

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MARIA EDUARDA SILVANO

**PROJETO, SIMULAÇÃO E FABRICAÇÃO DE UM SENSOR PARA
TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA INDUSTRIAL
APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESCOAMENTO
MULTIFÁSICO**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MARIA EDUARDA SILVANO

**PROJETO, SIMULAÇÃO E FABRICAÇÃO DE UM SENSOR PARA
TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA INDUSTRIAL
APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESCOAMENTO
MULTIFÁSICO**

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
Engenheira Mecatrônica

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

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Silvano, Maria Eduarda

Projeto, Simulação e Fabricação de um Sensor para Tomografia de Impedância Elétrica Industrial Aplicada ao Monitoramento de Escoamento Multifásico / Maria Eduarda

Silvano; orientação de Francisco Rafael Moreira da Mota. - Florianópolis, SC, 2024.

63 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 por Impedância Elétrica (TIE). 2. Simulações multifísicas. 3. Manufatura aditiva. I. Moreira da Mota, Francisco Rafael. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Projeto, Simulação e Fabricação de um Sensor para Tomografia de Impedância Elétrica Industrial Aplicada ao Monitoramento de Escoamento Multifásico.

PROJETO, SIMULAÇÃO E FABRICAÇÃO DE UM SENSOR PARA TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA INDUSTRIAL APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

MARIA EDUARDA SILVANO

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

Florianópolis, 06 de setembro, 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA**
Data: 24/09/2024 20:44:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO YUJI SAKURADA**
Data: 24/09/2024 16:46:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.
IFSC

Documento assinado digitalmente
 **VITOR FARIAS DE BORBA**
Data: 24/09/2024 16:11:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Vitor Farias de Borba, Me. Eng.
IFSC

Este trabalho é dedicado à memória de
meu pai, José Firmino Silvano.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus.

Ao meu professor/orientador Francisco Mota pela orientação, conhecimento adquirido e apoio nesta fase.

À minha família, em especial a minha mãe, pelas orações, suporte e incentivo durante a graduação.

Ao meu namorado, por estar sempre me escutando, apoiando e acreditando em mim.

À meus colegas e amigos, que estiveram presentes durante a graduação.

RESUMO

A Tomografia por Impedância Elétrica (TIE) é uma técnica de imagem não invasiva que permite a visualização da distribuição de impedância elétrica em materiais, explorando as diferenças nas condutividades elétricas entre eles. Esta técnica, ao aplicar correntes ou tensões a eletrodos na superfície de um objeto, permite a reconstrução computacional da resposta elétrica sob a forma de imagens. A TIE possui vasto potencial tanto em aplicações médicas, para diagnóstico e monitoramento de doenças sem o uso de radiação, quanto em aplicações industriais, como monitoramento de padrão de escoamento e medição de fração volumétrica. Este trabalho tem como foco o desenvolvimento e a avaliação de um sensor para TIE, visando melhorar a precisão e a confiabilidade das medições em processos multifásicos. O objetivo principal é criar um sensor eficiente utilizando simulações multifísicas e técnicas de manufatura aditiva. A metodologia incluiu uma revisão bibliográfica para fundamentar o desenvolvimento do sensor. Experimentos práticos foram conduzidos para validar as simulações e avaliar o desempenho do sensor em condições reais. Os resultados demonstraram que o sensor projetado é capaz de detectar diferenças de impedância com precisão. O estudo conclui que a combinação de simulações multifísicas com manufatura aditiva permite o desenvolvimento de um sensor TIE confiável, sugere-se a continuação do desenvolvimento com foco na otimização de parâmetros e na exploração de novos materiais e configurações de sensor para ampliar as aplicações da TIE.

Palavras-chave: Tomografia por Impedância Elétrica (TIE). Simulações multifísicas. Manufatura aditiva.

ABSTRACT

Electrical Impedance Tomography (EIT) is a non-invasive imaging technique that allows the visualization of the electrical impedance distribution in materials by exploring differences in their electrical conductivities. This technique, by applying currents or voltages to electrodes on the surface of an object, enables the computational reconstruction of the electrical response in the form of images. EIT has vast potential in both medical applications, for the diagnosis and monitoring of diseases without the use of radiation, and industrial applications, such as flow pattern monitoring and volumetric fraction measurement. This work focuses on the development and evaluation of a sensor for EIT, aiming to improve the accuracy and reliability of measurements in multiphase processes. The main objective is to create an efficient sensor using multiphysics simulations and additive manufacturing techniques. The methodology included a literature review to support the sensor's development. Practical experiments were conducted to validate the simulations and assess the sensor's performance in real conditions. The results demonstrated that the designed sensor is capable of accurately detecting impedance differences. The study concludes that the combination of multiphysics simulations with additive manufacturing enables the development of a reliable EIT sensor, and it suggests further development focused on parameter optimization and the exploration of new materials and sensor configurations to expand EIT applications.

