidade (aumento da condutividade) da água (a); e, para o caso de sensores com circuitos de carga e descarga, esse efeito pode ser amenizado diminuindo-se a frequência de chaveamento. Para o caso de aplicações com sensores não-invasivos, o aumento da frequência do sinal de excitação reduz os efeitos da condutividade da água.

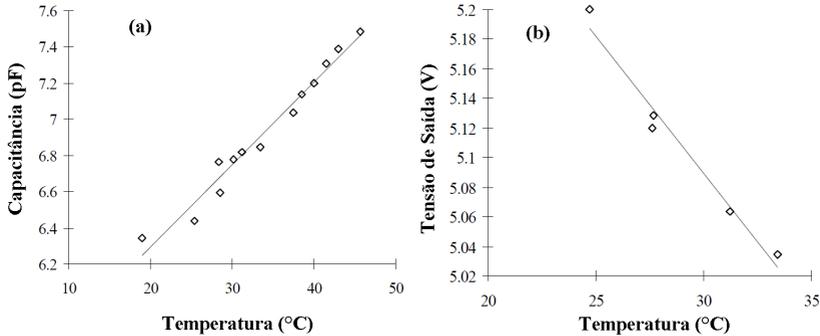


Figura 2.22: Efeito da temperatura sobre a capacitância medida em escoamento monofásico de água. (a) sensor de placas côncavas e (b) sensor helicoidal. Adaptado de Elkon e Reskallah [15]

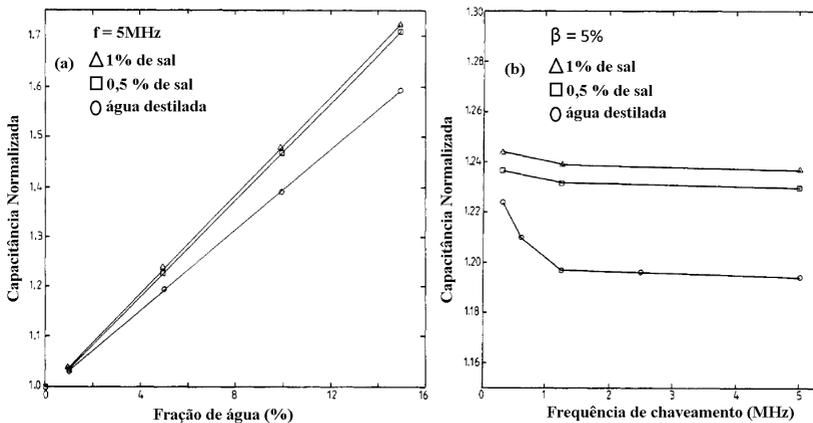


Figura 2.23: Efeito da condutividade da água na capacitância medida em função da fração volumétrica de água (a) e da frequência de chaveamento do circuito de carga e descarga (b). Adaptado de Huang *et al.* [20]

## 2.6 Circuitos para Medição de Capacitância

Na literatura, são apresentados dois circuitos que servem como base para medição de capacitância em aplicações de ECT: o circuito de carga e descarga (CD) [52] e o circuito baseado em corrente alternada (AC) [64]. Tais circuitos são extensamente usados por serem basicamente imunes às capacitâncias parasitas [55]. Ambos os circuitos foram analisados e comparados por Yang [57]. Recentemente, métodos mais complexos foram propostos [7] [10] [35] [46] [50] buscando, principalmente o diminuição da sensibilidade a ruídos e interferências externas e o aumento da taxa de aquisição.

### 2.6.1 Circuito de Carga e Descarga

O circuito de carga e descarga (CD), ilustrado na Fig. 2.24, é baseado no princípio de transferência de carga. Consiste em carregar e descarregar repetidamente a capacitância desconhecida  $C_X$  por meio da ação combinada das chaves semicondutoras  $S_1$  e  $S_2$ . Durante a fase de carga, as chaves  $S_1$  e  $S_4$  estão fechadas e as chaves  $S_2$  e  $S_3$  estão abertas. A carga flui desde a fonte de tensão  $V_e$  do capacitor (capacitância a ser medida)  $C_X$  e é convertida em tensão pelo amplificador operacional. Durante a fase de descarga, as chaves  $S_2$  e  $S_3$  estão fechadas e as chaves  $S_1$  e  $S_4$  estão abertas. A carga armazenada no capacitor  $C_X$  é descarregada através do amplificador operacional. Um amplificador diferencial, com ganho  $K$ , é usado para somar esses dois sinais, fornecendo, deste modo, uma tensão proporcional a capacitância medida:

$$V_3 = K(V_2 - V_1) = 2KfV_eC_XR_f \quad (2.43)$$

em que  $f$  representa a frequência de operação e  $R_f$  representa o valor da resistência de realimentação (*feedback*).

### 2.6.2 Circuito Baseado em CA

No circuito baseado em AC, ilustrado na Fig. 2.25, uma tensão senoidal é aplicada no capacitor (capacitância a ser medida)  $C_X$ , produzindo uma corrente CA de entrada. Um amplificador operacional com capacitor ( $C_f$ ) e resistor ( $R_f$ ) de realimentação (*feedback*) converte esta corrente em uma tensão CA [57]. Assim,

$$V_0 = \frac{j\omega C_X R_f}{j\omega C_f R_f + 1} V_i \quad (2.44)$$

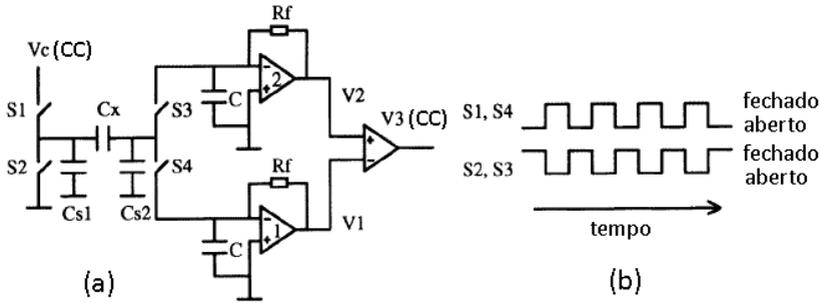


Figura 2.24: Circuito de medição por Carga/Descarga. (a) Circuito com capacitância parasita; (b) Sinal de Chaveamento. Adaptado de Yang [57]

em que  $\omega$  é a frequência angular do sinal de tensão senoidal. Se for escolhido um valor grande para  $R_f$ , tem-se que  $|j\omega C_f R_f| \gg 1$  (por exemplo, se  $\omega = 2\pi 500 \times 10^3$ , i.e.  $f = 500\text{kHz}$ ,  $C_f = 100\text{pF}$ ,  $R_f = 1\text{M}\Omega$ , então  $|j\omega C_f R_f| = 314,2 \gg 1$ ), a equação 2.44 pode ser reescrita como

$$V_0 = -\frac{C_x}{C_f} V_i \quad (2.45)$$

Desta maneira, o circuito baseado em CA produz um sinal CA com magnitude proporcional à capacitância medida.

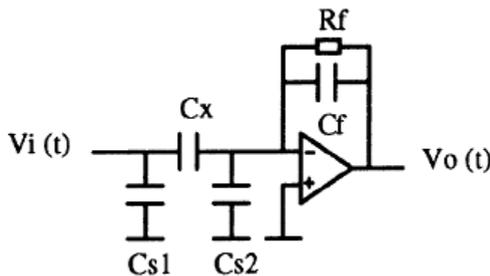


Figura 2.25: Circuito de medição baseado em CA. Adaptado de Yang [57]

## 2.7 Algoritmos para Reconstrução de Imagem

O problema da reconstrução de imagem a partir das medições realizadas é denominado de problema inverso, enquanto que o cálculo das capacitâncias a partir de uma imagem conhecida (distribuição de permissividade relativa conhecida) é denominado problema direto. Em sistemas ECT, a tarefa do algoritmo de reconstrução é, portanto, resolver o problema inverso. Ou seja, determinar a distribuição de permissividade relativa (imagem) dos objetos (fluidos, na indústria do petróleo) presentes na região sensível do sensor a partir de um conjunto limitado de medições de capacitâncias.

As imagens reconstruídas são propensas a apresentarem erros (geralmente nomeados de artefatos) devido ao número de incógnitas (o número de pixels na imagem) ser muito maior que o número de capacitâncias medidas. Por exemplo, para um sistema com 8 eletrodos, o número de pixels, geralmente 812, é muito maior que o número de capacitâncias medidas que, neste caso, é 28 (ver Eq. 2.19).

Como não há solução única para o problema de ajustar uma distribuição de permissividade relativa ( $\mathbf{g}$ ) para um conjunto particular de capacitâncias normalizadas ( $\lambda$ ), diz-se que esse problema é, portanto, um problema mal posto. Ou seja, caso haja uma solução, esta não será única ou não tem uma dependência contínua (suave) com os dados de entrada (capacitâncias normalizadas). Em sistemas ECT, a matriz de sensibilidade é dita mal-condicionada, portanto, qualquer pequena variação na capacitância medida pode causar grande mudança na imagem reconstruída.

Resumindo, para se reconstruir uma imagem a partir de variações de capacitância, a Eq. 2.46 deve ser resolvida. No entanto, há diversas dificuldades associadas à matriz de sensibilidade [63]:

- a matriz  $\mathbf{S}$  não pode ser invertida diretamente. Geralmente, o número de medições é menor que o número de pixels da imagem e uma pseudo-inversa de  $\mathbf{S}$  é requerida;
- o problema é mal posto. O número de variáveis conhecidas (capacitâncias normalizadas) é muito menor que o número de variáveis desconhecidas (permissividades relativas normalizada). Ou seja, diferentemente do problema direto, a solução do problema inverso não é única;
- a matriz  $\mathbf{S}$  é mal condicionada. O número de condicionamento da matriz  $\mathbf{S}$  é, geralmente, muito grande, resultando no aumento dos erros de medição e dos erros numéricos da reconstrução.

$$\lambda = \mathbf{S}\mathbf{g} \quad (2.46)$$

As mais diversas ferramentas matemáticas (algoritmos) têm sido utilizadas para a reconstrução de imagem. Desde a revisão feita por Isaksen [22], um considerável número de novos algoritmos tem sido desenvolvido e direcionado ao tratamento de problemas mal postos. Em geral, eles podem ser classificados em dois grupos: algoritmos diretos e algoritmos iterativos [62].

Aqui serão apresentados somente os algoritmos de reconstrução utilizados nesta tese: o algoritmo de retro-projeção linear e o algoritmo de Landweber. Para mais informações e o melhor entendimento dos demais algoritmos aplicados em sistemas ECT, sugere-se a leitura dos trabalhos de Isaksen [22], de Neumayer [36] e de Yang [62].

### 2.7.1 Retro Projeção Linear

Se a inversa de  $\mathbf{S}$  existisse, a Eq. 2.35 poderia ser resolvida diretamente por

$$\mathbf{g} = \mathbf{S}^{-1}\lambda \quad (2.47)$$

No entanto, a inversa de  $\mathbf{S}$  não existe e outros métodos para a solução do problema devem ser utilizados. O algoritmo de retro projeção linear, desenvolvido por Xie *et al.* [52], considera a matriz  $\mathbf{S}$  como um mapeamento linear desde o espaço vetorial das permissividades relativas normalizadas para o espaço vetorial das capacitâncias normalizadas. Desta forma, a transposta de  $\mathbf{S}$  pode ser considerada como um mapeamento linear do espaço vetorial das capacitâncias normalizadas para o espaço vetorial das permissividades relativas normalizadas. Assim, a solução aproximada para a distribuição de permissividade relativa normalizada,  $\hat{\mathbf{g}}$  pode ser dada por

$$\hat{\mathbf{g}} = \mathbf{S}^T\lambda \quad (2.48)$$

De acordo com a Fig. 2.7, pode-se observar que os valores das capacitâncias normalizadas devem estar contidos no intervalo  $[0, 1]$ . E, conseqüentemente, o valor de permissividade relativa normalizada também deveria estar contido no intervalo  $[0, 1]$ . Como o problema é não linear, o que sucede na pratica é a ocorrência de valores de capacitância normalizada menores que 0, denominados de *under-shooting* e valores de capacitância maiores que 1, denominados de *over-shooting*. O mesmo ocorre com os valores de  $\hat{\mathbf{g}}$ , pro-

vocando o aparecimento de artefatos (saliências ou depressões que aparecem no plano da imagem) que contribuem negativamente para a resolução da imagem, dificultando a definição das interfaces.

O problema do *over-shooting* no cálculo de  $\hat{\mathbf{g}}$  pode ser eliminado através de uma operação de truncamento [52]. Essa operação sugere que a capacidade normalizada deve ser truncada para a unidade sempre que for maior que 1; e para zero sempre que for menor que zero, ou seja

$$\lambda = 1 \quad \text{se} \quad \lambda > 1 \quad (2.49)$$

$$\lambda = 0 \quad \text{se} \quad \lambda < 0 \quad (2.50)$$

Mesmo fornecendo apenas imagens qualitativas, Fig. 2.26, o algoritmo LBP é largamente utilizado para reconstrução de imagens em tempo real [62].

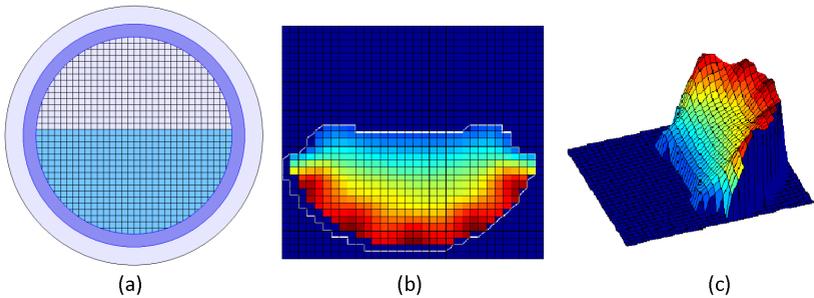


Figura 2.26: Reconstrução do escoamento laminar usando o algoritmo LBP. (a) imagem real, (b) imagem reconstruída e (c) vista 3D.

## 2.7.2 Landweber Iterativo

### Princípio dos Algoritmos Iterativos

Tal como apresentado por Yang *et al.* [63], assumindo que  $\mathbf{A}_0$  seja uma aproximação inicial para  $\mathbf{S}^{-1}$ , a matriz residual pode ser definida como

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} - \mathbf{A}_0\mathbf{S} \quad (2.51)$$

em que  $\mathbf{I}$  representa a matriz identidade. Rearranjando-se os termos da Eq. 2.51, tem-se

$$\mathbf{S}^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}_0 \quad (2.52)$$

Se  $\mathbf{A}_0$  é tão próxima de  $\mathbf{S}^{-1}$  que o raio espectral da matriz residual é menor que a unidade,  $\rho(\mathbf{R}) < 1$ , uma expansão em série de  $(\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1}$  pode ser feita e a  $k$ -ésima aproximação da inversa é dada por [63][49]

$$\mathbf{A}_k = (\mathbf{I} + \mathbf{R}) + \dots + \mathbf{R}^{k+1} \mathbf{A}_0 \quad (2.53)$$

Note que

$$(\mathbf{I} - \mathbf{R})(\mathbf{I} + \mathbf{R} + \dots + \mathbf{R}^{k+1}) = \mathbf{I} - \mathbf{R}^{k+2} \quad (2.54)$$

Rearranjando-se as Eq. 2.51, Eq. 2.53 e Eq. 2.54, tem-se

$$\mathbf{R}^k \mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_0 (\mathbf{I} - \mathbf{S} \mathbf{A}_k) \quad (2.55)$$

Para a  $(k+1)$ -ésima aproximação de  $\mathbf{S}^{-1}$  pela matriz  $\mathbf{A}_{k+1}$ , tem-se, portanto,

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \mathbf{A}_{k+1} \lambda \quad (2.56)$$

Utilizando a Eq. 2.53 para expandir a Eq. 2.56, tem-se

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k + \mathbf{R}^k \mathbf{A}_0 \lambda \quad (2.57)$$

Substituindo a Eq. 2.55 na Eq. 2.57, tem-se

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k + \mathbf{A}_0 (\lambda - \mathbf{S} \hat{\mathbf{g}}_k) \quad (2.58)$$

Dessa forma, dada uma estimativa inicial de  $\mathbf{S}^{-1}$ , a Eq. 2.58 pode ser utilizada para prover a aproximação iterativa para melhorar a estimativa do vetor de permissividade relativa.

A condição para a aproximação de  $(\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1}$  na Eq. 2.52 pode ser escrita em termos da norma Euclidiana da matriz residual ( $\mathbf{R}$ ),

$$\|\mathbf{R}\|_2 < 1 \quad (2.59)$$

Substituindo a Eq. 2.51 na Eq. 2.59, tem-se a condição necessária para a convergência do processo iterativo como

$$\|\mathbf{A}_0\mathbf{S}\|_2 < 2 \quad (2.60)$$

### Algoritmo de Landweber

O algoritmo de Landweber [28] é uma variante do método do gradiente descendente (*steepest descent* ou *gradient descent*) e foi originalmente desenvolvido para resolver o problema de mínimos quadrados. O algoritmo minimiza a seguinte função objetivo [62] [29]

$$\min f(\mathbf{g}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{g} - \lambda\|^2 \quad (2.61)$$

Sendo  $f(\mathbf{g})$  dada por

$$f(\mathbf{g}) = \frac{1}{2} (\mathbf{S}\mathbf{g} - \lambda)^T (\mathbf{S}\mathbf{g} - \lambda) = \frac{1}{2} (\mathbf{g}^T \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{g} - 2\mathbf{g}^T \mathbf{S}^T \lambda + \lambda^T \lambda) \quad (2.62)$$

o gradiente de  $f(\mathbf{g})$  pode ser calculado como

$$\nabla f(\mathbf{g}) = \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{g} - \mathbf{S}^T \lambda = \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{g} - \lambda) \quad (2.63)$$

O método do gradiente descendente escolhe a direção na qual  $f(\mathbf{g})$  decresce mais rapidamente como a nova direção para a próxima iteração. Esta direção é oposta ao gradiente de  $f(\mathbf{g})$  no ponto atual. O procedimento de iteração é portanto

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k - \mu_k \nabla f(\hat{\mathbf{g}}_k) = \hat{\mathbf{g}}_k - \mu_k \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\hat{\mathbf{g}}_k - \lambda) \quad (2.64)$$

em que o termo  $\mu_k \mathbf{S}^T$  representa a aproximação inicial de  $\mathbf{S}^{-1}$  e  $\mu_k$ , denominado de fator de relaxação (ou fator de ganho), é um escalar positivo que define o tamanho do passo de iteração (*step size*). Uma maneira simples de escolher  $\mu_k$  é lhe atribuir um valor fixo no início do processo iterativo. Para  $\mu_k$  fixo, o algoritmo de Landweber pode ser expresso como

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k - \mu \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\hat{\mathbf{g}}_k - \lambda) \quad (2.65)$$

O valor de  $\mu_k$  também pode ser definido a partir de um determinado

critério de convergência. Por exemplo, substituindo  $\mathbf{A}_0$  por  $\mu \mathbf{S}^T$  na Eq. 2.60, tem-se

$$\|\mu \mathbf{S}^T \mathbf{S}\|_2 < 2 \quad (2.66)$$

Assim,  $\mu$  pode ser dado por

$$\mu = \frac{2}{\delta_{max}} \quad (2.67)$$

em que  $\delta_{max}$  é o máximo autovalor de  $\mathbf{S}^T \mathbf{S}$ .

Na Eq. 2.65, o termo  $\hat{\mathbf{g}}_k$  representa a solução inicial, que pode ser igual a zero ou obtida, por exemplo, pelo algoritmo LBP. Quando a  $\hat{\mathbf{g}}_k$  for atribuído valor igual a zero, a solução converge para a solução de mínimos quadrados de norma mínima [63].

O maior problema do método iterativo de Landweber está relacionado a sua baixa taxa de convergência. Uma forma simples de melhorar a taxa de convergência é modificar a Eq. 2.65 incluindo um operador de projeção ( $P$ ) [29] [51] [62] [63]

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = P[\hat{\mathbf{g}}_k - \mu \mathbf{S}^T (\mathbf{S} \hat{\mathbf{g}}_k - \lambda)] \quad (2.68)$$

Dessa forma, a cada iteração, a solução é projetada para um conjunto convexo.

$$P[f(x)] = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x) < 0 \\ f(x) & \text{se } 0 \leq f(x) \leq 1 \\ 1 & \text{se } f(x) > 1 \end{cases} \quad (2.69)$$

Outro problema do método iterativo de Landweber é a sua semi-convergência. O erro de imagem diminui rapidamente, mas após alcançar o ponto mínimo, o erro de imagem cresce caso o processo de iteração continue. O número ótimo de iterações pode ser determinado se há alguma informação prévia sobre as capacitâncias medidas. No entanto, geralmente um número fixo de iterações é escolhido empiricamente. Para aplicações em medição de fração, esse problema se torna ainda maior, pois em geral não há um número fixo de iterações que possa ser aplicado a todo o intervalo de medição (0 a 100%). A Fig. 2.27 ilustra a reconstrução de um escoamento estratificado óleo-água utilizando o algoritmo de Landweber com operador de projeção.

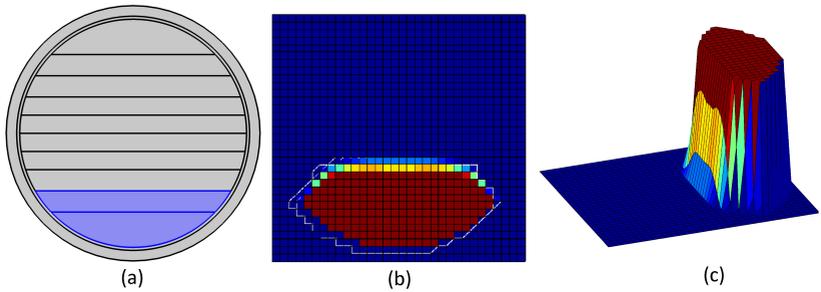


Figura 2.27: Reconstrução do escoamento laminar usando Landweber. (a) imagem real, (b) imagem reconstruída e (c) vista 3D.

## 2.8 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais tópicos relacionados à teoria e ao projeto de sensores capacitivos, visando, assim, que sejam levados em consideração todos os efeitos da variação dos parâmetros geométricos e operacionais sobre o desempenho do sensor. Também foram apresentados os fundamentos teóricos que formam a base do método ECTM proposto nesta tese.



## Capítulo 3

# Projeto do Sensor e Método de Medição Proposto

### 3.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se o sistema ECTM proposto neste trabalho. Inicialmente, apresenta-se o procedimento adotado na simulação numérica para análise dos efeitos dos parâmetros geométricos de projeto de sensores capacitivos e, a partir, dos resultados de simulação, a construção do sensor. Depois, o método de medição e cálculo da fração volumétrica são apresentados, juntamente com os demais componentes do sistema.

### 3.2 Configuração Geral dos Sensor

O sensor utilizado na simulação numérica é constituído, basicamente, por um duto não condutor (permissividade relativa  $\epsilon_p = 3$ ) tendo em sua parede externa  $n$  eletrodos de medição igualmente espaçados e todo o conjunto está envolto por uma proteção denominada blindagem ou malha de aterramento externo. Em algumas simulações também foram considerados eletrodos de aterramento axial, entre os pares de eletrodos de medição, e anéis de aterramento final (para simulações 3D). A Fig. 3.1 ilustra as vistas frontal e lateral do sensor em que  $R_1$  e  $R_2$  são o raio interno e externo do duto isolante, respectivamente.  $R_3$  representa o raio da blindagem (aterramento externo).  $\theta$  e  $\phi$  são os ângulos referentes ao comprimento angular dos eletrodos de me-

dição e dos eletrodos de aterramento axial, respectivamente.  $L_1$  e  $L_3$  são os comprimentos dos eletrodos de medição e dos anéis de aterramento axial final, respectivamente, e  $L_2$  representa o espaçamento entre eles. A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros escolhidos como base para dar início à variação dos parâmetros e, assim, poder analisar a influência de cada um no desempenho do sensor.

