

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Tiago Rodrigues de
Barros..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 11.1.09.12.11

Rui Felipe Moura
ORIENTADOR

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

Tiago Rodrigues de Barros

Simulação Numérica de um Sensor de Tomografia
Capacitiva para Análise de Escoamento Bifásico
Ar-Água

Campinas, 2011

Tiago Rodrigues de Barros

Simulação Numérica de um Sensor de Tomografia Capacitiva para Análise de Escoamento Bifásico Ar-Água

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

Campinas

2011

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

B278s Barros, Tiago Rodrigues de
Simulação numérica de um sensor de tomografia capacitiva para análise de escoamento bifásico ar-água / Tiago Rodrigues de Barros. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Tomografia. 2. Sensores. 3. Capacitores. 4. Escoamento multifásico. 5. Equações diferenciais - Soluções numéricas. I. Moura, Luiz Felipe Mendes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Numerical simulation of a capacitance tomography sensor for the biphasic flow air-water analysis

Palavras-chave em Inglês: Tomography, Sensors, Capacitor, Multiphasic flow, Differential equations - Numerical solutions

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Marcelo Moreira Ganzarolli, Emerson dos Reis

Data da defesa: 11/04/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

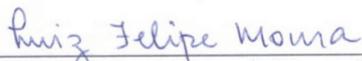
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

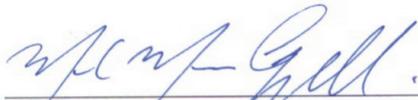
Simulação Numérica de um Sensor de Tomografia Capacitiva para Análise de Escoamento Bifásico Ar-Água

Autor: Tiago Rodrigues de Barros
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura, Presidente
Universidade Estadual de Campinas/FEM



Prof. Dr. Marcelo Moreira Ganzarolli
Universidade Estadual de Campinas/FEM



Prof. Dr. Emerson dos Reis
Instituto Federal São Paulo/São João da Boa Vista

Campinas, 11 de Abril de 2011

Dedico este trabalho a Deus e tudo que ele criou.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, este trabalho não teria sentido se Deus não estivesse guiando meus passos durante esta jornada, logo meu agradecimento especial.

Este trabalho não poderia ser terminado sem o auxílio e o suporte de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A toda minha família, pais, esposa e filho por terem me dado o devido suporte e entender as minhas faltas durante esta fase.

Ao Professor Luiz Felipe Mendes de Moura pela oportunidade concedida, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e pela orientação durante este percurso.

Ao Professor Fernando de Almeida França que foi uma das pessoas mais importantes para que este trabalho fosse iniciado e, que eu espero que fique bom logo e seja muito feliz.

A Cleuza de Vasconcelos Lima pela paciência e suporte nas horas de maior importância tratando com muita eficiência dos assuntos burocráticos.

A todos os colegas e amigos, que são tantos, que me auxiliaram e estiveram presente nesta etapa muito feliz da minha vida.

A CAPES pelo apoio financeiro.

*As pessoas viajam para admirar a
altura das montanhas, as imensas ondas dos
mares, o longo percurso dos rios, o vasto
domínio do oceano, o movimento circular das
estrelas e, no entanto, elas passam por si
mesmas sem se admirarem.*

SANTO AGOSTINHO

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a simulação numérica de um sensor de tomografia capacitiva elétrica, em função da permissividade elétrica relativa das fases presentes dentro da tubulação, com a finalidade de determinar a melhor geometria do sensor para a geração de imagem de escoamentos numa mistura bifásica ar-água, levando em consideração fluidos com efeito da condutividade nula. A simulação numérica do sensor de tomografia capacitiva é de crucial importância para o desenvolvimento de um tomógrafo capacitivo usado em aplicações específicas, como é o caso do monitoramento de escoamentos bifásicos. A tomografia capacitiva elétrica é uma tecnologia recente que vem se desenvolvendo desde o início de 1980, quando começou a ser utilizada para análise de processos industriais, principalmente em escoamentos multifásicos. Ela é utilizada para gerar uma imagem do interior da tubulação de acordo com a permissividade relativa das fases ali presentes, sendo atualmente o tipo de tomografia de processos mais utilizada. Após a determinação de algumas premissas do projeto como, o diâmetro da tubulação que foi simulada na horizontal, o comprimento dos eletrodos que seriam montados do lado externo da tubulação, as simulações bidimensionais foram realizadas para se obter o melhor espaçamento entre os doze eletrodos do sensor e a distância ideal da blindagem externa. Com as simulações tridimensionais, foi investigada a necessidade de utilização dos eletrodos de guarda, assim como, foi realizada a simulação da geometria final do sensor numa mudança dos componentes de ar para água no interior da tubulação. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram determinar a geometria mais adequada do sensor para a situação proposta, assim como, obter o valor das capacitâncias para diferentes condições de escoamento. Os resultados das simulações tridimensionais apontaram as principais limitações de uma análise bidimensional.

Palavras Chave: Tomografia Capacitiva Elétrica, Projeto de Sensor Capacitivo, Simulação Numérica, Escoamento Multifásico.

Abstract

This study was aimed to realize numerical simulations of a capacitive electrical tomography sensor, depending on the relative permittivity of the phases inside the pipe, in order to determine the best geometry of the sensor to generate the image of the flow in the air-water two-phase flow, taking into account the effect of conductivity zero in the fluids. Numerical simulation of the ECT sensor is of crucial importance to develop a capacitive tomograph used in specific applications such as monitoring biphasic flow. Electrical capacitance tomography is a new technology that has been developed since early 1980, when it began to be used in industrial processes, mainly in multiphase flows. It is used to generate an image from inside the pipe according to the relative permittivity of the phases present there, and is currently the type of process tomography procedures most commonly used. After the determination of some assumptions of the project as the diameter of the pipe that was simulated in the horizontal, the length of the electrodes that must be assembled outside the pipe, the two-dimensional simulations were performed to obtain the best spacing between the twelve electrodes of the sensor and the ideal distance of the outer shield. With the three-dimensional simulations, we investigated the necessity of use guard electrodes, as well as, it was realized the simulation of the final geometry of the sensor components in a change of air to water inside the pipe. The results of this study allow us to determine the most suitable sensor geometry for the proposed situation, as well as obtaining the value of capacitance for different flow conditions. The results of three-dimensional simulations showed the main limitations of a two dimensional analysis.

Key Words: Electrical Capacitance Tomography, Capacitance Sensor Design, Numeric Simulation, Multiphase Flow.

Lista de Ilustrações

Figura 2-1 Padrões de escoamento horizontal ar-água (OERTEL, 2004).....	5
Figura 2-2 Mapa de padrões feito por Mandhane et al. 1974 (OERTEL, 2004).	7
Figura 2-3 Sistema ECT	9
Figura 2-4 Malha para o método dos elementos finitos aplicado a ECT	13
Figura 2-5 Secção transversal de um sensor ECT	18
Figura 2-6 Sensor com aterramento axial.....	19
Figura 2-7 Efeito do aterramento axial.....	19
Figura 2-8 Circuitos elétricos para medição da capacitância (WEGLEITER, 2008).....	24
Figura 2-9 - Secção transversal do ECT (GERAESTS e BORST, 1988).....	25
Figura 3-1 - Resumo do pacote computacional do Maxwell (ANSOFT 2006)	34
Figura 3-2 - Sensor capacitivo com 12 eletrodos	37
Figura 3-3 - Definição do critério de solução.....	38
Figura 3-4 - Primeiro refinamento da malha	39
Figura 3-5 - Segundo refinamento da malha	40
Figura 3-6 – Eletrodos em 170° sem blindagem núcleo com ar.....	41
Figura 3-7 - Eletrodos em 170° com blindagem núcleo com ar.....	42
Figura 3-10 - Simulação 3D para comparação com Geraests e Borst (1988) com blindagem	45
Figura 4-1 - Distribuição do ϕ (Ângulo = 90° e $\epsilon_r = 1$)	52
Figura 4-2 - Distribuição do ϕ (Ângulo = 90° e $\epsilon_r = 100$)	53
Figura 4-3 – Erro entre as simulações bidimensionais e a solução exata.....	55
Figura 4-4 - Modelo 3D simplificado.....	56
Figura 4-5 – Erro entre as simulações tridimensionais e a solução exata	59
Figura 4-6 – Distribuição do potencial elétrico para eletrodos com 3° de espaçamento	60
Figura 4-7 – Distribuição do potencial elétrico para eletrodos com 27° de espaçamento	60
Figura 4-8 - Capacitâncias em função do espaçamento entre eletrodos para água	62
Figura 4-9 - Capacitâncias em função do espaçamento entre eletrodos para ar.....	62

Figura 4-10 - Capacitâncias em função do espaçamento entre eletrodos para ar (sem par adjacente).....	63
Figura 4-11 - Distância da blindagem externa a 350 mm (esq.) e 500 mm (dir.) com água.....	64
Figura 4-12 - Distância da blindagem externa a 350 mm (esq.) e 500 mm (dir.) com ar	65
Figura 4-13 – Variação da capacitância em função da distância da blindagem, em relação a referência de 300 mm, para água.....	66
Figura 4-14 - Variação da capacitância em função da distância da blindagem, em relação a referência de 300 mm, para ar	66
Figura 4-15 – Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 20 mm dos eletrodos – núcleo com água (esq.) e ar (dir.).....	67
Figura 4-16 - Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 35 mm dos eletrodos - núcleo com água (esq.) e ar (dir.).....	67
Figura 4-17 - Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 50 mm dos eletrodos - núcleo com água (esq.) e ar (dir.).....	68
Figura 4-18 - Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 70 mm dos eletrodos - núcleo com água (esq.) e ar (dir.).....	68
Figura 4-19 – Comparação das simulações 3D com a solução exata.....	71
Figura 4-20 - Distribuição do ϕ com guarda e blindagem – água (dir.) e ar (esq.)	72
Figura 4-21 - Gráfico comparativo do eletrodo de guarda com aterramento axial	73
Figura 4-22 - Intensidade do campo elétrico para a água.....	74
Figura 4-23 - Intensidade do campo elétrico para o ar	74
Figura 4-24 - Modelo final com ar (esq.) e água (dir.).....	75
Figura 4-25 – Simulação da mudança gradual de ar para água no interior do sensor.....	76
Figura 4-26 – Gráfico de simulação da dinâmica do sensor.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Valores da tubulação	37
Tabela 3-2 - Valores das variáveis da solução exata.....	40
Tabela 3-3 - Variáveis de validação da ferramenta computacional.....	46
Tabela 3-4 - Espaçamento entre eletrodos.....	47
Tabela 3-5 - Distância da blindagem externa	48
Tabela 4-1 - Valores para validação bidimensional 90° (pF/m).....	51
Tabela 4-2 - Valores para validação bidimensional 120° (pF/m).....	53
Tabela 4-3 - Valores para validação bidimensional 150° (pF/m).....	54
Tabela 4-4 - Valores para validação bidimensional 170° (pF/m).....	54
Tabela 4-5 - Valores para validação tridimensional 90° (pF/m)	57
Tabela 4-6 - Valores para validação tridimensional 120° (pF/m)	57
Tabela 4-7 - Valores para validação tridimensional 150° (pF/m)	58
Tabela 4-8 - Valores para validação tridimensional 170° (pF/m)	58
Tabela 4-9 - Valores de capacitância para água (pF/m)	61
Tabela 4-10 - Valores de capacitância para ar (pF/m).....	61
Tabela 4-11 - Simulação 3D sem guarda (pF/m)	69
Tabela 4-12 - Simulação 3D com guarda (pF/m).....	70
Tabela 4-13 - Simulação 3D com guarda e blindagem (pF/m)	70
Tabela 4-14 - Simulação 3D com aterramento axial (pF/m)	73

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

A	– amostra	
B	– densidade do fluxo magnético ou indução magnética	[T]
C	– capacitância	[F]
c	– velocidade do som	[m/s]
D	– densidade do campo elétrico	[C/m ²]
E	– intensidade do campo elétrico	[V/m]
H	– força ou intensidade do campo magnético	[A/m]
J	– densidade da corrente elétrica	[A/m ²]
L	– indutância	[H]
M	– número total de capacitâncias independentes	
N	– número de eletrodos do sensor	
Q	– carga elétrica	[C]
V	– potencial elétrico	[V]
X _C	– reatância capacitiva	[Ω]
X _L	– reatância indutiva	[Ω]
Y _C	– susceptância capacitiva	[S]
Y _L	– susceptância indutiva	[S]

.....

Letras Gregas

Γ	– localização espacial do eletrodo	
ε ₀	– permissividade absoluta do vácuo	[8,8541878176.10 ⁻¹² F/m]
ε _r	– permissividade relativa	
λ	– capacitância normalizada	
μ	– permeabilidade magnética	[N/A ² ou H/m]
μ ₀	– permeabilidade magnética do vácuo	[4π.10 ⁻⁷ N/A ²]
ρ	– densidade volumétrica da carga elétrica	[C/m ³]

\emptyset – diâmetro	[mm]
ϕ – potencial elétrico ou eletrostático	[V]
ω – velocidade angular	[rad/s]

.....

Operadores

- ∇ . – gradiente de grandeza escalar ou divergente de grandeza vetorial
- $\nabla \times$ – rotacional de um campo vetorial
- ∇^2 – laplaciano ou divergente do gradiente ($\nabla \cdot \nabla$)

.....

Subscritos

- (x,y) – bidimensional
- (i,j) – eletrodos emissor e receptor respectivamente

.....

Abreviações

- CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- DP** – Desvio Padrão
- ECT** – *Electrical Capacitance Tomography*
- FEM** – *Finite-Element Method*
- HTHP** – *High Temperature and High Pressure*
- LIF** – Limite Inferior de Fabricação
- LSF** – Limite Superior de Fabricação
- SI** – Sistema Internacional de Unidades
- TCE** – Tomografia Capacitiva Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Escopo do trabalho	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1	Escoamento multifásico.....	3
2.1.1	Padrões de escoamento ar-água horizontal.....	5
2.2	Tomografia	7
2.3	Tomografia capacitiva elétrica	8
2.3.1	Problema direto	10
2.3.2	Mapas de sensibilidade.....	13
2.3.3	Problema inverso	15
2.3.4	Sensor	16
2.3.5	Circuito de transdução.....	22
2.4	Solução exata bidimensional para o problema direto.....	25
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Fenômeno físico	27
3.1.1	A reatância e a susceptância elétricas.....	30
3.1.2	Tipo de simulação utilizada.....	32
3.2	A simulação numérica	32
3.3	O pacote computacional	33
3.4	Procedimento geral.....	35
3.4.1	Parâmetros fixos e variáveis na simulação.....	36
3.4.2	Melhorias no modelo para validação das ferramentas computacionais	38
3.4.3	Validação das ferramentas computacionais.....	45
3.4.4	Espaçamento entre eletrodos	46
3.4.5	Distância entre os eletrodos e a blindagem externa.....	47
3.4.6	Eletrodos de guarda	48
3.4.7	Aterramento axial	49

3.4.8	Simulação da geometria final do sensor	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1	Validação bidimensional da ferramenta computacional.....	51
4.2	Validação tridimensional da ferramenta computacional	56
4.3	Definição do espaçamento entre eletrodos	59
4.4	Definição da distância entre os eletrodos e a blindagem externa	64
4.5	Estudo dos eletrodos de guarda	69
4.6	Utilização dos aterramentos axiais	72
4.7	Resultados obtidos com a geometria final.....	75
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
5.1	Conclusões.....	78
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	80
	Referências.....	81
	APÊNDICE A – Programa computacional para solução 2D	85

1 INTRODUÇÃO

A tomografia capacitiva elétrica é atualmente a modalidade de tomografia de processos mais difundida e utilizada para o monitoramento de escoamentos multifásicos em processos industriais. Ela se baseia na medição dos valores de capacitância entre pares de eletrodos montados ao redor de uma tubulação e na conversão destes valores, com a utilização dos mapas de sensibilidade anteriormente gerados, em uma imagem do interior da tubulação devido as diferenças de permissividade relativa entre as fases. Neste contexto, a simulação numérica do sensor de tomografia capacitiva é de grande importância, pois ela pode determinar as características do circuito de transdução, qual a necessidade de utilização de eletrodos de guarda e qual é o melhor projeto do sensor para a detecção dos padrões de escoamento.

A simulação numérica do sensor constitui uma etapa muito importante no desenvolvimento de um sistema de tomografia capacitiva elétrica, pois com a simulação é possível se conhecer o comportamento e resposta do sensor às diversas condições de escoamento, facilitando a escolha da melhor configuração para a montagem do sensor. Com esta simulação prévia é possível definir as melhores características geométricas do sensor de acordo com os padrões de escoamento que se deseja monitorar, evitando a definição das características geométricas do sensor por tentativa e erro, o que aumentaria consideravelmente o tempo de desenvolvimento do sensor.

O objetivo deste trabalho é realizar a simulação numérica para obtenção dos valores de capacitância de um sensor de tomografia capacitiva elétrica e determinar a melhor geometria para montagem do sensor para aplicação em escoamento bifásico ar-água estratificado e/ou ondulado, onde as entradas estabelecidas para o projeto foram o número de eletrodos a serem utilizados e as características geométricas da tubulação. Assim, o trabalho tem como objetivos específicos, a definição do espaçamento entre os doze eletrodos, a obtenção da distância da blindagem externa, o estudo do efeito de borda e as soluções para sua minimização com a aplicação de eletrodos de guarda e eletrodos de aterramento de finalização axiais e a simulação da geometria final com a simulação da troca de componentes de ar para água para validação da geometria final.

1.1 Escopo do trabalho

O trabalho começa com o estudo das pesquisas realizadas na área de tomografia de processos industriais, com o levantamento de referências para embasamento deste trabalho, que são apresentadas no capítulo 2.

No capítulo 3 são apresentados o fenômeno físico, a solução numérica, o funcionamento do pacote computacional e o procedimento geral que descreve as simulações realizadas para o desenvolvimento do sensor.

Os resultados obtidos com as simulações descritas no procedimento geral do capítulo 3 são apresentados e discutidos no capítulo 4.

No capítulo 5 é feito um apanhado geral com as conclusões obtidas das simulações numéricas e algumas sugestões de trabalhos futuros e aprofundamento das simulações realizadas nesta dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Com a revisão da literatura buscamos apresentar a fundamentação deste trabalho, com a elaboração de estudo completo das atuais pesquisas realizadas envolvendo a medição de escoamentos multifásicos, com foco no método de Tomografia Capacitiva Elétrica. Para iniciar a revisão, será apresentada no item 2.1 uma introdução sobre escoamento multifásico. No item 2.2 será feita uma abordagem sobre tomografia com destaque para ECT, que será discutida com maior detalhamento no item 2.3 deste capítulo. Para finalizar, será apresentada no item 2.4 uma solução exata para servir de parâmetro comparativo com os resultados iniciais deste trabalho.

2.1 Escoamento multifásico

Os escoamentos multifásicos representam uma área de relevante importância na Mecânica dos Fluidos, assim como, em outras disciplinas. Segundo Kolev (2002), pode-se encontrar escoamentos multifásicos não somente na natureza na forma de chuvas, tornados, tufões, poluição do ar e da água, atividades vulcânicas, etc., como também em processos industriais em motores de combustão, sistemas de propulsão, fluxos dentro do corpo humano, transporte e produção de óleo e gás e nas indústrias químicas, biológicas, de processamento, metalúrgicas, petrolíferas, de alimentos, etc.

A importância e complexidade deste tipo de escoamento são citadas por Azevedo Filho (2002), por ter despertado o interesse de grandes estudiosos como Maxwell (1873), Rayleigh (1872), Einstein (1906) e Landau (1960).

Provavelmente o primeiro estudo sistemático em escoamento bifásico conhecido foi realizado durante a Segunda Guerra Mundial pelo cientista soviético Teletov, que publicou seu trabalho em 1958. Dois livros publicados na Rússia e nos EUA em 1969 por Mamaev et al. e Wallis tiveram importante contribuição na educação e geração de cientistas nesta disciplina, ambos contém valiosa informação sobre escoamento multifásico. Após a publicação destas obras,

o estudo e interesse sobre escoamentos multifásicos tiveram grande evolução e conta, atualmente, com inúmeras publicações (KOLEV, 2002).

Azevedo Filho (2002) define escoamento multifásico como todo escoamento em que duas ou mais fases de uma mesma substância ou de substâncias diferentes, ou ainda, uma única fase de duas ou mais substâncias imiscíveis, escoam em dutos ou canais com ou sem transferência de calor e massa.

Justamente por se tratar de escoamentos onde existem dois ou mais fluidos num único meio, o escoamento multifásico tem comportamento diferenciado em relação aos escoamentos monofásicos apresentados na maioria dos livros de Mecânica dos Fluidos tradicionais.

França (2008) nos enumera alguns dos motivos para a maior complexidade na análise de escoamentos multifásicos em relação aos monofásicos: 1 - Inicialmente, a presença de mais de uma fase no escoamento, exigindo um número adicional de equações para o fechamento (*closure*) dos modelos matemáticos que expressam o fenômeno físico; 2 - No escoamento multifásico, geralmente, há uma distribuição espacial das fases que não é conhecida "a priori". Ademais, a distribuição espacial das fases não deixa de ser um fenômeno de difícil quantificação. Em muitos casos, a interface gás-líquido que separa as fases tem forma complicada, além de apresentar movimento aleatório; 3 - Há mudanças de padrões de escoamento (a distribuição espacial das fases determina padrões de escoamento) que dependem de características físicas e operacionais do sistema. Estes padrões (algumas vezes também denominados de "regimes do escoamento bifásico"), por sua vez, alteram e/ou determinam os fenômenos de transferência interfacial, isto é, os processos de transferência de massa, de quantidade de movimento e energia entre as fases; 4 - Na medida em que há grande influência do escoamento de cada uma das fases no escoamento da outra, experimentos mostram que as variáveis locais (referentes a uma posição espacial) de cada fase, como velocidade, pressão, etc, podem flutuar no tempo com amplitude considerável. Conseqüentemente, definir ou calcular ou mesmo medir o valor médio de uma variável em escoamento bifásico requer procedimentos mais complexos que aqueles aplicados às variáveis de escoamentos monofásicos.

Por se tratarem de escoamentos com grande complexidade e diversidade, vamos focar nossos estudos no escoamento água-ar, suas definições e seus padrões de escoamento, já que este é o tipo de escoamento definido para a realização das simulações.

2.1.1 Padrões de escoamento ar-água horizontal

Os padrões de escoamento ar-água estão distribuídos e classificados de acordo com o agrupamento geométrico de suas fases. Os padrões típicos de escoamento horizontal são apresentados na Figura 2-1.

