

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

CÂMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

NICOLAS MEDEIROS PACHECO

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE
SENSORES PARA TOMOGRAFIA CAPACITIVA**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

CÂMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

NICOLAS MEDEIROS PACHECO

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE
SENSORES PARA TOMOGRAFIA CAPACITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Professor Orientador: Francisco Rafael
Moreira da Mota, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Pacheco, Nicolas Medeiros

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE SENSORES PARA TOMOGRAFIA CAPACITIVA / Nicolas Medeiros Pacheco ; orientação de Francisco Rafael Moreira da Mota. - Florianópolis, SC, 2018. 61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Tomografia Capacitiva Elétrica. 2. Sensor Capacitivo.

3. Reconstrução de Imagem. 4. Comsol. 5. Matlab.

I. Moreira da Mota, Francisco Rafael. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE SENSORES PARA TOMOGRAFIA CAPACITIVA

NICOLAS MEDEIROS PACHECO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

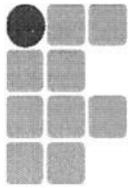
Florianópolis, 13 de dezembro de 2018.

Banca Examinadora:

Francisco Rafael Moreira da Mota, Dr. Eng. (Orientador)

Mauricio Edgar Stivanello, Dr. Eng.

Marina Enricone Stasiak, MSc. Eng.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **NICOLAS MEDEIROS PACHECO**, matrícula n° **132004501-4**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE SENSORES PARA TOMOGRAFIA CAPACITIVA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Francisco Rafael Moreira da Mota

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente aos meus pais e ao meu irmão, por todo apoio, suporte e incentivo durante toda a graduação.

À minha namorada, por todo carinho e atenção em todos os momentos, além de sempre acreditar na minha capacidade.

Ao meu professor/orientador Francisco Rafael, por me conceder todo o conhecimento, apoio e orientação diária ao longo do trabalho.

Aos meus amigos, em especial Guilherme Roberto Pamplona, Guilherme Bueno Silveira e Igor Pereira, pelos momentos felizes, de nervosismo, de projetos desenvolvidos e de aprendizados durante esses 5 anos de curso.

Aos professores do curso de Engenharia Mecatrônica, por toda bagagem acadêmica transmitida.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina pelo auxílio financeiro concedido através de programas de assistência estudantil.

RESUMO

A tomografia capacitiva elétrica é uma tecnologia que vem sendo explorada desde os anos 80 de forma crescente em processos industriais, principalmente em escoamentos multifásicos. Dentre as técnicas de análise e medição desses processos, a tomografia capacitiva se destaca por ser uma tecnologia não intrusiva e não invasiva, ser de baixo custo, além de ser de fácil implementação e apresentar robustez. O propósito deste tipo de tomografia é gerar uma imagem do interior de processos industriais dinâmicos levando em conta a permissividade relativa dos materiais ali presentes. A imagem é gerada, aplicando-se algoritmos para resolução de problemas inversos, a partir de N medições de capacitâncias influenciadas pela distribuição de permissividade (dos materiais) no interior do sensor. Geralmente, um sistema de tomografia capacitiva elétrica é constituído por três componentes básicos: o sensor, o sistema de aquisição de dados e o computador para geração da imagem. Quanto ao sensor, os diversos parâmetros de construção como a espessura e material da parede do duto isolante, número de eletrodos de medição, blindagem, eletrodos de guarda, malhas de aterramento e o comprimento axial dos eletrodos influenciam no desempenho do sensor na leitura e geração de resultados. O presente trabalho tem como objetivo otimizar os parâmetros geométricos de construção do sensor capacitivo elétrico para a implementação de técnicas tomográficas. Para tanto, foram utilizados os programas de simulação COMSOL e MATLAB para avaliar a influência dos parâmetros de construção nas medidas das capacitâncias, bem como a placa EVAL-AD7746EBZ para aquisição dos valores das capacitâncias nas medições reais. Também foram construídos dois sensores: um sensor “base” utilizado como ponto de partida para a validação do modelo e otimização; e outro com parâmetros otimizados. Por fim, as imagens geradas a partir dos sensores (base e otimizado) foram analisadas quantitativamente e qualitativamente. As imagens reconstruídas apresentaram uma concordância superior a 80% e um erro próximo a zero. A qualidade das imagens obtidas atesta a validade do sistema tomográfico desenvolvido.

Palavras-chave: Tomografia Capacitiva Elétrica. Comsol. Matlab. Sensor Capacitivo. Reconstrução de Imagem. Otimização.

ABSTRACT

Electrical capacitive tomography is a technology that has been explored since the 1980s in industrial processes, especially in multiphase flows. Among the techniques of analysis and measurement of these processes, the capacitive tomography stands out as being a non-intrusive and non-invasive technology, being low cost, besides being easy to implement and robust. The purpose of this type of tomography is to generate an image of the interior of dynamic industrial processes taking into account the relative permittiveness of the materials presents therein. The image is generated, applying algorithms to solve inverse problems, from N capacitance measurements influenced by the distribution of permittiveness (of materials) inside the sensor. Generally, an electrical capacitive tomography system consists of three basic components: the sensor, the data acquisition system and the computer for image generation. As for the sensor, the various construction parameters such as the thickness and material of the insulation duct wall, number of measuring electrodes, shielding, guard electrodes, grounding loops and the axial length of the electrodes influence the performance of the sensor in reading and generation of results. The present work aims to optimize the geometric parameters of the construction of the electric capacitive sensor for the implementation of tomographic techniques. For that, the simulation programs COMSOL and MATLAB were used to evaluate the influence of the construction parameters on the capacitance measurements, as well as the EVAL-AD7746EBZ board for the acquisition of the capacitance values in the real measurements. Two sensors were also built: a "base" sensor used as a starting point for model validation and optimization; and another one with optimized parameters. Finally, the images generated from the sensors (base and optimized) were analyzed quantitatively and qualitatively. The reconstructed images showed an agreement superior to 80% and an error close to zero. The quality of the images obtained testifies to the validity of the tomographic system developed.

Keywords: Electrical Capacitive Tomography. Comsol. Matlab. Capacitive Sensor. Image Reconstruction. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Tomografia Capacitiva Elétrica.....	18
Figura 2 – Seção transversal de um sensor com 12 eletrodos dividida em 1024 píxeis.	23
Figura 3 – Mapas de sensibilidade para um sensor com 12 eletrodos. Par adjacente 1-2 (a) e par oposto 1-7 (b)	25
Figura 4 - Vista frontal (a) e inferior (b) da placa de fibra de vidro. C: Comprimento do eletrodo. L: Largura do eletrodo.	32
Figura 5 - Sensor base montado.	32
Figura 6 – (a) Placa de aquisição de dados e (b) Interface do software fornecido....	33
Figura 7 – Modelo de geometria 2D implementado no programa SolidWorks.	34
Figura 8 - Materiais do sensor base com as suas vinculações na malha analisada no programa COMSOL.	36
Figura 9 - Processo de medição do sensor base. (1) computador, (2) placa de aquisição de dados e (3) sensor capacitivo.....	37
Figura 10 – Processo de medição sequencial dos valores de capacitância.....	37
Figura 11 – Comparação dos dados de simulação e experimental do sensor base para o caso vazio (cheio de ar).	38
Figura 12 - Valores de S_p para diferentes materiais da parede do duto.....	40
Figura 13 - Valores de S_p para diferentes espessuras da parede do duto.	41
Figura 14 - Valores de S_p para diferentes comprimentos dos eletrodos.	42
Figura 15 - Valores de S_p para diferentes larguras dos eletrodos.....	44
Figura 16 - Valores de S_p para a presença ou não do eletrodo de terra axial.....	45
Figura 17 - Valores de S_p para diferentes espessuras da placa de fibra de vidro.	47
Figura 18 – Posicionamento dos eletrodos ao centro (a) e nas extremidades (b) na seção transversal do sensor.....	48
Figura 19 - Valores de S_p para o posicionamento dos eletrodos ao centro da placa de fibra de vidro para diferentes larguras dos eletrodos.	49
Figura 20 - Valores de S_p para o posicionamento dos eletrodos nas extremidades da placa de fibra de vidro para diferentes larguras dos eletrodos.....	50

Figura 21 - Valores de S_p para o posicionamento dos eletrodos ao centro da placa de fibra de vidro comparado com aqueles posicionados nas extremidades.	51
Figura 22 – Sensor Capacitivo Otimizado Montado.	53
Figura 23 – Processo de medição experimental das capacitâncias do sensor otimizado para o caso vazio (cheio de ar).	54
Figura 24 - Processo de medição experimental das capacitâncias do sensor otimizado para o caso cheio (cheio de ABS).	54
Figura 25 - Processo de medição experimental das capacitâncias do sensor otimizado para o caso 50% (metade ABS e metade ar).	55
Figura 26 – Comparação entre a imagem ideal (1), a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LBP (2) e a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB (3) para o sensor base. EQMN_LBP= 0,5753. EQMN_LWB= 0,5525. Conc_LBP= 0,7937. Conc_LWB= 0,7097.	55
Figura 27 - Comparação entre a imagem ideal (1), a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LBP (2) e a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB (3) para o sensor otimizado. EQMN_LBP= 0,3325. EQMN_LWB= 0,3300. Conc_LBP= 0,8199. Conc_LWB= 0,8373.	55
Figura 28 - Comparação entre a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB para o sensor base (1) com a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB para o sensor otimizado (2).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do Sensor Base e suas características.	31
Tabela 2 - Parâmetros utilizados na construção do sensor base.	35
Tabela 3 - Permissividades relativas dos materiais do sensor capacitivo.	36
Tabela 4 - Parâmetros utilizados como base para a variação da espessura da parede do duto.	39
Tabela 5 - Parâmetros utilizados como base para a variação da espessura da parede do duto.	41
Tabela 6 - Parâmetros utilizados como base para a variação do comprimento dos eletrodos.....	42
Tabela 7 - Parâmetros utilizados como base para a variação da largura dos eletrodos.	43
Tabela 8 - Parâmetros utilizados como base para a presença ou não do eletrodo de terra axial.....	45
Tabela 9 - Parâmetros utilizados como base para a variação da espessura da placa de fibra de vidro.....	46
Tabela 10 - Parâmetros utilizados como base para a variação do posicionamento dos eletrodos na placa de fibra de vidro.	48
Tabela 11 - Parâmetros de construção otimizados para o sensor capacitivo.	51
Tabela 12 – Características e parâmetros empregados para a construção do sensor capacitivo otimizado.	52
Tabela 13 – Valores de erro quadrático médio normalizado e de concordância para os sensores base e otimizado utilizando os algoritmos de reconstrução LBP e LWB. ..	57

LISTA DE ABREVIATURAS

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

ECT – *Electrical Capacitance Tomography* (Tomografia Capacitiva Elétrica)

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

LBP – *Linear Back Projection* (Retro-Projeção Linear)

LWB – Landweber Projetado (Iterativo)

PLA – Poliacido Láctico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo Geral.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
1.2. Justificativa e Relevância	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. Tomografia.....	16
2.2. Tomografia Capacitiva Elétrica	17
2.3. Aplicações de ECT.....	18
2.4. Capacitância	19
2.5. Modelos de Normalização.....	21
2.6. Mapas de Sensibilidade	22
2.7. Parâmetros para Avaliação da Sensibilidade.....	25
2.8. Algoritmos para Reconstrução de Imagem	26
2.8.1. Retro-Projeção Linear.....	26
2.8.2. Landweber Projetado.....	27
2.9. Projeto do Sensor Capacitivo.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. Construção do Sensor Base	31
3.2. Sistema de Aquisição de Dados	33
3.3. Programas de Simulação Multifísica COMSOL e Matlab	33
3.3.1. Programa COMSOL	33
3.3.2. Programa Matlab	34
4. DESENVOLVIMENTO	35
4.1. Validação do Modelo.....	35

4.1.1. Validação do Modelo de Simulação utilizando Experimento com o Sensor Base	36
4.2. Otimização dos Parâmetros Geométricos.....	39
4.2.1. Efeito do Material da Parede do Duto.....	39
4.2.2. Efeito da Espessura da Parede do Duto.....	40
4.2.3. Efeito do Comprimento dos Eletrodos	42
4.2.4. Efeito da Largura dos Eletrodos	43
4.2.5. Efeito do Eletrodo de Terra Axial.....	44
4.2.6. Efeito da Espessura da Placa de Fibra de Vidro	46
4.2.7. Efeito do Posicionamento dos Eletrodos	47
4.3. Construção e Análise Experimental do Sensor Otimizado	52
5. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

A palavra tomografia é derivada do termo grego *tomos* e *grafen*, que significam, respectivamente, partes e registro/imagem. Ou seja, é o registro das partes que compõem uma imagem. Historicamente, mais precisamente até o final dos anos 70, a tomografia restringia-se à área médica com a finalidade de auxiliar nas detecções e diagnósticos de doenças. Na década seguinte, essa restrição deixou de existir e a aplicabilidade da tomografia ganhou os ramos industriais.

Diversas aplicações de imagens tomográficas em equipamentos de processo foram descritas na década de 1980, mas geralmente envolviam o uso de radiação ionizante de fontes de raios X ou isótopos e não eram satisfatórias para a maioria das aplicações de rotina, devido ao alto custo envolvido e à restrições de segurança. A maioria dos métodos baseados em radiação usava tempos de exposição longos, o que significava que as medições dinâmicas do comportamento em tempo real dos sistemas de processo não eram viáveis (Beck e Williams, 1996).

Em aplicações para indústria do petróleo, por exemplo, várias técnicas para a medição da fração volumétrica foram desenvolvidas e estão sendo utilizadas principalmente como parte integrante de medidores multifásicos, tais como técnicas baseadas em absorção radioativa (raios X e gama) e técnicas baseadas em impedância elétrica (resistiva e capacitiva) (Mota, 2015).

A variação da permissividade relativa do meio é o parâmetro medido na tomografia elétrica por capacitância. Essa variação é provocada pela inserção de um ou mais componentes em um meio de baixa permissividade e, a partir dessas medidas, pode-se reconstruir a imagem da seção transversal (Yang e Conway, 1998).