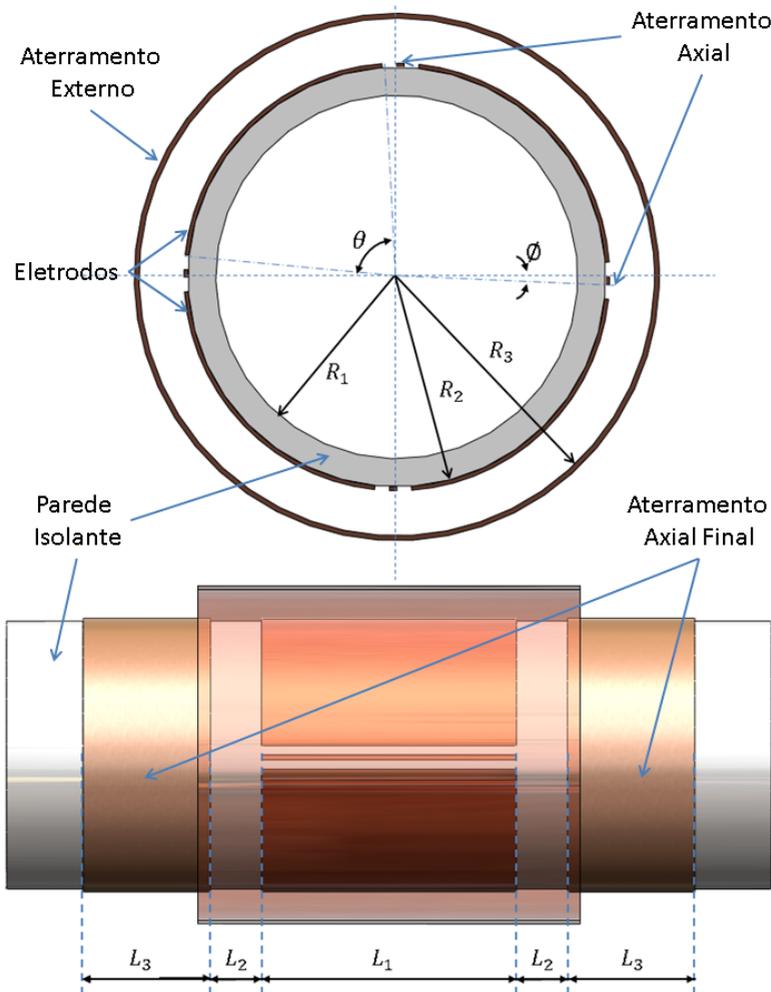


Figura 3.1: Ilustração das vistas frontal e lateral de um sensor capacitivo com 4 eletrodos.

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados como base.

Parâmetros						
$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	$R_3$ [mm]	$\epsilon_o$	$\epsilon_a$	$\epsilon_p$	$L_1$ [mm]
38,0	43,0	50,0	2,2	80,0	3,0	100,0

### 3.3 Capacitância entre Eletrodos

Como foi visto anteriormente, no capítulo 2 subseção 2.2.1, a capacitância entre os pares de eletrodos pode ser obtida por

$$C = -\frac{1}{u} \iint_{\Gamma} \epsilon \nabla \phi d\Gamma \quad (3.1)$$

em que  $\epsilon$  representa a distribuição de permissividade na região sensitiva (seção transversal do duto, por exemplo),  $u$  representa a diferença de potencial entre o par de eletrodos,  $\phi$  representa a distribuição de potencial e  $\Gamma$  representa a superfície do eletrodo.

Como um dos parâmetros de projeto a ser analisado é o número de eletrodos, optou-se por sensores com 2, 4, 8 e 12 eletrodos. Assim, tem-se 1, 6, 28 e 66 medições independentes. Na Tabela 3.3 estão dispostas as 144 combinações possíveis para um sensor com 12 eletrodos. No entanto, não se utilizará o último eletrodo como emissor (todas as possíveis medições são dependentes), assim o número de medições independentes reduz-se de 144 para 132. Como pode-se observar,  $C_{i,j} = C_{j,i}$ , restando portanto as 66 medições ditas independentes.

Este conjunto de medições pode ser organizado em grupos caracterizados pela “distância” entre os eletrodos, assim, tem-se:

- Grupo 1 - Eletrodos Adjacentes: este grupo é representado pelo par (1,2) e é formado por todos os pares de eletrodos adjacentes. A saber, (1,2), (2,3), (3,4), (5,6), (6,7), (7,8), (8,9), (9,10), (10,11) e (11,12);
- Grupo 2 - 1 Eletrodos Intermediários: este grupo é representado pelo par (1,3) e é formado por todos os pares de eletrodos com um eletrodo intermediário. A saber, (1,3), (2,4), (3,5), (5,7), (6,8), (7,9), (8,10), (9,11) e (10,12);
- Grupo 3 - 2 Eletrodos Intermediários: este grupo é representado pelo par (1,4) e é formado por todos os parede de eletrodos adjacentes. A saber, (1,4), (2,5),(3,6), (5,8), (6,9), (7,10), (8,11) e (9,12);

Tabela 3.2: Possíveis medições de capacitância entre eletrodos.

$E_{em}$	Receptor											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	x	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)	(1,9)	(1,10)	(1,11)	(1,12)
2	(2,1)	x	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)	(2,7)	(2,8)	(2,9)	(2,10)	(2,11)	(2,12)
3	(3,1)	(3,2)	x	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)	(3,8)	(3,9)	(3,10)	(3,11)	(3,12)
4	(4,1)	(4,2)	(4,3)	x	(4,5)	(4,6)	(4,7)	(4,8)	(4,9)	(4,10)	(4,11)	(4,12)
5	(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	x	(5,6)	(5,7)	(5,8)	(5,9)	(5,10)	(5,11)	(5,12)
6	(6,1)	(6,2)	(6,3)	(6,4)	(6,5)	x	(6,7)	(6,8)	(6,9)	(6,10)	(6,11)	(6,12)
7	(7,1)	(7,2)	(7,3)	(7,4)	(7,5)	(7,6)	x	(7,8)	(7,9)	(7,10)	(7,11)	(7,12)
8	(8,1)	(8,2)	(8,3)	(8,4)	(8,5)	(8,6)	(8,7)	x	(8,9)	(8,10)	(8,11)	(8,12)
9	(9,1)	(9,2)	(9,3)	(9,4)	(9,5)	(9,6)	(9,7)	(9,8)	x	(9,10)	(9,11)	(9,12)
10	(10,1)	(10,2)	(10,3)	(10,4)	(10,5)	(10,6)	(10,7)	(10,8)	(10,9)	x	(10,11)	(10,12)
11	(11,1)	(11,2)	(11,3)	(11,4)	(11,5)	(11,6)	(11,7)	(11,8)	(11,9)	(11,10)	x	(11,12)
12	(12,1)	(12,2)	(12,3)	(12,4)	(12,5)	(12,6)	(12,7)	(12,8)	(12,9)	(12,10)	(12,11)	x

- Grupo 4 - 3 Eletrodos Intermediários: este grupo é representado pelo par (1,5) e é formado por todos os parede de eletrodos adjacentes. A saber, (1,5), (2,6),(3,7), (5,9), (6,10), (7,11) e (8,12);

Fica evidente que a quantidade de grupos (e o número de medições por grupo) é reduzida ao se reduzir o número de eletrodos. Por exemplo, para sensores com 4 eletrodos haverá somente os grupos 1, 2 e 3 cada qual com 3, 2 e 1 medições, respectivamente.

### **3.4 Análise da Influência dos Parâmetros de Projeto sobre a Sensibilidade do Sensor**

Para a avaliação da influência devido à variação dos parâmetros de projeto sobre a distribuição da sensibilidade dos sensores capacitivos, fez-se uso do pacote comercial de simulação numérica COMSOL Multiphysics com o modelo numérico e as condições de contorno discutidas no Capítulo 2, Seção 2.2. Após a validação do modelo, avaliou-se a influência dos seguintes parâmetros: a espessura da parede do duto isolante, o comprimento angular dos eletrodos (largura), o comprimento angular (largura) dos eletrodos de aterramento axial e o diâmetro da malha (duto) de blindagem.

A influência de cada parâmetro foi avaliada utilizando a Eq. 2.40 (Capítulo 2, subseção 2.2.5 )

#### **3.4.1 Validação do Modelo**

A modelagem numérica é uma ferramenta que tem ajudado a compreender e dimensionar os mais diversos tipos de equipamentos. Porém, esses modelos só podem ser considerados válidos quando a comparação destes resultados com resultados experimentais apresentem determinado grau de concordância, estabelecido conforme o grau de detalhe que se necessita para compreensão dos fenômenos de interesse.

Para a validação do modelo implementado no COMSOL, foram utilizados os dados experimentais obtidos nos trabalhos de Flores *et al.* [17] e Alme *et al.* [2]. Os parâmetros geométricos de projeto utilizados pelos autores estão dispostos na Tabela 3.3. As Figs 3.2 a 3.5 representam a comparação entre os resultados experimentais e aqueles obtidos nas simulações realizadas neste trabalho. O erro quadrático médio normalizado (*EQMN*) foi utilizado para comparar quantitativamente os resultados.

$$EQMN = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (\hat{y}_i - y_i)^2}{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (\mu_i - y_i)^2} \quad (3.2)$$

em que  $N_e$  representa o número de amostras utilizadas,  $\hat{y}_i$  representa o valor da capacitância obtida por simulação,  $y_i$  representa o valor da capacitância obtida experimentalmente e  $\mu_i$  representa a média das capacitâncias obtidas por simulação.

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados para a validação do modelo.

Autor	Parâmetros					
	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	$R_3$ [mm]	$\theta$ [°]	$\phi$ [°]	$L_1$ [mm]
Flores <i>et al.</i> [17]	45,5	52,5	65,0	25,57	0,41	100
Alme <i>et al.</i> [2]	25,0	27,0	34,0	25,2	2,5	100

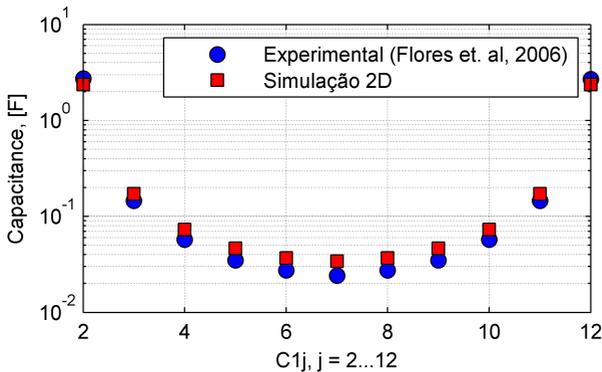


Figura 3.2: Comparação entre os valores de capacitância medidos por Flores *et al.* [17] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa  $\epsilon = 1,7$ .  $EQMN = 0,1920$ .

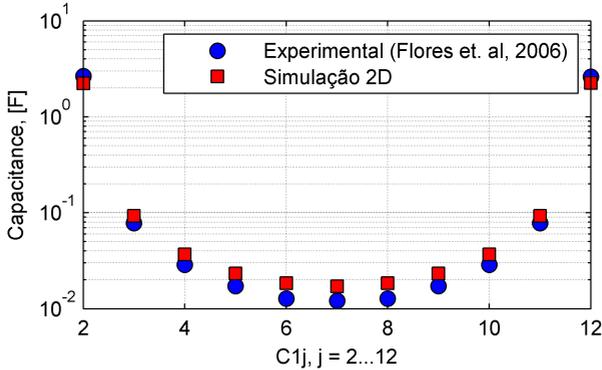


Figura 3.3: Comparação entre os valores de capacitância medidos por Flores *et al.* [17] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa  $\epsilon = 1$ .  $EQMN = 0,2248$ .

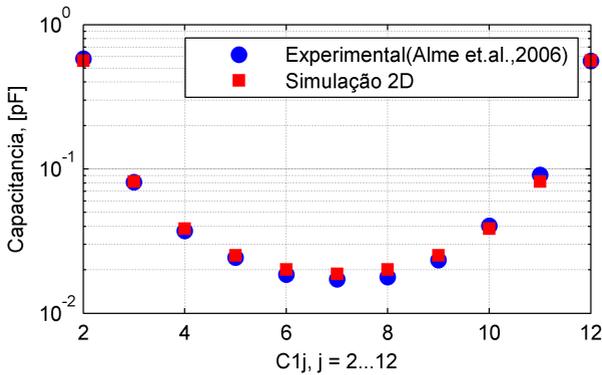


Figura 3.4: Comparação entre os valores de capacitância medidos por Alme *et al.* [2] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa  $\epsilon = 2$ .  $EQMN = 0,1142$ .

### 3.4.2 Efeito da Parede do Duto Isolante

Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 3.4 e variando-se a espessura da parede (aumentado-se o raio externo,  $R_2$ ), caracterizada por  $D_p = R_2 - R_1$ , observou-se o valor de  $S_p$  para quatro diferentes espessuras do duto isolante: 1,0; 2,5; 3,5 e 5,0. Os resultados são mostrados na Tabela 3.5.

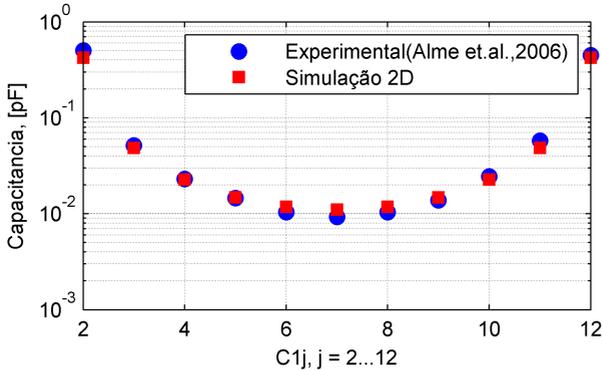


Figura 3.5: Comparação entre os valores de capacitância medidos por Alme *et al.* [2] e simulados. Modelo 2D. Sensor completamente cheio de material com permissividade relativa  $\epsilon = 1$ .  $EQMN = 0,0690$ .

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados como base para variação da espessura da parede.

Parâmetros					
$R_1$ [mm]	$R_3$ [mm]	$L_1$ [mm]	$\epsilon_o$	$\epsilon_a$	$\epsilon_p$
38,0	50,0	100,0	2,2	80,0	3,0

Tabela 3.5: Valores de  $S_p$  para diferentes valores de espessura da parede do duto isolante. Diâmetros dados em milímetros

Configuração							
2 Eletrodos		4 Eletrodos		8 Eletrodos		12 Eletrodos	
$D_p$	$S_p$	$D_p$	$S_p$	$D_p$	$S_p$	$D_p$	$S_p$
1,0	1,3648	1,0	2,7239	1,0	4,5271	1,0	5,5738
2,5	0,7353	2,5	2,3593	2,5	3,5818	2,5	4,7911
3,5	0,6189	3,5	2,2477	3,5	3,3903	3,5	4,4620
5,0	0,5777	5,0	2,1463	5,0	3,3172	5,0	1,4406

Observando-se os valores de  $S_p$  na Tabela 3.5, nota-se, claramente, que a variação da espessura da parede influencia significativamente a distribuição da sensibilidade no interior do sensor. E, segundo os valores obtidos, quanto mais espessa a parede menor é o valor de  $S_p$ .

Quanto aos mapas de sensibilidade, Figs 3.6 a 3.9, para os sensores com 2, 4, 8 e 12 eletrodos, respectivamente, observa-se que a espessura da

parede tem o seu efeito acentuado para os dois últimos casos (Fig. 3.8 e Fig. 3.9). O aumento da espessura causa o aumento da sensibilidade na região próxima ao eletrodo emissor. No entanto, esse aumento, que teoricamente deveria aumentar o valor de  $Sp$  não o faz, pois essa alta concentração de linhas de fluxo (que consequentemente aumenta o valor da capacitância) fica concentrada na região ocupada pela parede. Ou seja, a região interna do sensor (região de interesse) fica livre dessa alta concentração, apresentando somente valores de sensibilidade muito próximos.

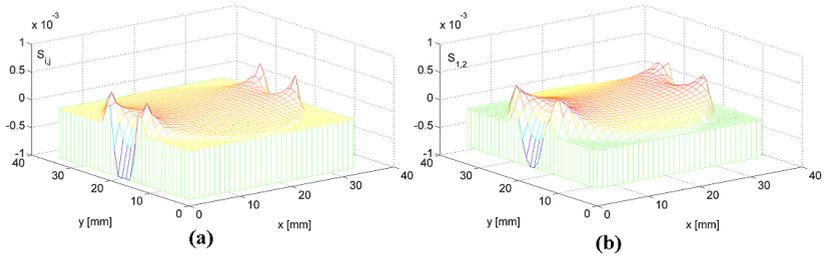


Figura 3.6: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a)  $D_e = 1,0\text{mm}$  e (b)  $D_e = 5,0\text{mm}$ .  $\theta = 150^\circ$  e  $\phi = 15^\circ$ .

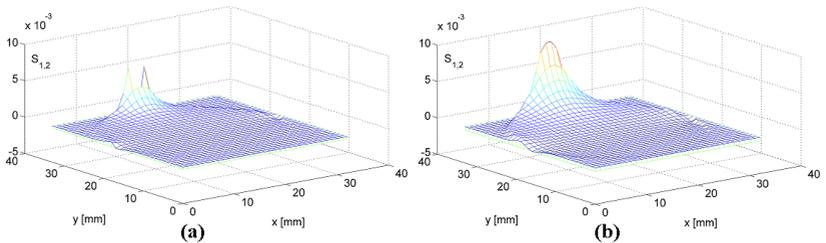


Figura 3.7: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a)  $D_e = 1,0\text{mm}$  e (b)  $D_e = 5,0\text{mm}$ .  $\theta = 80^\circ$  e  $\phi = 4^\circ$ .

### **3.4.3 Efeito do Comprimento Angular**

Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 3.6 e variando-se o valor de  $\theta$ , observou-se o valor de  $Sp$ . Os resultados estão dispostos na Tabela 3.7.

Observando-se os valores de  $Sp$  na Tabela 3.7, nota-se que o aumento de  $\theta$  afeta positivamente o valor de  $Sp$  para todas as configurações estudadas.

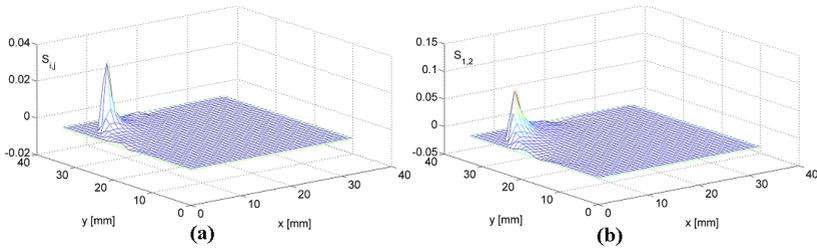


Figura 3.8: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a)  $D_e = 1,0\text{mm}$  e (b)  $D_e = 5,0\text{mm}$ .  $\theta = 40^\circ$  e  $\phi = 1^\circ$ .

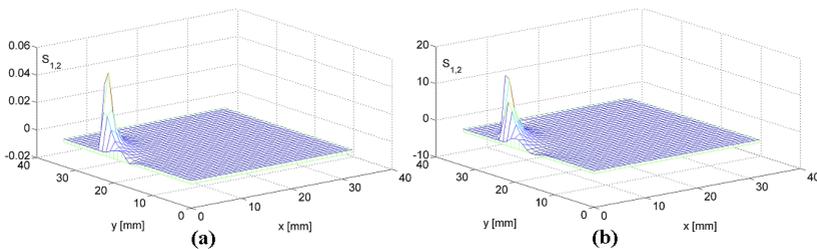


Figura 3.9: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a)  $D_e = 1,0\text{mm}$  e (b)  $D_e = 5,0\text{mm}$ .  $\theta = 25^\circ$  e  $\phi = 1^\circ$ .

Tabela 3.6: Parâmetros utilizados como base para variação do comprimento angular ( $\theta$ ) do eletrodo.

Parâmetros						
$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	$R_3$ [mm]	$L_1$ [mm]	$\epsilon_o$	$\epsilon_a$	$\epsilon_p$
38,0	43,0	50,0	100,0	2,2	80,0	3,0

Segundo Xie *et al.* [53] esses valores podem diminuir ainda mais caso fosse considerado um valor maior de espessura da parede ( $D_e$ ).

Quanto aos mapas de sensibilidade, Figs. 3.10 a 3.13, para os sensores com 2, 4, 8 e 12 eletrodos, respectivamente, observa-se que o aumento de  $\theta$  causa, assim como o aumento de  $D_e$ , o aumento da sensibilidade na região próxima ao eletrodo emissor; e pelo mesmo motivo se obtém uma distribuição de sensibilidade mais homogênea na região central do sensor. No entanto, o efeito da variação de  $\theta$  torna-se mais evidente ao se observar o desaparecimento ou amenização das regiões de sensibilidade negativa. Tais regiões, que aparecem para todas as configurações nas quais se adotaram os menores valo-

res de  $\theta$ , desapareceram ou foram reduzidas com o aumento do comprimento angular dos eletrodos.

Tabela 3.7: Valores de  $S_p$  para diferentes valores de comprimento angular ( $\theta$ ) dos eletrodos.

Configuração							
2 Eletrodos		4 Eletrodos		8 Eletrodos		12 Eletrodos	
$\theta$ [°]	$S_p$						
30	3,1833	20	3,7459	10	4,5845	10	4,8545
80	1,6730	40	2,7511	20	3,9509	15	4,5962
150	0,5777	60	2,1757	30	3,5145	20	4,3783
180	0,9973	80	2,1463	40	3,3172	25	1,4406

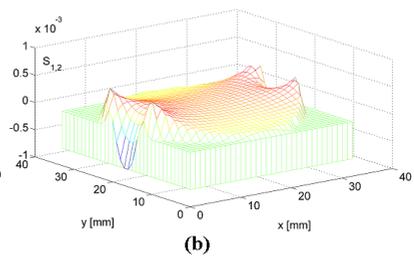
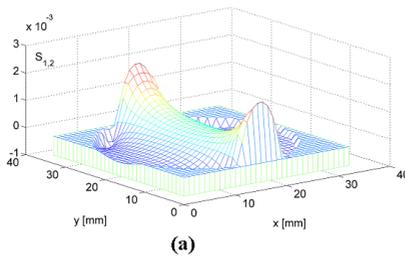


Figura 3.10: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a)  $\theta = 30,0^\circ$  e  $\phi = 148,0^\circ$ . (b)  $\theta = 150,0^\circ$  e  $\phi = 15,0^\circ$ .

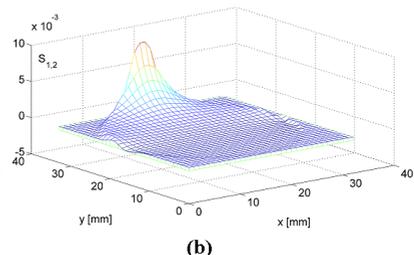
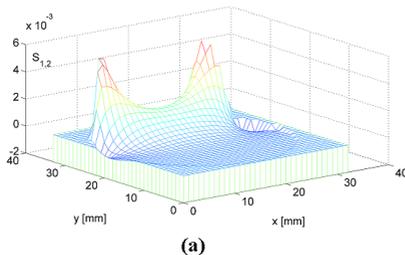


Figura 3.11: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a)  $\theta = 20,0^\circ$  e  $\phi = 148,0^\circ$ . (b)  $\theta = 80,0^\circ$  e  $\phi = 68,0^\circ$ .

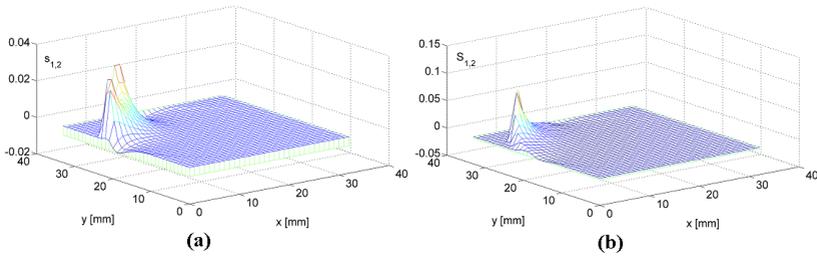


Figura 3.12: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a)  $\theta = 10,0^\circ$  e  $\phi = 33,0^\circ$ . (b)  $\theta = 40,0^\circ$  e  $\phi = 3,0^\circ$ .

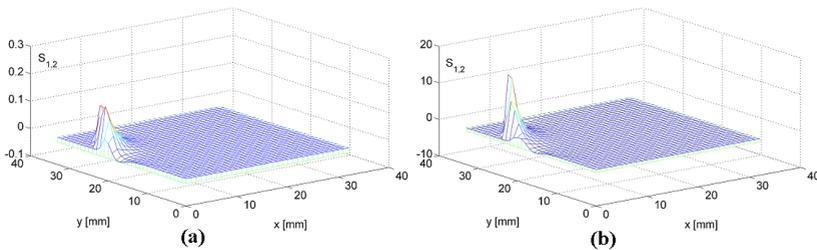


Figura 3.13: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a)  $\theta = 10,0^\circ$  e  $\phi = 18,0^\circ$ . (b)  $\theta = 25,0^\circ$  e  $\phi = 3,0^\circ$ .

### 3.4.4 Efeito da Malha de Aterramento Axial

Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 3.8 e variando-se o valor de  $\phi$ , observou-se o valor de  $Sp$ . Os resultados estão dispostos na Tabela 3.9.

Tabela 3.8: Parâmetros utilizados como base para variação do comprimento angular ( $\phi$ ) do eletrodo de aterramento axial.