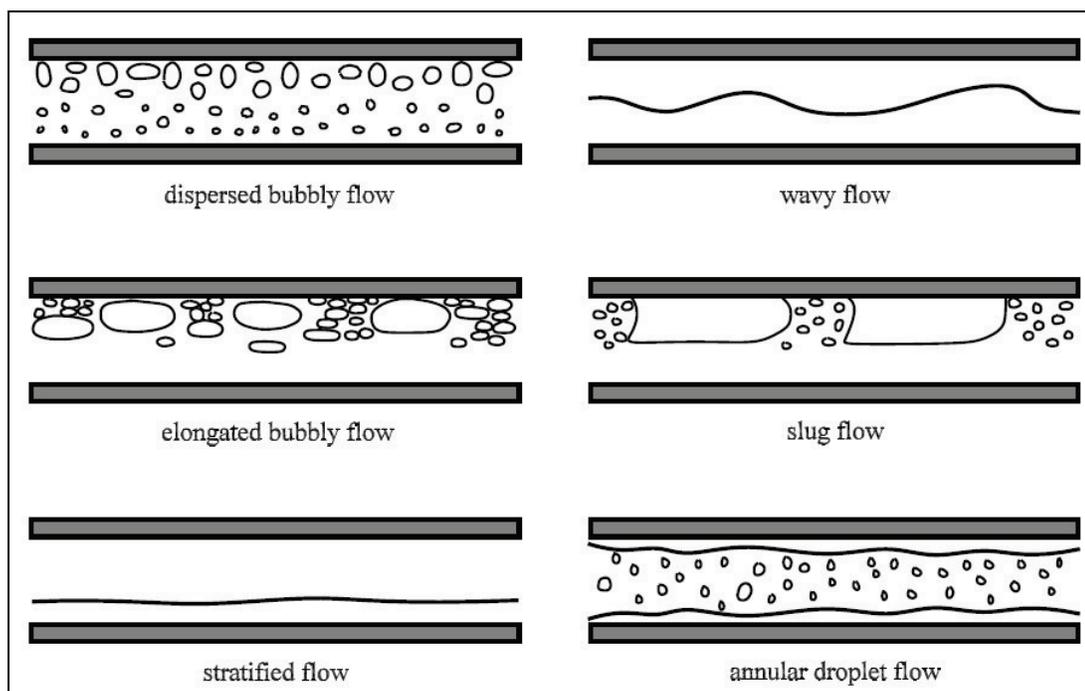


Figura 2-1 Padrões de escoamento horizontal ar-água (OERTEL, 2004)

O padrão em bolhas dispersas (*disperse bubbly flow*) é caracterizado pela presença de bolhas de ar dispersas na fase líquida da água. O tamanho e quantidade destas bolhas podem variar desde que esta variação no tamanho não as caracterizem como bolhas alongadas.

No padrão em bolhas alongadas (*elongated bubbly flow*), as bolhas, antes dispersas, começam a permanecer mais na parte superior do duto, com um aumento no tamanho das bolhas, já se aproximando de um padrão pistonado.

O padrão pistonado (*slug flow*) ocorre quando se tem um aumento da porcentagem de ar em relação à água e as bolhas alongadas, anteriormente vistas, começam a formar pistões dentro da fase líquida.

O padrão estratificado (*stratified flow*) é caracterizado pela total estratificação, formando uma interface quase que retilínea entre as duas fases.

O padrão ondulado (*wavy flow*) é caracterizado pela quase que total estratificação do escoamento em fases distintas ar-água, que, devido às diferentes velocidades dos dois fluidos e a variação da tensão interfacial na extensão do escoamento, acaba gerando ondulações.

O padrão anular, não apresentado na Figura 2-1, seria uma derivação do escoamento estratificado, onde uma fase ficaria em contato com a parede do duto em toda a circunferência e a outra fase escoaria no meio do duto. Uma aplicação bem interessante deste tipo de escoamento é o *coreflow*, onde é aplicada água em contato com a parede do duto e o óleo escoar no centro, com a intenção de se reduzir o trabalho para extração e transporte de óleo pesado (GALVIS, 2009).

O padrão anular com gotículas (*annular droplet flow*) é outra configuração de fluxo anular onde a água escoar junto da parede do duto e o ar escoar na região central do duto com gotas de água em seu interior. Este tipo de escoamento seria uma mistura dos tipos anular e com bolhas dispersas.

Oertel (2004) apresenta estudo realizado para definição de padrões de escoamento feito por Mandhane et al. em 1974 com escoamento horizontal ar-água em tubulação com 2,5 cm de diâmetro a 0,1 Mpa de pressão. A Figura 2-2 nos mostra os resultados encontrados.

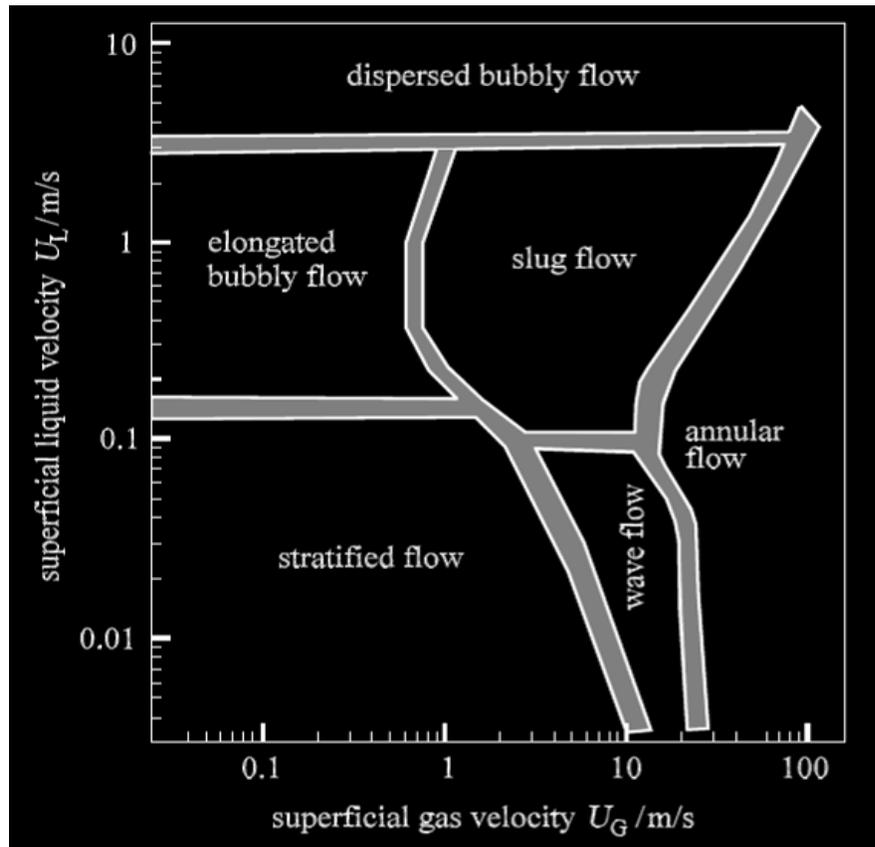


Figura 2-2 Mapa de padrões feito por Mandhane et al. 1974 (OERTEL, 2004).

2.2 Tomografia

A palavra tomografia é derivada do termo *tomos*, partes e *grafên*, registro, ou seja, é o registro de partes para se formar uma imagem. A palavra tomografia é bem difundida no meio médico através de sua utilização desde 1972, com a tomografia axial computadorizada que é a utilização de raios X para a geração de imagens de uma secção do corpo humano.

Atualmente a tomografia está presente não somente no meio médico, mas também para a análise de processos industriais, dentre os principais tipos de tomografia pode-se citar (AZEVEDO FILHO, 2002):

- a) Tomografia através do uso de radiação eletromagnética;
 - a. Tomografia ótica;
 - b. Tomografia por raios-X;
 - c. Tomografia por raios- γ ;
 - d. Tomografia por emissão de raios pósitron;
- b) Tomografia através de ressonância eletromagnética;
- c) Tomografia através do princípio acústico;
- d) Tomografia através de propriedades elétricas e magnéticas;
 - a. Tomografia por indução eletromagnética;
 - b. Tomografia por resistência elétrica;
 - c. Tomografia por impedância elétrica;
 - d. Tomografia por capacitância elétrica.

Dentre todos os tipos de tomografia citados, vamos apresentar mais detalhadamente a tomografia capacitiva elétrica (TCE) ou do inglês *Electrical Capacitance Tomography (ECT)*, que atualmente é o tipo de tomografia para processos mais utilizada (YANG, 2010).

2.3 Tomografia capacitiva elétrica

Tomografia Capacitiva Elétrica é uma técnica bastante comum nos dias de hoje, onde se analisa a distribuição de permissividade de uma ou mais fases de um ou mais fluidos, isto é, escoamentos com mais de uma fase, através da medição das capacitâncias de um sistema com eletrodos montados ao redor de um tubo não condutor. Geralmente, um sistema de tomografia capacitiva elétrica é constituído por sensor, sistema de aquisição de dados e sistema de imagem ou computador como mostrado na Figura 2-3.

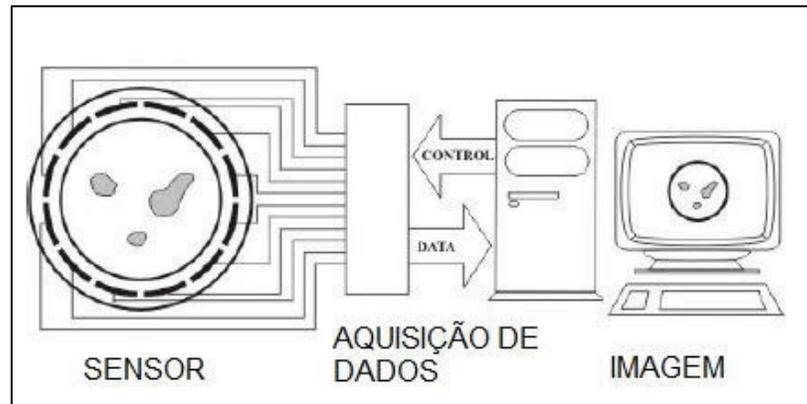


Figura 2-3 Sistema ECT

O princípio de funcionamento de um ECT consiste em quatro passos (ZANGL, FUCHS e BRETTNERKLIEBER, 2009):

O primeiro passo é a excitação da região sensorial, onde ocorre o escoamento do processo que se deseja obter a imagem, com um campo energizado. De acordo com um padrão de chaveamento predefinido, um sinal de alta frequência (vários MHz) é aplicado aos eletrodos selecionados, resultando no desenvolvimento de um campo elétrico dentro do tubo.

O segundo passo é a distorção do campo devido ao material dentro do volume sensível. Uma vez que o campo sensor é deformado quando passa pelo material no interior do tubo, a tomografia capacitiva elétrica é considerada “*Soft Field Sensor*”.

O terceiro passo é a medição dos efeitos da distorção do campo nos eletrodos. Mudanças na capacitância entre eletrodos, causadas pela distribuição de permissividade dentro do tubo afetam tanto o potencial elétrico para um circuito medidor de potencial elétrico como a corrente dielétrica para um circuito medidor da corrente dielétrica, assim o valor de capacitância para os eletrodos são medidos.

O quarto passo é a reconstrução da imagem através da resolução do problema inverso. O problema inverso pode ser resolvido através de algoritmos iterativos ou não-iterativos.

Flores et al. (2005) definiram a ECT como uma técnica que consiste em colocar uma malha de eletrodos ao redor de um tubo ou vaso feito de material isolante, contendo o processo que vai ser visualizado e, através do uso de uma ferramenta adequada, medir todos os pares de

capacitores possíveis. As medições obtidas dependem do valor da constante dielétrica (permissividade elétrica) das diferentes fases ou componentes da mistura e do jeito que elas estão distribuídas dentro do tubo ou vaso. O próximo passo é obter uma imagem da distribuição de permissividades através das medidas de capacitância, por meio de um algoritmo adequado de reconstrução de imagem.

Outros autores como Pei e Wang (2009), Wegleiter et al. (2008), Yang (2001) e Lei et al. (2008) também descrevem o conceito de tomografia capacitiva elétrica que, em outras palavras, pode ser resumido na resolução do problema direto e do problema inverso, descritos detalhadamente mais adiante.

As vantagens da ECT, em relação às outras formas de tomografia de processos conhecidas, são (YANG, 2010):

1. Não usa radiação como nos casos de raios x e gama;
2. Alta velocidade na geração da imagem (normalmente 100 imagens por segundo);
3. Não intrusiva;
4. Não invasiva;
5. Robusta;
6. Suporta trabalho com altas temperaturas e pressões (HTHP);
7. Baixo custo.

2.3.1 Problema direto

O problema direto consiste na obtenção dos M valores de capacitância com a medição através de um sensor de tomografia capacitiva elétrica ou na obtenção destes valores através de simulação numérica, que obtém os valores de capacitâncias independentes (M na equação (2.1)), através da resolução da equação diferencial parcial elíptica de segunda ordem (equação de Laplace) para campo eletrostático bidimensional (Lei de Gauss), conforme demonstram as equações (2.2) e (2.3) que foram usadas e bem discutidas por Azevedo Filho (2002) e Galvis (2009), porém é válido lembrar que as mesmas são válidas para fluidos não condutores.

$$M = N * \left(\frac{N-1}{2} \right) \quad (2.1)$$

Onde N é o número total de eletrodos do sensor.

$$\begin{aligned} \nabla[\varepsilon(x, y)\nabla\phi(x, y)] &= 0 \\ \varepsilon(x, y)\nabla^2\phi(x, y) + \nabla\varepsilon(x, y)\nabla\phi(x, y) &= 0 \end{aligned}$$

Condições de contorno: (2.2)

$$\phi \begin{cases} V_0 & (x, y) \subseteq \Gamma_i \\ 0 & (x, y) \subseteq \Gamma_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, 12, \quad j \neq i$$

Onde ε é a permissividade absoluta do meio ($\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$); ε_0 é a permissividade absoluta do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$) que é obtida a partir de ($\varepsilon_0 = 1 / c^2 \cdot \mu_0$); c é a velocidade da luz no vácuo; μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu = B / H$); B é a densidade do fluxo magnético ou indução magnética; H é a força do campo magnético; $\varepsilon_r(x, y)$ é a distribuição da permissividade relativa bidimensional; $\phi(x, y)$ é o potencial elétrico ou eletrostático bidimensional; Γ é a localização espacial dos eletrodos emissor (i) e receptor (j).

$$C_{i,j} = \frac{\varepsilon_0}{(\phi_i - \phi_j)} \oint_{(x,y) \in \Gamma_j} \varepsilon_r(x, y) \nabla \phi_i(x, y) d\Gamma_j \quad \therefore \nabla \phi_i(x, y) = \frac{\partial \phi_i}{\partial x} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \quad (2.3)$$

Onde $C_{i,j}$ é a capacitância para o par de eletrodos.

Para se obter analiticamente o valor de capacitância através da equação (2.3), é preciso primeiramente resolver a equação (2.2) para se ter os valores da distribuição do campo elétrico, mas, para resolvê-la, é necessário conhecer a distribuição de permissividade relativa das fases, sendo que este é o principal objetivo da tomografia capacitiva elétrica. Assim, é impossível se obter uma equação que relacione explicitamente a capacitância com a fração e posição dos componentes no interior do sensor devido à distribuição irregular de permissividades. Assim como, apresentado por Xie et al. (1990), são cinco os métodos para resolver o problema:

O primeiro método é o analítico, que não pode ser usado devido às dificuldades já abordadas anteriormente.

O segundo é o método dos elementos de contorno, do inglês (BEM – *Boundary-element method*).

O terceiro é o método das diferenças finitas, do inglês (FDM – *Finite-difference method*).

O quarto é o método de Monte Carlo.

O quinto é o método dos elementos finitos, do inglês (FEM – *Finite-element method*), que é o método mais utilizado e difundido na resolução do problema direto para tomografia capacitiva elétrica, isso devido ao fato de poder trabalhar com uma discretização da malha em geometrias complexas e a facilidade computacional conhecendo-se as condições de contorno. Para a resolução do problema direto através do FEM, geralmente é utilizado um pacote computacional específico como o COMSOL ou o Maxwell da *Ansoft Incorporated* (YANG, 2010).

Atualmente, muitos outros métodos têm sido testados para a solução do problema direto como o método de Galerkin livre de elementos, do inglês (EFGM – *Element-free Galerkin method*), que foi comparado com o método dos elementos finitos e obteve bons resultados com um erro relativo ao FEM abaixo de 3%, com a vantagem de ser um método onde não é necessário o trabalho computacional preparando dados com divisões da área de interesse, evitando-se gargalos computacionais (ZHANG et al, 2010).

2.3.2 Mapas de sensibilidade

Os mapas de sensibilidade, são feitos a partir da discretização da área da secção transversal da região interna do sensor de um sistema de tomografia capacitiva elétrica, que é dividido em pequenos elementos com uma forma geométrica definida a priori.

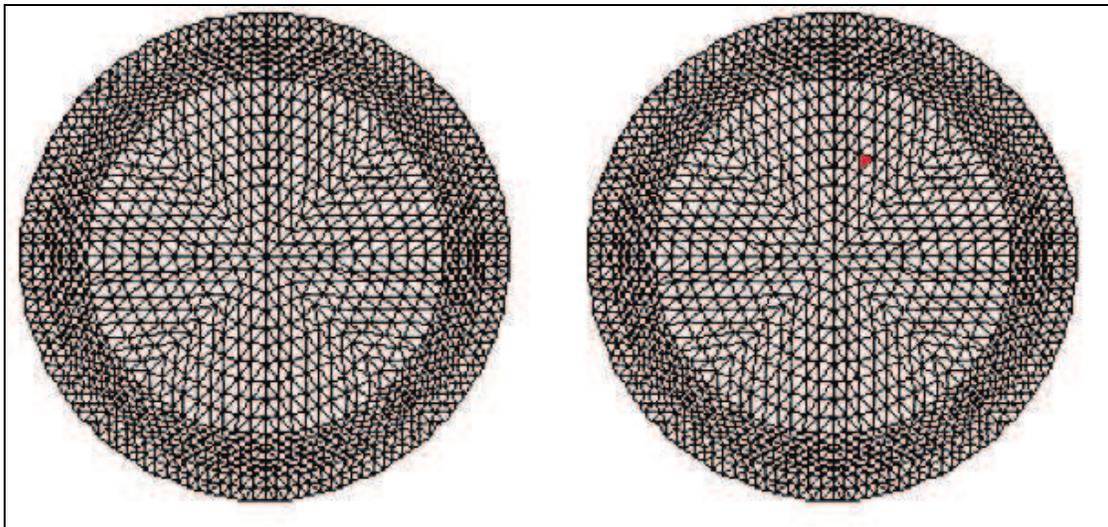


Figura 2-4 Malha para o método dos elementos finitos aplicado a ECT

Com a divisão da área do sensor em elementos (Figura 2-4) e conhecendo as permissividades relativas dos materiais envolvidos no problema, pode-se calcular os mapas de sensibilidade da seguinte forma, (CHEN et all, 2002):

1. Admite-se que todos os elementos da região interna ao tubo possuem a permissividade relativa do componente de menor permissividade;
2. Escolhe-se um único elemento e varia-se a permissividade relativa deste para o componente de maior permissividade. (Figura 2-4, lado esquerdo);
3. Calculam-se os M valores de capacitância para esta condição;

4. Retorna-se a permissividade relativa deste elemento para o valor de menor permissividade (retornando ao passo 1) e escolhe-se outro elemento para ter sua permissividade aumentada e executa-se novamente o cálculo das M capacitâncias, conforme passo três;
5. Executa-se este laço de um a três sempre utilizando um novo elemento, até que todos os elementos tenham seu valor alterado uma vez para o valor de maior permissividade.

Para a finalização dos mapas de sensibilidade, se faz necessário o cálculo das sensibilidades normalizadas (equação (2.5)), pois os mapas de sensibilidade são plotados de forma tridimensional com as dimensões x e y da secção transversal do tubo e as sensibilidades normalizadas representando o eixo de coordenadas z (PENG, 2005).

$$\lambda = \frac{C - C_{emp}}{C_{full} - C_{emp}} \quad (2.4)$$

Onde λ é a capacitância normalizada que vai ser calculada para os M pares de eletrodos; C é o vetor de capacitâncias, obtido com os passos mencionados anteriormente, C_{emp} são os valores de capacitância para o sensor cheio de ar e C_{full} para o sensor cheio de água.

$$S = \mu * \lambda \quad (2.5)$$

Onde S é a sensibilidade normalizada para cada elemento e μ é um fator de ponderação que é calculado com a divisão da área do elemento pela área média dos elementos. Caso todos os elementos tenham o mesmo tamanho as sensibilidades serão iguais as capacitâncias normalizadas.

No caso da discretização dos elementos finitos de forma simétrica o número necessário de mapas de sensibilidades calculados é $M/2+1$, pois a outra metade é exatamente igual e pode ser obtida por rotação.

2.3.3 Problema inverso

Para obtenção da imagem se faz necessário resolver o problema inverso, que tem sido objeto de estudos de muitos pesquisadores, onde é aplicado um algoritmo que, através da medição dos valores das capacitâncias para os M valores possíveis e a criação dos mapas de sensibilidade, gera a imagem do escoamento no interior do duto.

Isaksen (1996) demonstrou a relação entre três tipos de técnicas para a reconstrução de imagens. A primeira delas é a retro-projeção linear, do inglês (LBP – *Linear Back Projection*), que consiste na obtenção da imagem através da linearização do sistema sensor com o auxílio da construção prévia do mapa de sensibilidades. Neste método, a imagem é obtida pela retro-projeção das capacitâncias medidas usando o mapa de sensibilidades. Como características deste método, pode ser citada, a rapidez, a baixa resolução da imagem e a introdução de dados inexistentes na imagem, porém este é o método mais utilizado e difundido até hoje. O algoritmo utilizado recebe o mesmo nome da técnica, ou seja, LBP.

A segunda técnica é a retro-projeção linear iterativa, do inglês (ILBP – *Iterative Linear Back Projection*), utiliza-se do mesmo princípio da LBP, mas o erro médio quadrado entre os valores de capacitância e a solução direta da imagem final é minimizado pela iteração que ocorre no mapa de sensibilidades. Como características deste método em relação ao anterior, têm-se que o mesmo é mais lento e apresenta uma melhor imagem. Um exemplo de algoritmo utilizado nesta técnica é o Landweber ILBP.

A terceira técnica é a otimização, do inglês (*Optimization*), onde um conjunto de funções objetivas são otimizadas de forma iterativa fornecendo uma melhor resolução na imagem. Como características este método têm uma melhor imagem e é mais lento se comparado ao ILBP. Para

aplicação desta técnica, são conhecidos inúmeros algoritmos e um deles é conhecido como redes neurais artificiais.

Outros algoritmos também foram desenvolvidos para a resolução do problema inverso. Dentre os vários existentes, podemos citar alguns trabalhos como Cao, Xu e Wang (2009), que utilizam o método de Calderon, onde a idéia principal é considerar que a distribuição de permissividade possui um valor constante, calculando-se o valor da distribuição do potencial elétrico de forma analítica e aplicando-se a transformada bidimensional de Fourier para reconstruir as perturbações da distribuição de permissividades. O método de Calderon apresenta bons resultados e pode ser um algoritmo direto se comparado com outros que se utilizam dos mapas de sensibilidades, porém este método se mostrou ineficiente para grandes contrastes de dielétrico, por exemplo, entre a água e o ar.

Zhao, Takei e Basario (2009) apresentam um novo algoritmo para reconstrução de imagens que é denominado de Matriz Inversa Ponderada Funcional, do inglês (*FWIM - Functional Weighted Inverse Matrix*) e o comparam com os algoritmos de Landweber (LW - ILBP), *Iterative Tikhonov Regularization* (ITR) e *Generalized Vector Sampled Pattern Machine* (GVSPM) e obtiveram bons resultados, sendo comparado aos outros algoritmos em termos da capacitância residual, erro na imagem e correlação na imagem.

Lei et al. (2009) fazem uma extensão do algoritmo de regularização de Tikhonov (ITR) através do método de estimação da combinação e um item de estabilização prorrogado de acordo com as características do ECT. Como resultado, se comparado com o LW – ILBP, eles obtiveram uma boa resolução com um erro de imagem menor em até cinco vezes, mas com até doze vezes o tempo do algoritmo proposto por Landweber. Outra função de destaque deste algoritmo é a robustez contra ruídos.