Keywords: Electrical Impedance Tomography (EIT). Multiphysics simulations. Additive manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos padrões de escoamento bifásico água-óleo (preto-branco) em dutos horizontais. (a) estratificado. (b) estratificado ondulado, (c) estratificado ondulado separado, (d) plug disperso, (e) e (f) slug disperso, (g) e (h) anular ondulado e (i) anular liso.....	14
Figura 2 - Sistema TIE.....	16
Figura 3 - Diferença entre campo duro e campo macio. Campo duro (a) e campo macio (b).....	17
Figura 4 – Sensores para TCE (a e b) e para TIE (c).....	21
Figura 5 – Propostas para avaliação do acoplamento dos eletrodos (a) e do sensor (b).....	22
Figura 6 – Simplificação da geometria da proposta 1.....	24
Figura 7 – Simplificação da geometria da proposta 2.....	24
Figura 8 – Parametrização do modelo para proposta 1.....	25
Figura 9 – Parametrização da malha para proposta 1.....	25
Figura 10 – Malhas geradas para avaliação da influência do refinamento: (a) normal, (b) fina, (c) mais fina, (d) extrafina e (e) extremamente fina.....	26
Figura 11 – Parametrização do solver.....	27
Figura 12 – Linhas de corrente – densidade de corrente.....	27
Figura 13 – Procedimento para geração dos mapas de sensibilidade.....	28
Figura 14 – Exemplo da geração do mapa de sensibilidade para os eletrodos 4 e 5.....	29
Figura 15 - Tratamento de acetona.....	30
Figura 16- Conexão do sensor protótipo ao sistema TIE.....	31
Figura 17 - Teste de estanqueidade.....	32
Figura 18 - Validação do modelo implementado no Comsol.....	33
Figura 19 – Estrutura isolante.....	34
Figura 20 – Perfis de tensão nos eletrodos para sensores com diferentes comprimentos.....	35
Figura 21 – Observação das linhas de corrente para o sensor com 140 mm de comprimento.....	36
Figura 22 - Mapa de sensibilidade 2D, utilizando o par 1_2 como emissor e os pares receptores (a) 4_5, (b) 8_9, (c) 10_11 e (d) 15_16.....	37
Figura 24 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de um tarugo de latão.....	39
Figura 25 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de dois tarugos de metal e dois bastões de nylon.....	39
Figura 26 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de um tubo de alumínio.....	40
Figura 27 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de um tarugo de dois dutos de metal e um de bastão de nylon.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dimensionais para modelagem dos sensores.....	24
Tabela 2 – Valores de impedância para diferentes refinamentos da malha.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
EIDORS	<i>Electrical Impedance Tomography (EIT) and Diffusion based Optical Tomography</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
PVC	Policloreto de Vinila
ROI	Região de interesse
TIE	Tomografia de Impedância Elétrica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivos.....	15
1.1.1. Objetivo Geral.....	15
1.1.2. Objetivos Específicos.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. Configuração de sistemas TIE e suas aplicações.....	16
2.2. Projeto e avaliação de sensores TIE.....	18
2.2.1. Parâmetros de projeto e avaliação da sensibilidade.....	18
2.2.2. Simulação numérica.....	19
2.3. Escoamento Multifásico.....	19
3. METODOLOGIA.....	21
3.1. Restrições do projeto e modelagem CAD do sensor.....	21
3.2. Modelagem e simulação numérica das propostas de sensor.....	23
3.2.1. Modelagem e simplificação da geometria.....	23
3.2.2. Seleção e parametrização do modelo físico.....	24
3.2.3. Geração e avaliação das malhas.....	25
3.2.4. Parametrização do solver e visualização dos resultados.....	26
3.3. Avaliação da sensibilidade do sensor.....	28
3.4. Processo de fabricação dos sensores.....	29
4. RESULTADOS.....	31
4.1. Sensores fabricados.....	31
4.2. Avaliação da influência da malha e validação do modelo.....	32
4.3. Distribuição da sensibilidade.....	36
4.4. Resultados experimentais.....	37
5. CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1.INTRODUÇÃO

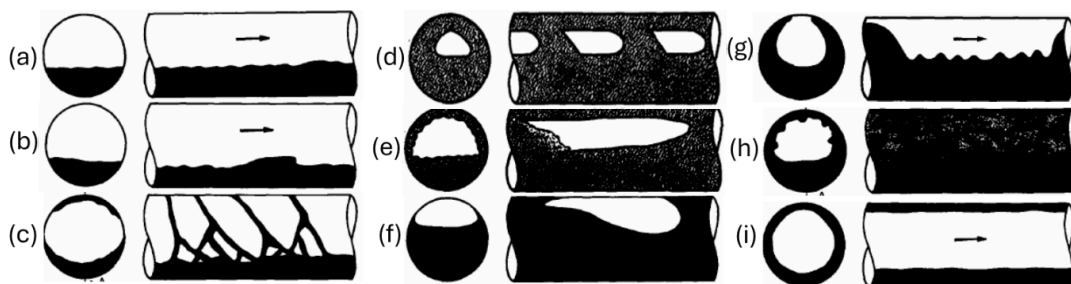
Segundo Figueiroa (2000), a crescente complexidade dos processos industriais exige a utilização de instrumentos de medição mais precisos, capazes de fornecer informações detalhadas sobre o interior de equipamentos de processo que transportam/escoam fluidos multifásicos.

Como descrito por Rosa (2012), escoamento multifásico aplica-se quando mais de uma fase está escoando simultaneamente. O autor define fase como sendo “uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que encerra em seu interior um material com composição química homogênea”. Esses escoamentos são geralmente classificados de acordo com as fases envolvidas (gás-líquido, gás-sólido, líquido-sólido, líquido-líquido) com a distribuição geométrica.

O termo utilizado para descrever a distribuição geométrica das diferentes fases presentes em escoamento é denominado Padrões ou Regime de Escoamento. A observação visual é geralmente utilizada para se distinguir tais padrões. No entanto, o conceito de padrões de escoamento é útil não somente quando se deseja caracterizar a aparência física do escoamento, mas também quando se deseja comparar dados experimentais obtidos a partir de análises em escoamentos multifásicos com aqueles já estabelecidos para um determinado padrão de escoamento (ADEDIGBA, 2007). Os padrões são determinados pelas propriedades físicas das fases (massa específica, tensão superficial, por exemplo) e pelas características dinâmicas do escoamento (fração volumétrica e velocidade de cada fase). A Figura 1 representa diferentes padrões observados no escoamento bifásico água-óleo.