A tomografia capacitiva elétrica é atualmente a modalidade de tomografia de processos mais difundida e utilizada para o monitoramento de escoamentos multifásicos em processos industriais. Ela se baseia na medição dos valores de capacitância entre pares de eletrodos montados ao redor de uma tubulação e na conversão destes valores, com a utilização dos mapas de sensibilidade

anteriormente gerados, em uma imagem do interior da tubulação devido as diferenças de permissividade relativa entre as fases.

Neste contexto, a simulação numérica do sensor de tomografia capacitiva é de grande importância, pois ela pode determinar as características do circuito de transdução, qual a necessidade de utilização de eletrodos de guarda e qual é o melhor projeto do sensor para a detecção dos padrões de escoamento (Barros, 2011).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Otimizar os valores dos parâmetros geométricos de construção de um sensor capacitivo multieletrodo para implementação de técnicas tomográficas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Construir um sensor com parâmetros não otimizados (sensor base) que servirá como base para a validação do modelo utilizado nas simulações e dará um ponto de partida para a otimização dos parâmetros;
- b) Avaliar a influência dos parâmetros geométricos sobre os valores da capacitância utilizando os softwares de simulação multifísica Comsol e Matlab;
- c) Construir um sensor com os parâmetros otimizados obtidos por simulações;
- d) Comparar a imagem gerada utilizando o sensor otimizado com a imagem obtida pelo sensor com geometria não otimizada.

1.2. Justificativa e Relevância

Há uma necessidade crescente de se obter informações mais exatas sobre as características internas de escoamentos e misturas multifásicas em equipamentos de processo. Os instrumentos de medição convencionais podem ser inadequados quando submetidos às condições internas adversas, o que pode comprometer a leitura correta dos dados e perturbar a operação por trabalharem de forma invasiva.

Segundo Azevedo (2002), para as aplicações industriais que visam o controle e o monitoramento de processos dinâmicos, observou-se que a lenta resposta dos detectores de radiação, bem como a lentidão dos movimentos sequenciais da tomografia nucleônica, que usa raios-X ou raios-gama, a torna indicada apenas para obtenção de imagens de objetos estacionários, não se prestando aos objetivos da tomografia industrial por não possuir resolução temporal para tais medições.

Por ser uma tecnologia que não utiliza radiação, como nos casos de raios-X e raios-gama, não ser intrusiva nem invasiva, além de ser um processo de baixo custo, proporcionar uma resposta rápida e que pode suportar alta temperatura e pressão, a tomografia capacitiva elétrica é a modalidade de tomografia mais difundida no monitoramento e controle de processos industriais.

O projeto do sensor capacitivo mostra-se como uma das etapas mais importantes no processo de análise e medição para obtenção dos melhores resultados. Vários estudiosos analisaram de forma mais detalhada os parâmetros geométricos de construção de um sensor capacitivo, e perceberam que a mudança de um desses parâmetros influenciou substancialmente nos resultados obtidos nas simulações e nas medições experimentais.

Outro ponto importante levado em conta para a aplicação desse estudo está na vasta experiência do professor orientador na área, tendo em vista a aplicabilidade de estudo aprofundado em sua tese de doutorado. Esse trabalho abordará uma parte específica, que consiste em aplicar conceitos de tomografia capacitiva elétrica em um sensor inovador no mercado por possuir uma estrutura de seção transversal quadrada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Tomografia

A imagem tomográfica de objetos oferece uma oportunidade única para desvendar as complexidades da estrutura sem a necessidade de invadir o objeto. O desenvolvimento da instrumentação tomográfica, iniciada na década de 1950, levou à ampla disponibilidade de scanners corporais, que fazem parte da medicina moderna. Nos anos 90, a indústria passou a utilizar os recursos de maneira mais eficiente e para satisfazer a demanda e a legislação sobre a qualidade do produto e da redução das emissões ambientais. Portanto, há uma necessidade crescente de saber mais sobre a maneira exata como os fluxos internos nos equipamentos de processos estão se comportando. Muitas vezes, isso deve ser feito de forma não invasiva por instrumentação tomográfica, porque os instrumentos de medição convencionais podem ser inadequados para a exposição às condições internas adversas do processo ou, por sua presença, perturbar a operação do processo (Beck e Williams, 1996).

Existem diversos tipos de sistemas de tomografia, tais como, tomografia elétrica, ultrassônica, radioativa, micro-ondas e ótica. Entretanto, segundo Mota (2015), um grande número de técnicas envolvendo a medição de propriedades elétricas têm recebido considerável atenção: Tomografia Capacitiva, Tomografia Resistiva e Tomografia Eletromagnética. A principal desvantagem dessas técnicas é a baixa resolução espacial da imagem resultante, pois ao contrário da tomografia de raio-x, por exemplo, o campo elétrico não pode ser confinado em um feixe direto entre o transmissor e o receptor, dando-lhe uma característica não linear típica de técnicas do tipo *soft-field*. Esse tipo de técnica requer, geralmente, algoritmos de reconstrução complexos devido a relação não linear entre as capacitâncias medidas e a distribuição de permissividade relativa. Todavia, dentre às técnicas envolvendo propriedades elétricas, a tomografia capacitiva se destaca por apresentar uma configuração não-intrusiva e não-invasiva, além de não utilizar fontes radioativas e apresentar baixo custo de fabricação, manutenção e instalação.

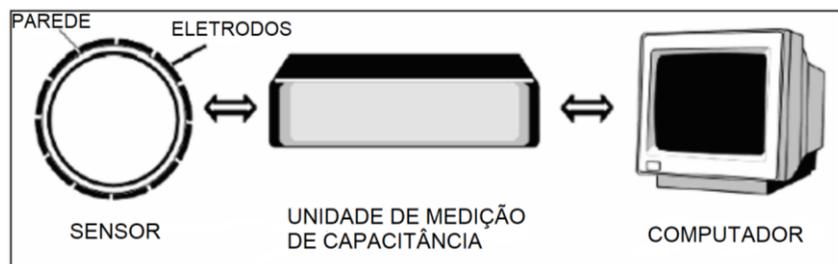
2.2. Tomografia Capacitiva Elétrica

O desenvolvimento da ECT (*Electrical Capacitance Tomography*) começou no início dos anos 80, quando um grupo de pesquisadores da *Morgantown Energy Technology Center* desenvolveu um sistema de tomografia de capacitância 2D com as suas aplicações em imagens transversais de sistemas de leito fluidizado. Aplicações da ECT a oleodutos e gasodutos transportadores pneumáticos foram explorados por pesquisadores do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade de Manchester no início dos anos 90. A ECT foi posteriormente aplicada a exames de imagem de sistemas de fluxo, tais como os fluxos de óleo-gás e óleo-água em poços de petróleo, escoamentos gás-sólido em transportadores pneumáticos, gás-sólido em leitos fluidizados, e reatores de leito gotejante. No entanto, a aplicação da ECT a fluxos multifásicos mais complexos é desafiada pela sua baixa resolução espacial em comparação com outros sistemas de tomografia e sua limitação a meios não condutores como líquidos orgânicos (Marashdeh *et al*, 2008).

A Tomografia Capacitiva Elétrica é uma técnica atualmente muito utilizada, na qual se analisa a distribuição de permissividade relativa que está associada a distribuição das fases em um escoamento multifásico, através da medição das capacitâncias de um sistema com eletrodos montados ao redor de um tubo não condutor. Os sistemas ECT são usados para se obterem imagens da distribuição de permissividade no interior do sensor para qualquer mistura de materiais com diferentes permissividades (Mota, 2015).

O sistema ECT é composto por sensor, unidade de medição de capacitância e computador, conforme representa a Figura 1. O sensor é composto por um conjunto de eletrodos enrolados ao redor da periferia do tubo ou do compartimento a ser analisado. A unidade de medição condiciona o sinal obtido do sensor e transmite-os ao computador. O computador processa as informações obtidas e constrói imagens de distribuição de permissividade correspondente à seção transversal visualizada pelos sensores. Todos os parâmetros medidos e calculados são normalizados para reduzir os erros de medição (Donthi, 2014).

Figura 1 – Sistema de Tomografia Capacitiva Elétrica.



Fonte – Donthi, 2014 (Adaptado).

2.3. Aplicações de ECT

Os sistemas de fluxo multifásico são um elemento crítico de muitos processos industriais, pois constituem o meio pelo qual os ingredientes básicos são processados para produzir o produto final. Exemplos de seu uso incluem processos de geração de energia, processamento de alimentos e fabricação de medicamentos, entre outros. A capacidade de visualizar interações de fluxo multifásico em tempo real sempre foi uma capacidade altamente desejável para entender melhor a dinâmica complexa entre fases de interação em qualquer sistema de fluxo. Esse entendimento é fundamental, por exemplo, para modelar, otimizar e dimensionar efetivamente os reatores que hospedam o processo. Desde o início, as técnicas de detecção elétrica atraíram muita atenção como meio não invasivo de geração de imagens de sistemas de fluxo multifásico. Além disso, as taxas nas quais as interações de fase ocorrem frequentemente exigem modalidades de imagem rápidas, tornando as técnicas de sensoriamento elétrico uma escolha natural (Marashdeh *et al*, 2008).

Diversas são as aplicações da tomografia de processo no campo das engenharias. No monitoramento da densidade do leito e dos padrões de circulação em leito fluidizado; em medidas de concentração volumétrica em misturas de gás/sólido, gás/óleo e gás/líquido; medições em trajetória e velocidade de partículas. Na indústria do petróleo, a tomografia é aplicada desde a caracterização e exploração de reservatórios através de métodos geofísicos até a análise em laboratório com amostras de rochas extraídas dos poços de petróleo, facilitando o estudo de problemas relacionados à viscosidade, gravidade e controle de mobilidade nos escoamentos multifásicos gás/água/óleo através dessas rochas (Azevedo, 2002).

Ainda pode-se incluir a lista de aplicações, o monitoramento da combustão dentro da câmara de combustão e transporte pneumático de sólidos. Algumas indústrias de aplicação incluem indústrias químicas, indústrias farmacêuticas, bens de consumo de alta demanda e indústrias de petróleo (Ramanathan *et al.*, 2013).

2.4. Capacitância

A capacitância medida entre dois eletrodos é função do dielétrico, da distância entre eles e também da área da superfície de cada eletrodo. Entende-se por dielétrico o material isolante que retém parte da energia requerida para o estabelecimento do campo elétrico através dele quando o campo é removido. A propriedade característica dos dielétricos é a permissividade elétrica, que é a capacidade do dielétrico em permitir o adensamento do fluxo de campo elétrico. A constante dielétrica, ou permissividade relativa, é a relação entre a capacitância observada quando o dielétrico é o material estudado e a capacitância observada quando o dielétrico é o vácuo. O caráter elétrico capacitivo surge, então, ao se aproximar dois materiais condutores (eletrodos), isolados entre si por um dielétrico. A capacitância é, portanto, a capacidade desse conjunto de armazenar cargas elétricas (Mota, 2015).

Para a determinação do número de eletrodos alocados ao redor do duto a ser analisado, é preciso levar em conta os aspectos positivos e negativos quanto à maior ou menor quantidade de eletrodos a serem utilizados. Segundo Yang (2010), com a redução do número de eletrodos são esperados os seguintes benefícios:

- Ter um *hardware* simplificado com menor número de canais;
- Menor número de autovalores na matriz de sensibilidade, diminuindo a dificuldade em resolver o problema inverso na reconstrução da imagem, no caso de aplicações em ECT;
- Uma rápida aquisição dos dados, devido à redução no número de capacitâncias independentes.

Todavia, em ECT, reduzindo-se o número de eletrodos, a qualidade da imagem reconstruída também será diminuída devido ao menor número de medições independentes. Com o aumento do número de eletrodos, o número

de medições independentes também aumenta resultando, dessa forma, numa melhor resolução da imagem reconstruída. Porém, um grande número de eletrodos resultará em algumas dificuldades:

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

Peng *et al.* investigaram o efeito do número de eletrodos na resolução da imagem reconstruída comparando resultados obtidos a partir de sensores com 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 32 eletrodos. Eles observaram que a sensibilidade entre eletrodos adjacentes não varia significativamente com o aumento do número de eletrodos. Já para os pares opostos, o efeito causado pelo aumento do número de eletrodos é claramente observado, ocasionando uma considerável diminuição da sensibilidade. Eles também comprovaram que para sensores com mais de 12 eletrodos não se observa considerável melhoria na qualidade na imagem, sendo a quantidade de eletrodos a ser empregada neste trabalho.

O número de medições das capacitâncias independentes entre os pares de eletrodos alocados ao redor do duto é calculado pela Equação 1. Ou seja, exclui-se aquelas medições consideradas equivalentes ($C_{12} = C_{21}$, por exemplo), resultando assim em:

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

em que M e n representam, respectivamente, o número de medições independentes e o número de eletrodos utilizados. Sendo assim, para 12 eletrodos alocados ao redor do duto, o número total de medições independentes é 66.

2.5. Modelos de Normalização

Uma vez que o valor da capacitância é função da permissividade relativa da mistura observada, a escolha do modelo para o cálculo da permissividade relativa influencia diretamente nos valores estimados de fração volumétrica a partir das medições realizadas utilizando sensores capacitivos. Desta forma, as capacitâncias medidas são geralmente normalizadas utilizando diferentes modelos de permissividade relativa. Os modelos de normalização mais utilizados são o modelo em paralelo, o modelo em série e o modelo de Maxwell (Mota, 2015).