Parâmetros						
$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	$R_3$ [mm]	$L_1$ [mm]	$\epsilon_o$	$\epsilon_a$	$\epsilon_p$
38,0	43,0	50,0	100,0	2,2	80,0	3,0

Observando-se os valores de  $Sp$  na Tabela 3.9, nota-se que o efeito devido à variação de  $\phi$  apresenta comportamento diferente para as diferentes configurações avaliadas. Por exemplo, para os sensores com 2 e 4 eletrodos,  $Sp$  apresenta seu valor mínimo para  $\phi = 15^\circ$  e  $4^\circ$ , respectivamente; e valores

Tabela 3.9: Valores de  $S_p$  para diferentes valores de comprimento angular ( $\phi$ ) dos eletrodos de aterramento axial.

Configuração							
2 Eletrodos		4 Eletrodos		8 Eletrodos		12 Eletrodos	
$\phi$ [°]	$S_p$	$\phi$ [°]	$S_p$	$\phi$ [°]	$S_p$	$\phi$ [°]	$S_p$
0	0,7135	0	2,1999	0	3,2617	0	1,2491
5,0	0,5868	2,0	2,2095	1,0	3,3172	1,0	1,4406
15,0	0,5777	4,0	2,1942	1,5	3,3274	1,5	1,4738
20,0	0,6220	6,0	2,2299	2,0	3,3318	2,0	1,4929

abaixo ou acima desses resultaram em valores de  $S_p$  maiores. Já para os sensores com 8 e 12 eletrodos, observou-se que o valor mínimo de  $S_p$  foi obtido quando não foram considerados eletrodos de aterramento axial,  $\phi = 0^\circ$ .

Quanto aos mapas de sensibilidade, Figs. 3.14 a 3.17, para os sensores com 2, 4, 8 e 12 eletrodos, respectivamente, observa-se que a correta escolha de  $\phi$  pode reduzir as regiões de sensibilidade negativa principalmente para sensores com 2 eletrodos. Para o sensor com 12 eletrodos, o efeito foi contrário ao observado para o sensor com 2 eletrodos. Os mapas de sensibilidade tanto para  $\phi = 0^\circ$  quanto para  $\phi = 2,0^\circ$  apresentaram regiões negativas. Para aplicações em ECT esse comportamento deve ser evitado, pois dessa maneira as medições realizadas pelo par de eletrodos (1,2) não apresentariam sensibilidade alguma às variações de permissividade no interior do sensor, resultando em valores de capacitâncias normalizadas negativas e fazendo com que surjam imperfeições nas imagens reconstruídas (artefatos).

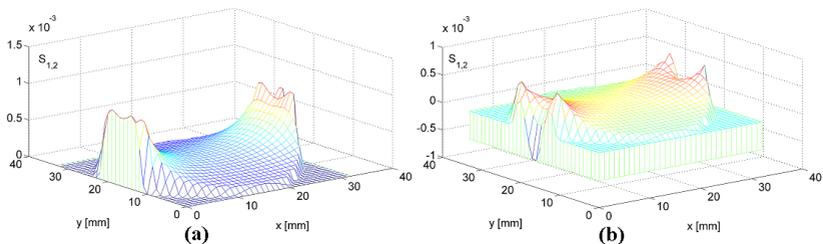


Figura 3.14: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a)  $\theta = 150,0^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ . (b)  $\theta = 150,0^\circ$  e  $\phi = 15,0^\circ$ .

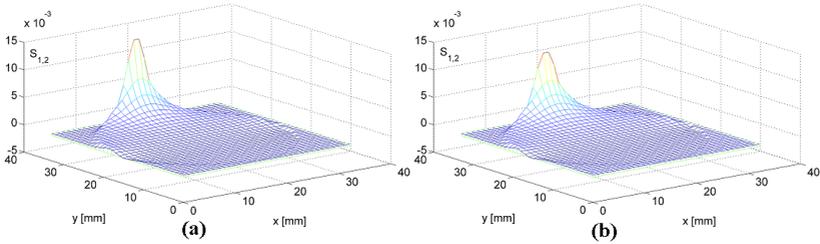


Figura 3.15: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a)  $\theta = 80,0^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ . (b)  $\theta = 80,0^\circ$  e  $\phi = 4,0^\circ$ .

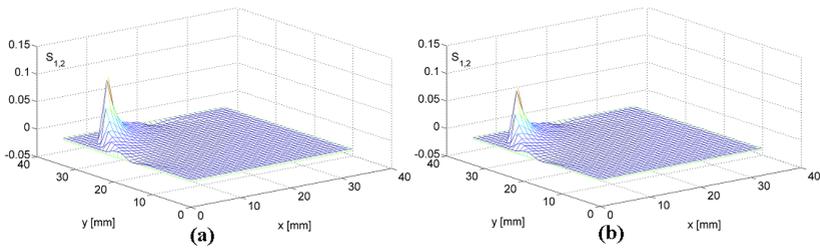


Figura 3.16: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a)  $\theta = 40,0^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ . (b)  $\theta = 40,0^\circ$  e  $\phi = 2,0^\circ$ .

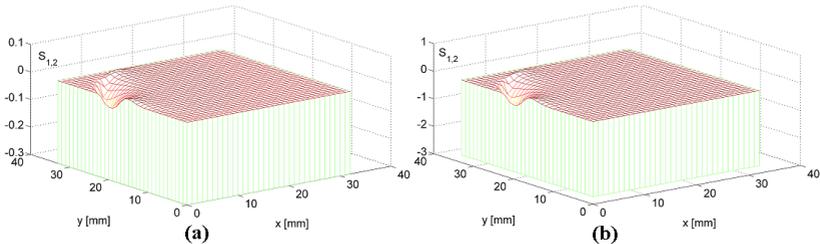


Figura 3.17: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a)  $\theta = 25,0^\circ$  e  $\phi = 0^\circ$ . (b)  $\theta = 25,0^\circ$  e  $\phi = 2,0^\circ$ .

### 3.4.5 Efeito da Malha de Aterramento Externa

Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 3.10 e variando-se a distância entre a malha de blindagem e a superfície externa do duto isolante (aumentando-se o raio,  $R_3$ ), caracterizada por  $D_e = R_3 - R_2$ , observou-se o valor de  $S_p$  para as diferentes configurações. Os resultados

estão dispostos na Tabela 3.11.

Tabela 3.10: Parâmetros utilizados como base para variação da malha de blindagem.

Parâmetros					
$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	$L_1$ [mm]	$\epsilon_o$	$\epsilon_a$	$\epsilon_p$
38,0	43,0	100,0	2,2	80,0	3,0

Tabela 3.11: Valores de  $S_p$  para diferentes valores de  $D_e$ . Diâmetros dados em *mm*

Configuração							
2 Eletrodos		4 Eletrodos		8 Eletrodos		12 Eletrodos	
$D_e$	$S_p$	$D_e$	$S_p$	$D_e$	$S_p$	$D_e$	$S_p$
2,0	0,5794	2,0	2,1903	2,0	3,3200	2,0	1,4508
7,0	0,5777	7,0	2,1942	7,0	3,3172	7,0	1,4406
12,0	0,5774	12,0	2,1944	12,0	3,3165	12,0	1,4383

Observando-se os valores de  $S_p$  na Tabela 3.11, nota-se que o efeito devido à variação de  $D_e$  apresenta pouca influência para as diferentes configurações avaliadas. Com exceção do sensor com 2 eletrodos (Fig. 3.18), os mapas de sensibilidade para as demais configurações não apresentam efeito visível, Figs. 3.19 a 3.21.

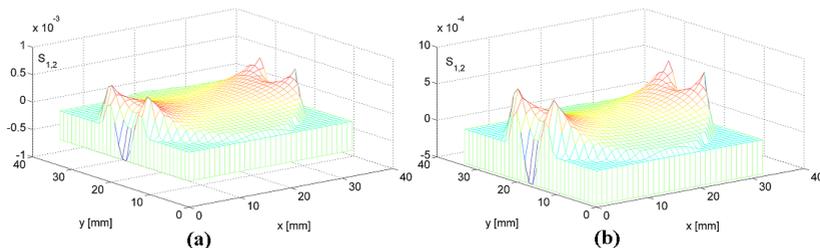


Figura 3.18: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 2 eletrodos. (a)  $D_e = 7,0$ mm e (b)  $D_e = 12,0$ mm.  $\theta = 150,0^\circ$  e  $\phi = 15,0^\circ$ .

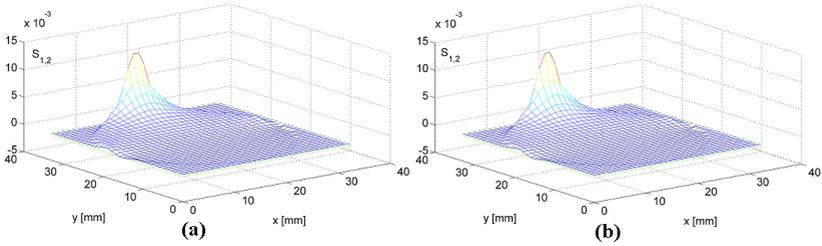


Figura 3.19: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 4 eletrodos. (a)  $D_e = 2,0$  mm e (b)  $D_e = 12,0$  mm.  $\theta = 80,0^\circ$  e  $\phi = 4,0^\circ$ .

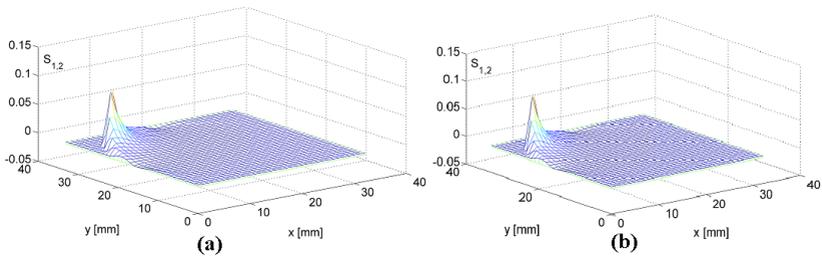


Figura 3.20: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 8 eletrodos. (a)  $D_e = 2,0$  mm e (b)  $D_e = 12,0$  mm.  $\theta = 40,0^\circ$  e  $\phi = 1,0^\circ$ .

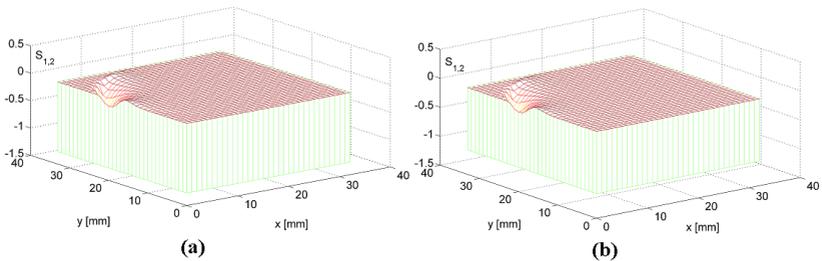


Figura 3.21: Mapa de sensibilidade para o par (1,2). Sensor com 12 eletrodos. (a)  $D_e = 2,0$  mm e (b)  $D_e = 12,0$  mm.  $\theta = 25,0^\circ$  e  $\phi = 1,0^\circ$ .

### 3.5 Método de Medição e Cálculo da Fração Volumétrica de Água

Diferentemente da estratégia de combinação de eletrodos aplicada a sensores ECT, no método de medição proposto o número de eletrodos combinados é fixo e sempre igual a 6; ou seja, desta forma tem-se sempre metade dos eletrodos em modo emissor e metade no modo receptor. Portanto, o SNR (*signal-to-noise-ratio*) desta configuração é o mesmo obtido em sensores com apenas dois eletrodos. A Fig. 3.22 representa duas possíveis configurações (combinações de eletrodos). Depois de se medir a capacitância entre os grupos 1 e 2 (configuração 1), faz-se uma nova combinação e mede-se, agora, a capacitância entre os novos grupos 1 e 2. O mesmo procedimento é repetido até que  $M = 12$  combinações sejam realizadas. O mesmo sinal de excitação é aplicado aos eletrodos que compõem o grupo emissor, enquanto os demais eletrodos (grupo receptor) são conectados ao mesmo circuito de medição, Fig. 3.23.

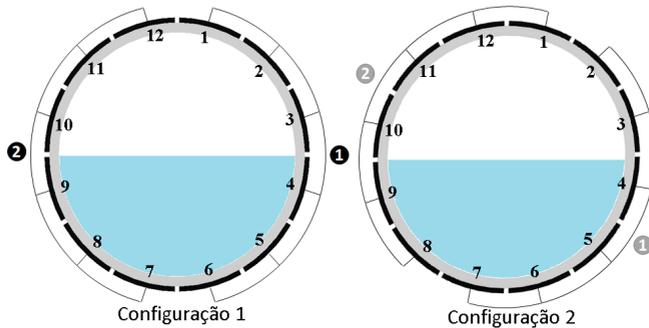


Figura 3.22: Duas diferentes combinações para o sistema ECTM.

Uma vez realizadas as  $M = 12$  medições de capacitância entre os grupos emissor e receptor, o algoritmo iterativo de Landweber é então aplicado para determinar a distribuição de permissividade do escoamento monitorado. Como será apresentado no Cap 4, são necessárias apenas três iterações para a convergência do resultado. Por fim, utiliza-se a Eq. 3.3 para obter-se uma estimativa do valor da fração de água do escoamento monitorado a partir dos valores de permissividade relativa obtidos com o algoritmo de Landweber.

$$\Theta = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \hat{g}(i) \quad (3.3)$$

em que  $\Theta$  é a fração volumétrica da água,  $P$  representa o número total de pixels e  $\hat{g}(i)$  representa o valor da permissividade normalizada do  $i$ -ésimo pixel.

De acordo com o exposto anteriormente, o método de medição do sistema ECTM pode ser descrito pelos seguintes passos:

- **Passo 1** - realiza-se a primeira combinação, formada pelo grupo 1-6 como emissor e 7-12 como receptor;
- **Passo 2** - mede-se o valor da capacitância entre o grupo emissor e receptor;
- **Passo 3** - repetem-se os passos 1 e 2  $N$  (número de eletrodos independentes) vezes;
- **Passo 4** - aplica-se o algoritmo iterativo de Landweber para obtenção de distribuição de permissividade;
- **Passo 5** - calcula-se a fração de água no escoamento monitorado utilizando a Eq.3.3.

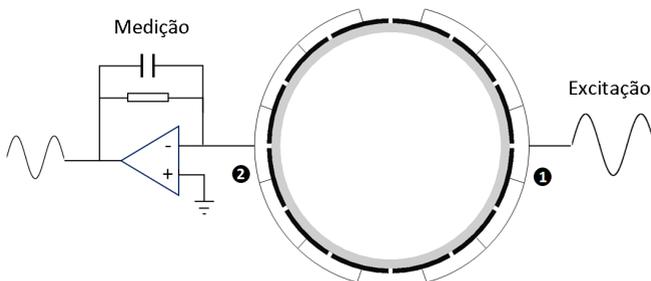


Figura 3.23: Ilustração da técnica de medição implementada no sistema ECTM.

### 3.6 Sistema de Medição Proposto

O sistema proposto, denominado Sistema de Tomometria Capacitiva Elétrica (Electrical Capacitance Tomometry - ECTM), assim como os sistemas para ECT, é composto por um sensor capacitivo, um módulo de controle de chaveamento e medição, um gerador de onda senoidal, um módulo de

aquisição e condicionamento de sinais e um computador. A Fig. 3.24 ilustra o sistema proposto e na Fig. 3.25 pode ser visto o sistema construído.

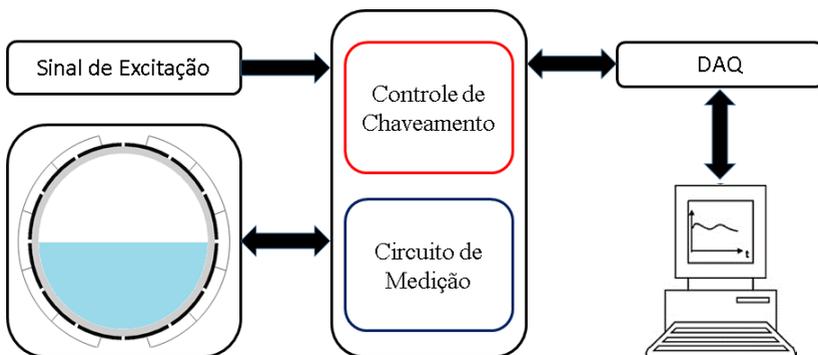


Figura 3.24: Ilustração do sistema de tomometria capacitiva elétrica.

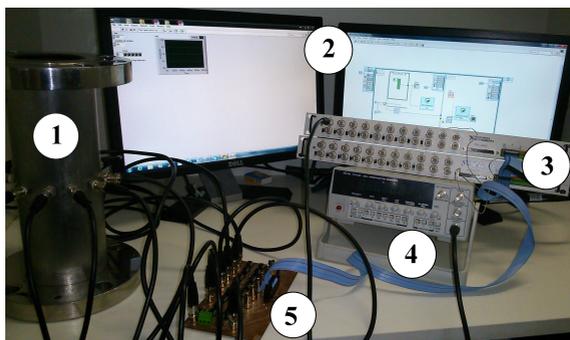


Figura 3.25: Sistema ECTM. (1) sensor capacitivo, (2) computador, (3) módulo de aquisição e condicionamento de sinais, (4) gerador de onda senoidal e (5) módulo de controle de chaveamento e medição.

### 3.6.1 Influência do Acoplamento Sensor-Tubulação

Uma vez que para a realização dos experimentos dinâmicos o sensor será instalado na tubulação de teste da Unidade Experimental de escoamento Multifásico - UEE (ver Capítulo 5, Seção 5.3.1), verificou-se que além das análises já realizadas, também deveria ser avaliada a influência do acoplamento sensor-tubulação. Tal necessidade é fundamentada na hipótese de que

a tubulação acoplada ao sensor pode agir como se fosse uma extensão dos eletrodos de aterramento axial final, afetando, assim, diretamente no valor das capacitâncias medidas.

Para tanto, foram simuladas três configurações diferentes entre si pelo comprimento total do duto isolante e pela distância entre os eletrodos de medição e os eletrodos de aterramento axial final,  $L_2$ . As Figs 3.26 a 3.28 ilustram os valores das capacitâncias medidas para o par de eletrodos (1,2) quando considerado dutos isolante de 1m, 0,5m e 0,3m acoplados ou não à tubulação (aço AISI 4340,  $\epsilon = 1$ ), respectivamente. Os demais parâmetros são caracterizados pelos valores expostos na Tabela 3.12.

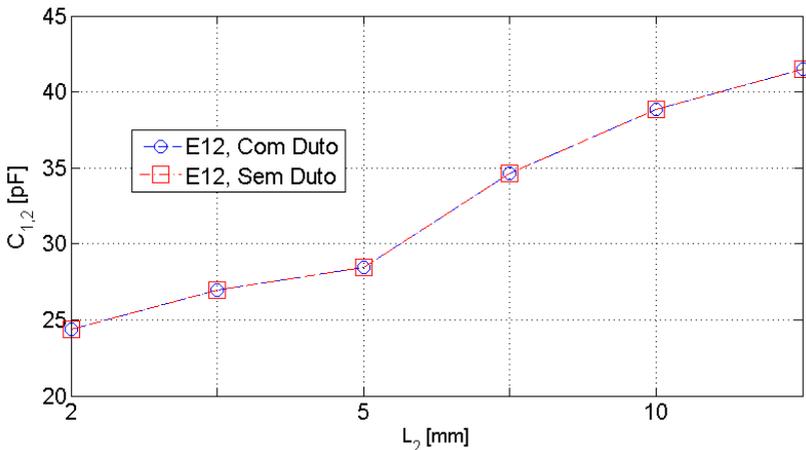


Figura 3.26: Influência do acoplamento sensor-tubulação e da variação de  $L_2$  na capacitância medida. Duto isolante com comprimento de 1m.

Como se pode observar, a influência da presença tubulação acoplada ao sensor pode ser desprezada, pois a diferença entre as capacitâncias medidas em ambos os casos é irrelevante. Isso pode ser justificado devido à presença dos eletrodos de aterramento axial final que impedem que linhas de fluxo do campo elétrico se dirijam à tubulação. No entanto, fica claro o forte efeito causado pela variação de  $L_2$ ; quanto maior a distância entre os eletrodos de medição e os eletrodos de aterramento axial final, maior é a capacitância medida.

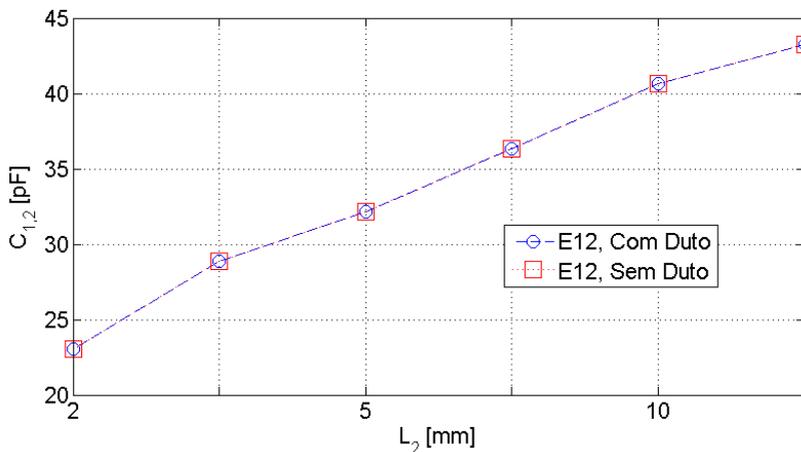


Figura 3.27: Influência do acoplamento sensor-tubulação e da variação de  $L_2$  na capacitância medida. Duto isolante com comprimento de 0,5m.

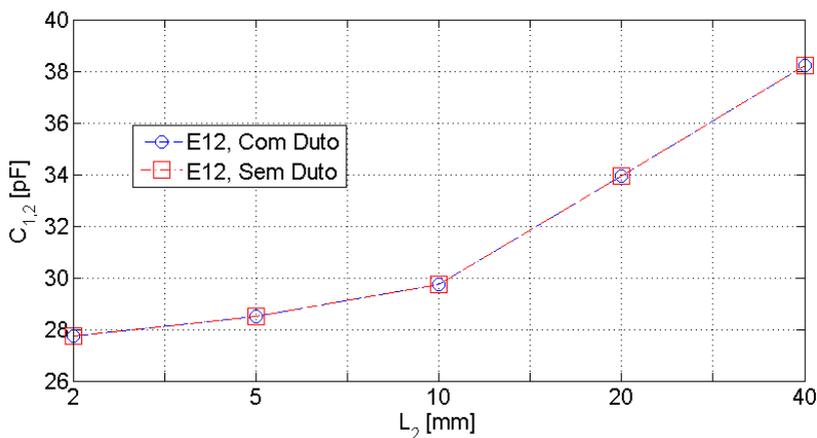


Figura 3.28: Influência do acoplamento sensor-tubulação e da variação de  $L_2$  na capacitância medida. Duto isolante com comprimento de 0,3m.

### 3.6.2 Sensor Construído

De acordo com os resultados e as análises feitas na Seção 3.4, foram adotados os valores de parâmetros expostos na Tabela 3.12 tanto para o de-

envolvimento dos modelos numéricos quanto para a construção do sensor. O valor para cada parâmetro foi adotado, seguindo as seguintes observações:

- **número e comprimento angular de eletrodos** - adotou-se por um sensor com  $n = 12$  eletrodos por ser o número de eletrodos geralmente utilizado em aplicações ECT e como apresentado na Seção 3.4, os menores valores de  $Sp$  foram obtidos para as configurações com 2 e 12 eletrodos;
- **comprimento angular dos eletrodos** - como apresentado na Subseção 3.4.3, para um sensor com 12 eletrodos, quanto maior o comprimento angular dos eletrodos, menor o valor de  $Sp$ . Dessa forma, adotou-se um comprimento angular de  $28^\circ$ , deixando-se, portanto um comprimento angular de  $2^\circ$  entre os eletrodos;
- **comprimento angular dos eletrodos de aterramento axial** - como apresentado na Subseção 3.4.4, o menor valor de  $Sp$ , para o sensor com 12 eletrodos, foi obtido para a configuração sem eletrodos de aterramento axial. Dessa forma, tanto para a realização das simulações como para a construção do protótipo, não foram utilizados eletrodos de aterramento axial;
- **comprimento dos eletrodos** - adotou-se o comprimento de 100 mm, obedecendo-se, assim, a regra de que o comprimento mínimo dos eletrodos deve ser maior do que o diâmetro do duto isolante (76 mm);
- **comprimento dos eletrodos de aterramento axial final** - como não avaliou-se o efeito do comprimento dos eletrodos de aterramento axial sobre a sensibilidade do sensor, adotou-se um comprimento de 50 mm;
- **diâmetro da blindagem** - como foi apresentado na Subseção 3.4.5, quanto maior o diâmetro da blindagem (malha de aterramento externa), menor é o valor de  $Sp$ . Para facilitar a construção do protótipo, optou-se por utilizar um duto com diâmetro padrão (comercial) de 4 polegadas, ou seja, de aproximadamente 100 mm;
- **espessura da parede do duto isolante** - como apresentado na Subseção 3.4.2, o menor valor de  $Sp$  foi obtido para uma espessura de 5 mm. Este mesmo valor foi, então, utilizado tanto para realizar as simulações quanto para a construção do protótipo.