O monitoramento de escoamentos multifásicos é realizado por equipamentos denominados Medidores Multifásicos (MF). Os parâmetros geralmente monitorados são a fração volumétrica (relacionada diretamente com o padrão de escoamento) e a vazão de cada fase (HEWITT e FALCONE, 2009). Desta maneira os MF foram concebidos para a medição não intrusiva (sem influenciar as características do escoamento) do escoamento simultâneo de duas ou mais fases, sem a necessidade de separação. Os MF são geralmente compostos por um aglomerado de sensores responsáveis pelo monitoramento de diferentes parâmetros do escoamento; por exemplo, um MF pode ser composto por um sensor de medição de fração e um medidor de velocidade; dessa forma, a combinação dos valores medidos de fração e velocidade podem ser utilizados para compor uma estimativa da vazão volumétrica de cada fase.

Figura 1 - Classificação dos padrões de escoamento bifásico água-óleo (preto-branco) em dutos horizontais. (a) estratificado, (b) estratificado ondulado, (c) estratificado ondulado separado, (d) *plug* disperso, (e) e (f) *slug* disperso, (g) e (h) anular ondulado e (i) anular liso.



Fonte: Adaptado de Paladino (2005).

Os sensores baseados em propriedades elétricas (resistividade, condutividade, permissividade, etc) têm se destacado em aplicações de monitoramento de padrão de escoamento e medição de fração volumétrica. Os sistemas de Tomografia de Impedância Elétrica são exemplos de equipamentos utilizados com sucesso para tal fim. Esta técnica de tomografia envolve o imageamento de uma região de interesse (interior de um sensor), a partir da injeção de corrente elétrica através de um par de eletrodos dispostos na periferia do sensor e a medição das diferenças de potenciais elétricos entre outros pares de eletrodos (posicionados também na periferia do sensor). A partir da resposta à excitação, estima-se a distribuição de condutividades no interior do sensor; e, a partir de tal distribuição, pode-se estimar o padrão de escoamento e a fração volumétrica das fases.

A reconstrução de imagens deste tipo de tomografia envolve um problema de resolução inversa não-linear, mal-posto e mal-condicionado, tornando o resultado obtido bastante dependente dos parâmetros geométricos (ou de projeto) do sensor. Por exemplo, a quantidade, o tamanho e o espaçamento dos eletrodos são parâmetros que influenciam diretamente na qualidade das imagens reconstruídas e, conseqüentemente, nos valores estimados de fração volumétrica.

Dessa forma, neste trabalho, foi proposto, a partir de um conjunto de especificações e restrições, o projeto de um sensor cilíndrico com 16 eletrodos com características dimensionais que permite o seu acoplamento a uma tubulação de 4 polegadas. Os softwares Fusion, Comsol e Matlab foram utilizados para modelagem CAD, modelagem e simulação numérica e controle do sistema de aquisição, respectivamente. Um protótipo do sensor foi fabricado em ABS, utilizando a tecnologia de impressão 3D. Resultados de simulação e experimentais obtidos em uma bancada de laboratório permitiram avaliar o desempenho do sistema.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver um sensor para compor um sistema de Tomografia de Impedância Elétrica que será utilizado para o monitoramento de escoamento multifásico.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. utilizar um *software* de modelagem e simulação multifísica para avaliar o desempenho do projeto do sensor para tomografia elétrica;
2. fabricar, utilizando tecnologia adequada, um protótipo do sensor para aplicações de tomografia elétrica em escoamento multifásico;
3. avaliar, experimentalmente, o desempenho/qualidade das medições obtidas utilizando o sensor fabricado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Configuração de sistemas TIE e suas aplicações

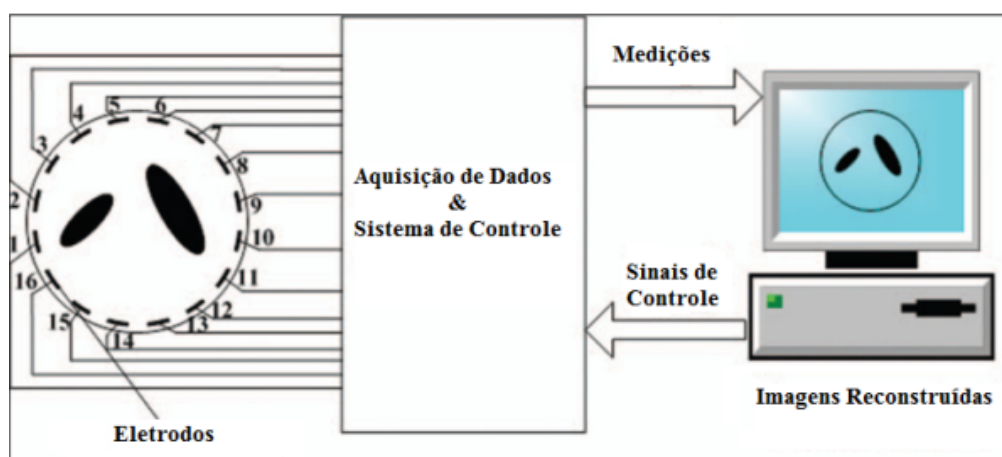
A Tomografia de Impedância Elétrica (TIE) é um método de obtenção de imagens baseado em medidas da impedância elétrica, quando realizadas na superfície de um objeto de interesse. Esse método tem sido estudado desde a década de 1970, quando as primeiras aquisições de dados foram efetuadas. (MORO E PORTO, 2016).

De acordo com Silva, M. J. (2008), os sensores de impedância operam com base nas propriedades dielétricas dos materiais que compõem o fluxo. Quando uma corrente alternada é aplicada, a impedância do circuito depende da permissividade dos materiais presentes. Diferentes fases em um fluxo multifásico, como gás, líquido e sólido, terão diferentes permissividades, permitindo que o mesmo detecte e meça a proporção de cada fase.

Um sistema TIE é construído com base em um sensor, um sistema de coleta de dados e um algoritmo de reconstrução de imagem, que são conhecidos como os três elementos-chave de um sistema de tomografia. O objetivo do dispositivo de medição é detectar diferenças de impedância elétrica e convertê-las em concentração. A medição da impedância na fase dispersa em um fluxo multifásico é transformada em um sinal elétrico nos eletrodos, que é a principal entrada do sistema de coleta de dados. (VILAR et al., 1996)

Isto é, um sistema TIE é composto por um sensor de impedância, um circuito para excitação, chaveamento, aquisição de dados e condicionamento de sinais e um computador contendo um software responsável pelo controle de chaveamento dos eletrodos, análise dos dados e reconstrução da imagem.