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

$$C^m = (1 - \lambda)C^l + \lambda C^h \quad (2)$$

Isolando λ , também denominada de capacitância normalizada, obtêm-se uma relação linear entre capacitância medida e a fração do material de maior permissividade relativa (Yang e Byars, 1999), dada por:

$$\lambda = \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} \quad (3)$$

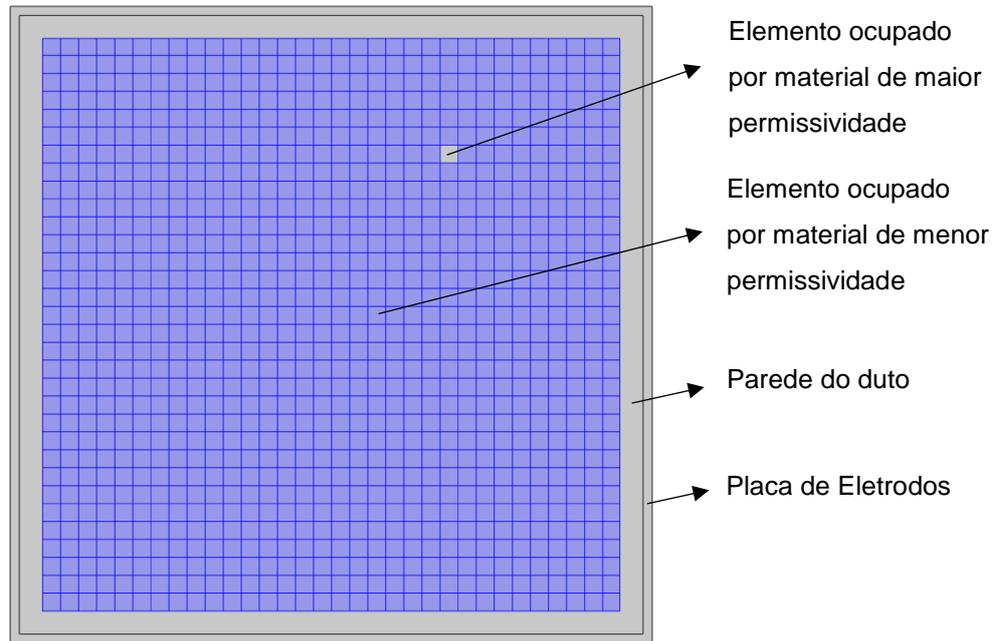
em que C^m representa a capacitância medida, C^l representa a capacitância quando a região sensível (região entre os eletrodos) se encontra inteiramente ocupada pelo material de menor permissividade relativa e C^h representa a capacitância quando a região sensível se encontra inteiramente ocupada pelo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

2.6. Mapas de Sensibilidade

A sensibilidade à variação de permissividade normalizada de um dos píxeis para cada um dos M pares de eletrodos pode ser obtida através de métodos numéricos ou experimentais. Numericamente, a sensibilidade à variação de permissividade relativa de um pixel para um determinado par de eletrodos é obtida da seguinte maneira (Azevedo, 2002 e Barros, 2011):

1. primeiramente, discretiza-se toda a região sensível em pequenas áreas denominadas de píxeis (visualizar Figura 2);
2. admite-se, inicialmente, que todos os píxeis da região sensível estão ocupados pelo material de menor permissividade relativa;
3. em seguida, seleciona-se apenas um pixel e varia-se sua permissividade relativa fazendo com que ele assuma o valor da permissividade relativa igual à do material de maior permissividade relativa na mistura, enquanto o restante dos píxeis permanecem com a permissividade relativa igual à do material de menor permissividade relativa;
4. calcula-se os M valores de capacitância para esse pixel nessas condições;
5. em seguida, esse pixel volta a ter a permissividade relativa mais baixa (retornando-se à condição inicial, passo 2) para se selecionar outro pixel, elevar a sua permissividade relativa e calcular os M valores de capacitância;
6. repete-se o laço composto pelos passos de 3 - 5, sempre utilizando um novo pixel, até que todos os píxeis tenham seu valor de permissividade relativa alterado e forem obtidas as M medidas de capacitância.

Figura 2 – Seção transversal de um sensor com 12 eletrodos dividida em 1024 píxeis.



Fonte – O autor (2018).

Os mapas de sensibilidade mostram como se distribui os valores de capacitância de todos os píxeis da região sensível do sensor para cada um dos M pares de eletrodos. Esses mapas são construídos plotando-se os valores de capacitâncias normalizadas de cada um dos píxeis em um sistema de eixos tridimensional onde o eixo z representa esse valor (Azevedo, 2002).

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

$$S_{i,j}(p) = \mu(p) \cdot \frac{C_{i,j}^m(p) - C_{i,j}^l}{C_{i,j}^h - C_{i,j}^l} \cdot \frac{1}{\varepsilon^h - \varepsilon^l} = \mu(p) \cdot C_N(p) \cdot \frac{1}{\varepsilon^h - \varepsilon^l} \quad (4)$$

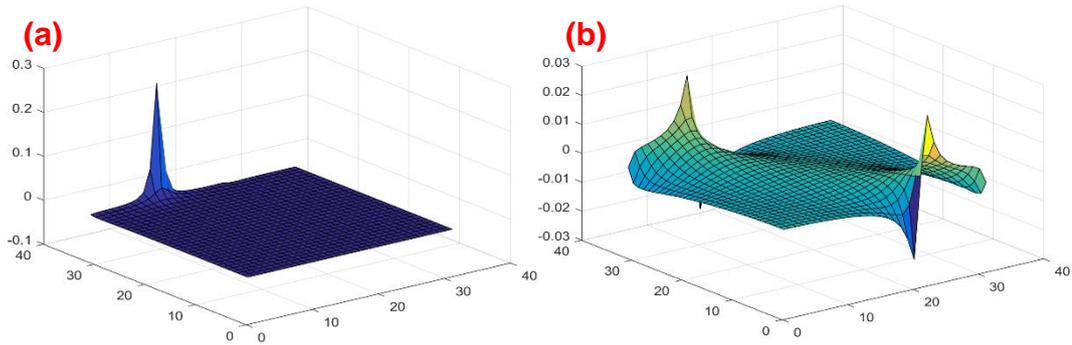
em que:

- ε^h e ε^l representam os valores de permissividade relativa para o material de maior permissividade relativa (h) e de menor permissividade relativa (l);
- i, j representam o eletrodo emissor e o eletrodo receptor, respectivamente;

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

Desta maneira, pode-se dizer que um mapa de sensibilidade para um determinado par de eletrodos é um conjunto de valores numéricos que mostra a influência que cada pixel da região sensível tem sobre o valor da capacitância deste determinado par de eletrodos quando o valor da permissividade relativa de cada um dos píxeis da região sensível é alterado de um valor mínimo para um valor máximo enquanto todos os demais píxeis permanecem com o valor da mínima permissividade relativa (Azevedo, 2002). Na Figura 3 podem-se observar os mapas de sensibilidade para os pares de eletrodos 1-2 (a) e 1-7 (b). Pode-se notar que a distribuição de sensibilidade não é uniforme, além de existir regiões com sensibilidade negativa. A capacitância para o par adjacente (a) é aproximadamente 10 vezes maior que a capacitância para o par oposto (b).

Figura 3 – Mapas de sensibilidade para um sensor com 12 eletrodos. Par adjacente 1-2 (a) e par oposto 1-7 (b)



Fonte – O autor (2018).

2.7. Parâmetros para Avaliação da Sensibilidade

Seguindo os conceitos de média, desvio padrão e coeficiente de variação utilizados na análise estatística, pode-se avaliar a distribuição da sensibilidade dos sensores capacitivos por meio dos seguintes parâmetros (Mota, 2015):

$$S_{i,j}^{avg} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P S_{i,j}(p) \quad (5)$$

$$S_{i,j}^{dev} = \left(\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (S_{i,j}(p) - S_{i,j}^{avg})^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$Sp_{i,j} = \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} \quad (7)$$

$$Sp = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n Sp_{i,j} \quad (8)$$

em que:

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

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

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

2.8. Algoritmos para Reconstrução de Imagem

O problema da reconstrução de imagem a partir das medições realizadas é denominado de problema inverso, enquanto que o cálculo das capacitâncias a partir de uma imagem conhecida (distribuição de permissividade relativa conhecida) é denominado problema direto. Em sistemas ECT, a tarefa do algoritmo de reconstrução é, portanto, resolver o problema inverso. Ou seja, determinar a distribuição de permissividade relativa (imagem) dos objetos presentes na região sensível do sensor a partir de um conjunto limitado de medições de capacitâncias (Mota, 2015). Os algoritmos de reconstrução de imagem utilizados neste trabalho são: Retro-Projeção Linear e Landweber Projetado.

2.8.1. Retro-Projeção Linear

A Equação 9 representa o cálculo do vetor de capacitância normalizada λ , que é a multiplicação do vetor de permissividade normalizada g com a matriz Jacobiana S (matriz de distribuição de sensibilidade, obtida a partir dos 66 mapas de sensibilidade).

$$\lambda = gS \quad (9)$$

Como a incógnita de interesse para a reconstrução da imagem é o vetor de permissividade normalizada, basta isolá-la na equação, podendo ser resolvida por:

$$g = S^{-1}\lambda \quad (10)$$

Entretanto, não existe a inversa de S por não ser uma matriz quadrada. O algoritmo LBP, desenvolvido por Xie *et al.*, considera a matriz S como um mapeamento linear desde o espaço vetorial das permissividades relativas normalizadas para o espaço vetorial das capacitâncias normalizadas. Desta forma, a transposta pode ser considerada como um mapeamento linear do espaço vetorial das capacitâncias normalizadas para o espaço vetorial das permissividades relativas normalizadas. Sendo assim, a solução aproximada para a distribuição de permissividade relativa normalizada dada pelo vetor g , que com ele pode-se plotar a imagem reconstruída, pode ser dada por:

$$g = S^T\lambda \quad (11)$$

2.8.2. Landweber Projetado

O algoritmo de Landweber é um método iterativo de solução inversa, ou seja, tem a função de determinar, de maneira iterativa, a distribuição de permissividade relativa (imagem) dos objetos presentes na região sensível do sensor a partir de um número limitado de medições de capacitância. O algoritmo pode ser expresso por:

$$g_{k+1} = P[g_k - \mu S^T(Sg_k - \lambda)] \quad (12)$$

em que P equivale ao operador de projeção (Equação 14), g_k representa a solução inicial, que pode ser igual a zero ou obtida, por exemplo, pelo algoritmo LBP, μS^T caracteriza a aproximação inicial da inversa de S (S^{-1}) e λ corresponde ao vetor de capacitância normalizada.

μ denomina-se fator de relaxação (ou fator de ganho), é um escalar positivo que define o tamanho do passo de iteração (*step size*), que pode ser dado por:

$$\mu = \frac{2}{\delta_{max}} \quad (13)$$

em que δ_{max} é o máximo autovalor de $S^T S$.

$$P[f(x)] = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x) < 0 \\ f(x) & \text{se } 0 < f(x) < 1 \\ 1 & \text{se } f(x) > 1 \end{cases} \quad (14)$$

2.9. Projeto do Sensor Capacitivo

Com o intuito de buscar a melhor configuração do projeto de um sensor capacitivo, vários parâmetros de construção devem ser analisados de uma maneira mais aprofundada tendo em vista os seus efeitos e influências nos resultados gerados.

Segundo Donthi (2004), os eletrodos podem ser montados na parte externa ou no interior do tubo a ser analisado. A escolha de onde colocar os eletrodos depende do material usado para fabricar o tubo. Se o tubo é feito de material condutor, eletrodos internos são usados. Eletrodos externos são usados se o tubo é feito de material isolante. Ambos têm suas vantagens e desvantagens. Sensores com eletrodos externos são não intrusivos e fáceis de projetar. Eles não estão sujeitos a temperaturas extremas, altas pressões e turbulências. Assim, eles não serão contaminados pelo fluido dentro do duto. A principal desvantagem é a não linearidade em suas características. A capacitância pode aumentar ou diminuir com a mudança na permissividade dentro do tubo, dependendo da espessura da parede do vaso. Fatores de correção precisam ser aplicados para tornar as características lineares. Por outro lado, os sensores com eletrodos internos são complexos de projetar, pois precisam suportar temperaturas extremas, altas pressões e turbulências. Eles precisam resistir à corrosão se o fluido interno for corrosivo. Mas a mudança na capacitância é diretamente proporcional à mudança de permissividade dentro do tubo. As características lineares exibidas por eles provam ser sua maior vantagem.

Vários pesquisadores têm se aplicado ao estudo da influência de cada parâmetro de construção no desempenho do sensor capacitivo. Xie *et al.* (1990), por exemplo, analisaram a influência de parâmetros como a espessura e o material da parede do duto, além da blindagem externa. Yang e Liu (1999) estudaram as características de sensores ECT com seção transversal quadrada. Peng *et al.* (2005) investigaram o efeito do comprimento dos

eletrodos de medição e de guarda sobre a distribuição da sensibilidade. Olmos *et al.* (2007) analisaram os efeitos do tamanho dos eletrodos de medição, de guarda e o arranjo da malha de aterramento em um sensor ECT com 12 eletrodos. Yang (2006, 2010) revisou alguns pontos chaves para o projeto de sensores ECT, incluindo o número de eletrodos, a diferença entre eletrodos internos e externos, a influência da espessura da parede do duto, eletrodos de guarda e malha de aterramento. Azevedo (2002) analisou o comportamento dos valores de capacitância variando-se o ângulo dos eletrodos, a permissividade relativa e a espessura da parede do duto do sensor capacitivo.

Em um sensor ECT típico, usa-se, geralmente, um grid quadrangular de 32×32 pixels para amostrar a distribuição de permissividade relativa na seção transversal, totalizando 1024 pixels em que cada pixel representa o valor normalizado da permissividade relativa do material ali presente. Através das medidas das capacitâncias entre eletrodos, é obtido a imagem da distribuição de permissividade relativa por meio de um algoritmo de reconstrução de imagem adequado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do sensor, os materiais necessários foram: placas retangulares de policarbonato; placas retangulares dupla face para circuito impresso (PCB, fibra de vidro); e “grãos” de polímero ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno).

Já para o sistema de aquisição de dados, utilizou-se a placa EVAL-AD7746EBZ *Evaluation Board* e o *software AD7746 Evaluation*. Além disso, um computador pessoal do tipo notebook foi usado para a verificação e armazenamento dos dados adquiridos.

Com relação à avaliação dos parâmetros de construção do sensor capacitivo, foram utilizados os *softwares* de simulação multifísica COMSOL e Matlab.