Para validar experimentalmente os resultados obtidos por simulação, construiu-se um protótipo do sensor, Fig. 3.29. Tal protótipo foi projetado de

Tabela 3.12: Parâmetros selecionados para o sensor de medição de fração de água. Raios e comprimentos dados em milímetros

Parâmetros									
$n$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$\epsilon_p$	$\theta [^\circ]$	$\phi [^\circ]$
12	38,0	43,0	100,0	50,0	2,0	5,0	3,0	88,0	0

maneira a obedecer os requisitos de instalação da Unidade Experimental de Escoamento Multifásico (UEEM DAS-CTC). O duto isolante foi fabricado em *Nylon* ( $\epsilon = 3,0$ ) e os eletrodos de medição e de aterramento axial final foram feitos utilizando uma fita metálica adesiva de cobre fornecida pela empresa 3M. Para a malha de aterramento externo utilizou-se uma seção de duto de aço inox e toda a estrutura foi acoplada à tubulação de processo por meio de flanges. Na Fig. 3.29 podem ser vistos o projeto CAD (Fig. 3.29a), o sensor construído (Fig. 3.29b) e o sensor instalado na tubulação da UEEM (Fig. 3.29c).

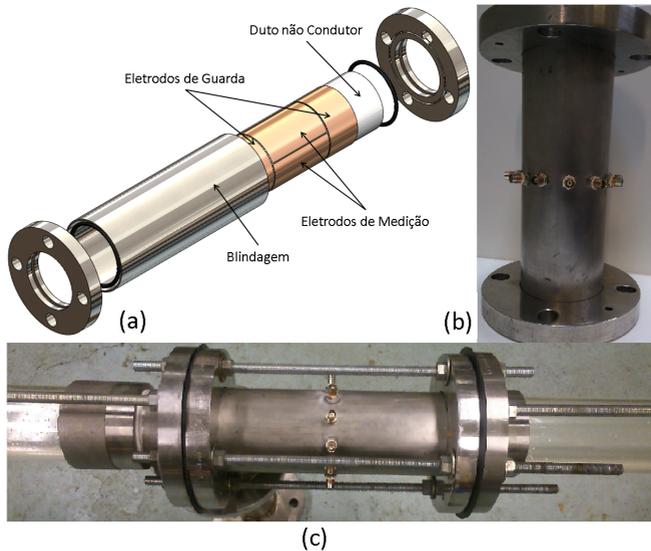


Figura 3.29: Sensor desenvolvido. (a) Projeto CAD, (b) protótipo e (c) protótipo instalado na tubulação.

### 3.6.3 Módulo de Controle de Chaveamento e Medição

O módulo de controle de chaveamento é responsável por habilitar o modo de operação dos eletrodos (emissor ou receptor) e também por fazer a interconexão (combinação) entre eles. Para tanto, 16 chaves ADG419-EP CMOS SPDT (*Single Pole Double Throw*, um polo e duas posições) foram utilizadas, sendo 12 para realizar a interconexão entre os eletrodos e 4 para controle dos modos de operação. Para a implementação do circuito de medição baseado em CA, foram utilizados dois amplificadores operacionais TL071CP. A Fig. 3.30 ilustra o diagrama para a implementação do módulo e na Fig. 3.31 pode ser visto o circuito implementado.

Como pode ser visto na Fig. 3.30, cada grupo (ou combinação) de eletrodos pode operar como emissor ou receptor. Como o módulo foi projetado com base na estratégia de combinação de eletrodos, não há como um eletrodo operar individualmente, ou seja, cada eletrodo deve estar interconectado (combinado) com, no mínimo, outro eletrodo (eletrodo 6 ou 12, eletrodos conectados diretamente nos circuitos de emissão/recepção).

No modo emissor, o eletrodo 6 ou o eletrodo 12 está conectado à malha de emissão (ME); as chaves ER1, ER2 estão em nível baixo (quando o eletrodo 6 operar como emissor, chave S6 em nível baixo) e as chaves ER3 e ER4 estão em nível alto (eletrodo 12 no modo receptor, chave S12 em nível alto). Quando o eletrodo 12 operar no modo emissor, as chaves ER1, ER2 e S6 estão em nível alto; e as chaves ER3, ER4 e S12 estão em nível baixo.

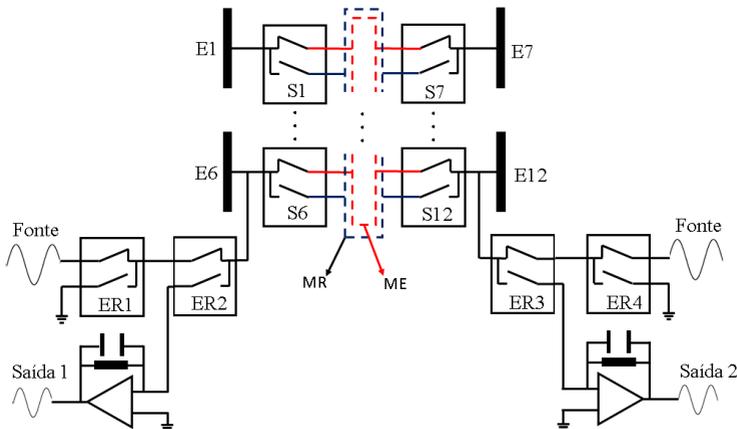


Figura 3.30: Diagrama para implementação do módulo de controle de chaveamento e medição.

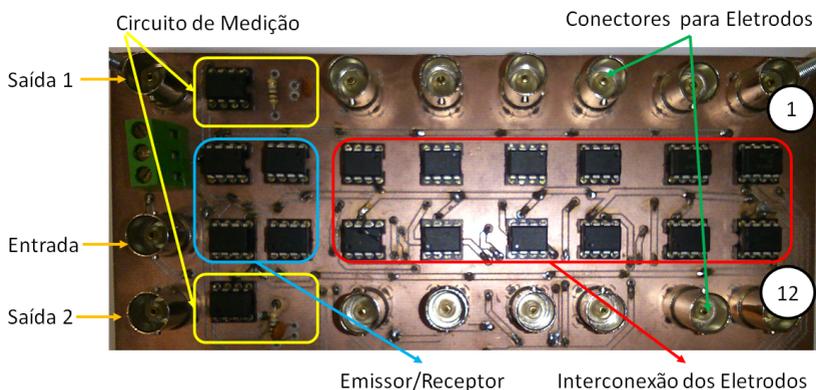


Figura 3.31: Módulo de controle de chaveamento e medição.

Como exemplo, na Tab 3.13 são apresentados os estados de cada chave (0 para nível baixo e 1 para nível alto) quando o grupo de eletrodos 1-6 está em modo emissor e, por consequência, o grupo 7-12 está em modo receptor.

Tabela 3.13: Estado das chaves para a configuração na qual o grupo de eletrodos 1-6 está no modo emissor e o grupo de eletrodos 7-12 está no modo receptor

Chaves S												Chaves ER			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1

### 3.6.4 DAQ e Implementação do Método de Medição

O sistema de ECTM pode ser separado, basicamente, em dois blocos: o bloco de hardware e o bloco de software, Fig. 3.32. O bloco de hardware é composto pelo sensor, módulo de controle de chaveamento e medição, placa de aquisição NI PCIe-6363 série X e caixa de conexão BNC2090A.

O bloco de software foi implementado utilizando-se a plataforma Lab-View e é composto pelos seguintes sub-blocos: comando, aquisição e condicionamento; cálculo e normalização das capacitâncias e cálculo da permissividade normalizada (implementação do algoritmo iterativo de Landweber) e cálculo da fração volumétrica de água.

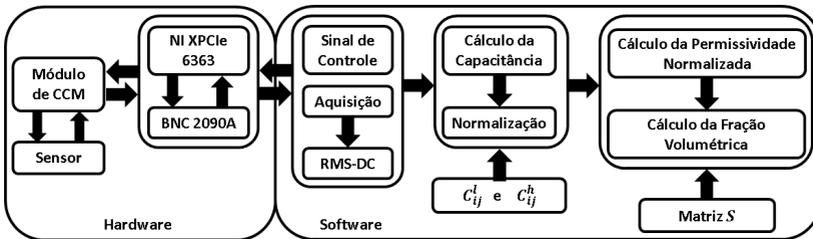


Figura 3.32: Diagrama de blocos do sistema ECTM.

#### Sub-bloco de Comando, Aquisição e Condicionamento

O sub-bloco de Comando, Aquisição e Condicionamento é responsável por enviar os sinais de comando para as chaves, controlando, assim, quais eletrodos estão interconectados e também quais estão em modo emissor e quais estão em modo receptor; também é responsável por fazer a aquisição dos sinais provenientes do circuito de medição. A Fig. 3.33 ilustra a implementação do sub-bloco no LabView.

Uma estrutura de casos (*Case Structure*) foi criada para gerar a sequência de comando para as  $M = 12$  medições, Tabela 3.14. Uma estrutura de *loop* temporal (*timed loop structure*) e um contador de iterações foram usados para incrementar o bit de controle da estrutura de casos até as 12 medições serem realizadas. Depois de cada sequência de comandos, o valor de tensão é adquirido e o valor RMS é obtido utilizando-se a função *Basic DC/RMS* do LabView.

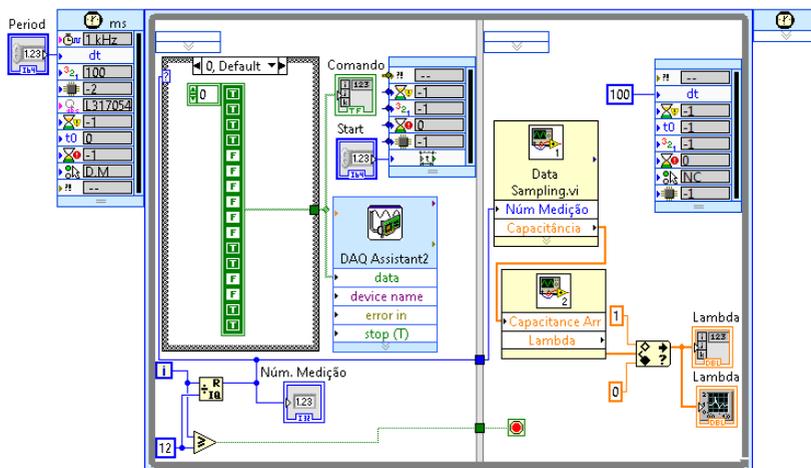


Figura 3.33: Implementação do sub-bloco de comando, medição e condicionamento no ambiente LabView-National Instruments.

Tabela 3.14: Sequência de comando para controle das chaves e interconexão e modo emissor/receptor. Nível lógico: 0, nível baixo e 1, nível lógico alto.

M	Chaves S												Chaves ER			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1
5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
6	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
7	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
8	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
9	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
11	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
12	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0

### Sub-bloco de Cálculo e Normalização das Capacitâncias

O sub-bloco de Cálculo e Normalização das Capacitâncias, Fig. 3.34, é executado sequencialmente ao sub-bloco anterior. O valor da capacitância,

$C_m$ , é calculado utilizando-se o valor da tensão medida,  $V_{in}$ , e sabendo-se o valor da capacitância de realimentação,  $C_f$ , e da amplitude do sinal de excitação,  $V_e$ . Os valores de  $C_f$ ,  $R_f$  e  $V_e$  são apresentados na Tabela 3.15. A relação entre  $V_{in}$  e  $V_e$  é dada por

$$C_m = -\frac{V_{in}}{V_e} C_f \quad (3.4)$$

Tabela 3.15: Valores dos parâmetros utilizados no circuito de medição.

Parâmetro	Valor
$C_f$	20 pF
$R_f$	10 M $\Omega$
$V_e$	5 V
$f_e$	500 kHz

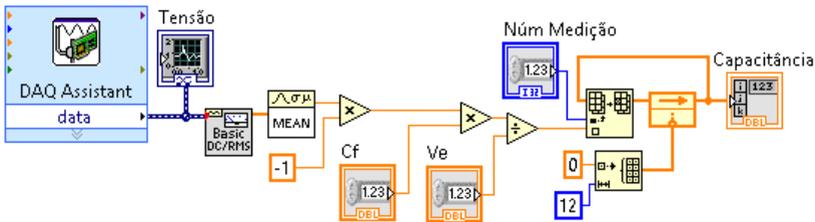


Figura 3.34: Implementação do sub-bloco de cálculo das capacitâncias.

Cada valor de capacitância é então armazenada, gerando-se um vetor  $12 \times 1$ . Vetores, previamente armazenados, com os valores das capacitância para o caso do sensor cheio de óleo,  $C_b$ , e cheio de água,  $C_a$ , são então utilizados para o cálculo das capacitâncias normalizadas (Lambda,  $\lambda$ ), Fig. 3.35. Como pode ser visto, o modelo paralelo (ver, Capítulo 2, Subseção 2.2.3) foi utilizado para realizar a normalização, sendo, portanto

$$\lambda = \frac{C_m - C_b}{C_a - C_b} \quad (3.5)$$

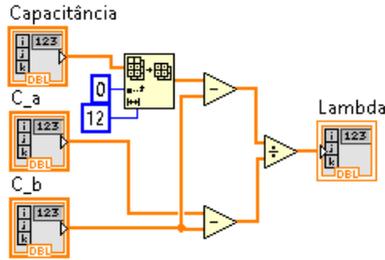


Figura 3.35: Implementação do sub-bloco de normalização das capacitâncias.

### Sub-bloco de Cálculo da Permissividade Normalizada e da Fração Volumétrica

Para o cálculo da distribuição da permissividade normalizada, utiliza-se tanto o algoritmo LBP quando o algoritmo de Landweber com o valor inicial dado pelo algoritmo LBP. A matriz de sensibilidade ( $S$ ) utilizada foi obtida por meio de simulações (ver, Capítulo 2, Subseção 2.2.4). As Figs 3.36 e 3.37 ilustram a implementação dos algoritmos LBP e Landweber, respectivamente.

Por fim, o valor da fração de água é calculado fazendo-se a média dos valores que compõem o vetor de distribuição da permissividade relativa.

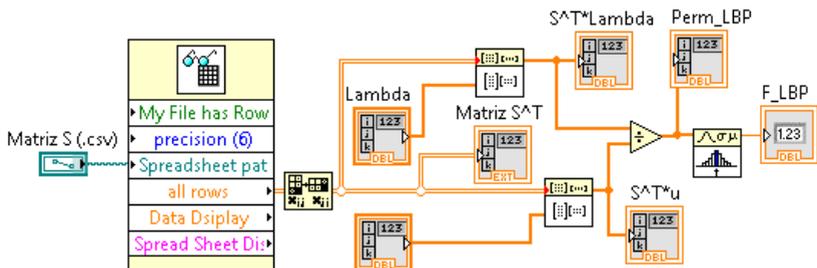


Figura 3.36: Implementação do algoritmo LBP.

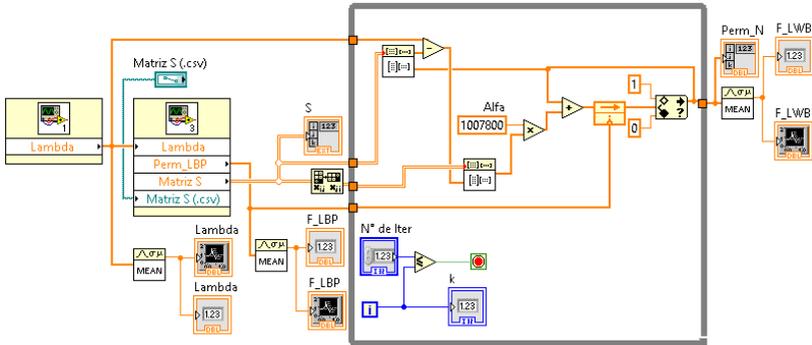


Figura 3.37: Implementação do algoritmo de Landweber com valor inicial dado pelo algoritmo LBP.

### 3.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a configuração geral adotada para o sistema ECTM e também a proposta (protocolo) para a medição da fração de água. Para a melhor escolha dos parâmetros de construção do sensor, foram realizadas diversas simulações no software COMSOL Multiphysics, variando-se cada parâmetro e avaliando a distribuição de sensibilidade. Com base nos resultados de simulação, o sensor foi então construído. Dividindo-se o sistema em blocos de hardware e software, as características de cada um foram apresentadas. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos utilizando-se o protocolo proposto para a medição da fração de água.

# Capítulo 4

## Resultados de Simulação

### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados baseados em simulações realizadas utilizando-se os softwares COMSOL Multiphysics e Matlab. Como a base teórica-prática para o desenvolvimento do método ECTM é a tomografia capacitiva elétrica, os resultados apresentados, sempre que possível, serão comparados com aqueles obtidos utilizando o método ECT tradicional com 12 eletrodos. Como o número de eletrodos é o mesmo tanto para o sensor ECMT proposto quanto para o sensor ECT, a mesma geometria e malha pode ser utilizada para realizar as simulações. A Fig. 4.1 ilustra a geometria (a), malha (b) e distribuição do campo elétrico (c) para o sensor ECTM.

Primeiramente, algumas medidas básicas como valores de capacitância para o sensor cheio de óleo e cheio de água são apresentadas. Depois, avaliada-se a distribuição de sensibilidade (ou mapa de sensibilidade) e matriz de sensibilidade (matriz S) obtida aplicando-se tanto o método ECTM quanto o método ECT. Em seguida, são apresentados os resultados referentes à medição da fração de água em escoamentos estratificados bifásicos óleo-água.

### 4.2 Perfis de Capacitância

Uma vez que tanto o sensor ECT quanto o sensor ECTM possuem 12 eletrodos, tem-se, portanto, 12 e 66 valores de capacitância, respectivamente.

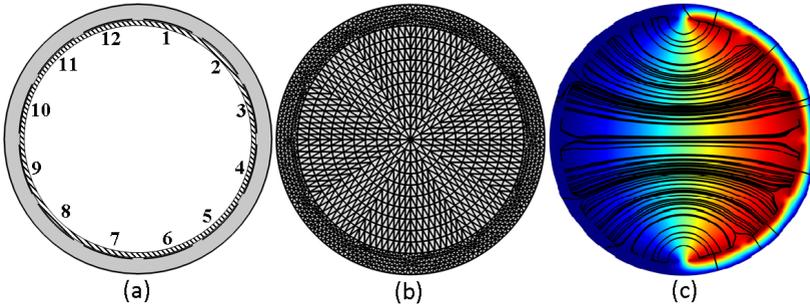


Figura 4.1: Modelo numérico para avaliação do método ECTM. (a) geometria 2D, (b) malha 2D e (c) distribuição do campo elétrico para o sensor ECTM.

As Figs 4.2 e 4.3 representam os valores de capacitância obtidos na simulação dos sensores ECT e ECTM cheios de óleo (0% de água) e cheios de água (100% de água). Como pode ser observado na Fig. 4.2, há uma grande variação nos valores de capacitância (característica dos sensores ECT), sendo que os maiores valores são atribuídos aos pares de eletrodos adjacentes (aproximadamente 8 pF) e os menores, aos pares de eletrodos opostos (menor que 0,5 pF). Tal característica tem se mostrado como um desafio quando considerado o desenvolvimento de hardware para aplicações práticas.

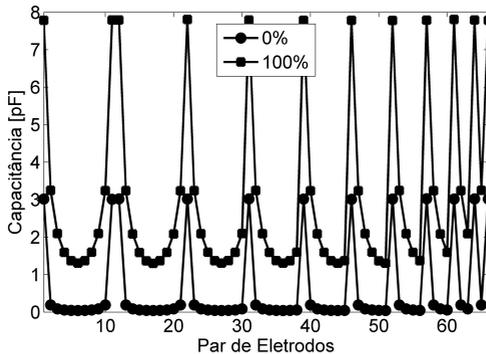


Figura 4.2: Valores de capacitância (em pF) para o sensor ECT.

No entanto, pode-se observar na Fig. 4.3 que utilizando-se a estratégia de combinação de eletrodos com o mesmo número de eletrodos emissores e receptores, obtêm-se valores de capacitância na ordem de 9,2 pF para o caso do sensor cheio de óleo (0% de água); valor maior que aqueles obtidos para o

sensor ECT cheio de água. Já para o sensor ECTM cheio de água, valores de capacitância na ordem de 41 pF foram obtidos.

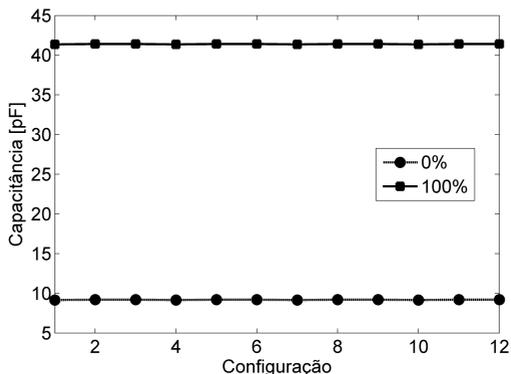


Figura 4.3: Valores de capacitância para o sensor ECTM.

Outra grande vantagem de se aplicar a estratégia de combinação de eletrodos é o aumento significativo da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR). No caso do método ECTM no qual o número de eletrodos combinados (interconectados) é sempre igual a 6, formando um sensor com apenas 2 eletrodos, o SNR é o mesmo obtido para esta configuração.

### 4.3 Distribuição e Matriz de Sensibilidade

O cálculo das distribuições de sensibilidade (mapas de sensibilidade) para cada par de eletrodo e da matriz de sensibilidade é um passo indispensável em qualquer aplicação ECT. No método ECTM, utiliza-se o mesmo procedimento para cálculo dos mapas e da matriz de sensibilidade adotado em ECT; ver Capítulo 2, Subseção 2.2.4.

Como já discutido no Capítulo 2, a análise dos mapas de sensibilidade torna-se uma ferramenta na etapa de projeto do sensor. Dessa análise, tem-se, por exemplo, um indicativo da homogeneidade da distribuição de sensibilidade e, por consequência, um indicativo da (in)dependência das medições frente às variações de padrão de escoamento.

As Figs 4.4 e 4.5 representam o mapa de sensibilidade para os pares de eletrodos adjacentes e opostos do sensor ECT, respectivamente. Como pode-se observar, os eletrodos adjacentes apresentam uma distribuição homogênea

na maior parte da região sensível (seção transversal do duto isolante). No entanto, por seus valores serem muito maiores que aqueles obtidos pelos demais pares, os mapas do grupo adjacente são muitas vezes desprezados na composição da matriz de sensibilidade. Para o par de eletrodos opostos, nota-se uma grande variação de sensibilidade e regiões com sensibilidade negativa ( $S < 0$ ), indicando uma forte dependência das medições em relação ao padrão de escoamento para o grupo formado por eletrodos opostos.

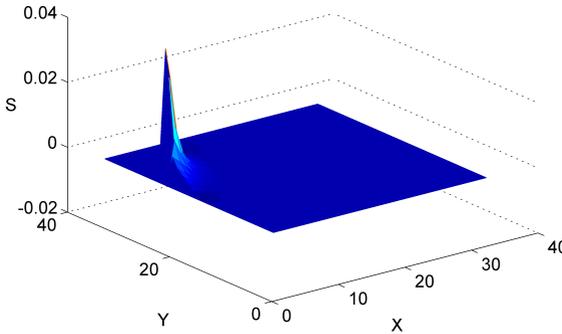


Figura 4.4: Distribuição de sensibilidade para o sensor ECT. Par de eletrodo adjacentes.

A Fig. 4.6 representa a distribuição de sensibilidade para a configuração 1 (eletrodos 1 a 6 como emissores e eletrodos 7 a 12 como receptores). Observa-se que, assim como para eletrodos do grupo adjacente no sensor ECT, grande parte da região sensível apresenta aproximadamente o mesmo valor de sensibilidade (homogênea) e não há regiões negativas. Como as demais configurações também possuem 6 eletrodos emissores e 6 eletrodos receptores, acontece somente a rotação desse mapa, ou seja, as 12 configurações apresentarão valores semelhantes de capacitância medida (ver Fig 4.3).

A matriz de sensibilidade pode ser vista (de uma maneira simplificada) como um agrupamento dos mapas de sensibilidade; tomando-os como vetores ( $856 \times 1$ , sendo 856 o número de pixels do mapa) e agrupando-os de maneira a se obter uma matriz  $856 \times 66$  e  $856 \times 12$  para o sensor ECT e para o sensor ECTM, respectivamente.