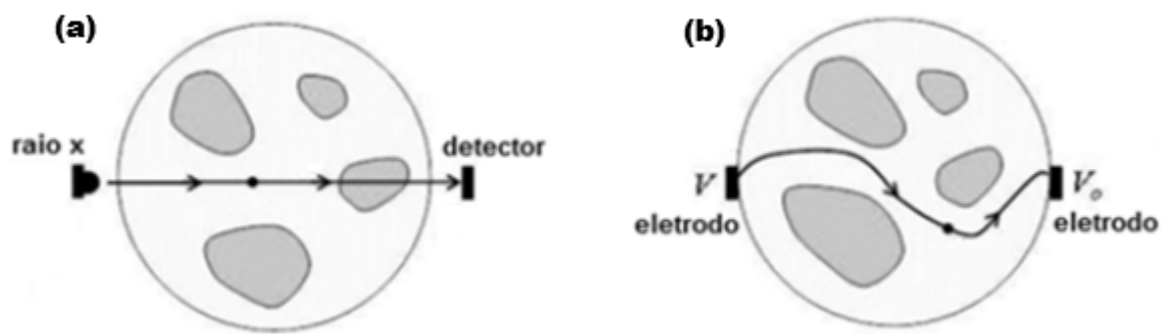
Figura 2 - Sistema TIE



Fonte: Rocha(2019).

Corroborando com a ideia de Rocha(2019), a tomografia pode ser comumente dividida em campo duro (hard field) e campo macio (soft field). No campo duro, uma fonte emite raios X, que são detectados na extremidade oposta do tomógrafo após terem sido atenuados ao atravessar o material. Esses feixes se propagam em linha reta, e a absorção em uma parte do material pode ser independente da absorção em outra, caracterizando um problema de tomografia linear. Por outro lado, no campo macio, a atenuação de um campo elétrico em qualquer ponto do material depende da distribuição das propriedades elétricas em todo o sensor, fazendo com que o potencial elétrico medido seja uma função não-linear dessa distribuição, o que torna o problema mais complexo de resolver.

Figura 3 - Diferença entre campo duro e campo macio. Campo duro (a) e campo macio (b).



Fonte: Rocha (2019).

Aplicações práticas incluem o uso da tomografia por impedância elétrica em indústrias para a visualização de escoamentos bifásicos, os quais podem ocorrer de forma natural ou acidental. Um exemplo disto, é a detecção de bolhas de ar que surgem subitamente em escoamentos, como mostra o estudo de (KIM et al., 2001) em reatores nucleares. Além disso, a técnica é utilizada em processos da indústria química, onde diversos equipamentos operam com escoamentos bifásicos ou necessitam detectar contaminações, bem como em indústrias de produção, para monitorar o fluxo de materiais e produtos de uma fábrica.

Na pesquisa de Djamdji et al. (1996) foi utilizado uma abordagem pelo método da TIE através de matriz planar para caracterização de pastilhas semicondutoras e filmes condutores finos. Neste tipo de aplicação é essencial para a fabricação das pastilhas semicondutoras que as propriedades eletrônicas e a uniformidade da espessura das camadas condutoras sejam mantidas, pois afetam diretamente as características eletrônicas e o desempenho dos dispositivos.

Vilhunen et al. (2002) propuseram em seu trabalho o uso da TIE para detectar falhas em revestimentos resistivos, motivados por melhorar o tempo em testes de controle de qualidade em implantes, como, por exemplo, revestimento de diamante em endopróteses, onde pode ocorrer o depósito de partículas estranhas ou porosidades que são críticos para a durabilidade das próteses.

O estudo de Aristovich et al. (2014) utiliza eletrodos planares intracranianos em escala microscópica para análise de atividade neuronal. Com simulações realizadas com o cérebro de ratos como base, o estudo tem foco na particular solução do problema de reconstrução da imagem cerebral submetida a rápidos estímulos na atividade neural do hipocampo.

2.2. Projeto e avaliação de sensores TIE

2.2.1. Parâmetros de projeto e avaliação da sensibilidade

A determinação de parâmetros em escoamentos bifásicos é essencial para a indústria, tornando o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem medições e estimativas cada vez mais precisas e econômicas de uma área de grande interesse.

Danés (2012) ressaltou como a escolha dos parâmetros em sensoriamento de escoamentos bifásicos é crucial para garantir a precisão das medições. Em sua pesquisa, ele utilizou um sensor de impedância para medir a velocidade média e a vazão de um fluxo bifásico, destacando a importância desses parâmetros na obtenção de resultados confiáveis

Na tese de Mota (2015), oferece solução prática e eficiente para a medição da fração volumétrica de água em escoamentos bifásicos de óleo e água. Ao tratar sobre os parâmetros como espessura e material do sensor, apresenta que o material deve ser isolante, pois a permissividade relativa do material e a espessura do duto influenciam na distribuição de sensibilidade deste. O espaçamento e o número de eletrodos podem impactar diretamente a aquisição de dados e qualidade de imagens.

De acordo com Barros (2011), o número e o tamanho dos eletrodos dependem das aplicações, pois com um maior número de eletrodos é possível uma melhor resolução, mas, em contrapartida, a sensibilidade das medidas será menor devido ao tamanho reduzido dos eletrodos.

Na pesquisa de Peng et al.(2012), investigaram o impacto do número de eletrodos na resolução de imagens reconstruídas através de uma comparação de dados obtidos de sensores com diferentes configurações de eletrodos 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 32. Constatou-se que a sensibilidade entre eletrodos adjacentes permanece relativamente constante

independentemente do aumento no número de eletrodos. No entanto, para pares de eletrodos opostos, o aumento no número de eletrodos resulta em uma diminuição significativa da sensibilidade.

