

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE ELABORADA POR Rodrigo Andrés  
Martínez Galvis E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27/07/09  
Luiz Felipe Moura  
ORIENTADOR

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

# **Simulação Numérica do Comportamento do Sensor de Capacitância para Monitoramento de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow**

Autor: Rodrigo Andrés Martínez Galvis  
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

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

# **Simulação Numérica do Comportamento do Sensor de Capacitância para Monitoramento de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow**

Autor: Rodrigo Andrés Martínez Galvis  
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Térmica e Fluídos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009  
S.P . – Brasil

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

M365s                      Martínez Galvis, Rodrigo Andrés  
                                    Simulação numérica do comportamento do sensor de  
                                    capacitância para monitoramento de escoamento  
                                    multifásico do tipo Core-Flow / Rodrigo Andrés  
                                    Martínez Galvis. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

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

                                    1. Tubulação - Dinamica dos fluidos. 2. Fluxo  
                                    viscoso. 3. Emulsões. 4. Simulação por computador. I.  
                                    Mendes, Luiz Felipe de Moura. II. Universidade  
                                    Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
                                    Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Numerical simulation of the capacitance sensor behavior for  
                                    multiphase core-flow monitoring

Palavras-chave em Inglês: Pipe fluid dynamics, Viscous flow, Emulsions,  
                                    Simulation computer

Área de concentração: Engenharia Térmica e de Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Antônio Carlos Bannwart, Paulo Seleglim Junior

Data da defesa: 27/07/2009

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 ACADEMICO**

**Simulação Numérica do Comportamento do  
Sensor de Capacitância para Monitoramento  
de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow**

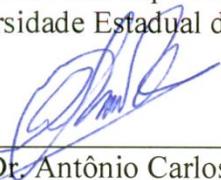
Autor: Rodrigo Andrés Martínez Galvis  
Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura

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. Antônio Carlos Bannwart  
Universidade Estadual de Campinas/FEM



---

Prof. Dr. Paulo Selegim Junior  
Universidade de São Paulo/EESC

Campinas, 27 de julho de 2009

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho à minha querida família Hilario, Blanca, Silvia e Mari. São tudo.

## **Agradecimentos**

Ao Jesus pela sabedoria.

Ao Professor Luiz Felipe Mendes de Moura pelo conhecimento transmitido, pela paciência e orientação durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Emerson Dos Reis pela ajuda.

Ao Professor Fabio Carvajal pela confiança e pela amizade.

Aos meus grandes amigos: Jairo e Oscar L.B., Charlie e Julian. Que sempre estão quando eu preciso. E todos os que conheci no grande Brasil e a M.I.

A todos muito obrigado.

*Porque é uma vantagem...*

## Resumo

MARTÍNEZ GALVIS, Rodrigo Andrés, *Simulação Numérica do Comportamento do Sensor de Capacitância para Monitoramento de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 92 p. Dissertação (Mestrado).

Os sistemas de transporte de óleos pesados, que adicionam um líquido de menor viscosidade como água, geram uma mistura que pode escoar em diferentes padrões. Um deles é o escoamento anular ou *core-flow*, onde a água escoar na região perimetral anular e o óleo na região central, permitindo uma diminuição da potência utilizada no transporte convencional. Quando são injetados óleo e água torna-se necessário monitorar o comportamento deste processo. Uma solução do problema consiste em utilizar uma sonda não-intrusiva, que utiliza a modificação do campo elétrico devida à diferença entre as permissividades do óleo e da água num capacitor de placas côncavas colocado na superfície externa da tubulação, de maneira que a distribuição das fases modifica a capacitância. Existem diferentes geometrias para os eletrodos, formas de colocar-los na tubulação, separação entre eletrodos, entre outros parâmetros que podem modificar o comportamento do sensor. Testar as diferentes configurações de forma experimental pode resultar árduo. Aproveitando a natureza do fenômeno e as leis físicas que o governam, é possível utilizar ferramentas computacionais e, mediante técnicas numéricas, obter soluções que ajudem a agilizar o processo de desenvolvimento. Pode-se testar um volume razoável de configurações e obter um mapa do comportamento do sistema, para que na etapa de testes sejam somente utilizados os parâmetros que deram as melhores respostas.

As simulações dependem da escolha de diferentes parâmetros e devem fornecer respostas não ambíguas, que possam ser lidas com um sistema eletrônico. Neste trabalho são levadas em conta diferentes situações presentes em escoamentos do tipo *core-flow* que afetam a medida feita pela sonda, como a variação do diâmetro do fluido que escoar na região central ( neste caso é o óleo), a excentricidade

que pode apresentar esta região, a mudança de permissividades devida às emulsificações ocasionadas na injeção do óleo na tubulação cheia de água e o efeito volumétrico do capacitor.

*Palavras chave*

Core-Flow, Efeito volumétrico, Emulsificação, Simulação Numérica, Capacitância.

## **Abstract**

The heavy oil transport systems, that add a liquid of lower viscosity as water, generate a mixture which can flow with different patterns. One of them is the core-flow, where water flow in the annular region and the oil in the core, allowing a reduction in the power used in the conventional transport. When oil and water are injected it becomes necessary monitoring the behavior of the process. One solution for this problem consists in use a non-intrusive probe, which uses a modification of the electric field due to the difference between the oil and the water permittivities, inside a capacitor of concave plates placed in the external surface of the pipe, thus the distribution of the phases modifies the capacitance. There are different geometries for the electrodes, ways for placing them in the pipe, separation between electrodes, among other parameters, which can modify the sensors behavior. Taking advantage of the nature of the phenomenon and the physical laws that govern it, is possible to use computational tools and, by numerical techniques, to get solutions that help expediting the development process. It can be tested a reasonable volume of configurations and getting a map of the behavior of the system, so that in the stage of testing only will be used the parameters which provided the best answers.

The simulations depend on the choice between different parameters and should not provide ambiguous answers, which can be read with an electronic system. In this work are taking into account different situations in draining of the core-flow kind that affect the measurement made by the probe, such as the variation of the diameter of the fluid that flows in the central region (in this case oil), the eccentricity that can show this region, the changes in the permittivity due to the emulsion produced in the oil injection in to the tubing full of water and the volumetric effect of the capacitor.

### *Key Words*

Core-Flow, Volumetric effect, Emulsion, Numerical Simulation, Capacitance.

## Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xviii
1 – Introdução	1
1.1 Escopo do trabalho	2
2 – Revisão da Literatura	3
2.1 Escoamentos multifásicos	3
2.1.1 Core-flow	4
2.1.2 Técnicas de tomografia de escoamentos multifásicos	4
2.2 Modelagem	6
2.2.1 Duas dimensões	11
2.2.2 Três dimensões	13
2.3 Simulação numérica	15
2.4 Modelos de emulsificação	17
3 – Metodologia	21
3.1 Abordagem do problema eletrostático	21

3.1.1 Capacitância	21
3.1.2 Caracterização dos meios	23
3.1.2.1 Condutores	24
3.1.2.2 Dielétricos	25
3.1.3 Condições de contorno	26
3.2 Pacote computacional	27
3.2.1 Procedimento geral	27
3.2.2 Avaliação do software Maxwell 2D/3D	29
3.2.2.1 Permissividade do ar e do vidro	35
3.2.2.2 Simulação numérica	36
4 – Simulação Numérica do Sensor de Capacitância	39
4.1 Descrição da sonda capacitiva	39
4.2 Solução numérica para núcleo concêntricos	42
4.3 Resultados numéricos para escoamento anular concêntrico	44
4.4 Resultados numéricos para escoamento anular excêntricos	61
5 – Emulsificação e Efeito Volumétrico	70
5.1 Emulsificação do sistema	70
5.2 Variação da capacitância com a emulsificação	77
5.3 Efeito Volumétrico	83
6 – Conclusões e Recomendações	91
6.1 Conclusões	91

6.2 Recomendações para trabalhos futuros	92
Referencia Bibliográficas	93

## Lista de Figuras

2.1	Escoamento horizontal <i>core-flow</i>	4
2.2	Modelo Básico Da Sonda Capacitiva	5
2.3	Comportamento dos campos elétricos de duas cargas de polaridades diferentes	7
2.4	Secção transversal do capacitor cilíndrico	12
2.5	Modelo típico para resolver as equações de Maxwell com FEM	16
2.6	Malha de elementos finitos em três dimensões	17
2.7	Processos de emulsão que influenciam as propriedades dielétricas	18
3.1	Capacitor de dois condutores	22
3.2	Condutor sob influencia de um campo elétrico	24
3.3	Condutor em condições estáticas	25
3.4	Átomo de um dielétrico: (a) $E=0$ , (b) sob campo elétrico	25
3.5	Resumo da solução de um problema mediante um programa computacional	28
3.6	Geometria de placas paralelas	30
3.7	Geometria de placas côncavas	31
3.8	Placas paralelas de cobre com dielétrico de vidro	33
3.9	Placas côncavas de cobre com dielétrico de vidro e ar	33
3.10	E4980A Precision LCR Meter	34
3.11	Dielectric Test Fixture	34

3.12	Permissividades do ar medidas para diferentes distancias entre placas	35
3.13	Distribuição do campo elétrico entre placas paralelas com meio isotrópico de vidro	36
3.14	Distribuição do campo elétrico 3D do modelo de placas paralelas	37
3.15	Distribuição 2D do campo elétrico entre placas côncavas	38
3.16	Dispersão do campo elétrico 3D do modelo de placas côncavas	38
4.1	Geometria do sensor de capacitância 2D	40
4.2	Montagem de dois sensores de capacitância	40
4.3	Geometria tridimensional do sensor de capacitância	41
4.4	Capacitâncias calculadas para $\theta = 5^\circ$	46
4.5	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 5^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j)	46
4.6	Capacitâncias calculadas para $\theta = 30^\circ$	47
4.7	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 30^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j)	47
4.8	Capacitâncias calculadas para $\theta = 35^\circ$	48
4.9	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j)	48
4.10	Capacitâncias calculadas para $\theta = 40^\circ$	49
4.11	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 40^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j)	49
4.12	Capacitâncias calculadas para $\theta = 50^\circ$	50
4.13	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 50^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j)	50
4.14	Capacitâncias calculadas para $\theta = 60^\circ$	51
4.15	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 60^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j)	51

4.16	Capacitâncias calculadas para $\theta = 70^\circ$	52
4.17	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 70^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j)	52
4.18	Capacitâncias calculadas para $\theta = 80^\circ$	53
4.19	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 80^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j)	53
4.20	Capacitâncias calculadas para $\theta = 90^\circ$	54
4.21	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 90^\circ$ e $s = 1$ mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j)	54
4.22	Capacitâncias calculadas para diferentes valores de $\theta$	57
4.23	Capacitâncias calculadas para o sensor recomendado	59
4.24	Capacitâncias calculadas e medidas para o sensor recomendado	60
4.25	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 29.9$ mm e $s = 1$ mm (a)	61
4.26	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 28.9$ mm e $s = 2$ mm (a), 1 mm (b)	62
4.27	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 27.9$ mm e $s = 3$ mm (a), 2 mm (b) , 1 mm (c)	62
4.28	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 26.9$ mm e $s = 4$ mm (a), 3 mm (b) , 2 mm (c) , 1 mm (d)	62
4.29	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 25.9$ mm e $s = 5$ mm (a), 4 mm (b), 3 mm (c) , 2 mm (d), 1 mm (e)	63
4.30	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 24.9$ mm e $s = 6$ mm (a), 5 mm (b), 4 mm (c) , 3 mm (d), 2 mm (e) , 1 mm (f)	63
4.31	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 23.9$ mm e $s = 7$ mm (a), 6 mm (b), 5 mm (c) , 4 mm (d), 3 mm (e) , 2 mm (f), 1 mm (g)	64
4.32	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 22.9$ mm e $s = 8$ mm (a), 7 mm (b), 6 mm (c) , 5 mm (d), 4 mm (e), 3 mm (f) , 2 mm (g) , 1 mm (h)	64

4.33	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 21.9$ mm e $s = 9$ mm (a), 8 mm (b), 7 mm (c), 6 mm (d), 5 mm (e), 4 mm (f), 3 mm (g), 2 mm (h), 1 mm (i)	65
4.34	Distribuição do campo elétrico para $\theta = 35^\circ$ , $R_c = 20.9$ mm e $s = 10$ mm (a), 9 mm (b), 8 mm (c), 7 mm (d), 6 mm (e), 5 mm (f), 4 mm (g), 3 mm (h), 2 mm (i), 1 mm (j)	66
4.35	Capacitâncias calculadas para diferentes valores de $\theta$	68
5.1	Modelo de Maxwell-Wagner	71
5.2	Modelo de Bruggeman-Hanai	71
5.3	Modelo de Lewis-Nielsen	72
5.4	Modelo de Pan	72
5.5	Comparação dos modelos de emulsificação	74
5.6	Comparação dos modelos de emulsificação como os dados experimentais	75
5.7	Comparação do modelo Bruggeman-Hanai com os dados experimentais	76
5.8	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 5%	77
5.9	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 10%	78
5.10	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 15%	78
5.11	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 20%	79
5.12	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 25%	79
5.13	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 30%	80
5.14	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 35%	80
5.15	Variação da capacitância em função de $s$ para emulsificação de 40%	81
5.16	Variação da capacitância para diferentes emulsificações	82
5.17	Vista lateral da secção de medida	83
5.18	Distribuição do campo elétrico for $s = 2$ mm onde $k = 25$ mm (a), 20 mm (b), 15 mm (c), 10 mm (d), 5 mm (e), onda no centro do eletrodo sensor (f)	84
5.19	Resultados da passagem de uma onda na sonda para $s = 2$ mm	85

5.20	Distribuição do campo elétrico for $s = 3$ mm onde $k = 25$ mm (a), 20 mm (b), 15 mm (c), 10 mm (d), 5 mm (e), onda no centro do eletrodo sensor (f)	86
5.21	Resultados da passagem de uma onda na sonda para $s = 3$ mm	86
5.22	Distribuição do campo elétrico for $s = 4$ mm onde $k = 25$ mm (a), 20 mm (b), 15 mm (c), 10 mm (d), 5 mm (e), onda no centro do eletrodo sensor (f)	87
5.23	Resultados da passagem de uma onda na sonda para $s = 4$ mm	87
5.24	Distribuição do campo elétrico for $s = 5$ mm onde $k = 25$ mm (a), 20 mm (b), 15 mm (c), 10 mm (d), 5 mm (e), onda no centro do eletrodo sensor (f)	88
5.25	Resultados da passagem de uma onda na sonda para $s = 5$ mm	88
5.26	Distribuição do campo elétrico for $s = 6$ mm onde $k = 25$ mm (a), 20 mm (b), 15 mm (c), 10 mm (d), 5 mm (e), onda no centro do eletrodo sensor (f)	89
5.27	Resultados da passagem de uma onda na sonda para $s = 6$ mm	83

## Lista de tabelas

3.1	Valores dos parâmetros modificados para simulação de capacitância em placas paralelas	30
3.2	Valores de ângulo e permissividades testadas em placas côncavas	31
3.3	Permissividade do ar	35
3.4	Permissividade do vidro	36
4.1	Nomenclatura das variáveis que afetam a capacitância	41
4.2	Permissividades dos meios homogêneos	42
4.3	Faixa de variação dos valores de capacitância para diferentes valores de $\theta$	58
4.4	Valores de capacitância do sensor recomendado	59
4.5	Valores de capacitância do sensor obtidos na calibração estática	60
5.1	Permissividades das emulsões	73
5.2	Erro (%) em relação aos resultados experimentais	76

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

<i>A</i>	Área de seção transversal do tubo	[m <sup>2</sup> ]
<i>B</i>	Campo magnético	[kg/A.s <sup>2</sup> ]
<i>C</i>	Capacitância	[F]
<i>D</i>	Densidade superficial de campo elétrico	[ <sup>a</sup> s/ m <sup>2</sup> ]
<i>d</i>	Altura do segmento de óleo	[mm]
<i>E</i>	Magnitude de campo elétrico	[V/m]
<i>e</i>	Espaçamento entre eletrodos	[mm]
<i>H</i>	Intensidade de campo magnético	[A/m]
<i>J</i>	Densidade superficial de corrente elétrica	[A/ m <sup>2</sup> ]
<i>k</i>	Distancia do segmento de óleo ao centro do eletrodo sensor	[mm]
<i>L<sub>g</sub></i>	Comprimento dos eletrodos de guarda	[mm]
<i>L<sub>s</sub></i>	Comprimento do eletrodo fonte	[mm]
<i>R<sub>c</sub></i>	Raio do núcleo	[mm]
<i>R<sub>e</sub></i>	Raio exterior da tubulação	[mm]
<i>R<sub>i</sub></i>	Raio interior da tubulação	[mm]
<i>R<sub>b</sub></i>	Raio da blindagem	[mm]
<i>Q</i>	Carga	[A.s]
<i>q</i>	Espessura do segmento de óleo	[mm]
<i>t</i>	Comprimento do eletrodo sensor	[mm]
<i>V</i>	Potencial	[V]

### ***Letras Gregas***

$\varepsilon$	Permissividade dielétrica relativa	[-]
$\varepsilon_o$	Permissividade dielétrica do espaço livre	[-]
$\Phi_E$	Potencial elétrico	[V/m]
$\Omega$	Ângulo sólido representado	[A/m <sup>2</sup> ]
$\gamma$	Ângulo de montagem	[°]
$\theta_1$	Ângulo de eletrodo Fonte	[°]
$\theta_2$	Ângulo do eletrodo sensor	[°]

### ***Abreviações***

<i>div</i>	Divergente
<i>curl</i>	Rotacional
SI	Sistema Internacional de Unidades

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas de transporte de óleos pesados que adicionam um componente de menor viscosidade como água geram uma mistura que pode escoar em diferentes padrões, um deles é o escoamento anular ou *core-flow*, onde a água escoar na região perimetral anular e o óleo na região central permitindo uma diminuição da potencia utilizada no transporte convencional. Uma vez são injetados o óleo e a água é necessário monitorar o comportamento deste processo, uma solução do problema se pranteia mediante a utilização duma sonda não-intrusiva que utiliza a modificação dos campos elétricos devida à diferença entre as permissividades do óleo e a água num capacitor de placas côncavas colocado na tubulação de maneira que cada distribuição das fases modifica a capacitância, mas existem diferentes geometrias para os eletrodos, formas de colocar na tubulação, separação entre eletrodos entre outros parâmetros que modificam o comportamento deste e testar as diferentes configurações de forma experimental pode resultar árduo. Aproveitando a natureza do fenômeno e as leis físicas que o governam, é possível utilizar ferramentas computacionais e, mediante técnicas numéricas, obter soluções que ajudem a agilizar o processo de desenvolvimento. Pode-se testar um volume razoável de configurações e obter um mapa do comportamento do sistema, para que na etapa de testes sejam somente utilizados os parâmetros que deram as melhores respostas.

As simulações dependem da escolha de diferentes parâmetros e devem fornecer respostas não ambíguas, que possam ser lidas com um sistema eletrônico. Neste trabalho são levadas em conta diferentes situações presentes em escoamentos do tipo *core-flow* que, afetam a medida feita pela sonda, como a variação do diâmetro do fluido que escoar na região central ( neste caso é o

óleo), a excentricidade que pode apresentar esta região e a mudança de permissividades devida às emulsificações ocasionadas na injeção do óleo na tubulação cheia de água.

## **1.1 Escopo do trabalho**

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao desenvolvimento de simulações de fenômenos eletrostáticos ligados ao estudo de escoamentos multifásicos.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia empregada na abordagem dos problemas eletrostáticos, relacionados com o cálculo da capacitância mediante técnicas computacionais.

Os modelos de geometrias selecionados para estudo e as equações gerais que representam o fenômeno físico estudado são descritos no capítulo 4. Na seqüência é realizado um estudo das características do sensor em relação ao escoamento anular concêntrico e excêntrico. Também é apresentada uma comparação entre os resultados numéricos obtidos com os resultados experimentais de outros trabalhos.

No capítulo 5 são descritos os modelos de emulsificação e é avaliado o desvio que ocorre na sonda capacitiva com núcleos concêntricos. Na seqüência é apresentado um estudo do efeito volumétrico mediante simulações tridimensionais.

## Capítulo 2

### Revisão Da Literatura

A partir da revisão bibliográfica procura-se criar fundamentos sobre o desenvolvimento de simulações de fenômenos eletrostáticos ligados ao estudo de escoamentos multifásicos. Primeiro se descreve o *core-flow* no item 2.1.1, seguido do enfoque de medição que será descrito no item 2.1.2. Depois, no item 2.2, enfoca-se na modelagem dos princípios físicos dos campos eletrostáticos. No item seguinte, 2.3, se estuda a influencia dos métodos numéricos na solução, finalizando com a definição de alguns modelos de emulsão W/O (*water-oil*).

#### 2.1 Escoamentos Multifásicos

Atualmente os escoamentos multifásicos estão presentes em diferentes processos industriais nas áreas das engenharias, ciências químicas e ciências médicas, sendo encontrados em vários tipos de configurações como: gás com partículas sólidas, gás com gotas líquidas, liquido com bolhas de gás, liquido com gotas líquidas e liquido com partículas sólidas. Basicamente este tipo de escoamento é caracterizado pela presença de uma ou mais fases de uma mesma substancia ou duas ou mais substancias diferentes, mesmo que na mesma fase.

Existem vários sistemas de escoamentos multifásicos agrupados por Hewitt (1978) da seguinte maneira: bolhas, pistonado, agitante, anular e anular com gotas agrupadas; conforme a quantidade crescente da segunda fase. O escoamento estudado seria o anular, também conhecido como *core-flow*.

### 2.1.1 Core-flow

A simulação numérica da sonda capacitiva está relacionada com a medida de escoamentos bifásicos sob características especiais, conhecido como *core-flow*, que consiste em injetar óleo em um duto cheio de água, para criar uma configuração anular, onde o óleo ocupa o centro do tubo e a água escoar junto à parede, como é apresentado na Figura 2.1, convertendo-se em uma espécie de lubrificante, que reduz a perda de carga significativamente, procurando uma forma de baixar os custos de transporte. A técnica foi apresentada pela primeira vez por Russell *et. al.* (1959) e Charles *et. al.* (1961), no Canadá, mas foi desenvolvida uma década depois por Ooms (1972), Joseph *et. al.* (1984) e Ooms *et. al.* (1984).



Figura 2.1- Escoamento horizontal *core-flow*.

Fonte: Hernandez (2007)

Quanto à estabilidade hidrodinâmica, Ooms (1972) explica que se a espessura da camada anular na parede é pequena em relação ao raio do tubo, ocorrerá um efeito de redução do crescimento das possíveis instabilidades devido ao desequilíbrio das velocidades interfaciais dos fluidos. Baseados na necessidade de medir esta e outras características do escoamento se desenvolveram diferentes técnicas de medida.

### 2.1.2 Técnicas de tomografia de escoamentos multifásicos

Existem diferentes métodos para a tomografia de escoamentos multifásicos como: por fluxo de nêutrons Hussein e Meneley (1986), ultra-som Plaskowski *et al.* (1987) e raios gama Kirouac *et al.* (1999). Além disso, existe uma técnica tomográfica baseada em capacitores tratada pelos autores Yi-ping e Gang (2005), York *et al.* (2006). Apesar dos enfoques serem diferentes, pois um é dirigido a escoamento de fluxo bifásico e outro a leituras de escoamentos microscópicos, a

estrutura física da sonda corresponde a um conjunto de eletrodos côncavos próximos à tubulação, que fornecem valores de capacitância em varredura de uma seção transversal. Cada capacitor por si mesmo vai ter um valor de dielétrico diferente, permitindo conhecer em detalhe a distribuição de permissividades.

Um sensor capacitivo é composto por um par de eletrodos e um circuito transdutor de capacitância. Os eletrodos são colocados na parede externa ou interna da tubulação, como placas que detectam a mudança da permissividade dielétrica do meio entre eles. No caso de *core-flow* o óleo e a água possuem permissividades dielétricas de 3 e 80 respectivamente, conforme Nobre (2006), onde dependendo da distribuição destas substâncias o capacitor apresenta um valor diferente. O conjunto de eletrodos é envolvido por uma blindagem externa (gaiola de Faraday), para evitar os campos eletromagnéticos externos. Além disso, existe uma técnica que relaciona o comprimento do capacitor e o diâmetro do tubo de forma a aumentar a precisão, tratada por Abdullah *et al.*(1995) onde se conclui que é melhor ter dita relação maior que um. Outro efeito produzido por capacitores de placas paralelas é chamado o efeito de borda onde as linhas de campo são dispersas para fora do capacitor, Reinecke e Mewes (1996) utilizam dois eletrodos colocados nos extremos horizontais do eletrodo sensor, chamados eletrodos de guarda, que minimizam este efeito. A Figura 2.2 apresenta um esquema em três dimensões da distribuição física dos eletrodos de uma sonda capacitiva montada sobre uma tubulação circular usando eletrodos côncavos.

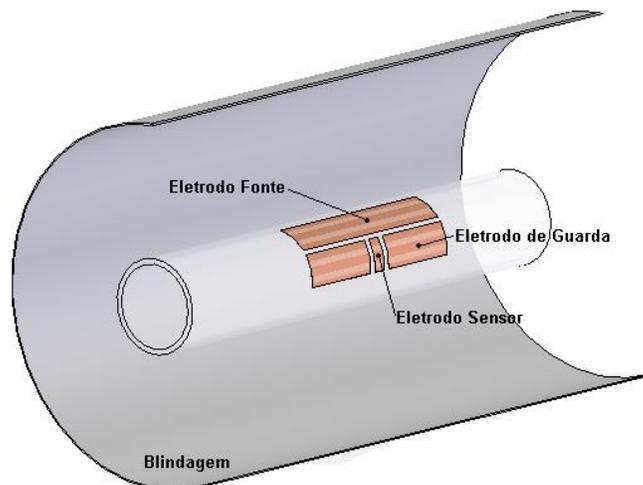


Figura 2.2.- Modelo Básico Da Sonda Capacitiva.

## 2.2 Modelagem

A modelagem de sondas capacitivas utilizando o método dos elementos finitos (MEF) é estudada por diferentes autores em duas e três dimensões. Neste contexto os fatores influentes transpassam as geometrias e as permissividades, pois os diferentes tipos de escoamento horizontal óleo-água tem influencia no valor da capacitância.

O calculo da capacitância entre dois eletrodos se fundamentam nos estudos realizados por Maxwell (1865), onde se descreve o comportamento dos campos elétrico e magnético e suas interações em quatro equações que relacionam os fenômenos físicos. A primeira explica como as cargas elétricas produzem campos elétricos, chamada Lei de Gauss; a segunda é ausência experimental de cargas magnéticas, a terça explica como a corrente elétrica produz campo magnético chamada Lei de Ampère e a quarta mostra como as variações de campo magnético produzem campos elétricos chamada Lei da indução de Faraday, Serway (1996). As equações diferenciais parciais governantes para o problema eletromagnético são:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 ; \text{ Lei de Gauss para indução magnética.} \quad (2.1)$$

$$\text{div } \mathbf{D} - \rho_f = 0 ; \text{ Lei de Gauss para campo elétrico.} \quad (2.2)$$

$$-\frac{\partial D}{\partial t} + \text{rot } \mathbf{H} - \mathbf{J}_f = \mathbf{J}_a ; \text{ Lei de Ampere.} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \text{rot } \mathbf{E} = 0 ; \text{ Lei de Faraday.} \quad (2.4)$$

Onde  $\mathbf{B}$  é a densidade superficial de fluxo magnético (unidade SI: tesla), também chamada de indução magnética,  $\mathbf{D}$  é o campo elétrico de deslocamento ou densidade superficial de campo elétrico (unidade SI: coulomb por metro quadrado),  $\mathbf{H}$  é a intensidade de campo magnético (unidade SI: ampère por metro),  $\mathbf{J}$  é a densidade superficial de corrente elétrica (unidade SI: ampère por metro quadrado) e  $\mathbf{E}$  é a intensidade de campo elétrico (unidade SI: volt por metro).

A modelagem de capacitâncias é um problema eletrostático, por tanto em princípio é descrito fisicamente por duas cargas de polaridade diferente como é apresentado na Figura 2.3.

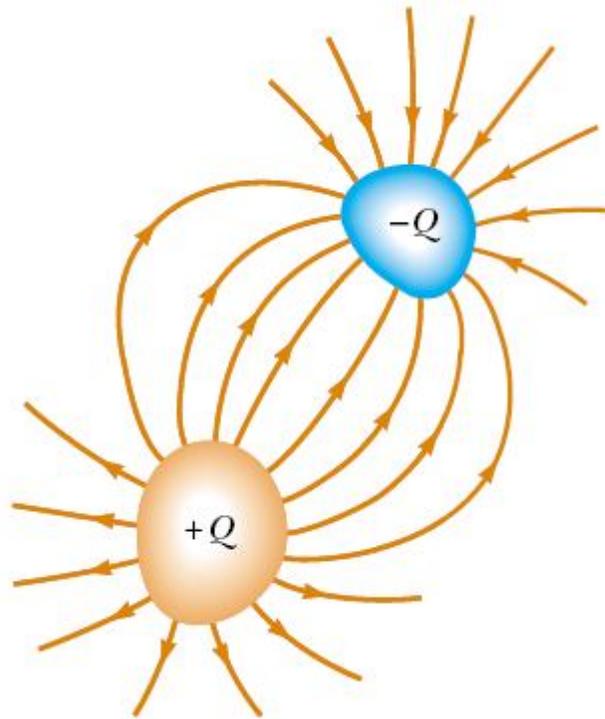


Figura 2.3. - Comportamento dos campos elétricos de duas cargas de polaridades diferentes.

Este tipo de situações relaciona duas variáveis, a quantidade de carga e a diferença de potencial entre as cargas, sendo esta uma relação linear segundo a lei de Coulomb, Eq. (2.5).

$$Q \propto \Delta V \tag{2.5}$$

A constante de proporcionalidade depende da forma dos condutores e da separação podendo escrever a Eq. (2.5) da seguinte forma:

$$Q = C \times \Delta V \tag{2.6}$$

O termo novo da Eq. 2.6 é conhecido como capacitância e é definido como a relação da quantidade de carga e o valor da diferença de potencial entre elas. Conseqüentemente a capacitância é a habilidade de armazenar carga elétrica e no sistema internacional de unidades SI é medido em *farad* (F).

A capacitância depende da forma e da separação na qual se encontram as cargas elétricas como do material presente entre elas, que é chamado de meio dielétrico, fato pode alterar o valor capacitivo do sistema num fator de  $K$ :

$$C = K \frac{Q_0}{\Delta V_0} \quad (2.7)$$

Os sensores capacitivos são baseados na variação de dielétrico presente, na distancia ( $d$ ) ou a área ( $A$ ) pois  $C$  e definido como:

$$C = K \frac{A}{d} \quad (2.8)$$

Sendo  $K$  uma permissividade relativa do meio dada por:

$$K = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a constante dielétrica do vácuo e vale 8,85 pF/m.

A variação da capacitância depende de três fatores primários e somente dois produzem comportamentos lineares a permissividade (Eq. 2.10) e a área (Eq. 2.11):

$$\frac{\partial C}{\partial \epsilon} = \frac{A}{d} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial A} = \frac{\epsilon_r}{d} \quad (2.11)$$

A variação da distancia produz um comportamento não-linear

$$\frac{\partial C}{\partial d} = -\frac{\epsilon A}{d^2} \quad (2.12)$$

A lei de Gauss parte do conceito de fluxo elétrico  $\Phi_E$  (do grego *PHI*) descrito pela Eq. (2.13):

$$\Phi_E = E \times A \quad (2.13)$$

Onde E é campo elétrico e A é a área numa secção transversal. O campo elétrico é entendido como um lugar no espaço onde atuam as forças elétricas produzidas pelas cargas. De tal forma que o fluxo elétrico é proporcional a numero de linhas de campo penetrando uma superfície, mas quando a superfície não é perpendicular ao plano das linhas é assumida uma pequena área, então a Eq. (2.13) fica:

$$\Delta\Phi_E = E \times \Delta A \times \cos(\theta) \quad (2.14)$$

De forma geral a Eq. (2.14) fica:

$$\Phi_E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \sum E \times \Delta A = \int_{Superfície} E \cdot dA \quad (2.15)$$

A lei de Gauss apresenta a relação entre o fluxo que atravessa uma superfície e a carga encerrada pela superfície da seguinte forma:

Sendo o campo elétrico:

$$E = k_E \frac{q}{r^2} \quad (2.16)$$

E a superfície gaussiana uma esfera:

$$\oint dA = 4\pi r^2 \quad (2.17)$$

Onde a Constante de Coulomb é descrita da seguinte forma:

$$k_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2.18)$$

O fluxo elétrico pode ser expresso como:

$$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q}{r^2} \times 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.19)$$

$$\Phi_E = \oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

Esta expressão permite conhecer a carga em função do campo elétrico. Se for assumida uma carga elétrica livre igual a zero a lei de Gauss (Eq. 2.2) fica:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.21)$$

E campo elétrico no for extremadamente intenso para que todo material possa ser tratado como linear, existe uma relação entre  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{E}$  dada permissividade dielétrica do material.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot [\epsilon_0 \cdot \epsilon(x, y) \cdot \nabla \varphi(x, y)] \quad (2.22)$$

O campo elétrico está relacionado com o potencial elétrico em função do espaço tridimensional da seguinte forma:

$$E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad ; \quad E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (2.23)$$

$$E = \nabla\varphi \quad (2.24)$$

A modelagem está enfocada em conhecer o valor da capacitância do sistema, então a Eq.(2.7) pode ser substituída com a Eq.(2.20)

$$C = \frac{\varepsilon_0 \oint \varepsilon(x, y) \cdot E \cdot dl}{\Delta V_0} \quad (2.25)$$

Sendo  $\Delta V$  a diferença entre as voltagens das placas do capacitor  $\varphi_{Fonte} - \varphi_{Sensor}$  e substituindo a Eq.(2.24) em a Eq.(2.25) fica:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \oint \varepsilon(x, y) \cdot \nabla\varphi(x, y) \cdot dl}{\varphi_{Fonte} - \varphi_{Sensor}} \quad (2.26)$$

O valor da capacitância do sistema foi reduzido à determinação do potencial elétrico que se resolve mediante a Eq.(2.22)

### 2.2.1 Duas Dimensões

Em torno das equações de Maxwell diferentes autores desenvolveram soluções para o capacitor de placas côncavas em duas dimensões, Geraets e Borst (1988) desenvolveram a solução para o modelo da Figura 2.4.