A matriz de sensibilidade para sensores ECT e conseqüentemente para o sensor ECTM é dita mal condicionada, sendo esta característica avaliada pelo chamado número de condicionamento,  $Cond(S)$ , da matriz  $S$ . De acordo com a literatura sobre o tema, quanto menor o número de condicionamento de  $S$ , menor serão os efeitos dos erros de medição na reconstrução da imagem.

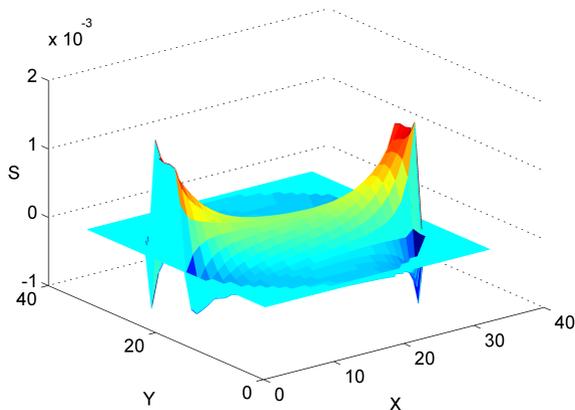


Figura 4.5: Distribuição de sensibilidade para o sensor ECT. Par de eletrodos opostos.

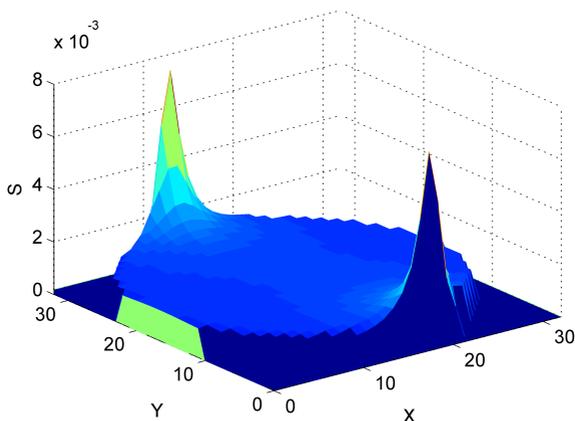


Figura 4.6: Distribuição de sensibilidade para o sensor ECTM. Configuração 1: eletrodos 1-6 como emissor e eletrodos 7-12 como receptor.

As Figs. 4.7 e 4.8 representam as matrizes de sensibilidade para o sensor ECT e para o sensor ECTM, respectivamente.

Os números de condicionamento obtidos para o sensor ECT e para o sensor ECTM são  $1,636 \times 10^3$  e  $2,068 \times 10^{13}$ , respectivamente. O valor obtido para a matriz ECTM justifica o porquê do método não ser utilizado para reconstrução de imagem, como será discutido adiante.

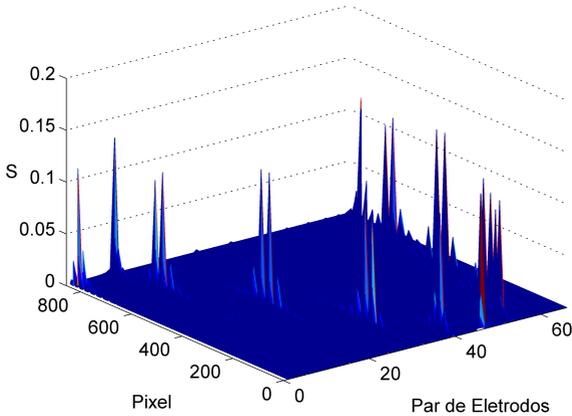


Figura 4.7: Matriz de sensibilidade para ECT.

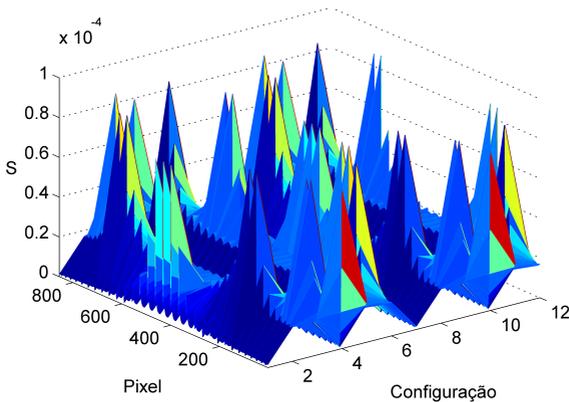


Figura 4.8: Matriz de sensibilidade para o sensor ECTM.

## 4.4 Cálculo da Fração de Água em Escoamento Estratificado Óleo-Água

Para avaliar o desempenho do método ECT, foram simulados diversos casos de escoamento estratificado caracterizados por diferentes valores de fração de água, Fig. 4.9. Para dar início à discussão, serão avaliados os resultados obtidos para o escoamento estratificado óleo-água com 50% de fração de água.

As Figs 4.10 e 4.11 representam os valores de capacitância obtidos para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água utilizando o método ECT e o método ECTM, respectivamente. Observando-se o perfil de capacitância obtido pelo ECT e comparando com aqueles obtidos para o sensor cheio de óleo (0% de água) e cheio de água, nota-se claramente a presença de regiões da seção transversal ocupada somente por água e regiões ocupadas somente por óleo. Porém, ao observar-se o perfil de capacitância obtido pelo ECTM, não se pode chegar à mesma conclusão. Essa observação fica ainda mais evidente, ao observarem-se os perfis de capacitância normalizada para o caso em questão. As Figs 4.12 e 4.13 representam os valores de capacitância obtidos.

Calculando-se a média das capacitâncias normalizadas, tem-se uma estimativa da fração volumétrica de água presente no escoamento. Nota-se que utilizando-se o método ECTM obtêm-se uma melhor estimativa da fração volumétrica de água.

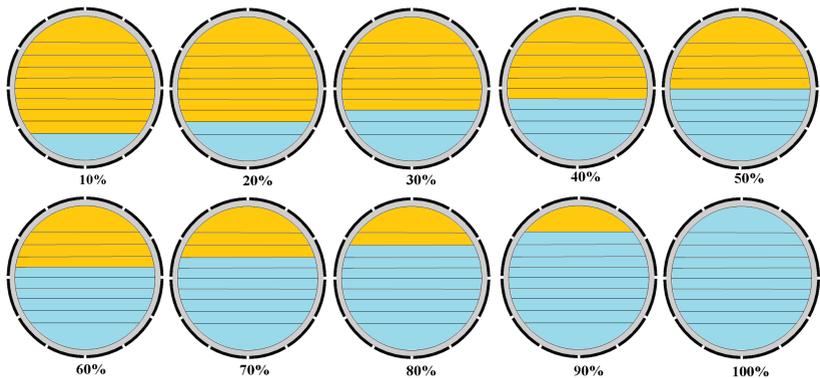


Figura 4.9: Ilustração dos escoamentos utilizados para avaliação do desempenho do método ECTM. O escoamento para 0% de água não está representado, mas também foi utilizado na avaliação.

Aplicando-se o algoritmo iterativo de Landweber, obtêm-se a estimativa da distribuição de permissividade relativa na seção transversal do sensor (região sensível). As Figs 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 representam os perfis de permissividade relativa e as imagens reconstruídas utilizando-se os métodos ECT e ECTM. Como pode ser visto, na imagem reconstruída utilizando o método ECT a distribuição de permissividade representa claramente o escoamento estratificado. Para a imagem reconstruída utilizando o método ECTM, observa-se que a distribuição de permissividade é, praticamente, homogênea,

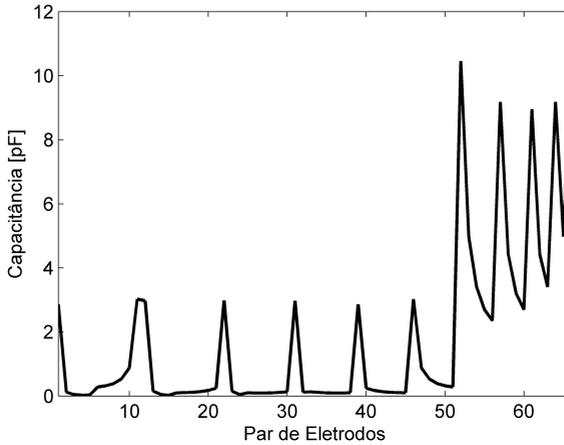


Figura 4.10: Perfil de capacitância obtido pelo método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações.

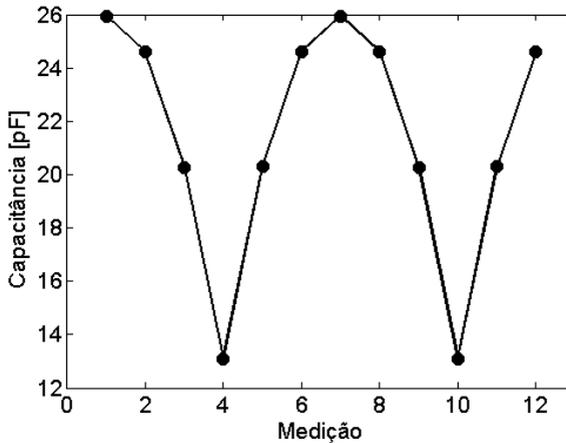


Figura 4.11: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

sendo também aproximadamente igual ao valor da fração volumétrica de água presente no escoamento. Assim, pode-se estimar o valor da fração de água sem que a imagem reconstruída seja fiel à distribuição real presente no escoamento. Na Fig. 4.18 são apresentados os valores de fração volumétrica obtidos pelos métodos ECT e ECTM para diferentes números de iterações.

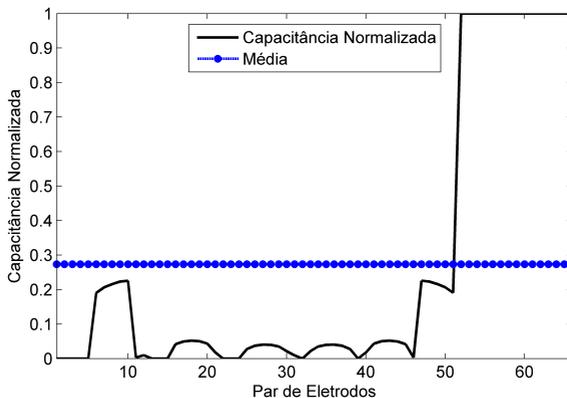


Figura 4.12: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações.

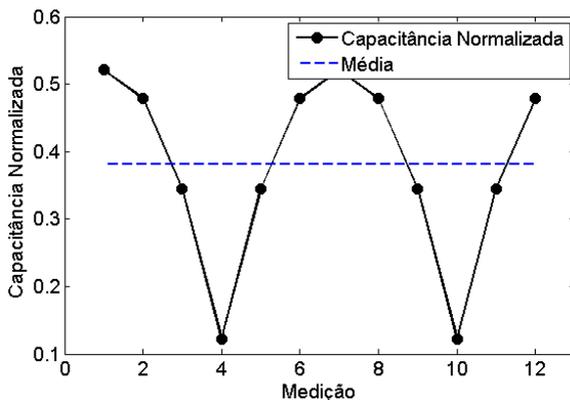


Figura 4.13: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

Observa-se que para o método ECTM, o valor da fração volumétrica não sofre variação depois da terceira iteração. No entanto, para o método ECT, verifica-se que o valor da fração volumétrica aumenta com o aumento do número de iterações.

Uma vez apresentadas as características básicas dos resultados obtidos com os métodos ECT e ECTM, apresentam-se agora os resultados de simulação para os demais casos representados na Fig. 4.9. Para tanto, a Fig. 4.19

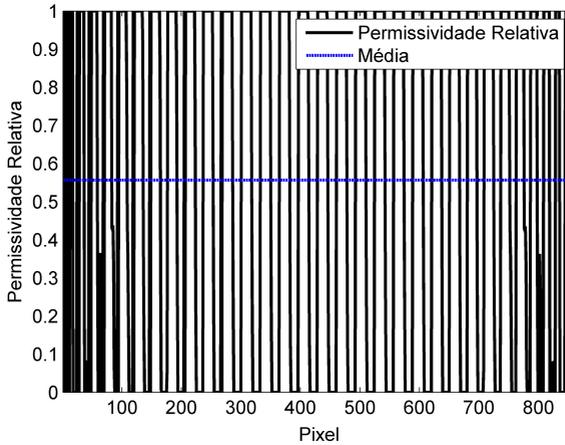


Figura 4.14: Perfil de permissividade normalizada obtido pelo método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações.

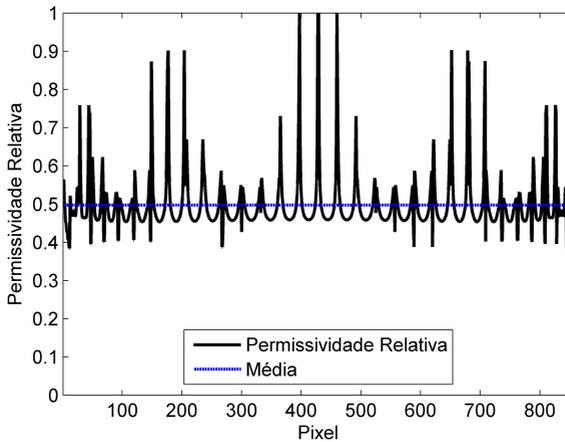


Figura 4.15: Perfil de permissividade normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

representa os valores de capacitância obtidos utilizando-se o método ECTM para escoamentos estratificados óleo-água com 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% de fração volumétrica de água. A Fig. 4.20 representa os valores de capacitância normalizada obtidos utilizando o método ECTM com diferentes modelos de normalização para escoamentos

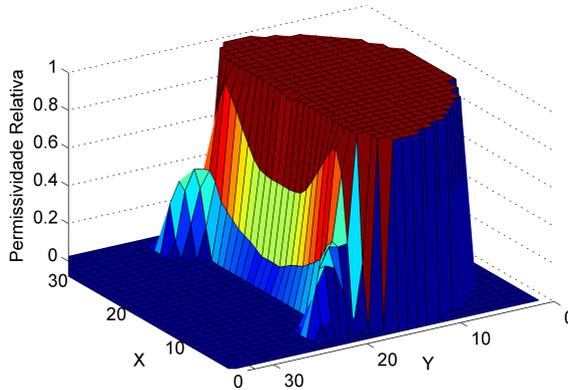


Figura 4.16: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECT para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 50 iterações.

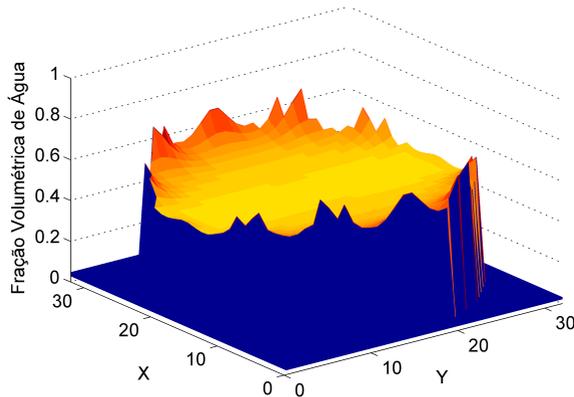


Figura 4.17: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

estratificados óleo-água com 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% de fração volumétrica de água. Como pode ser observado, há uma grande dependência entre os valores de fração volumétrica e o modelo de normalização utilizado. Para valores baixos de fração volumétrica (menor que 30%), o modelo em paralelo se mostra mais adequado. No entanto, para valores de fração volumétrica acima de 30%, o modelo de Maxwell apresenta erro menor quando comparado com os modelos em paralelo e em série.

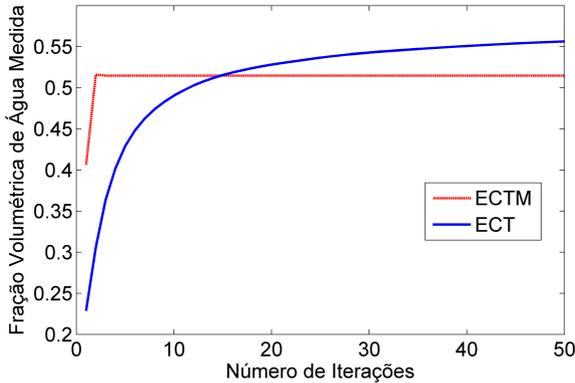


Figura 4.18: Fração volumétrica obtido pelos métodos ECT e ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água com diferentes números de iterações.

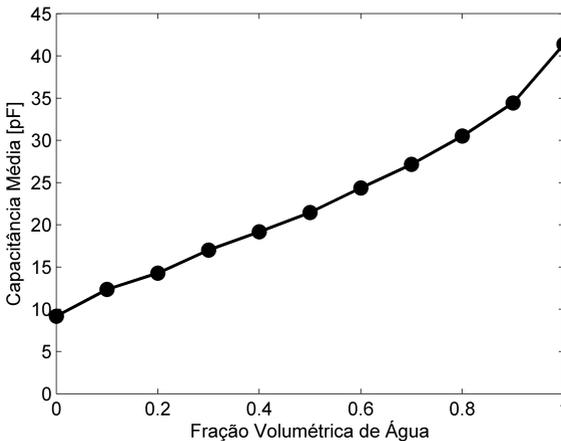


Figura 4.19: Capacitância média para frações de 0% a 100% de água utilizando o método ECTM. 3 iterações.

A Fig. 4.21 representa os valores de fração volumétrica calculados utilizando-se os métodos ECT e ECTM. Adotou-se  $k = 3$  para número de iterações aplicadas ao algoritmo iterativo de Landweber; com esse número de iterações (aceitável para medições em tempo real), o erro absoluto para os valores calculados de fração de água já são satisfatórios (erro máximo menor que 0,1). Os valores de erro absoluto para frações de 0 a 100% são repre-

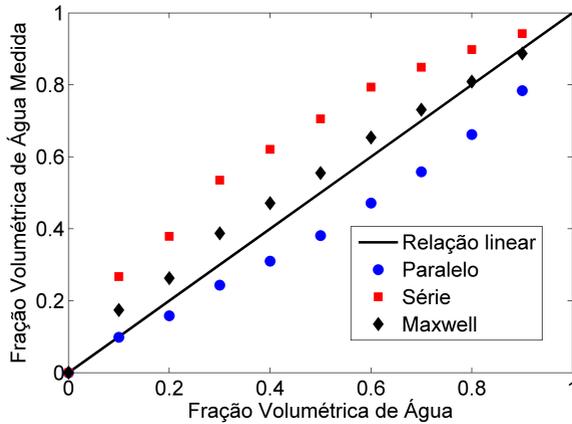


Figura 4.20: Capacitância média normalizada para frações de 0% a 100% de água utilizando o método ECTM com diferentes modelos de normalização.

sentados na Fig. 4.22. Como apresentado na Fig. 4.23, quando avaliada a dependência entre os valores de fração volumétrica obtidos utilizando o algoritmo de Landweber e os modelos de normalização, observa-se claramente que o modelo em série e o modelo de Maxwell não podem ser utilizados.

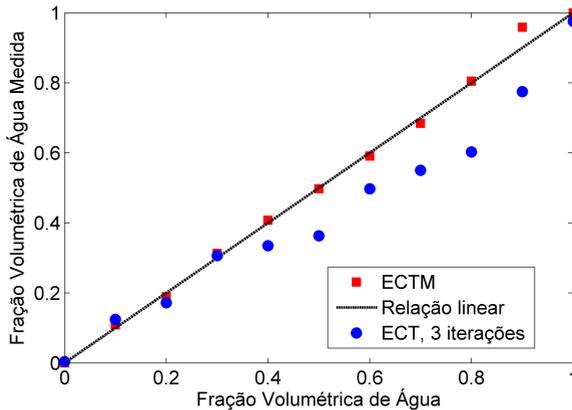


Figura 4.21: Fração volumétrica de água calculada utilizando o método ECTM. 3 iterações.

Sabe-se que uma das grandes preocupações que surgem ao se trabalhar com técnicas baseadas em *soft field* é a dependência das medições em

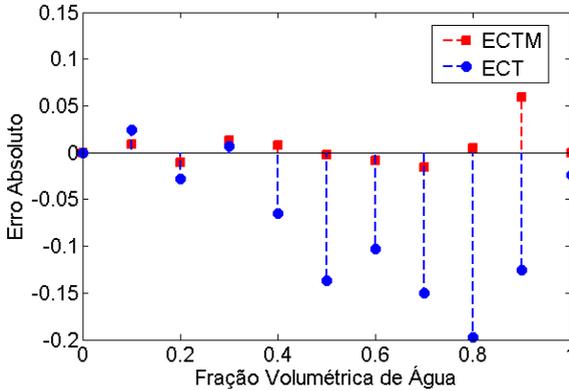


Figura 4.22: Comparação entre os erros absolutos obtidos pelos métodos ECT e ECTM. 3 iterações

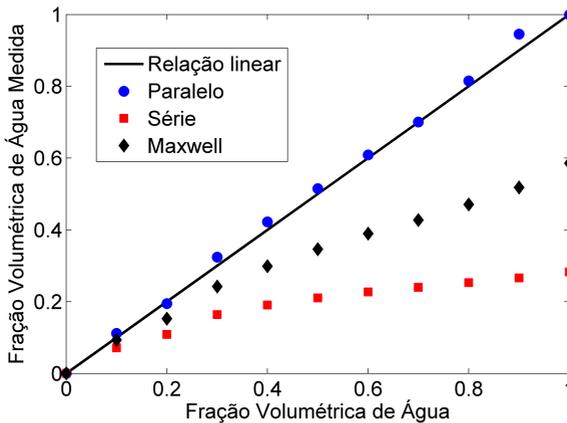


Figura 4.23: Valores de fração volumétrica de água obtidos utilizando o método ECTM com diferentes modelos de normalização.

relação aos diferentes padrões de escoamento. Isso se deve ao fato de que para um mesmo valor de fração volumétrica de água, distribuída de diferentes maneiras na seção transversal, o sensor pode apresentar diferentes valores de fração medida. Como no método ECT a fração é estimada de acordo com a imagem reconstruída, esses efeitos são praticamente radicados. No entanto, para se reconstruir uma imagem fiel à distribuição monitorada, necessita-se que seja aplicado um número maior ( $k > 500$ ) de iterações ao algoritmo de

Landweber.

## 4.5 Dependência do Padrão de Escoamento

Para se discutir um pouco sobre os efeitos da distribuição de permissividade sobre os valores calculados de fração de água, foram simulados quatorze diferentes casos de distribuição para a mesma quantidade de fração de água (10%), Figs. 4.24 e 4.25. Sabe-se que os padrões de escoamentos bifásicos óleo-água observados em dutos são bem caracterizados; quer dizer, sabe-se que o padrão anular, por exemplo, caracteriza-se pelo núcleo (região central do duto) de óleo envolto por um filme água co-corrente que escoo junto à parede [43]. Os padrões aqui simulados são hipotéticos, caracterizados por distribuições variadas e não observadas em escoamentos reais. Optou-se por tais distribuições, uma vez que os padrões reais (com exceção do padrão estratificado e anular ideal) são difíceis de serem reproduzidos; e os padrões hipotéticos oferecem maior variedade de distribuições para uma mesma quantidade de fração de água.

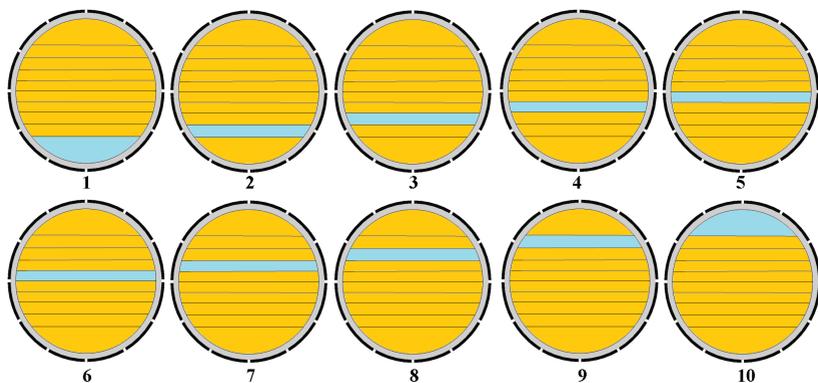


Figura 4.24: Diferentes distribuições de permissividade para 10% de fração de água. Distribuição em lâminas.