Na análise de Pacheco(2018), mostra como os parâmetros geométricos, material e espessura da parede do duto, comprimento e largura dos eletrodos, influenciam na distribuição de sensibilidade no sensor.

2.2.2. Simulação numérica

O COMSOL permite a definição de geometrias, propriedades de materiais e físicas que descrevem fenômenos específicos (COMSOL, 2024). O COMSOL pode ser integrado com o software MATLAB que possui uma linguagem de programação para realizar análises complexas e processamento de dados dos resultados obtidos nas simulações do COMSOL.

O COMSOL com a sua capacidade de comunicar-se diretamente com o MATLAB, facilita o cálculo das matrizes de sensibilidade. Essa integração permite que o MATLAB realize iterações que modificam a localização dos pixels e seleciona os eletrodos emissores/receptores diretamente do código, tornando o processo mais eficiente e automatizado.

Mota (2015) explora a Tomometria Capacitiva Elétrica, para a avaliação da influência devido à variação dos parâmetros de projeto sobre a distribuição da sensibilidade dos sensores capacitivos, fez-se uso do pacote comercial de simulação. Além disso, obteve-se resultados com o COMSOL integrado ao MATLAB como valores de capacitância e matriz de sensibilidade.

No estudo de Figueiroa(2000), utilizou-se o software MATLAB para solucionar o problema proposto, apresentando funções prontas direcionadas ao cálculo numérico e a possibilidade de gerar gráficos que possibilitaram a análise dos resultados.

2.3. Escoamento Multifásico

De acordo com Danés (2012), o escoamento multifásico é definido como qualquer fluido que contenha mais de uma fase ou componente. No entanto, o termo exclui situações em que os componentes estão misturados em nível molecular ou próximo deste nível. Assim, permanecem apenas as situações em que as moléculas de cada componente se agrupam em número suficiente para formar ao menos uma fase, resultando em diferentes tipos de escoamentos, como o trifásico e os bifásicos (líquido-sólido, gás-sólido e gás-líquido).

Para Hewitt e Falcanone (2009), cada fase possui propriedades físicas distintas, como densidade e viscosidade, que influenciam o comportamento do escoamento. Essas diferenças resultam em padrões de escoamento, que podem variar dependendo das condições operacionais, como velocidade do fluido e fração volumétrica das fases.

Segundo Paladino (2005), os principais padrões de escoamento incluem o escoamento em bolhas, onde pequenas bolhas de gás se dispersam no líquido, o escoamento estratificado, com fases separadas em camadas distintas, e o escoamento em anular, onde uma fase líquida escoar pelas paredes formando um anel fino e o gás escoar pelo centro do duto. A compreensão desses padrões é crucial para a modelagem e a simulação eficazes de escoamentos multifásicos.

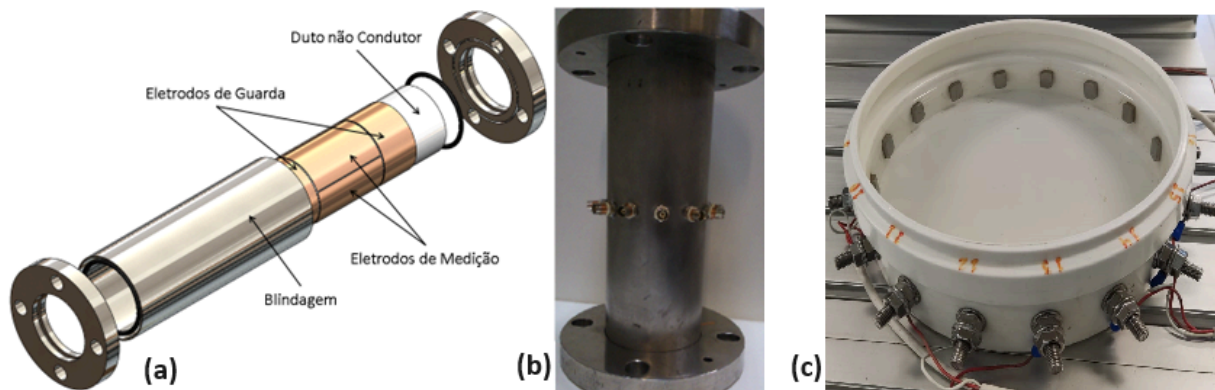
Segundo Adedigba (2007), a investigação sobre o escoamento bifásico em tubos helicoidais horizontais revelou que esse tipo de configuração pode diminuir problemas como o *slugging* severo, comum em sistemas de produção nas águas profundas do mar. Sua pesquisa demonstrou que os tubos helicoidais favorecem o escoamento em bolhas, reduzindo a instabilidade do fluxo em comparação com tubos retos, o que é particularmente vantajoso para a indústria de petróleo e gás, onde a estabilidade do escoamento é essencial para a eficiência e segurança operacional.

3. METODOLOGIA

3.1. Restrições do projeto e modelagem CAD do sensor

As especificações e restrições para o projeto surgiram a partir de observações feitas em sensores já fabricados em trabalhos anteriores. Pode-se observar, na Figura 4, dois sensores fabricados durante a execução de projetos de pesquisa realizados no IFSC e UFSC. A Figura 4(a) e (b) é um sensor para Tomografia de Capacitância Elétrica (TCE); e, na Figura 4(c), um sensor para Tomografia de Impedância Elétrica. Como pode-se observar, no sensor para TCE, os eletrodos são acoplados na parede externa do duto onde escoará o fluxo multifásico; esta característica facilita consideravelmente o projeto, pois os eletrodos não estão em contato com o fluido. No entanto, nos sensores para TIE, os eletrodos estão em contato com o fluido, permitindo, assim, a passagem de corrente elétrica; esta condição, dificulta a fabricação destes sensores.

Figura 4 – Sensores para TCE (a e b) e para TIE (c).