O estudo foi realizado no Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, com a utilização de recursos disponíveis nos laboratórios de Projetos Integradores (LABPI), de Modelagem, além do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e de Máquinas Operatrizes (MOP). Os demais recursos, tais como os *softwares* de pacote comercial de simulação numérica COMSOL Multiphysics e Matlab, a placa de aquisição de dados e materiais para a construção do sensor capacitivo foram disponibilizados pelo Laboratório Experimental de Escoamento Multifásico do Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1. Construção do Sensor Base

Visando avaliar a influência dos parâmetros de construção do sensor capacitivo, objetivo central do trabalho, o estudo se inicia com a construção de um sensor base que servirá de modelo para as simulações. Os itens que compõem esse sensor são: placas retangulares de policarbonato, placas de fibra de vidro (PCB) e tampas de material polimérico.

As placas retangulares de policarbonato compõem a parte estrutural do sensor. Esse tipo de material foi utilizado devido à disponibilidade no Laboratório de P&D. Depois de cortadas e realizado um acabamento, elas foram coladas, formando, assim, um duto de seção transversal quadrada, conforme a Figura 5. Além disso, foi produzido utilizando uma impressora 3D disponível na Instituição duas tampas, uma inferior e outra superior, para o fechamento do duto. A Tabela 1 representa os componentes do sensor base e suas características.

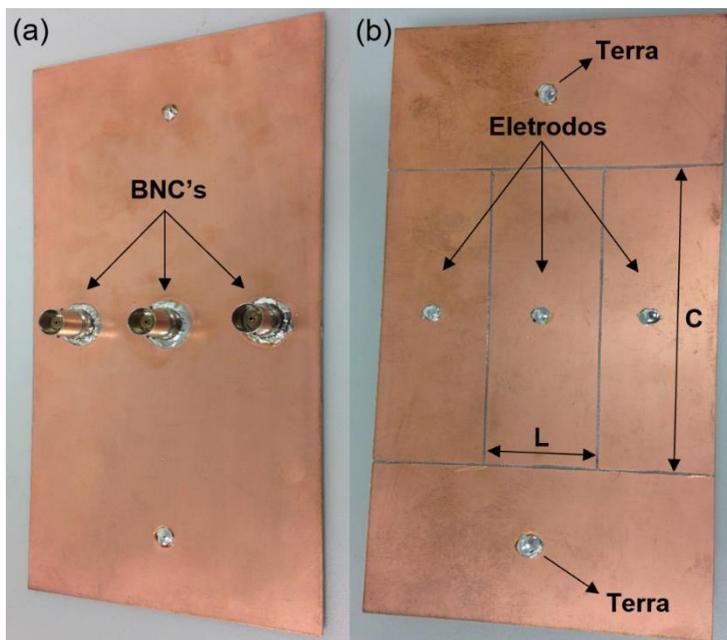
Tabela 1 – Componentes do Sensor Base e suas características.

Componente	Material	Dimensões (mm)	Quantidade
Paredes do Duto	Policarbonato	300x100x4	4
Placa de Eletrodos	Fibra de Vidro	200x100x1,6	4
Tampas	PLA	104x104x20	2

Fonte – O autor (2018).

Externamente às paredes do duto foram fixadas as placas de fibra de vidro. Cada placa possui 3 eletrodos espaçados igualmente, totalizando, assim, 12 eletrodos. Como pode ser observado na Figura 4, foram utilizados conectores BNC para interligar os eletrodos à placa de aquisição e medição da capacitância.

Figura 4 - Vista frontal (a) e inferior (b) da placa de fibra de vidro. C: Comprimento do eletrodo. L: Largura do eletrodo.



Fonte – O autor (2018).

Figura 5 - Sensor base montado.

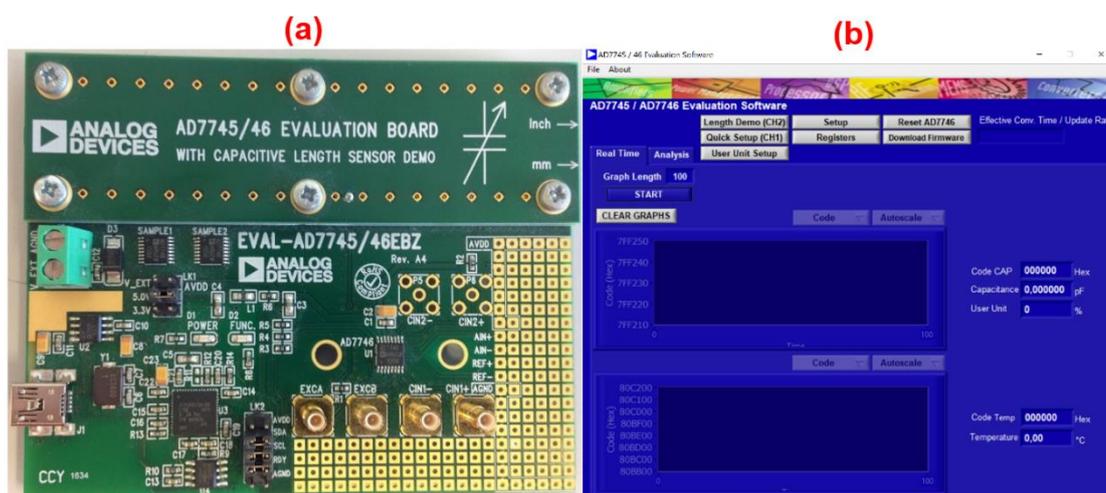


Fonte – O autor (2018).

3.2. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição dos dados no procedimento de medição das capacitâncias é feito através da placa EVAL-AD7745/46. É uma placa de avaliação que é operada com um computador através de uma conexão USB padrão com o *software* fornecido, que permite ao usuário realizar uma análise detalhada desse componente que converte diretamente a capacitância medida para a forma digital. É um conversor de alta linearidade, precisão e resolução. Em suma, a placa é responsável pelo interfaceamento do sensor capacitivo com o usuário. A Figura 6 representa a placa utilizada e a interface do *software* fornecido.

Figura 6 – (a) Placa de aquisição de dados e (b) Interface do *software* fornecido.



Fonte – O autor (2018).

3.3. Programas de Simulação Multifísica COMSOL e Matlab

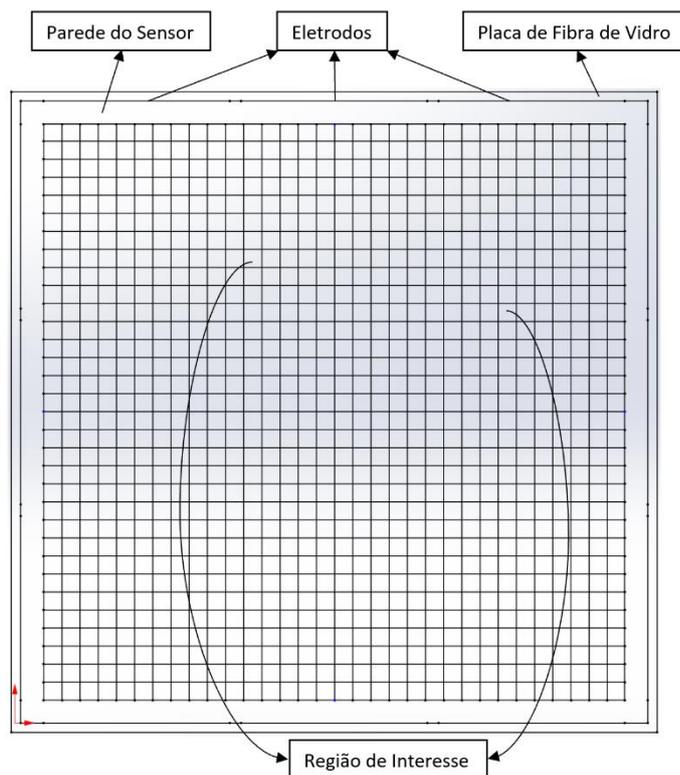
Para avaliar a influência dos parâmetros de construção do sensor, foram utilizados os *softwares* de simulação numérica COMSOL e Matlab.

3.3.1. Programa COMSOL

No programa COMSOL são definidos os parâmetros geométricos de modelagem do sensor como a geometria importada em 2D, além das condições de contorno incluindo a escolha dos materiais dos componentes do sensor, a indicação dos eletrodos com as suas respectivas tensões, a geração de campo elétrico e o cálculo das capacitâncias. A geometria, como pode ser observado

na Figura 7, é uma representação 2D da seção transversal do sensor. Buscando maior fidelidade entre a representação 2D e o sensor construído, utilizou-se o programa SolidWorks para implementá-la.

Figura 7 – Modelo de geometria 2D implementado no programa SolidWorks.



Fonte – O autor (2018).

3.3.2. Programa Matlab

A automatização do processo de simulação do sensor capacitivo é feita utilizando o programa Matlab. Nesse programa são empregadas funções para o cálculo da capacitância normalizada utilizando o modelo paralelo (seção 2.5), para a geração dos mapas de sensibilidade (seção 2.6), além da implementação do parâmetro de avaliação de sensibilidade S_p (seção 2.7) e dos algoritmos de reconstrução de imagem Retro-Projeção Linear (subseção 2.8.1) e Landweber Projetado (subseção 2.8.2).

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Validação do Modelo

As ferramentas de modelagem numérica são de suma importância para melhor compreender e dimensionar os mais diversos equipamentos. Todavia, faz-se necessário comparar os resultados obtidos desses modelos com os resultados experimentais para poder validar o modelo proposto. Além disso, não só compará-los, mas também eles devem apresentar um certo grau de concordância, estabelecido conforme o nível de detalhamento que o equipamento ou processo exigem.

Para a validação do modelo implementado no COMSOL, foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 2. A escolha desses parâmetros (e seus respectivos valores) para o sensor base foram definidos junto ao orientador do projeto, visto a sua larga experiência na área de tomografia capacitiva. Os materiais sob avaliação são Ar e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno).

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na construção do sensor base.

Parâmetro	Definição
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede (mm)	4
Comprimento dos Eletrodos (mm)	100
Largura dos Eletrodos (mm)	32
Espessura da Placa de Fibra de Vidro (mm)	1,6
Presença do Eletrodo de Terra Axial	Sem
Posicionamento dos Eletrodos	Ao Centro

Fonte – O autor (2018).

4.1.1. Validação do Modelo de Simulação utilizando Experimento com o Sensor Base

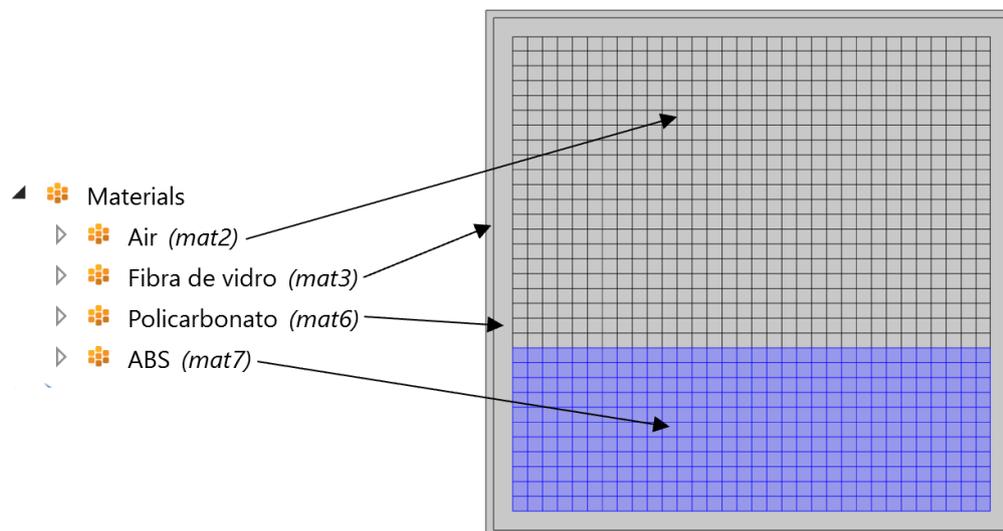
Como visto no item 3.3.1, no programa COMSOL são definidos todos os parâmetros de modelagem do sensor capacitivo, Figura 8. Neste *software*, os materiais são caracterizados pelo seu valor de permissividade relativa, Tabela 3.

Tabela 3 - Permissividades relativas dos materiais do sensor capacitivo.

Componente	Permissividade Relativa
Policarbonato	3,0
ABS	3,0
Ar	1,0
Fibra de Vidro	4,3

Fonte – O autor (2018).

Figura 8 - Materiais do sensor base com as suas vinculações na malha analisada no programa COMSOL.

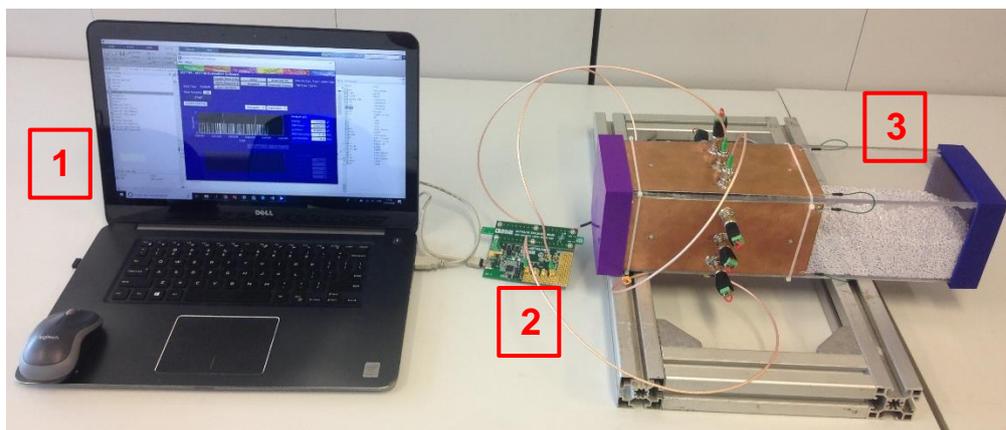


Fonte – O autor (2018).