A Fig. 4.26 representa os valores de fração de água calculados utilizando os métodos ECT e ECTM com três iterações para diferentes distribuições de 10% de água representadas na Fig. 4.24. Observa-se que os valores calculados utilizando o método ECTM apresentam pequenas variações (em torno de  $\pm 1\%$ ) em relação ao valor real. A Fig. 4.27 representa os valores de fração de água calculados utilizando os métodos ECT e ECTM com diferentes

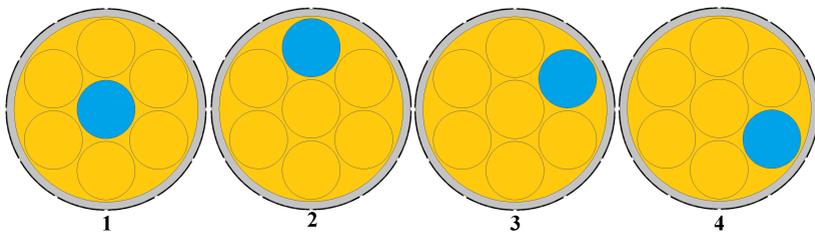


Figura 4.25: Diferentes distribuições de permissividade para 10% de fração de água. Distribuição em círculos.

números de iterações para diferentes distribuições de 10% de água representadas na Fig. 4.25. Como pode ser observado, os valores obtidos utilizando o método ECTM com três iterações apresentam variação de aproximadamente  $\pm 2,5\%$  em torno do valor real. Para o método ECT, verifica-se a grande influência do número de iterações sobre os valores calculados. Como pode ser observado, os valores obtidos utilizando o método ECT com 100 iterações são semelhantes aos valores obtidos utilizando o método ECTM com apenas 3 iterações.

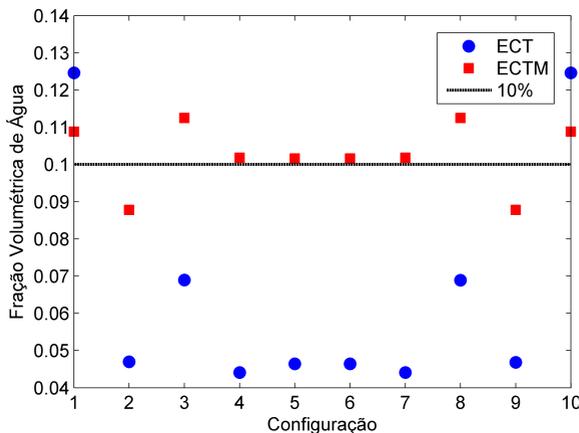


Figura 4.26: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 10%. Distribuições representadas nas Fig. 4.24

Da mesma maneira, diferentes distribuições para 20%, 30%, 40% e 50% de fração volumétrica de água foram simuladas e os resultados são representados nas Figs. 4.28 a 4.35. Observa-se para a grande maioria das distri-

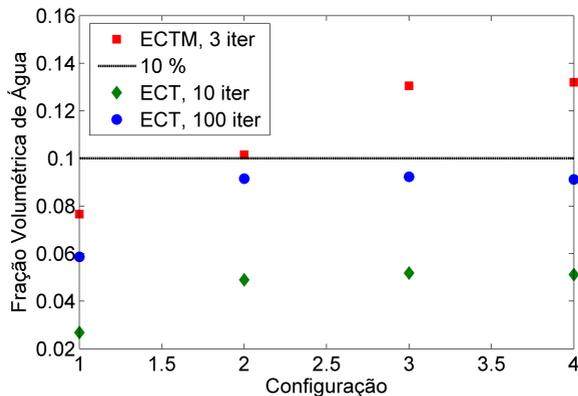


Figura 4.27: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 10%. Distribuições representadas nas Fig. 4.25

buições simuladas, os valores obtidos pelo método ECTM são mais próximos dos valores reais quando comparados com os valores obtidos pelo método ECT com 10 iterações. Para o método ECT com 100 iterações, observa-se, em geral, erro menor que 0,1.

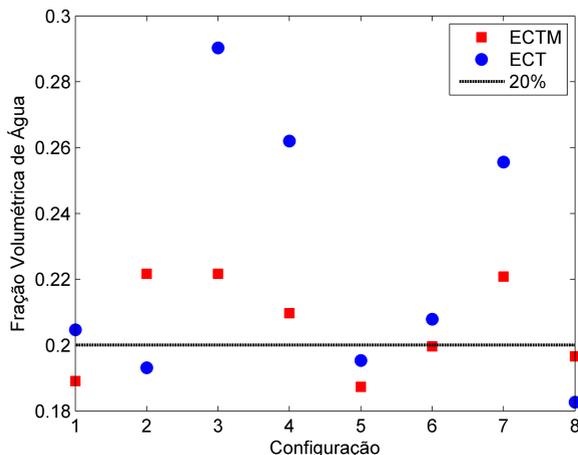


Figura 4.28: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 20%. Distribuição em lâminas.

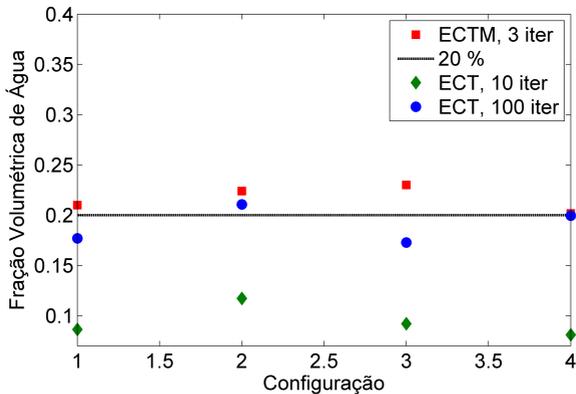


Figura 4.29: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 20%. Distribuição em círculos.

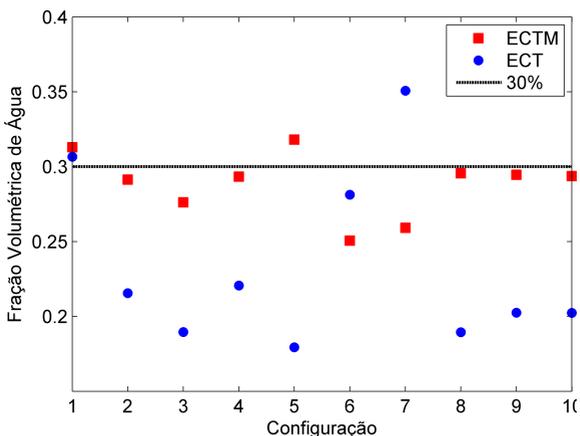


Figura 4.30: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 30%. Distribuição em lâminas.

## 4.6 Considerações Finais

Neste capítulo, os resultados de simulação para o cálculo da fração volumétrica de água utilizando tanto o método ECT quanto o método ECTM foram apresentados. Inicialmente, as principais características do perfil de capacitância calculado foram apresentados e comparados com aqueles obtidos pelo método ECT tradicional. Em seguida, foram apresentados os resultados

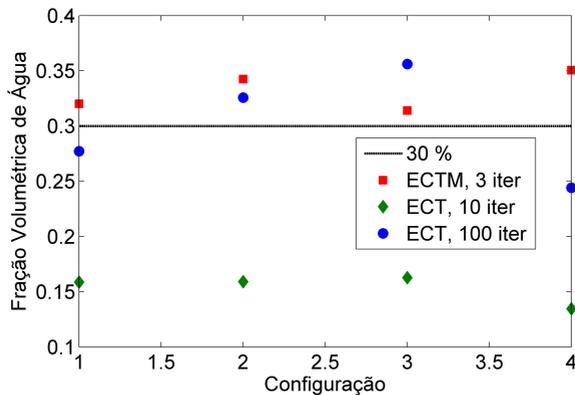


Figura 4.31: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 30%. Distribuição em círculos.

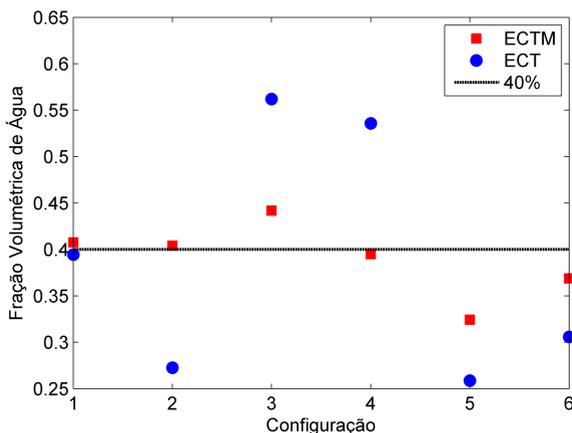


Figura 4.32: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 40%. Distribuição em lâminas.

referentes ao cálculo da fração de água para escoamentos estratificados com frações de água de 0% a 100%. Por fim, foram apresentados os resultados referentes ao cálculo da fração para diversas distribuições com a mesma fração de água. No próximo capítulo serão apresentados os resultados experimentais estáticos e dinâmicos obtidos com o protótipo construído.

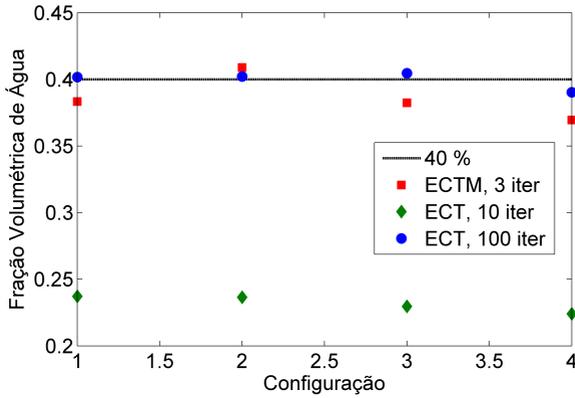


Figura 4.33: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 40%. Distribuição em círculos.

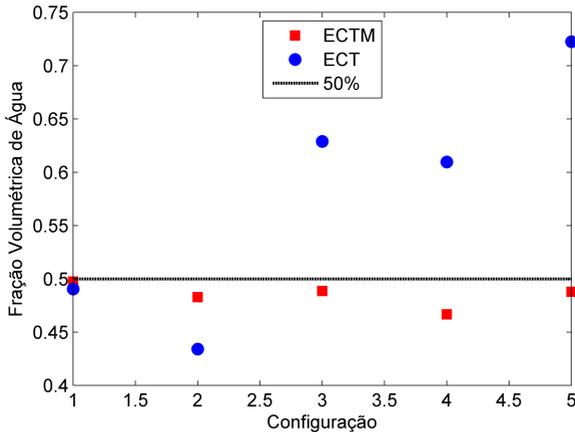


Figura 4.34: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 50%. Distribuição em lâminas.

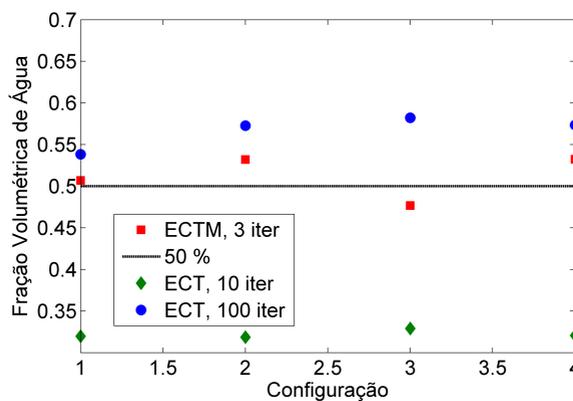


Figura 4.35: Valores de fração volumétrica de água calculada para diferentes distribuições. Fração real igual a 50%. Distribuição em círculos.



# Capítulo 5

## Resultados Experimentais

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos experimentos estáticos e dinâmicos para a validação dos resultados de simulação apresentados no Capítulo 4 e avaliação do funcionamento do sistema ECTM frente a situações reais. Tanto para os experimentos estáticos quanto para os dinâmicos, utilizou-se uma fonte de excitação (sinal senoidal) com amplitude ( $V_e$ ) de 5 V e frequência ( $f_e$ ) de 500 kHz.

### 5.2 Experimentos Estáticos

Os experimentos estáticos foram realizados utilizando-se a montagem representada na Fig. 5.1. Nessa montagem, uma das extremidades do sensor foi tampada utilizando um flange e um disco de acrílico com marcações que indicam o nível de líquido correspondente a uma determinada fração quando considerados escoamentos estratificados. Água fresca (*tap water* ou *fresh water*) e óleo mineral lubrificante Spindura 10. Os valores de permissividade relativa e condutividade dos fluidos utilizados estão dispostos na Tabela 5.1.

#### 5.2.1 Procedimento Experimental

Todos os experimentos foram realizados de acordo com os seguintes passos:

Tabela 5.1: Características elétricas dos fluidos utilizados. Temperatura igual a 25°C.

Parâmetros		
Fluido	$\epsilon[-]$	$\sigma[\mu S/m]$
Água Fresca	81,0	375,0
Óleo Mineral	2,1	$\approx 0$

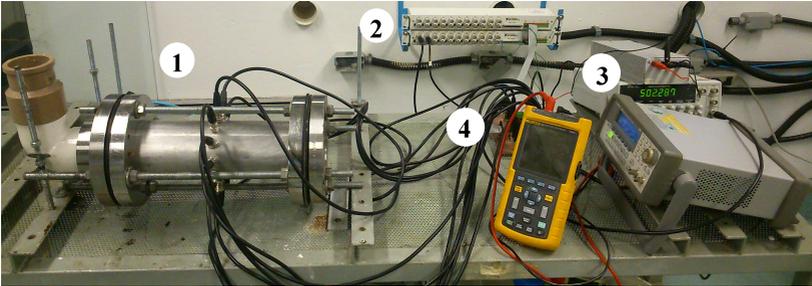


Figura 5.1: Montagem para realização dos experimentos estáticos. Sensor ETCM (1), Conector BNC (2), módulo de controle de chaveamento e medição (3) e gerador de função senoidal (4).

1. **Medição das capacitâncias  $C_{i,j}^l$  e  $C_{i,j}^h$**  - inicialmente, os valores de capacitância para o sensor cheio de óleo ( $C_{i,j}^l$ ) e cheio de água ( $C_{i,j}^h$ ) necessários para o cálculo das capacitâncias normalizadas foram obtidos e armazenados;
2. **Medição Inicial** - preencheu-se o sensor completamente com óleo e mediu-se o valor de fração de correspondente a 0% de água;
3. **Medição** - retirou-se a quantidade de óleo correspondente a 10% do volume total do sensor, colocou-se a mesma quantidade de água e mediu-se a fração correspondente; repetiu-se esse procedimento até que o sensor estivesse completamente cheio de água.

A Fig. 5.2 representa a média dos valores de fração de água medidos. Como pode ser observado na Fig. 5.3, para a maioria dos valores de fração de água medidos, o erro absoluto é inferior a  $\pm 0,03$ . O maior valor de erro, aproximadamente  $+0,06$ , foi obtido para fração de água igual a 90%. Nota-se também que os valores obtidos por meio de simulação apresentam o mesmo comportamento dos valores obtidos experimentalmente. Na Tabela 5.2 são

apresentados os valores de fração volumétrica e erro absoluto obtidos nas simulações e nos experimentos estáticos.

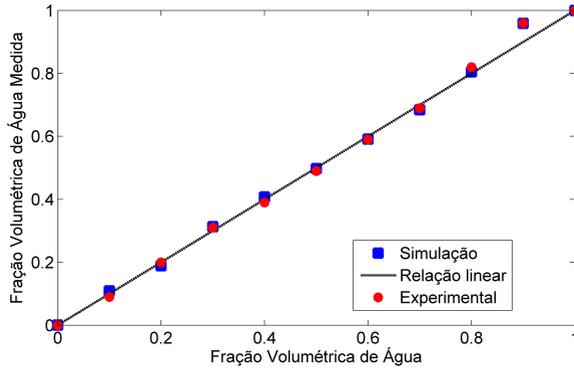


Figura 5.2: Valores de fração volumétrica de água medidos utilizando-se o sistema ECTM. Distribuição estratificada de óleo e água.

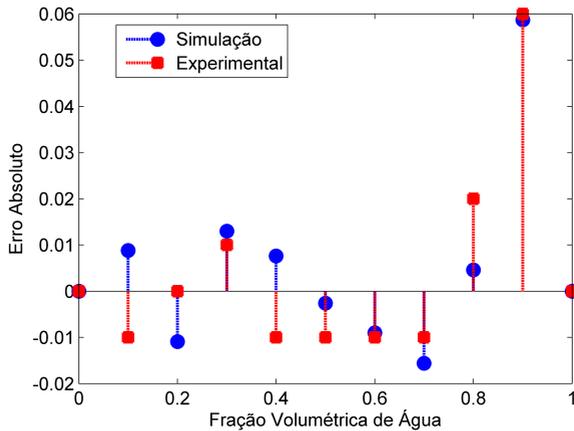


Figura 5.3: Erro absoluto referentes aos valores de fração de água medidos pelo sistema ECTM. Distribuição estratificada de óleo e água.

Tabela 5.2: Valores de fração volumétrica e erro absoluto obtidos por simulação e experimento

$\Theta$	$\Theta_M$	$\Theta_S$	$e_M$	$e_S$
0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
0,1000	0,09	0,1088	-0,01	+0,0088
0,2000	0,20	0,1891	0,00	-0,0109
0,3000	0,31	0,3130	+0,01	+0,0130
0,4000	0,39	0,4076	-0,01	+0,0076
0,5000	0,49	0,4974	-0,01	-0,0026
0,6000	0,59	0,5910	-0,01	-0,0090
0,7000	0,69	0,6844	-0,01	-0,0156
0,8000	0,82	0,8046	+0,02	+0,0046
0,9000	0,96	0,9587	+0,06	+0,0587
1,0000	1,00	1,0000	0,00	0,0000

### 5.3 Experimentos Dinâmicos

Para uma melhor avaliação do sistema ECTM, experimentos dinâmicos foram realizados utilizando a Unidade Experimental de Escoamento Multifásico - UEEM. Ao se utilizar óleo e água como fluido de trabalho, observou-se a formação de emulsão para, praticamente, todos os valores de vazão. Assim, optou-se por utilizar água e ar comprimido como fluidos de trabalho. Para se comparar com os resultados experimentais dinâmicos, também foram realizados experimentos estáticos e simulações considerando-se escoamento estratificado ar-água. As características dos fluidos utilizados estão dispostas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Características elétricas dos fluidos utilizados para os experimentos dinâmicos. Temperatura igual a 25°C.

Parâmetros		
Fluido	$\epsilon[-]$	$\sigma[\mu S/m]$
Água Fresca	81,0	375,0
Ar Comprimido	1,0	$\approx 0$

### 5.3.1 Unidade Experimental de Escoamento Multifásico

A UEEM é um unidade experimental para a investigação de novas tecnologias e/ou aprimoramento das já existentes nas áreas de medição e controle para escoamentos multifásicos. Detalhes do projeto, como dimensionamento de tubulações e instrumentação, fluidos utilizados, malhas de controle e comunicação podem ser encontrados em Almeida [3].

Com o auxílio de um software supervisor, pôde-se atribuir valores para as variáveis de interesse e monitorar todo o processo remotamente. A Fig. 5.4 ilustra o supervisor e seus respectivos instrumentos e equipamentos, estando estes identificados da seguinte maneira:

1. separador gás-líquido e instrumentos responsáveis pela medição e controle de nível e de pressão deste equipamento;
2. tanque de água;
3. tanque de óleo;
4. válvula de controle de vazão de gás e medidores de vazão volumétrica, temperatura e pressão para o cálculo da vazão mássica de gás;
5. unidade de produção e tratamento de ar comprimido;
6. separador bifásico água-óleo. Este equipamento não foi utilizado neste trabalho, visto que se trabalhou somente com escoamentos bifásicos gás-líquido (água);
7. bomba de água;
8. bomba de óleo;
9. medidor de vazão volumétrica de água;
10. medidor de vazão volumétrica de gás;
11. sensor ECTM.

Em resumo, o procedimento de realização do ensaio pode ser explicado da seguinte maneira: inicialmente atribuiu-se, por meio dos comandos do sistema supervisor, os valores de vazão de gás e de líquido previamente determinados. Uma vez desenvolvido o padrão referente a essas vazões, mediu-se durante 100 s o valor referente à fração volumétrica de água presente no escoamento. Os valores reais de fração volumétrica de água foram

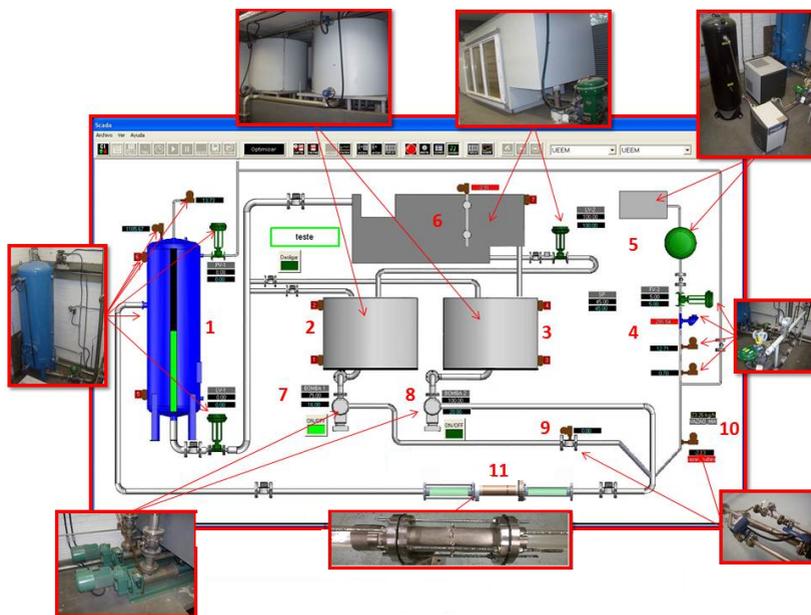


Figura 5.4: Software supervisorio e identificação dos instrumentos e equipamentos da UEEM.

obtidos fechando-se válvulas manuais a montante e a jusante do sensor. A Fig. 5.5 ilustra o sensor ECTM instalado na tubulação da UEEM.

A Fig. 5.6 representa os valores de fração volumétrica de água obtidos tanto por meio de simulações quanto por experimentos estáticos e dinâmicos. Como observado na Fig. 5.7, os valores de erro absoluto obtidos para os escoamentos estratificados de ar comprimido e água são maiores que aqueles para escoamento de óleo e água (erro máximo de 0,12). Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de fração volumétrica e erro absoluto obtidos nos experimentos dinâmicos. A Fig. 5.8 representa os valores de fração volumétrica de água medidos em escoamentos com frações reais de 10% e 20%.

## 5.4 Considerações Finais

Neste capítulo, os resultados experimentais para a medição da fração volumétrica de água utilizando o método ECTM foram apresentados. Inicialmente, foram apresentados os resultados obtidos nos experimentos estáticos

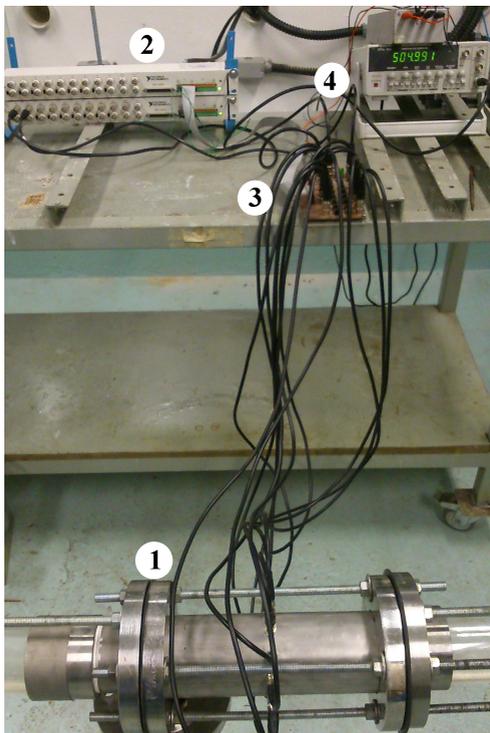


Figura 5.5: Montagem para realização dos experimentos dinâmicos. Sensor ETCM (1), Conector BNC (2), módulo de controle de chaveamento e medição (3) e gerador de função senoidal (4).

considerando óleo e água. Como não possível utilizar óleo e água para gerar escoamentos na UEEM, devido à formação de emulsões, optou-se por utilizar ar comprimido e água. Assim, tanto os resultados obtidos por meio de simulação e experimentos estáticos e dinâmicos foram apresentados. Os erros absolutos obtidos para os experimentos com óleo e água (fluidos) não ultrapassaram  $\pm 0,06$  e para aqueles com ar comprimido e água,  $+0,12$ .

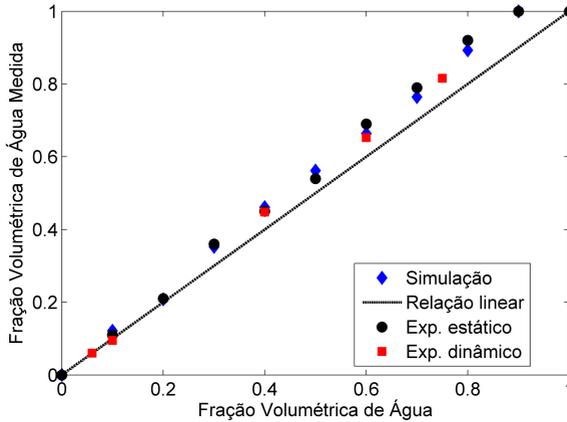


Figura 5.6: Valores de fração volumétrica de água obtidos experimentalmente. Escoamento estratificado de ar comprimido e água.