Fonte: Elaboração própria (2024).

Pensando em reproduzir as melhores características dos sensores já fabricados, foram adotadas as seguintes restrições para a execução do projeto do sensor para monitoramento de escoamentos multifásicos:

- adaptação de parafusos comerciais de aço inoxidável do tipo T (retangular filetado, “cabeça de martelo”). Este tipo de parafuso foi utilizado como eletrodo no projeto da Figura 4(c);
- utilização de 16 eletrodos;
- utilização de anéis de borracha (*o-rings*) para realizar o acoplamento do sensor à tubulação de fluxo multifásico;
- acoplamento dos eletrodos de maneira a garantir a característica de não invasão

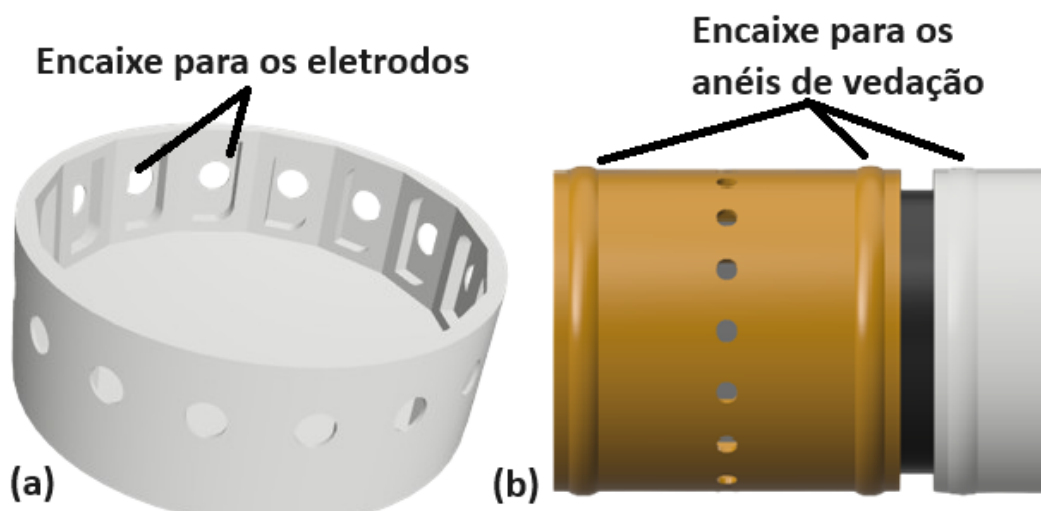
da região interna do sensor;

- parametrização do diâmetro interno do sensor de acordo com valores observados em dutos comerciais. Adotou-se o valor de 4 polegadas.

A partir das restrições, foram modelados, no *software* Fusion, duas propostas de sensores: uma para avaliação do acoplamento dos eletrodos (proposta 1 – PR1, Figura 5(a)) e outra para avaliação do acoplamento do sensor na tubulação (proposta 2 – PR2, Figura 5(b)). A PR2 possui *o-ring* em ambas as extremidades, e sua base sendo uma tampa comercial de cano PVC, que também inclui *o-ring* para vedação como mostrado na modelagem na figura 5(b). As duas propostas possuem paredes projetadas para acomodar (encaixe) os eletrodos rente à parede interna, garantindo que não haja invasão da região de interesse (ROI).

Na Tabela 1 estão dispostas as informações dimensionais de cada proposta. As folhas de projeto podem ser consultadas no Apêndice A.

Figura 5 – Propostas para avaliação do acoplamento dos eletrodos (a) e do sensor (b).



Fonte: Elaboração própria (2024).

Tabela 1 – Parâmetros dimensionais para modelagem dos sensores.

Parâmetro	Proposta 1	Proposta 2
Diâmetro interno	102.5 mm	103 mm
Diâmetro externo	115 mm	115 mm
Comprimento	40 mm	140 mm
Encaixe para o eletrodo	10,48x4,45x23,22 mm	10,48x4,45x23,22 mm
Furo para o eletrodo	M8	M8

Fonte: Elaboração própria (2024).

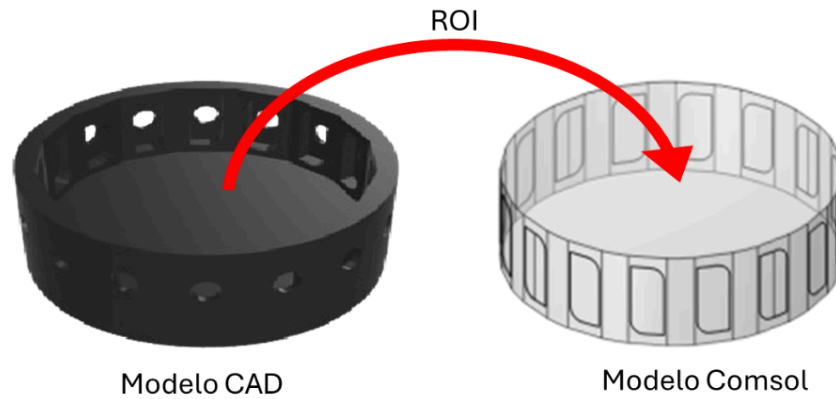
3.2. Modelagem e simulação numérica das propostas de sensor

Para avaliar o desempenho das propostas de projeto de sensor, utilizou-se o *software* de modelagem e simulação multifísica Comsol. Neste software o problema pode ser resolvido em cinco etapas: modelagem e simplificação da geometria; seleção e parametrização do modelo físico; discretização dos domínios (geração de malhas); parametrização do *solver* e visualização dos resultados. Todos os experimentos de simulação foram realizados utilizando um computador HP Z200 Workstation que possui um processador Intel Xeon CPU E3-1225 V2 @ 3,2GHz e 16 Gb de RAM.