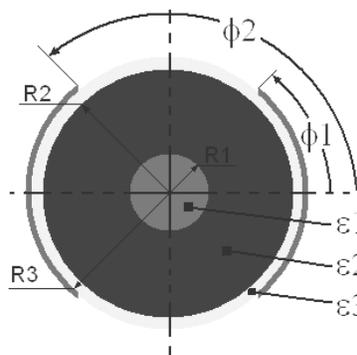


Figura 2.4.- Secção transversal do capacitor cilíndrico.

A equação do modelo em duas dimensões partindo da equação de Laplace em coordenadas cilíndricas (Eq. 2.27), gera a distribuição de potencial eletrostático dentro do capacitor descrita pela Eq. 2.28.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (2.27)$$

$$V(r_3, \phi) = A_3 + B_3 \text{Ln}(r) + \sum_{n=1}^{\infty} ((A_{3n} r^n + B_{3n} r^{-n}) \text{Cos}(n\phi)) \quad (2.28)$$

As condições de contorno para o problema são descritas pelas Eq. 2.29 e 2.30.

$$V_1(R_1, \phi) = V_2(R_1, \phi) \quad (2.29)$$

$$V_2(R_{21}, \phi) = V_3(R_1, \phi) \quad (2.30)$$

Geraets e Borst (1988) concluíram que a solução deste problema é dada por:

$$C = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_3}{\pi} \left( \text{Ln} \left( \frac{\text{Sen} \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}}{\text{Sen} \frac{\phi_2 - \phi_1}{2}} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(ACF_1^n + BD) \text{Sen}(n\phi_1) \text{Sen}(n\phi_2)}{n(CDF_2^n + ABF_3^n + ACF_1^n + BD)} \right) \quad (2.31)$$

Onde

$$A = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$B = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$C = \varepsilon_3 - \varepsilon_2$$

$$D = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

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

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

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

Além disso, desenvolve-se aplicações de sensores com características físicas descritas pelas equações (2.2) e (2.4), pois dependem das modificações do campo elétrico em modelos capacitivos, como os tratados por Jincheng e Gencang (2003), Reis (2003) e Wu e Cangellaris (2004), onde são geradas aproximações da distribuição do campo elétrico nos meios dielétricos internos do capacitor.

### 2.2.2 Três Dimensões

Também é possível utilizar as formulações apresentadas por Maxwell(1865) para conhecer as distribuições do campo elétrico em modelos em três dimensões, como no trabalho feito por Yi-ping e Gang (2005), que propõe um modelo 3D para aumentar a precisão da simulação, pois no modelo de duas dimensões o efeito de borda no campo é depreciado. Esta modelagem é realizada para um sistema tomográfico e parte de duas suposições: a primeira que a distribuição das componentes de fluxo não varia com o comprimento do eletrodo e a segunda que as permissividades das componentes de fluxo permeassem iguais. Sob estas duas considerações pode-se calcular a distribuição de potencial elétrico por meio da equação de Poisson, com a distribuição dielétrica constante, e com as condições de contorno definidas por

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0 \quad (2.32)$$

$$\varphi(x, y, z) \Big|_{(x, y, z) \in \Gamma_i} = U \quad (2.33)$$

$$\varphi(x, y, z) \Big|_{(x, y, z) \in \Gamma_j} = 0 \quad (2.34)$$

$$\varphi(x, y, z) \Big|_{(x, y, z) \in \Gamma_s} = 0 \quad (2.35)$$

Onde  $\Gamma_s$  representa o domínio computacional envolvido pela gaiola de Faraday (*shield screen*) e  $\Gamma_i$  e  $\Gamma_j$  são posições espaciais dos eletrodos e  $U$  é a diferença de potencial entre os eletrodos. Da lei de Gauss pode-se obter a carga elétrica

$$q_{i,j} = -\iiint_{V_j} \varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z) dV \quad (2.36)$$

Onde  $V$  é o volume que envolve o eletrodo  $j$ . Então pode-se calcular a capacitância de par de eletrodos pela equação 2.37

$$C_{ij} = q_{ij} / U \quad (2.37)$$

Existem diferentes métodos analíticos usados para resolver as equações de Poisson, mas quando a distribuição de permissividade tem uma distribuição espacial complexa só os métodos numéricos são efetivos, conclui Tollefsen e Hammer (1998).

## 2.3 Solução numérica

Dentro do processo da modelagem, estas equações precisam ser resolvidas para se obter resultados úteis. Xie *et al.* (1990) explicam que há cinco métodos principais para a solução dos problemas eletrostáticos: O primeiro deles é o método analítico, o segundo é o método dos elementos de contorno (*BEM* do inglês *Boundary-Element Method*), o terceiro é o método das diferenças finitas (*FDM* do inglês *Finite-Difference Method*), o quarto é o método dos elementos finitos (*FEM* do inglês *Finite-Element Method*) e por último o método de Monte Carlo. Se adota o método dos elementos finitos (MEF) por diferentes razões:

- A primeira é que a malha pode ser desenhada com uma forma geométrica complexa.

- As propriedades dos materiais não precisam ser as mesmas em elementos adjacentes, o que possibilita a utilização de corpos com diversos materiais.
- Pode-se tirar vantagem do grande número de termos nulos para tornar a solução do sistema mais eficiente.
- O sistema capacitivo é fácil de simular conhecendo as condições de contorno.

Outros autores desenvolveram estudos de modelagem utilizando este método de solução. Kawase *et al.* (2002) tratam o caso desde o ponto de vista magnético e em três dimensões, confirmando a acurácia dos resultados do método com dados medidos. Dular *et al.* (2006) desenvolvem duas formulações com o método dos elementos finitos em três dimensões para os efeitos capacitivos (Campo elétrico) e indutivo (Fluxo magnético) em *micro-coils*. Xu *et al.*(2007) calculam a capacitância de uma interconexão em três dimensões e concordam com Xie *et al.*(1990) que o método dos elementos finitos (FEM) é versátil e flexível para analisar geometrias complexas, além disso apresentam uma referência computacional de simulação para o cálculo do comportamento de campos eletromagnéticos, chamada MAXWELL 3D e desenvolvido por ANSOFT(2007), que utiliza o método dos elementos finitos para problemas de campos estáticos. Também existe a ferramenta computacional para duas dimensões chamada MAXWELL 2D *Student Version*, desenvolvido por ANSOFT(2007).

Vu-Quoc *et al.* (2003) apresenta um procedimento típico para resolver as equações de Maxwell na Figura 2.5, onde cinco etapas são definidas, separadas por quatro processos que são seguidos por Reis (2003) no desenvolvimento de um simulador de capacitância. O método dos elementos finitos em três dimensões foi aplicado por Tollefsen e Hammer (1998) na simulação de uma sonda capacitiva. O modelo obtido é apresentado na Figura 2.6, onde 43360 elementos são analisados num volume equivalente a 2,827 Litros. O resultado das simulações é comparado com o valor da capacitância medida com um *Hewlett Packard 4192A LF Impedance Analyser*. O erro da medida é estimado em  $\pm 5\%$  de f.s.d. gerando uma diferença máxima de  $\pm 26\%$  na faixa de variação da capacitância.

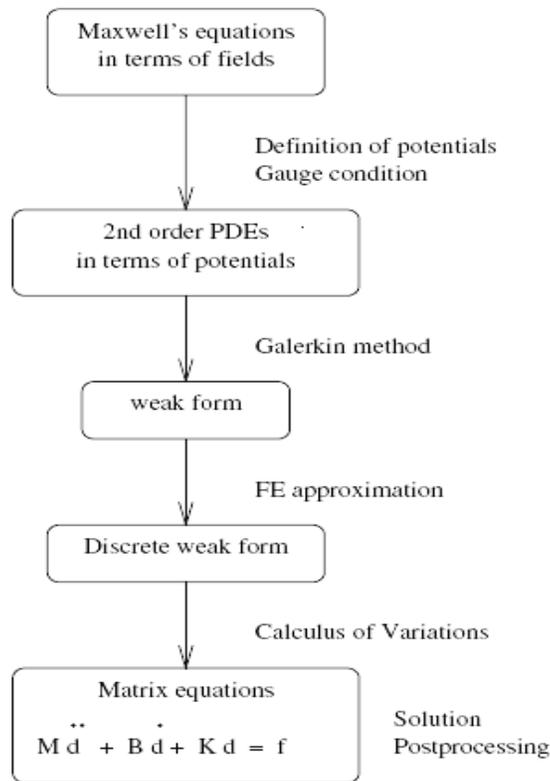


Figura 2.5.- Modelo típico para resolver as equações de Maxwell com FEM.

Fonte: Vu-Quoc *et al.* (2003)

Yi-ping e Gang (2005) aplicam o método dos elementos finitos a um sensor baseado na tecnologia da eletro-tomografia para a medição da fração de vazio num escoamento bifásico de óleo e gás, analisando o efeito do eletrodo de guarda para diferentes distâncias e distribuição de potencia de cada eletrodo.

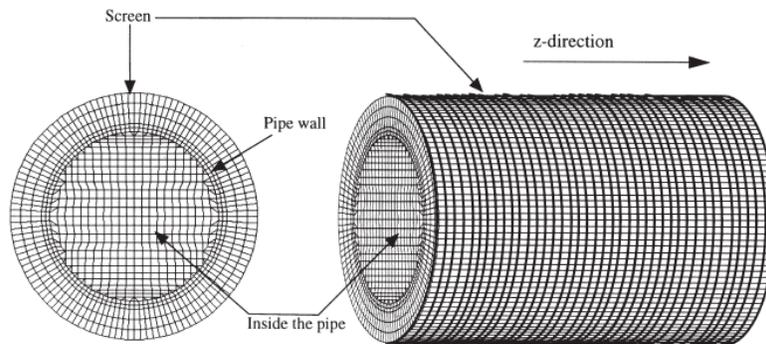


Figura 2.6.- Malha de elementos finitos em três dimensões.

Fonte: Tollefsen e Hammer (1998)

## 2.4 Modelos de emulsificação

No processo de simulação dos parâmetros da sonda se encontra o caso onde as fases não estão totalmente separadas, existindo uma porcentagem de água no óleo e vice-versa. No primeiro caso o óleo é chamado de meio contínuo e a água de meio disperso e no segundo caso a água é chamada de meio contínuo e o óleo de meio disperso Pal(1994). Somente quando o óleo é o meio contínuo é levada em conta a variação da permissividade porque em caso contrário esta variação é da mesma ordem de grandeza com o erro da medição segundo Pal(1994). Na literatura esta emulsão é conhecida como emulsão W/O e é amplamente estudada desde o início do século XX quando Wagner(1916) desenvolveu um modelo para a permissividade complexa de uma emulsão diluída, apresentado na Equação 2.38.

$$\left( \frac{\epsilon^* - \epsilon_c^*}{\epsilon^* + 2\epsilon_c^*} \right) = \left( \frac{\epsilon_d^* - \epsilon_c^*}{\epsilon_d^* + 2\epsilon_c^*} \right) \phi \quad (2.38)$$

$$\left( \frac{\epsilon^* - \epsilon_d^*}{\epsilon_c^* - \epsilon_d^*} \right) \left( \frac{\epsilon_c^*}{\epsilon^*} \right)^{1/3} = 1 - \phi \quad (2.39)$$

Onde

$\epsilon^*$  é a permissividade complexa da emulsão.

$\epsilon_c^*$  é a permissividade complexa do meio contínuo.

$\epsilon_d^*$  é a permissividade complexa do meio disperso.

$\phi$  é a concentração da fase dispersa.

Hanai *et. al.* (1960) comparam as relações de Wagner(1916) com as suas próprias para dispersões esféricas. A equação 2.39 representa o modelo para permissividade complexa, sendo o modelo de Wagner(1916) referido para emulsões diluídas e o modelo de Hanai *et. al.* (1960) para emulsões concentradas.

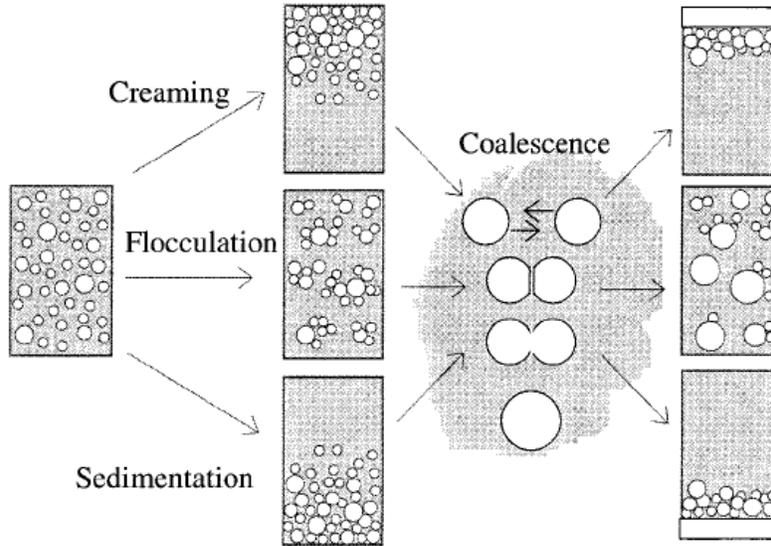


Figura 2.7.- Processos de emulsão que influenciam as propriedades dielétricas.

Fonte: Skodvin e Sjoblom (1996)

Skodvin *et al.* (1996) analisa o comportamento das propriedades elétricas das soluções tomando em conta o processo de emulsificação descritos como *creaming*, *floculation* e *sedimentation*. A figura 2.7 exemplifica estes casos e explica que normalmente os modelos são propostos para possesores de flocluação.

Pal(1994) apresenta as relações para emulsões diluídas segundo Wagner(1916):

$$\epsilon_h = \epsilon_c \left( \frac{2\epsilon_c + \epsilon_d - 2\phi(\epsilon_c - \epsilon_d)}{2\epsilon_c + \epsilon_d + \phi(\epsilon_c - \epsilon_d)} \right) \quad (2.40)$$

$$\epsilon_l = \epsilon_c \left( \frac{K_l}{K_c} \right) + \left( \frac{9(\epsilon_d K_c - \epsilon_c K_d) K_c \phi}{(2K_c + K_d + \phi(K_c - K_d))^2} \right) \quad (2.41)$$

$$K_l = K_c \left( \frac{2K_c + K_d - 2\phi(K_c - K_d)}{2K_c + K_d + \phi(K_c - K_d)} \right) \quad (2.42)$$

$$k_h = k_c \left( \frac{\epsilon_h}{\epsilon_c} \right) + \left( \frac{9(K_c \epsilon_c - K_d \epsilon_d) \epsilon_c \phi}{(2\epsilon_c + \epsilon_d + \phi(\epsilon_c - \epsilon_d))^2} \right) \quad (2.43)$$

Pal(1994) também apresenta as relações para emulsões concentradas segundo Hanai *et. al.*(1960):

$$\left( \frac{\epsilon_h - \epsilon_d}{\epsilon_c - \epsilon_d} \right) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_h} \right)^{1/3} = 1 - \phi \quad (2.44)$$

$$\epsilon_l \left( \frac{3}{K_l - K_d} - \frac{1}{K_l} \right) = 3 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_d}{K_c - K_d} + \frac{\epsilon_d}{K_l - K_d} \right) - \frac{\epsilon_c}{K_c} \quad (2.45)$$

$$\left( \frac{K_l - K_d}{K_c - K_d} \right) \left( \frac{K_c}{K_l} \right)^{1/3} = 1 - \phi \quad (2.46)$$

$$K_h \left( \frac{3}{\epsilon_h - \epsilon_d} - \frac{1}{\epsilon_h} \right) = 3 \left( \frac{K_c - K_d}{\epsilon_c - \epsilon_d} + \frac{K_d}{\epsilon_h - \epsilon_d} \right) - \frac{K_c}{\epsilon_c} \quad (2.47)$$

Onde

$\epsilon_h$  é a permissividade da emulsão para alta frequência.

$\epsilon_l$  é a permissividade da emulsão para baixa frequência.

$\epsilon_d$  é a permissividade da fase dispersa.

$\epsilon_c$  é a permissividade da fase continua.

$K_h$  é a condutividade da emulsão para alta frequência.

$K_l$  é a condutividade da emulsão para baixa frequência.

$K_d$  é a permissividade da fase dispersa.

$K_c$  é a permissividade da fase continua.

## Capítulo 3

### Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para abordar os problemas eletrostáticos, relacionados com o cálculo da capacitância mediante técnicas computacionais. Esta consiste de três procedimentos: A modelagem que descreve o comportamento do campo elétrico em um conjunto de eletrodos, uma descrição da metodologia utilizada pelo software de simulação para resolver as equações e um processo comparativo de resultados analíticos, numéricos e experimentais que determine a exatidão do programa utilizado.

#### 3.1 Abordagem do problema eletrostático

Nesta seção são apresentados os conceitos físicos relacionados com o processo eletrostático referente ao cálculo da capacitância. Estes contribuem com o entendimento específico do fenômeno, que permite o monitoramento do *core-flow*.

##### 3.1.1 Capacitância

Dois eletrodos separados e polarizados eletricamente interagem devido às forças de ação a distância, o campo elétrico surge da necessidade de explicar a influência mútua que ocorre em ausência de contato físico. A Figura 3.1 apresenta este tipo de configuração que é chamada capacitor, onde os eletrodos são, por vezes, referidos como as placas do capacitor.

As placas podem estar separadas por espaço livre ou por um meio dielétrico e são mantidas sob uma diferença de potencial  $V$  dada por

$$V = V_1 - V_2 = - \int_2^1 E \cdot dl \quad (3.1)$$

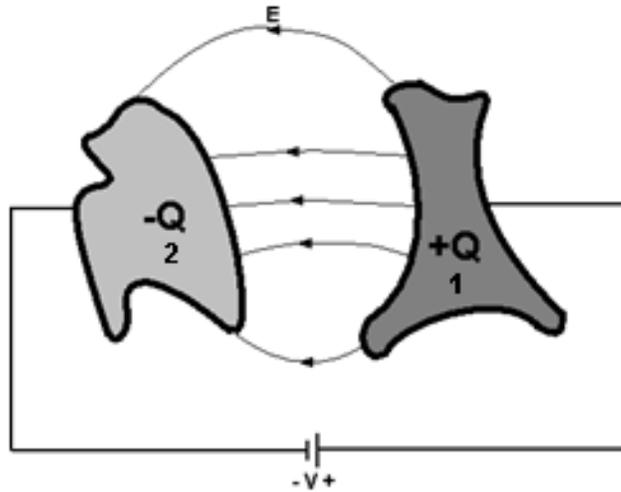


Figura 3.1.- Capacitor de dois condutores.

Onde  $E$  é o campo elétrico existente entre os eletrodos e sempre é ortogonal às superfícies dos eletrodos.

A capacitância  $C$  é uma propriedade física do capacitor é medida em farads (F) e se define como a razão entre o valor da carga em uma das placas e a diferença de potencial entre elas. Isto é:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon \oint E \cdot dS}{\int E \cdot dl} \quad (3.2)$$

Utilizando a Eq. 3.2,  $C$  pode ser obtido, para qualquer capacitor de dois eletrodos, seguindo um destes dois métodos:

- Assumindo um valor de  $Q$  e determinando  $V$  em termos de  $Q$  (utilizando a lei de Gauss).

- Assumindo um valor de  $V$  e determinando  $Q$  em termos de  $V$  (utilizando a redução da equação de Laplace).

O primeiro método implica o uso dos seguintes passos:

- Escolher um sistema de coordenadas apropriado.
- Atribuir aos dois eletrodos, as cargas  $+Q$  e  $-Q$ .
- Determinar  $E$  utilizando a lei de Coulomb ou a lei de Gauss e encontrar  $V$  a partir de  $V = -\int E \cdot dl$ .
- Finalmente, obter  $C$  a partir de  $C = \frac{Q}{V}$ .

### 3.1.2 Caracterização dos meios

Genericamente, os materiais podem ser classificados, de acordo com a sua condutividade, como condutores ou não-condutores. A condutividade de um material depende da temperatura e da frequência. Um material com elevada condutividade é referido como metal, enquanto um material com baixa condutividade é referido como isolante. Um material cuja condutividade está entre a condutividade dos condutores e dos isolantes é denominado semicondutor.

A condutividade dos condutores geralmente aumenta com a diminuição da temperatura. Em temperaturas próximas do zero absoluto ( $T=0K$ ), alguns condutores apresentam condutividade infinita e são chamados de supercondutores.

Microscopicamente, a diferença mais significativa entre condutores e isolantes reside na quantidade de eletrodos livres para a condução da corrente elétrica. Os condutores têm abundância de elétrons livres ou contrario dos isolantes que têm poucos elétrons disponíveis.

Neste trabalho são tratados dois tipos de meios: condutores (como o cobre e o alumínio) e isolantes (como vidro, ar, água e óleo).

### 3.1.2.1 Condutores

A matéria que possui cargas elétricas livres em abundância é conhecida como condutor. A Figura 3.2 apresenta o instante em que um condutor é influenciado por um campo elétrico externo  $E_e$ , empurrando as cargas livres positivas no sentido do campo aplicado e as cargas elétricas negativas no sentido oposto. A migração ocorre rapidamente. Em um primeiro momento as cargas se acumulam na superfície do condutor formando uma superfície de cargas induzidas que estabelecem um campo elétrico  $E_i$  induzido, o qual cancela o campo elétrico externo aplicado  $E_e$ .

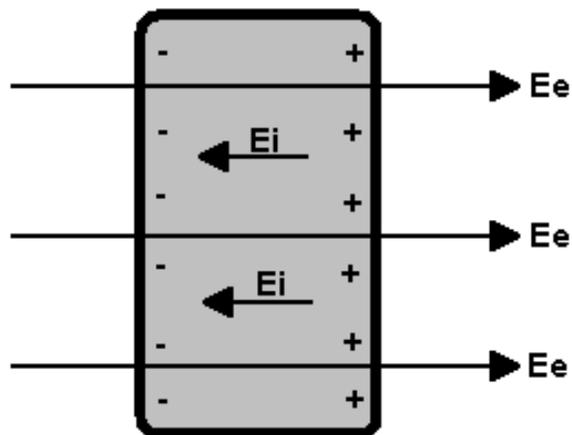


Figura 3.2.- Condutor sob influencia de um campo elétrico.

Como resultado, se obtém uma propriedade dos condutores, que indica que um condutor ideal não pode conter campo eletrostático em seu interior, como é apresentado na Figura 3.3.

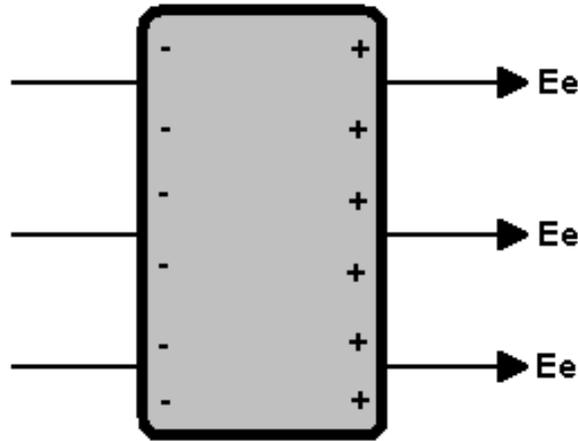


Figura 3.3.- Condutor em condições estáticas.

Portanto um condutor é equipotencial e no seu interior:

$$E = 0, \rho_v = 0, V_{ab} = 0 \quad (3.3)$$

### 3.1.2.2 Dielétricos

Os dielétricos não têm disponibilidade de elétrons livres nas camadas mais externas, mas as cargas estão presas devido ao efeito de forças finitas e é esperado um deslocamento quando uma força externa é aplicada. A Figura 3.4 (a) apresenta um átomo de um dielétrico e a Figura 3.4 (b) apresenta a distorção sofrida quando um campo elétrico influencia esta configuração da nuvem eletrônica (carga negativa  $-Q$ ) e do núcleo (carga positiva  $+Q$ ).

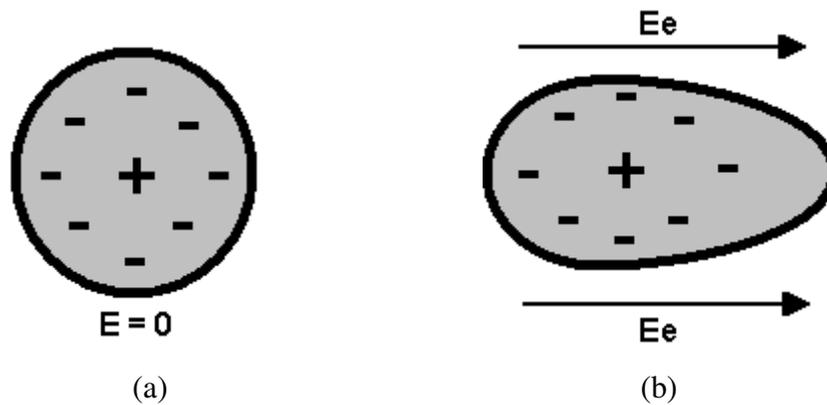


Figura 3.4.- Átomo de um dielétrico: (a)  $E=0$ , (b) sob campo elétrico.

Quando o centro das cargas positivas não coincide com o centro das cargas negativas o dielétrico apresenta uma distribuição assimétrica de cargas na molécula e é chamada de molécula polar. As substâncias cujas moléculas possuem cargas elétricas distribuídas de forma simétrica se denominam apolares. Um exemplo de molécula polar é a molécula da água que apesar de ter carga total neutra, no oxigênio estão concentradas as cargas negativas deixando as cargas positivas no núcleo do hidrogênio desprovido de seus elétrons. Por outra parte, os gases nobres são exemplos de moléculas apolares que não possuem dipolos enquanto não for aplicado um campo elétrico externo.

A permissividade é uma constante física que descreve como o campo elétrico afeta e é afetado por um meio e se refere a habilidade de um material de se polarizar na presença de um campo elétrico aplicado, cancelando parcialmente o campo dentro do material.

Teoricamente se pressupõe dielétricos ideais, mas na prática nenhum dielétrico é ideal. Portanto um campo elétrico suficientemente elevado começa a arrancar os elétrons das moléculas e o dielétrico torna-se condutor. O menor valor de campo para o qual essa ruptura ocorre é chamado de rigidez dielétrica.

### **3.1.3 Condições de contorno**

Na aplicação dos campos elétricos é comum encontrar regiões formadas por dois meios diferentes, as condições que o campo deve satisfazer na interface de separação são chamadas de condições de contorno. As condições de contorno são úteis pois a que contribuem na determinação do campo elétrico em um lado da fronteira se o campo for conhecido do outro.

As interfaces podem ser determinadas como:

- Dielétrico e dielétrico.

- Condutor e dielétrico.
- Condutor e espaço livre.

### **3.2 Pacote computacional**

Na pesquisa bibliográfica foi apresentado o software de simulação Maxwell da Ansoft, de alto desempenho no desenho eletrônico, utilizado por diferentes autores como Xu *et al.*(2007) e Miller e Rosu (2008). O software Maxwell é utilizado no desenho e análise de estruturas 2D/3D, sendo baseado no método dos elementos finitos e resolve problemas eletromagnéticos estáticos, no domínio da frequência e variantes no tempo, assim também problemas de campos elétricos.

#### **3.2.1 Procedimento geral**

A Figura 3.5 apresenta um resumo dos passos utilizados para resolver um modelo 3D ou 2D, com o uso de uma ferramenta computacional.

A primeira etapa do processo começa com a seleção do tipo de problema a resolver, que pode ser: eletrostático, magnetostático, condução AC/DC ou correntes de Eddy. Neste caso é escolhido o tipo eletrostático, pois se precisa conhecer o campo elétrico quando é aplicado um sinal de 1MHz no eletrodo fonte.

Na etapa seguinte se escolhe o tipo de coordenadas que facilite o desenho e se realiza a modelagem bidimensional ou tridimensional. São criados elementos representativos dos meios e fronteiras entre condutores (cobre e alumínio) e dielétricos (ar, água, vidro e óleo).

Na terceira e na quarta etapa, os elementos são caracterizados com propriedades como permissividade e condutividade, depois são definidos os elementos (normalmente os eletrodos) que possuem cargas elétricas ou voltagens (fontes). As condições de contorno predeterminadas são naturais para os objetos da interface e de Neumann nas fronteiras que indica que não existem condições especiais no domínio e que  $E$  é normal à fronteira respectivamente. Embora, se houver

uma condição especial como simetria ou estruturas onde E é oblíquo à fronteira pode se utilizar condições do tipo simétrico ou *master-slave*.

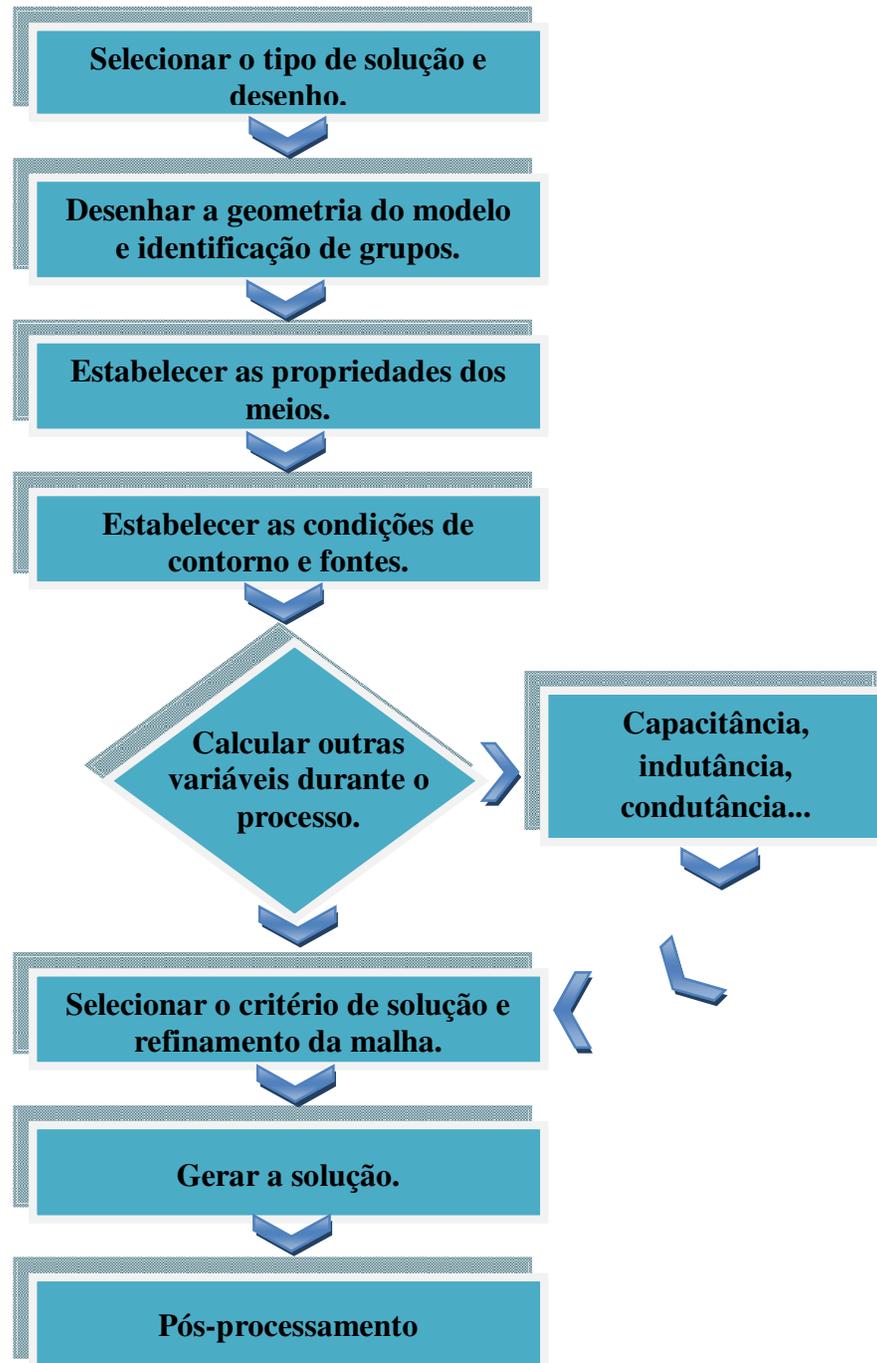


Figura 3.5.- Resumo da solução de um problema mediante um programa computacional.

Na etapa seguinte se instrui o simulador para calcular parâmetros especiais como força, torque, fluxo de corrente e, neste caso, a matriz de capacitância, mediante a determinação dos elementos que servem como eletrodos fonte e sensor (ou terra).

Na sexta etapa se definem as opções de como deve ser calculada a solução. Primeiro deve ser escolhida uma solução adaptativa para que o simulador resolva as equações iterativamente, refinando as regiões da malha onde os erros são maiores. O simulador possui duas alternativas de solução: direta e ICCG (*Incomplete Cholesky Conjugate Gradient*). O método ICCG é rápido com matrizes grandes, mas ocasionalmente diverge e o método direto garante a solução, mas é lento. O software avalia a matriz e tenta solucioná-la, se a matriz esta mal condicionada é utilizado método direto, de outra forma é utilizado o método ICCG.

Os critérios de parada são ditados pelo numero de passos e pelo resíduo da solução, que indica quão perto está cada solução de satisfazer as equações que foram utilizadas para gerar a solução.

A última etapa se refere à análise da solução, onde se pode obter o resultado da matriz de capacitância e visualizar grandezas como o potencial elétrico, campo elétrico, deslocamento elétrico e energia.