2.3.4 Sensor

De acordo com Flores et al. (2005), num sensor para ECT, as substâncias atuam como o material dielétrico de um capacitor e suas placas seriam os eletrodos, que geralmente são placas

metálicas coladas num tubo isolante cobrindo a região onde se deseja obter a imagem. O número e o tamanho dos eletrodos dependem das aplicações, pois com um maior número de eletrodos é possível uma melhor resolução, mas, em contrapartida, a sensibilidade das medidas será menor devido ao tamanho reduzido dos eletrodos.

A grande maioria dos sensores para ECT são circulares com eletrodos de medição em planos simples ou duplos, sendo que os planos duplos são feitos de duas malhas próximas para se medir a velocidade do escoamento.

Para gerar uma imagem, são feitas diversas medidas de capacitância independentes. Vamos imaginar um sensor composto por 12 eletrodos, à medida que o eletrodo 1 é excitado, os eletrodos do 2 ao 12 são usados para detecção, obtendo 11 medidas de capacitância. No próximo passo o eletrodo 2 é excitado e os eletrodos do 3 ao 12 servem como detecção até que se excite o eletrodo 11 e use o eletrodo 12 como detecção. De acordo com a equação (2.1), obtém-se 66 valores de capacitância independentes.

Segundo Yang (2010), o sensor para ECT, esquematizado na Figura 2-5, é constituído de quatro partes principais:

1. Eletrodos;
2. Carcaça isolante;
3. Malhas de aterramento externo (gaiola de Faraday), radial e axial de finalização (Figura 2-6);
4. Cabos e conectores coaxiais.

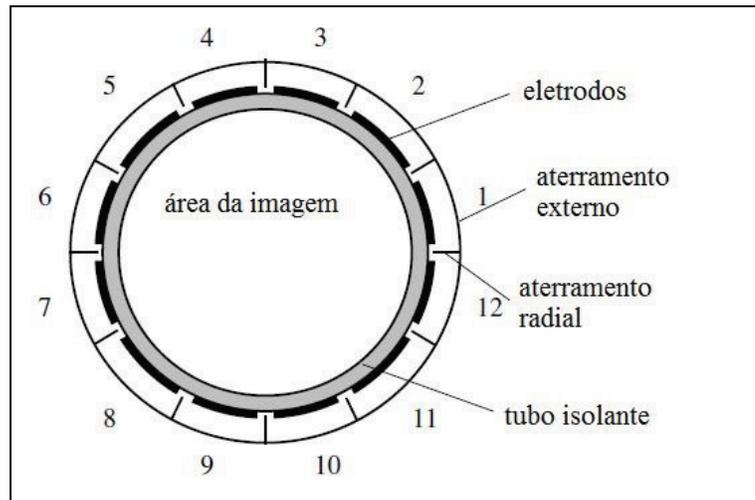


Figura 2-5 Seção transversal de um sensor ECT

Num sensor para ECT, a capacitância entre eletrodos é normalmente muito pequena. Por exemplo, para um sistema com 12 eletrodos de 10 cm de comprimento, a capacitância de um par adjacente e um par oposto é da ordem de 0,5 pF e 0,01 pF, respectivamente. As mudanças na capacitância que são usadas para a reconstrução de imagens são ainda menores entre 0,1 pF e 0,1 fF. Na maioria dos casos, não é necessário calcular a capacitância absoluta porque (YANG, 2010):

1. É possível se obter a distribuição de sensibilidades através do produto escalar dos campos elétricos, obtendo-se uma boa aproximação;
2. Para a reconstrução de imagens, a capacitância absoluta não se faz necessária, uma vez que todos os algoritmos de reconstrução de imagens trabalham com capacitâncias normalizadas.

Peng et al. (2005) compararam o impacto entre o modelo 2D e o modelo 3D sobre a distribuição de permissividade usando o método dos elementos finitos. Eles notaram que os dois modelos apresentam uma distribuição de permissividade bem parecida e salientaram que, do ponto de vista físico, o modelo 2D é uma simplificação do modelo 3D quando o comprimento dos eletrodos tende ao infinito, eliminando-se os efeitos de borda.

Flores et al. (2005) também abordaram o fato da simplificação dos campos de 2D para 3D, devido à utilização dos eletrodos de aterramento de finalização axiais, demonstrados na Figura 2-6, que têm a função de atenuar a deformação do campo elétrico nos extremos dos eletrodos, conforme mostrado na Figura 2-7.

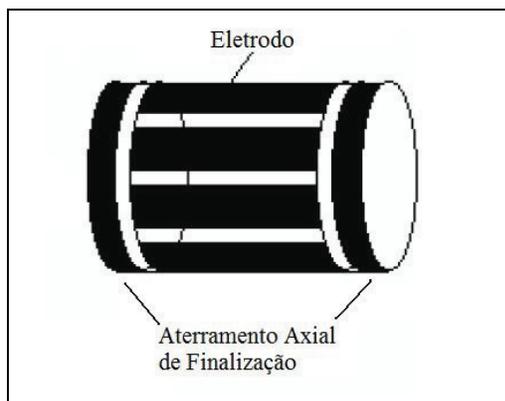


Figura 2-6 Sensor com aterramento axial

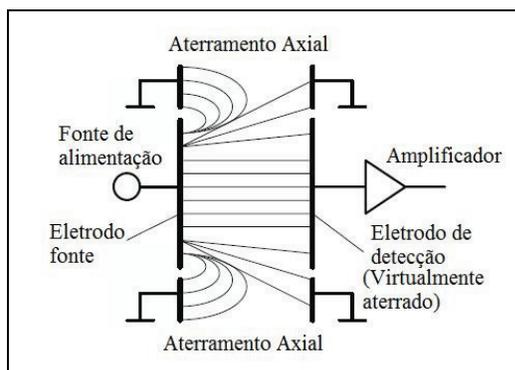


Figura 2-7 Efeito do aterramento axial

Yang (2010) também enumerou os pontos-chaves para o projeto de sensores para aplicação em tomografia elétrica capacitiva.

1. Número de Eletrodos

Quando um sensor para ECT é projetado, o número de eletrodos precisa ser determinado primeiro, com a redução do número de eletrodos são esperados os seguintes benefícios:

- a) Ter um hardware simplificado com menor número de canais;
- b) Menor número de autovalores na matriz de sensibilidade, diminuindo a dificuldade em resolver o problema inverso na reconstrução da imagem;
- c) Uma rápida aquisição dos dados, devido à redução no número de capacitâncias independentes;
- d) O comprimento dos eletrodos pode ser reduzido devido ao aumento no ângulo de cobertura de cada eletrodo.

Por outro lado, reduzindo-se o número de eletrodos a qualidade da imagem também será diminuída.

2. Comprimento 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, chega-se a conclusão 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 de 10 cm de comprimento. Em consequência, quanto mais diminuirmos 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 esta característica, Peng et al. (2005) 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.

3. Eletrodos Internos ou Externos

O mais comum é a montagem dos eletrodos fora do tubo de isolamento. Neste caso, o sensor é não intrusivo e não invasivo. Todavia, a parede do tubo tem um aspecto negativo na medição da capacitância, porque está em série com a capacitância interna. Se a espessura da parede do tubo é grossa demais comparada com a capacitância do meio, será difícil de dissociar a medida da capacitância interna da capacitância total medida. Deste ponto de vista, quanto menor a espessura da parede melhor o desempenho do sensor. Na prática, a espessura da parede é determinada pela pressão de trabalho interna.

Os eletrodos podem ser montados na superfície interna do tubo isolante, neste caso, a parede do tubo não mais afetaria a medição, mas outros problemas ocorreriam como erosão, contaminação do meio, o sensor seria invasivo e teria um alto custo na construção.

4. Malhas de aterramento

As malhas de aterramento podem ser:

- a) Externa: é de crucial importância para se evitar interferências de ruídos externos;
- b) De 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.
- c) Radial: o aterramento radial 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.

5. Eletrodos de Guarda

Alguns pesquisadores têm sugerido o uso dos eletrodos de guarda, com a finalidade de reduzir os efeitos de borda.

Os eletrodos de guarda 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.

Esta idéia pode ter surgido do analisador de impedância da HP (HP 4192A) que utiliza dois grandes discos com um pequeno espaço entre eles, simulando um capacitor de placas paralelas ideal, mas esta idéia é válida somente se o espaço entre os pratos é preenchido com um único material, caso contrário, o uso do eletrodo de guarda agravaria o efeito de borda e a capacitância medida não seria significativa (YANG, 2010).

Peng et al. (2005), 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 tenha apresentado resultados para valores mais baixos, o autor salienta que este seria um limite mínimo para o comprimento dos eletrodos de guarda.

6. 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 o comprimento do eletrodo que tem influência direta na medida da capacitância, que tem um limite de acordo com o sistema de medida, limitando, assim, o diâmetro do sensor em relação ao comprimento do eletrodo.

2.3.5 Circuito de transdução

O circuito de transdução têm a finalidade de efetuar o chaveamento entre os eletrodos, que hora são emissores e hora são receptores, efetuar as medidas de capacitância, amplificar os sinais e filtrar os ruídos.

De acordo com Wegleiter et al. (2008), o sensor é feito para trabalhar com um vasto campo de aplicações, para uma ampla gama de materiais e deve ser confiável. Assim, os requisitos fundamentais dos circuitos eletrônicos utilizados em ECT são:

1. Possibilidade de utilizar cada eletrodo como emissão e/ou recepção.
2. Banda larga dinâmica do circuito de amplificação para cobrir uma larga banda de amplitudes de eletrodos vizinhos ou opostos e valores de alta e baixa permissividade.

3. Exatidão na medição de capacitância de pequenos valores entre eletrodos, desde 1 pF a 5 fF.
4. Alta resolução na medição, uma vez que a variação de permissividade dentro do tubo pode ser muito pequena.
5. Aterramento para todos os circuitos do sensor, com a finalidade de obter um bom funcionamento dos circuitos eletrônicos e eliminar o efeito das interferências eletromagnéticas.
6. Robustez contra fontes de ruídos externos.
7. Uma função de transferência monótona do circuito receptor para uma banda de, pelo menos, 70 dB.
8. Não ser sensível aos diferentes tipos de contaminação.
9. Medição paralela dos sinais, a fim de obter rapidamente a distribuição de permissividade.
10. Possibilidade de calibração dos circuitos de emissão e recepção.

Dois circuitos criados para atender os requisitos mencionados acima são apresentados na Figura 2-8.

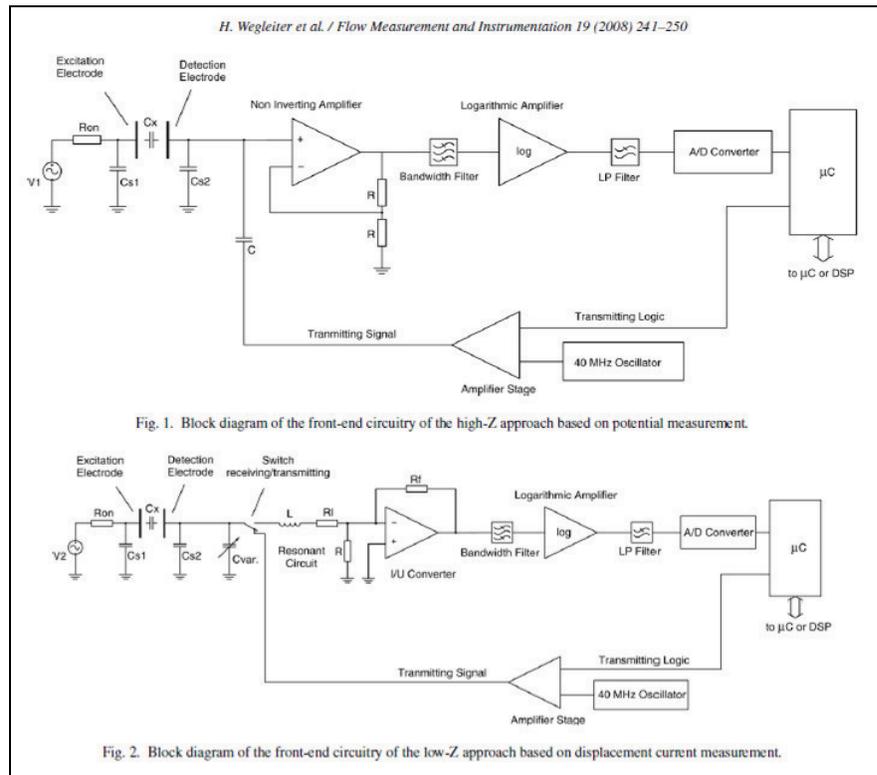


Figura 2-8 Circuitos elétricos para medição da capacitância (WEGLEITER, 2008)

Ambos os circuitos foram concebidos para amplificar altas frequências, com um filtro passa banda, um demodulador logarítmico e um conversor analógico-digital controlado por um microcontrolador ou microprocessador. O circuito apresentado na parte superior da Figura 2-8 é baseado na medida do potencial elétrico e foi desenvolvido para a medida de altas impedâncias. O circuito apresentado na parte inferior da Figura 2-8 é baseado na medida da corrente de deslocamento e foi desenvolvido para a medida de baixas impedâncias.

Considerando algumas características como o ruído, a resolução e a robustez contra capacitâncias parasitas, o circuito baseado na medição da corrente de deslocamento apresentou um melhor desempenho.

2.4 Solução exata bidimensional para o problema direto

Geraests e Borst (1988) utilizaram as equações de Maxwell para solucionar o problema direto num sistema de ECT, conforme modelo apresentado na Figura 2-9, e chegaram a uma solução exata para escoamento anular concêntrico que é apresentada na equação (2.6).

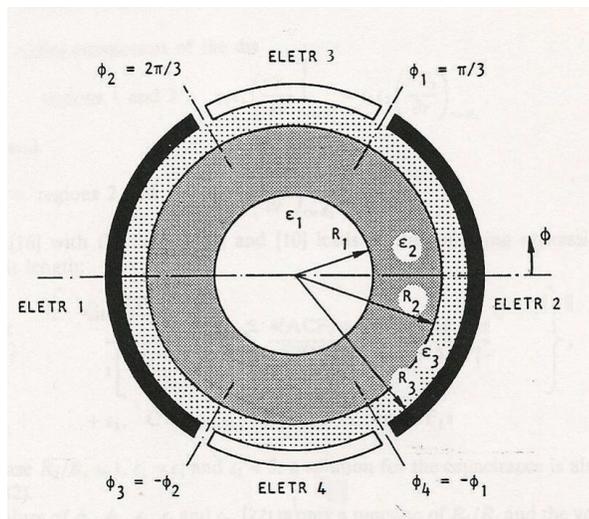


Figura 2-9 - Seção transversal do ECT (GERAESTS e BORST, 1988)

Na Figura 2-9 as partes feitas em cobre numeradas como ELETR de 1 a 4 são respectivamente eletrodo emissor, eletrodo receptor e malha de aterramento axial.

$$C = \frac{2\epsilon_0\epsilon_3}{\pi} \left(\ln \left(\frac{\text{Sen} \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}}{\text{Sen} \frac{\phi_2 - \phi_1}{2}} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(ACF_1^n + BD)\text{Sen}(n\phi_1)\text{Sen}(n\phi_2)}{n(CDF_2^n + ABF_3^n + ACF_1^n + BD)} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

$$A = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$B = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$C = \varepsilon_3 - \varepsilon_2$$

$$D = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

$$F_1 = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

$$F_2 = \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^2$$

$$F_3 = \left(\frac{R_3}{R_1} \right)^2$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o problema físico, o procedimento de simulação numérica e o pacote computacional que foi utilizado para a resolução do problema físico. Para finalizar o capítulo, é descrito o procedimento geral que define como foram feitas as simulações para validação das ferramentas computacionais, com base na solução exata no item 2.4. No procedimento geral também descrevemos quais são os parâmetros fixos definidos no início do projeto como o diâmetro da tubulação, o número total de eletrodos e descrevemos como foram definidos e feitos os testes que terão seus resultados apresentados no capítulo 4.

3.1 Fenômeno físico

Como vimos na revisão bibliográfica, a resolução do problema direto do sistema de tomografia capacitiva elétrica se fundamenta, principalmente, na medida da capacitância que varia de acordo com a distribuição de permissividade do meio presente entre dois eletrodos confeccionados de material condutor, carregados com cargas de polaridades diferentes criando uma diferença de potencial. Para se modelar este comportamento é utilizada a teoria eletrostática apresentada em Thidé (2006), que descreve, fisicamente, um fenômeno relacionado com a interação entre cargas elétricas estacionárias ou a distribuição de cargas num espaço finito que tem condições de contorno estacionárias.

Para podermos descrever este fenômeno utilizaremos como base os estudos efetuados por Maxwell (1865 e 1873), onde são descritos os comportamentos do campo elétrico e do campo magnético, bem como suas interações, através de quatro equações diferenciais parciais.

A primeira das equações é a Lei de Gauss para a densidade do fluxo magnético, que estabelece que o fluxo magnético através de uma superfície fechada é zero:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.1)$$

Onde B é a densidade superficial do fluxo magnético (SI: tesla (T)).

A segunda das equações é a Lei de Gauss para o campo elétrico, que fornece a relação entre o fluxo elétrico que passa por uma superfície fechada e a quantidade de carga elétrica que existe dentro do volume limitado por esta superfície:

$$\nabla \cdot D - \rho = 0 \quad (3.2)$$

Onde D é a densidade superficial de campo elétrico (SI: Coulomb por metro quadrado (C/m^2)); ρ é a densidade volumétrica de carga elétrica, não incluindo dipolos de cargas ligadas no material (SI: Coulomb por metro cúbico (C/m^3)).

A terceira equação é a Lei de Ampère-Maxwell que relaciona a intensidade do campo magnético sobre um condutor com a corrente elétrica que passa pelo mesmo:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.3)$$

Onde H é a intensidade do campo magnético (SI: Ampère por metro (A/m)); J é a densidade superficial de corrente elétrica (SI: Ampère por metro quadrado (A/m^2)).

A quarta e última equação é a Lei de Faraday que afirma que a corrente elétrica induzida em um circuito fechado por um campo magnético, é proporcional ao número de linhas de fluxo que atravessam a área envolvida do circuito na unidade de tempo:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.4)$$

Onde E é a intensidade do campo elétrico (SI: Volt por metro (V/m)).

Basicamente, o problema eletrostático ocorre com uma diferença de potencial entre dois ou mais condutores estáticos, e relaciona duas grandezas físicas entre estes condutores, suas quantidades de cargas e a diferença de potencial entre eles. Segundo a Lei de Coulomb, estas duas grandezas são proporcionais e, num sistema com duas cargas com polaridades diferentes, seria representada da seguinte forma:

$$Q \propto \Delta V \quad (3.5)$$

Onde Q é o valor da carga elétrica (SI: Coulombs (C)); ΔV é a diferença de potencial entre as cargas (SI: Volts (V)).

A constante de proporcionalidade pode ser trocada por outra grandeza, deixando a fórmula já equacionada da seguinte maneira:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (3.6)$$

Onde C é o valor da capacitância (SI: Faraday(F)).

O novo termo presente na equação (3.6) é conhecido como capacitância, que é a relação da quantidade de carga armazenada e o valor da diferença de potencial entre dois objetos condutores.

O valor da capacitância varia tanto com a forma dos condutores, quanto com o material e espaçamento entre condutores. O material do meio presente entre as placas do capacitor é chamado de dielétrico, onde nos interessa sua permissividade relativa, que é a habilidade que este material tem de se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado, anulando o campo elétrico dentro do material.

Para resolver o problema direto na tomografia capacitiva elétrica, a equação (2.3) descreve o cálculo da capacitância e a equação (2.2) descreve o campo eletrostático, mas, como mencionado anteriormente, esta equação não tem uma solução analítica geral, sendo necessária a utilização de métodos numéricos para sua solução. Neste trabalho, será utilizado o software MAXWELL da Ansoft para simulação do comportamento do problema eletrostático 2D e também 3D.

3.1.1 A reatância e a susceptância elétricas

A reatância é a resistência oferecida à passagem de corrente alternada por um indutor ou capacitor num circuito elétrico, ela constitui, juntamente com a resistência elétrica, a impedância.

A reatância gerada por um indutor é conhecida como reatância indutiva e a forma de obtê-la é apresentada na equação (3.7).

$$X_L = \omega \times L \tag{3.7}$$

Onde X_L é a reatância indutiva (SI: Ohms (Ω)); ω é a velocidade angular (SI: radianos por segundo (rad/s)); L é a indutância (SI: Henry (H)).

A reatância gerada por um capacitor é conhecida como reatância capacitiva e a forma de obtê-la é apresentada na equação (3.8).

$$X_c = \frac{1}{\omega \times C} \quad (3.8)$$

Onde X_c é a reatância capacitiva (SI: Ohms (Ω)); C é a capacitância (SI: Farad (F)).

A susceptância, em circuitos elétricos, é a medida da permissão à passagem da corrente alternada causada por elemento passivo de circuitos elétricos dotados de propriedades de campos variantes no tempo. Se a susceptância se refere a campo magnético, esta é indutiva e se a susceptância se refere a campo elétrico, esta é capacitiva.

A susceptância é a grandeza inversa à reatância, neste caso, basta calcular o inverso da reatância para obter seu valor, chegando até as equações (3.9) e (3.10).

$$Y_L = \frac{1}{\omega \times L} \quad (3.9)$$

Onde Y_L é a susceptância indutiva (SI: siemens (S)).

$$Y_C = \omega \times C \quad (3.10)$$

Onde Y_C é a susceptância capacitiva (SI: siemens (S)).

3.1.2 Tipo de simulação utilizada

Como foi apresentado na revisão bibliográfica, para se trabalhar com tomografia capacitiva se faz necessário a aplicação de uma fonte de energia alternada com oscilação de vários Megahertz de frequência, isto porque, analisando as equações da susceptância e sabendo que, quanto maior a frequência, maior será a velocidade angular, teremos a parte capacitiva do sistema de ECT conduzindo a corrente elétrica e a parte indutiva impedindo a passagem da corrente elétrica, também devido a forma geométrica do sensor. Desta forma, o tipo de campo a ser simulado é o campo elétrico com a simulação eletrostática.

Com relação à parte real da impedância, a que diz respeito à resistência elétrica, uma vez que se utiliza água destilada com uma condutância elétrica igual a 0,0002 S ela pode ser desprezada, pois o valor resistivo será muito alto.

3.2 A simulação numérica

A simulação numérica dos valores de capacitância, com a finalidade de se obter uma geometria ótima para o sensor usado no tomógrafo capacitivo elétrico de nossa aplicação, foi realizada através do software Maxwell que resolve a equação (2.2) com a utilização do método dos elementos finitos.

O software utiliza seu simulador de campo eletrostático para calcular os campos elétricos estáticos provindos das diferenças de potencial e das distribuições de cargas. Resolvendo primeiramente o potencial elétrico, o sistema automaticamente resolve o campo elétrico e a densidade do fluxo elétrico usando as equações de Maxwell (equações de (3.1) até (3.4)).

Conhecendo a distribuição de energia e a diferença de potencial, o sistema tem a possibilidade de calcular a matriz de capacitâncias.

3.3 O pacote computacional

Para o cálculo da capacitância, conforme mencionado no item 3.1, o sistema necessita de várias informações como o tipo de problema a ser resolvido, a geometria, as propriedades dos materiais, as condições de contorno, necessidade de outras grandezas na resolução e a definição do critério de convergência e refinamento da malha, possibilitando a análise detalhada da solução no pós-processamento. Em geral, o sistema realiza o procedimento contido no fluxograma da Figura 3-1 que serve para os casos em duas ou três dimensões.