Foram realizados três ensaios de simulação: um para o caso no qual o sensor está cheio de ar; um para o caso no qual o sensor está cheio de ABS e outro com uma composição estratificada de ABS ocupando aproximadamente 39% da seção transversal do sensor.

Como pode se observar na Figura 9, o *setup* para o ensaio experimental é composto, basicamente, pelo sensor, a placa de medição de capacitância e o computador para aquisição, cálculo e armazenamento dos dados.

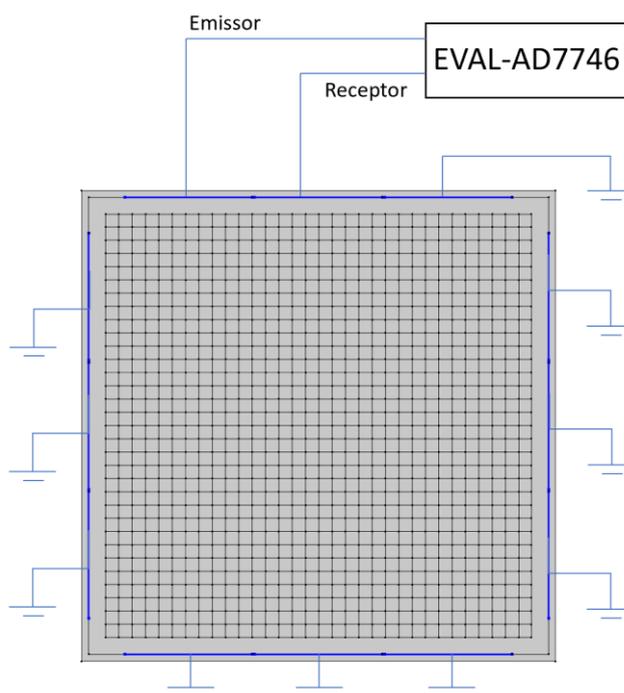
Figura 9 - Processo de medição do sensor base. (1) computador, (2) placa de aquisição de dados e (3) sensor capacitivo.



Fonte – O autor.

Como a placa de aquisição possui apenas um canal, a medição dos 66 valores de capacitância não pode ser realizada paralelamente. Ou seja, a capacitância de cada par de eletrodo foi medida sequencialmente, sendo um eletrodo emissor e o outro receptor; e os demais aterrados, Figura 10.

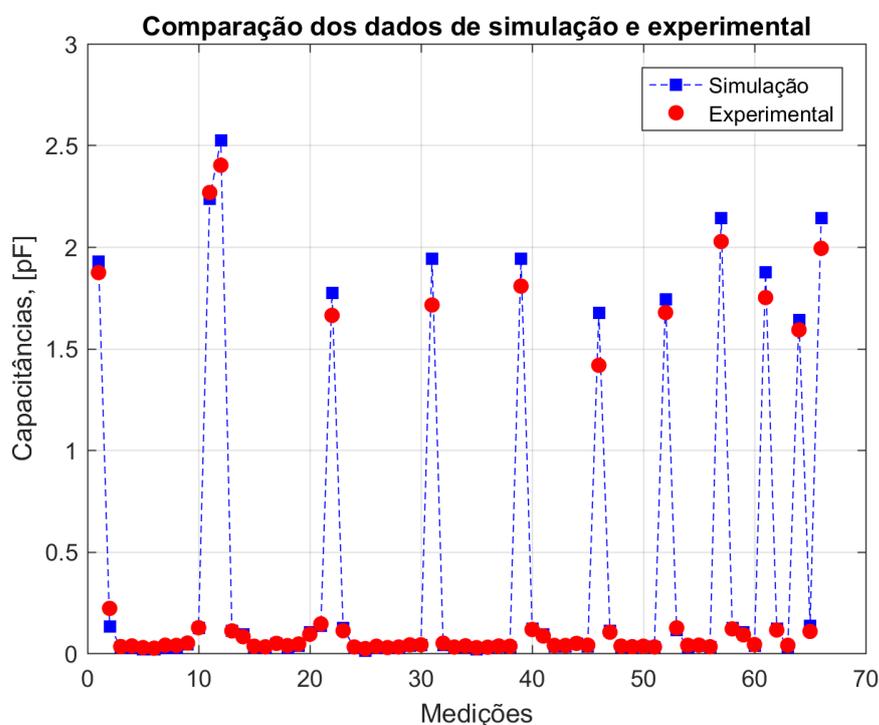
Figura 10 – Processo de medição sequencial dos valores de capacitância.



Fonte – O autor (2018).

Assim como nas simulações, foram realizados três ensaios: um para o caso no qual o sensor está cheio de ar; um para o caso no qual o sensor está cheio de ABS e outro com uma composição estratificada de ABS ocupando aproximadamente 39% da seção transversal do sensor. A Figura 11 representa a comparação entre os valores de capacitância simulados e medidos experimentalmente. O caso analisado foi aquele no qual o sensor está cheio de ar. Como pode-se observar, há uma boa concordância entre os dados, indicando que, dessa forma, pode-se utilizar o modelo implementado no Comsol para otimizar os parâmetros de construção do sensor.

Figura 11 – Comparação dos dados de simulação e experimental do sensor base para o caso vazio (cheio de ar).



Fonte – O autor (2018).

4.2. Otimização dos Parâmetros Geométricos

Nas subseções seguintes, os parâmetros de construção do sensor serão avaliados a partir dos valores estabelecidos para o sensor base.

O processo de otimização consiste em variar um dos parâmetros de construção (mantendo os demais fixos) e observar a sua influência sobre o valor de S_p (parâmetro de sensibilidade, Equação 8). Como visto na Seção 2.7, quanto menor o valor de S_p , melhor será a homogeneidade da distribuição de sensibilidade do sensor. Dessa forma, seleciona-se o valor do parâmetro que obteve o menor valor de S_p , deixando-o fixo durante a avaliação do próximo parâmetro de construção.

4.2.1. Efeito do Material da Parede do Duto

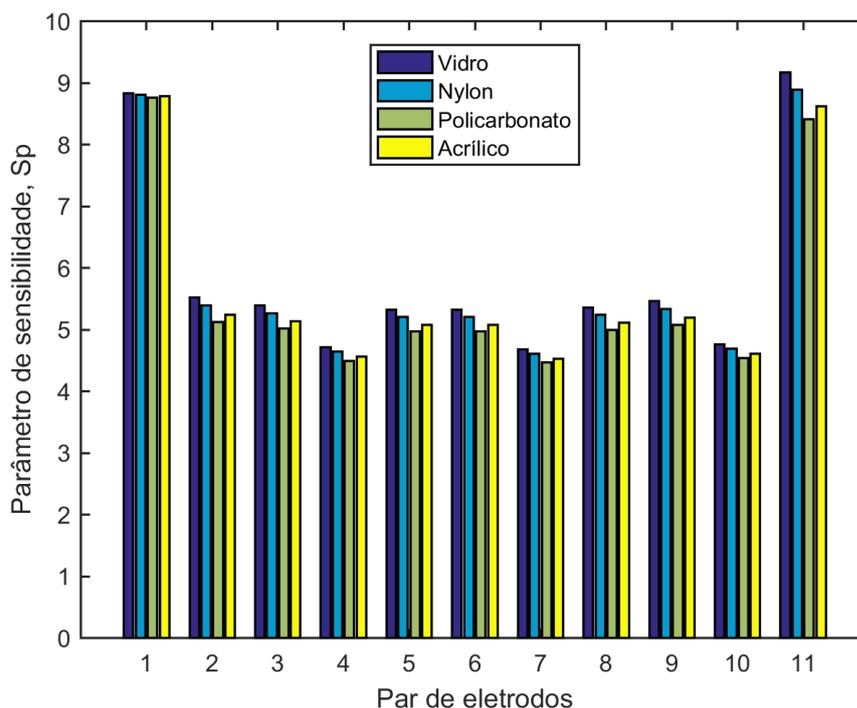
Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 4 e variando-se o tipo de material da parede do duto, observou-se o valor de S_p para quatro diferentes tipos de materiais: Vidro; Nylon; Policarbonato e Acrílico. Os resultados são ilustrados na Figura 12.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados como base para a variação da espessura da parede do duto.

Parâmetro	Valor
Espessura da Parede	4mm
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Largura dos Eletrodos	32mm
Eletrodo de Terra Axial	Sem
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

Figura 12 - Valores de S_p para diferentes materiais da parede do duto.



Fonte – O autor (2018).

Analisando-se os valores de S_p na Figura 12, nota-se que a variação do material da parede do duto influencia na distribuição da sensibilidade no interior do sensor. Segundo os valores obtidos, o policarbonato apresentou o menor valor de S_p . Ou seja, o material da parede continuará o mesmo.

4.2.2. Efeito da Espessura da Parede do Duto

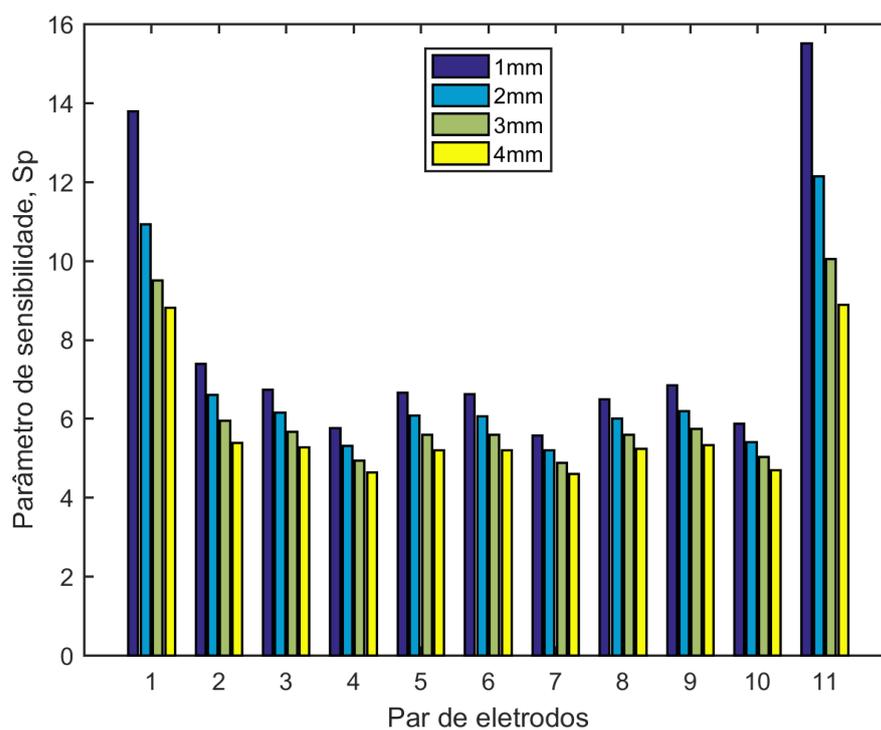
Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 5 e variando-se a espessura da parede do duto, observou-se os valores de S_p descritos na Figura 13. Nota-se claramente que o aumento da espessura da parede do duto afeta positivamente o valor de S_p . Manteve-se, portanto o valor de 4mm de espessura (mantendo a dimensão utilizada no sensor base).

Tabela 5 - Parâmetros utilizados como base para a variação da espessura da parede do duto.

Parâmetro	Valor
Material da Parede	Policarbonato
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Largura dos Eletrodos	32mm
Eletrodo de Terra Axial	Sem
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

Figura 13 - Valores de S_p para diferentes espessuras da parede do duto.



Fonte – O autor (2018).

4.2.3. Efeito do Comprimento dos Eletrodos

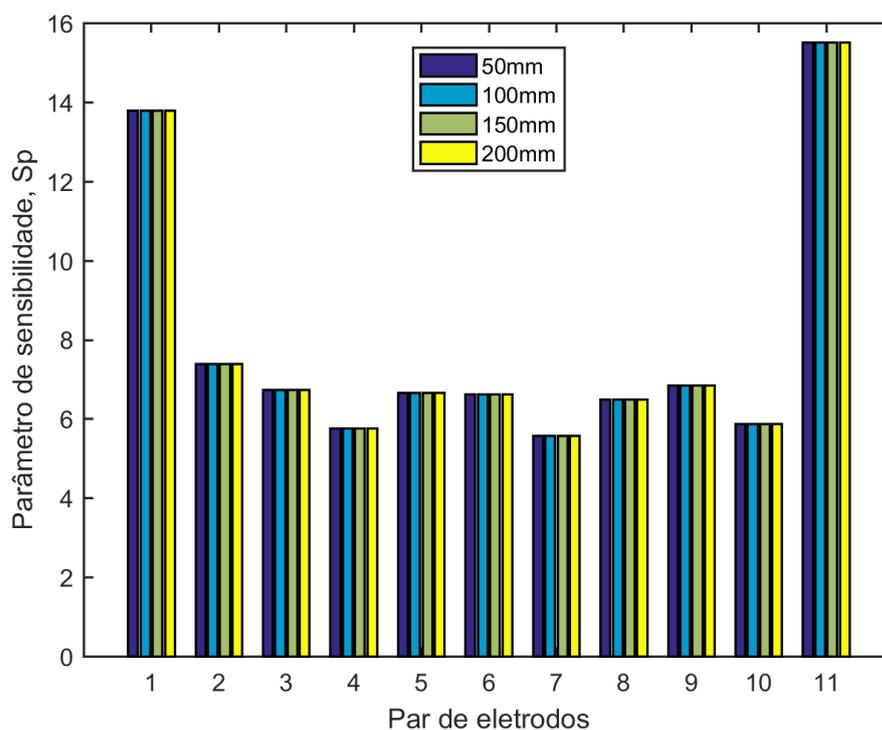
Como o material e a espessura da parede do sensor não sofrerão alterações em relação ao sensor base, manteve-se os mesmos valores de parâmetros, conforme representado na Tabela 6. Variando-se o comprimento dos eletrodos, observou-se o valor de S_p para os valores de 50, 100, 150 e 200mm. Os resultados são representados na Figura 14.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados como base para a variação do comprimento dos eletrodos.