### **3.2.2 Avaliação do software Maxwell 2D/3D.**

Existem geometrias de capacitores que são amplamente estudadas na literatura, como por exemplo, as placas planas. Fazendo uso desta geometria pode se comparar a exatidão dos resultados numéricos.

Para obter uma perspectiva global do comportamento da solução frente a variação dos parâmetros fundamentais que afetam um capacitor, determinados pelas equações 2.10, 2.11 e 2.12, é proposto uma modificação na área das placas, na permissividade do meio e na distancia entre as placas.

A Figura 3.6 apresenta a geometria básica composta por um par de placas paralelas de metal (cobre), separadas por um médio isotrópico.

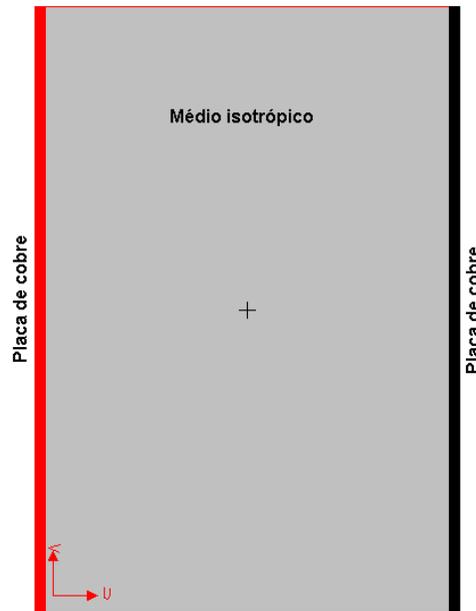


Figura 3.6.- Geometria de placas paralelas.

As simulações foram limitadas mediante um domínio próximo das placas do modelo para evitar levar em conta o campo elétrico produzido pelo efeito de borda, fazendo que o cálculo da capacitância seja próximo do ideal. A tabela 3.1 apresenta os valores dos parâmetros que foram modificados. Estes valores combinados resultariam em um total de 945 simulações. A estratégia adotada foi manter o lado da placa em 1mm para minimizar o efeito de borda, as separações menores 10 mm e dielétricos com permissividades de 1 até 100. Outro modelo testado foi uma placa de 0.03 m de lado para as mesmas condições, resultando um total de 56 simulações.

Tabela 3.1. Valores dos parâmetros modificados para simulação de capacitância em placas paralelas.

Parâmetro	Valores
Área da placa [m <sup>2</sup> ]	1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.03, 0.029, 0.028, 0.027, 0.026, 0.025, 0.024
Distancia entre placa [mm]	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
Permissividade	1, 3, 5, 10, 30, 50, 70, 100

Dos resultados das simulações feitas com o software Maxwell para placas paralelas foram obtidas as médias dos erros em relação ao cálculo de capacitância pela solução analítica apresentada na Eq. 2.8 e foram utilizados na solução numérica aproximadamente 25000 triângulos, para três casos diferentes.

O primeiro é a variação da permissividade, que apresentou um erro médio de  $4,73E-2\%$ . Depois foi testado o caso da variação da área, que apresentou um erro médio de  $4,70E-2\%$ . Em ultimo lugar se avaliou o resultado da variação da distancia entre as placas, que gerou um erro médio de  $4,73E-2\%$ .

Após estas simulações foi feita a avaliação para placas côncavas montadas simetricamente em relação à linha vertical, apresentada na Figura 3.7, de uma secção transversal circular e com apenas um meio, onde são modificados os ângulos dos eletrodos e a permissividade, segundo a tabela 3.2. Os resultados são comprados com a solução da Equação 2.31, proposta por Geraets e Borst (1988), fazendo todos os meios iguais.

Tabela 3.2. Valores de ângulo e permissividades testadas para placas côncavas.

Parâmetro	Valores
Ângulo [°]	170, 160, 120
Permissividade	1, 3, 5, 10, 30, 50, 70, 100

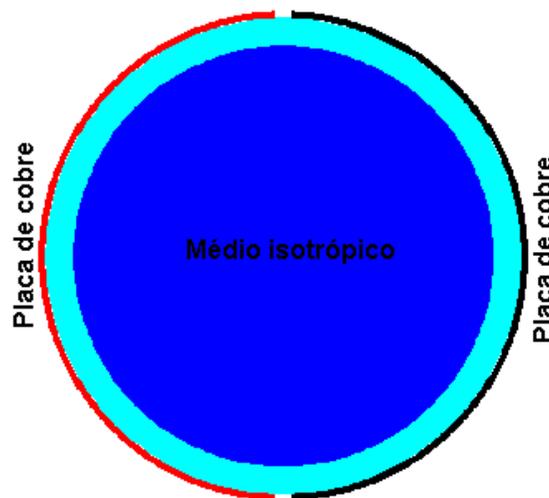


Figura 3.7.- Geometria de placas côncavas.

Os resultados foram obtidos com uma malha de aproximadamente 66000 triângulos e indicam que a variação da permissividade do meio não modifica a diferença entre os valores de capacitância simulados e os obtidos analiticamente. Por outro lado, o ângulo do eletrodo afeta este resultado, quanto menor é o ângulo maior é a diferença entre os valores simulados e calculados analiticamente, para um ângulo de  $170^\circ$  o erro médio foi de 0.3%. Para um ângulo de  $160^\circ$  o erro médio foi de 5% e para um ângulo de  $120^\circ$  o erro médio foi de 28.4%, em relação à solução analítica.

Nota-se que a complexidade do modelo interfere no cálculo analítico, já que se os parâmetros de convergência do modelo computacional são mantidos constantes para diferentes ângulos, os erros devem apresentar a mesma ordem de grandeza do mesmo modo que acontece para a placa plana. Quando são avaliadas configurações côncavas com dos meios diferentes em uma disposição anular ocorre este mesmo efeito.

O comportamento das respostas em qualquer caso é fisicamente realista, pois pode se observar que o aumento das permissividades relativas provoca um aumento do valor da capacitância do sistema e quando é variado o raio do meio central e este possui uma permissividade menor que o meio exterior, os valores da capacitância apresentam uma variação negativa.

Os sistemas simulados com dois meios anulares apresentam erros de até 80% quando comparados com valores analíticos, que não levam em conta o comportamento do campo elétrico nas interfaces dos meios. Estes utilizam valores correspondentes a uma ponderação de permissividades dos meios, sem levar em conta a distorção do campo elétrico.

Para cada um dos modelos apresentados foi feito um modelo real. A Figura 3.8 apresenta o modelo de placas paralelas que tem como meio isotrópico uma placa de vidro e a Figura 3.9 apresenta o modelo de placas côncavas montadas num cilindro de vidro com as mesmas características que o usado na sonda de medição da camada de água.

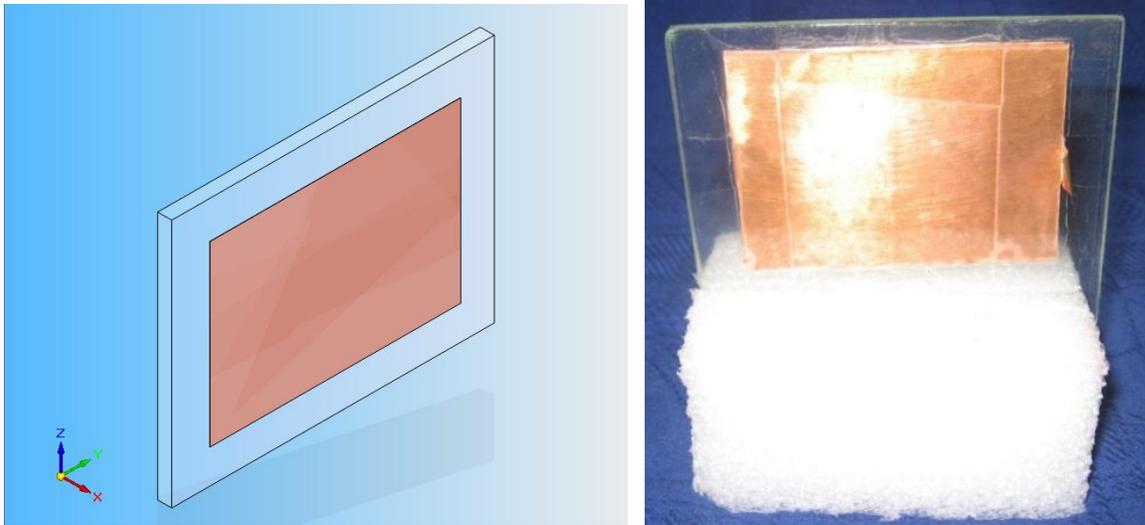


Figura 3.8.- Placas paralelas de cobre com dielétrico de vidro.

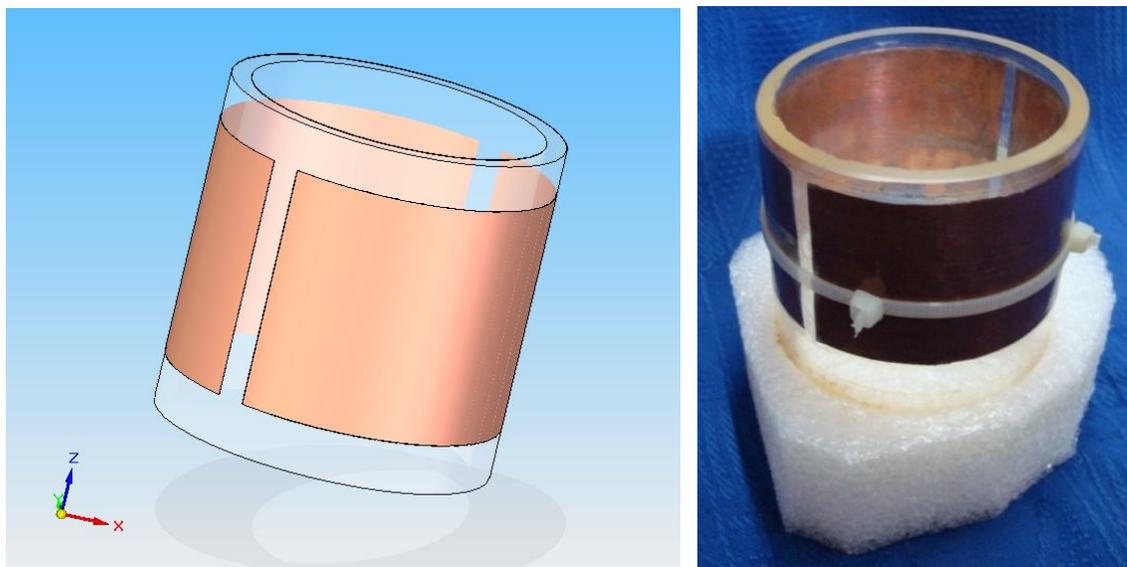


Figura 3.9.- Placas côncavas de cobre com dielétrico de vidro e ar.

As propriedades dos meios foram medidas usando um E4980A *Precision LCR Meter* mostrado na Figura 3.10, com um sistema de medição de permissividades chamado *Dielectric Test Fixture* mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.10.- E4980A Precision LCR Meter.



Figura 3.11.- Dielectric Test Fixture.

### 3.2.2.1 Permissividade do ar e do vidro.

Para medir a permissividade do ar foi feito um conjunto de testes modificando a espessura da camada de ar entre as placas do *Dielectric Test Fixture*. A tabela 3.3 apresenta os valores obtidos de capacitância e os valores calculados de permissividade relativa.

Tabela 3.3. Permissividade do ar a 1MHz.

Ar		
Distancia [m]	Capacitância [F]	Permissividade
1,00E-03	1,03E-11	1,03E+00
2,00E-03	5,13E-12	1,03E+00
3,00E-03	3,42E-12	1,03E+00
4,00E-03	2,57E-12	1,03E+00
5,00E-03	2,06E-12	1,03E+00
1,00E-02	1,02E-12	1,02E+00
1,50E-02	9,18E-13	1,38E+00

A curva característica dos dados é apresentada na Figura 3.12

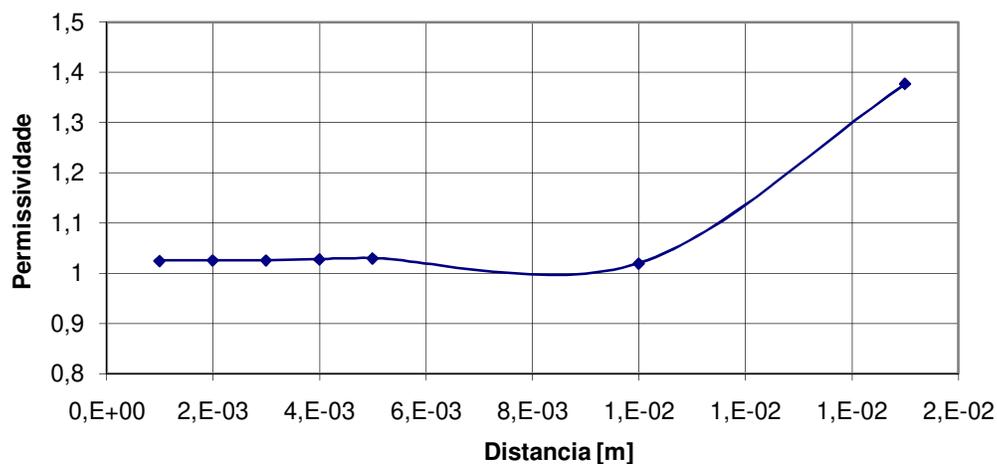


Figura 3.12.- Permissividades do ar medidas para diferentes distancias entre placas.

Uma media aritmética é aplicada aos dados para obter um valor de permissividade relativa de 1,076.

Para o cálculo da permissividade do vidro foi aplicado um procedimento parecido, obtendo como resultado os valores da tabela 3.4.

Tabela 3.4. Permissividade do vidro a 1MHz.

Vidro	Capacitância [F]	Permissividade
Distancia [m]		
3,94E-03	1,70E-11	6,68E+00

### 3.2.2.2 Simulação numérica.

Com os valores das permissividades e o valor da distancia entre as placas foi feita a simulação bidimensional do sistema de placas paralelas fazendo uso de 25000 triângulos e o comportamento do campo elétrico é apresentado na Fig. 3.13.

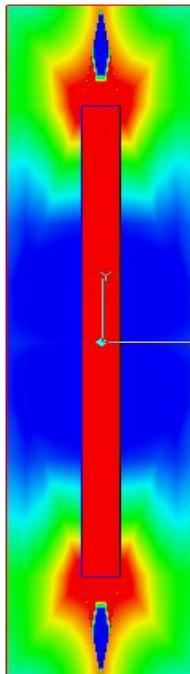


Figura 3.13.-Distribuição do campo elétrico entre placas paralelas com meio isotrópico de vidro.

Fazendo uso da ferramenta tridimensional de simulação do software Maxwell, foi modelado o conjunto de placas paralelas. A Figura 3.14 apresenta a distribuição espacial do

campo elétrico espacialmente para um total de 23151 tetraedros. As simulações 3D permitem levar em conta os efeitos produzidos pelos cantos das placas e efeito volumétrico do modelo.

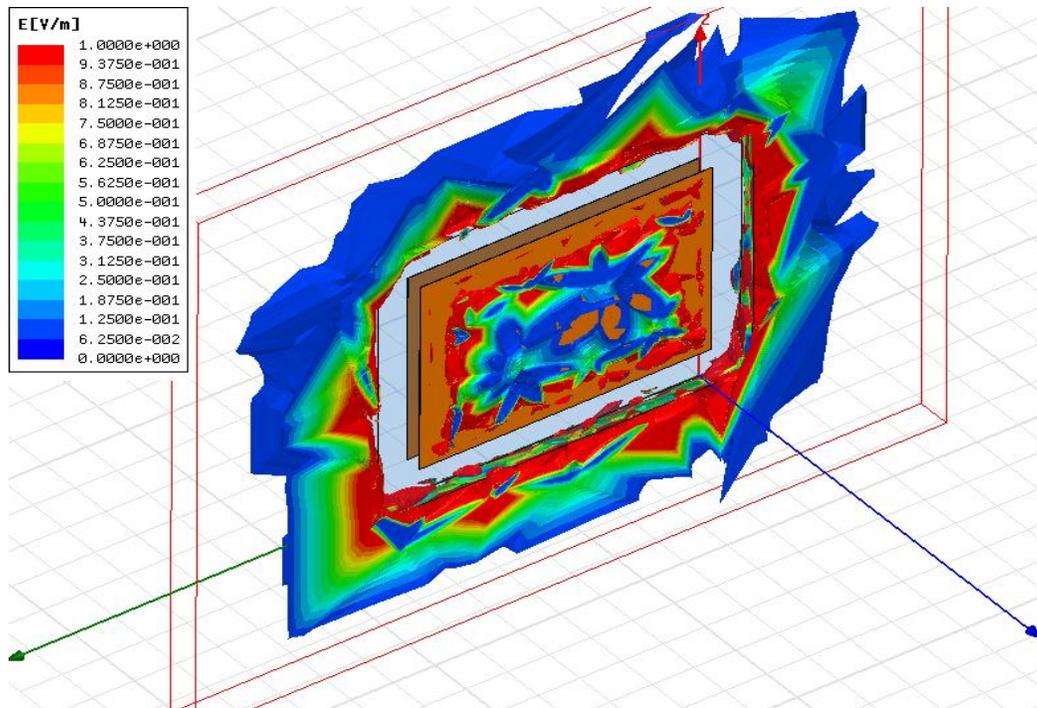


Figura 3.14.-Distribuição do campo elétrico 3D do modelo de placas paralelas.

A solução analítica do problema tem como resultado um valor de 52,5 pF e o resultado da extração da capacitância do modelo bidimensional foi de 51,9 pF enquanto do modelo tridimensional foi de 56,7 pF. O capacitor formado pelos dos eletrodos foi medido com o E4980A *Precision LCR Meter* e o valor obtido foi de 59,8 pF. O erro maior resulta da comparação com o valor medido com a simulação bidimensional e é da ordem de 13,2%. Comparando o valor medido com o valor analítico resulta um erro de 12,2% e finalmente comparando com o valor extraído da simulação 3D o erro é da ordem de 5,11%.

Para o modelo de placas côncavas foi seguido o mesmo procedimento. A Figura 3.15 apresenta a distribuição do campo elétrico no modelo bidimensional, onde a magnitude do campo elétrico é maior nas regiões próximas das placas, para este ângulo de eletrodos o fenômeno ocorre na parte superior e inferior da secção de tubulação e a Figura 3.16 apresenta a distribuição tridimensional do campo elétrico.

O valor medido utilizando o E4980A *Precision LCR Meter* foi de 18,2 pF e a extração da capacitância do modelo bidimensional foi de 15,08 pF, o que indica um erro de 16,77 %. Para a simulação tridimensional o valor da capacitância foi de 16,23 pF e o erro em relação do valor medido foi de 10,43%.

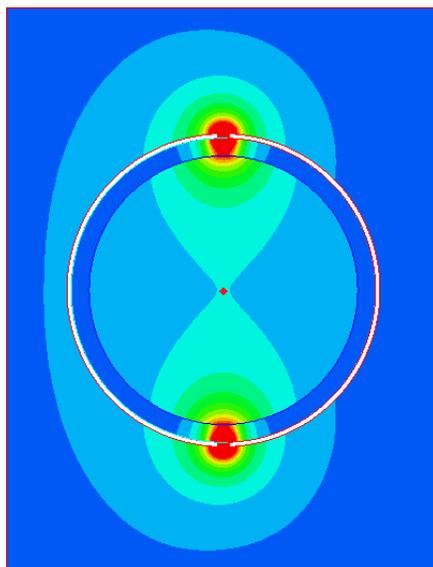


Figura 3.15.- Distribuição 2D do campo elétrico entre placas côncavas.

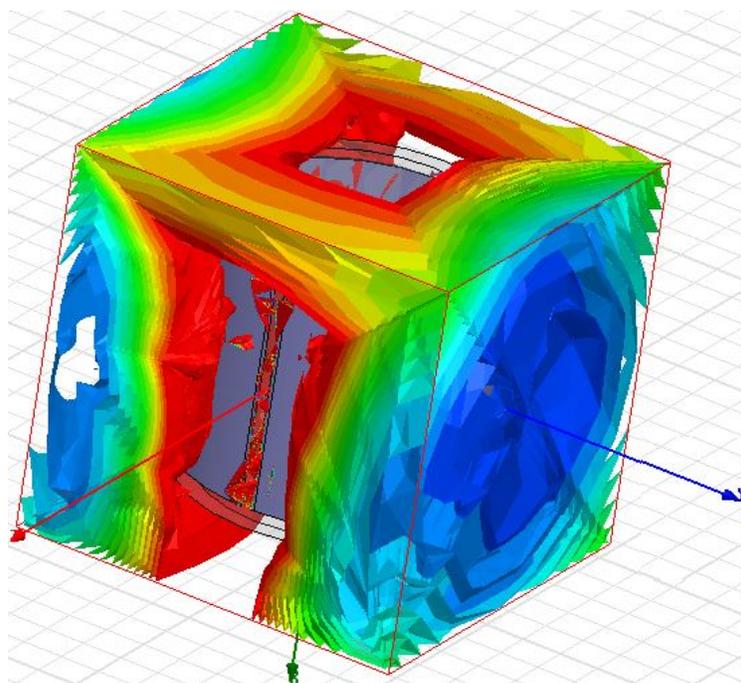


Figura 3.16.-Dispersão do campo elétrico 3D do modelo de placas côncavas.

## Capítulo 4

### Simulação Numérica do Sensor de Capacitância

Neste capítulo são descritos os modelos utilizados na análise do sensor, as equações gerais que representam o fenômeno físico estudado, bem como as diversas simplificações resultantes da abordagem assumida e as hipóteses subjacentes a estas simplificações. Na seqüência é realizado um estudo das características do sensor em relação ao escoamento anular concêntrico, que permita determinar a geometria mais adequada para medir a espessura da camada de água no topo superior da tubulação e avaliar a influência da excentricidade inerente do escoamento. Também será apresentada uma comparação entre os resultados numéricos obtidos com os resultados experimentais de outros trabalhos.

#### 4.1 Descrição da sonda capacitiva

A Figura 4.1 apresenta o esquema bidimensional da geometria do sensor de capacitância, onde duas placas côncavas de material condutor de eletricidade (cobre) são colocadas na parede externa da tubulação de vidro. O sensor é inserido no oleoduto mediante um conjunto de flanges, tensores e extensores, como é mostrado na Figura 4.2.

Na geometria bidimensional também são apresentados os meios que afetam o cálculo da capacitância como o ar, o vidro e os meios referentes ao escoamento anular que são óleo e água. Uma técnica utilizada para evitar interferências de campos elétricos externos consiste em adicionar uma blindagem de material condutor (alumínio).

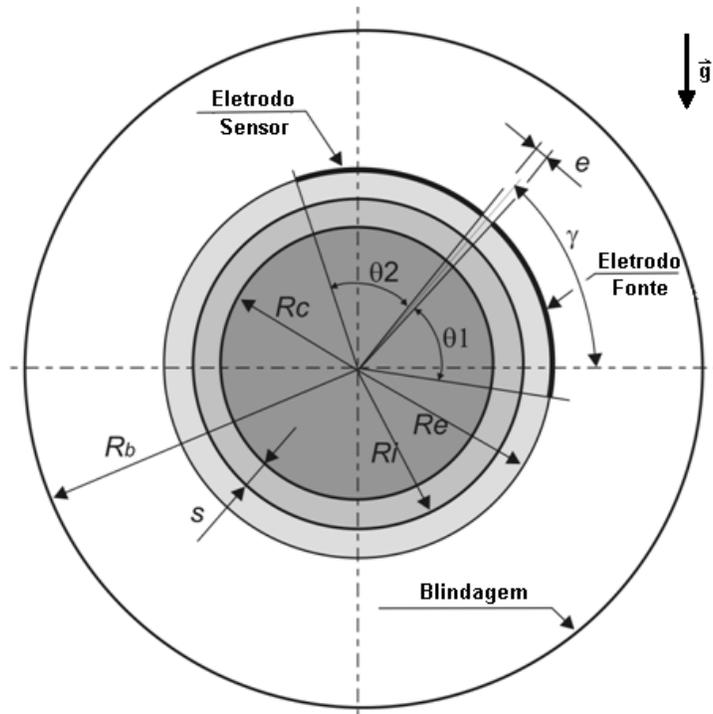


Figura 4.1.- Geometria do sensor de capacitância 2D.



Figura 4.2.- Montagem de dois sensores de capacitância.

A nomenclatura é definida para as variáveis que afetam a capacitância e é apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Nomenclatura das variáveis que afetam a capacitância.

Parâmetro	Descrição
$\gamma$	Ângulo de montagem
$\theta_1$	Ângulo de eletrodo Fonte
$\theta_2$	Ângulo do eletrodo sensor
$e$	Espaçamento entre eletrodos
$s$	Espessura da camada de água
$R_c$	Raio do núcleo
$R_e$	Raio exterior da tubulação
$R_i$	Raio interior da tubulação
$R_b$	Raio da blindagem

Para avaliar o efeito volumétrico da sonda capacitiva foi definida uma geometria tridimensional (3D), apresentada na Figura 4.3.

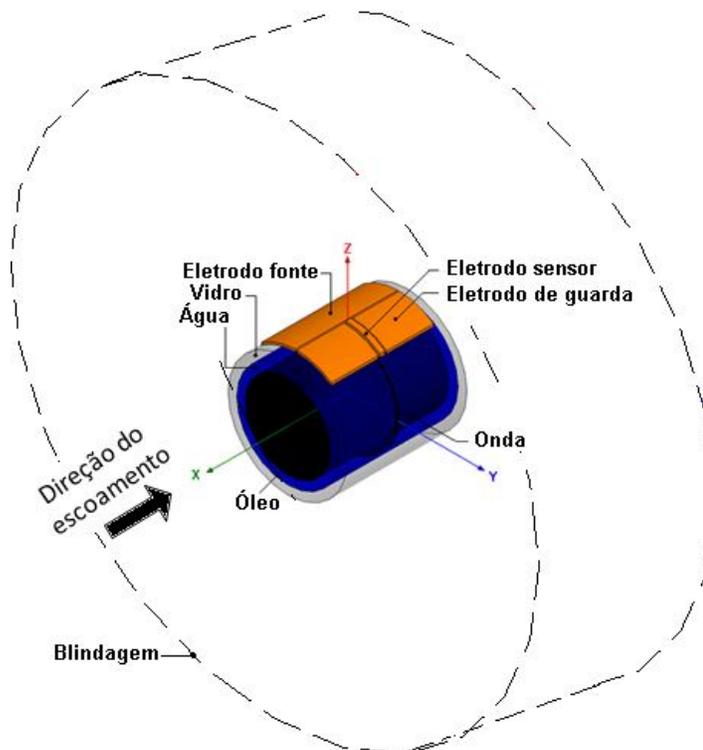


Figura 4.3.- Geometria tridimensional do sensor de capacitância.

Mais dois eletrodos chamados eletrodos de guarda de comprimento  $L_g$  são considerados, junto com algumas outras variáveis como o comprimento do eletrodo sensor  $t$  e o comprimento do eletrodo fonte  $L_s$ . Como será discutido na seção 5.3, com a finalidade de estudar os desvios do campo elétrico foi modelado um segmento de óleo de espessura  $q$  e altura  $d$  a uma distância do eletrodo fonte  $k$ .

Os domínios de simulação são limitados pela blindagem tanto no modelo bidimensional como no tridimensional. Cada meio possui propriedades distintas e os valores considerados foram obtidos de medições feitas no laboratório. A tabela 4.2 apresenta os valores de permissividades para meios homogêneos.

Tabela 4.2. Permissividades dos meios homogêneos.

Meio Homogêneo	Permissividade relativa	% Incerteza
Ar	1,00	0,49
Água	78,89	3,35
Óleo	2,57	1,71
Teflon PTFE	2,00	1,33
Vidro	6,20	10,00

A condutividade dos meios mostrados na tabela 4.2 é nula, enquanto que o cobre e o alumínio são considerados como condutores ideais com condutividade infinita.

#### 4.2 Solução numérica para núcleo concêntricos

O comportamento do campo elétrico gerado por um conjunto de placas côncavas é simulado numericamente pelo método dos elementos finitos, utilizando o software Maxwell 2D/3D de Ansoft. Em cada caso a equação de Poisson (Eq. 4.1) é resolvida pelo programa computacional, baseado na discretização das equações diferenciais. O programa computacional utiliza os valores escalares do potencial elétrico como DOFs (graus de liberdade) considera-se os objetos presentes no domínio são estáticos (por tanto a velocidade é zero em qualquer ponto em que o campo elétrico é calculado), não existe variação no tempo de nenhuma grandeza eletromagnética  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$  e não existe corrente pelos condutores (os condutores estão em equilíbrio eletrostático), por tanto as perdas de Joule são zero em qualquer lugar do domínio. Os DOFs

não conhecidos são escalares do potencial elétrico em todos os nós dos triângulos (solução bidimensional) ou tetraedros (solução tridimensional) da malha, a distribuição de condutividade é irrelevante, sendo que somente distribuição de permissividades é relevante.

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = \rho_v(x, y, z) \quad (4.1)$$

A utilização de uma blindagem no domínio de cálculo e a homogeneidade dos meios permite que ocorra um caso especial da equação de Poisson, que é conhecida como equação de Laplace:

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0 \quad (4.2)$$

Para a solução do campo elétrico de modelos bidimensionais, existem 6 DOFs associados com cada triângulo, três nós nos vértices e três nós nos pontos médios dos lados. Conseqüentemente, para modelos tridimensionais existem 10 DOFs associados com cada tetraedro, quatro nós nos vértices e seis nós nos pontos médios dos lados. Por conseguinte uma aproximação quadrática é feita para calcular o escalar do potencial elétrico dentro dos elementos.

As fontes típicas utilizadas em modelos eletrostáticos são:

- Distribuição uniforme de cargas num meio dielétrico.
- Potenciais elétricos aplicados a condutores perfeitos (condições de contorno de Dirichlet).
- Volume de densidade de carga.

E as condições de contorno típicas são:

- Voltagem. (Eletrodo Fonte)

Para  $\Gamma_f$

$$\varphi(x, y, z) = V_f \quad (4.3)$$

- Flutuante (Eletrodo sensor).

Para  $\Gamma_s$

$$\varphi(x, y, z) = 0 \quad (4.4)$$

- Isolamento (Blindagem).

Para  $\Gamma_b$

$$\varphi(x, y, z) = 0, \frac{d\phi_b}{dr} = 0 \quad (4.5)$$

No modelo de placas côncavas a fonte é determinada por um potencial aplicado entre o eletrodo fonte e o eletrodo sensor. Este sinal possui uma frequência de 1MHz e permite uma análise eletrostática, devido ao fato que as cargas aplicadas pela a fonte são instantaneamente distribuídas na superfície do material condutor. Para condutores reais a constante de difusão da carga é da ordem de  $10^{-19}$ .

As condições de contorno predeterminadas são naturais no interior do domínio e de Nuemann nas fronteiras. Esta condição obriga um comportamento tangencial do campo elétrico na vizinhança da fronteira. Não é necessário aplicar condições particulares na interface entre dois meios de diferentes propriedades como, por exemplo, entre o vidro a água e entre a água e o óleo, pois a solução garante a continuidade da componente tangencial da intensidade de campo elétrico e a continuidade da componente normal do vetor de densidade de fluxo de campo elétrico através de uma superfície com uma densidade de carga igual a zero.

Após ser calculado o potencial elétrico  $\varphi$  no domínio do problema, por meio da solução da equação diferencial de segundo ordem e das condições de contorno, antes citadas, pode-se aplicar as equações 2.21 e 2.24 para obter a intensidade de campo elétrico  $E$  e a densidade de fluxo elétrica  $D$ .

### 4.3 Resultados numéricos para escoamento anular concêntrico

A descrição do *core-flow* apresentada na seção 2.1.1, explica que dois fluidos podem escoar numa tubulação formando uma configuração anular. Na prática este fenômeno é utilizado para transportar óleo pesado, utilizando a água como redutor da viscosidade efetiva do processo. Na revisão da literatura no capítulo 2 se determinou que uma forma efetiva de monitorar o comportamento do escoamento anular é mediante a medição da camada de água e, devido a diferença de densidades entre os fluidos o ponto crítico está na parte superior da tubulação. Portanto, o estudo se concentra nesta região.

Idealmente o escoamento anular visto numa seção transversal, corresponde a duas circunferências concêntricas. Na figura 4.1 a circunferência determinada por  $R_i$  e a circunferência determinada por  $R_c$  são concêntricas. Portanto, a espessura da camada de água  $s$  é determinada por  $R_i - R_c$ .

Os valores estabelecidos para os parâmetros da tabela 4.1 correspondem à tubulação comercial de 2½ polegadas, em consequência  $R_i = 61.8\text{mm}$  e  $R_c = 70\text{mm}$ . Em relação aos parâmetros que determinam a geometria do sensor foi estabelecido um ângulo de montagem  $\gamma$  de  $90^\circ$ , pois a região de maior intensidade de campo elétrico está localizada nos cantos das placas e com este ângulo ela localiza-se próxima do topo da tubulação.

Os outros parâmetros da geometria são: o ângulo do eletrodo fonte  $\theta_1$ , o ângulo do eletrodo sensor  $\theta_2$  e o espaçamento  $e$  entre eles. No processo de simulação o ângulo do eletrodo fonte  $\theta_1$  é igual ao ângulo do eletrodo sensor  $\theta_2$  e é chamado de  $\theta$ . O espaçamento entre eles é mínimo para aumentar o valor da capacitância em relação a equação 2.12 e foi fixado em 1mm.

Como a variável a ser medida é a espessura da camada de água as simulações foram feitas com relação à  $s$ , e supondo que existe uma estabilidade no escoamento, esta espessura  $s$  deve ser pequena em relação ao diâmetro da tubulação. Sendo assim, foram simulados valores de 1 mm até 10 mm com passo de 1 mm, para ângulos de eletrodo  $\theta$  de  $5^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  e  $90^\circ$ .