No fluxograma, a primeira etapa é a seleção do tipo de problema a resolver que pode ser eletrostático, magnetostático, corrente Eddy, condução DC, térmico estático, condução AC, Eddy axial e transiente, assim como, o tipo de desenho que pode ser em coordenadas retangulares ou cilíndricas.

Na segunda etapa, é definido o modelo geométrico, isto é, o desenho que pode ser em duas ou três dimensões, de acordo com o tipo de software, e os agrupamentos entre os objetos do modelo, caso seja necessário agrupar algum item.

Na terceira etapa são atribuídas, aos materiais, características físicas, como permissividade relativa e condutividade, sendo que o software já apresenta uma biblioteca com os materiais mais utilizados como água, ar, vácuo, poliamida e cobre.

Na quarta etapa, são definidas as condições de contorno e as fontes de energia, cargas elétricas ou diferença de potencial, que geralmente são atribuídas aos elementos condutores como o cobre. Essas condições de contorno são naturais para os objetos de interface e de Neumann nas fronteiras, o que indica que não existem condições especiais e que o vetor de intensidade do campo elétrico é normal à fronteira. Todavia, na necessidade de se utilizar condições de contorno especiais, o sistema permite a utilização de condições simétricas ou *master-slave*.

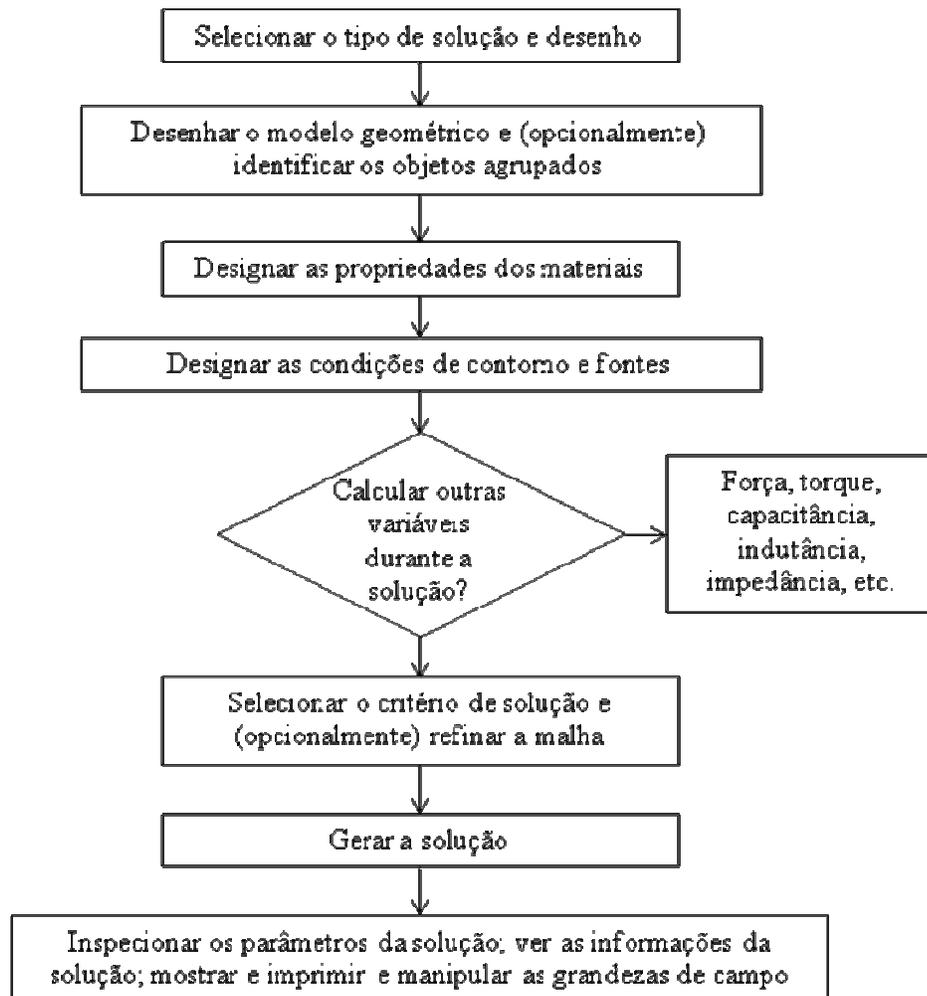


Figura 3-1 - Resumo do pacote computacional do Maxwell (ANSOFT 2006)

Na quinta etapa, que é opcional, deve ser informado ao sistema se serão calculados outros parâmetros como força, torque, capacitância, indutância, etc. Como o intuito deste trabalho é conhecer os valores de capacitância de acordo com a geometria utilizada no sensor, nesta etapa é solicitada a matriz de capacitâncias, mediante a informação dos condutores que receberão potencial alto ou serão aterrados e informando entre quais pares de condutores se deseja obter o valor de capacitância.

Na sexta etapa, deve ser informado ao sistema o tipo de método que irá ser utilizado para a solução do problema entre automático, direto ou ICCG (*Incomplete Cholesky Conjugate Gradient*), os parâmetros de convergência da solução adaptativa e, opcionalmente, existe a possibilidade de refinar a malha de triângulos ou tetraedros manualmente.

Entre os métodos de solução, o método ICCG é mais rápido com uma boa solução, mas ocasionalmente este método diverge, o método direto garante a solução, porém é mais lento. O software avalia a matriz e define qual dos dois métodos é o mais apropriado quando está em modo automático.

Os parâmetros para a convergência da solução adaptativa são os valores que determinam o percentual de refinamento da malha a cada iteração e os critérios de parada de acordo com o número máximo de refinamentos realizados e o erro percentual entre a iteração anterior e a atual.

Na sétima etapa, o programa calcula automaticamente os valores de acordo com os dados de entrada das seis etapas anteriores e gera as condições necessárias para que a próxima etapa seja executada.

Na oitava e última etapa, o software apresenta os resultados obtidos como a matriz de capacitância e outros fatores solicitados na quinta etapa, permite a plotagem do potencial elétrico, a densidade superficial do campo elétrico, a intensidade do campo elétrico e o fluxo magnético, mostra as informações de convergência e permite realizar a análise completa dos resultados, por isso, esta etapa leva o nome de pós-processamento.

3.4 Procedimento geral

Como ponto de partida para este trabalho, a solução exata apresentada no item 2.4 da revisão da literatura foi implementada com auxílio do programa MATLAB[®], conforme APÊNDICE A – Programa computacional para solução 2D, para posterior comparação e validação das ferramentas computacionais utilizadas, os softwares Maxwell em duas e três dimensões. Como a solução apresentada pelos autores é bidimensional, os maiores esforços

foram realizados na ferramenta computacional bidimensional, que considera o comprimento do tubo como sendo infinito.

Para realizar as comparações e obter resultados satisfatórios, foram feitas inúmeras melhorias e estudos no modelo apresentado, em relação ao tempo de processamento e precisão da resolução, isto é, uma análise de custo versus benefício, que é discutida com mais detalhes no item 3.4.2. Este trabalho também foi responsável por um incremento substancial no aprendizado a respeito de como utilizar de forma avançada a ferramenta computacional.

Depois de validada a ferramenta, vários estudos com a variação das características do sensor de tomografia capacitiva elétrica foram realizados com a finalidade de se obter uma geometria ótima para a análise dos escoamentos internos ar-água nos padrões, estratificado e pistonado.

3.4.1 Parâmetros fixos e variáveis na simulação

Para definição da melhor geometria do sensor de capacitância, são necessárias inúmeras simulações com a ferramenta computacional para identificar os valores que as variáveis podem assumir e quais são os valores favoráveis para a visualização da distribuição das fases do escoamento bifásico ar-água no interior da tubulação.

Os principais parâmetros do sensor são: número de eletrodos, comprimento dos eletrodos, eletrodos internos ou externos, diâmetro do sensor, ângulo de espaçamento entre eletrodos, possíveis aterramentos e eletrodos de guarda. Alguns parâmetros são especificados e definidos já no início do projeto por limitações técnicas ou físicas, como o diâmetro do tubo do sensor que foi definido de acordo com a tubulação presente no laboratório. Para obtenção do diâmetro do tubo, foram feitas cinco medidas e apresentadas as médias, desvios padrões (DP) e limites de fabricação (LIF e LSF), como mostra Tabela 3-1. Para efeitos práticos, foram definidos o diâmetro externo em 40 mm e o diâmetro interno em 34 mm.

Tabela 3-1 - Valores da tubulação

TUBULAÇÃO DO LABORATÓRIO									
Região	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	Média	DP	LSF	LIF
\varnothing interno	33,8	33,5	34,1	33,8	34,0	33,84	0,230	34,53	33,15
\varnothing externo	40,4	40,2	40,4	40,1	40,2	40,26	0,134	40,66	39,86

O número de eletrodos foi definido em função da complexidade de hardware e necessidade de uma boa visualização do escoamento. Foram estipulados 12 eletrodos montados externamente devido à dificuldade da montagem interna.

Após a definição dos parâmetros fixos, podemos modelar o sensor com 12 eletrodos externos num sensor de 40 mm como mostra a Figura 3-2. Note que o sensor emissor (eletrodo 1) está representado em vermelho, enquanto que todos os outros eletrodos (eletrodo 2 ao 12) estão representados em preto, o núcleo está representado em azul (que pode ser ar ou água) e a parede do tubo está representada em cinza.

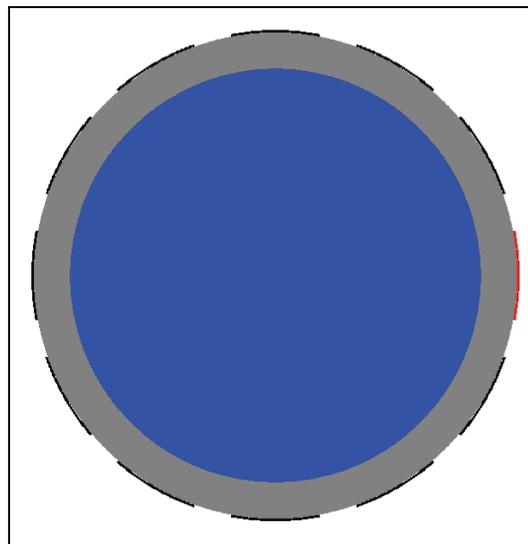


Figura 3-2 - Sensor capacitivo com 12 eletrodos

A definição dos demais valores é a parte que fundamenta e torna necessário este trabalho, portanto, ganhará maior destaque na sequência do mesmo.

3.4.2 Melhorias no modelo para validação das ferramentas computacionais

O modelo proposto como validação da ferramenta computacional (apresentado no item 2.4), considera apenas dois eletrodos côncavos opostos com um núcleo bifásico anular.

A solução computacional se baseia em apresentar o modelo, as condições de contorno e definir a malha que melhor definam o sensor. Nesta etapa, surgiram os primeiros problemas de ordem de modelagem, pois a solução numérica não representava alguns aspectos que serão abordados na sequência, assim como, seria necessário definir o critério de solução utilizado para calcular o valor de capacitância.

O critério de solução é definido através da tela representada na Figura 3-3, onde a única alteração com relação ao padrão foi a alteração do erro percentual de 1% para 0,1%.

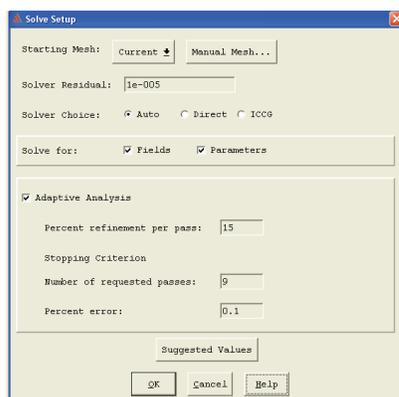


Figura 3-3 - Definição do critério de solução

A malha gerada pelo programa computacional, para um critério de solução de 0,1%, possui 43.173 elementos triangulares e está apresentada na Figura 3-4. O valor de capacitância obtido foi de 25,733pF/m, depois de um tempo de processamento de 5 min.

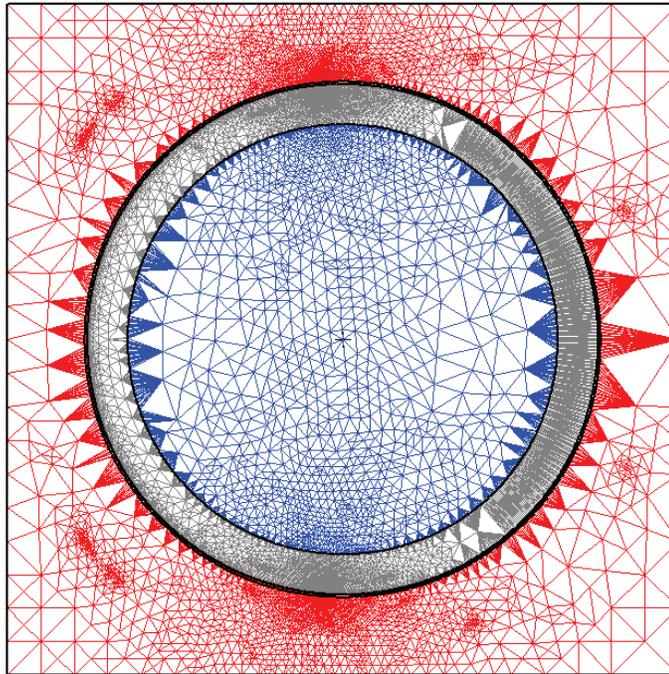


Figura 3-4 - Primeiro refinamento da malha

Com a alteração do critério de solução de 0,1% para 0,01%, obtivemos um aumento muito grande no tempo de processamento que ultrapassou 5 horas e a capacitância obtida foi de 25,732pF/m, com uma malha de 406.087 triângulos, conforme mostra a Figura 3-5.

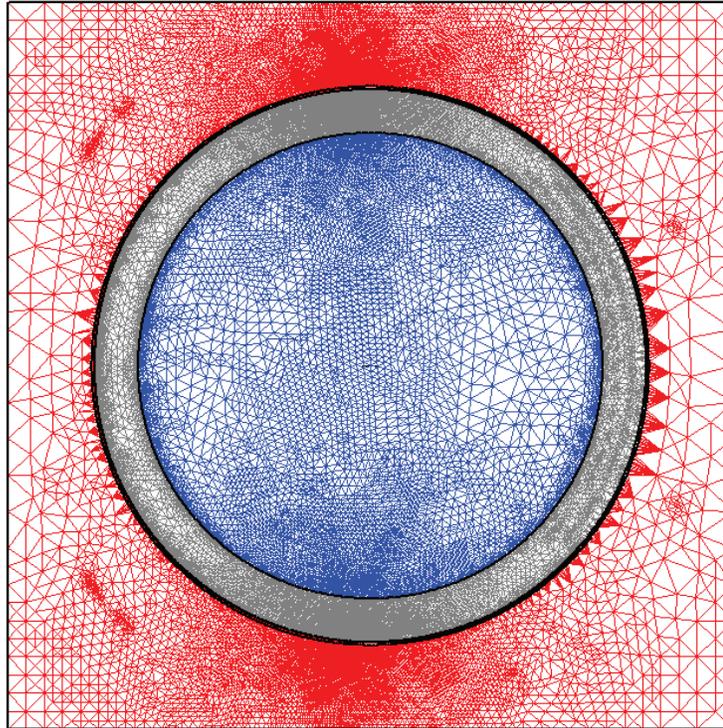


Figura 3-5 - Segundo refinamento da malha

A partir destes resultados, ficou determinado que o padrão de solução que seria utilizado nas simulações seria de 0,1% do valor de energia entre uma iteração e outra do programa, sendo que o mesmo faria no máximo 10 refinamentos na malha para alcançar a solução.

Tabela 3-2 - Valores das variáveis da solução exata

Grandeza	R₁	R₂	R₃	ε1	ε2	ε3	Φ₁	Φ₂	Φ₃	Φ₄	dΦ_i Φ_j
Exata	10	17	20	81	1	3,5	60°	120°	240°	300°	-
Maxwell	10	17	20	81	1	3,5	60°	120°	240°	300°	0,5°

O ângulo de espaçamento entre os eletrodos sensor e receptor (ELET 1 e 2) e os eletrodos de aterramento (ELET 3 e 4), conforme desenho apresentado na Figura 2-9, não foram especificados pelos autores do trabalho. Para resolver este impasse vários valores entre $0,5^\circ$ e 10° foram simulados, sendo que os valores que representaram resultados mais próximos dos obtidos pela solução exata foram com um ângulo de $0,5^\circ$, conforme Tabela 3-2.

A solução exata não considerava a região externa ao sensor e a ferramenta computacional considerava uma região retangular externa ao sensor e o tamanho desta região apresentava influência direta no resultado de capacitância entre os eletrodos. Esta região se faz presente tanto em coordenadas retangulares quanto polares e foi ilustrada pela parte externa ao círculo formado pelos eletrodos dentro do retângulo da Figura 3-6, onde a escala de cores representa a distribuição do potencial elétrico variando de cinco volts na região vermelha e zero volt na região azul escura.

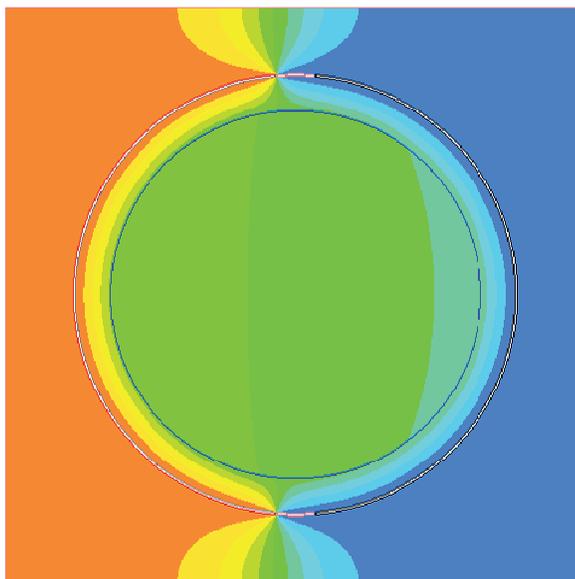


Figura 3-6 – Eletrodos em 170° sem blindagem núcleo com ar

Para solucionar este problema, foi colocada uma malha de blindagem externa aterrada para que o domínio fosse isolado das áreas externas da figura. Assim, a parte externa à blindagem é

referenciada com 0V, representando uma condição de contorno com fluxo do campo elétrico igual a zero (azul escuro) e não apresenta influência no valor de capacitância calculado entre os eletrodos emissor e receptor, independentemente do tamanho desta região. O novo modelo é apresentado na Figura 3-7, onde o anel branco que circunda o modelo é a representação da blindagem externa.

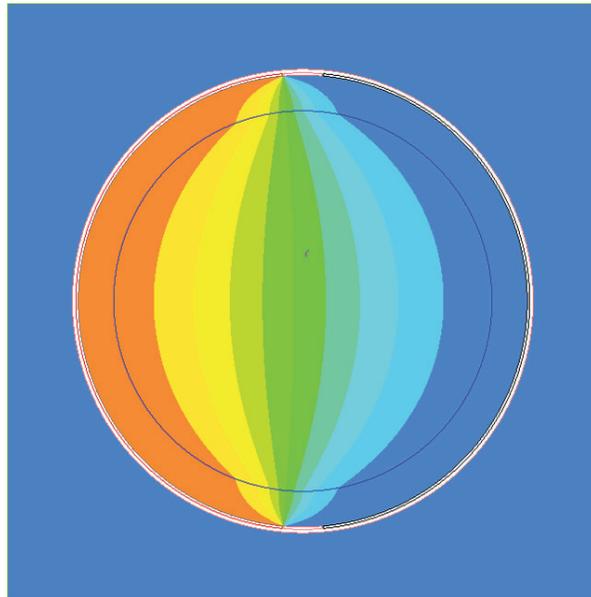


Figura 3-7 - Eletrodos em 170° com blindagem núcleo com ar

Comparando-se a Figura 3-6 com a Figura 3-7, podemos notar claramente que a distribuição do potencial elétrico, que anteriormente estava com seus valores mais altos (tons avermelhados) na região externa do sensor, apresenta agora este potencial dentro do sensor como uma espécie de confinamento do fenômeno eletrostático.

Após as melhorias e comparações, foi definido o padrão de solução que seria utilizado para as próximas simulações, assim como, os parâmetros não citados no trabalho utilizado como referência e necessários para a simulação com a ferramenta computacional.

Para passar do modelo de duas para três dimensões, o primeiro problema encontrado foi o efeito de borda presente na simulação para um comprimento de tubo maior que o comprimento do eletrodo, que foi determinado em 10 mm, representando um tamanho mínimo para que o mesmo obtenha a pior condição na medição das capacitâncias, conforme Figura 3-8. Por causa do efeito de borda, os erros encontrados nas simulações tridimensionais no Maxwell variaram aproximadamente entre 40% e 370%, em relação à solução exata bidimensional.

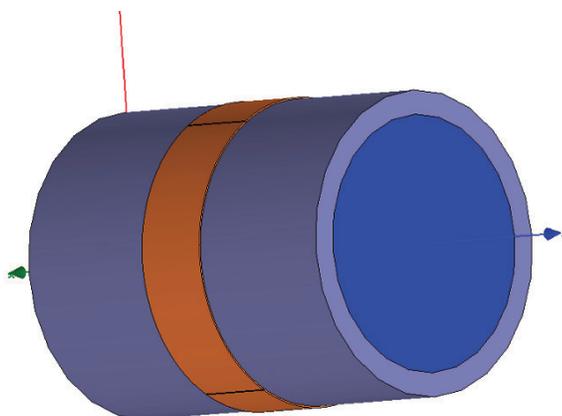


Figura 3-8 - Simulação 3D para comparação com Geraests e Borst (1988) sem guarda

Existem várias possibilidades para minimizar o efeito de borda. Uma delas consiste na inclusão de eletrodos de guarda, conforme o modelo apresentado na Figura 3-9.

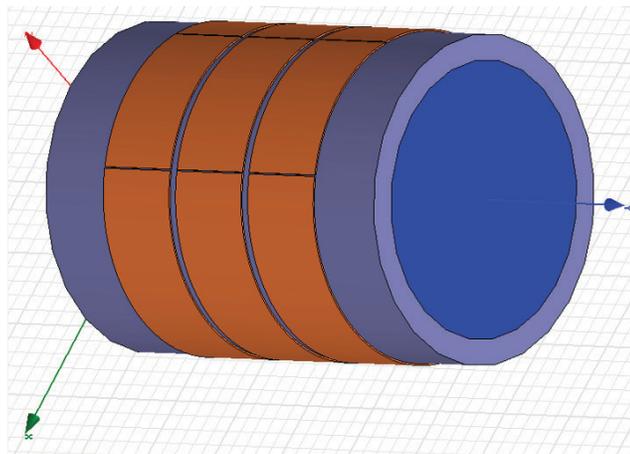


Figura 3-9 - Simulação 3D para comparação com Geraests e Borst (1988) com guarda

Para o modelo apresentado na Figura 3-9, o simulador aponta um erro devido ao não atendimento das condições de contorno, pois o espaçamento entre os eletrodos de guarda e sensores fazem com que exista uma região de contorno indefinida ao redor da tubulação, onde se deseja obter o valor da capacitância. Uma alternativa foi fazer com que os eletrodos tivessem um espaçamento axial tendendo à zero, desta forma, o programa entende que todo o contorno é definido com potencial elétrico igual a 0V ou 5V. Para verificar os valores em condições semelhantes as condições de montagem reais, isto é, com espaçamentos entre as três camadas axiais de eletrodos maiores que um milímetro, foi utilizada uma Gaiola de Faraday, conforme espaçamento descrito nos itens 3.4.5 e 4.4. Assim, obtemos o modelo conforme a Figura 3-10, onde a malha de aterramento e o ar em volta do sensor foram colocados como transparente no desenho para que fosse possível a visualização de seu interior.