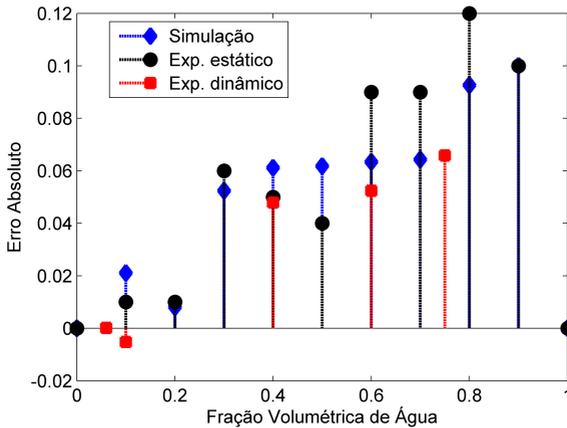


Figura 5.7: Erro absoluto referentes aos valores de fração de água medidos pelo sistema ECTM. Escoamento estratificado de ar comprimido e água.

Tabela 5.4: Valores de fração volumétrica e erro absoluto obtidos nos experimentos dinâmicos

$\Theta$	$\Theta_M$	$e_M$
0,0000	0,0000	0,0000
0,1000	0,0948	-0,0052
0,2000	---	---
0,3000	---	---
0,4000	0,4479	+0,0479
0,5000	---	---
0,6000	0,6524	+0,0524
0,7000	---	---
0,8000	---	---
0,9000	---	---
1,0000	1,0000	0,0000

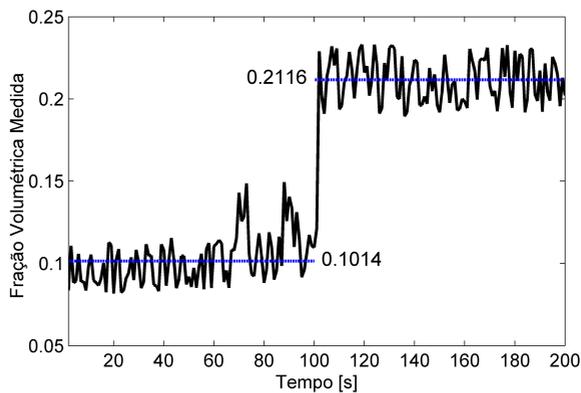


Figura 5.8: Exemplo de valores de fração volumétrica de água medidos durante o experimento dinâmico.



## Capítulo 6

# Conclusões e Sugestões

O presente trabalho tratou do desenvolvimento de uma técnica não invasiva e não intrusiva para a medição da fração volumétrica de água em escoamentos bifásicos óleo-água. Os resultados de simulações e experimentais dessa nova técnica, baseada nos sistemas ECT tradicionais e na estratégia de combinação de eletrodos, provam que não é necessário reconstruir fielmente a distribuição de permissividade do escoamento para se obter melhores estimativas da fração volumétrica.

Inicialmente, foi feita uma vasta pesquisa bibliográfica para se identificar os principais problemas encontrados nas técnicas aplicadas à medição de fração volumétrica. Constatou-se que a grande maioria das técnicas apresentam uma forte relação de dependência com o padrão de escoamento. Aquelas que apresentam menor influência do padrão de escoamento, como a ECT, sofrem de outros problemas como, por exemplo, baixo SNR e a necessidade de se utilizar algoritmos iterativos e muitas iterações para a solução do problema de reconstrução de permissividade.

Buscando-se uma maneira de solucionar tais problemas, desenvolveu-se uma técnica que utiliza as melhores características dos sistemas ECT e que, ao mesmo tempo, apresenta alto SNR. Esta técnica foi denominada de Tomometria Capacitiva Elétrica (*Electrical Capacitance Tomometry* - ECTM), justificando-se, assim, a não necessidade de se reconstruir imagens.

Grande dedicação foi dada ao projeto do sensor, visando a construção de um protótipo que amenizasse os problemas de não homogeneidade devido à natureza *soft field* do problema. Diversas simulações foram realizadas e, a partir dos resultados, o valor de cada parâmetro de projeto foi definido.

Tanto os resultados experimentais estáticos quanto os dinâmicos apresentaram o mesmo comportamento daqueles obtidos por simulação, dando, assim, credibilidade aos resultados de simulação referentes a diferentes padrões de escoamento. A maioria dos resultados obtidos (simulações e experimentos) apresentam erros menores que aqueles obtidos pelos sensores ECT nas mesmas condições (mesmo número de eletrodos e mesmo número de iterações).

Com base na experiência adquirida, algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros podem ser feitas:

- **Melhoria do hardware** - um dos tópicos mais discutidos na literatura sobre sensores ECT diz respeito a melhorias de hardware. O hardware desenvolvido (módulo de controle e medição) foi projetado para suprir as necessidades momentâneas na realização dos experimentos. Propõe-se a construção de uma solução de hardware completa na qual tanto a geração do sinal de excitação, sinal de controle, medição, condicionamento e implementação do algoritmo de reconstrução sejam embarcados;
- **Implementação de outros protocolos de excitação** - é sabido que a estratégia de combinação de eletrodos possibilita a implementação de uma grande variedade de protocolos de excitação (combinações diferentes para eletrodos emissores e receptores). No método ECTM, aplicou-se somente um protocolo de excitação (6 eletrodos adjacentes como emissor e 6 adjacentes como receptores); mas outros também podem ser testados;
- **Avaliação do sistema ECTM para outros padrões de escoamento** - o sistema ECTM foi desenvolvido e avaliado neste trabalho para escoamentos estratificados, uma vez que é grande a ocorrência desse tipo de padrão em aplicações na indústria de petróleo, principalmente em configurações de poços inteligentes. No entanto, para aumentar a área de aplicação do sistema, deve-se avaliá-lo para outros padrões como por exemplo padrão anular e de golfada;
- **Compensação dos efeitos da temperatura e condutividade** - é sabido que os valores de permissividade relativa das fases constituintes do escoamento sofrem variações devido à temperatura e condutividade (com o aumento da salinidade, por exemplo), aumentando, assim, os erros de medição. Algumas alternativas de solução para esse problema foram apresentadas na literatura e podem ser implementadas no sistema ECTM;

- **Análise das incertezas envolvidas no sistema** - para a completa avaliação do sistema ECTM, uma análise detalhada das incertezas envolvidas no processo de medição.

As pesquisas desenvolvidas até o momento deram origem aos seguintes artigos:

- **publicado** - Mota, F. R. M. da e Pagano, D. J. (2014). Simulation and experimental study of phase segregation in helical pipes: A new method for flow conditioning. *Flow Meas. Instrum.* Vol. 35. pp 99-108.
- **submetido** - Mota, F. R. M. da; Pagano, D. J. e Dias, M. A. (2015). Development of an Electrical Capacitance Tomometry System using Rotating Electrodes and Image Reconstruction Algorithms. *IEEE Trans. Instr. Meas.*



# Apêndice A

## Perfis de Capacitância

Neste apêndice expõe-se os demais gráficos de perfis de capacitância obtidas por meio das simulações descritas no Capítulo 4.

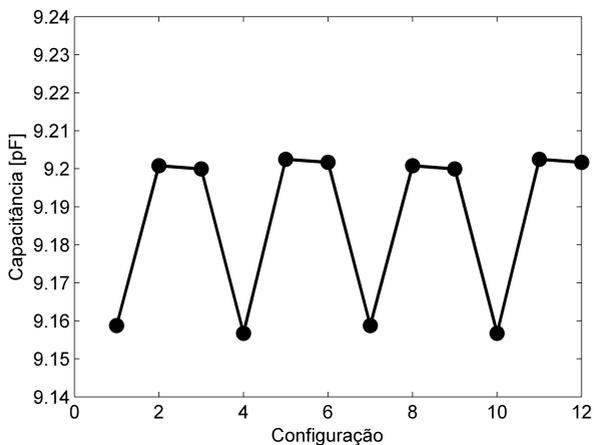


Figura A.1: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 0% de água. 3 iterações.

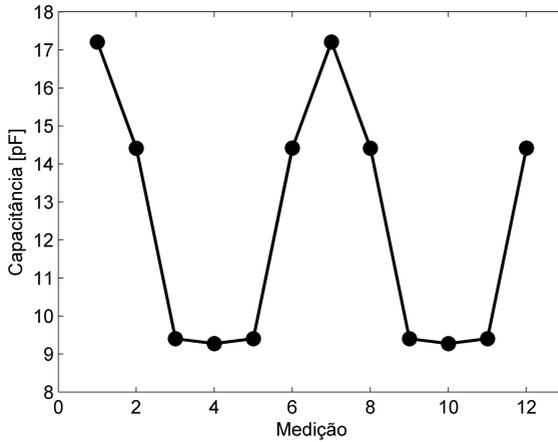


Figura A.2: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 10% de água. 3 iterações.

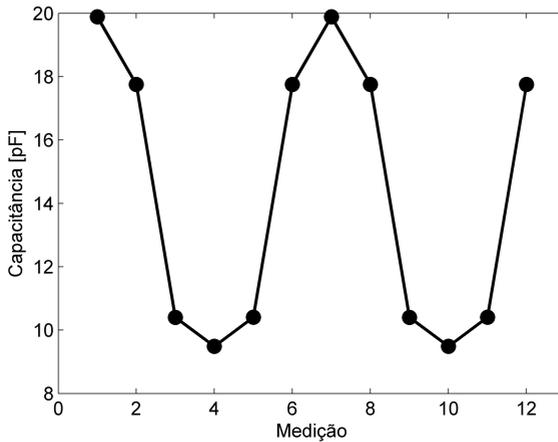


Figura A.3: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 20% de água. 3 iterações.

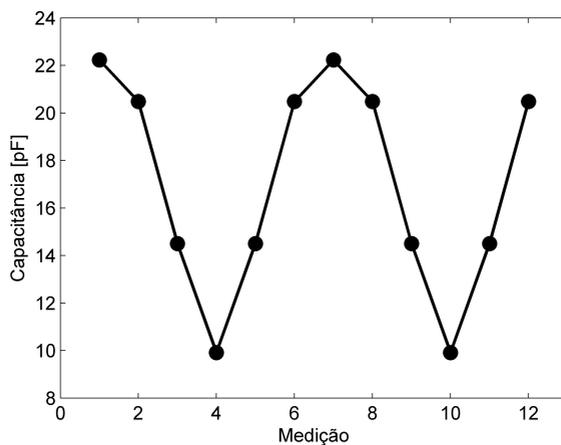


Figura A.4: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 30% de água. 3 iterações.

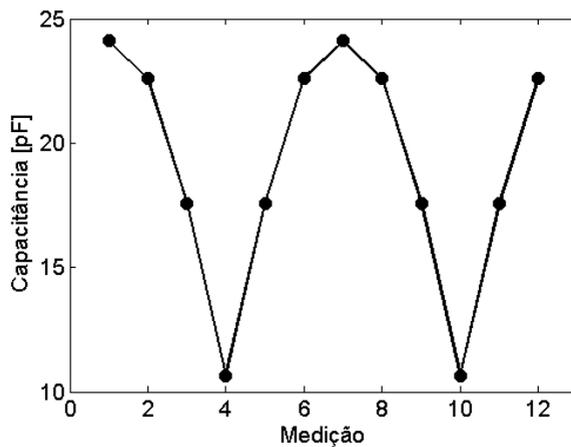


Figura A.5: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 40% de água. 3 iterações.

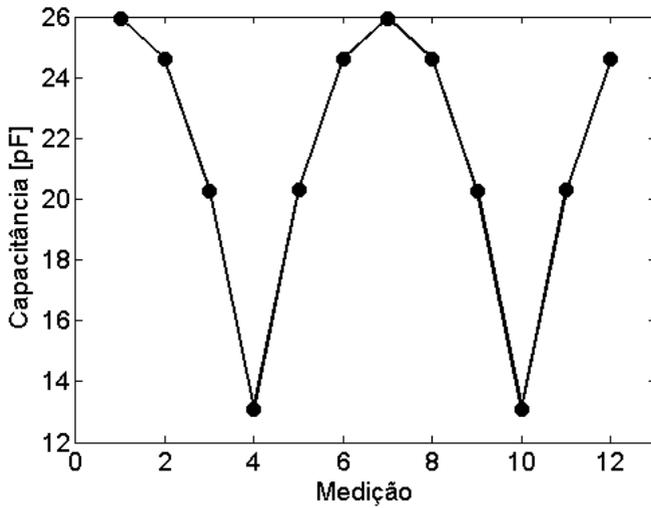


Figura A.6: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

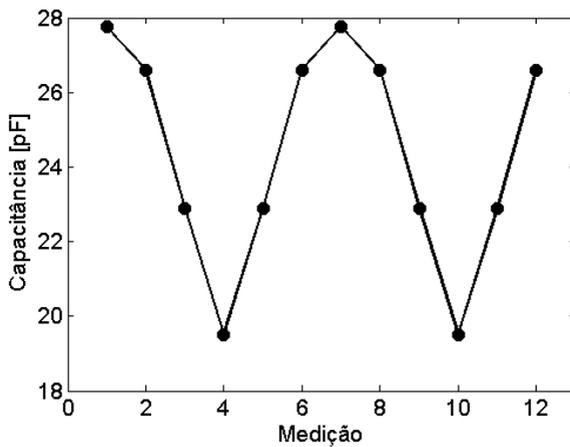


Figura A.7: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 60% de água. 3 iterações.

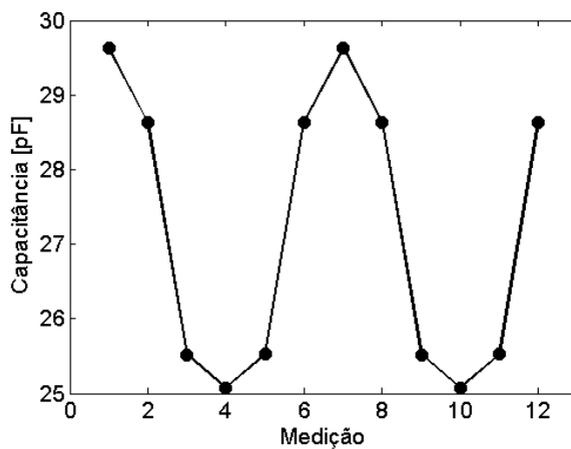


Figura A.8: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 70% de água. 3 iterações.

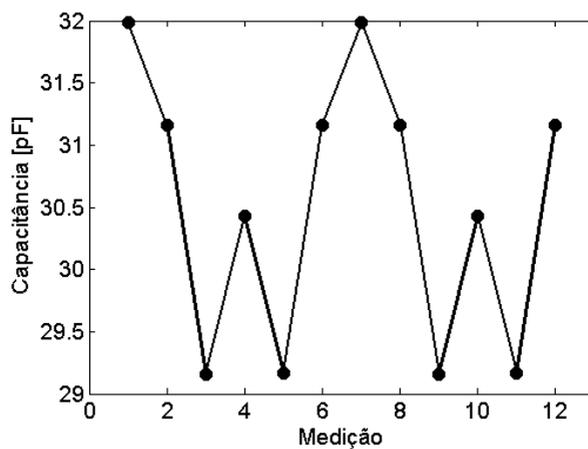


Figura A.9: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 80% de água. 3 iterações.

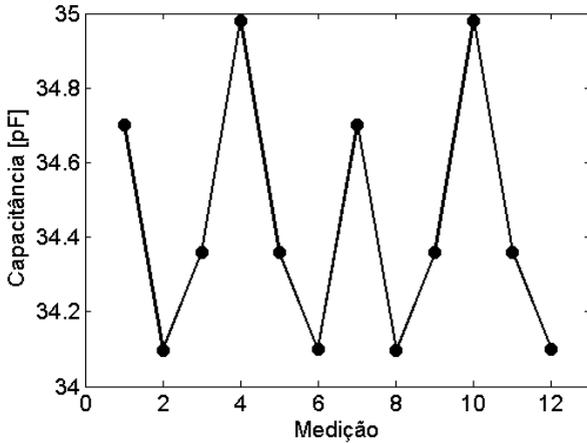


Figura A.10: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 90% de água. 3 iterações.

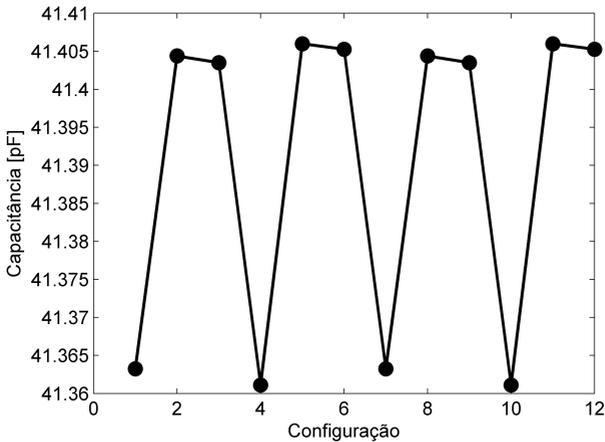


Figura A.11: Perfil de capacitância obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 100% de água. 3 iterações.

## Apêndice B

# Perfis de Capacitância Normalizadas

Neste apêndice expõe-se os demais gráficos de perfis de capacitância normalizadas obtidas por meio das simulações descritas no Capítulo 4.

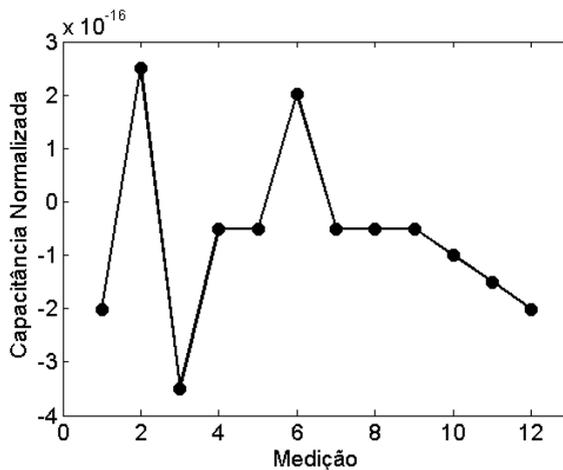


Figura B.1: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 0% de água. 3 iterações.

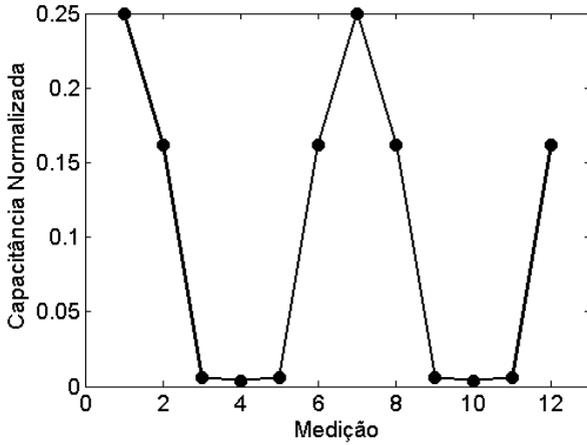


Figura B.2: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 10% de água. 3 iterações.

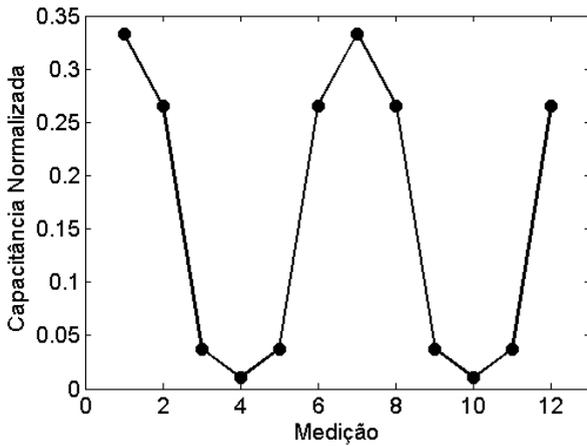


Figura B.3: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 20% de água. 3 iterações.

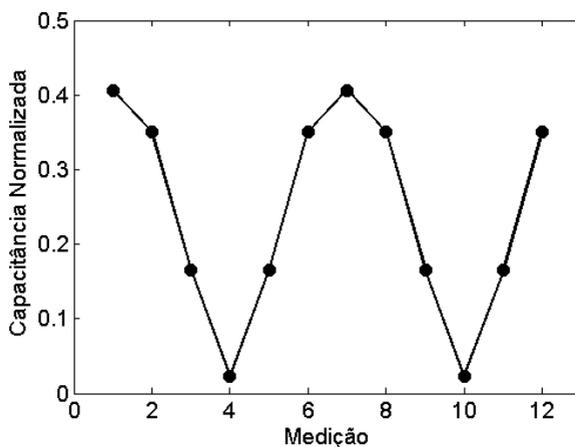


Figura B.4: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 30% de água. 3 iterações.

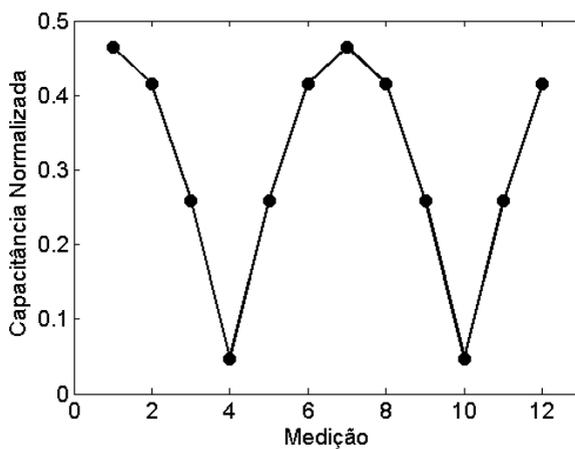


Figura B.5: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 40% de água. 3 iterações.

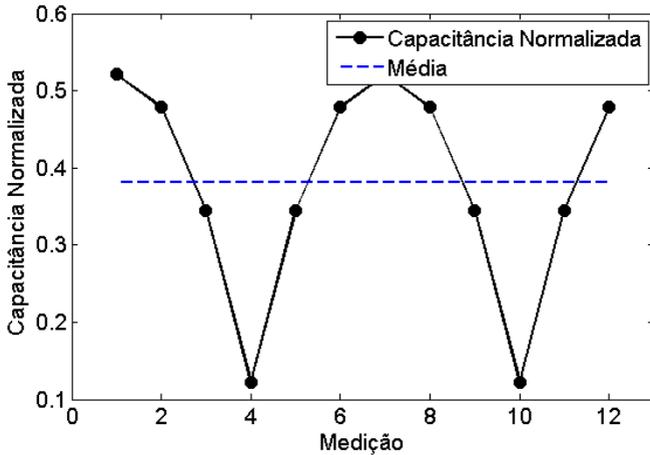


Figura B.6: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

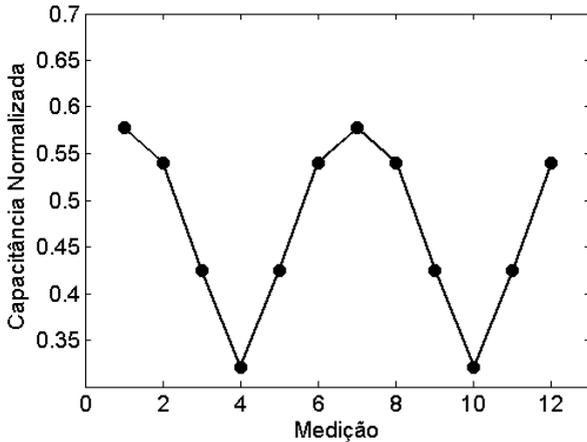


Figura B.7: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 60% de água. 3 iterações.

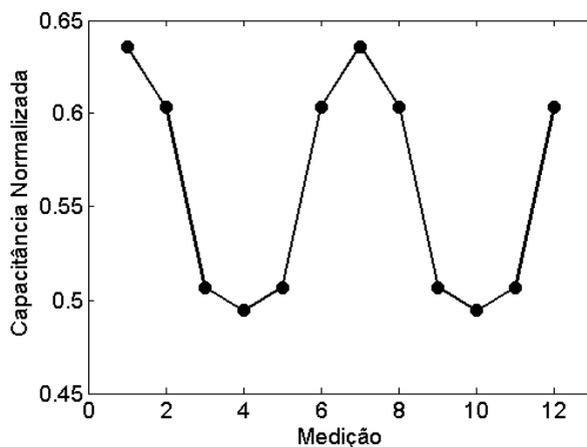


Figura B.8: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 70% de água. 3 iterações.