Cada simulação foi feita utilizando uma malha de aproximadamente 50000 elementos, utilizando o refinamento automático que ocorre nas regiões próximas aos cantos dos eletrodos. Em cada solução foi visualizada a distribuição de intensidade de campo elétrico e apresentada fazendo uso da ferramenta de pós-processo do software Maxwell.

Nas figuras que apresentam a distribuição de campo elétrico são detalhadas as regiões que apresentam maior gradiente de campo elétrico. No restante do domínio a intensidade de campo é próxima de zero.

A Figura 4.4 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 5^\circ$  e a Figura 4.5 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada valor da camada de água.

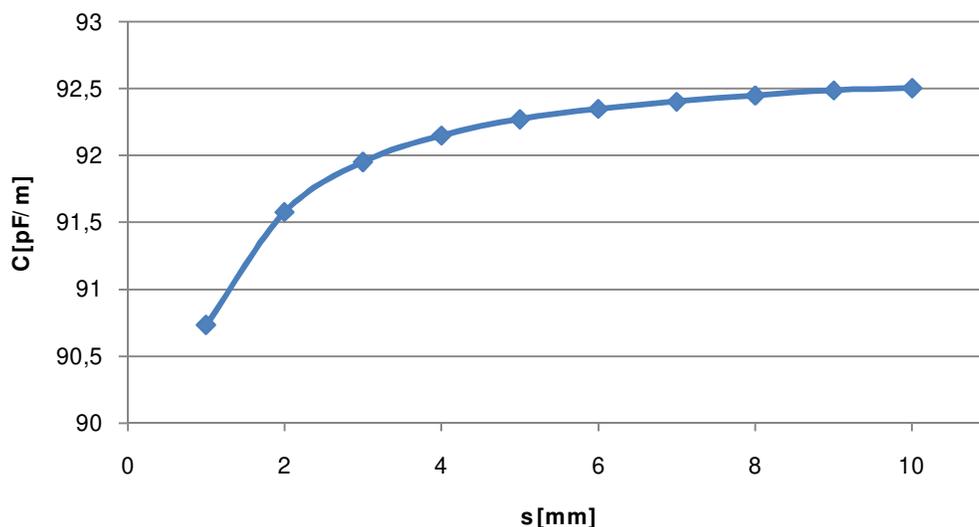


Figura 4.4.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 5^\circ$ .

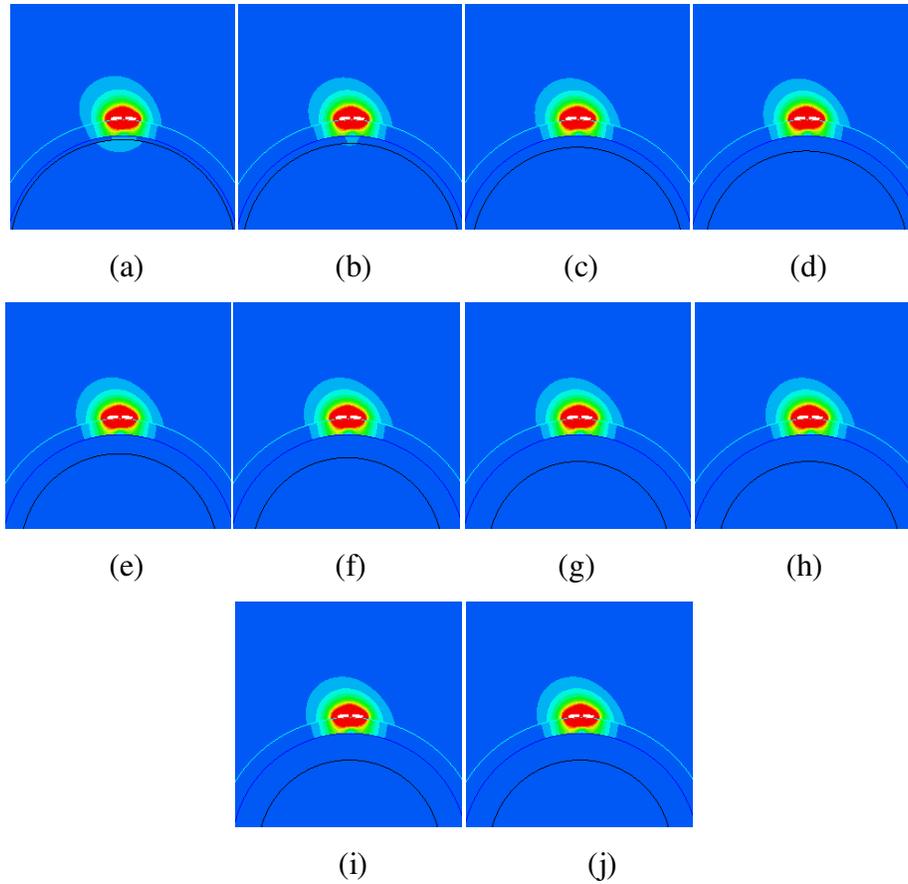


Figura 4.5.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 5^\circ$  e  $s = 1$  mm (a) , 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.6 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 30^\circ$  e a Figura 4.7 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

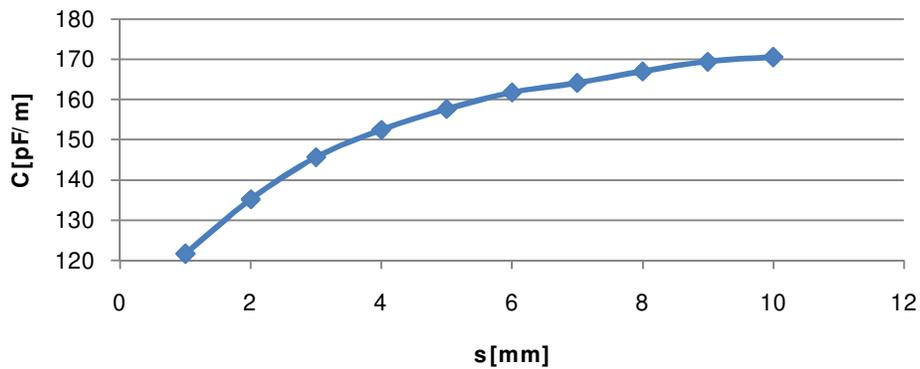


Figura 4.6.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 30^\circ$ .

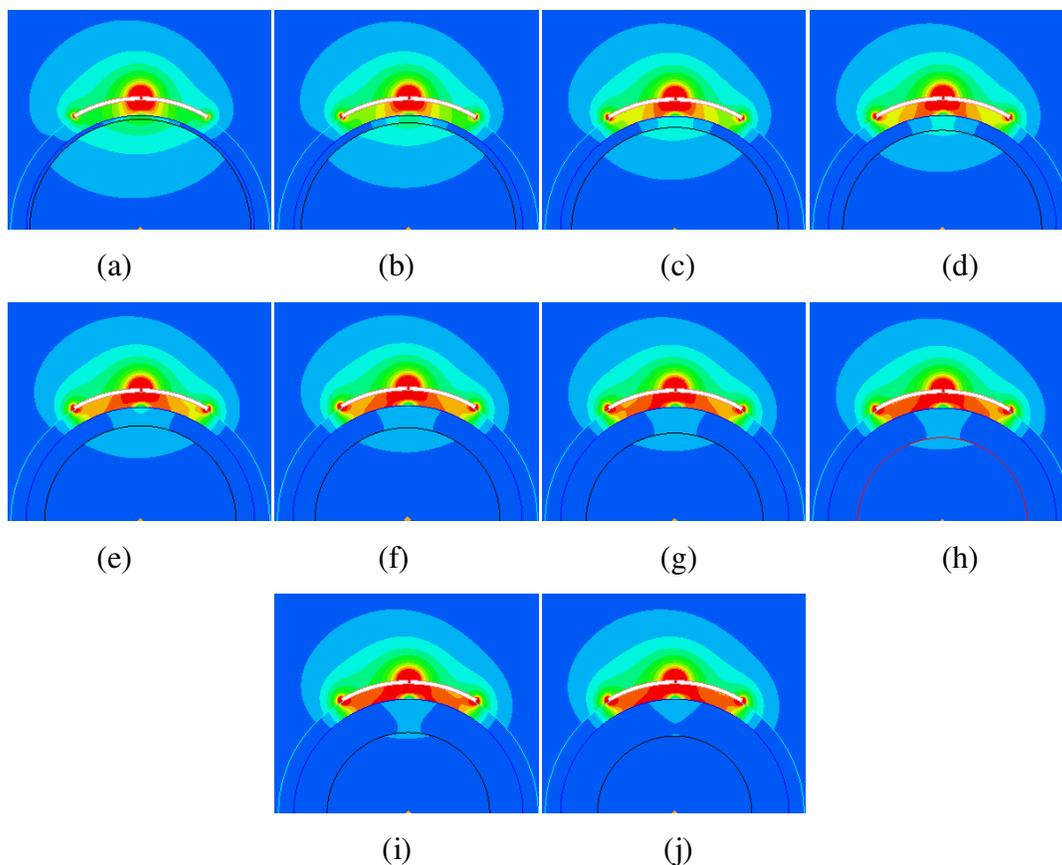


Figura 4.7.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 30^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b), 3 mm (c), 4 mm (d), 5 mm (e), 6 mm (f), 7 mm (g), 8 mm (h), 9 mm (i), 10 mm (j).

A Figura 4.8 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 35^\circ$  e a Figura 4.9 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

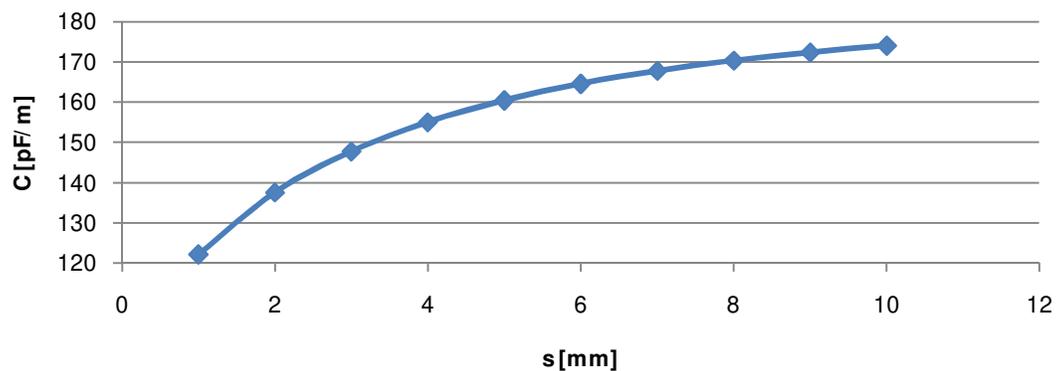


Figura 4.8.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 35^\circ$ .

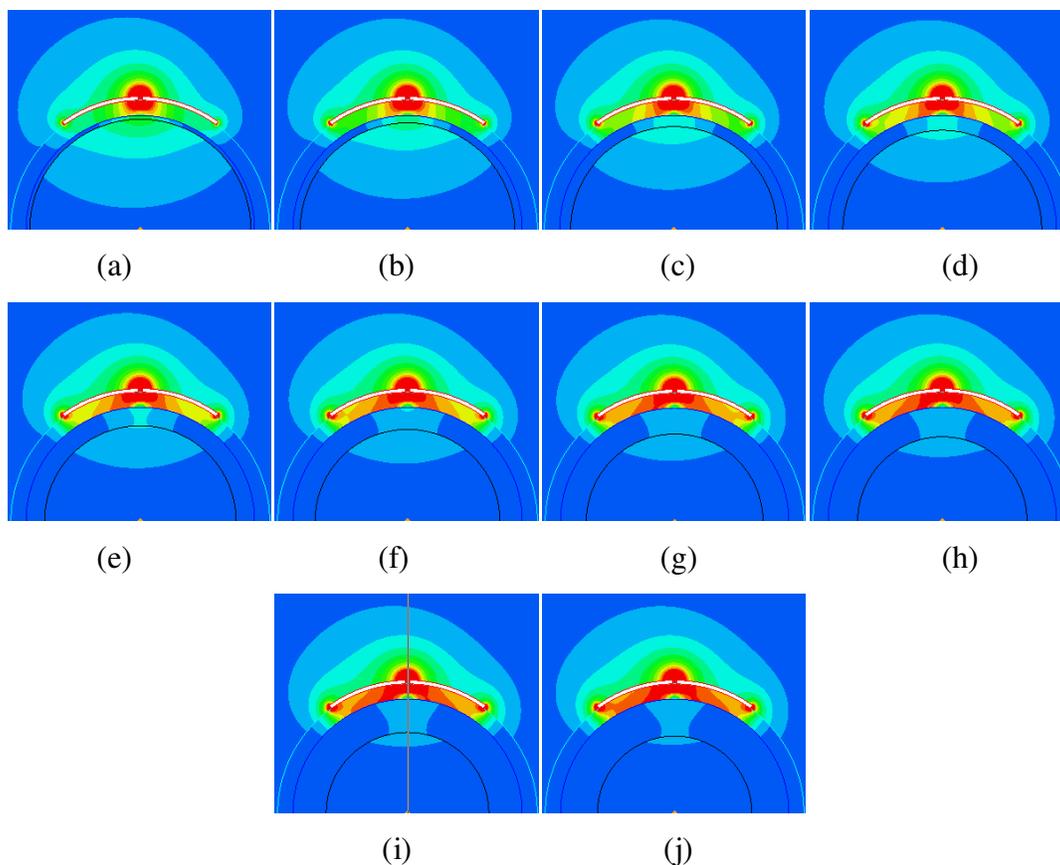


Figura 4.9.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.10 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 40^\circ$  e a Figura 4.11 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

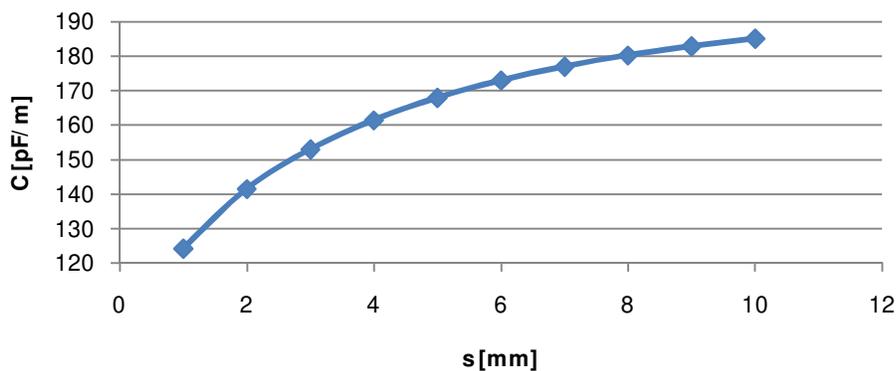


Figura 4.10.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 40^\circ$ .

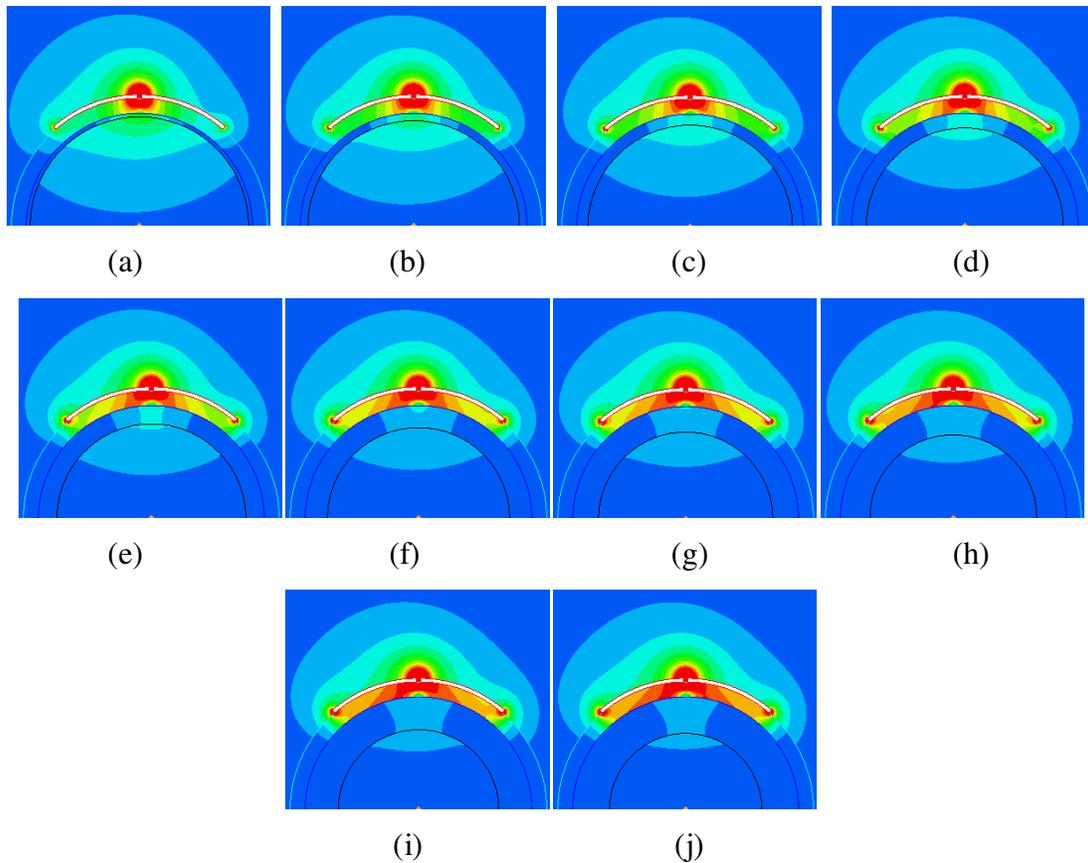


Figura 4.11.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 40^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.12 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 50^\circ$  e a Figura 4.13 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

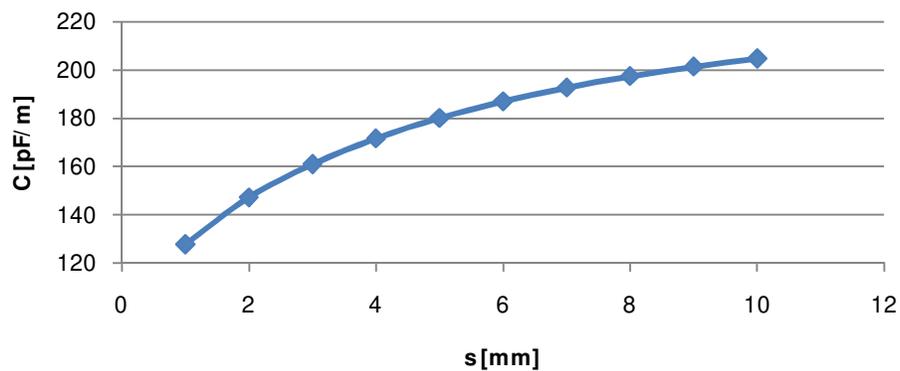


Figura 4.12.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 50^\circ$ .

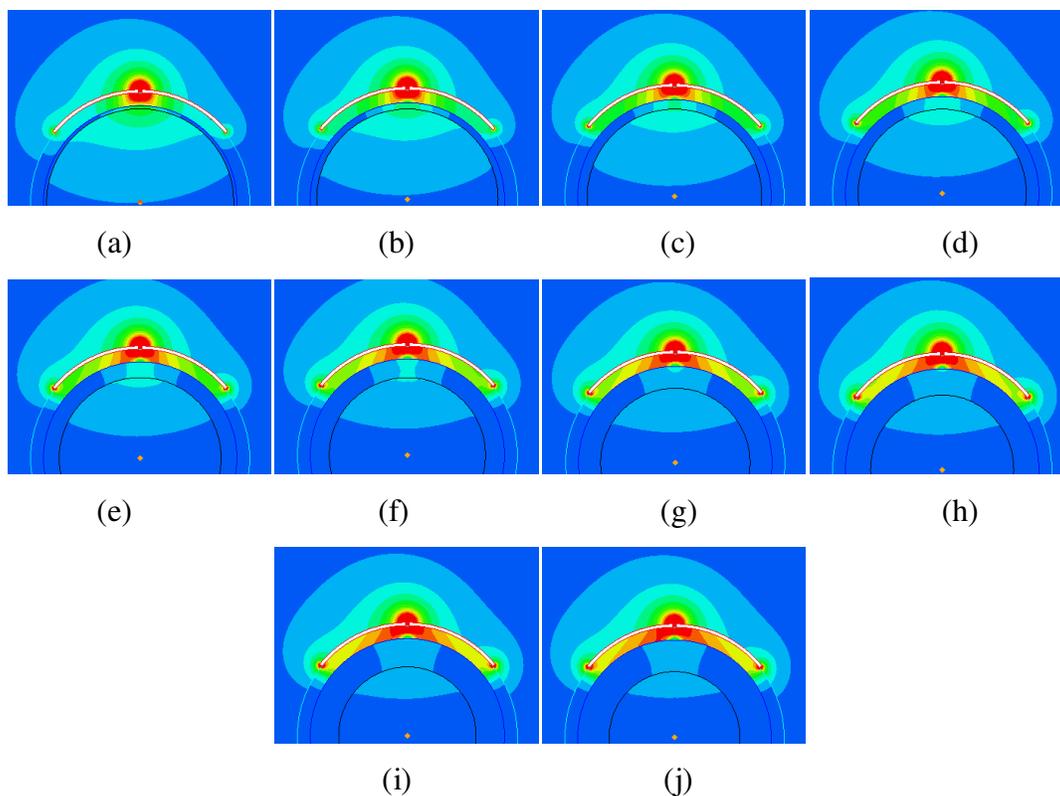


Figura 4.13.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 50^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.14 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 60^\circ$  e a Figura 4.15 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

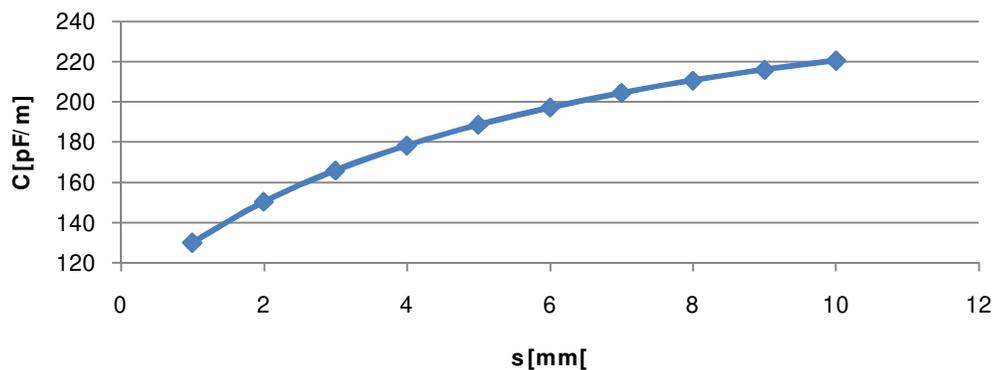


Figura 4.14.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 60^\circ$ .

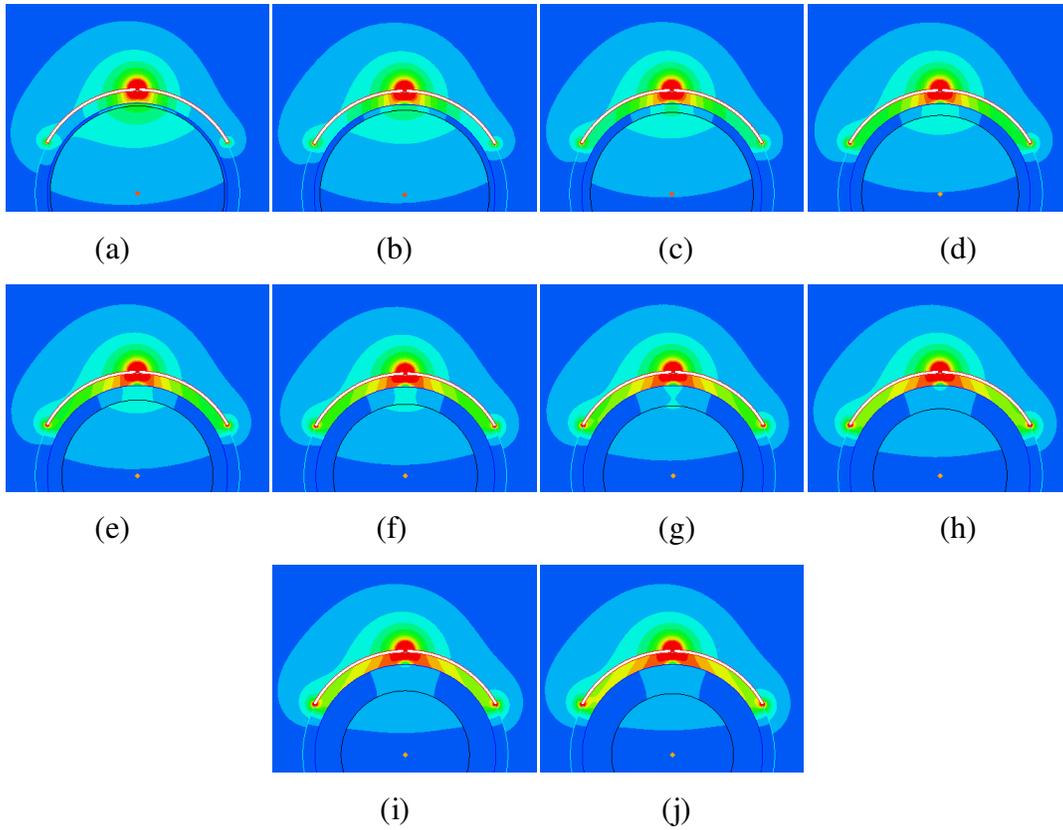


Figura 4.15.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 60^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.16 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 70^\circ$  e a Figura 4.17 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

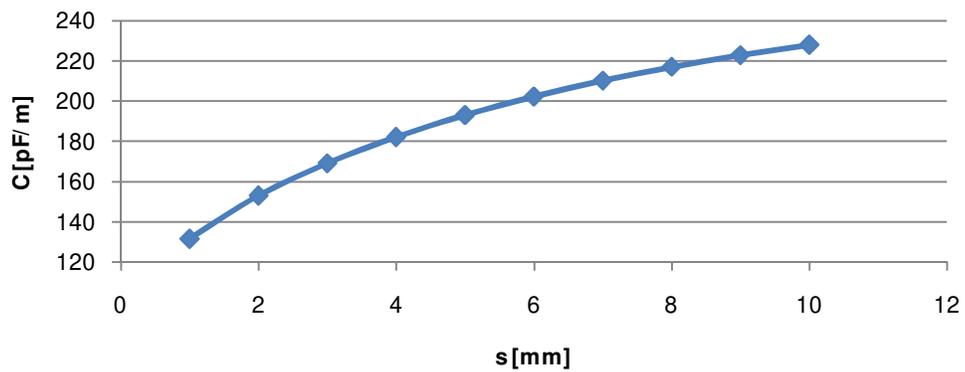


Figura 4.16.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 70^\circ$ .

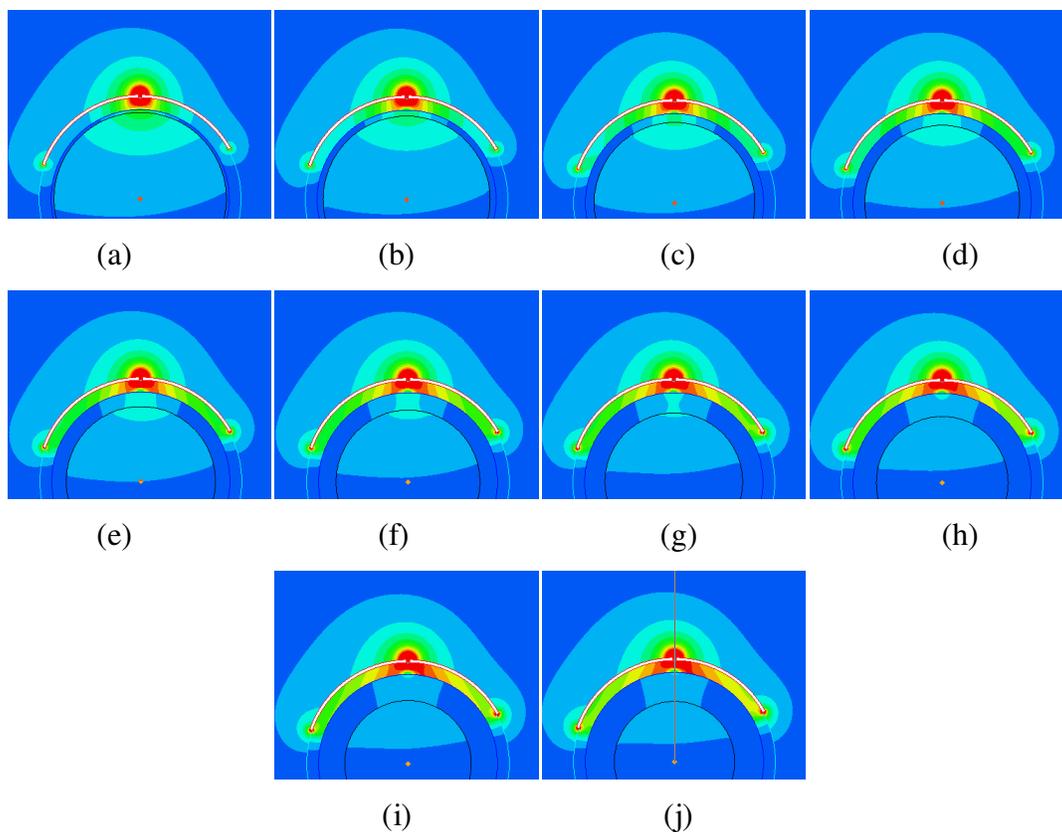


Figura 4.17.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 70^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.18 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 80^\circ$  e a Figura 4.19 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

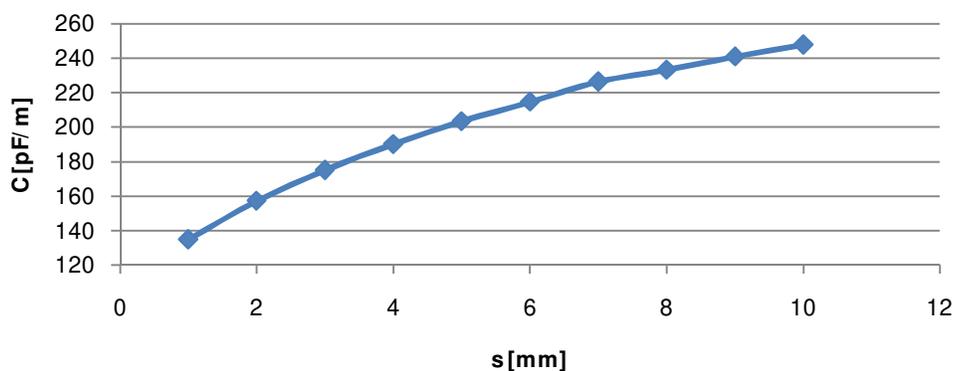


Figura 4.18.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 80^\circ$ .

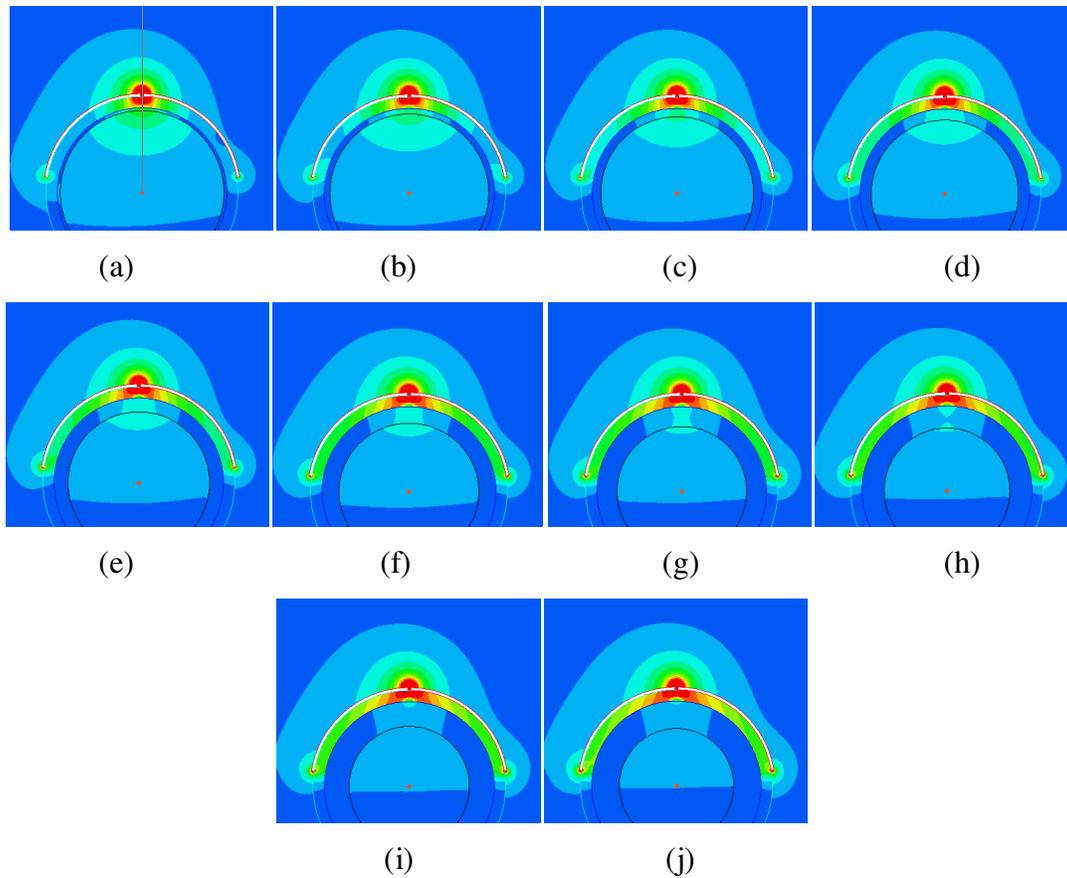


Figura 4.19.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 80^\circ$  e  $s = 1$  mm (a) , 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A Figura 4.20 apresenta a curva das capacitâncias calculadas para  $\theta = 50^\circ$  e a Figura 4.21 mostra a distribuição do campo elétrico no domínio para cada camada de água.