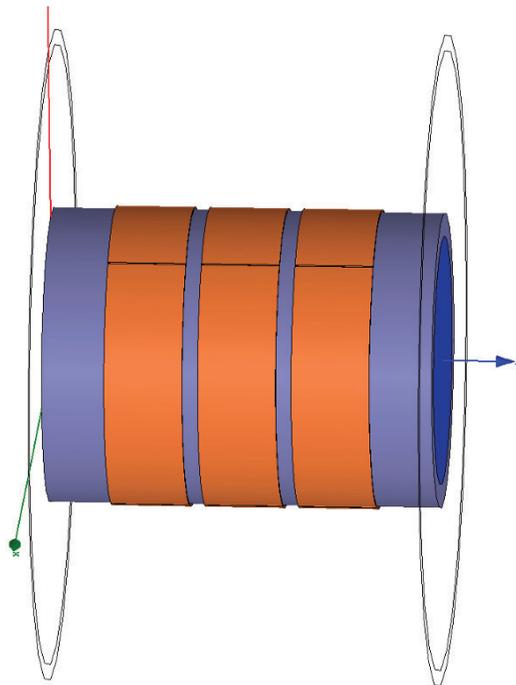


Figura 3-10 - Simulação 3D para comparação com Geraests e Borst (1988) com blindagem

No modelo apresentado na Figura 3-10, temos dois anéis externos que são a representação da blindagem externa, onde o diâmetro interno da malha é igual a 120 mm com núcleo cheio de ar e, em sua volta é colocada uma blindagem de cobre aterrada.

3.4.3 Validação das ferramentas computacionais

Como mencionado anteriormente, a validação das ferramentas computacionais foi obtida através da comparação entre os valores obtidos com a solução exata no MATLAB[®] (equação (2.6)) e os valores obtidos pelo Maxwell 2D e 3D. Para se obter uma solução abrangente, foram analisados dois parâmetros, o ângulo de cobertura dos eletrodos e a permissividade relativa dos

materiais. A Tabela 3-3 apresenta os parâmetros analisados com o intuito de se obter uma validação confiável da ferramenta computacional.

Tabela 3-3 - Variáveis de validação da ferramenta computacional

Parâmetros	Valores
Ângulo (°)	90, 120, 150 e 170
Permissividade Relativa	1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 80 e 100

Conforme a Tabela 3-3, com quatro valores de ângulo de cobertura dos eletrodos fonte e sensor e nove valores de permissividade relativa chegamos a um total de trinta e seis valores de capacitância, para a validação dos softwares de simulação.

Após a análise satisfatória dos resultados apresentados no item 4.1 e no item 4.2, a próxima etapa consiste em definir quais parâmetros serão considerados como fixos e quais serão os parâmetros que variam na simulação do sensor. Nesta etapa, será feita a distinção de quais simulações podem ser feitas com a ferramenta em 2D e quais precisarão da ferramenta em 3D, respeitando a respectiva ordem.

3.4.4 Espaçamento entre eletrodos

O espaçamento entre eletrodos é um dos mais importantes parâmetros, pois é através dele que será definido indiretamente o ângulo dos eletrodos.

Para a definição do espaçamento entre eletrodos, foram sugeridos valores entre 3° e 15°, além de uma simulação com 27°, conforme Tabela 3-4. Estas simulações foram feitas levando em consideração a distância entre eletrodos e superfície externa do tubo de 1 µm com ar presente neste espaço e o núcleo da tubulação com apenas um componente, totalmente cheio de ar ou totalmente cheio de água.

Tabela 3-4 - Espaçamento entre eletrodos

Parâmetros	Valores
Ângulo entre eletrodos (°)	3, 6, 9, 12, 15 e 27
Componentes	Ar e Água

Com as duas variáveis da Tabela 3-4 são possíveis 12 simulações. Para um sensor com 12 eletrodos, temos 66 valores independentes de capacitância, conforme equação (2.1). Porém, devido ao fato de termos apenas uma fase no interior do sensor e a simetria do sensor, temos apenas 6 valores independentes de capacitância. Portanto, para as 12 simulações previstas na Tabela 3-4, teremos 72 valores de capacitância.

Para definir o melhor espaçamento entre eletrodos devem ser observados o menor valor de capacitância e a faixa de variação da capacitância, onde o menor valor de capacitância é obtido entre o par de eletrodos opostos e a faixa de variação da capacitância é a diferença entre a capacitância do par adjacente e do par oposto de eletrodos. Os resultados obtidos serão apresentados no item 4.3.

3.4.5 Distância entre os eletrodos e a blindagem externa

A blindagem externa, que também recebe o nome de Gaiola de Faraday, tem a função de isolar o sensor de interferências eletromagnéticas externas. Ela é feita de material condutor e está ligada ao potencial zero.

Para se determinar o valor mais apropriado da distância entre os eletrodos e a blindagem externa foram simuladas distâncias de 10 mm até 300 mm, conforme Tabela 3-5, para os componentes ar e água. A distância de 300 mm entre os eletrodos e a malha externa foi utilizada como referência e as variações desta em relação às demais distâncias foram observadas com a

tubulação cheia de ar ou água. Assim, foi determinado o melhor valor para o nosso sensor, levando em consideração as condições possíveis de fabricação.

Tabela 3-5 - Distância da blindagem externa

Parâmetros	Valores
Distância (mm)	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 150, 200, 250 e 300
Componentes	Ar e Água

Com os 23 valores de distância entre a blindagem externa e os eletrodos e para os dois componentes, chegamos a um número total de 46 simulações, com 6 valores de capacitâncias independentes cada, num total de 276 valores de capacitâncias independentes, que serão apresentados em forma de gráfico no item 4.4.

3.4.6 Eletrodos de guarda

Os eletrodos de guarda são eletrodos distribuídos no comprimento axial do tubo, como se fosse a divisão de um conjunto de eletrodos maiores em três conjuntos menores, como foi visto no item 3.4.1 (Figura 3-9 e na Figura 3-10).

Como discutido no item 2.3.4 da revisão bibliográfica, muitos autores têm diferentes opiniões sobre a utilização e o projeto de eletrodos de guarda, que servem para reduzir os efeitos de borda que surgem devido ao comprimento dos eletrodos ser finito e o campo elétrico sofrer distorções naturais em função das diferenças de permissividades dos meios sob escoamento. Este efeito de borda se faz presente somente nos modelos 3D, uma vez que nos modelos 2D considera-se o comprimento da tubulação, escoamento e eletrodos como sendo infinitos.

Para se comparar a influência do efeito de borda e a necessidade dos eletrodos de guarda foram utilizados os resultados do software 3D apresentados no item 4.2, alongando-se o comprimento da tubulação e escoamento (Figura 3-8) para verificar o efeito de borda. Depois foram colocados os eletrodos de guarda com distância de zero, um e dois milímetros do conjunto de eletrodos sensores (Figura 3-9) e comprimento de 10 mm, embora para espaçamentos diferentes de zero seja necessária a colocação de malha externa aterrada (Figura 3-10). Assim, foi analisado o erro em função da solução exata e entre as simulações para se determinar o seu menor valor.

Os resultados desta simulação, para eletrodos emissor e receptor com um ângulo de 120° e permissividade relativa variando de 1 a 100 (Tabela 3-3), serão apresentados no item 4.5.

3.4.7 Aterramento axial

Os aterramentos de finalização axiais são aterramentos pouco utilizados, pois eles atenuam o sinal elétrico reduzindo o campo e, como consequência, a capacitância. Para simulação numérica, é fácil acrescentar e retirar estes eletrodos, acrescentando um pouco mais de tempo para se verificar o efeito que estes eletrodos causam no resultado final. Desta forma, foram feitas as simulações e seus resultados são apresentados no item 4.6.

A simulação dos eletrodos de aterramento axial baseia-se na Figura 3-11, onde os eletrodos axiais foram simulados no mesmo local onde foram modelados os eletrodos de guarda (Figura 3-9), onde podemos ver os eletrodos de aterramento de finalização axial que estão espaçados em 1 mm de distância dos eletrodos sensores e receptores e medem 5 mm.

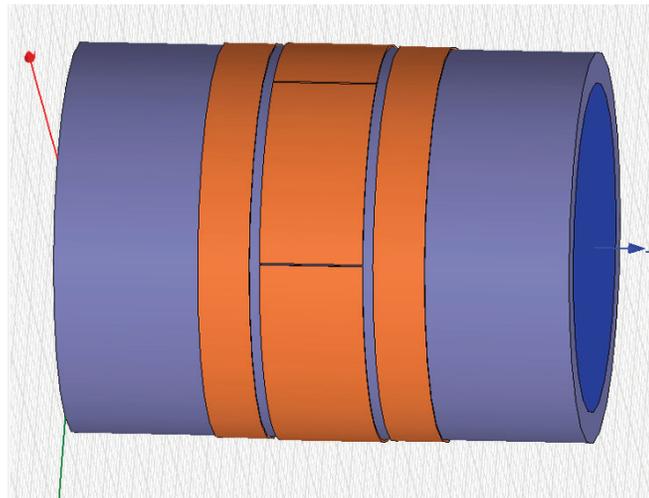


Figura 3-11 - Simulação com aterramento axial

3.4.8 Simulação da geometria final do sensor

Com a finalização de todas as simulações para a definição da geometria final do sensor, falta realizar as simulações finais para se assegurar que a geometria definida atende as nossas necessidades e, para isso, será simulado o preenchimento de forma planificada de uma tubulação com água, sendo que as simulações serão realizadas com o preenchimento sendo feito a cada 2 mm de distância, mudando assim o componente no interior do sensor aos poucos de ar para água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados a validação dos softwares de simulação numérica e todos os resultados obtidos a fim de prover dados suficientes para a escolha da melhor geometria de montagem do sensor de ECT. Todas as simulações aqui apresentadas seguem o escopo geral apresentado no capítulo 3.

4.1 Validação bidimensional da ferramenta computacional

A simulação com eletrodos côncavos ocorreu para a validação das ferramentas computacionais de acordo com o item 3.4.3, onde os resultados são apresentados em tabelas para ângulos de eletrodos fixos e valores de permissividade relativa variáveis.

Tabela 4-1 - Valores para validação bidimensional 90° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
90	1	1,9944	1,9944	0,00%
90	3	5,8935	5,8932	0,01%
90	5	9,5751	9,5740	0,01%
90	10	17,575	17,570	0,03%
90	20	29,075	29,061	0,05%
90	30	36,649	36,626	0,06%
90	50	45,832	45,795	0,08%
90	80	53,045	52,996	0,09%
90	100	55,920	55,865	0,10%

A Tabela 4-1 mostra que, conforme o valor de permissividade relativa aumenta, o valor de capacitância aumenta, o que é naturalmente compreensivo uma vez que uma permissividade

relativa maior e uma diferença de potencial elétrico constante resultam em uma maior carga elétrica armazenada.

Quando comparados os resultados obtidos pela simulação realizada no software Maxwell 2D e pela solução exata apresentada no item 2.4 (implementada no MATLAB), notamos que os erros obtidos para todas as permissividades não passa de 0,1%, o que pode ser considerado um valor muito pequeno.

O software Maxwell 2D usou 43.318 triângulos nos resultados apresentados na Tabela 4-1. As seguintes distribuições no potencial elétrico foram obtidas para a menor e a maior permissividade, conforme podemos ver na Figura 4-1 e na Figura 4-2.

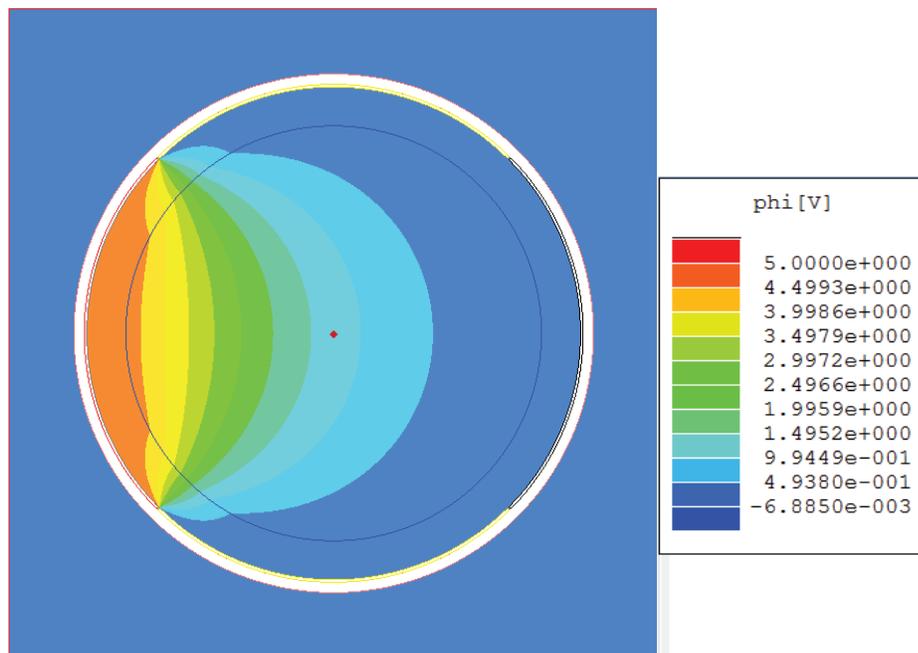


Figura 4-1 - Distribuição do ϕ (Ângulo = 90° e $\epsilon_r = 1$)

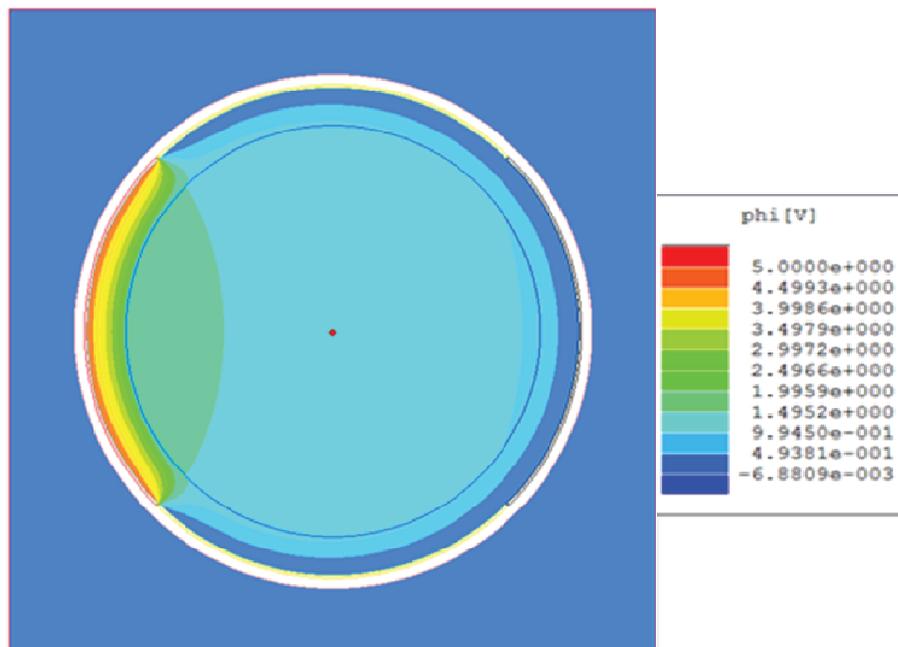


Figura 4-2 - Distribuição do ϕ (Ângulo = 90° e $\epsilon_r = 100$)

Para o ângulo dos eletrodos emissor e receptor de 120° com uma malha composta por 62.093 triângulos foi gerada a Tabela 4-2, para o ângulo de 150° com uma malha de 63.106 triângulos foi gerada a Tabela 4-3 e para o ângulo de 170° com uma malha de 43.416 triângulos foi gerada a Tabela 4-4, onde os valores do erro encontrado entre a solução exata e do Maxwell também resultaram em valores menores que 0,1% para todos os valores de permissividade relativa e ângulos simulados.

Tabela 4-2 - Valores para validação bidimensional 120° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
120	1	4,0394	4,0379	0,04%
120	3	11,819	11,815	0,03%
120	5	18,998	18,993	0,03%
120	10	34,096	34,084	0,04%
120	20	54,911	54,881	0,05%

120	30	68,217	68,170	0,07%
120	50	84,037	83,966	0,08%
120	80	96,276	96,184	0,10%
120	100	101,11	101,01	0,10%

Tabela 4-3 - Valores para validação bidimensional 150° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
150	1	8,4668	8,4668	0,00%
150	3	23,274	23,273	0,00%
150	5	36,149	36,141	0,02%
150	10	61,567	61,545	0,04%
150	20	94,301	94,247	0,06%
150	30	114,33	114,25	0,07%
150	50	137,52	137,41	0,08%
150	80	155,11	154,96	0,10%
150	100	161,99	161,83	0,10%

Tabela 4-4 - Valores para validação bidimensional 170° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
170	1	21,334	21,341	-0,03%
170	3	43,347	43,344	0,01%
170	5	61,184	61,169	0,02%
170	10	94,338	94,297	0,04%
170	20	134,69	134,61	0,06%
170	30	158,60	158,48	0,08%
170	50	185,77	185,61	0,09%
170	80	206,10	205,90	0,10%
170	100	213,99	213,79	0,09%

De uma maneira geral, com os resultados apresentados podemos afirmar que o software apresenta curvas de erro bem parecidas, independentemente do ângulo entre os eletrodos emissor e receptor, como pode ser visto na Figura 4-3, nela também podemos ver que, devido a

permissividade relativa da parede da tubulação ser maior em alguns pontos do que a permissividade relativa do meio, existem alguns pontos onde os erros encontrados tiveram uma leve tendência a aumentar para permissividades relativas menores que três e meio.

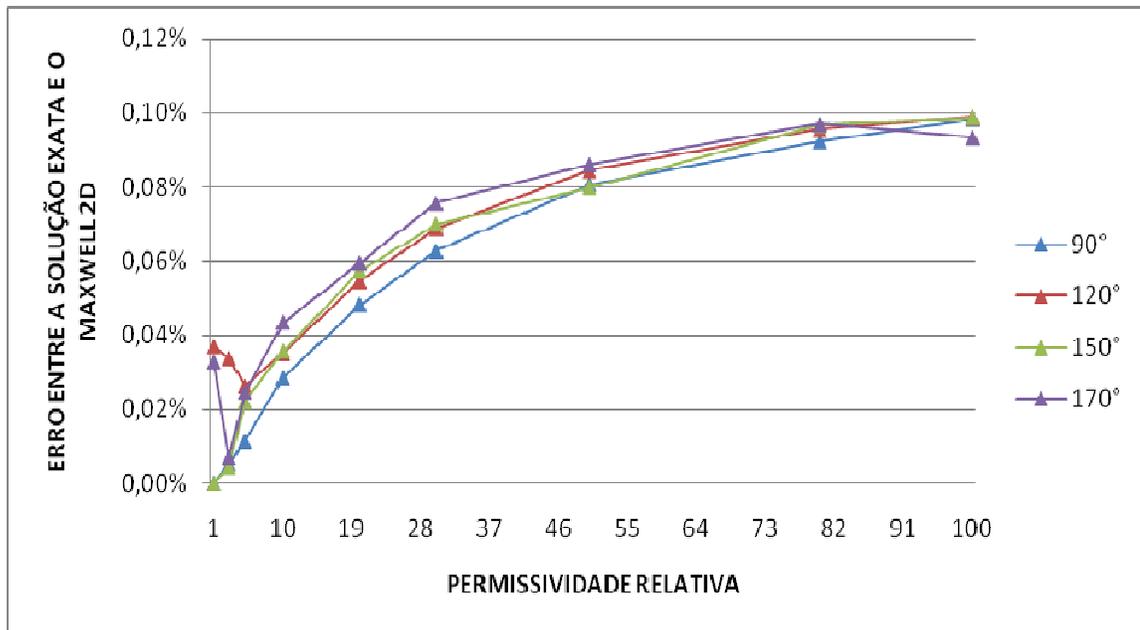


Figura 4-3 – Erro entre as simulações bidimensionais e a solução exata

Como o erro encontrado foi muito pequeno, podemos afirmar que o software Maxwell 2D pode ser utilizado com segurança para realizar as simulações de capacitância e ajudar a definir as geometrias do sensor.

4.2 Validação tridimensional da ferramenta computacional

A simulação com eletrodos côncavos foi realizada para a validação das ferramentas computacionais de acordo com o item 3.4.3, onde os resultados são apresentados em tabelas para ângulos de eletrodos fixos e valores de permissividade relativa variáveis. A seguir, serão tratados os resultados das simulações tridimensionais.

Como o intuito aqui é apenas isolar o fenômeno e saber se o software Maxwell 3D é capaz de fornecer erro aceitável, foi proposto o exemplo abaixo onde a tubulação, o volume da substância no interior da tubulação e os eletrodos têm o mesmo comprimento, conforme mostra a Figura 4-4.

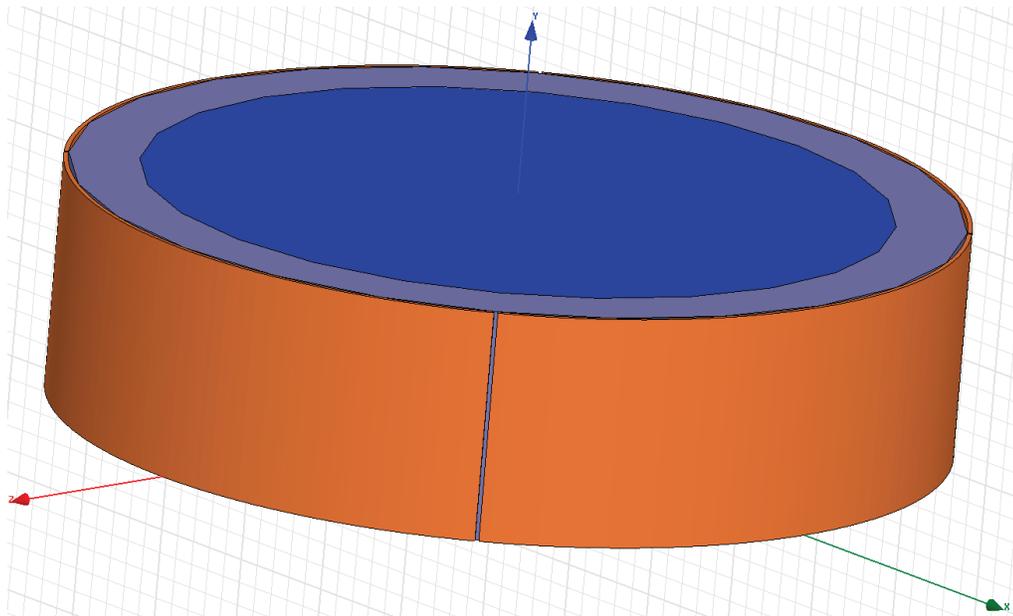


Figura 4-4 - Modelo 3D simplificado

Para o modelo apresentado, foram obtidos os seguintes resultados dispostos na Tabela 4-5, na Tabela 4-6, na Tabela 4-7 e na Tabela 4-8, com a utilização de cerca de 200.000 a 400.000

tetraedros para a construção da malha de elementos finitos e resolução do problema. Nestas tabelas, diferentemente das utilizadas na validação bidimensional, aparece um campo com os valores corrigidos, que nada mais são do que a transformação dos valores de capacitância em Faraday para um valor de Faraday por metro, mesma unidade da solução exata. Isto é feito com a multiplicação do valor obtido no Maxwell 3D para um eletrodo de 10 mm por 100, transformando o valor em metros.