Parâmetro	Valor
Material da Parede	Polycarbonato
Espessura da Parede	4mm
Largura dos Eletrodos	32mm
Eletrodo de Terra Axial	Sem
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

Figura 14 - Valores de S_p para diferentes comprimentos dos eletrodos.



Fonte – O autor (2018).

Analisando-se os valores de S_p da Figura 14, percebe-se que a variação do comprimento dos eletrodos não apresenta nenhuma influência relevante sobre o parâmetro S_p . Sendo assim, mantém-se o comprimento de 100mm já definido para o sensor base.

4.2.4. Efeito da Largura dos Eletrodos

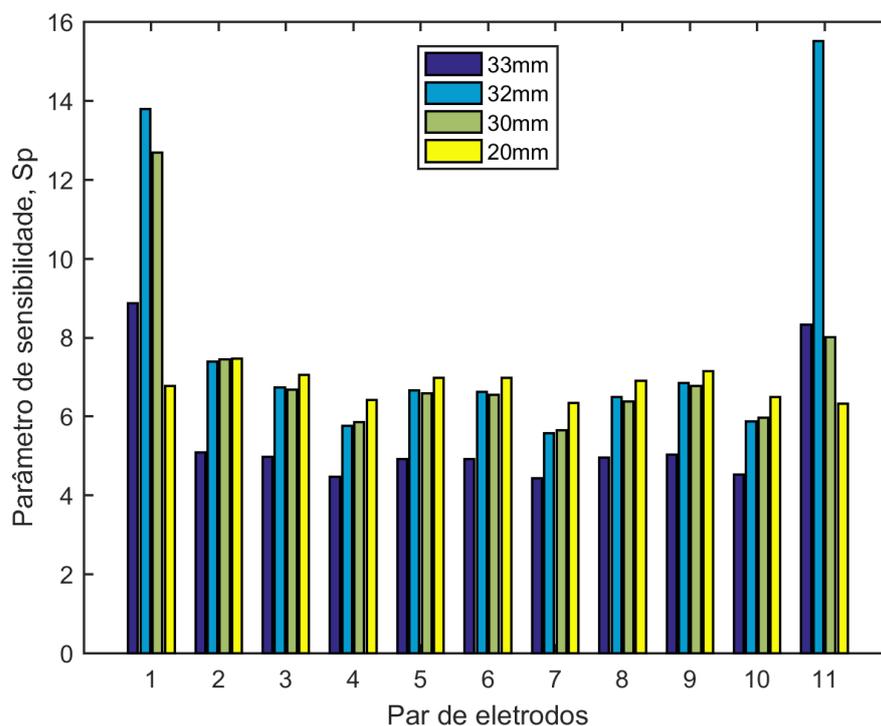
Mantendo-se constantes os parâmetros dispostos na Tabela 7 e variando-se a largura dos eletrodos, observou-se os valores de S_p gerados, Figura 15.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados como base para a variação da largura dos eletrodos.

Parâmetro	Valor
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede	4mm
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Eletrodo de Terra Axial	Sem
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

Figura 15 - Valores de S_p para diferentes larguras dos eletrodos.



Fonte – O autor (2018).

Observando-se os resultados dos valores de S_p para os pares de eletrodos 1-3 a 1-11 (pares 2 a 10), verifica-se que os menores valores são atribuídos ao comprimento igual a 33mm. Portanto, tal valor foi escolhido como valor otimizado para a largura dos eletrodos.

4.2.5. Efeito do Eletrodo de Terra Axial

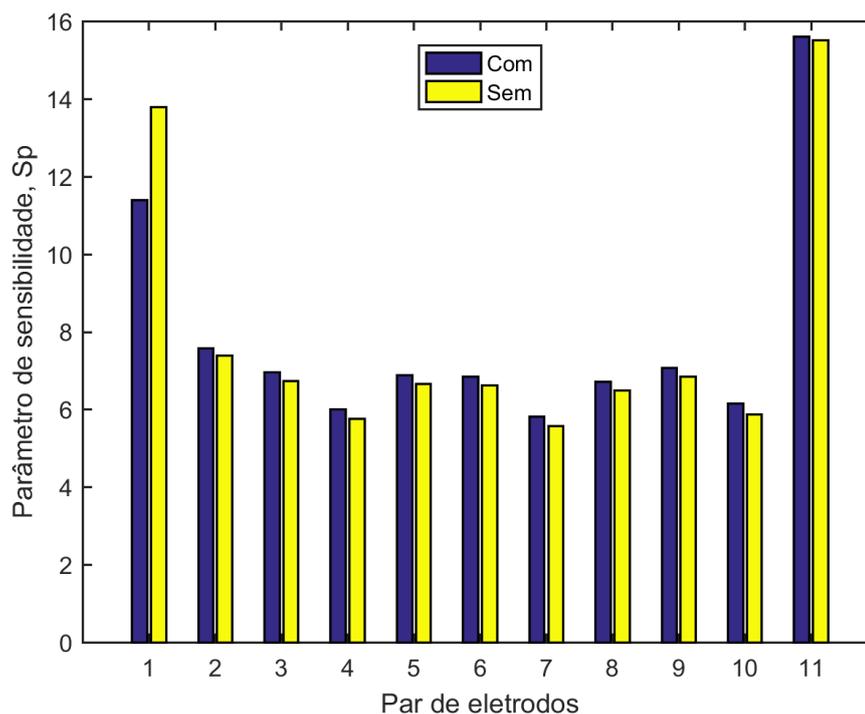
Outro parâmetro analisado é a presença do eletrodo de terra axial localizado entre os eletrodos de medição. Para tanto, mantendo-se os parâmetros descritos na Tabela 8, os valores S_p foram analisados para os casos caracterizados pela presença ou não de eletrodos axiais. Verificou-se, como pode se observar na Figura 16, que os menores valores (considerando, novamente, os pares 1-3 a 1-11) são aqueles obtidos para o último caso.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados como base para a presença ou não do eletrodo de terra axial.

Parâmetro	Valor
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede	4mm
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Largura dos Eletrodos	33mm
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

Figura 16 - Valores de S_p para a presença ou não do eletrodo de terra axial.



Fonte – O autor (2018).

4.2.6. Efeito da Espessura da Placa de Fibra de Vidro

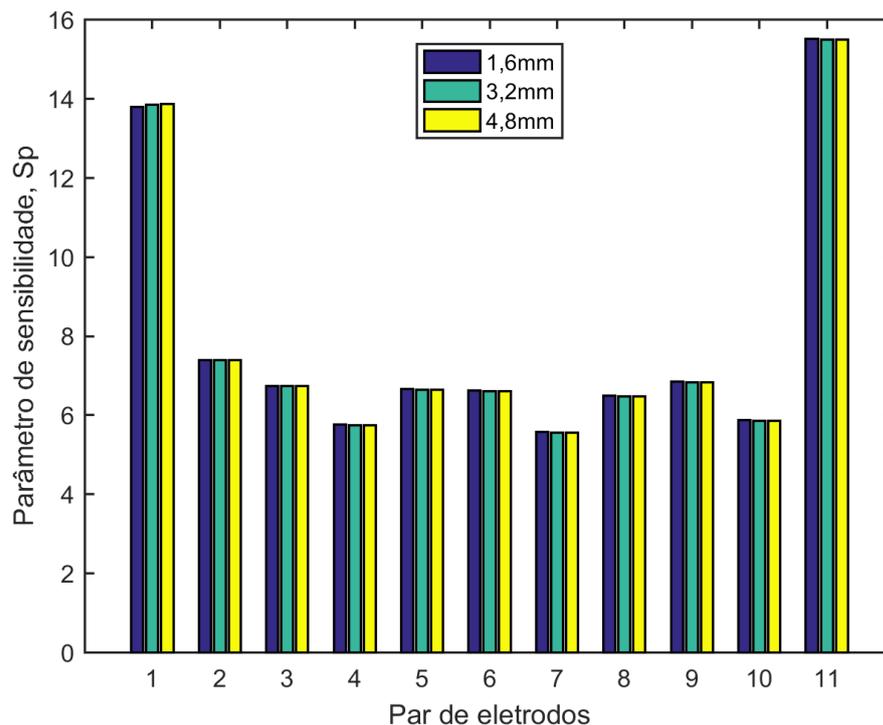
O penúltimo parâmetro analisado é a espessura da placa de fibra de vidro. Repetindo o processo para simulações anteriores, manteve-se os parâmetros descritos na Tabela 9, variou-se a espessura da placa de fibra de vidro e observou-se os valores de S_p correspondentes, conforme a Figura 17. Ao analisar os valores de S_p obtidos, percebe-se que o efeito devido à variação da espessura da placa apresenta pouca influência. Assim, decidiu-se manter a espessura definida para o sensor base.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados como base para a variação da espessura da placa de fibra de vidro.

Parâmetro	Valor
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede	4mm
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Largura dos Eletrodos	33mm
Presença do Eletrodo de Terra Axial	Sem
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

Figura 17 - Valores de S_p para diferentes espessuras da placa de fibra de vidro.



Fonte – O autor (2018).

4.2.7. Efeito do Posicionamento dos Eletrodos

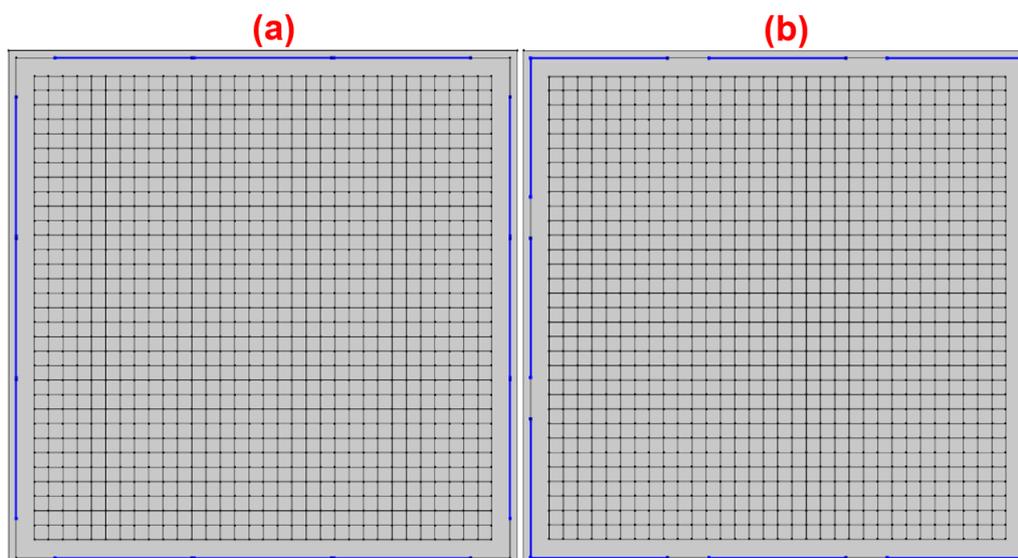
A última etapa de otimização consiste em avaliar a influência do posicionamento dos eletrodos na placa de fibra de vidro. Dois casos foram avaliados: eletrodos posicionados ao centro da placa e eletrodos posicionados nas extremidades, Figura 18. A Tabela 10 representa os parâmetros utilizados como base para efetuar essa variação.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados como base para a variação do posicionamento dos eletrodos na placa de fibra de vidro.

Parâmetro	Parâmetro Fixo
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede	4mm
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Largura dos Eletrodos	33mm
Presença do Eletrodo de Terra Axial	Sem
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm

Fonte – O autor (2018).

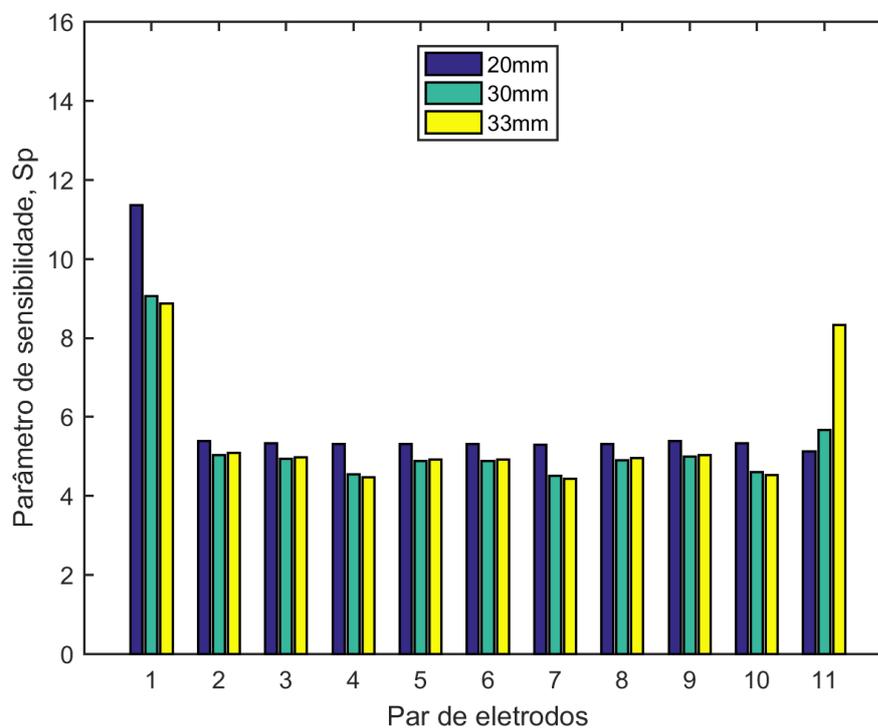
Figura 18 – Posicionamento dos eletrodos ao centro (a) e nas extremidades (b) na seção transversal do sensor.



Fonte – O autor (2018).

Visto a limitação da largura da placa de fibra de vidro (100mm) e da parede do duto (4mm), a variação do posicionamento dos eletrodos também afetará a variação da largura dos eletrodos. Assim, foram consideradas as larguras: 20, 30 e 33mm com distância entre eletrodos fixa e igual a 0,5mm. A Figura 19 representa os valores de S_p obtidos.