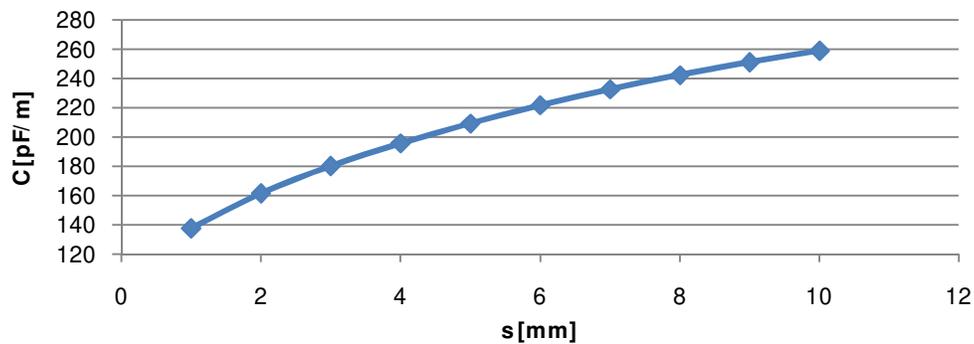


Figura 4.20.- Capacitâncias calculadas para  $\theta = 90^\circ$ .

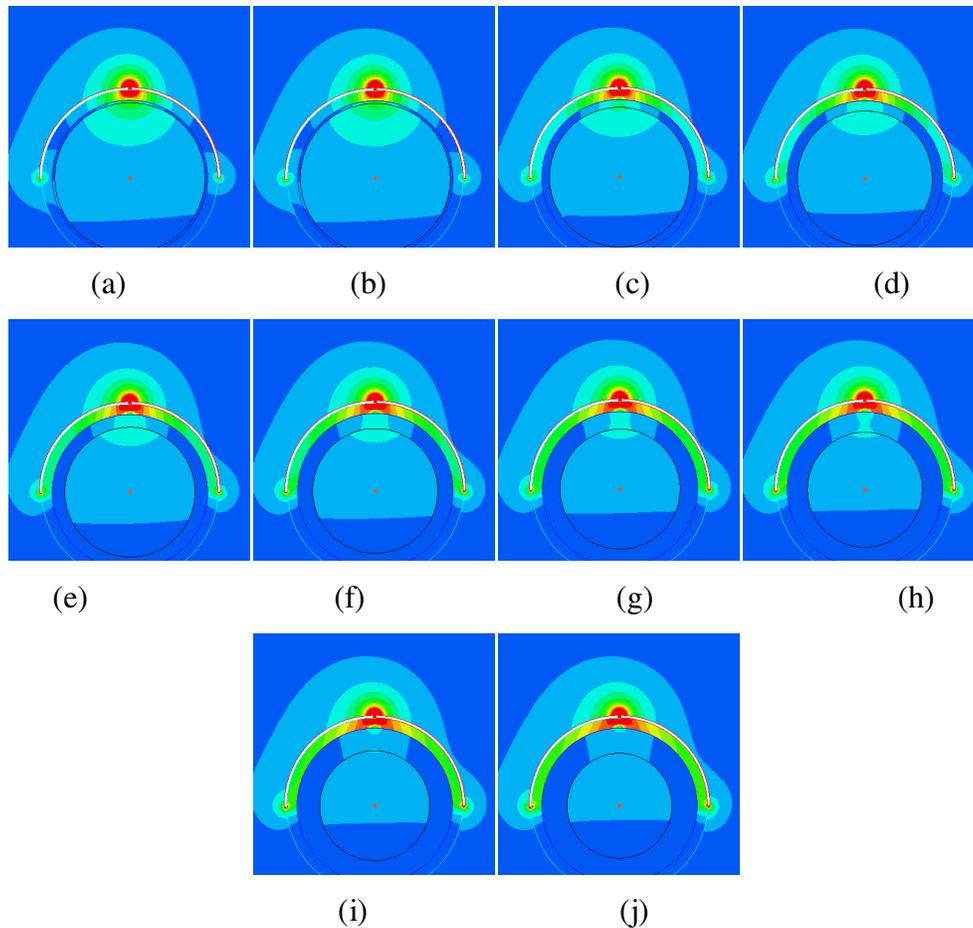


Figura 4.21.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 90^\circ$  e  $s = 1$  mm (a), 2 mm (b) , 3 mm (c) , 4 mm (d) , 5 mm (e) , 6 mm (f) , 7 mm (g) , 8 mm (h) , 9 mm (i) , 10 mm (j).

A variação da capacitância em função da espessura da camada de água indica que existe uma relação entre o comportamento do escoamento bifásico anular e distribuição dos campos elétricos que afetam o capacitor.

Independente do ângulo do eletrodo, o valor da capacitância aumenta em relação ao aumento da camada de água. Isto ocorre devido ao aumento da espessura do meio de maior permissividade do processo e à diminuição do núcleo de óleo. A variação dos valores de capacitância tem grande dependência com a espessura do vidro. De fato, é melhor utilizar uma espessura pequena, mas para a aplicação pratica tem que se levar em conta fatores como as pressões do processo, rigidez do material e disponibilidade no mercado. Como a sonda é inserida

em uma seção no oleoduto a principal característica da tubulação de vidro é que o diâmetro interno seja igual ao do oleoduto, para não interferir no escoamento.

Nas simulações foi utilizada uma espessura de 4.1mm e é notório o gradiente que ocorre dentro da tubulação devido a baixa permissividade do vidro. Como a espessura do vidro é independente do fenômeno multifásico para qualquer camada de água sempre existe uma porção de campo disperso neste meio, fixando uma capacitância mínima entre as placas.

As características de dispersão do campo elétrico permanecem em função dos diferentes ângulos de eletrodo. Quando o ângulo do eletrodo é pequeno o campo também é pequeno como o apresentado na Figura 4.5, e pode ser tão pequeno que o escoamento que esta dentro da tubulação não consegue afetar predominantemente o campo. Quando o ângulo do eletrodo aumenta como, por exemplo, no conjunto de eletrodos apresentado na Figura 4.7 o campo elétrico começa a ser maior tanto assim que o vidro não consegue manter o campo e as fases do escoamento modificam o valor da capacitância mais facilmente.

Neste tipo de configuração geométricas, a capacitância entre os eletrodos é afetada também pelo ar que está presente na face do eletrodo oposta ao vidro. Devido à baixa permissividade do ar o campo elétrico sofre um gradiente forte, que não contribui no valor da capacitância. Sempre as linhas de campo elétrico saem e entram ortogonalmente nas superfícies condutoras e a intensidade maior ocorre nas regiões onde as placas estão mais próximas.

Tendo descrito o comportamento do campo elétrico de forma geral nos meios presentes no modelo, é necessário analisar as geometrias dos eletrodos em procura da mais adequada para monitorar o escoamento anular.

O objetivo principal da sonda é medir a espessura da camada de água. As Figuras 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.18 e 4.20 apresentam os valores das capacitâncias calculadas numericamente para diferentes ângulos de eletrodos  $\theta$ . A tendência das curvas é similar em todos os casos e existe uma tendência assintótica a um valor que depende do ângulo do eletrodo e corresponde ao valor da capacitância quando a tubulação esta cheia de água.

Como a capacitância depende da área dos eletrodos quando estes são maiores o campo produzido no modelo é maior como se pode observar progressivamente respeito ao aumento do ângulo  $\theta$  nas Figuras 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15, 4.17, 4.19 e 4.21. Conseqüentemente o aumento de campo elétrico no modelo produz uma sensibilidade maior, pois mais campo é modificado entre as placas segundo a camada de água que houver.

A Figura 4.22 apresenta os valores das capacitâncias calculadas em função do ângulo  $\theta$ . Idealmente, é preferível utilizar um conjunto de eletrodos pequenos para que a modificação do campo elétrico corresponda a uma variação local das fases no topo da tubulação. Portanto, o comprimento escolhido para o eletrodo sensor  $t$  foi de 3 mm.

O sistema de medição de capacitância utiliza um sistema eletrônico desenvolvido em Reis(2003), que possui um pequeno desvio na linha base, sensibilidade alta e estável, imunidade a presença de condutâncias em paralelo e uma resolução da ordem de 1fF. A curva de capacitância obtida para um conjunto de placas com um ângulo de eletrodo  $\theta$  de  $5^\circ$  possui uma faixa de medição pequena que não supera os 6 fF. Fato que tornaria a medição de pouca resolução devido as características do medidor.

As capacitâncias obtidas para  $\theta = 5^\circ$ , comparadas com as capacitâncias obtidas para  $\theta$  de  $30^\circ$  a  $90^\circ$ , apresentam uma diferença máxima, no caso de uma espessura de camada de água  $s$  de 10 mm, de aproximadamente de 170 pF/m como é apresentado na Figura 4.22.

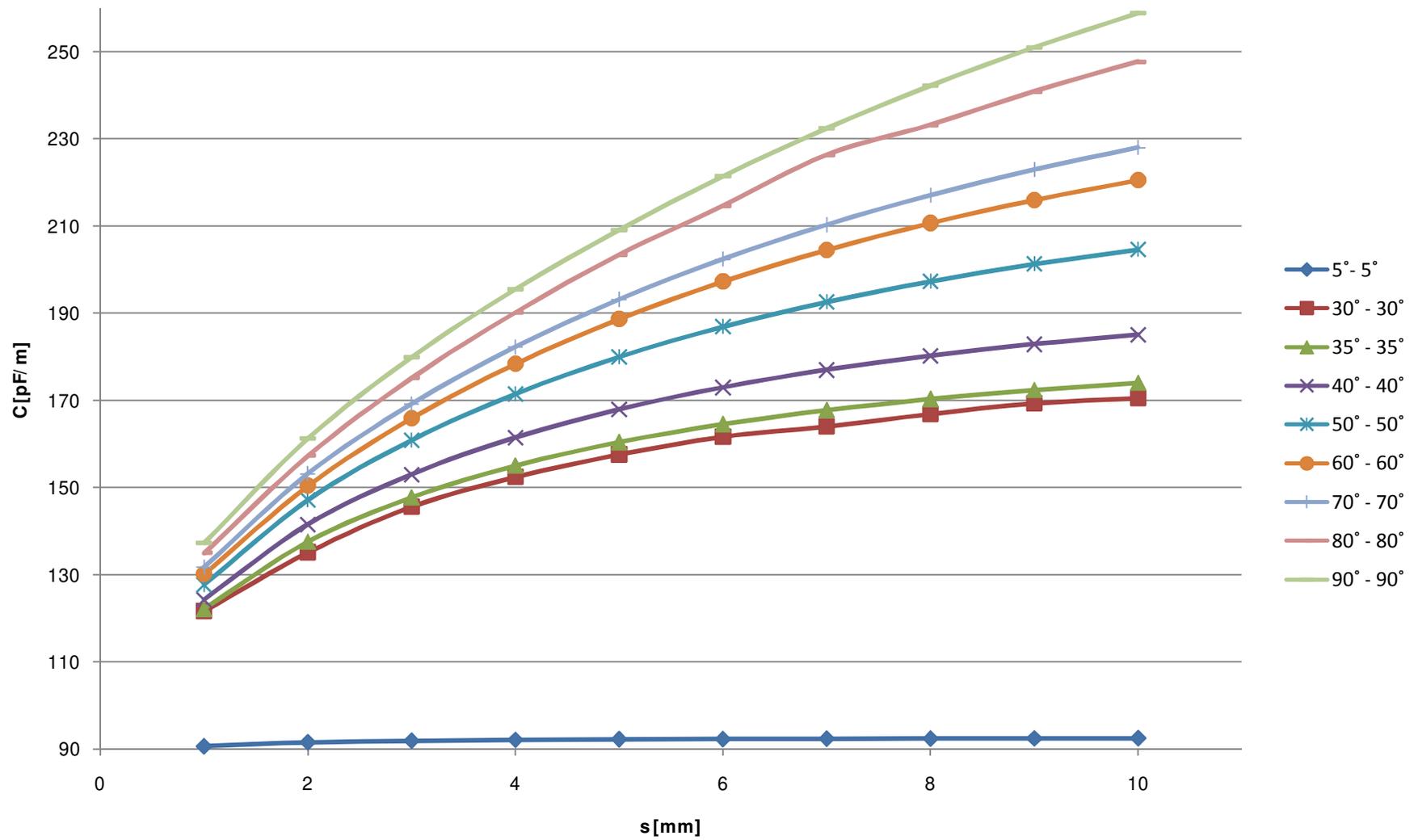


Figura 4.22.- Capacitâncias calculadas para diferentes valores de  $\theta$ .

A tendência das curvas indica que o aumento do ângulo do eletrodo  $\theta$  depois de  $30^\circ$  não tem uma influencia dominante para valores pequenos da camada de água, pois para os valores apresentados a diferença máxima foi de 15 pF/m, mas o efeito da espessura da camada de água é notório, devido ao aumento do meio de alta permissividade.

A faixa de variação dos valores de capacitância para os diferentes ângulos simulados é apresentada na Tabela 4.3

Tabela 4.3. Faixa de variação dos valores de capacitância para diferentes valores de  $\theta$ .

$\theta$	Faixa [pF/m]
$30^\circ$	48,88
$35^\circ$	51,83
$40^\circ$	60,77
$50^\circ$	76,9
$60^\circ$	90,37
$70^\circ$	96,31
$80^\circ$	112,71
$90^\circ$	121,58

Qualquer dos ângulos simulados maior de  $30^\circ$ , apresenta uma faixa de variação dos valores de capacitância razoável, que pode ser lida pelo transdutor utilizado. Em trabalhos anteriores como o de Reis(2003) onde foi utilizado um sensor com estas características, é aconselhado utilizar ângulos maiores de  $30^\circ$ , para comprimentos de eletrodo sensor  $t$  menores de 5 mm. Além disso, um eletrodo pequeno concentra o campo na região onde ocorre o fenômeno que se pretende medir. Um eletrodo com ângulo  $\theta$  de  $35^\circ$  e comprimento  $t$  de 3 mm é o recomendado para realizar as medições, pois ao aumentar o ângulo pode-se diminuir o comprimento do eletrodo sem afetar o processo de medição e concentrar o campo para proporcionar uma medida local.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de capacitância para a geometria escolhida, onde a faixa de variação dos valores de capacitância é de 155,49 fF e a Figura 4.23 mostra o comportamento da capacitância para distintos valores de espessura de camadas de água.

Fazendo uso do EES, foi obtida a Equação 46 mediante uma regressão de sexta ordem que representa a curva característica obtida para o sensor de  $\theta = 35^\circ$ .

$$y = 293,538 + 92,1916x - 22,5337x^2 + 3,86324x^3 - 0,417683x^4 + 0,0249865x^5 - 0,000625x^6 \quad (4.6)$$

Tabela 4.4 Valores de capacitância do sensor recomendado.

s [mm]	C [fF]
1	366,66
2	412,8
3	443,34
4	465,15
5	481,35
6	493,71
7	503,37
8	511,02
9	517,17
10	522,15

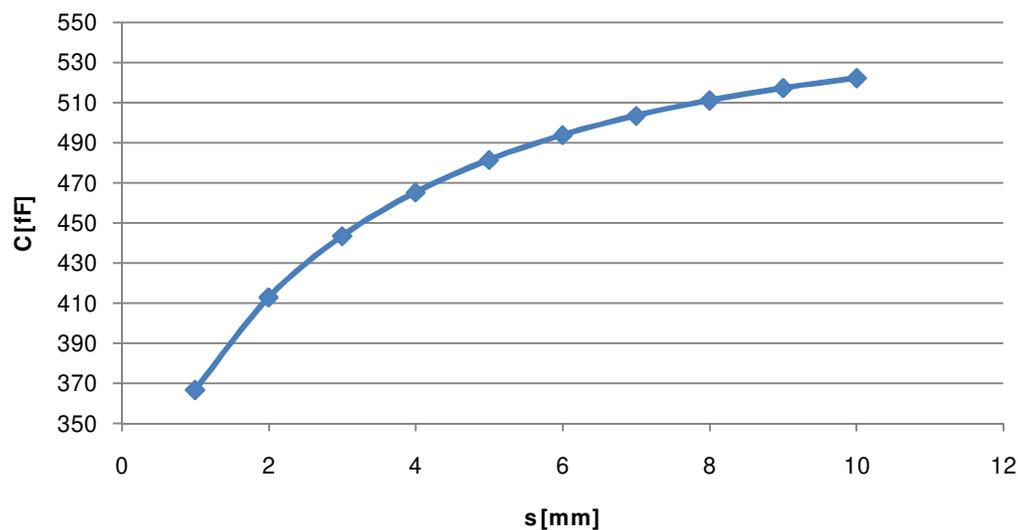


Figura 4.23.- Capacitâncias calculadas para o sensor recomendado.

Em testes realizados no laboratório por Dos Santos(2009) foi obtida uma curva de calibração estática, utilizando tarugos de teflon de diâmetros diferentes. A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.5 Valores de capacitância do sensor obtidos na calibração estática, Dos Santos(2009) .

s [mm]	C [fF]
1	429
1,2	434
1,35	443
1,5	453
1,75	463
2	471
2,45	489
3,15	498
4,5	513
7,65	522
10	522

A Figura 4.24 compara os resultados experimentais com os resultados obtidos nas simulações numéricas para os mesmos valores de espessura de camada de água  $s$ .

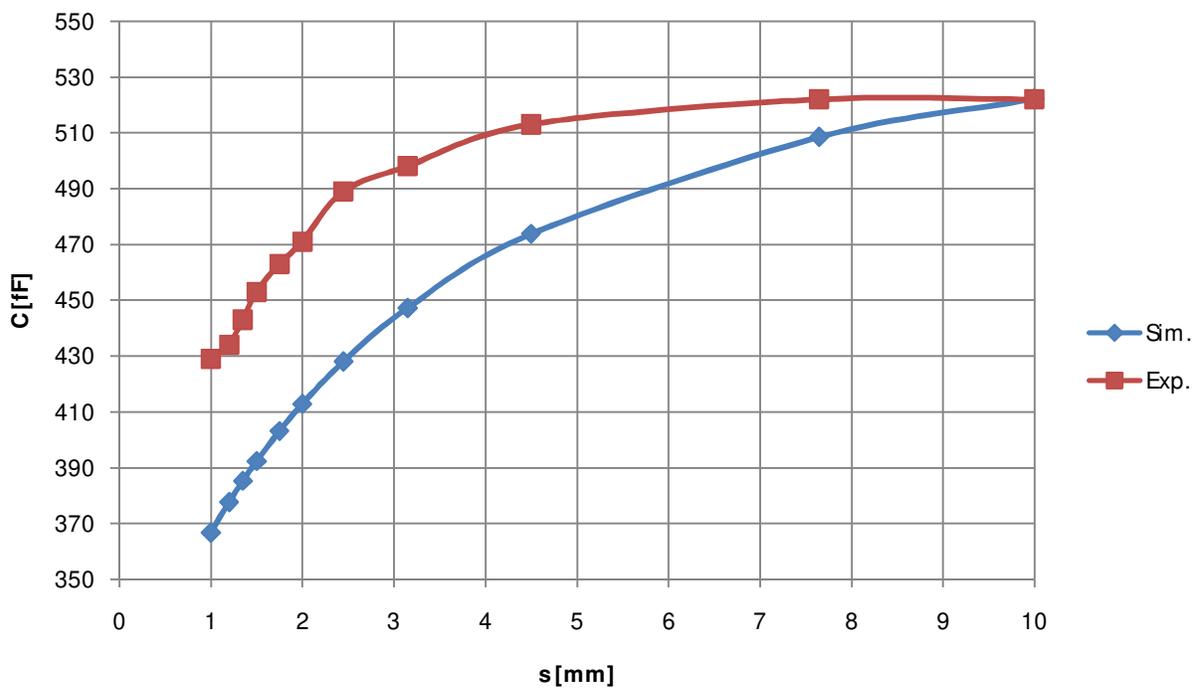


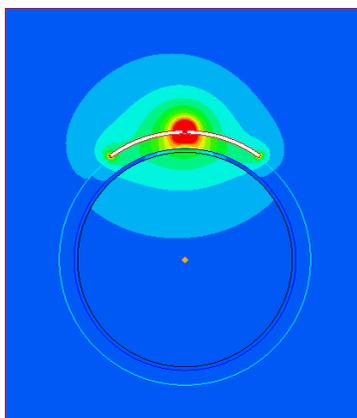
Figura 4.24.- Capacitâncias calculadas e medidas para o sensor recomendado.

O erro maior, de aproximadamente 14%, está localizado onde as camadas de água são pequenas. Quando a espessura da camada de água  $s$  atinge 10 mm o erro é nulo. Para valores intermediários o erro é da ordem de 10% e o comportamento tem as mesmas características, com uma inclinação maior no começo e uma tendência assintótica no final.

#### 4.4 Resultados numéricos para escoamento anular excêntricos

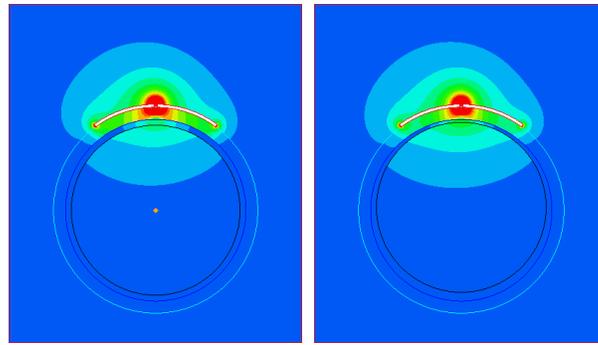
Tendo definida uma geometria para o sensor de capacitância que consegue detectar variações da espessura da camada de água no escoamento anular, é preciso detalhar o efeito da excentricidade inerente do escoamento horizontal causado pela diferença nas densidades dos fluidos.

As Figuras 4.25 até 4.34 apresentam o comportamento do campo elétrico devido a excentricidade para diferentes valores do diâmetro do núcleo de óleo, Nota-se que neste caso  $s$  é diferente de  $R_i - R_c$ .



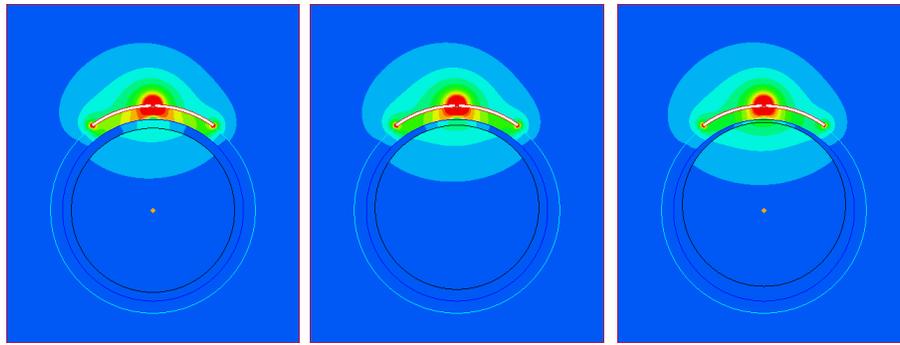
(a)

Figura 4.25.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $R_c = 29.9$  mm e  $s = 1$  mm (a).



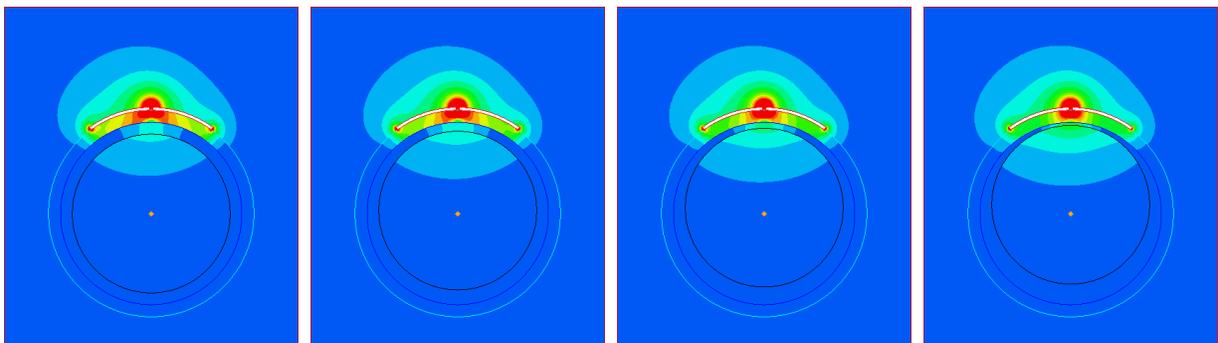
(a) (b)

Figura 4.26.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $R_c = 28.9$  mm e  $s = 2$  mm (a), 1 mm (b).



(a) (b) (c)

Figura 4.27.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $R_c = 27.9$  mm e  $s = 3$  mm (a), 2 mm (b), 1 mm (c).



(a) (b) (c) (d)

Figura 4.28.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $R_c = 26.9$  mm e  $s = 4$  mm (a), 3 mm (b), 2 mm (c), 1 mm (d).

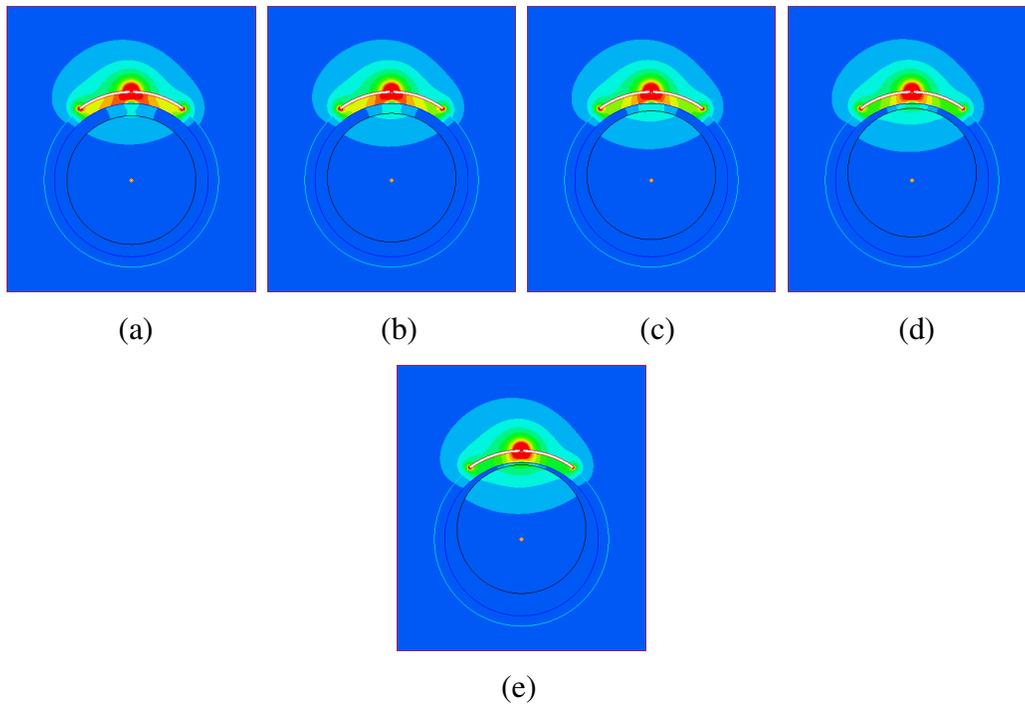


Figura 4.29.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $Rc = 25.9$  mm e  $s = 5$  mm (a), 4 mm (b), 3 mm (c), 2 mm (d), 1 mm (e).

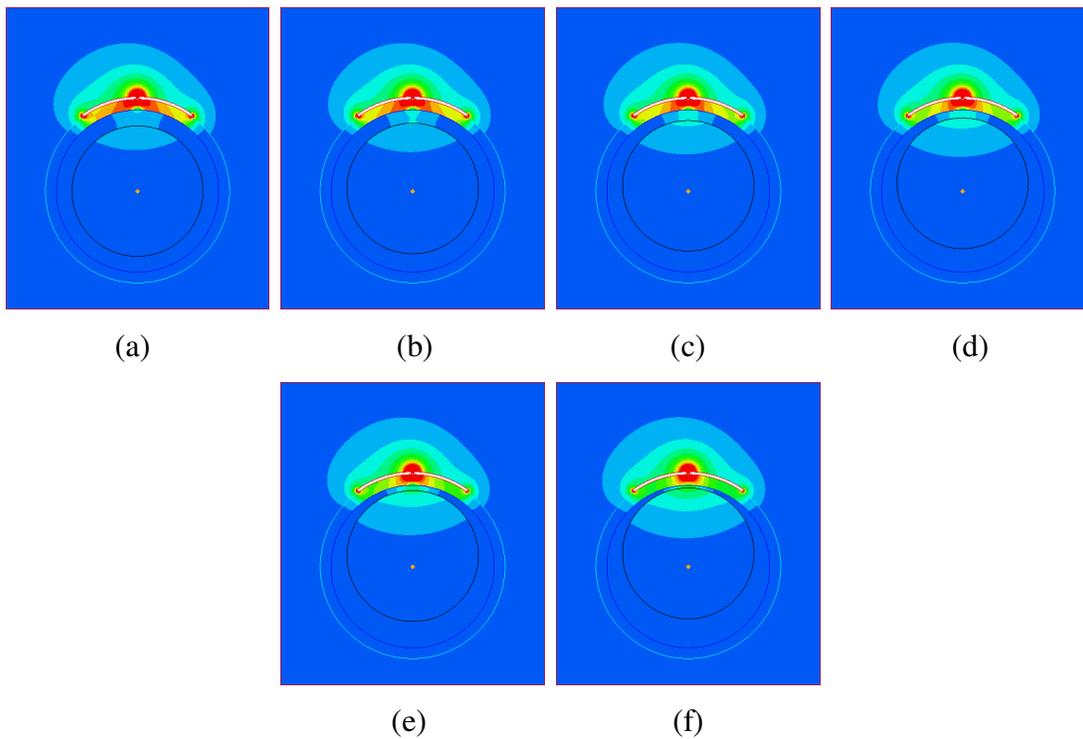


Figura 4.30.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $Rc = 24.9$  mm e  $s = 6$  mm (a), 5 mm (b), 4 mm (c), 3 mm (d), 2 mm (e), 1 mm (f).

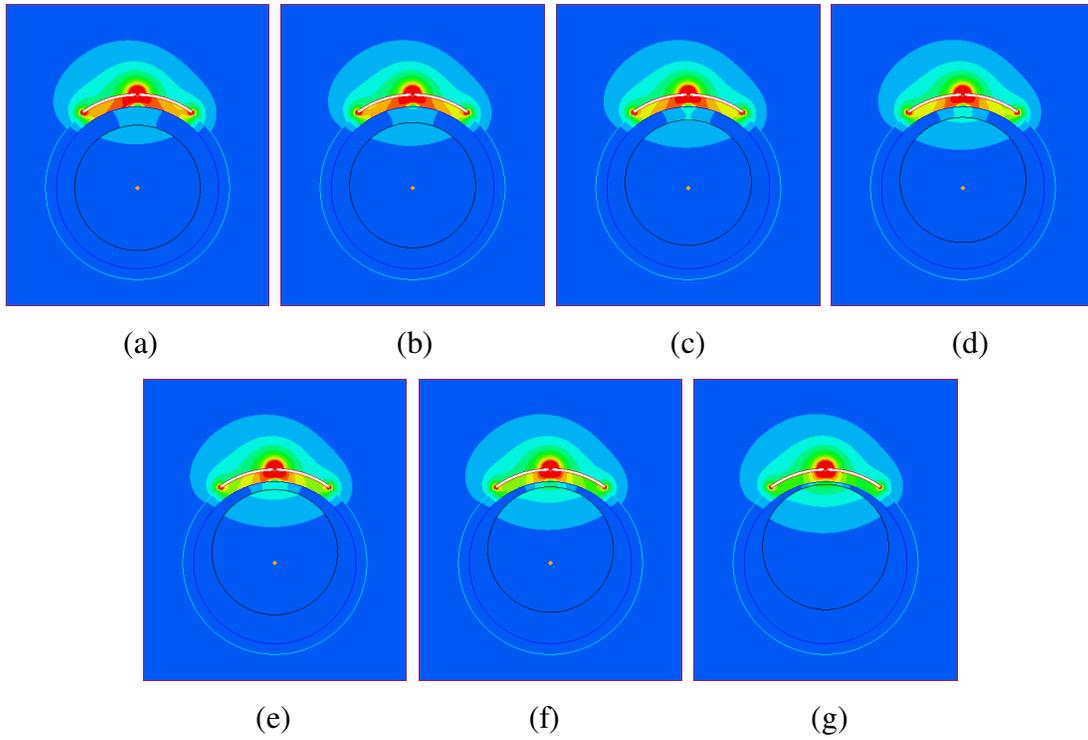


Figura 4.31.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $Rc = 23.9$  mm e  $s = 7$  mm (a), 6 mm (b), 5 mm (c), 4 mm (d), 3 mm (e), 2 mm (f), 1 mm (g).