Tabela 4-5 - Valores para validação tridimensional 90° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Corrigido	Erro
90	1	1,9944	1,9963E-02	1,9963	-0,10%
90	3	5,8935	5,8983E-02	5,8983	-0,08%
90	5	9,5751	9,5821E-02	9,5821	-0,07%
90	10	17,575	1,7585E-01	17,585	-0,06%
90	20	29,075	2,9085E-01	29,085	-0,03%
90	30	36,649	3,6657E-01	36,657	-0,02%
90	50	45,832	4,5836E-01	45,836	-0,01%
90	80	53,045	5,3045E-01	53,045	0,00%
90	100	55,920	5,5917E-01	55,917	0,01%

Tabela 4-6 - Valores para validação tridimensional 120° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Corrigido	Erro
120	1	4,0394	4,0421E-02	4,0421	-0,07%
120	3	11,819	1,1821E-01	11,821	-0,02%
120	5	18,998	1,8992E-01	18,992	0,03%
120	10	34,096	3,4082E-01	34,082	0,04%
120	20	54,911	5,4904E-01	54,904	0,01%
120	30	68,217	6,8144E-01	68,144	0,11%
120	50	84,037	8,3903E-01	83,903	0,16%
120	80	96,276	9,6102E-01	96,102	0,18%
120	100	101,11	1,0092E+00	100,92	0,19%

Tabela 4-7 - Valores para validação tridimensional 150° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Corrigido	Erro
150	1	8,4668	8,3660E-02	8,3660	1,19%
150	3	23,274	2,3235E-01	23,235	0,17%
150	5	36,149	3,6269E-01	36,269	-0,33%
150	10	61,567	6,2276E-01	62,276	-1,15%
150	20	94,301	9,6279E-01	96,279	-2,10%
150	30	114,33	1,1737E+00	117,37	-2,66%
150	50	137,52	1,4205E+00	142,05	-3,29%
150	80	155,11	1,6095E+00	160,95	-3,77%
150	100	161,99	1,6838E+00	168,38	-3,94%

Tabela 4-8 - Valores para validação tridimensional 170° (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Corrigido	Erro
170	1	21,334	2,0866E-01	20,866	2,19%
170	3	43,347	4,3320E-01	43,320	0,06%
170	5	61,184	6,1626E-01	61,626	-0,72%
170	10	94,338	9,5930E-01	95,930	-1,69%
170	20	134,69	1,3821E+00	138,21	-2,61%
170	30	158,60	1,6354E+00	163,54	-3,11%
170	50	185,77	1,9261E+00	192,61	-3,68%
170	80	206,10	2,1456E+00	214,56	-4,10%
170	100	213,99	2,2314E+00	223,14	-4,28%

De uma maneira geral, com os resultados alcançados, podemos afirmar que o software apresenta curvas de erro bem parecidas para ângulos dos eletrodos emissor e receptor de 90° e de 120° e começa a apresentar erros maiores, apesar de ainda menores que 5%, para ângulos de 150° e 170° como pode ser visto na Figura 4-5. Como os erros encontrados foram baixos para todas as simulações podemos afirmar que o software Maxwell 3D pode ser utilizado com segurança para realizar as simulações de capacitância e ajudar a definir as geometrias do sensor.

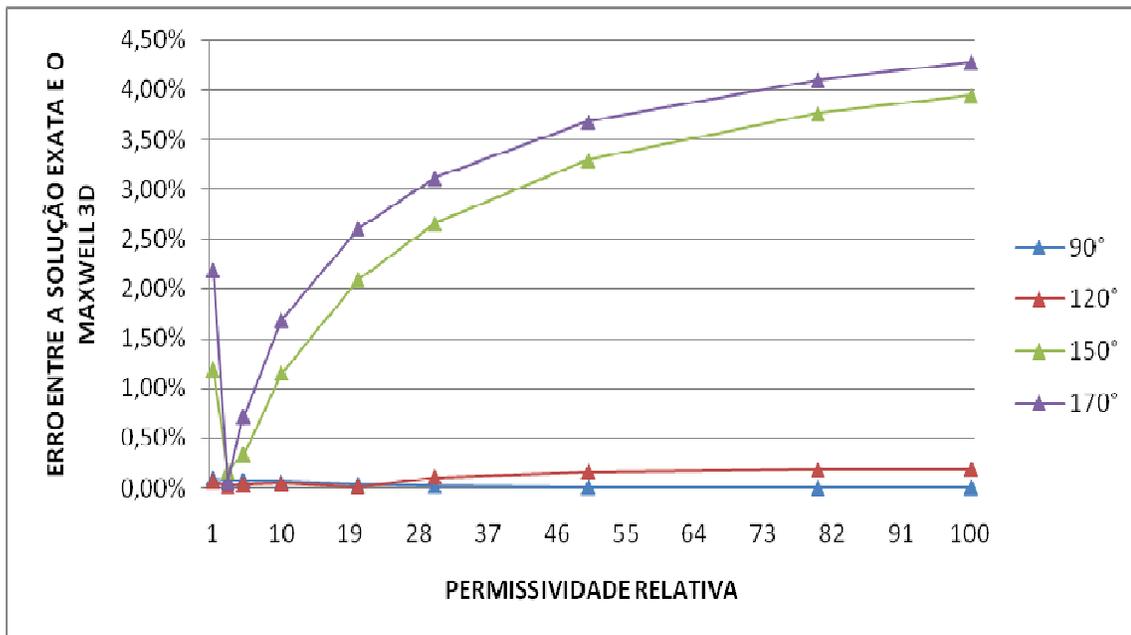


Figura 4-5 – Erro entre as simulações tridimensionais e a solução exata

4.3 Definição do espaçamento entre eletrodos

O espaçamento entre eletrodos é a distância em milímetros ou o ângulo em graus existente entre um par adjacente de eletrodos. As simulações foram todas realizadas conforme descrito no item 3.4.4, sendo iniciadas com um valor de 3° (que equivale a aproximadamente 1 mm) e foram até 15° (que equivalem a 5 mm ou metade do espaço existente para cada eletrodo). Por fim, foi realizada uma última simulação com 27° de espaçamento apenas para verificar uma condição extrema de montagem, que pode ser útil para alguma aplicação futura.

Na Figura 4-6 podemos ver como fica a distribuição do potencial elétrico desde zero volt na parte azul escura até cinco volts na parte vermelha. Devido à proximidade dos eletrodos adjacentes, pode-se notar que a tendência é obter uma grande discrepância entre os valores de capacitância do par adjacente em relação aos outros pares, resultando em um circuito eletrônico que tenha que medir uma grande amplitude de valores, o que não é favorável. Por outro lado, se

olharmos a Figura 4-7, notaremos que, para água, a distribuição de capacitâncias quase que não sofre impacto com a existência de um eletrodo aterrado em sua vizinhança, mas, para ar, além de sofrer pouca influência, os valores de capacitância se tornariam tão baixos, que seria praticamente impossível serem medidos.

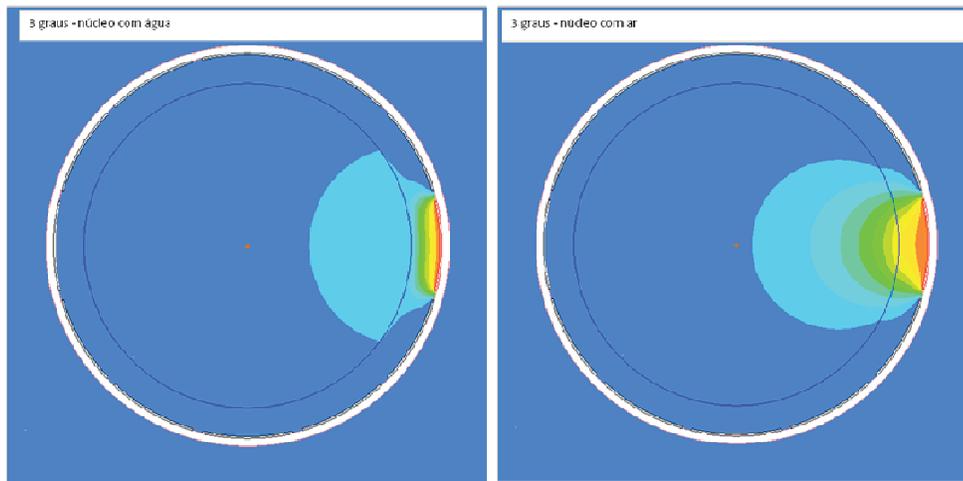


Figura 4-6 – Distribuição do potencial elétrico para eletrodos com 3° de espaçamento

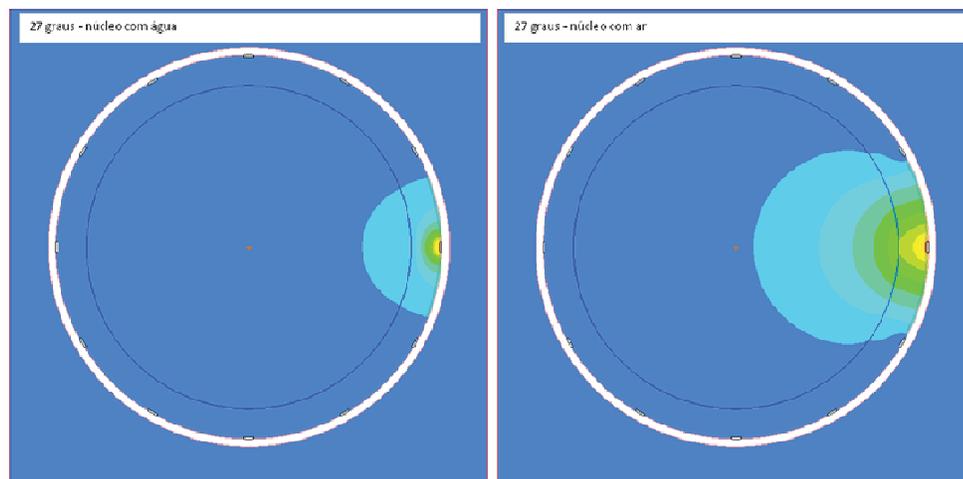


Figura 4-7 – Distribuição do potencial elétrico para eletrodos com 27° de espaçamento

Assim, para definição do melhor ângulo de espaçamento entre os eletrodos foram realizadas as simulações apresentadas na Tabela 4-9 e na Tabela 4-10, além de serem plotados a Figura 4-8 e a Figura 4-9, onde para se ter uma idéia mais clara dos valores de capacitância excluindo o par de eletrodos adjacentes, para o sensor cheio de ar, é apresentada a Figura 4-10.

Tabela 4-9 - Valores de capacitância para água (pF/m)

	Espaço	3°	6°	9°	12°	15°	27°
Emissor	Receptor						
1	2	26,5800	12,8100	8,7260	6,1820	4,3720	0,4347
1	3	8,1420	6,5370	5,3270	4,1740	3,1290	0,3390
1	4	6,9890	5,6260	4,5990	3,6130	2,7170	0,2974
1	5	6,3820	5,1430	4,2100	3,3130	2,4940	0,2748
1	6	6,0720	4,8970	4,0120	3,1600	2,3820	0,2632
1	7	5,9750	4,8210	3,9500	3,1130	2,3470	0,2596

Tabela 4-10 - Valores de capacitância para ar (pF/m)

	Espaço	3°	6°	9°	12°	15°	27°
Emissor	Receptor						
1	2	30,2600	14,5500	9,4690	6,2840	4,1490	0,3552
1	3	1,1540	0,8971	0,7230	0,5621	0,4198	0,0476
1	4	0,4339	0,3492	0,2873	0,2274	0,1724	0,0201
1	5	0,2715	0,2198	0,1814	0,1440	0,1095	0,0128
1	6	0,2136	0,1731	0,1432	0,1138	0,0866	0,0101
1	7	0,1981	0,1607	0,1329	0,1056	0,0840	0,0094

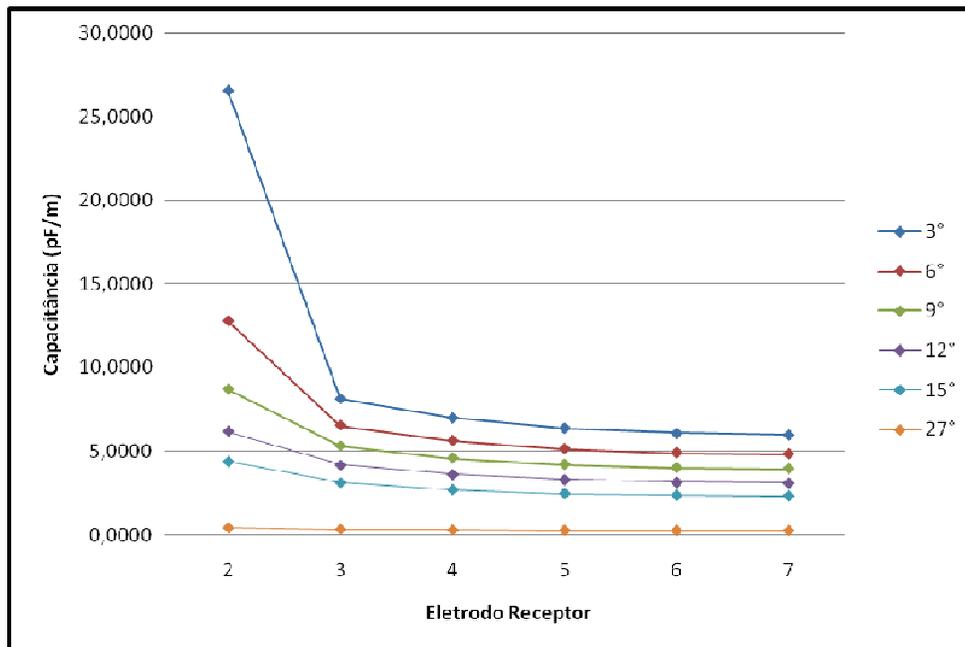


Figura 4-8 - Capacitâncias em função do espaçamento entre eletrodos para água

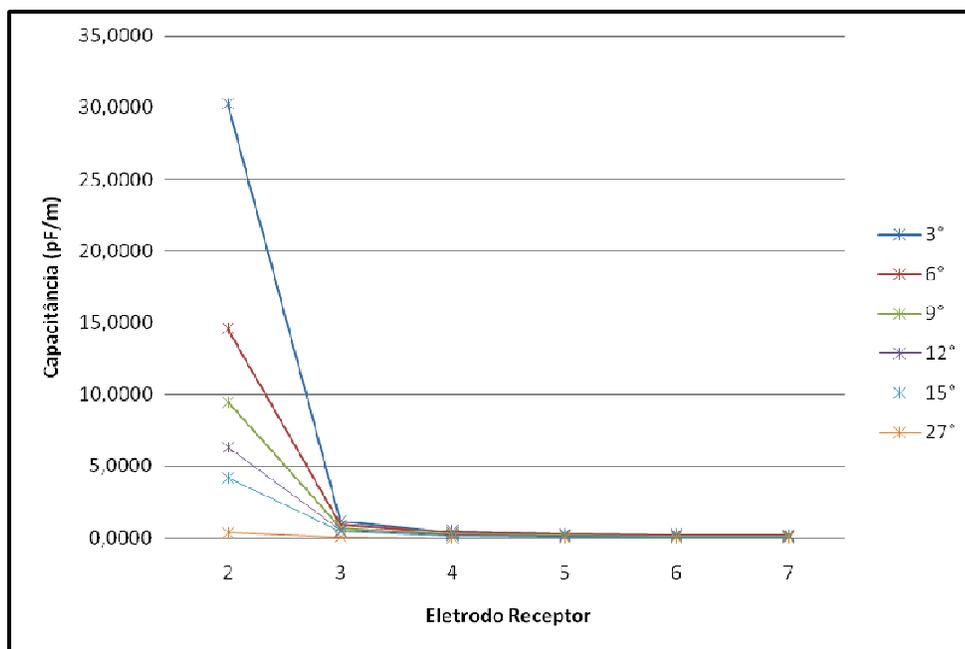


Figura 4-9 - Capacitâncias em função do espaçamento entre eletrodos para ar

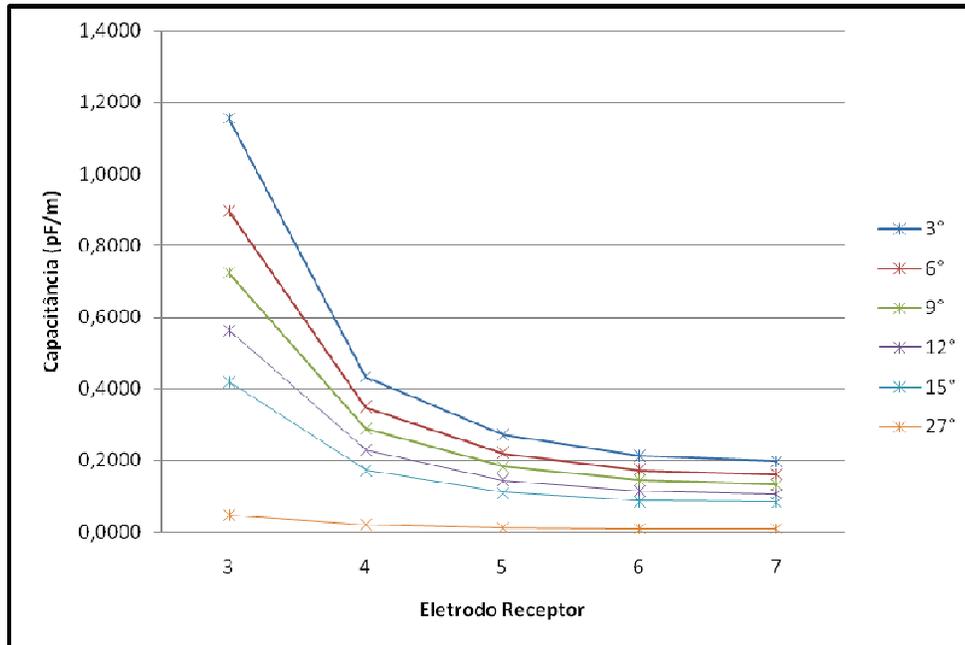


Figura 4-10 - Capacitâncias em função do espaçamento entre eletrodos para ar (sem par adjacente)

Com base nas figuras e gráficos aqui apresentados, podemos notar que excluindo-se os ângulos de 3° e 27°, onde o primeiro apresenta uma amplitude muito grande de valores para o sensor cheio de ar e o segundo apresenta valores muito pequenos para serem medidos por qualquer circuito transdutor, os outros ângulos podem atender nossas necessidades de projeto. Assim, para se definir o melhor ângulo a ser utilizado, foram comparados os valores mínimos e máximos de capacitância, levando em consideração um circuito que tenha como características medir valores de até 10,0 pF com uma precisão de 0,1 pF, chegando até um espaçamento de 9° entre eletrodos.

4.4 Definição da distância entre os eletrodos e a blindagem externa

A distância da malha externa em relação aos eletrodos é de extrema importância, pois se trata de uma malha aterrada que fica ao redor do sensor e esta blindagem provoca variações do campo elétrico no redor externo dos eletrodos, causando variação na distribuição do potencial e, por consequência, na capacitância, porém, para termos absolutos e em sistemas tomográficos com eletrodos receptores aterrados, o efeito da blindagem em valor absoluto, permanece constante entre cada par de eletrodos. Para ilustrar esta idéia com situações muito exageradas, foram feitas as simulações da Figura 4-11 e da Figura 4-12 com as distribuições do potencial elétrico para água e ar a uma distância de 350 mm e 500 mm. Avaliando cuidadosamente a distribuição do potencial elétrico quando o tubo esta cheio de ar, notamos que, para uma distância de 350 mm, ainda existe um acoplamento deste potencial à blindagem representada pela cor azul clara, sendo que a diferença de capacitância entre as simulações, para o caso do ar, variou de 0,3% para o par de eletrodos adjacentes até 4,3% para o par de eletrodos opostos, no caso da água ela variou entre 0,1% a 0,3%.

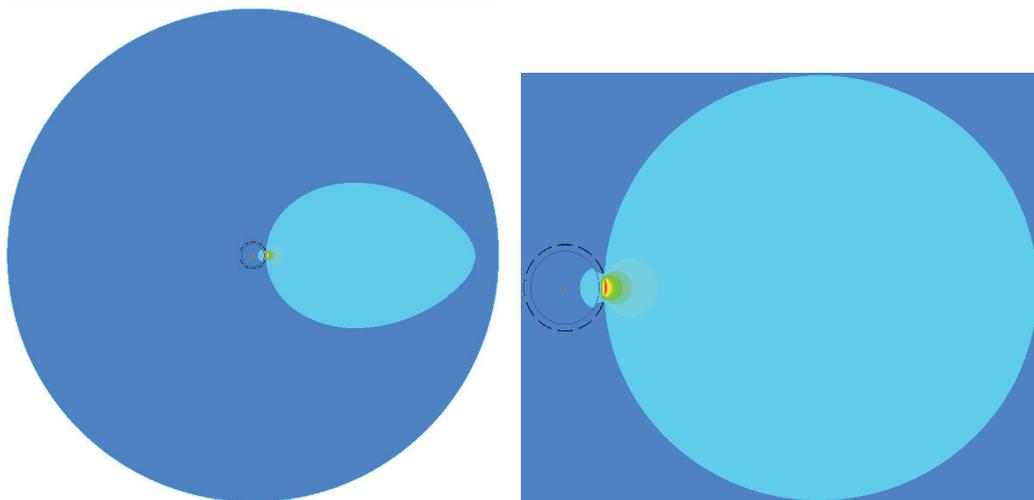


Figura 4-11 - Distância da blindagem externa a 350 mm (esq.) e 500 mm (dir.) com água

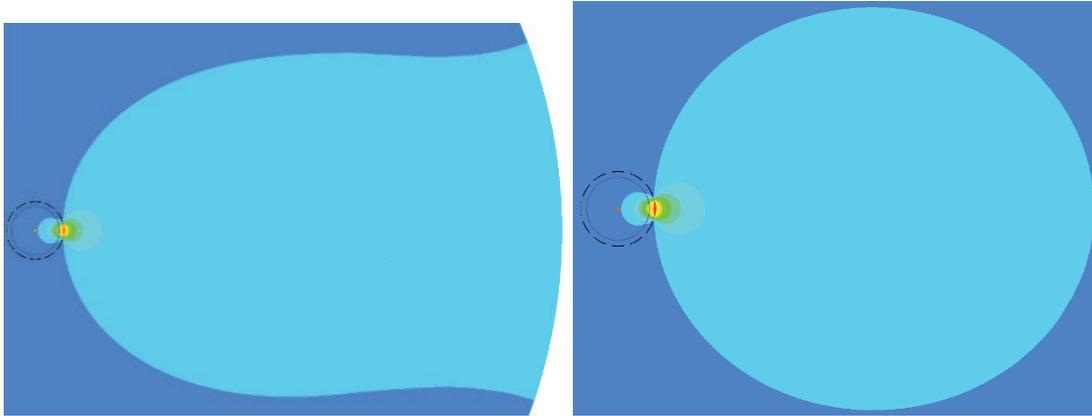


Figura 4-12 - Distância da blindagem externa a 350 mm (esq.) e 500 mm (dir.) com ar

Como podemos observar através da distribuição do potencial elétrico entre a Figura 4-15 e a Figura 4-18, à medida que distanciamos a blindagem do sensor temos uma menor interferência da blindagem nos resultados das simulações e, por consequência, nos valores de capacitância, sendo válido lembrar que a idéia de utilizar a blindagem externa é eliminar os ruídos externos causados por equipamentos elétricos que estejam próximos a instalação do sensor, como motores, alternadores, inversores de frequência entre outros.