Figura 19 - Valores de S_p para o posicionamento dos eletrodos ao centro da placa de fibra de vidro para diferentes larguras dos eletrodos.

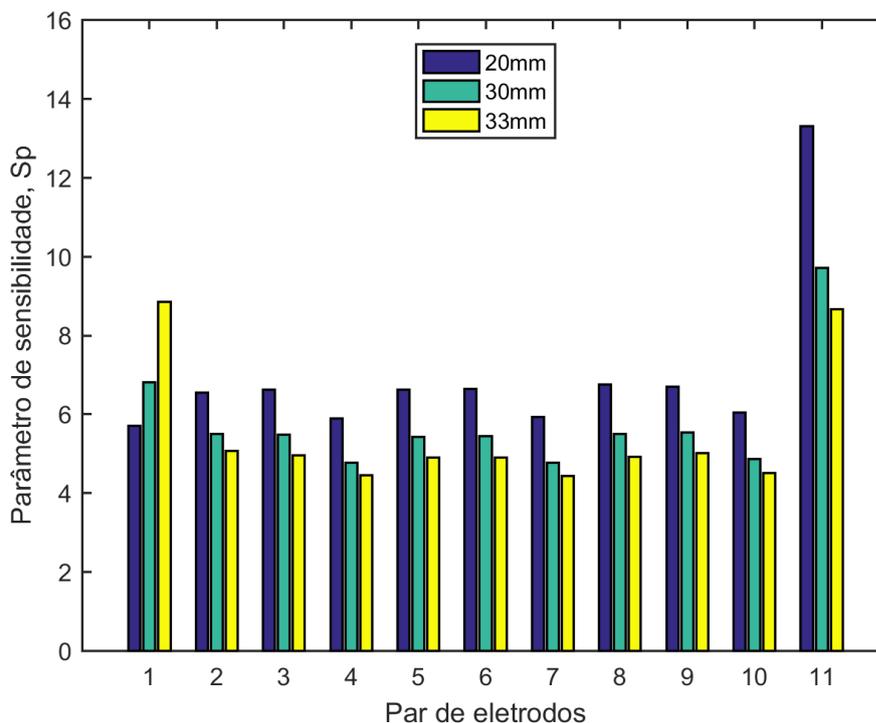


Fonte – O autor (2018).

Analisando a Figura 19 e excluindo os pares de eletrodos adjacentes (1-2 e 1-12), nota-se que a largura de 33mm resultou no menor valor de S_p para a maioria dos pares de eletrodos.

Para o caso no qual os eletrodos são posicionados nas extremidades, também foram considerados os valores de 20, 30 e 33mm de largura. Como observado na Figura 20, nota-se que o eletrodo com 33mm de largura apresentou o menor valor de S_p .

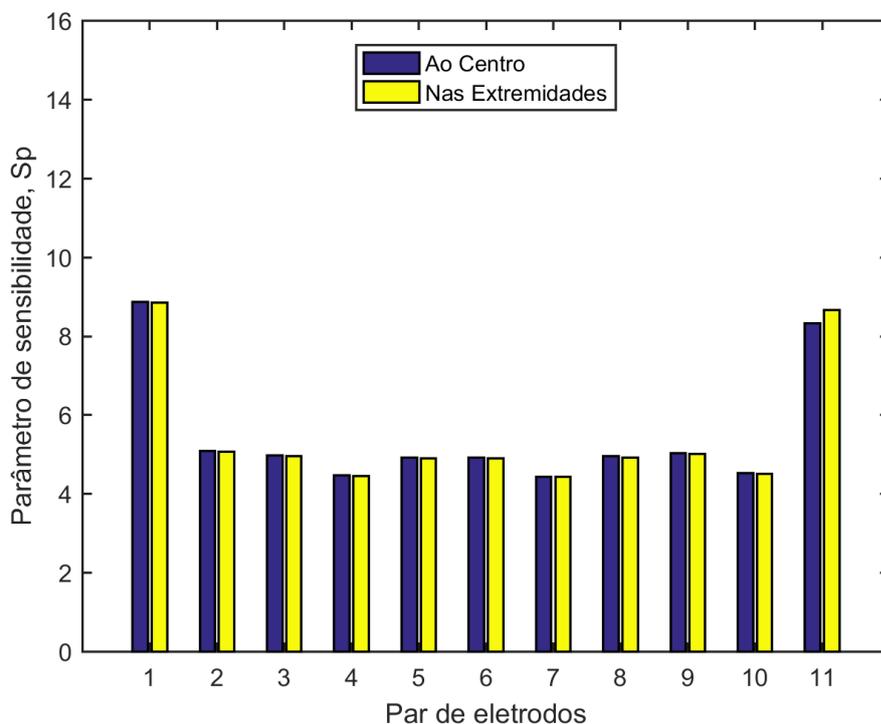
Figura 20 - Valores de S_p para o posicionamento dos eletrodos nas extremidades da placa de fibra de vidro para diferentes larguras dos eletrodos.



Fonte – O autor (2018).

Após analisar o posicionamento dos eletrodos de forma separada e definida a largura do eletrodo nos dois casos, comparou-se o valor de S_p utilizando eletrodos de 33mm de largura posicionados no centro e nas extremidades da placa, Figura 21. Percebe-se, analisando a figura, que o efeito do posicionamento dos eletrodos é mínimo, mantendo-se assim o posicionamento definido na construção do sensor base. Por fim, a Tabela 11 representa os valores dos parâmetros otimizados para a construção do sensor capacitivo.

Figura 21 - Valores de S_p para o posicionamento dos eletrodos ao centro da placa de fibra de vidro comparado com aqueles posicionados nas extremidades.



Fonte – O autor (2018).

Tabela 11 - Parâmetros de construção otimizados para o sensor capacitivo.

Parâmetro	Valor
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede	4mm
Comprimento dos Eletrodos	100mm
Largura dos Eletrodos	33mm
Presença do Eletrodo Axial	Sem
Espessura da Placa de Fibra de Vidro	1,6mm
Posicionamento dos Eletrodos	Ao centro

Fonte – O autor (2018).

4.3. Construção e Análise Experimental do Sensor Otimizado

Posteriormente à realização da análise e otimização dos parâmetros geométricos de construção do sensor, o estudo prosseguiu para a construção do sensor otimizado, Figura 22. Verificando o processo de otimização dos parâmetros geométricos, nota-se que o único parâmetro que sofreu variação, quando relacionado aos parâmetros utilizados para o sensor base, foi a largura do eletrodo que passou de 32 para 33mm.

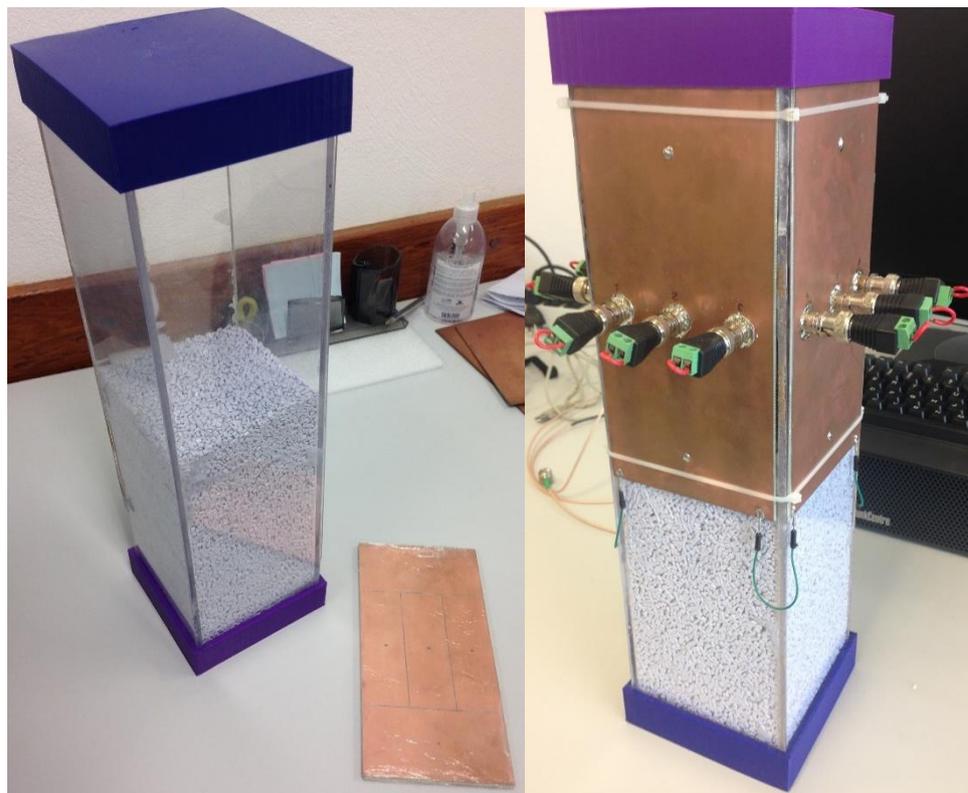
Outra alteração realizada foi com relação ao comprimento do duto. O comprimento foi aumentado de 200 para 400mm para facilitar nas medições para os casos cheio e vazio. Dessa forma, a quantidade necessária de ABS colocada no interior do duto foi somente pra cobrir a região dos eletrodos; e bastaria girar o sensor capacitivo em 180 graus para realizar as medições para os casos cheio (cheio de ABS) e vazio (cheio de ar). A Tabela 12 representa as características definidas para a construção do sensor otimizado.

Tabela 12 – Características e parâmetros empregados para a construção do sensor capacitivo otimizado.

Parâmetro	Definição
Material da Parede	Policarbonato
Espessura da Parede (mm)	4
Comprimento dos Eletrodos (mm)	100
Largura dos Eletrodos (mm)	33
Espessura da Placa de Fibra de Vidro (mm)	1,6
Presença do Eletrodo de Terra Axial	Sem
Posicionamento dos Eletrodos	Ao Centro
Placas de Fibra de Vidro (mm)	200x100
Placas Estruturais da Parede (mm)	400x100
Tampas (mm)	104x104x20

Fonte – O autor (2018).

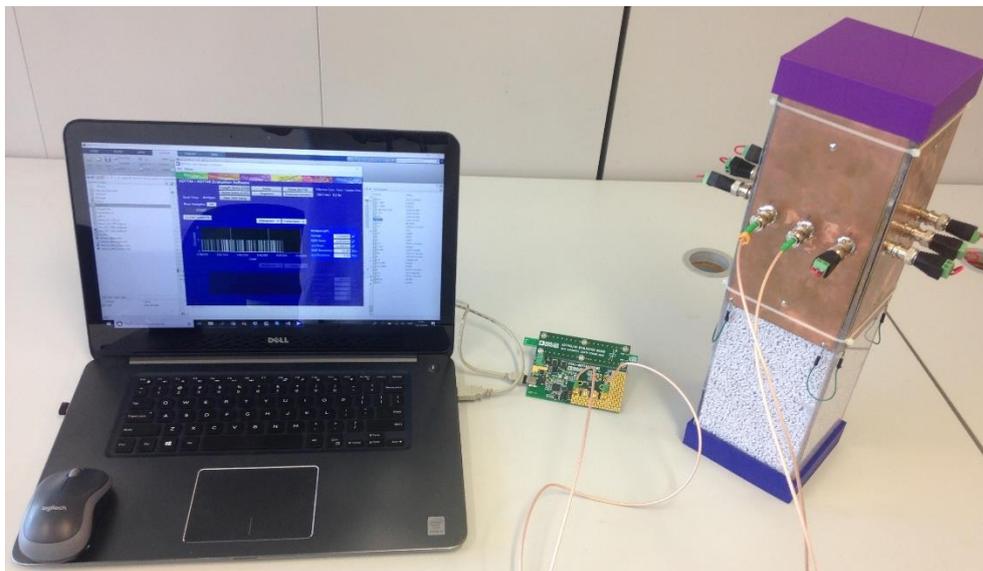
Figura 22 – Sensor Capacitivo Otimizado Montado.



Fonte – O autor (2018).

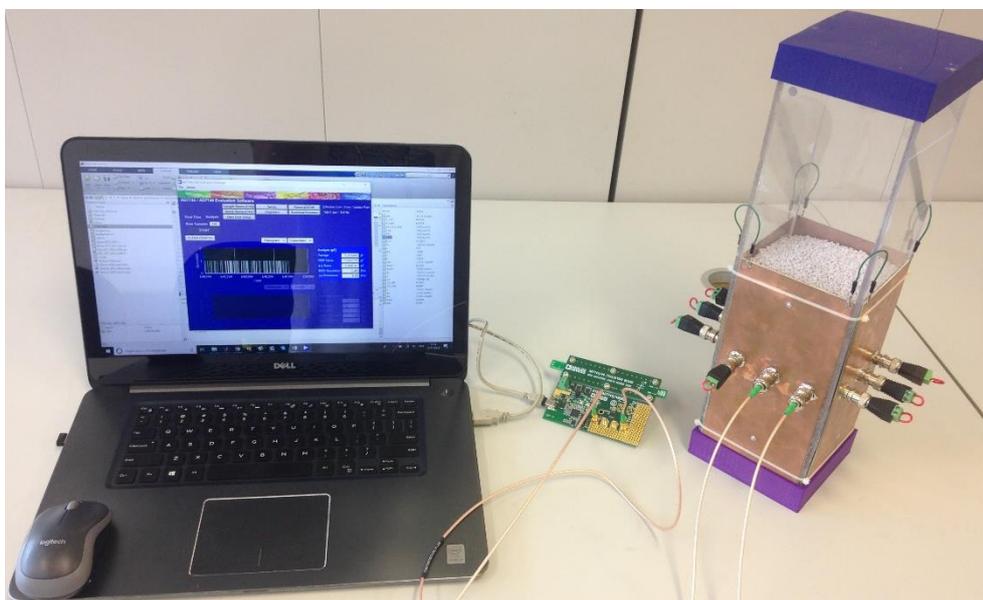
As configurações e a metodologia empregadas para efetuar as medições das capacitâncias foram as mesmas daquelas empregadas nos experimentos com o sensor base (verificar subseção 4.1.1). As Figuras 23, 24 e 25 representam o *setup* experimental para os casos vazio, cheio e 50% de ABS, respectivamente. Já as Figuras 26 e 27 representam o resultado da imagem reconstruída empregando os algoritmos de reconstrução LBP e LWB para o sensor base e otimizado, respectivamente. Observa-se, claramente, que a imagem reconstruída utilizando o sensor base apresenta baixa concordância quando comparada com a imagem ideal (distribuição de ABS e ar no interior do sensor), gerando artefatos na região inferior e superior da seção transversal. No entanto, as imagens reconstruídas a partir das medições com o sensor otimizado apresentam alto grau de concordância em relação a imagem ideal.