3.2.1. Modelagem e simplificação da geometria

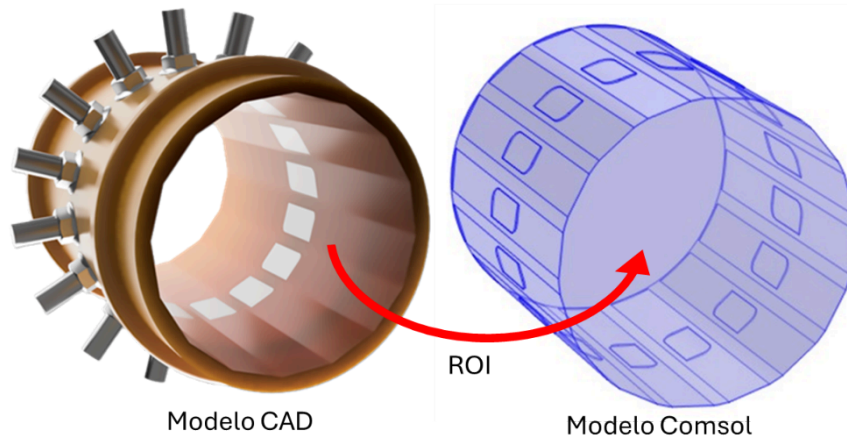
Para realização da simulação no Comsol, as geometrias das propostas 1 e 2 podem ser simplificadas. Uma vez que a parede do duto é isolante, considera-se que não haverá passagem de corrente elétrica nessa fronteira e, sendo assim, a parede pode ser retirada do modelo CAD. Em outras palavras, no Comsol, basta modelar a região interna do duto (região de interesse - ROI). As Figuras 6 e 7 representam essa simplificação.

Figura 6 – Simplificação da geometria da proposta 1.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 7 – Simplificação da geometria da proposta 2.



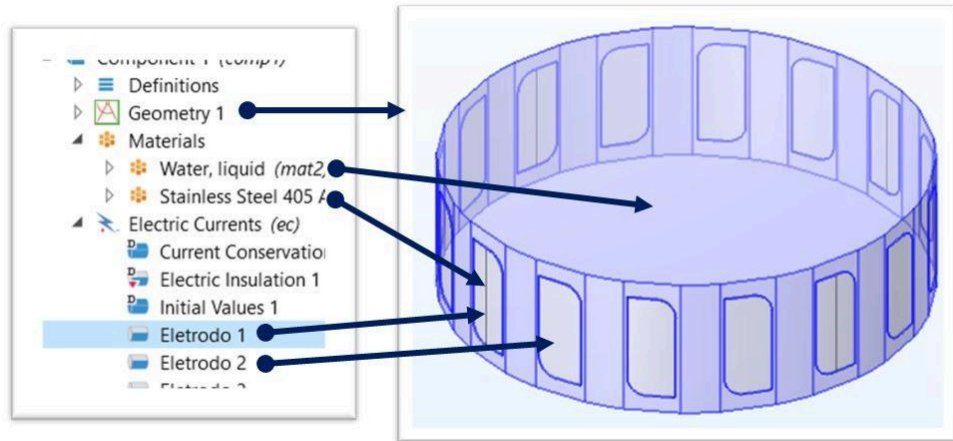
Fonte: Elaboração própria (2024).

3.2.2. Seleção e parametrização do modelo físico

No Comsol, uma vez criada a geometria e seus domínios, pode-se atribuir-lhes propriedades físicas de acordo com o problema que se deseja resolver. Neste trabalho, como o objetivo é simular um sensor de impedância elétrica, foi utilizado o módulo AC/DC *Electric Currents* do Comsol; e as propriedades físicas atribuídas são: condutividade elétrica (σ) e permissividade elétrica (ϵ). Esse módulo permite a solução de problemas eletrostáticos com condições de contorno (excitação de sinal elétrico e estimação de potencial elétrico) que se assemelham com a realidade. Como pode-se observar na Figura 8, a geometria da proposta 1 foi dividida em 17 domínios: um domínio que representa a ROI (em azul) e dezesseis domínios que representam os eletrodos (em cinza). Ao domínio ROI foi atribuída as propriedades elétricas da água líquida ($\sigma = 0,77 \text{ S/m}$ e $\epsilon = 80$); e para os eletrodos, as do aço inoxidável ($\sigma = 1,74 \text{ MS/m}$ e $\epsilon = 1$). Os eletrodos foram modelados como terminais

aos quais pode ser atribuído um valor de corrente ou tensão elétrica. Para a geometria da proposta 2, utilizou-se a mesma parametrização atribuída à geometria da proposta 1.

Figura 8 – Parametrização do modelo para proposta 1.

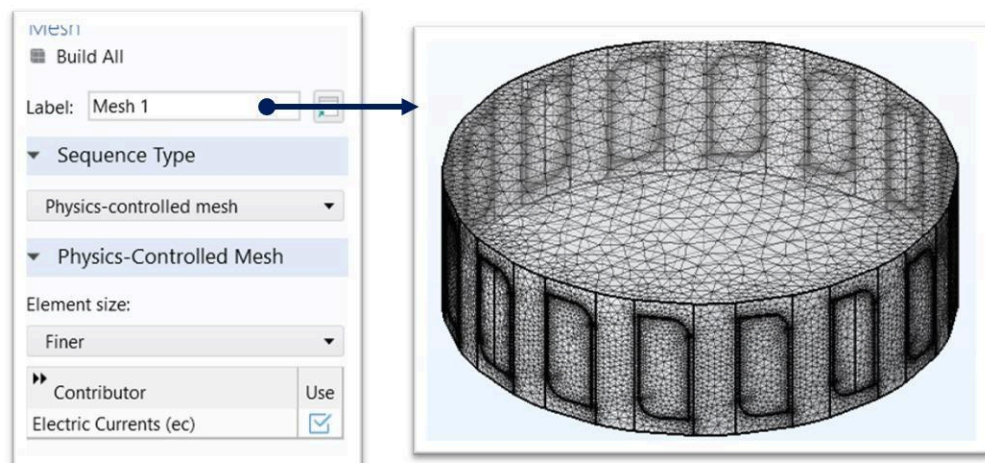


Fonte: Elaboração própria (2024).