Para definirmos a melhor distância que a blindagem externa deve ter em relação aos eletrodos, foram feitas várias simulações onde a variação da capacitância para cada par de eletrodos tendo como referência a distância de 300 mm é demonstrada para o tubo cheio de água na Figura 4-13 e cheio de ar na Figura 4-14. Logicamente, o valor ideal para esta blindagem seria um valor na ordem dos 500 mm o que torna totalmente inviável a construção do sensor devido ao espaço a ser utilizado que, nesta condição, seria um sensor de 1,04 m para um sensor de 40 mm de diâmetro. Tendo em vista que a partir de uma distância de 40 mm a variação dos valores de capacitância, em relação aos valores de referência (300 mm), é pequena, escolheu-se este valor como mais adequado. Desta maneira, o sensor apresenta um diâmetro de 120 mm.

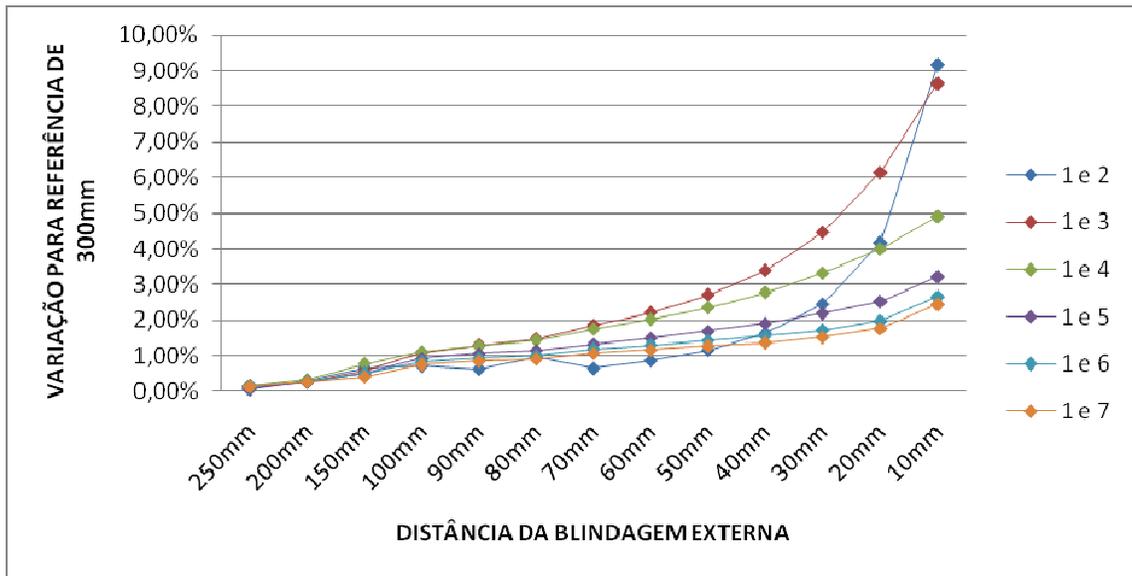


Figura 4-13 – Variação da capacitância em função da distância da blindagem, em relação a referência de 300 mm, para água

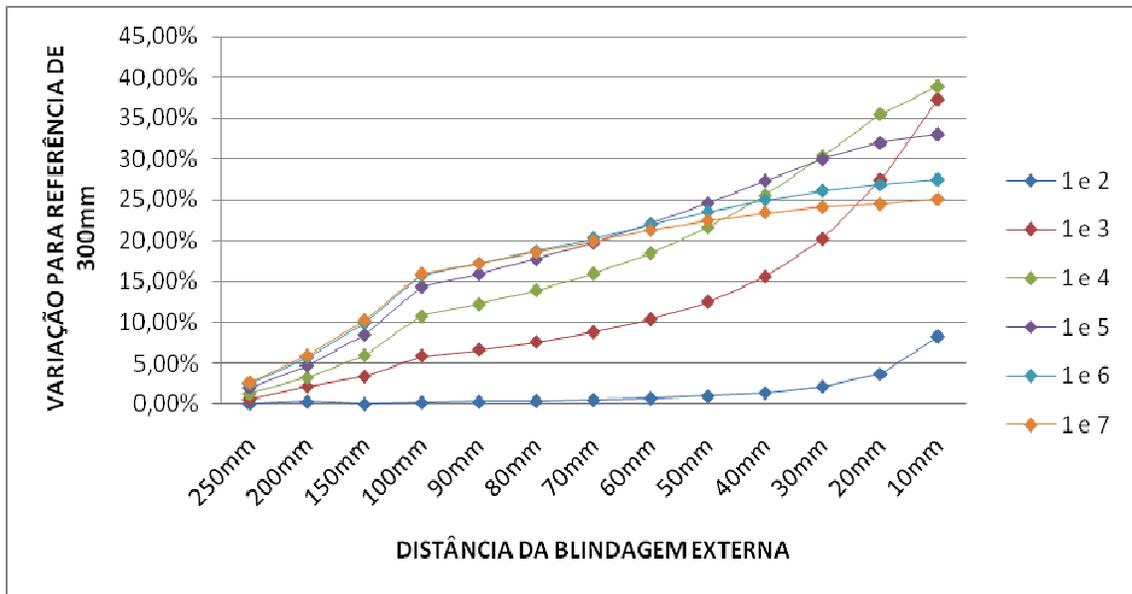


Figura 4-14 - Variação da capacitância em função da distância da blindagem, em relação a referência de 300 mm, para ar

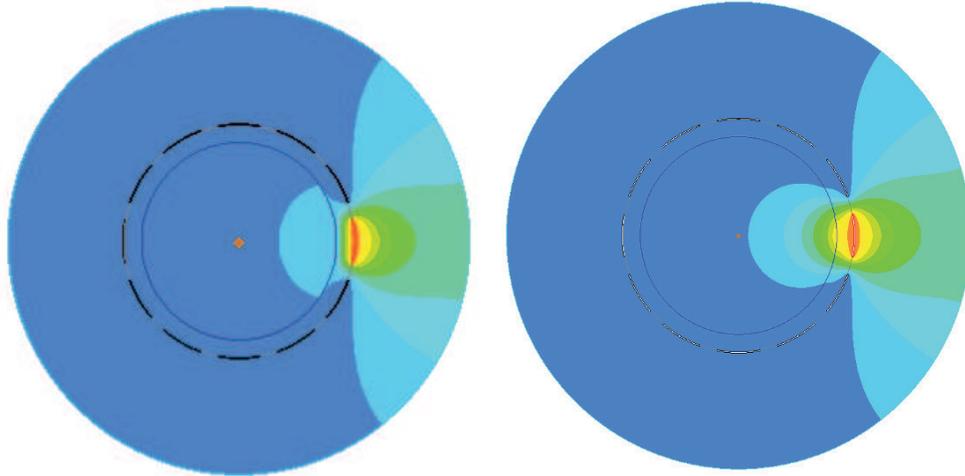


Figura 4-15 – Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 20 mm dos eletrodos – núcleo com água (esq.) e ar (dir.)

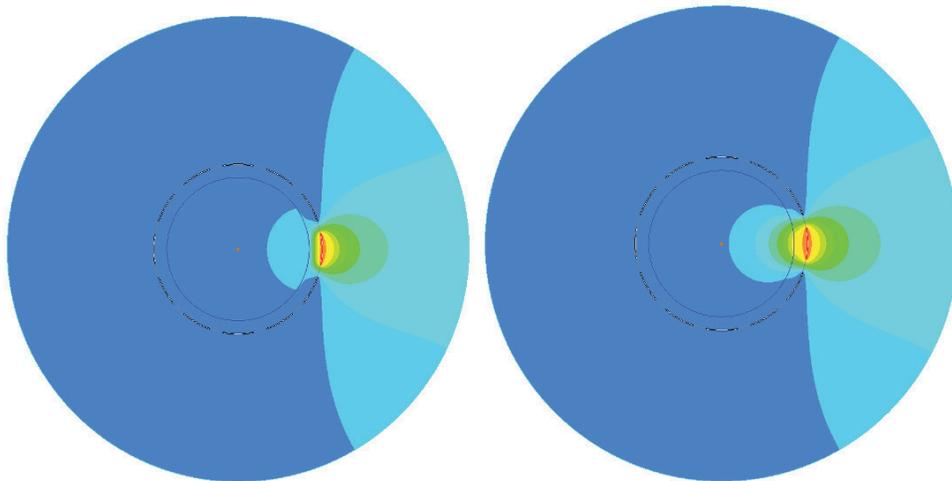


Figura 4-16 - Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 35 mm dos eletrodos - núcleo com água (esq.) e ar (dir.)

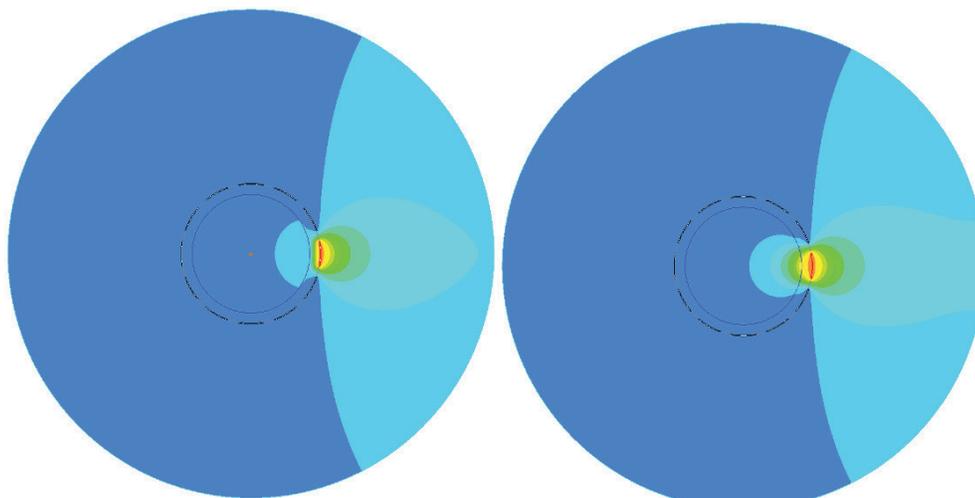


Figura 4-17 - Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 50 mm dos eletrodos - núcleo com água (esq.) e ar (dir.)

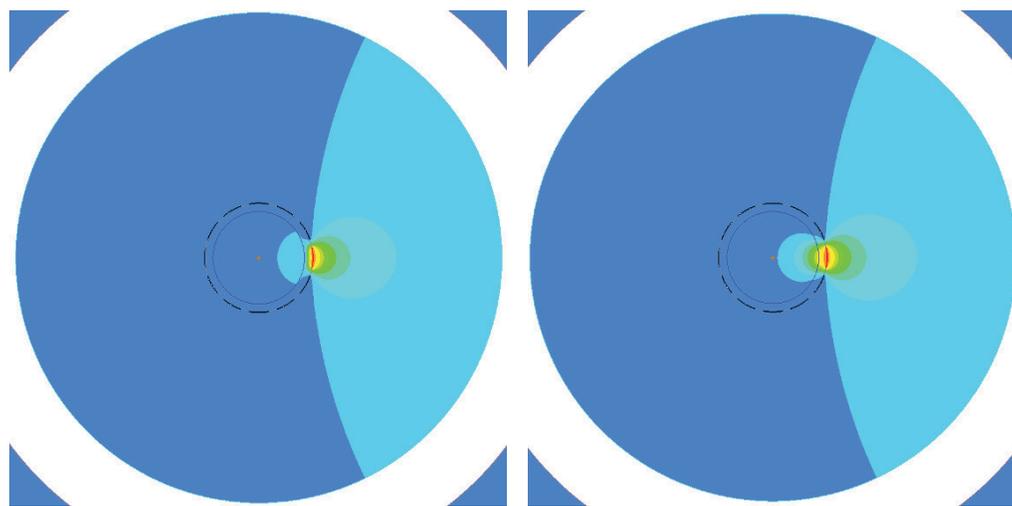


Figura 4-18 - Distribuição do potencial elétrico para a blindagem a 70 mm dos eletrodos - núcleo com água (esq.) e ar (dir.)

4.5 Estudo dos eletrodos de guarda

O efeito de borda é um fenômeno que somente ocorre nas simulações tridimensionais, uma vez que a simulação bidimensional considera o comprimento da tubulação e dos eletrodos como infinita. Como deseja-se buscar o desenvolvimento do sensor, se faz importante a simulação tridimensional para o completo entendimento do fenômeno eletrostático na obtenção da capacitância. Quando passa-se a modelagem para tridimensional, começam a surgir os efeitos de borda que são a diferença de capacitância devido ao fato de o sensor ser do tipo *soft field*, fazendo com que a região no comprimento axial da tubulação não coberta pelo sensor sirva de caminho para a distribuição do campo elétrico. Para melhor entender a necessidade dos eletrodos de guarda, foram simulados três casos diferentes. Na Tabela 4-11 são apresentados os resultados obtidos para um trecho de tubulação de 50 mm de comprimento, com eletrodos de 10 mm de comprimento, sem eletrodos de guarda e sem blindagem externa. Na Tabela 4-12 são apresentados os resultados obtidos com a adição de eletrodos de guarda de 10 mm de comprimento, separados de 1 mm dos eletrodos sensores. Finalmente, na Tabela 4-13 são apresentados os resultados obtidos com a adição de uma blindagem externa localizada a 40 mm dos eletrodos, além da adição dos eletrodos de guarda. Pode-se observar que os resultados dos eletrodos de guarda aproximam bastante os resultados tridimensionais dos resultados da solução exata bidimensional.

Tabela 4-11 - Simulação 3D sem guarda (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
120	1	4,0394	18,875	367,27%
120	3	11,819	38,071	222,12%
120	5	18,998	52,459	176,13%
120	10	34,096	77,074	126,05%
120	20	54,911	103,51	88,51%
120	30	68,217	117,46	72,19%
120	50	84,037	131,91	56,97%

120	80	96,276	141,82	47,31%
120	100	101,11	145,49	43,89%

Tabela 4-12 - Simulação 3D com guarda (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
120	1	4,0394	1,0753	73,38%
120	3	11,819	3,1606	73,26%
120	5	18,998	5,0941	73,19%
120	10	34,096	9,1574	73,14%
120	20	54,911	14,684	73,26%
120	30	68,217	18,142	73,41%
120	50	84,037	22,164	73,63%
120	80	96,276	25,204	73,82%
120	100	101,11	26,388	73,90%

Tabela 4-13 - Simulação 3D com guarda e blindagem (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
120	1	4,0394	1,4884	63,15%
120	3	11,819	4,2312	64,20%
120	5	18,998	6,7052	64,71%
120	10	34,096	11,808	65,37%
120	20	54,911	18,687	65,97%
120	30	68,217	22,998	66,29%
120	50	84,037	28,037	66,64%
120	80	96,276	31,867	66,90%
120	100	101,11	33,365	67,00%

A Figura 4-19 apresenta uma comparação dos três casos simulados.

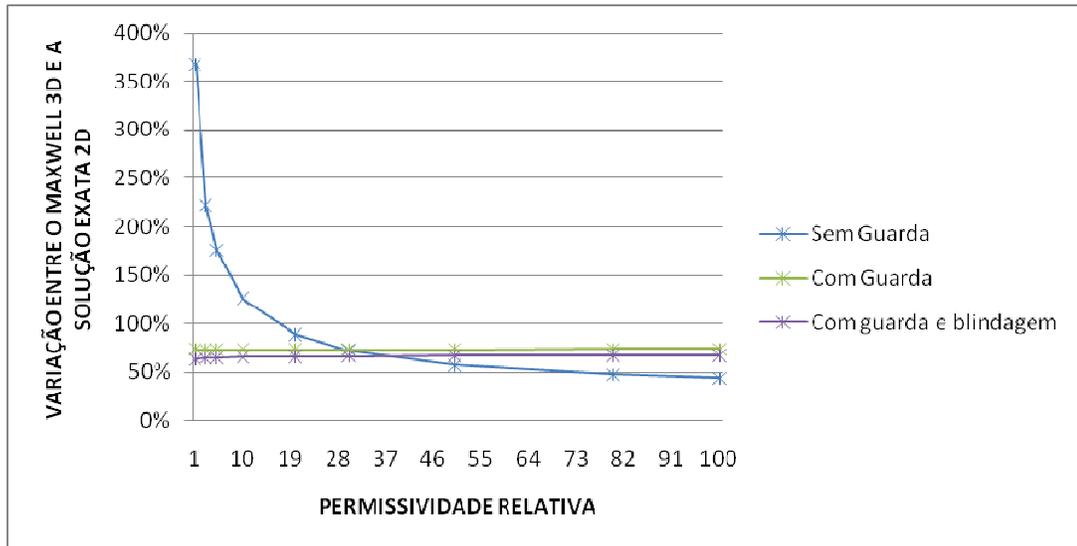


Figura 4-19 – Comparação das simulações 3D com a solução exata

Observamos na Figura 4-19 que, para um sensor sem guarda, o erro em relação à solução de Geraest e Borst (1988) apresentada na equação (2.6) é uma curva exponencial negativa com valores mais próximos da solução exata bidimensional quando a permissividade do meio é maior que 30, mas que alcança erros elevados para baixa permissividade relativa como a do ar, por exemplo, que tem o valor de 367,27%.

Nos casos da instalação da guarda, podemos perceber que o erro se mantém na ordem de 60% a 70%, representando um desvio em relação ao esperado, porém a diferença de capacitância para a água ($\epsilon_r = 80$) e o ar ($\epsilon_r = 1$) se mantém a mesma. Portanto, o uso dos eletrodos de guarda é de fundamental importância na construção do sensor.

Para o sensor com guarda e blindagem, foi feita a simulação numérica da distribuição do potencial elétrico, para água e para ar, e os resultados são apresentados na Figura 4-20.

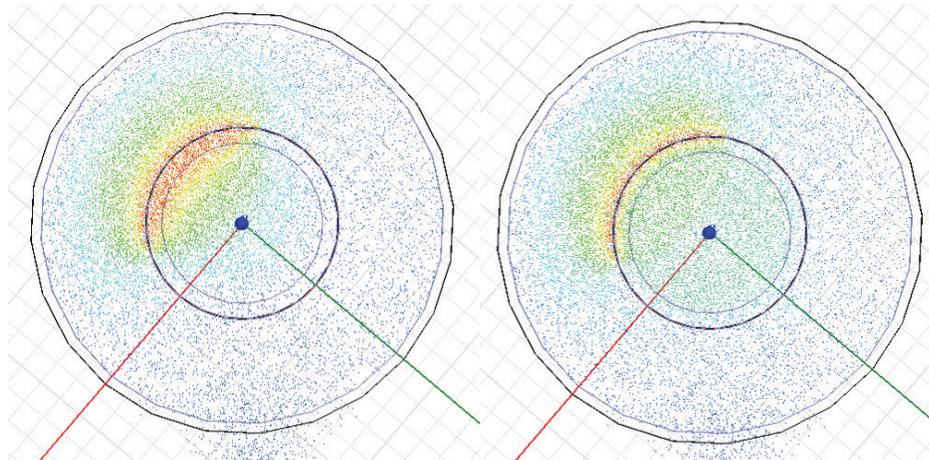


Figura 4-20 - Distribuição do ϕ com guarda e blindagem – água (dir.) e ar (esq.)

4.6 Utilização dos aterramentos axiais

Os aterramentos de finalização axiais, com comprimento de 5 mm, foram simulados com o intuito de substituir os eletrodos de guarda para redução do efeito de borda.

A Tabela 4-14 apresenta os resultados obtidos com o aterramento axial no lugar dos eletrodos de guarda. Pode-se observar que o aterramento axial é bastante eficiente para reduzir o efeito de borda. A Figura 4-21 apresenta uma comparação entre três casos diferentes: sensor com eletrodos de guarda e sem blindagem, sensor com eletrodo de guarda e com blindagem e sensor com aterramento axial e blindagem.

Tabela 4-14 – Simulação 3D com aterramento axial (pF/m)

Ângulo	Permissividade	Solução Exata	Maxwell	Erro
120	1	4,0394	1,8881	53,26%
120	3	11,819	5,2963	55,19%
120	5	18,998	8,5196	55,16%
120	10	34,096	15,334	55,03%
120	20	54,911	24,523	55,34%
120	30	68,217	30,193	55,74%
120	50	84,037	36,702	56,33%
120	80	96,276	41,564	56,83%
120	100	101,11	43,445	57,03%

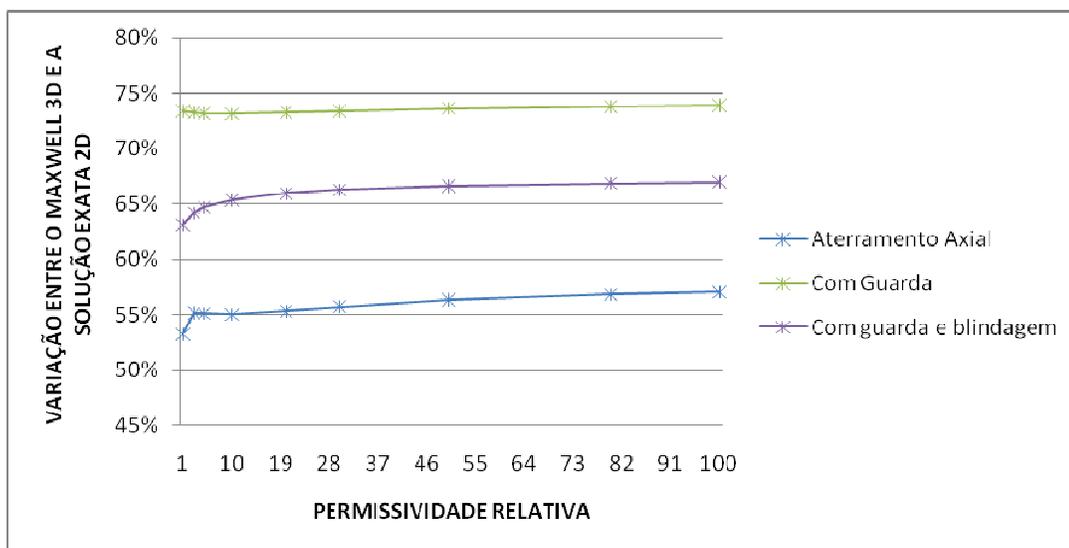


Figura 4-21 - Gráfico comparativo do eletrodo de guarda com aterramento axial

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4-21, o aterramento de finalização axial deve ser utilizado no lugar dos eletrodos de guarda para reduzir os efeitos de borda existentes na simulação tridimensional. Pois, além de apresentar resultados parecidos com os

obtidos pelos eletrodos de guarda, os eletrodos de finalização axial simplificam o hardware utilizado para o chaveamento dos eletrodos de guarda.

Analisando os vetores e a distribuição da intensidade do campo elétrico, representados na Figura 4-22 e na Figura 4-23, podemos perceber que a intensidade do campo é bem maior para ar do que para água, chegando até 336 V/m na parede interna da tubulação com ar e 33,6 V/m com água. Mas, para água percebemos que a distribuição do campo elétrico em todo o diâmetro é bem mais homogênea do que para o ar, isso devido a permissividade relativa da água que é muito maior que a do ar.