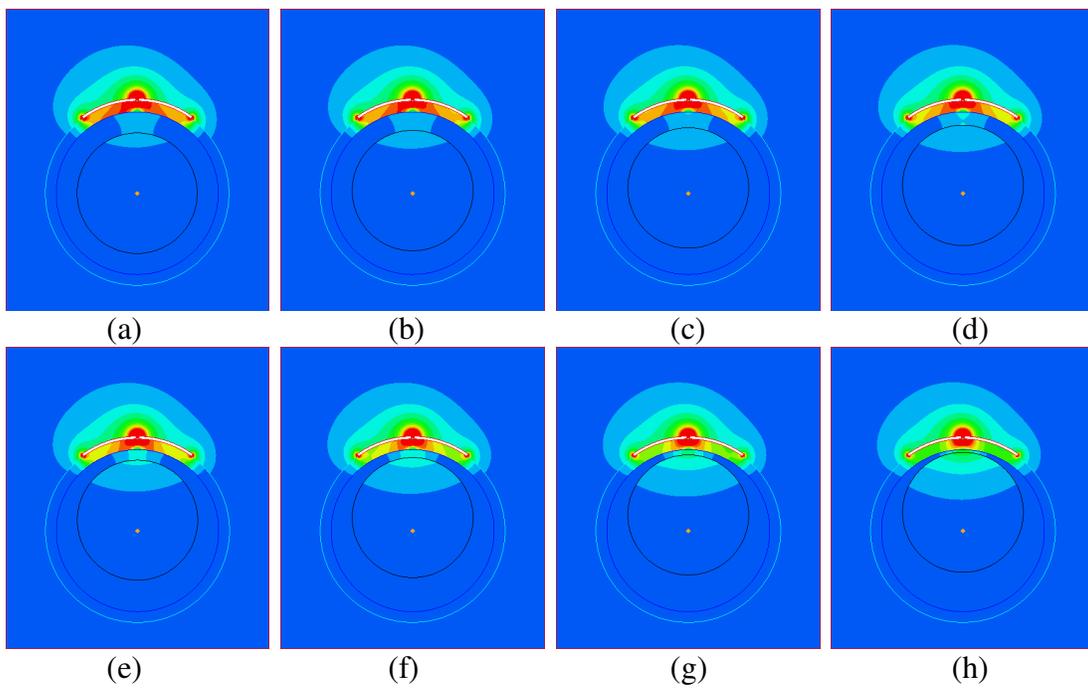


Figura 4.32.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $Rc = 22.9$  mm e  $s = 8$  mm (a), 7 mm (b), 6 mm (c), 5 mm (d), 4 mm (e), 3 mm (f), 2 mm (g), 1 mm (h).

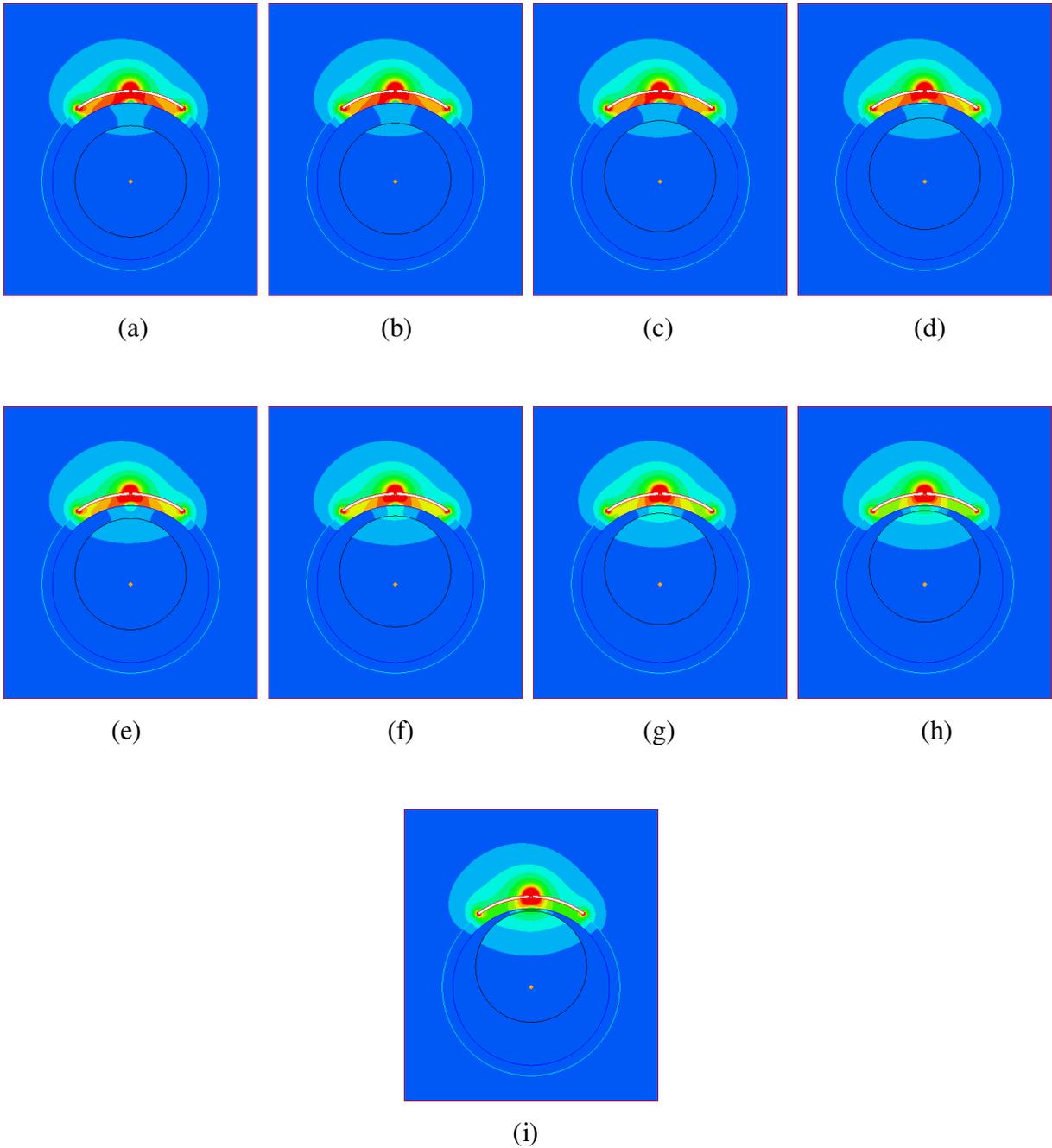


Figura 4.33.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $R_c = 21.9$  mm e  $s = 9$  mm (a), 8 mm (b), 7 mm (c), 6 mm (d), 5 mm (e), 4 mm (f), 3 mm (g), 2 mm (h), 1 mm (i).

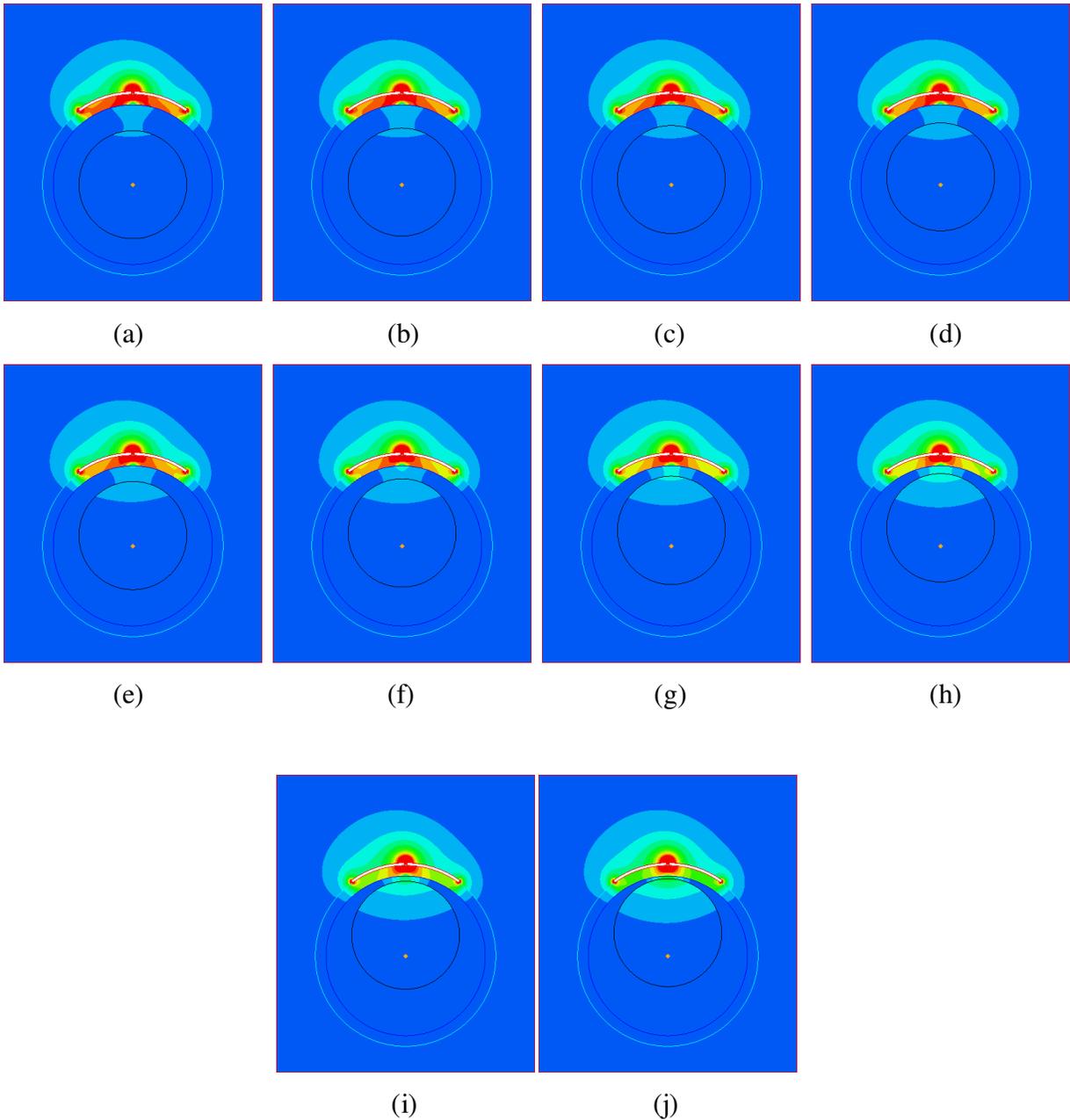


Figura 4.34.- Distribuição do campo elétrico para  $\theta = 35^\circ$ ,  $R_c = 20.9$  mm e  $s = 10$  mm (a), 9 mm (b), 8 mm (c), 7 mm (d), 6 mm (e), 5 mm (f), 4 mm (g), 3 mm (h), 2 mm (i), 1 mm (j).

As curvas dos valores de capacitância para cada condição apresentada nas Figuras 4.25 até 4.34 são mostradas na Figura 4.35, com os valores de  $s$  [mm] nas abscissas e  $C$  [pF] nas ordenadas.

Cada diâmetro do núcleo de óleo utilizado nas simulações fornece possibilidades diferentes de  $s$ , pois quanto menor é o diâmetro mais posições o núcleo pode ocupar no eixo onde se avalia o efeito da excentricidade. A Figura 4.25 apresenta um núcleo de diâmetro de 29,9 mm que corresponde ao diâmetro máximo, onde  $s$  é mínimo e igual a 1 mm. A Figura 4.34 apresenta um núcleo de diâmetro de 20,9 mm onde os valores de  $s$ , quando a excentricidade é nula, corresponde ao máximo valor de  $s$ .

Em todos os casos o campo elétrico sofre uma gradiente forte quando a espessura da camada de água diminuiu. O maior gradiente sempre ocorre na área onde a permissividade é menor, ou seja, ocorre no núcleo de óleo. Este fato faz com que o valor de capacitância decresça e o comportamento das curvas com as variações de excentricidade seja da mesma natureza que o comportamento das curvas para escoamento concêntrico. Nota-se que independente do diâmetro do núcleo o efeito da excentricidade afeta o campo elétrico da mesma forma e a diferença está na proporção como ele é afetado.

Na Figura 4.35 os mínimos de cada curva representam camadas de água pequenas e a curva do núcleo de diâmetro maior apresenta somente um ponto, pois não existe possibilidade de deslocamento no eixo vertical. Quando o diâmetro do núcleo diminuí existem mais pontos de excentricidade, assim como também diminui a quantidade de óleo e o valor de capacitância aumenta progressivamente. Portanto, as curvas estão deslocadas para acima na escala de capacitância.

A distribuição das fases do escoamento e sua posição na tubulação influenciam o valor do capacitor formado entre as placas côncavas, resultando em uma ambigüidade nos resultados obtidos. Este efeito se observa claramente na Figura 4.35 onde um valor de  $C$ [pF] no eixo Y superior de 125 pF corresponde a diferentes situações de excentricidade para diferentes diâmetros de núcleo.

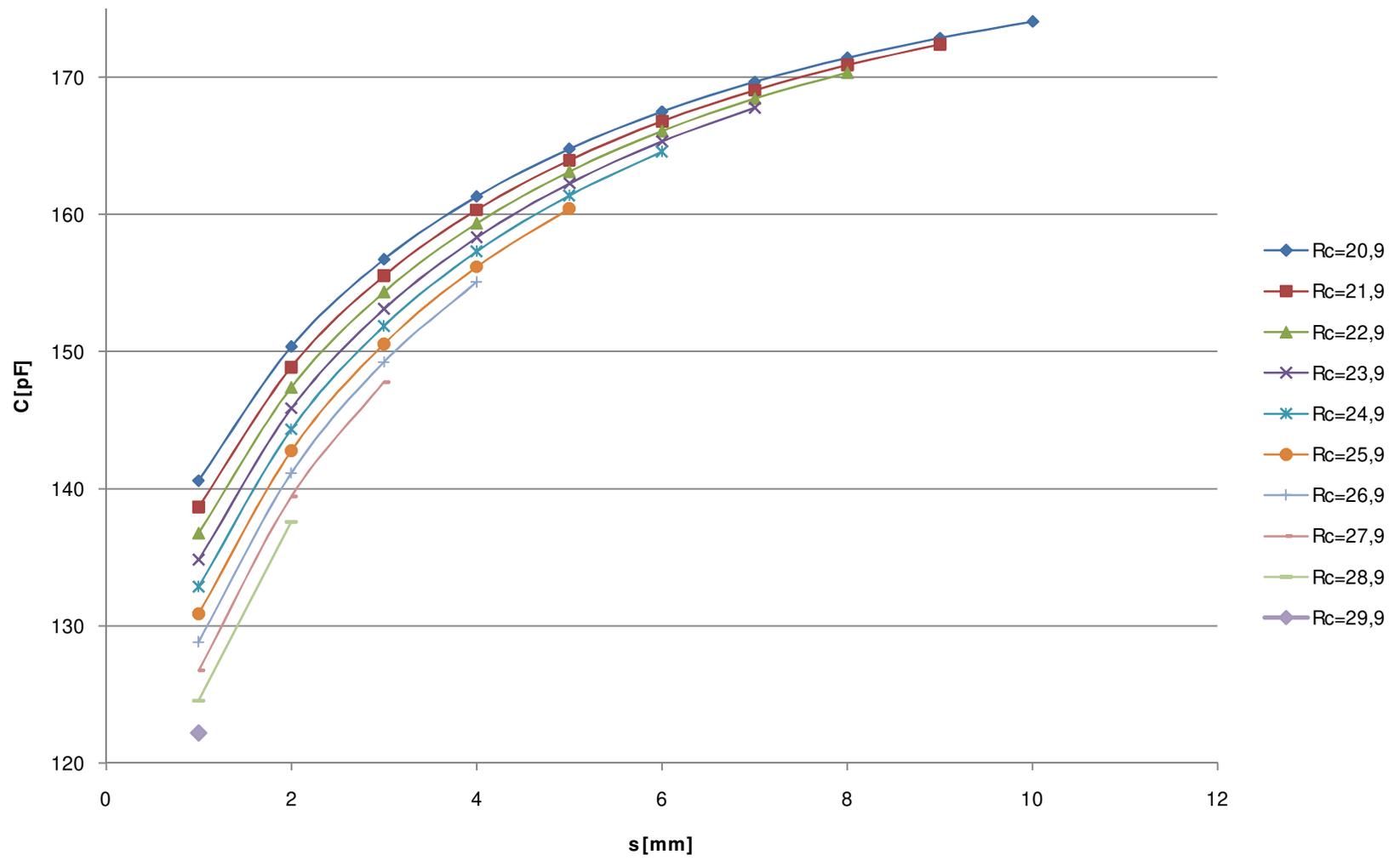


Figura 4.35.- Capacitâncias calculadas para diferentes valores de  $\theta$ .

Uma solução consiste em utilizar uma sonda das mesmas características posicionada a  $180^\circ$  do topo da tubulação para medir a espessura da camada de água na parte inferior da tubulação e estabelecer o diâmetro do núcleo e assim definir com dois pontos qual é o estado do escoamento.

## Capítulo 5

### Emulsificação e Efeito Volumétrico

Neste capítulo são tratados os modelos de emulsificação apresentados no Capítulo 2, mediante testes numéricos feitos para condições reais de mistura presentes no transporte e é feita uma comparação com dados experimentais para obter o modelo mais próximo da realidade. Com os valores obtidos do modelo é avaliado o desvio que ocorre na sonda capacitiva com núcleos de óleo concêntricos. Na seqüência é realizada uma análise do comportamento da capacitância quando se aproxima uma onda idealizada típica do escoamento anular ao conjunto de eletrodos mediante técnicas de simulação tridimensional.

#### 5.1 Emulsificações do sistema

Como é tratado na secção 2.1.1, o *core-flow* é implementado mediante a injeção de óleo numa tubulação cheia de água, fato que produz o fenômeno de emulsificação do óleo, ou seja, uma pequena quantidade de água encontra-se dispersa no óleo. Quando o óleo é misturado na água a mistura é chamada de emulsão O/W, sendo a água a fase contínua e o óleo a fase dispersa. Como isto ocorre numa porcentagem baixa, não produz uma variação significativa na capacitância. Quando o óleo é o meio contínuo e a água é o meio disperso é aconselhável verificar o comportamento das propriedades dielétricas, pois estas podem variar numa razão maior já que a água possui uma maior permissividade e condutividade em relação ao óleo, podendo gerar perturbações relevantes. Na natureza o óleo possui uma porcentagem de água e este tipo de emulsão é chamado de emulsificação W/O para o qual foram desenvolvidos métodos de análise por distintos autores, conforme descritos na secção 2.4.

Cada um dos quatro modelos apresentados foi testado para valores menores de 40% de concentração. A Eq. 5.1 representa o modelo de Maxwell-Wagner e a Figura 5.1 apresenta o comportamento da permissividade para diferentes emulsificações.

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^*c} = \left( \frac{1 + 2 \left( \frac{\varepsilon^*d - \varepsilon^*c}{\varepsilon^*d + 2\varepsilon^*} \right) \phi}{1 - \left( \frac{\varepsilon^*d - \varepsilon^*c}{\varepsilon^*d + 2\varepsilon^*} \right) \phi} \right) \quad (5.1)$$

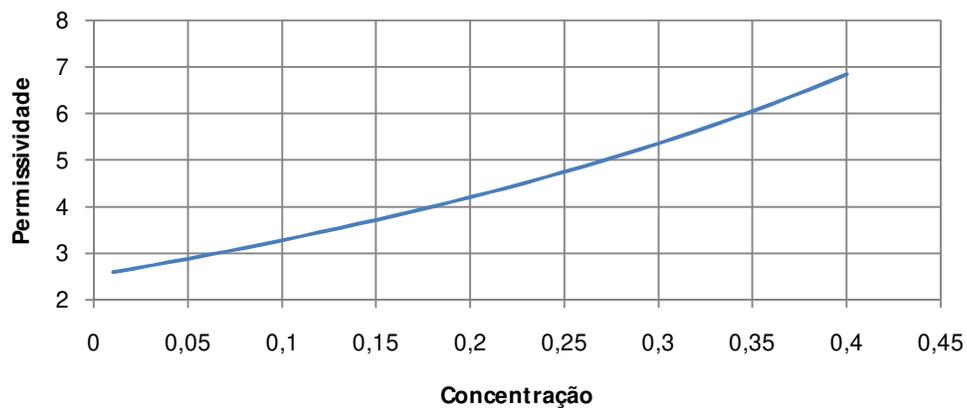


Figura 5.1.- Modelo de Maxwell-Wagner.

A equação que representa o modelo de Bruggeman-Hanai é a Eq. 5.2 e a curva apresentada na Figura 5.2 representa esta equação.

$$\left( \frac{\varepsilon^* - \varepsilon^*d}{\varepsilon^*c - \varepsilon^*d} \right) \left( \frac{\varepsilon^*c}{\varepsilon^*} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \phi \quad (5.2)$$

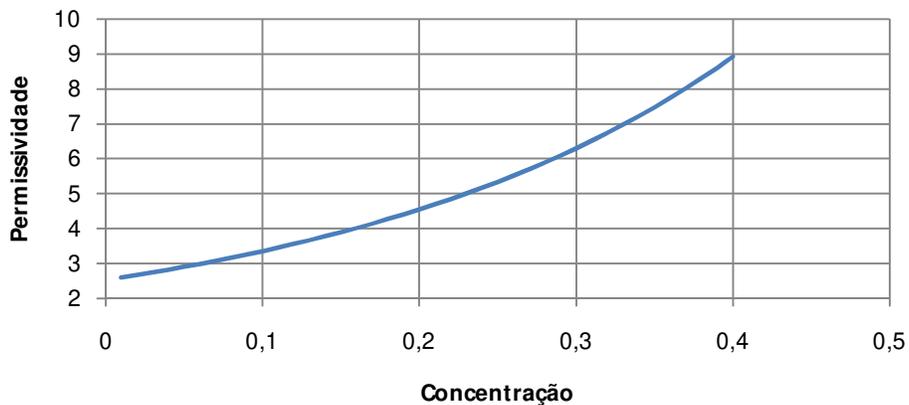


Figura 5.2.- Modelo de Bruggeman-Hanai.

O modelo de Lewis-Nielsen é apresentado nas Eq. 5.3 e Eq. 5.4 e a Figura 5.3 mostra o comportamento da permissividade para a emulsificação W/O.

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^*c} = \frac{\left(1 + 2\left(\frac{\varepsilon^*d - \varepsilon^*c}{\varepsilon^*d + 2\varepsilon^*}\right)\phi\right)}{\left(1 - \left(\frac{\varepsilon^*d - \varepsilon^*c}{\varepsilon^*d + 2\varepsilon^*}\right)\phi\Psi\right)} \quad (5.3)$$

Onde

$$\psi = 1 + \left(\frac{1 - \phi m}{\phi m^2}\right)\phi \quad (5.4)$$

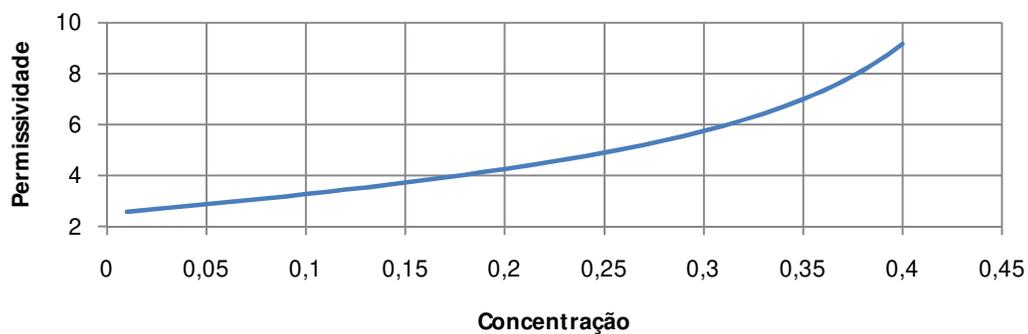


Figura 5.3.- Modelo de Lewis-Nielsen.

O modelo de Pan é apresentado na Eq. 5.5 e a curva de comportamento da permissividade na emulsificação W/O é apresentada na Figura 5.4.

$$\left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^*c}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\varepsilon^*d - \varepsilon^*c}{\varepsilon^*d - \varepsilon^*}\right) = \left(1 - \frac{\phi}{\phi c}\right)^{-\phi c} \quad (5.5)$$

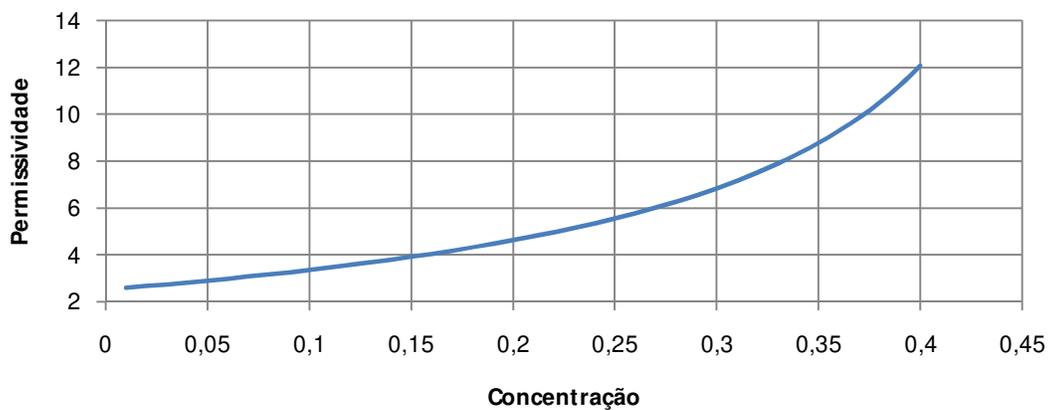


Figura 5.4.- Modelo de Pan.

A Figura 5.5 apresenta uma comparação dos modelos apresentados acima, onde as curvas que representam a variação da permissividade com a mudança da emulsificação apresentam em todos os casos inclinações positivas, o que indica que o aumento da quantidade de água no meio incrementa a permissividade da mistura, devido ao fato que o meio disperso (água) possui uma permissividade maior que o óleo. O modelo de Pan é o que possui valores maiores assim como o modelo de Maxwell-Wagner possui os valores menores. O fato de que algumas das curvas sejam de 2 ordem é devido a natureza das equações que representam o modelo.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de alguns pontos dos modelos analisados e na ultima coluna apresenta os valores de permissividade obtida de experimentos feitos com o E4980A *Precision LCR Meter*.

Tabela 5.1 Permissividades das emulsões.

%	M-W	B-H	L-N	Pal	Teste
5	2,886	2,901	2,886	2,90	2,951
10	3,282	3,350	3,286	3,356	3,402
15	3,720	3,890	3,738	3,915	3,921
20	4,206	4,542	4,265	4,623	4,606
25	4,749	5,333	4,909	5,551	5,352
30	5,360	6,297	5,755	6,835	6,239
35	6,052	7,476	6,996	8,764	7,275
40	6,842	8,921	9,162	12,069	8,614

A natureza do comportamento da emulsificação nas medidas experimentais corresponde ao esperado nos modelos matemáticos estudados como é apresentado na Figura 5.6, mas cada um deles apresenta uma diferença com as medidas. Dos modelos utilizados o mais próximo dos valores experimentais é o modelo de Bruggeman-Hanai, onde os valores dos erros apresentados na Tabela 5.2 são mínimos.

A Figura 5.7 apresenta uma curva que representa o modelo de Bruggeman-Hanai e outra que representa os valores obtidos nas medidas, onde a diferença para valores pequenos de emulsificação e próximos do 40% é da mesma ordem de grandeza, sendo o erro máximo de 3.5%.

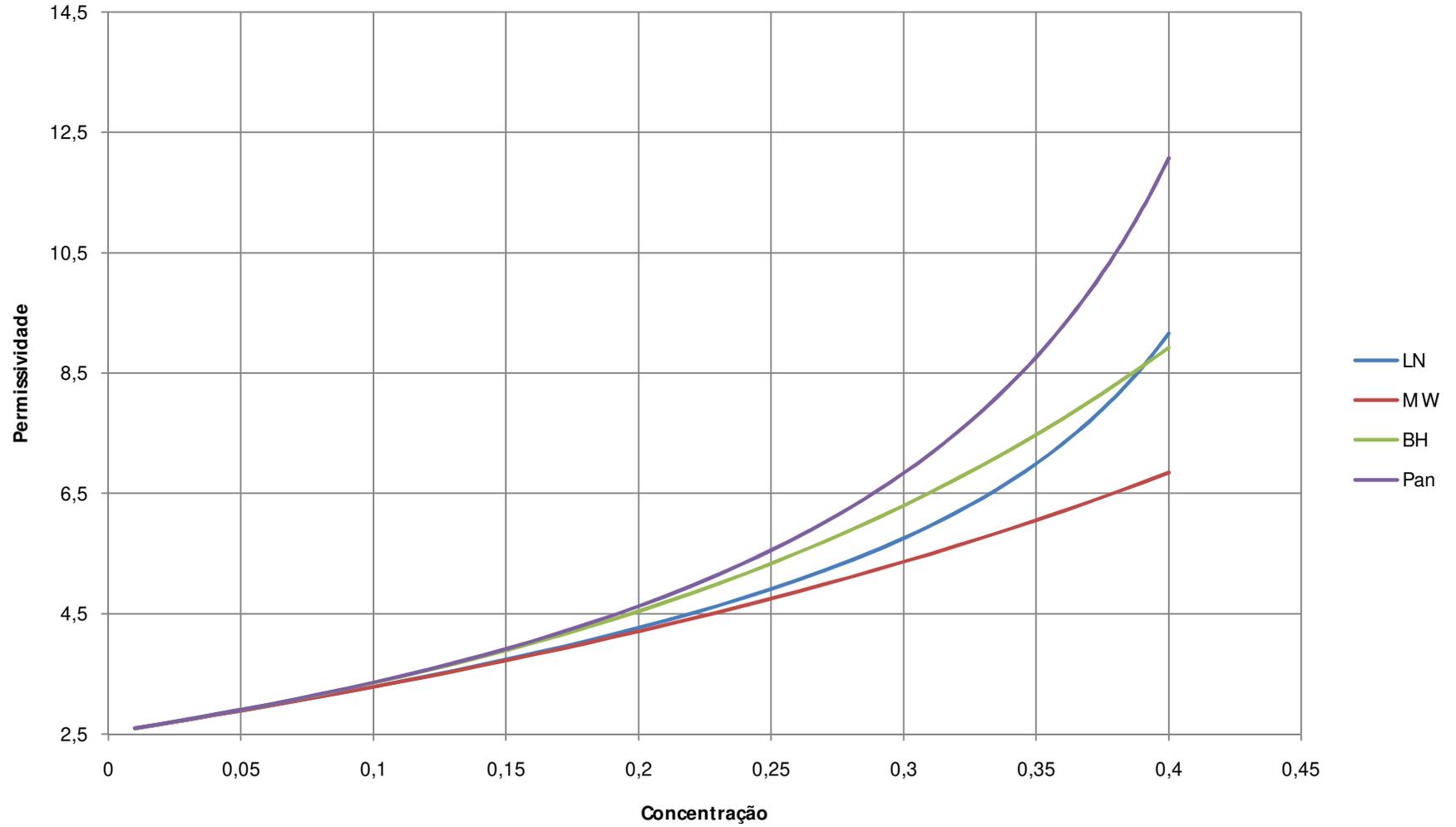


Figura 5.5.- Comparação dos modelos de emulsificação.

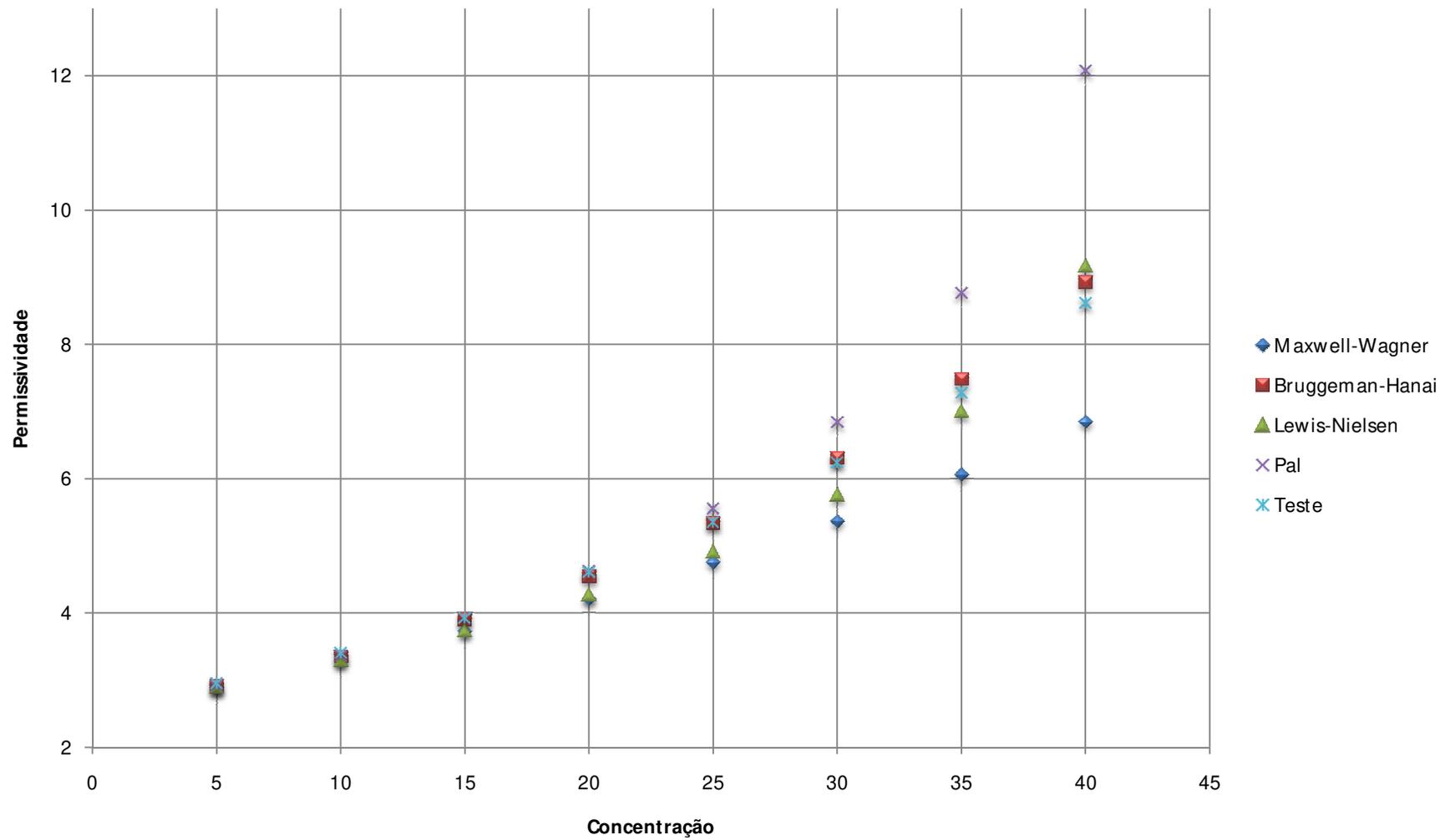


Figura 5.6.- Comparação dos modelos de emulsificação como os dados experimentais.