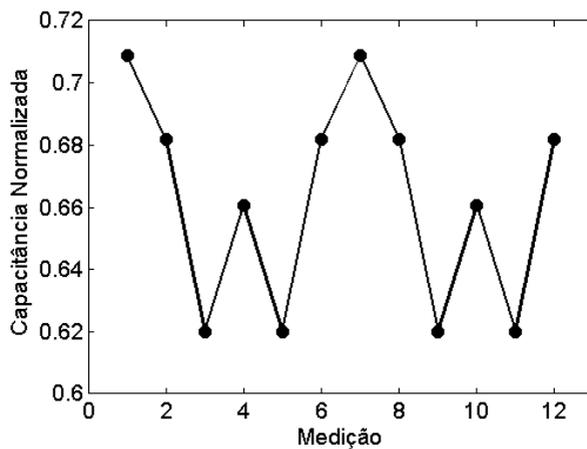


Figura B.9: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 80% de água. 3 iterações.

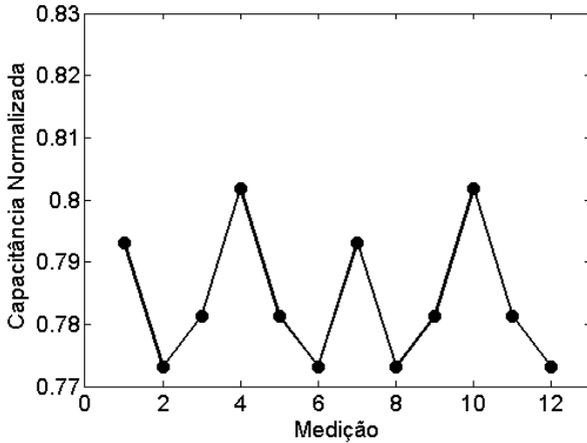


Figura B.10: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 90% de água. 3 iterações.

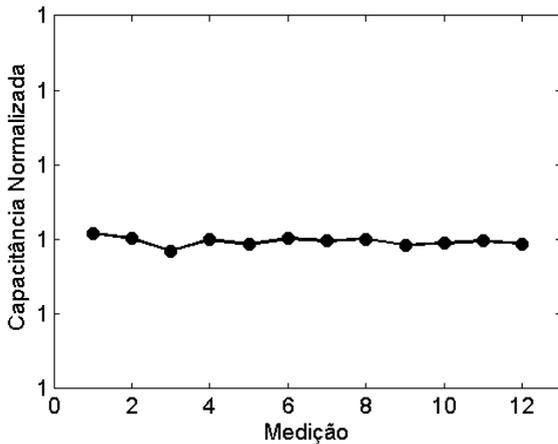


Figura B.11: Perfil de capacitância normalizada obtido pelo método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 100% de água. 3 iterações.

## Apêndice C

# Imagens Reconstruídas

Neste apêndice expõe-se as demais as imagens reconstruídas a partir da distribuição de permissividade relativa obtidas por meio das simulações descritas no Capítulo 4.

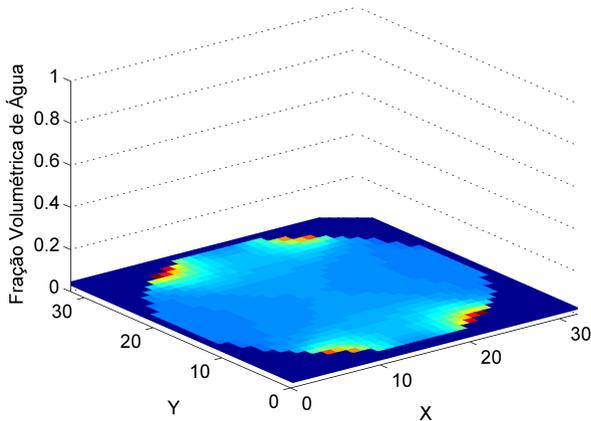


Figura C.1: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 0% de água. 3 iterações.

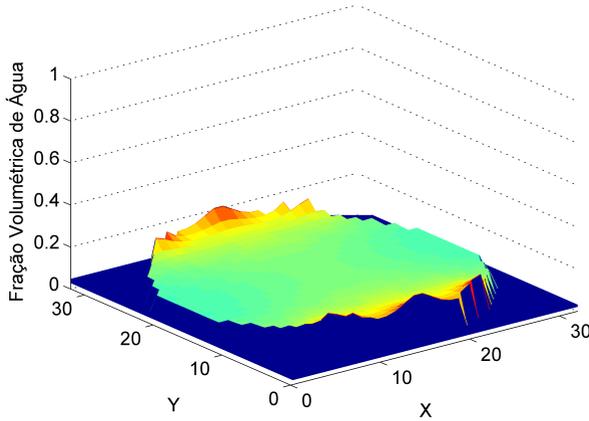


Figura C.2: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 10% de água. 3 iterações.

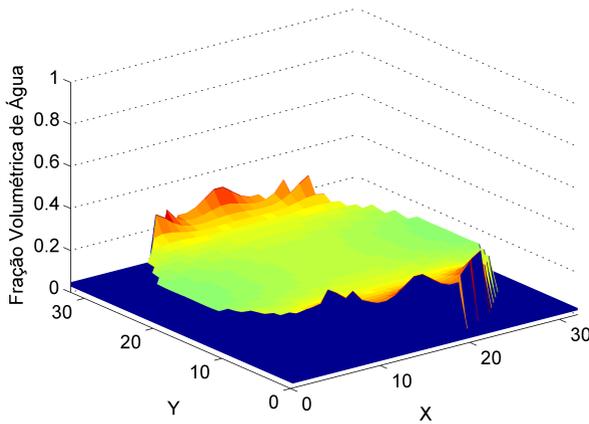


Figura C.3: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 20% de água. 3 iterações.

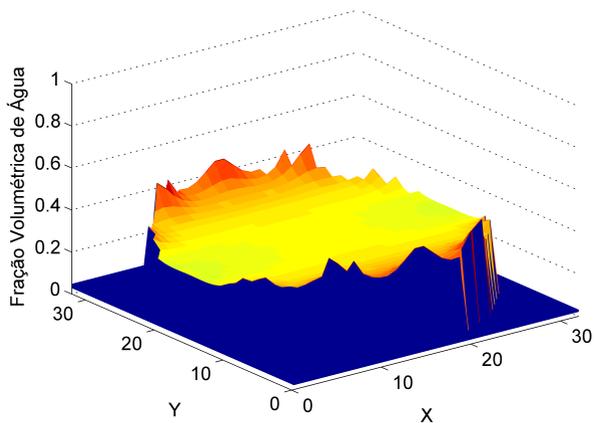


Figura C.4: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 30% de água. 3 iterações.

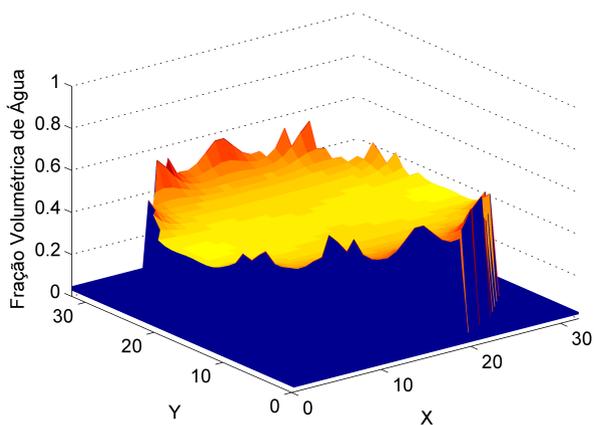


Figura C.5: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 40% de água. 3 iterações.

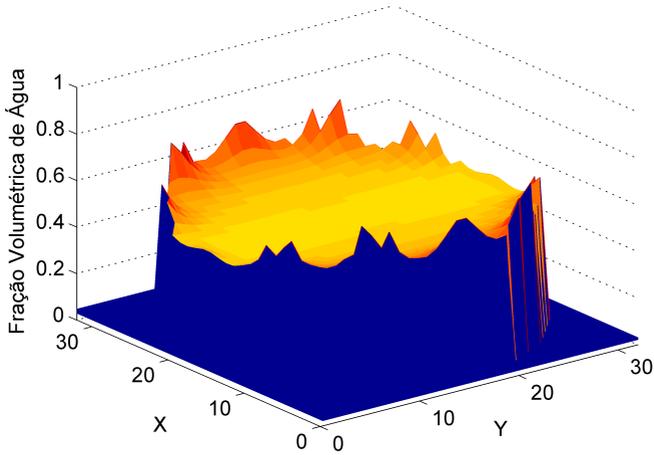


Figura C.6: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 50% de água. 3 iterações.

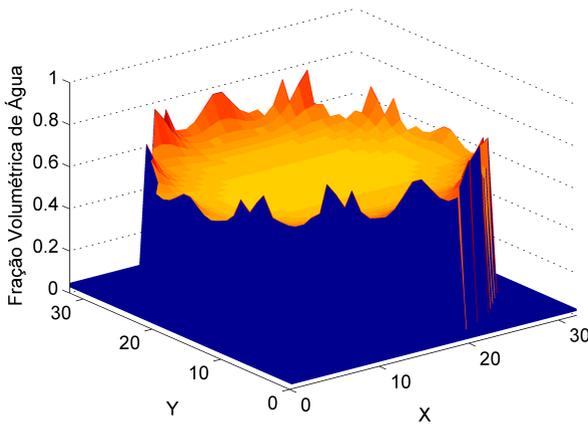


Figura C.7: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 60% de água. 3 iterações.

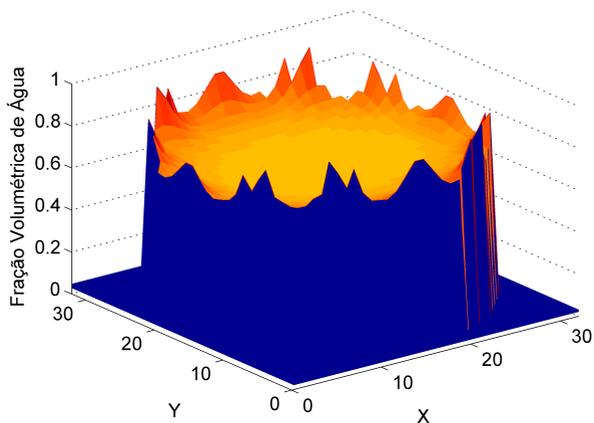


Figura C.8: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 70% de água. 3 iterações.

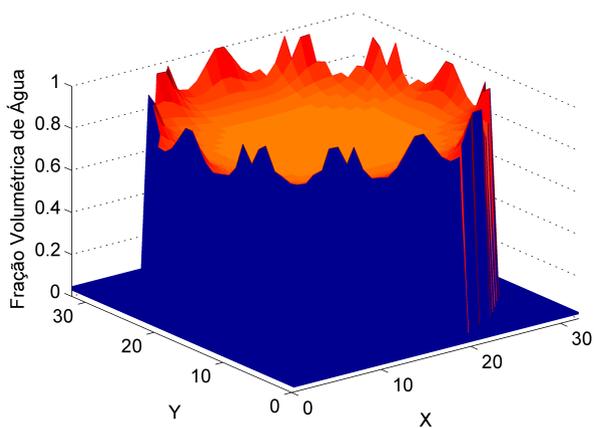


Figura C.9: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 80% de água. 3 iterações.

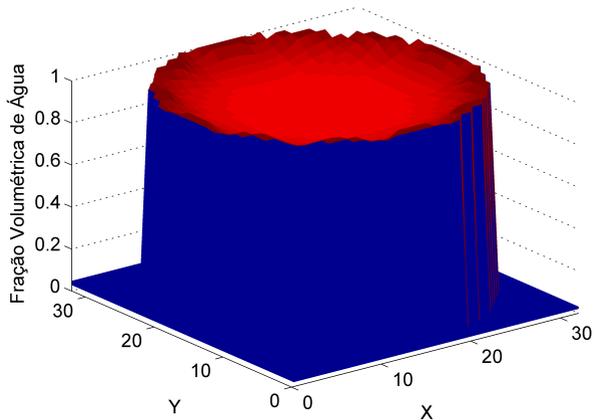


Figura C.10: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 90% de água. 3 iterações.

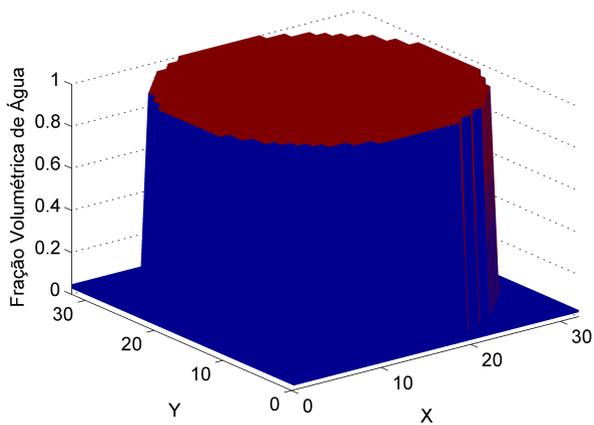


Figura C.11: Imagem reconstruída utilizando-se o método ECTM para o escoamento estratificado de óleo-água com 100% de água. 3 iterações.

# Referências Bibliográficas

- [1] Ahmed, W. H. (2006). Capacitance sensor for void fraction measurement and flow pattern identification in air-oil two-phase flow. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 6pp. 5.
- [2] Alme, K. J. e Mylvaganarn, S. (2006). Electrical capacitance tomography - sensor models, design, simulations, and experimental verification. *IEEE Sensors J.*, Vol. 6pp. 1256–1266.
- [3] Almeida, C. M. (2009). Projeto de uma unidade para pesquisa de medição e controle de escoamento multifásico. Relatório técnico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] Azevedo, A. C. (2002). *Desenvolvimento de um Sistema de Tomografia Capacitiva para Processos Multifásicos*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- [5] Barros, T. R. (2011). Simulação numérica de um sensor de tomografia capacitiva para análise de escoamento bifásico ar-Água. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.
- [6] Bolton, C. T., Korchinsky, W. J., e Waterfall, R. C. (1998). Calibration of capacitance tomography systems for liquid-liquid dispersions. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9pp. 1797–1800.
- [7] Czarnecki, P., Danko, L., e Szabatin, R. (2009). One channel capacitance tomograph with hardware implementation of image reconstruction algorithm. Proc. *IST 2009 - International Workshop on Imaging Systems and Techniques*.
- [8] Daoye, Y., Bin, Z., Chuanlong, X., Guanghua, T., e Shimin, W. (2009). Effect of pipeline thickness on electrical capacitance tomography. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 147pp. 1–13.

- [9] Demori, M., Ferrari, V., Strazzab, D., e Poesiob, P. (2010). A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water. *Sensors and Actuators*, Vol. 163pp. 172–176.
- [10] Deng, X. e Yang, W. Q. (2012). Fusion research of electrical tomography with others sensors for two phase-flow measurement. *Measurement Science Review*, Vol. 12pp. 62–67.
- [11] Din, S. M., Azmi, A., Song, C. P., Rahim, R. A., e Ling, L. P. (2014). Electric potential of various 4-electrode segmentation excitation for electrical capacitance tomography system. *Jurnal Teknologi*, Vol. 69pp. 35–38.
- [12] Dong, X. e Guo, S. (2008). Image reconstruction method for electrical capacitance tomography based on combined series and parapara normalization model. *Meas. Sci. Technol*, Vol. 19pp. 7.
- [13] Duarte, L. G. C. (2002). *Medição da fração de vazio em dutos de pequeno diâmetro utilizando sensores capacitivos*. Tese de Doutorado, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [14] Dyakowski, T., Jeanmeure, L. F. C., e Jaworski, A. J. (2000). Application of electrical capacitance tomography for gas-solid and liquid-solid flow - a review. *Powder Technology*, Vol. 112pp. 74–92.
- [15] Elkow, K. J. e Reskallah, K. S. (1996). Void fraction measurement in gas-liquid flows using capacitance sensors. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7.
- [16] Feynman, R. P. (1998). *Feynman Lectures on Physics*, Vol. 3. Addison-Wesley, Amsterdam.
- [17] Flores, N., Gamio, J. C., Ortiz-Alemán, C., e Damián, E. (2005). Sensor modeling for an electrical capacitance tomography system applied to oil industry. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference*, Vol.
- [18] Geraets, J. J. e Borst, J. C. (1988). A capacitance sensor for two-phase void fraction and flow pattern identification. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14pp. 305–320.
- [19] Hammer, E. A., Tollefsen, J., e Olsvik, K. (1989). Capacitance transducer for non-intrusive measurement of water in crude oil. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 1pp. 51–58.

- [20] Huang, S. M., Green, R. G., Plaskowski, A. B., e Beck, M. S. (1988). Conductivity effects on capacitance measurements of two-component fluids using the charge transfer method. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 21pp. 539–548.
- [21] Isaksen, O. (1994). *A novel approach to reconstruction of process tomography data*. Tese de Doutorado, University of Bergen.
- [22] Isaksen, O. (1996). A review of reconstruction techniques for capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7pp. 325–337.
- [23] Ismail, I., Bukhari, J. C. J. C. G. F. A., e Yang, W. W. Q. (2005). Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 16pp. 145–155.
- [24] Jaworski, A. J. e Bolton, G. T. (2000). The design of an electrical capacitance tomography sensor for use with media of high dielectric permittivity. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11pp. 743–757.
- [25] Kendoush, A. A. e Sarkis, Z. A. (1995). Improving the accuracy of the capacitance method for void fraction measurement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 11pp. 321–326.
- [26] Kendoush, A. A. e Sarkis, Z. A. (1996). A non-intrusive auto-transformer technique for the measurement of void fraction. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 13pp. 92–97.
- [27] Ko, M. S., Yun, B. J., Kim, K. Y., e Kim, S. (2012). Design of a capacitance sensor for void fraction measurement in annular flows through a vertical pipe. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 23pp. 1–9.
- [28] Landweber, L. (1951). An iteration formula for fredholm integral of first kind. *American Journal of Mathematics*, Vol. 73pp. 615–624.
- [29] Lei, J., Liu, S., Li, Z., e Sun, M. (2009). An image reconstruction algorithm based on the extended tikhonov regularization method for electrical capacitance tomography. *Measurement*, Vol. 42pp. 368–376.
- [30] Lucas, G. P. e Simonian, S. (1991). Towards a phase-distribution-independent impedance volume fraction meter. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 2pp. 105–114.
- [31] Maxwell, J. C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon, Oxford.

- [32] McKeen, T. R. e Pugsley, T. S. (2002). The influence of permittivity models on phantom image obtained from electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13pp. 1822–1830.
- [33] Mei, Q. (2010). Design of transducer structure parameters and materials characteristics analyses for electrical capacitance tomography system. *Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol. 7528pp. 1–6.
- [34] Merilo, M., Dechene, R. L., e Cicowlas, W. M. (1977). Void fraction measurement with a rotating electric field conductance gauge. *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, Vol. 99pp. 330–331.
- [35] Mohamad, E. J., Rahim, R. A., Ling, L. P., Rahiman, M. H. F., Mohd, O., Marwah, F. B., e Ayob, N. M. N. (2012). Segmented capacitance tomography electrodes: a design and experimental verification. *IEEE Sensor Journal*, Vol. 12pp. 1589–1598.
- [36] Neumayer, M. e et al. (2011). *Current Reconstruction Algorithms in Electrical Capacitance Tomography in New Developments and Appl. in Sensors Tech.* Springer-Verlag.
- [37] Olmos, A. M., Carvajal, M. A., Morales, D. P., García, A., e Palma, A. J. (2008). Development of an electrical capacitance tomography system using four rotating electrodes. *Sensors and Actuators*, Vol. 148pp. 366–375.
- [38] Olmos, A. M., Primicia, J. A., e Marron, J. L. F. (2007). Simulation design of electrical capacitance tomography sensors. *IET Sci. Meas. Technol.*, Vol. 1pp. 216–223.
- [39] Peng, L., Ye, J., Lu, G., e Yang, W. (2012). Evaluation of effect of number of electrodes in ect sensors on image quality. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12pp. 1554–1565.
- [40] Peng, L. H., Mou, C. H., Yao, D. Y., Zhang, B. F., e Xiao, D. Y. (2005). Determination of the optimal axial length of the electrode in an electrical capacitance tomography sensor. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 16pp. 169–175.
- [41] Polydorides, N. (2002). *Image Reconstruction Algorithms for Soft-field Tomography*. Tese de Doutorado, University of Manchester Institute of Science and Technology - UMIST.
- [42] Polydorides, N. e McCann, H. (2002). Electrode configurations for improved spatial resolution in electrical impedance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13pp. 1862–1870.

- [43] Rosa, E. S. (2012). *Escoamento Multifásico Isotérmico: momodel de multifluido e de mistura*. Bookman.
- [44] Rosa, E. S., Flora, B. F., e Souza, M. A. S. F. (2012). Design and performance prediction os an impedance void meter applied to the petroleum industry. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 23pp. 1–14.
- [45] Sami, M., Abouelwafa, A., e Kendall, E. J. M. (1980). The use of capacitance sensors for phase percentage determination in multiphase pipelines. *Trans. on Inst. ans Meas.*, Vol. 29pp. 24–27.
- [46] Styra, D. e Babout, L. (2010). Improvement of ac-based electrical capacitance tomography hardware. *Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 7pp. 47–50.
- [47] Talib, H., Mohamad-Saleh, J., Zainal-Mokhtar, K., e Osman-Ali, N. (2009). On the comparison of capacitance-based tomography data normalization mmethod for multilayer perceptron recognition of gas-oil flow patterns. *Modern Applied Science*, Vol. 3pp. 108–116.
- [48] Tollefsen, J. e Hammer, E. A. (1998). Capacitance sensor design for reducing errors in phase concentration measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 9pp. 25–32.
- [49] Westlake, J. R. (1968). *Handbook of numerical matrix inversion and solution of linear equations*. John Wiley & Sons.
- [50] Williams, P. e York, T. (1999). Evaluation of integrated electrodes for electrical capacitance tomography. *Proc. 1st World Congress on Industrial Process Tomography*.
- [51] Xiangyuan, D., Shuqing, G., e Hailong, Y. (2009). Fast image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography. *Icea*, Vol.pp. 3753–3756.
- [52] Xie, C. G., Huang, S. M., Hoyle, B. S., Torn, R., Lenn, C., Snowden, D., e Beck, M. S. (1992). Electrical capacitance tomograpghy for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithm and design of primary sensors. *IEE Proceedings*, Vol. 139pp. 89–98.
- [53] Xie, C. G., Stott, A. L., Plaskowski, A., e Beck, M. S. (1990). Design of capacitance electrodes for concentration measurement of two-phase flow. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 1pp. 65–78.

- [54] Yan, H., Shao, F. G., Xu, H., e Wang, S. (1999). Three-dimensional analysis of electrical capacitance tomography sensing fields. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10pp. 717–725.
- [55] Yang, Q. W. (1996a). A self-balancing circuit to measure capacitance and loss conductance for industrial transducer application. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 45pp. 995–958.
- [56] Yang, W. (2010). Design of electrical capacitance tomography sensors. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 21pp. 1–13.
- [57] Yang, W. Q. (1996b). Hardware design of electrical capacitance tomography systems. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7pp. 225–232.
- [58] Yang, W. Q. (1997). Modelling of electrical capacitance tomography sensors. *IET Proc. Sci. Meas. Technol.*, Vol. 144pp. 203–208.
- [59] Yang, W. Q. (2006). Key issues in designing capacitance tomography sensors. in *Proc. IEEE Conf. Sensors*, Vol. 22-25pp. 497–505.
- [60] Yang, W. Q. e Byars, M. (1999). An improved normalization approach for electrical capacitance tomography. *Proc. 1st World Congr. on Industrial Process Tomography*, Vol. pp. 215–218.
- [61] Yang, W. Q. e Liu, S. (1999). Electrical capacitance tomography with square sensor. *Electron. Lett.*, Vol. 35pp. 295–296.
- [62] Yang, W. Q. e Peng, L. (2003). Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14pp. R1–R13.
- [63] Yang, W. Q., Spink, D. M., York, T. A., e McCann, H. (1999). An image-reconstruction algorithm based on landweber's iteration meyhod for electrical-capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10pp. 1065–1069.
- [64] Yang, W. Q., Stott, A. L., e Beck, M. S. (1994). High frequency and high resolution capacitance measuring circuit for process tomography. *IEEE Proc. Circ. Dev. Syst.*, Vol. 141pp. 215–219.
- [65] Yang, Y. e Peng, L. (2013). A configurable electrical capacitance tomography system using a combining electrode strategy. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24pp. 11.

- [66] Ye, J., Peng, L., Wang, W., e Zhou, W. (2011). Helical capacitance sensor-based gas fraction measurement of gas-liquid two-phase flow in vertical tube with small diameter. *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 11pp. 1704–1710.
- [67] zhaoyan Fan e Gao, R. X. (2011). Enhansystem of measurement efficiency for electrical capacitance tomography. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, Vol. 60pp. 1699–1708.