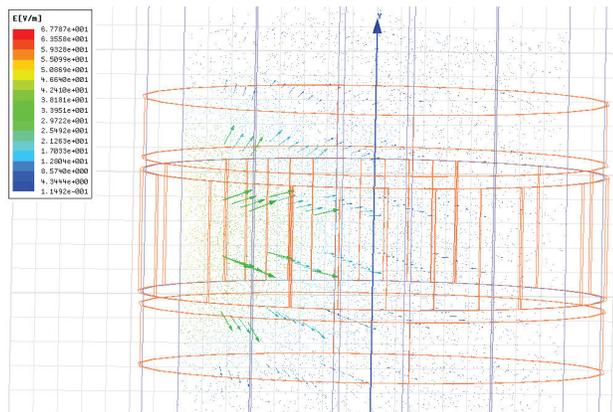


Figura 4-22 - Intensidade do campo elétrico para a água

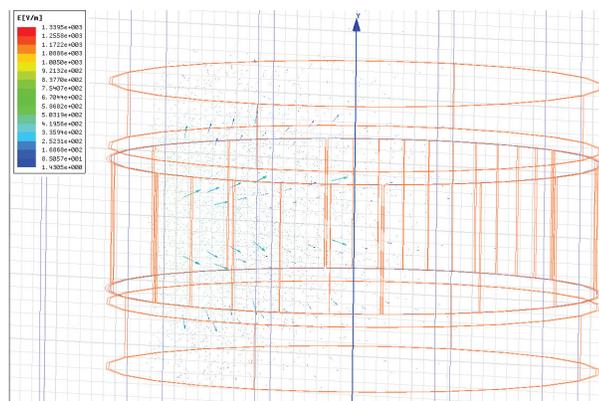


Figura 4-23 - Intensidade do campo elétrico para o ar

4.7 Resultados obtidos com a geometria final

A geometria definida neste projeto conta com as seguintes características: 12 eletrodos de 10 mm de comprimento espaçados em 9° entre si, tubulação com diâmetro de 40 mm e 3 mm de espessura de parede, aterramento axial em todo o contorno do sensor com comprimento de 5 mm, espaçado em 1 mm de distância antes e depois dos eletrodos sensores e malha de aterramento externo concêntrica com o sensor com um diâmetro de 120 mm.

Com a geometria final apresentada pela Figura 4-24, foram realizadas mais uma série de simulações com o intuito de se verificar o que acontece com o sensor com a mudança de ar para água no interior da tubulação.

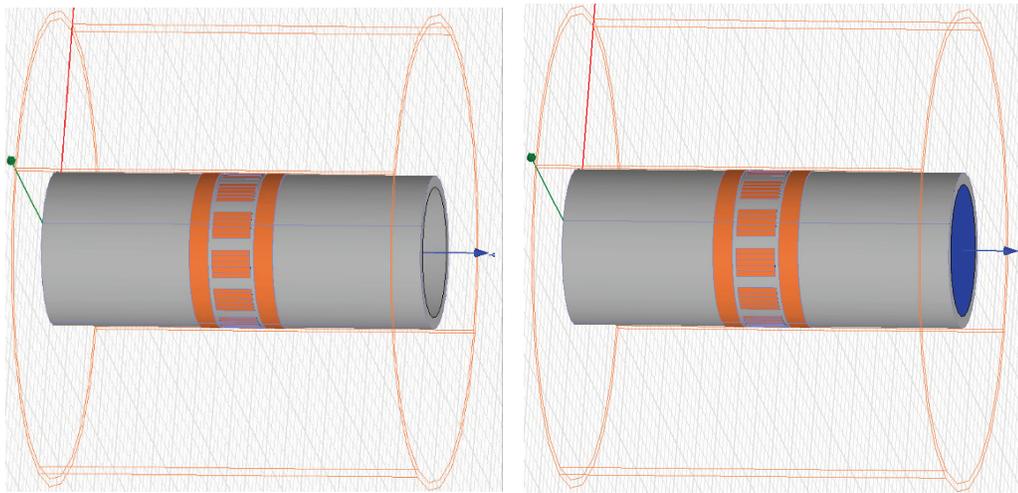


Figura 4-24 - Modelo final com ar (esq.) e água (dir.)

A Figura 4-25 mostra alguns passos da simulação onde o conteúdo da tubulação foi gradativamente mudando de ar para água, mostrando a sequência da mudança completa do ar para a água.

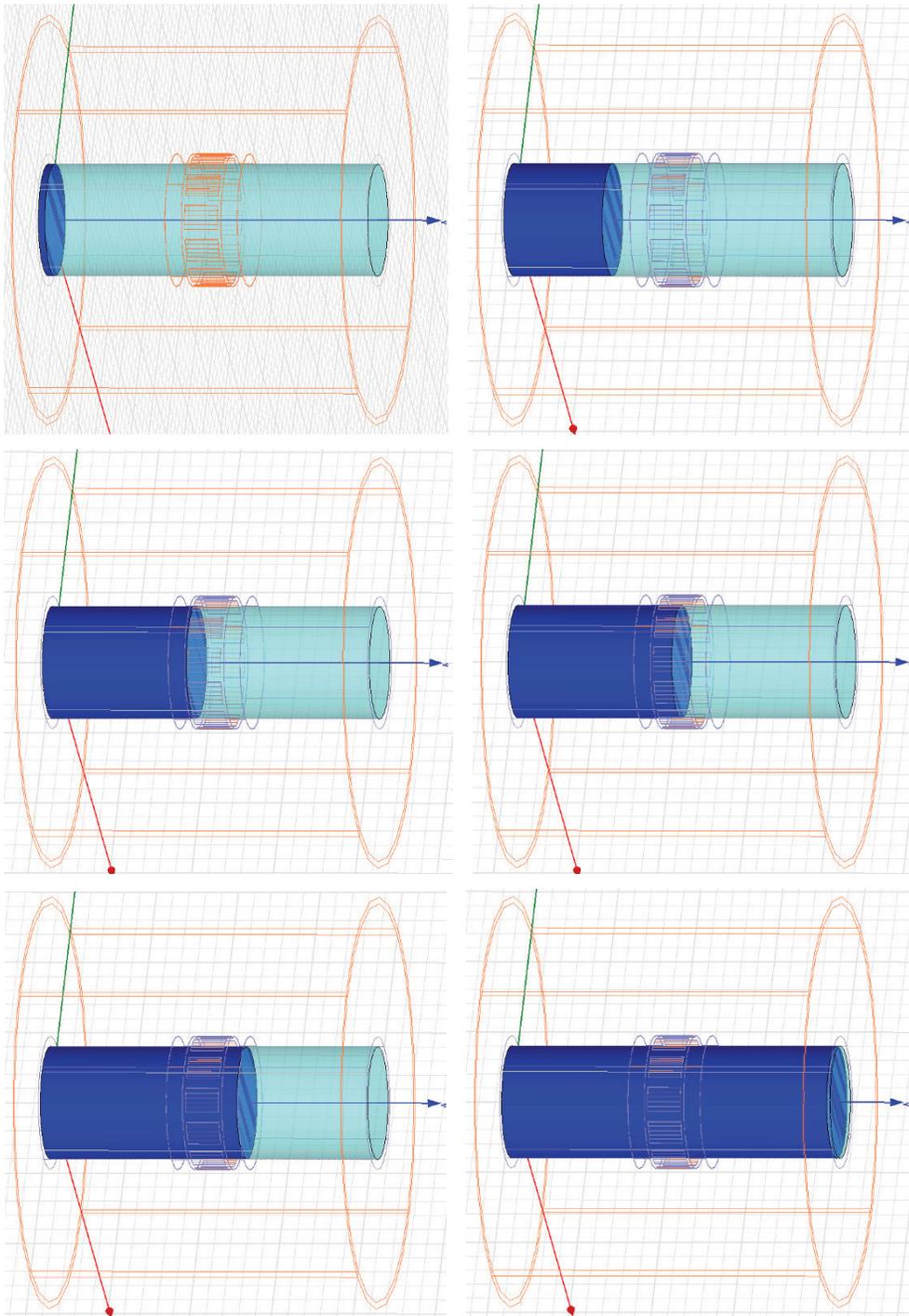


Figura 4-25 – Simulação da mudança gradual de ar para água no interior do sensor

Podemos notar na Figura 4-26 que existe uma clara mudança na capacitância à medida que a interface ar-água percorre a tubulação. Onde o eletrodo de aterramento axial começa em 39 mm indo até 44 mm com um espaçamento de 1 mm para os eletrodos fonte e receptores, que vão de 45 mm à 55 mm e o outro eletrodo de aterramento axial vai de 56 mm à 61 mm. Um ponto interessante a ser destacado é que o par adjacente apresenta um comportamento diferente dos pares formados pelos outros eletrodos não adjacentes.

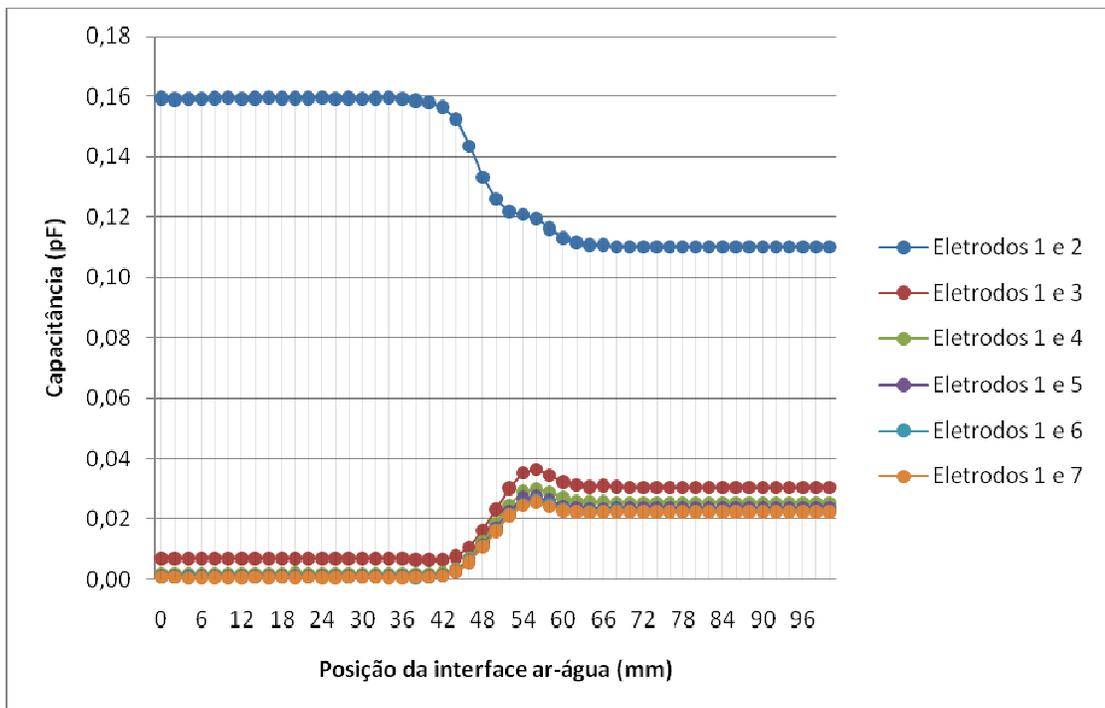


Figura 4-26 – Gráfico de simulação da dinâmica do sensor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e as sugestões para trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa.

5.1 Conclusões

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de simular, numericamente, o comportamento de um sensor de tomografia capacitiva trabalhando com diferentes tipos de escoamentos bifásicos do tipo ar-água. Ele alcançou seu objetivo final de gerar um modelo de sensor aplicável à detecção de capacitância para geração de imagem, tendo como vantagem minimizar possíveis retrabalhos após a fabricação do sistema, além de já contar com resultados esperados para construção dos mapas de sensibilidade e geração da imagem com a utilização de algum algoritmo de reconstrução de imagens.

O software de simulação numérica utilizado apresentou boa resposta para as simulações bidimensionais, tendo alcançado resultados com um erro inferior a 0,1% em relação à solução exata. Para as simulações tridimensionais foram obtidos erros na ordem de 5%, o que é um valor razoável se verificarmos que a solução usada como referência era bidimensional e não contemplava os efeitos de borda, sem mencionar os erros computacionais que nesta modalidade de simulação são maiores devido à condição espacial do modelo.

O espaçamento entre eletrodos foi definido com a simulação bidimensional. Em princípio, com um maior ângulo dos eletrodos, maior seria o valor de capacitância. Porém, de acordo com a simulação, o valor de capacitância somente é grande para o par de eletrodos adjacentes, deixando todos os outros valores, principalmente com tubo cheio de ar, na ordem de 0,2 pF/m. Assim, o sistema de tomografia teria que ser capaz de medir desde baixos valores de capacitância até altos valores na ordem de 30 pF/m, com uma precisão muito boa em toda a escala. Como alternativa foi escolhido um espaçamento de nove graus, que apresentou valores entre 0,13 pF/m e 10 pF/m,

assim, a precisão do circuito de transdução permanece praticamente a mesma com uma redução de três vezes no valor de fundo de escala.

A blindagem externa, que tem a função de isolar o sensor de interferências, foi simulada de forma bidimensional com a finalidade de obtermos um maior entendimento de sua influência sobre o campo elétrico no sensor e ajudar a definir a melhor geometria a ser utilizada. Vimos também que a distância ideal para a blindagem seria entre 350 mm e 500 mm, pois estes valores resultariam em pouca ou nenhuma influência na distribuição do campo elétrico e menor interferência no resultado da capacitância. Mas como tem-se que se adequar as condições reais, onde a distância da blindagem não deve ultrapassar muito o valor de uma ou duas vezes o diâmetro do sensor, foi realizada a simulação de valores de 300 mm até 10 mm. Com estas simulações chegamos a um resultado para a distância que o aterramento externo, ou Gaiola de Faraday, deve ter em relação ao sensor igual a 40 mm, deixando assim, o diâmetro do sensor igual a 120 mm.

A utilização dos eletrodos de guarda e sua eficiência para atenuação do efeito de borda, foi simulada de forma tridimensional e apresentou um melhor resultado em relação à simulação somente com os eletrodos, pois ela manteve o mesmo erro em relação à solução exata para qualquer valor de permissividade relativa, enquanto que a simulação somente com os eletrodos resultou em erro que varia junto com a permissividade, causando uma maior indefinição no valor esperado pela simulação. Porém, apesar de os eletrodos de guarda terem se mostrado de grande utilidade, eles foram substituídos com sucesso pelos eletrodos de aterramento axial de finalização que mantiveram a mesma característica do erro ser constante para qualquer valor de permissividade, com um valor do erro um pouco menor, além do fato de que este tipo de estrutura reduz drasticamente a complexidade do circuito eletrônico de transdução, pois onde seria necessário o chaveamento para conexão ao potencial alto ou neutro se torna apenas uma ligação direta do eletrodo de cobre ao terra do circuito.

O trabalho foi finalizado com a apresentação da geometria final e a simulação da dinâmica do sensor com a mudança completa de ar para água em seu interior. Com isto, foi possível verificar o comportamento do sensor, apresentando uma mudança na capacitância a medida que a permissividade relativa começa a mudar na proximidade dos eletrodos de aterramento de finalização axial e estabiliza após o outro eletrodo de finalização axial.

Assim, foi constatado que a geometria projetada atende às exigências a que o sensor se propôs, além de demonstrar que na maioria dos casos a simulação tridimensional deve ser utilizada, uma vez que, a simulação bidimensional não contempla todos os efeitos que interferem no resultado final da capacitância.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com este trabalho é sugerido que sejam feitos os seguintes trabalhos no futuro:

- Construção do sensor e comparação dos resultados experimentais com os apresentados neste trabalho.
- Construção de um sistema completo de tomografia para aplicação do sensor aqui desenvolvido.
- Aprofundar os estudos sobre o desempenho do sensor em relação a diferentes padrões de escoamento.
- Aprofundar os estudos sobre o desempenho dinâmico do sensor.

Referências

ANSOFT Maxwell 2D 2006: Electrical Engineering Simulation Software. Version 5.0.909. [S.I.]: Ansoft Corporation 2006.

ANSOFT Maxwell 3D 2006: Electrical Engineering Simulation Software. Version 11.1. [S.I.]: Ansoft Corporation 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24p.

AZEVEDO FILHO, A. C. **Desenvolvimento de um Sistema de Tomografia Capacitiva para Processos Multifásicos**. 2002. 306p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CAO, Z.; XU, L.; WANG, H. Image reconstruction technique of electrical capacitance tomography for low-contrast dielectrics using Calderon's method. **Measurement Science and Technology**. Manchester, v. 20, 2009.

CHEN, D.; ZHENG, G.; YANG, C.; YU, X. **Optimized Design and Simulation of Electrical Capacitance Sensor for Electrical Capacitance Tomography System**. Harbin, 2002.

FLORES, N.; GAMIO, J. C.; ORTIZ-ALEMÁN, C.; DAMIÁN, E. **Sensor Modeling for an Electrical Capacitance Tomography System Applied to Oil Industry**. Boston, 2005.

FRANÇA, F. A. **Modelagem de Escoamentos Multifásicos**. Campinas: MultiPhase_2008_1, 2008. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/ffranca>>. Acesso em: 08 mar.2010.

GALVIS, R. A. M. **Simulação Numérica do Comportamento do Sensor de Capacitância para Monitoramento de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow**. 2009. 117p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GERAETS, J. J. M.; BORST J. C. A. A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification. **International Journal Multiphase Flow**. Londres, v. 14, 1988. p. 305-320.

HUANG, S. M.; XIE, C. G.; THORN, R.; SNOWDEN, D.; BECK, M. S. Design of sensor electronics for electrical capacitance tomography. **IEE Proceedings-G**. Manchester, v. 139, 1992. p. 83-88.

ISAKSEN, Ø. A review of reconstruction techniques for capacitance tomography. **Meas. Sci. Technol.** Manchester, v. 7, 1996. p. 325-337.

JAWORSKI, A. J.; BOLTON, G. T. The design of an electrical capacitance tomography sensor for use with media of high dielectric permittivity. **Measurement Science and Technology**. Manchester, v. 11, 2000. p. 743-757.

KOLEV, N. I. **Multiphase Flow Dynamics 1. 2.** ed. Berlin: Springer-Verlag, 2005. p. IX-XI.

LEI, J.; LIU, S.; LI, Z. H.; SUN, M. Image reconstruction algorithm based on the extended regularized total least squares method for electrical capacitance tomography. **IET Sci. Meas. Technol.** Beijing, v. 2, 2008. p. 326-336.

LEI, J.; LIU, S.; LI, Z. H.; SUN, M. An image reconstruction algorithm based on the extended Tikhonov regularization method for electrical capacitance tomography. **Measurement**. Beijing, v. 42, 2009. p. 368-376.

LIU, S.; YANG, W. Q.; WANG, H. **An electrical capacitance tomography sensor with Internal-external electrodes**. Beijing, 2001.

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. 1 ed., v.1, Londres: Oxford at the Clarendon Press, 1873. p. 30-66.

MAXWELL, J. C. A Dynamical Theory of the Eletromagnetic Field, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Londres, v.155, 1865. p. 459-512.

OERTEL, H. **Applied Mathematical Sciences 158 - Prandtl's Essetials of Fluid Mechanics**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 2004. p. 453-464.

PEI, T.; WANG, W. **Simulation Analysis of Sensitivity for Electrical Capacitance Tomography**. Baoding, 2009.

PENG, L.; MOU, C.; Yao, D.; ZHANG, B.; XIAO, D. Determination of the Optimal axial length of the electrode in an electrical capacitance tomography sensor. **Flow Measurement and Instrumentation**. Beijing, v.16, 2005.

THIDÉ, B. **Eletromagnetic Field Theory**. 1 ed. Uppsala: Upsilon Books, 2006. p. 1-17.

WALLINGER, C.; WATZENIG, D.; STEINER, G. Inverse Problem Solution in Electrical Capacitance Tomography using Monotonicity and Least Squares. **EngOpt 2008 – International Conference on Engineering Optimization**. Rio de Janeiro, 2008.

WANG, F.; MARADESH, Q.; FAN, L. S.; WARSITO, W. Electrical Capacitance Tomography: Design and Applications. **Sensors**. Ohio, v.10, 2010. p. 1890-1917.

WEGLEITER, H.; FUCHS, A.; HOLLER, G.; KORTSCHAK, B. Development of a displacement current-based sensor for electrical capacitance tomography applications. **Flow Measurement and Instrumentation**. Graz, v.19, 2008. p. 241-250.

XIE, C. G., STOTT, A. L., PLASKOWISKI, A., BECK, M. S. Design of capacitance electrodes for concentration measurement of two-phase flow. **Measurement Science and Technology**. Manchester, v.1, 1990. p. 65-78.

YANG, W. Q. Modeling of capacitance tomography sensors. **IEE Proc. Sci. Meas. Technol.** Manchester, v. 144, 1997. p. 203-208.

YANG, W. Q. Further developments in an ac-based capacitance tomography system. **Review of Scientific Instruments**. Manchester, v. 72, 2001.

YANG, W. Design of electrical capacitance tomography sensors. **Measurement Science and Technology**. Manchester, v. 21, 2010.

ZANGL, H.; FUCHS, A.; BRETTERKLIEBER, Th. **Non-invasive measurements of fluids by means of capacitive sensors.** Graz, 2009.

ZHANG, L.; TIAN, P.; JIN, X.; TONG, W. Numerical Simulation of forward problem for electrical capacitance tomography using element-free Galerkin method. **Engineering Analysis with Boundary Elements.** Baoding, v. 34, 2010. p. 477-482.

ZHAO, T.; TAKEI, M.; BASARIO, K. G. Imaging and Visualization of Multiphase Fluid Flow by different reconstruction method for Electrical Computer Tomography. **Journal of Physics: Conference Series.** Tokyo, v. 147, 2009.

APÊNDICE A – Programa computacional para solução 2D

```

clear all
close all
format long e
clc
% =====
% DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
% =====
E0=8.854238837e-12;
E1=81; % Região do núcleo - água = 81
E2=1.0006; % Região externa - ar = 1.0006
E3=3.5; % Tubo feito em (polimetilmetacrilato) acrílico = 2.8~4 (3.5)
Ang_Elet=90; % ângulo do eletrodo
R1=10; % Raio do núcleo (da água)
R2=17; % Raio interno do tubo (do ar)
R3=20; % Raio externo do tubo (acrílico)
% =====
% CONSTANTES DE ADMENSIONALIZAÇÃO E ÂNGULOS
% =====
Theta1=Ang_Elet*pi/360;
Theta2=((360-2*Ang_Elet)*pi/360)+Theta1;
A=E1+E2;
B=E2+E3;
C=E3-E2;
D=E2-E1;
F1=(R2/R1)^2;
F2=(R3/R2)^2;
F3=(R3/R1)^2;
% =====
% ERRO MÁXIMO PERMITIDO
% =====
EMP=1e-12;
% =====
% VERIFICANDO PONTO DE CONVERGÊNCIA
% =====
Erro=10;
n = 0;
while Erro >= EMP
    n=n+1;
    SOMA(n)=[4*(A*C*F1^n+B*D)*sin(n*Theta1)*sin(n*Theta2)]/[n*(C*D*F2^n+...
        A*B*F3^n+A*C*F1^n+B*D)];
    if n>=2
        Erro=abs(SOMA(n)-SOMA(n-1));
    end
end
ST=sum(SOMA);
% =====
% CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA
% =====
Cap=(2*E0*E3/pi)*[log((sin((Theta1+Theta2)/2))/(sin((Theta2-Theta1)/2)))-ST]

```