Tabela 5.2 Erro (%) em relação aos resultados experimentais.

%	M-W	B-H	L-N	Pal
5	2,2	1,7	2,2	1,7
10	3,5	1,5	3,4	1,4
15	5,1	0,8	4,7	0,2
20	8,6	1,4	7,4	-0,4
25	11,3	0,4	8,3	3,7
30	14,1	0,9	7,8	9,6
35	16,8	2,8	3,8	20,5
40	20,6	3,6	6,4	40,1

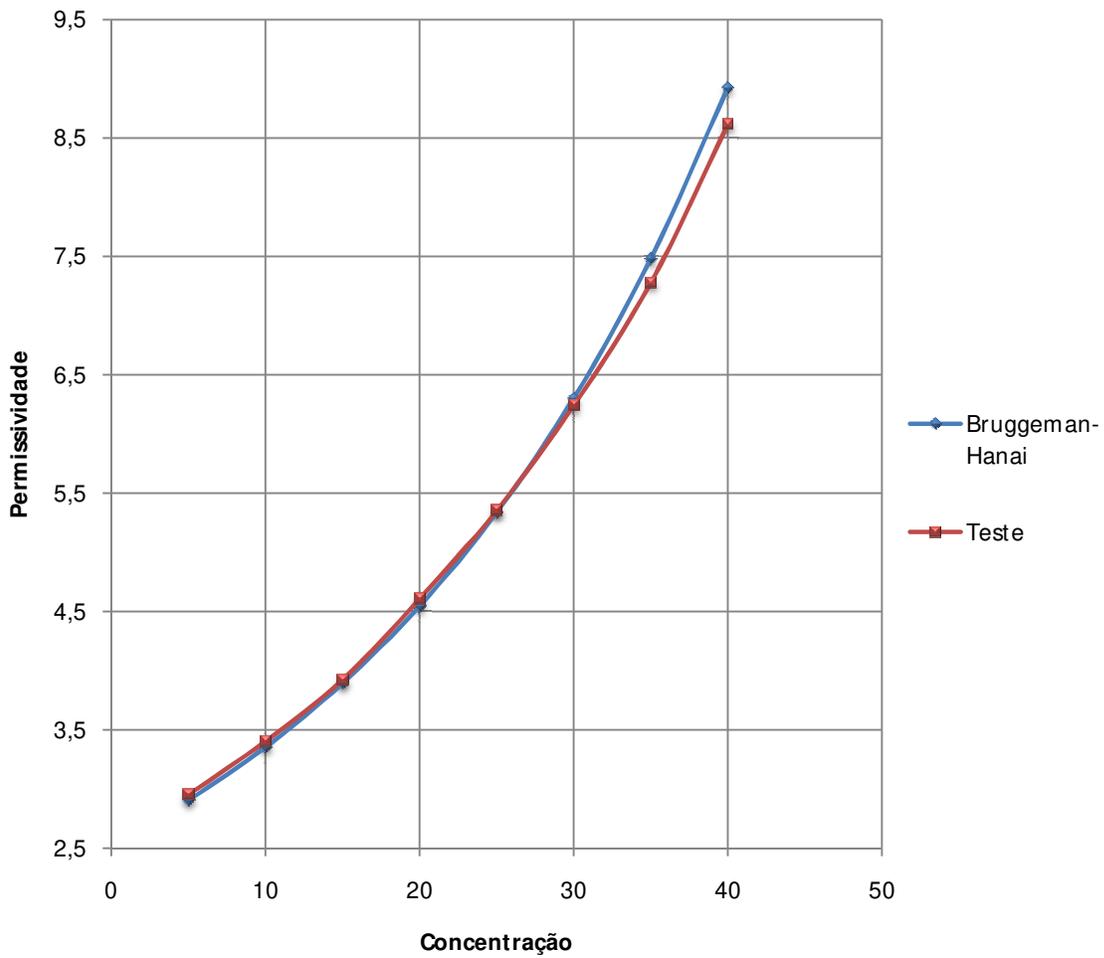


Figura 5.7.- Comparação do modelo Bruggeman-Hanai com os dados experimentais.

## 5.2 Variação da capacitância com a emulsificação

O efeito da emulsificação na sonda capacitiva faz que os valores previstos variem e uma forma de quantificar esta variação é utilizando a simulação numérica, modificando o valor de permissividade do óleo baseado nos resultados do modelo teórico de Bruggeman-Hanai em distintas porcentagens de emulsificação.

As Figuras 5.8 a 5,15 apresentam os resultados de simulações bidimensionais para diferentes valores de emulsificação W/O da capacitância em função da espessura da camada de água em núcleos concêntricos.

A Figura 5.8 apresenta um caso de baixa emulsificação (5%), onde a modificação da espessura da camada de água faz com que capacitância mude com as mesmas características que ocorrem no caso de óleo puro. Este fato indica que a capacitância continua sendo função da geometria dos eletrodos e da disposição dos meios permissivos.

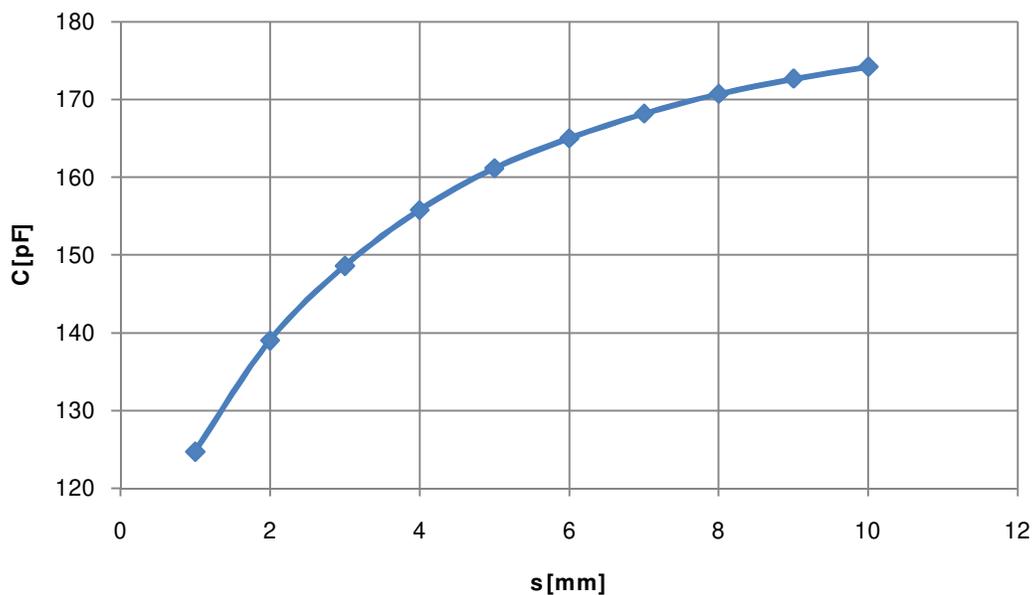


Figura 5.8.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 5%.

As Figuras 5.9 a 5,15 apresentam comportamentos similares, o que indica que a mudança de concentração e água no óleo não muda a forma da curva de resposta da sonda seja modificada em função da variação da permissividade dos meios.

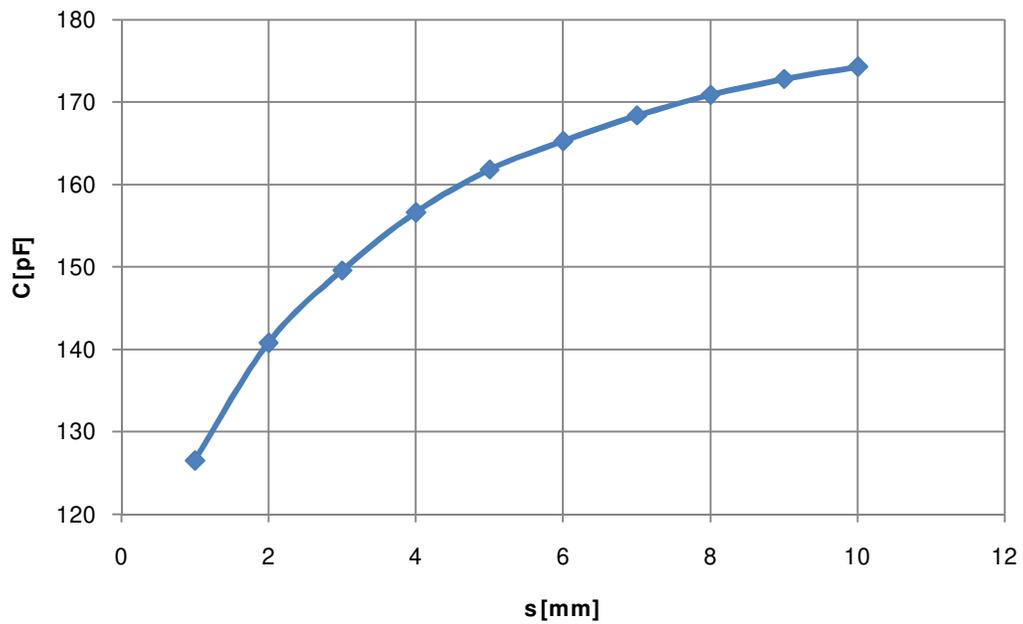


Figura 5.9.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 10%.

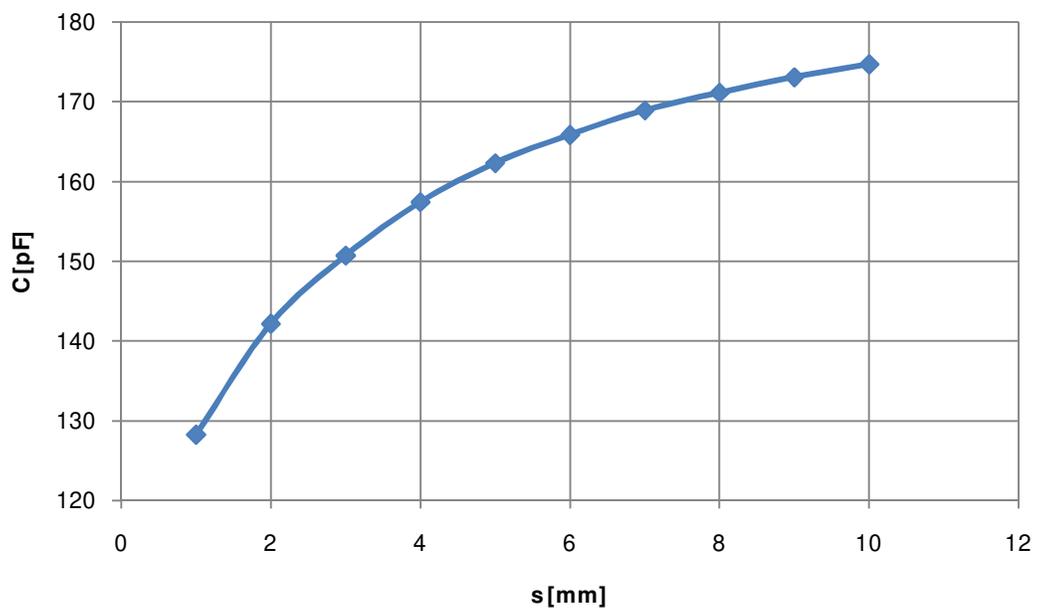


Figura 5.10.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 15%.

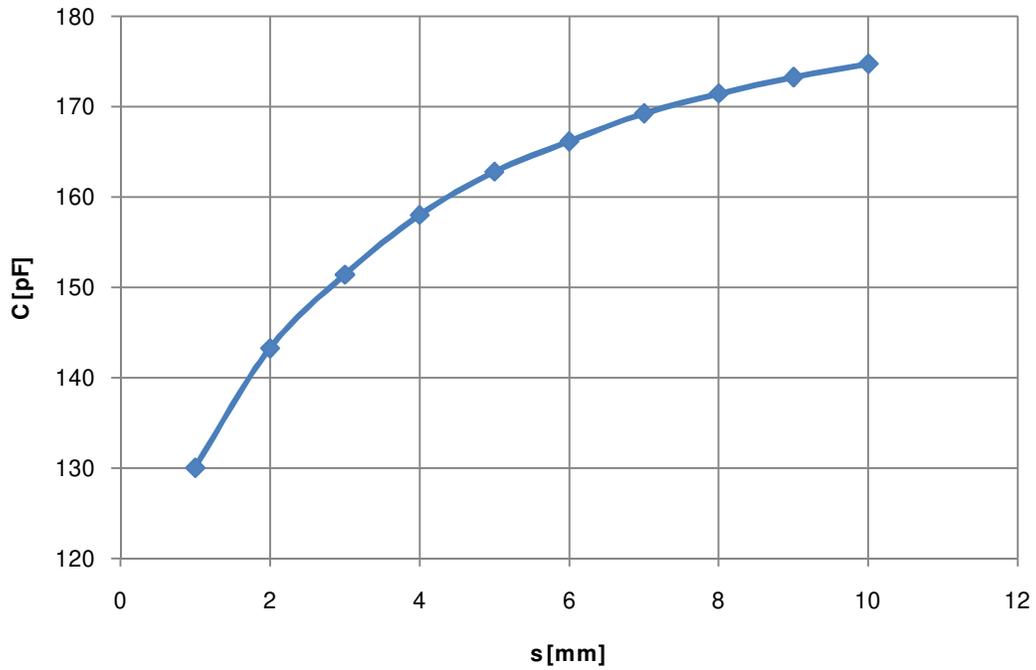


Figura 5.11.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 20%.

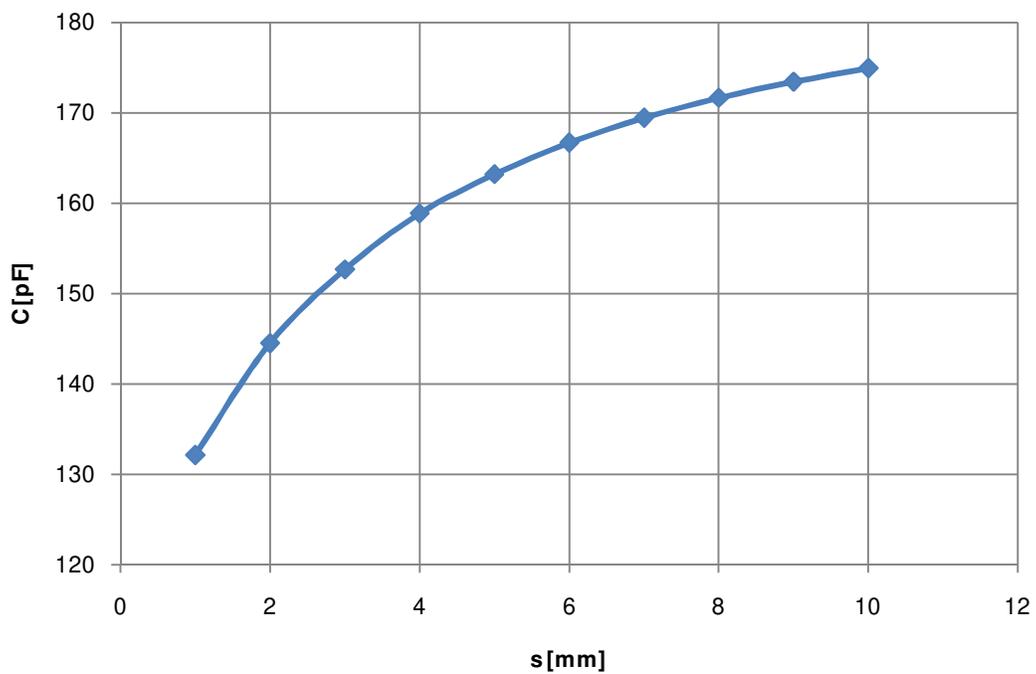


Figura 5.12.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 25%.

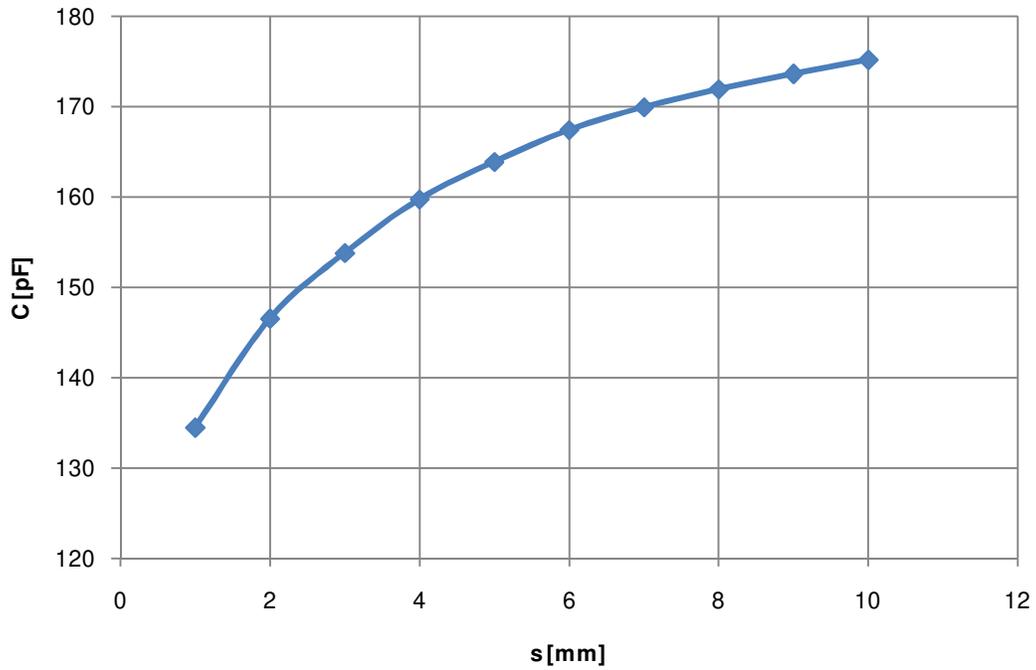


Figura 5.13.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 30%.

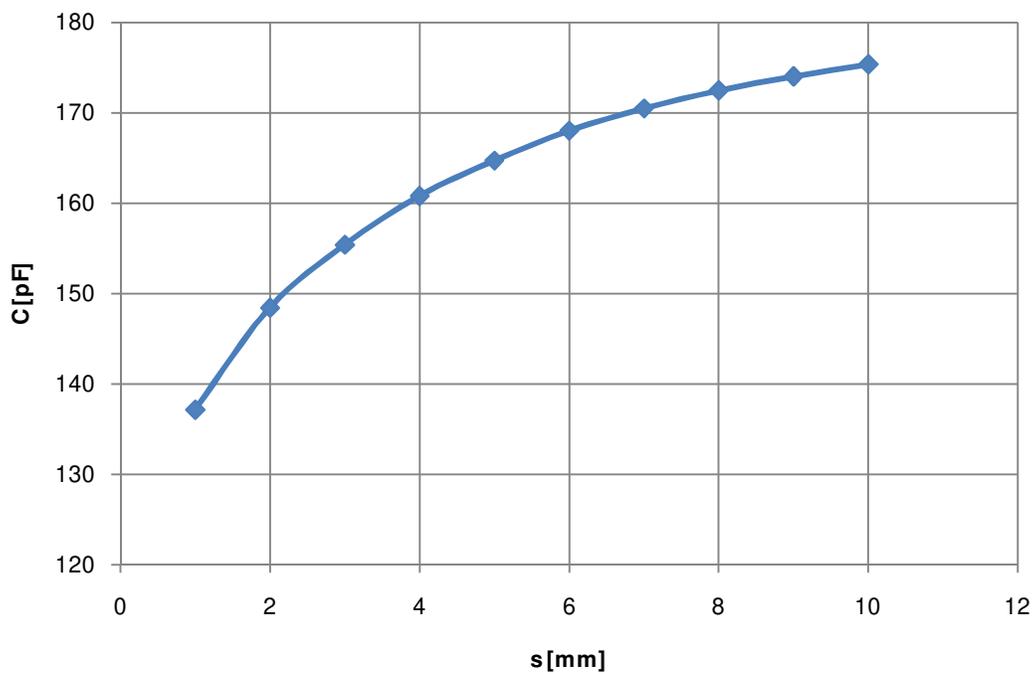


Figura 5.14.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 35%.

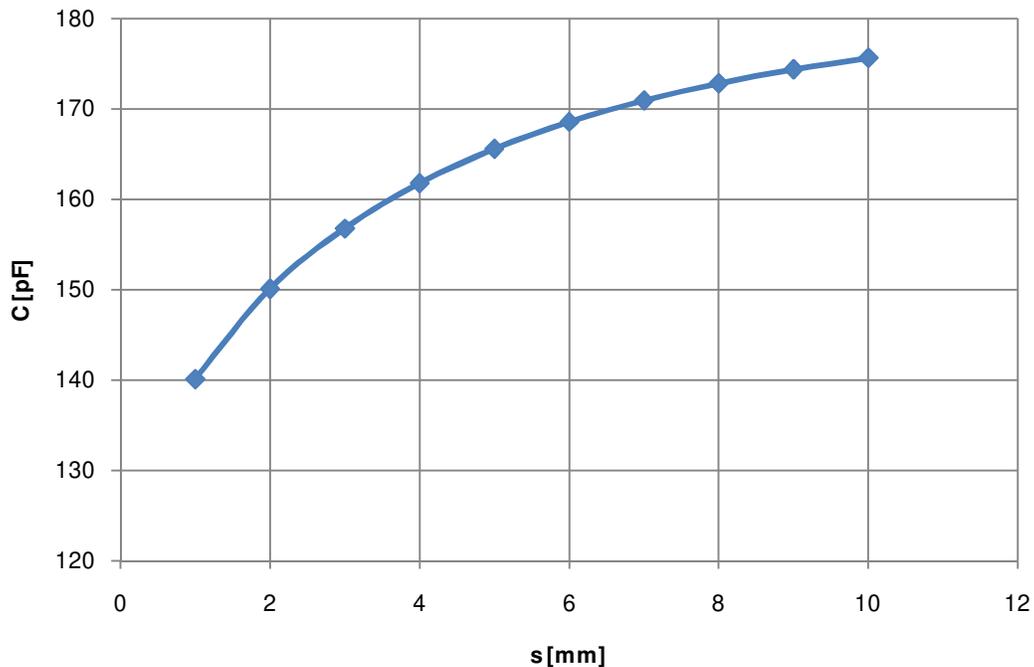


Figura 5.15.- Variação da capacitância em função de  $s$  para emulsificação de 40%.

A Figura 5.16 apresenta um conjunto de curvas que representam a variação da capacitância  $C$  em função da espessura da camada de água  $s$  para emulsificações W/O desde 0% até 40%, onde se observa que existe um deslocamento para acima das curvas em função do aumento da água no óleo, pois aumenta a permissividade do núcleo de óleo e conseqüentemente a permissividade total do sistema possibilitando o aumento da capacitância entre os eletrodos.

Na Figura 5.16 se observa que existe uma maior diferença quando a espessura da camada  $s$  de água é pequena e que o efeito vai diminuindo em função de  $s$ . A maior diferença apresentada está em  $s = 1$  mm e é menor de 20%.

Conhecendo o efeito causado pela emulsificação na resposta da sonda para determinada frequência é aconselhável utilizar um medidor de concentração on-line para realizar uma correção dos valores medidos.

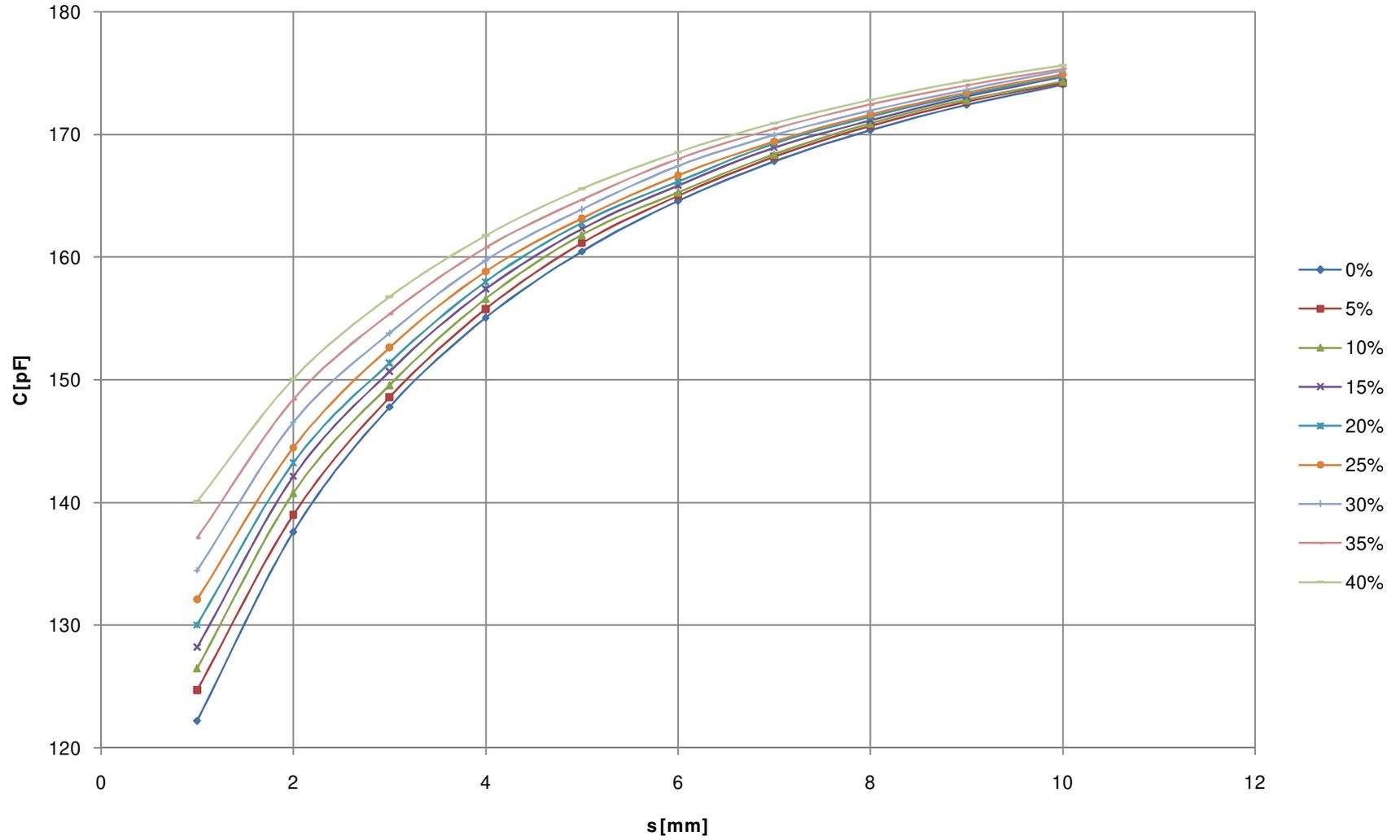


Figura 5.16.- Variação da capacitância para diferentes emulsificações.

### 5.3 Efeito Volumétrico

Nesta secção será estudado o efeito devido ao desvio do campo elétrico perto dos eletrodos causado pela fluidodinâmica do escoamento na interface óleo-água ondulada. As variáveis utilizadas foram apresentadas na descrição da sonda no capítulo 4.

A Figura 5.17 apresenta uma vista lateral do modelo da Figura 4.3, onde se pode observar a superfície do eletrodo sensor e dos eletrodos de guarda no plano X-Z. Esta foi a vista escolhida para analisar o desvio do campo elétrico em diferentes situações de altura de onda  $d$  e distancia da onda ao eletrodo sensor  $k$ .

O potencial  $P_s$  relativo ao eletrodo fonte está na face oculta da vista lateral da Figura 5.17, a distribuição do campo elétrico depende da geometria da secção de medida e das permissividades dos dielétricos de cada material presente: ar, vidro, água e óleo. Nas figuras o vermelho indica o potencial mais alto e o azul indica o potencial mais baixo.

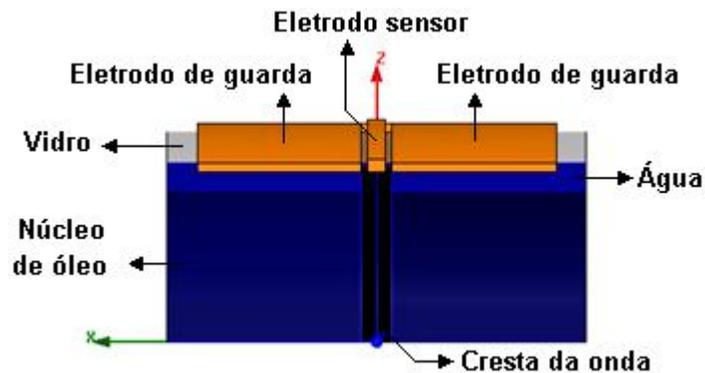


Figura 5.17.- Vista lateral da secção de medida.

As Figuras 5.18, 5.120, 5.22, 5.24 e 5.26 apresentam o comportamento do campo elétrico para diferentes espessuras de camada de água  $s$  e suas respectivas alturas de onda  $d$ . Cada figura mostra diferentes imagens do campo elétrico de (a)  $k = 25$  mm até (f)  $k = 0$  mm, mostrando uma onda quadrada se aproximando do centro do eletrodo sensor.

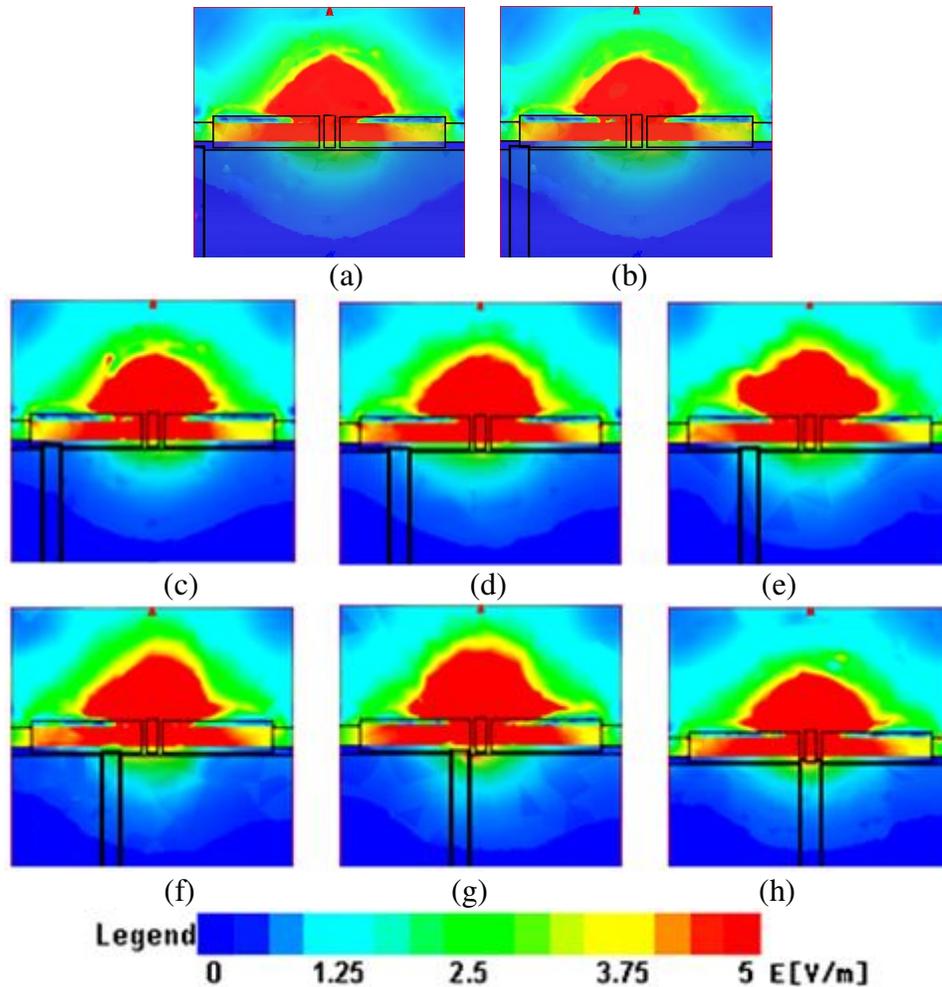


Figura 5.18 - Distribuição do campo elétrico for  $s = 2$  mm onde  $k = 35$  mm (a), 30 mm (b), 25 mm (c), 20 mm (d), 15 mm (e), 10 mm (f), 5 mm (g), onda no centro do eletrodo sensor (h).

O meio em contacto directo com a face externa dos eletrodos é o ar e com a face interna é o vidro e devido às baixas permissividades dielétricas destes materiais o campo elétrico é concentrado perto do eletrodo sensor, como apresentado na Figura 5.16, onde é fixada a espessura de camada de água  $s$  e variada a distancia entre a onda e o eletrodo sensor  $k$ .

A espessura de parede da tubulação tem importância no comportamento da sonda, na ordem de grandeza do valor da capacitância e também na sensibilidade, concordando com a conclusão de Hussein and Menele 1986, pois uma porcentagem alta as linhas de campo elétrico utiliza como meio o vidro.