Figura 23 – Processo de medição experimental das capacitâncias do sensor otimizado para o caso vazio (cheio de ar).



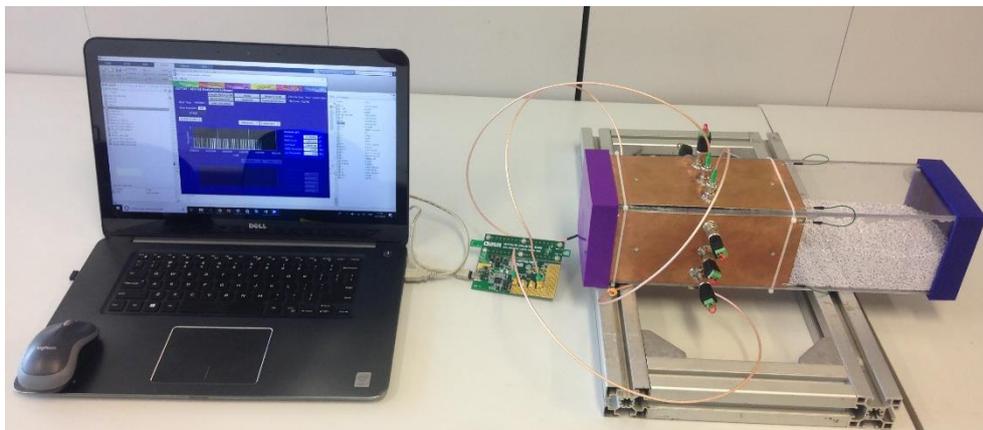
Fonte – O autor (2018).

Figura 24 - Processo de medição experimental das capacitâncias do sensor otimizado para o caso cheio (cheio de ABS).



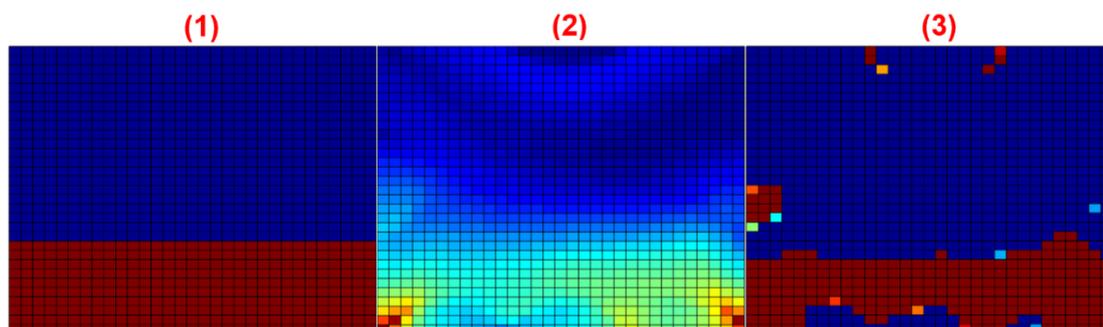
Fonte – O autor (2018).

Figura 25 - Processo de medição experimental das capacitâncias do sensor otimizado para o caso 50% (metade ABS e metade ar).



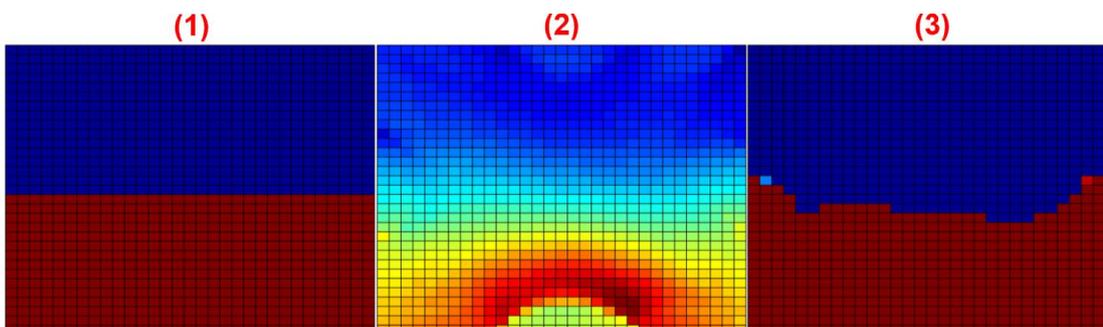
Fonte – O autor (2018).

Figura 26 – Comparação entre a imagem ideal (1), a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LBP (2) e a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB (3) para o sensor base. EQMN_LBP= 0,5753. EQMN_LWB= 0,5525. Conc_LBP= 0,7937. Conc_LWB= 0,7097.



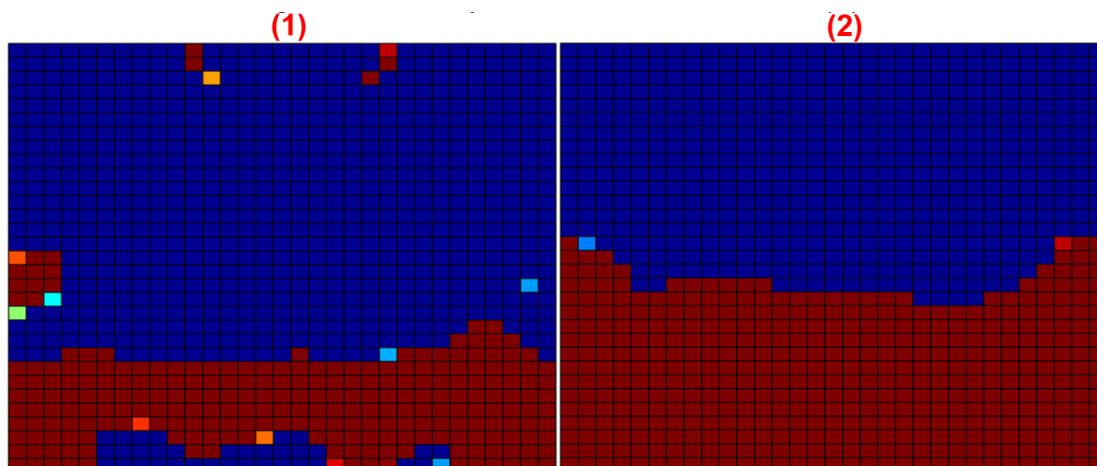
Fonte – O autor (2018).

Figura 27 - Comparação entre a imagem ideal (1), a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LBP (2) e a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB (3) para o sensor otimizado. EQMN_LBP= 0,3325. EQMN_LWB= 0,3300. Conc_LBP= 0,8199. Conc_LWB= 0,8373.



Fonte – O autor (2018).

Figura 28 - Comparação entre a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB para o sensor base (1) com a imagem reconstruída utilizando o algoritmo LWB para o sensor otimizado (2).



Fonte – O autor (2018).

Para realizar uma análise quantitativa dos resultados, calculou-se o erro quadrático médio normalizado (Equação 15) e o grau de concordância (Equação 16) entre as imagens geradas pelos sensores base e otimizado, quando comparadas com as distribuições ideais. A Tabela 13 representa os valores de erro quadrático médio normalizado e concordância para os sensores base e otimizado.

$$EQMN = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (\hat{y}_i - y_i)^2}{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (\theta_i - y_i)^2} \quad (15)$$

em que N_e representa o número de amostras utilizadas, \hat{y}_i representa o valor da permissividade normalizada obtida por simulação, y_i representa o valor da permissividade normalizada obtida experimentalmente e θ_i representa a média das permissividades normalizadas obtidas por simulação.

$$Conc = \sum \frac{(\hat{y} - \theta)(y - \sigma)}{\sqrt{\sum (\hat{y} - \theta)^2 (y - \sigma)^2}} \quad (16)$$

em que \hat{y} representa o valor da permissividade normalizada obtida por simulação, μ representa a média dos valores de permissividade normalizada obtidos por simulação, y representa o valor de permissividade normalizada

obtida experimentalmente e σ representa a média dos valores de permissividade normalizada obtidos experimentalmente. Tanto o erro quadrático médio normalizado quanto a concordância são parâmetros que comparam pixel a pixel da imagem reconstruída com a imagem ideal. A taxa de erro não leva em conta a tonalidade equivalente do pixel, ou seja, ou este está 100% de acordo (tendo um erro nulo) ou não está 100% de acordo (tendo um erro absoluto naquele pixel). Já a taxa de concordância equivale a quanto aquele determinado pixel concorda em tonalidade, tendo valores mais admitidos.

Tabela 13 – Valores de erro quadrático médio normalizado e de concordância para os sensores base e otimizado utilizando os algoritmos de reconstrução LBP e LWB.

	Sensor Base		Sensor Otimizado	
	LBP	LWB	LBP	LWB
Erro	0,5753	0,5525	0,3325	0,3300
Concordância	0,7937	0,7097	0,8199	0,8373

Fonte – O autor.

Analisando-se os resultados atingidos, especialmente ao utilizar o algoritmo de Landweber, percebe-se que a imagem gerada foi muito próxima da imagem real, vistos o erro e o índice de concordância obtidos. Ao comparar a imagem gerada utilizando o sensor otimizado com aquela obtida pelo sensor não otimizado (Figura 28), nota-se visivelmente a significativa melhoria na imagem reconstruída. Um dos fatores está na presença dos chamados “artefatos” - saliências ou depressões que aparecem no plano da imagem - no sensor não otimizado, imperfeições não presentes no sensor otimizado, evidenciando que a análise e otimização de cada parâmetro de construção do sensor capacitivo se mostrou como uma ótima estratégia para melhoria da distribuição de sensibilidade, afetando positivamente a qualidade das imagens geradas.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho tratou do desenvolvimento do processo de otimização dos parâmetros geométricos de um sensor capacitivo, que influenciam diretamente no desempenho e na reconstrução da imagem de objetos dispostos no interior do sensor.

Em sua etapa inicial, realizou-se um levantamento de fundamentação teórica acerca da tomografia capacitiva elétrica, principalmente voltada aos parâmetros geométricos de construção de um sensor capacitivo, o que possibilitou a constatação da influência gerada ao variar esses parâmetros no desempenho do sensor.

Em seguida, construiu-se um sensor capacitivo não otimizado que serviu como base para as simulações e para a otimização dos parâmetros de construção do sensor capacitivo. O sensor base construído foi validado, visto a proximidade entre os valores de capacitâncias geradas pelas simulações com aquelas geradas pelas medições experimentais.

A análise de cada parâmetro de construção do sensor evidenciou que a variação desses parâmetros altera significativamente o desempenho do sensor capacitivo. Considerando os parâmetros analisados e o sensor desenvolvido, as definições iniciais para o sensor base foram consideradas “certeiras”, visto que houve somente um parâmetro otimizado dentre os 7 parâmetros avaliados. Mesmo assim, a reconstrução da imagem obtida com o sensor otimizado utilizando o algoritmo LWB apresentou uma melhoria substancial.

Este trabalho foi aplicado em uma análise estática de sólidos no interior do sensor capacitivo. Propõe-se um estudo empregado em um sistema de escoamento multifásico dinâmico, aplicando-se a mesma metodologia utilizada nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. C. **Desenvolvimento de um Sistema de Tomografia Capacitiva Para Processos Multifásicos**, 2002. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Campinas SP - Universidade Estadual de Campinas.
- BARROS, T. R. **Simulação Numérica de um Sensor de Tomografia Capacitiva para Análise de Escoamento Bifásico Ar-Água**, 2011. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Campinas SP – Universidade Estadual de Campinas.
- BECK, M. S. e WILLIAMS, R. A. **Process Tomography: a European Innovation and its Applications**, 1996.
- DONTHI, S. S. **Capacitance based Tomography for Industrial Applications**, 2004.
- MARASHDEH, Q. FAN, L. S. WARSITO, W. **Electrical Capacitance Tomography – A Perspective**, 2008.
- MOTA, F. R. M. **Tomometria Capacitiva Aplicada à Medição de Fração de Água em Escoamentos Bifásicos**, 2015. Tese de Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas. Florianópolis SC – Universidade Federal de Santa Catarina.
- OLMOS, A. M., PRIMICIA, J. A., and MARRON, J. L. F. **Simulation Design of Electrical Capacitance Tomography Sensors**, 2007.
- PENG, L. H., MOU, C. H., YAO, D. Y., ZHANG, B. F., e XIAO, D. Y. **Determination of the Optimal Axial Length of the Electrode in an Electrical Capacitance Tomography Sensor**, 2005.
- RAMANATHAN, P., ARULMOZHIVARMAN, P. e TATAVARTI, R. **Optimal Design and Fabrication Steps of Electrical Capacitance Tomography Sensors**, 2013.
- XIE, C. G., HUANG, S. M., HOYLE, B. S., TORN, R., LENN, C., SNOWDEN, D. e Beck, M. S. **Electrical Capacitance Tomography for Flow Imaging: System Model for Development of Image Reconstruction Algorithm and Design of Primary Sensors**, 1992.
- YANG, W. Q. e BYARS, M. **An Improved Normalization Approach for Electrical Capacitance Tomography**, 1999.

YANG, W. Q. e CONWAY, W. F. Measurement of Sensitivity Distributions of Capacitance Tomography Sensor, 1998.

YANG, W. Q. e LIU, S. Electrical Capacitance Tomography with Square Sensor, 1999.

YANG, W. Q. Key Issues in Designing Capacitance Tomography Sensors, 2006.

YANG, W. Q. Design of Electrical Capacitance Tomography Sensors, 2010.