Externamente à tubulação de vidro é gerado um campo elétrico entre o eletrodo fonte, o eletrodo sensor e a blindagem. Mas devido a distancia entre o eletrodo fonte e a blindagem, o campo elétrico é predominante com o eletrodo sensor, como se pode observar na Figura 5.18. Dentro da tubulação, e por tanto dentro do núcleo de óleo, a distribuição do campo elétrico depende da geometria dada por  $k$  e por  $s$ . Enquanto a distribuição do campo elétrico no ar externo a tubulação é sempre maior de 5 V/m perto do eletrodo fonte, a magnitude do campo elétrico é aproximadamente 2.5 V/m perto do eletrodo sensor e de 1.25 V/m dentro do núcleo de óleo.

Quando  $k$  começa a diminuir a onda fica mais próxima do centro do sensor e a magnitude do campo começa a diminuir no topo da onda quadrada, deixando tons amarelos quando  $k = 0$  mm. A Figura 5.19 apresenta os valores de capacitância  $C$  para cada uma das seis posições da onda quando a espessura da camada de água  $s$  é fixada em 2 mm, também apresenta o comportamento dos valores de capacitância ideais sob as mesmas condições. Isto indica que quando a onda está a uma distancia do eletrodo sensor de  $k = 25$  mm, a capacitância  $C$  é aproximadamente de 302 fF e quando  $k$  é mínimo ( $k = 0$  mm)  $C$  é aproximadamente 299 fF, com uma diferença de somente 3 fF.

Ao considerar todos os pontos simulados, a forma da interface óleo-água não pode ser perfeitamente reproduzida pela sonda de capacitância, pois a sensibilidade depende também do efeito volumétrico perto do eletrodo sensor.

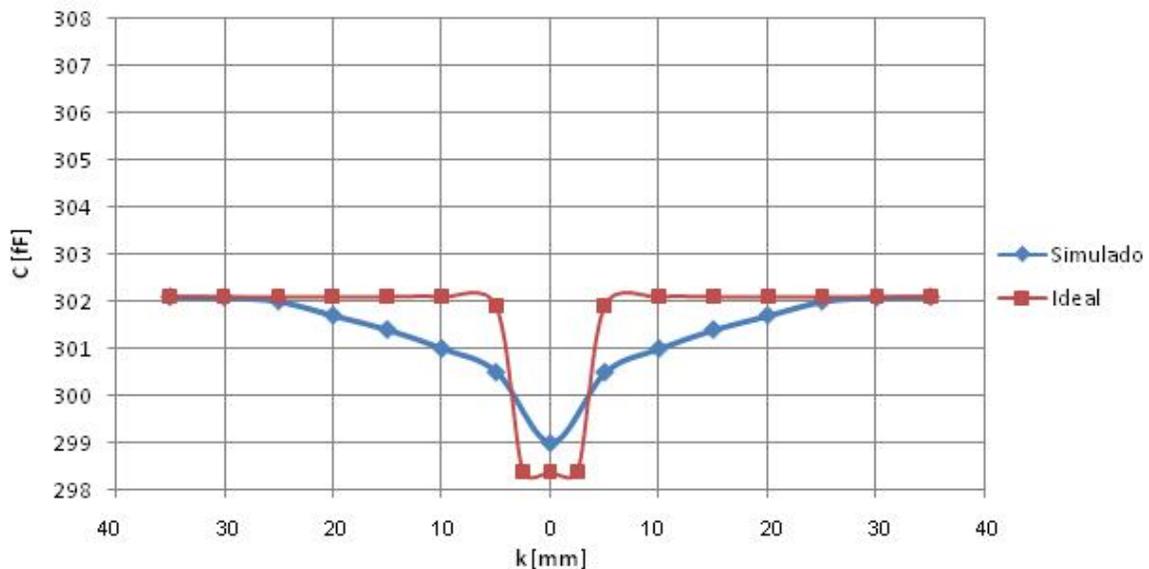


Figura 5.19- Resultados da passagem de uma onda na sonda para  $s = 2$  mm.

Resultados semelhantes foram obtidos para outros valores de  $s$ . Quando  $s = 3, 4, 5, 6$  mm se obtém os resultados apresentados nas Figuras 5.18, 5.20, 5.22, 5.24. De forma geral, a região de alta sensibilidade perto do eletrodo sensor é afetada com a aproximação da onda quadrada.

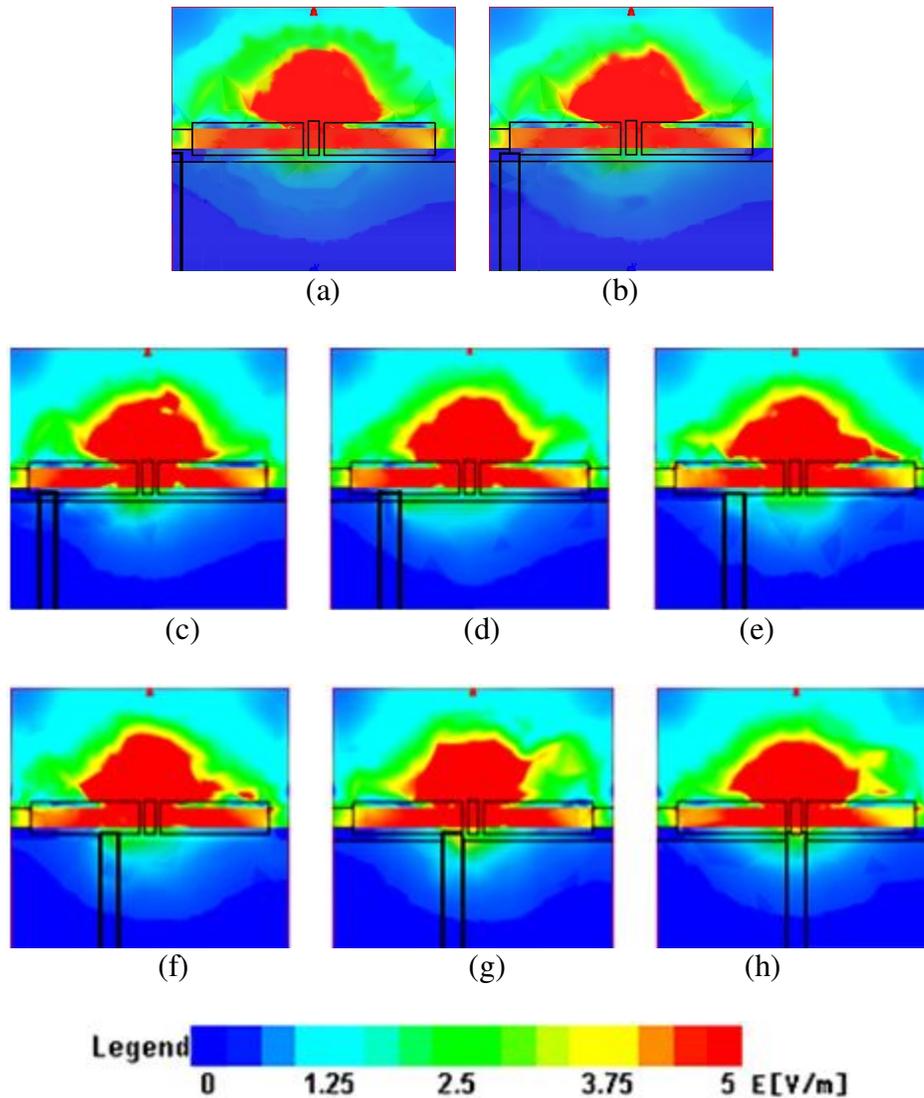


Figura 5.20 - Distribuição do campo elétrico for  $s = 3$  mm onde  $k = 35$  mm (a), 30 mm (b), 25 mm (c), 20 mm (d), 15 mm (e), 10 mm (f), 5 mm (g), onda no centro do eletrodo sensor (h).

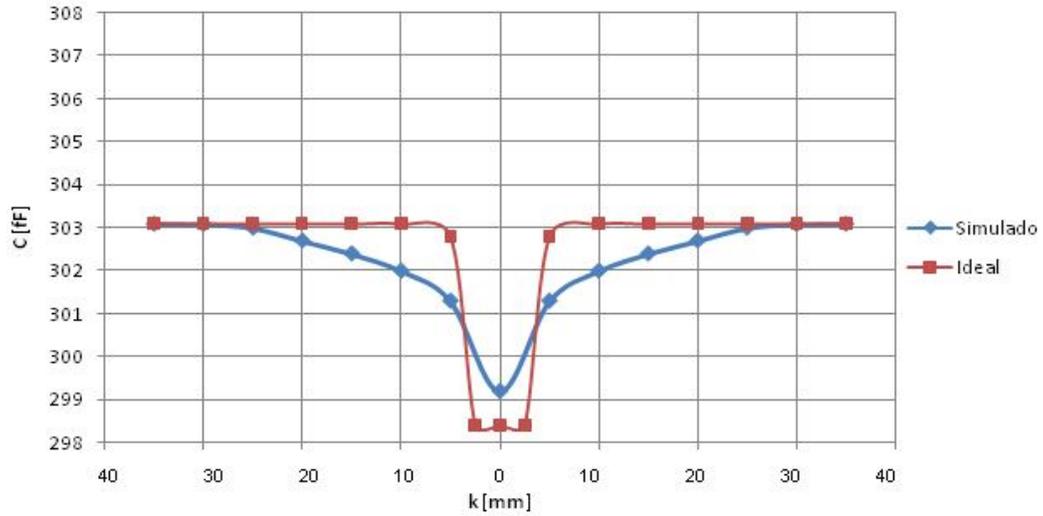


Figura 5.21 - Resultados da sonda para  $s = 3$  mm.

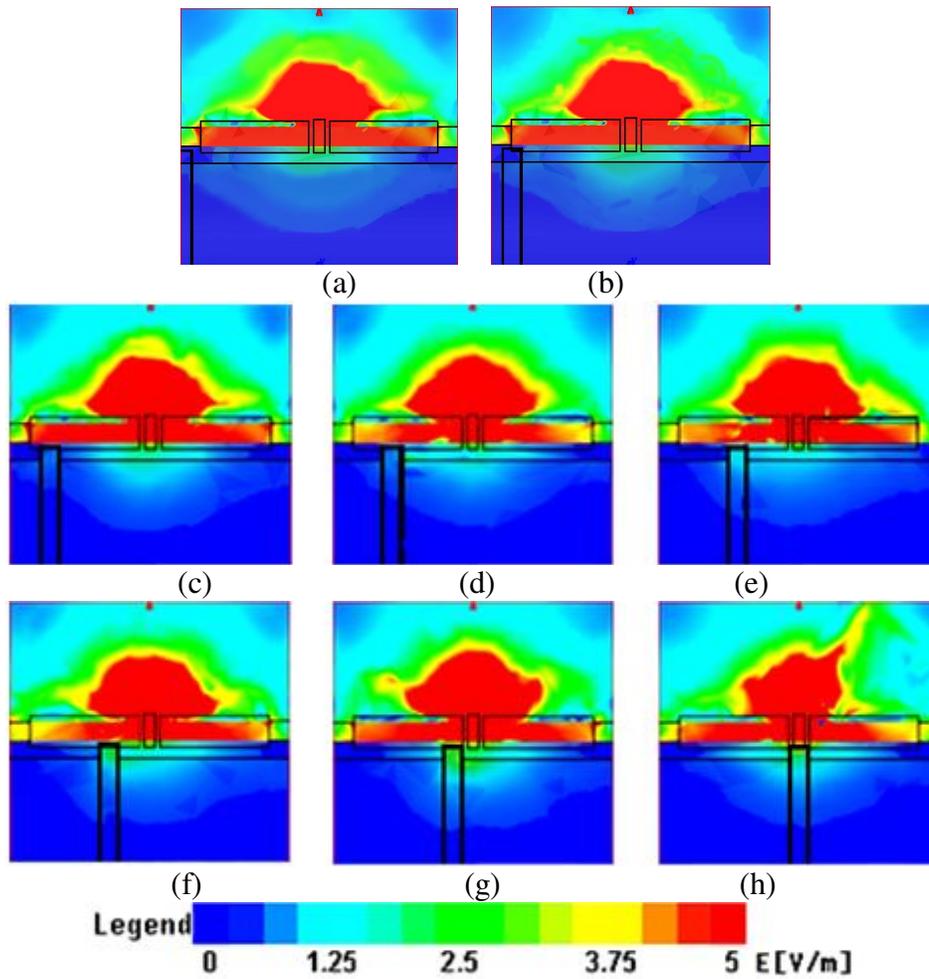


Figura 5.22 - Distribuição do campo elétrico for  $s = 4$  mm onde  $k = 35$  mm (a), 30 mm (b), 25 mm (c), 20 mm (d), 15 mm (e), 10 mm (f), 5 mm (g), onda no centro do eletrodo sensor (h).

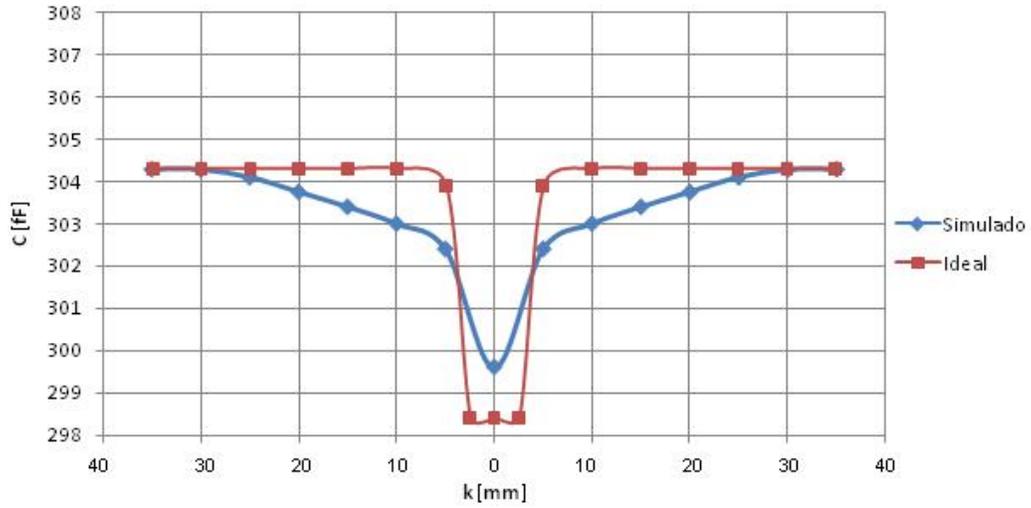


Figura 5.23 - Resultados da sonda para  $s = 4$  mm.

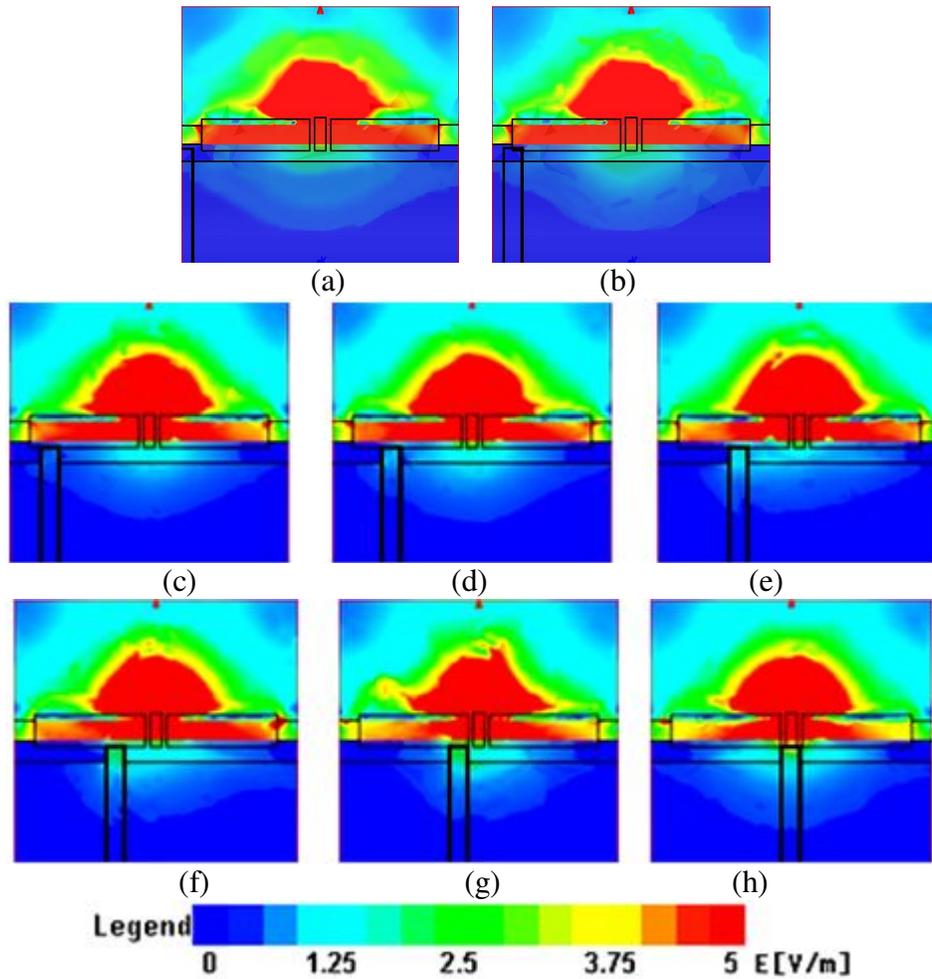


Figura 5.24 - Distribuição do campo elétrico for  $s = 5$  mm onde  $k = 35$  mm (a), 30 mm (b), 25 mm (c), 20 mm (d), 15 mm (e), 10 mm (f), 5 mm (g), onda no centro do eletrodo sensor (h).

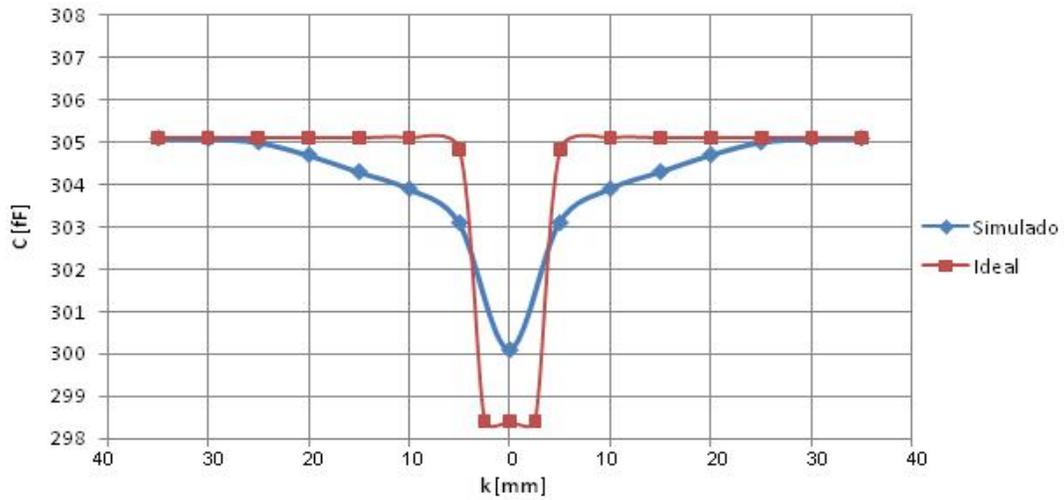


Figura 5.25- Resultados da sonda para  $s = 5$  mm.

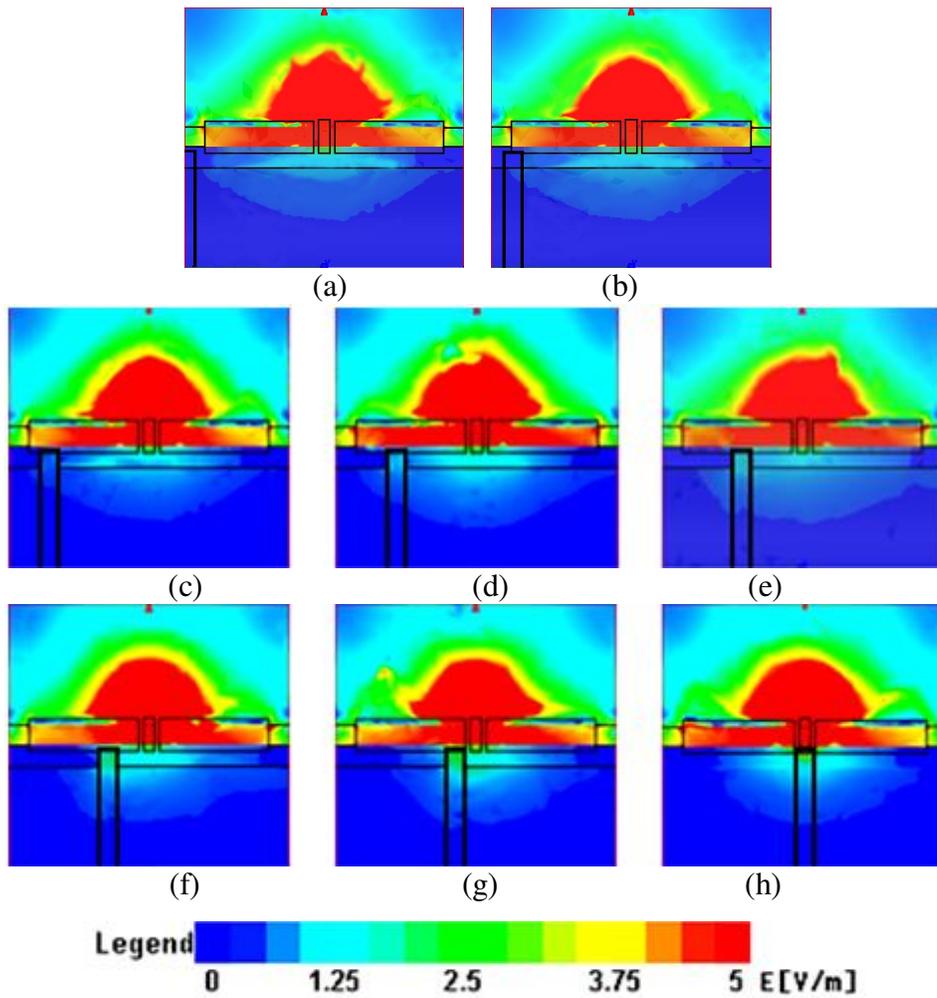


Figura 5.26 - Distribuição do campo elétrico for  $s = 6$  mm onde  $k = 35$  mm (a), 30 mm (b), 25 mm (c), 20 mm (d), 15 mm (e), 10 mm (f), 5 mm (g), onda no centro do eletrodo sensor (h).

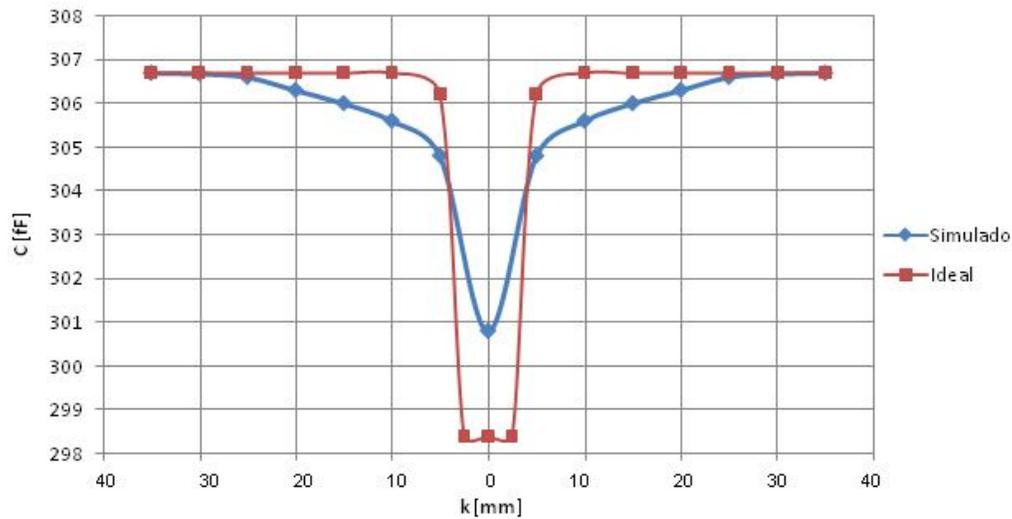


Figura 5.27 - Resultados da sonda para  $s = 6$  mm.

Adicionalmente, as Figuras 5.21, 5.23, 5.25, e 5,27 apresentam a capacitância  $C$  como função de  $s = 2, 3, 4, 5, 6$  mm para diferentes valores de  $k$ . Numa condição ideal da sonda, a resposta deveria ser a mesma quando a onda esta longe do eletrodo sensor, sendo este o objetivo de fazer a espessura do eletrodo sensor a mínima possível.

Os resultados mostram que as distorções de campo elétrico ocorridas no eletrodo sensor atingem os eletrodos de guarda, pois as regiões de sensibilidade se estendem até a metade do comprimento dos eletrodos de guarda.

## Capítulo 6

### Conclusões e Recomendações

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre os estudos realizados e as recomendações para trabalhos futuros.

#### 6.1 Conclusões

No trabalho foi apresentado um estudo teórico de uma sonda capacitiva não intrusiva utilizada na medição da espessura da camada de água num escoamento bifásico do tipo *core-flow*. O estudo compreendeu a determinação da geometria dos eletrodos capaz de medir a camada de água formada entre a região central do escoamento e a parede interna do tubo e previsão do comportamento da capacitância devido à excentricidade do núcleo, à emulsificação e ao efeito volumétrico.

O estudo envolveu o modelamento dos fenômenos físicos presentes nos meios do modelo, gerados pelas placas do capacitor através de um simulador. Para verificar a correta utilização do software empregado, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos para placas paralelas e côncavas com dados teóricos e com medidas experimentais.

As simulações bidimensionais para núcleos concêntricos indicaram que é aconselhável utilizar um conjunto de eletrodos de ângulos de  $35^\circ$  e 3 mm de comprimento e as simulações feitas para núcleos excêntricos apresentaram a existência de ambigüidade nos resultados, portanto é necessário utilizar uma sonda das mesmas características na parte inferior da tubulação.

O estudo do efeito da emulsificação apresentou a dependência da sonda capacitiva com a concentração volumétrica da água no óleo, além disso, indicou que se for medida, pode-se aplicar a respectiva correção baseada no estudo teórico. O efeito volumétrico foi estudado mediante simulações tridimensionais e apresentou que existem características que afetam o desempenho da sonda como: a espessura da tubulação de vidro, o comprimento do eletrodo de guarda e dificuldade que tem o campo elétrico em atravessar a interface vidro água. Finalmente foi considerada a fluidodinâmica do escoamento e verificado o efeito na sonda proposta.

## **6.2 Recomendações para trabalhos futuros**

São feitas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliação da sonda capacitiva utilizando núcleos com diferentes geometrias.
- Aplicação de modelos de core-flow nas simulações tridimensionais do estudo do efeito volumétrico.
- Estudo numérico de diferentes tipos de geometrias que permitam medir outros parâmetros do escoamento multifásico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, A. K.; and ZAREH, A. S. Improving the Accuracy of the Capacitance Method for Void Fraction Measurement. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 11, p. 321-326, 1995.

ANSOFT. MAXWEL 2D: 2D electromagnetic-field simulation for high-Performance Electromechanical Design. Disponível em: <<http://www.ansoft.com/products/em/max2d/Maxwell2D.pdf>>. Acesso em: 05 outubro 2007.

ANSOFT. MAXWEL 3D: 3D electromagnetic-field simulation for high-Performance Electromechanical Design. Disponível em: <<http://www.ansoft.com/products/em/max3d/Maxwell3D.pdf>>. Acesso em: 05 outubro 2007.

CHARLES, M. E.; GOVIER, G. W.; HODGSON, G. W. The horizontal pipe line flow of equal density oil-water mixture. **The Canadian journal of chemical engineering**. v. 39, n. 1, p. 27-36. 1961.

DULAR, P.; SABARIEGO, R. V.; KUO-PENG, P. Three-dimensional finite element modeling of inductive and capacitive effects in micro-coils. **The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**. v. 25, n. 3, 2006.

- GALDIANO, Eder dos Santos. Estudo de uma sonda capacitiva para medição da espessura da camada de água num escoamento anular óleo-água. 2009. p 120. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- GERAETS J. J. M.; BORST J. C. A capacitance sensor for tow-phase void fraction measurement and flow pattern identification. **International Journal Multiphase Flow**, London, v. 14, n. 3, p. 305-320, 1988.
- HANAI, T.; KOIZUMI, N.; GOTOH, R. Dielectric Properties of Emulsions. **Colloid & Polymer Science**. v. 184, n 2, 1962.
- HUSSEIN, E.M.A.; MENELEY, D.A. Single-exposure neutron tomography of two- phase flow. **International Journal Multiphase Flow**. v. 12, p. 1-34, 1986.
- JIMENEZ, R., Measure Relative Humidity With A PIC MCU. **Electronic Design**, v.53, n. 6, p. 79-80, 2005.
- JINCHENG W.; GENCANG Y. Numerical Modeling of the Damping Capacity of Al/SiC(p), **Metall Mater Trans Part A**, v. 34A, n. 60, 2003.
- JOSEPH, D. D.; RENARDY, M.; RENARDY Y. Instability of the flow of two immiscible liquids with different viscosities in a pipe. **Journal of Fluids Mechanics**. v. 141, p. 309-317, 1984.
- KAWASE, Y.; YAMAGUCHI, T.; MIMURA, N.; IGATA, M.; IDA, K. Analysis of Magnetizing Process Using Discharge Current of Capacitor by 3-D Finite-Element Method. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 38, n. 2, 2002.
- KIROUAC, G.J.; TRABOLD, T.A.; VASSALLO, P.F.; MOORE; W.E.; KUMAR, R. Instrumentation development in two-phase flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**. Zhejiang, v. 20, n. 2, p.79-93, 1999.

- MAXWELL, J. C. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, v. 155, p. 459-512, 1865.
- MILLER, J. M.; ROSU M. Electric Motors Advanced by “Ultra” Power Storage. **ANSOFT Advantage**. v. 2, n. 4, p. 27 – 28, 2008.
- MORTIS, G. Heavy oil Expansions gather momentum worldwide. **Oil & Gas journal**, New York, v. 93, n. 33, p. 31-38, 1995.
- NOBRE, M. A. Matérias Dielétricas. In: *Materiais Dielétricos: Correlação materiais e defeitos*. São Paulo, Ed. Laccet, 1ª Edição. cap. 1, p. 20, 2006.
- OOMS, G.; SEGAL, A.; VAN DER WEES, A. J.; MEERHOFF, R.; OLIEMANS, R. V. A. Theoretical model for core-annular flow of a very viscous oil core and a water annulus through a horizontal pipe. **International Journal of Multiphase Flow**. v. 10, n. 1, p. 41-60, 1984.
- OOMS, G. The hydrodynamic stability of core-annular flow of two ideal liquids. **Applied Science Research**, v. 26, p. 147-158, 1972.
- PAL, R. Techniques for measuring the composition (oil and water content) of emulsion – a state of art review. **Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**. v. 84, p. 141 – 193, 1994.
- PLASKOWSKI, A.B.; Beck, M.S.; KRAWACZYNSKI, J.S. Flow imaging for multi-component measurement. **Tran. Inst. Meas. Control**. v. 9, p. 108-112, 1987.
- REINECKE, N.; MEWES, D. Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n.3, p. 233-246, 1996.

REIS, Emerson. Estudo do escoamento pistonado horizontal ar-água em ramificações “T”. 2003. 645 p. Tese (doutorado)-Faculdade de engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. p. 76-94.

REIS, E.; CARVAJAL FLOREZ, F. A.; MOURA, L. F.; Numerical Modeling Of A Capacitive Probe For Measuring The Water Layer Thickness In The Annular Heavy Oil-Water Flow. **MFIP 2008**, p. 9, 2008.

RUSSELL, T. W. F.; HODGSON, G. W. Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water. **The Canadian journal of chemical engineering**. V. 37, n. 1, p. 9-17, 1959

SERWAY, R. A. Física para cientistas e engenheiros. Rio de Janeiro, Ed. Livros Tec. E Cient, 4ª Edição.1996.

SKODVIN, T.; SJOBLUM, J. Models for the Dielectric Properties of Flocculated W/O-Emulsions, **Journal Of Colloid And Interface Science**. v. 182, n. 0450, p. 190 – 198. 1996.

TERA ANALYSIS. QuickField 2D SV. Disponível em:

<[http://www.quickfield.com/free\\_soft.htm](http://www.quickfield.com/free_soft.htm)>. Acesso em: 05 outubro 2007.

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

VU-QUOC L.; SRINIVAS V.; ZHAI Y.; Finite element analysis of advanced multilayer capacitors. **International Journal For Numerical Methods In Engineering**, v. 58, p. 397–461, 2003.

WAGNER, K. W. *Arch. Elektrotech*. v. 2, p. 371-87, 1914

- WU, H.; CANGELLARIS A. C. Model-Order Reduction of Finite-Element Approximations of Passive Electromagnetic Devices Including Lumped Electrical-Circuit Models, **IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques**, v. 52, n. 9, 2004
- XIE, C. G.; STOTT, A. L.; PLASKOWSKI, A.; BECK, M. S. Design of capacitance electrodes for concentration measurement of two-phase flow. **Measurement Science and Technology**, v.1, p. 65-78, 1990.
- XU, J.; LI H. YIN, W.; MAO, J.; LI, L. Capacitance Extraction of Three-Dimensional Interconnects Using Element-by-Element Finite Element Method (EBE-FEM) and Preconditioned Conjugate Gradient (PCG) Technique. **IEICE TRANS. Electron**, v. E90–C, n. 1, 2007
- YI-PING, L.; GANG, N. Design of capacitance sensor system for void fraction measurement. **Jing Journal of Zhejiang University: Science. Zhejiang**, v. 6A, n. 12, p.1424-1429, 2005.
- YORK, T.A.; PHUA, T.N.; REICHEL, L.; PAWLOWSKI, A.; KNEER, R., A miniature electrical capacitance tomograph. **Measurement Science and Technology**. v.17, n. 8, p 2119-2129, 2006.