3.2.3. Geração e avaliação das malhas

Em simulações numéricas, o sucesso dos resultados obtidos e o tempo necessário para obtê-los está diretamente relacionado a qualidade da malha empregada. O Comsol disponibiliza uma interface amigável e modelos pré-definidos de malha que se ajustam ao tipo de problema físico que se deseja simular. O software disponibiliza, ainda, 9 tipos de refinamento (tamanho de malha/elementos). Na Figura 9, pode-se observar a malha gerada para a proposta 1, considerando o modelo pré-definido (*physics-controlled mesh*) e o tamanho de elemento *finer*.

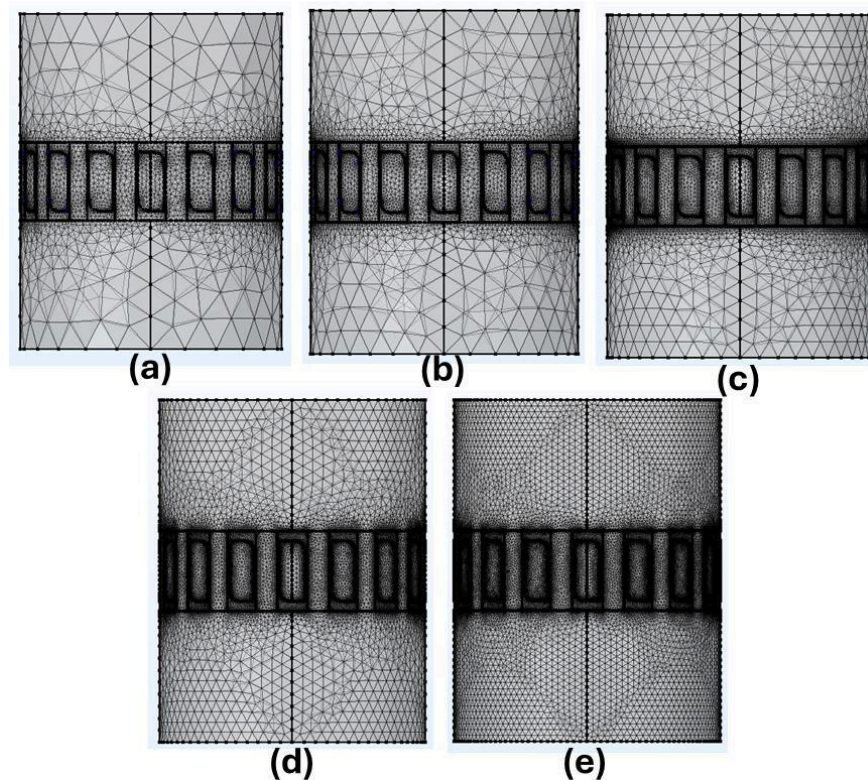
Figura 9 – Parametrização da malha para proposta 1.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Para avaliar a influência do refinamento no resultado quando utilizada proposta 2, foram geradas cinco malhas (Figura 10) com tamanhos de elementos diferentes: normal, fina, mais fina, extrafina e extremamente fina. Sendo que uma malha menos refinada consegue obter resultados satisfatórios com um menor tempo de simulação.

Figura 10 – Malhas geradas para avaliação da influência do refinamento: (a) normal, (b) fina, (c) mais fina, (d) extrafina e (e) extremamente fina.

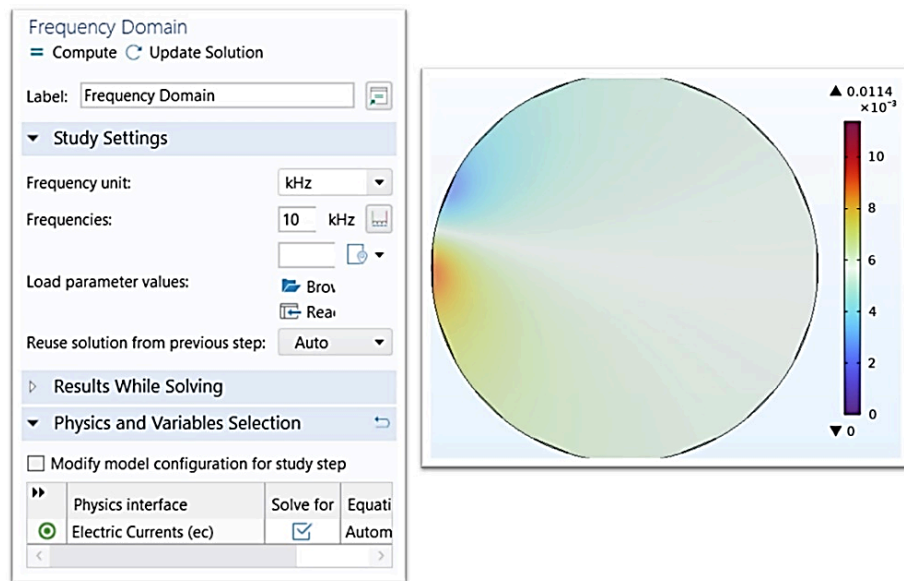


Fonte: Elaboração própria (2024).

3.2.4. Parametrização do *solver* e visualização dos resultados

O passo final para visualizar os resultados de simulação consiste na parametrização do *solver*. O Comsol disponibiliza, no Módulo AD/DC, a possibilidade de resolver o problema eletrostático no domínio da frequência (fixa ou variável). Neste trabalho, adotou-se a frequência fixa de 10kHz; a mesma parametrizada no *hardware* TIE que foi utilizado para avaliar os sensores fabricados. Na Figura 11, pode-se observar a parametrização utilizada no *solver* e a distribuição do potencial elétrico resultado da solução numérica do problema.

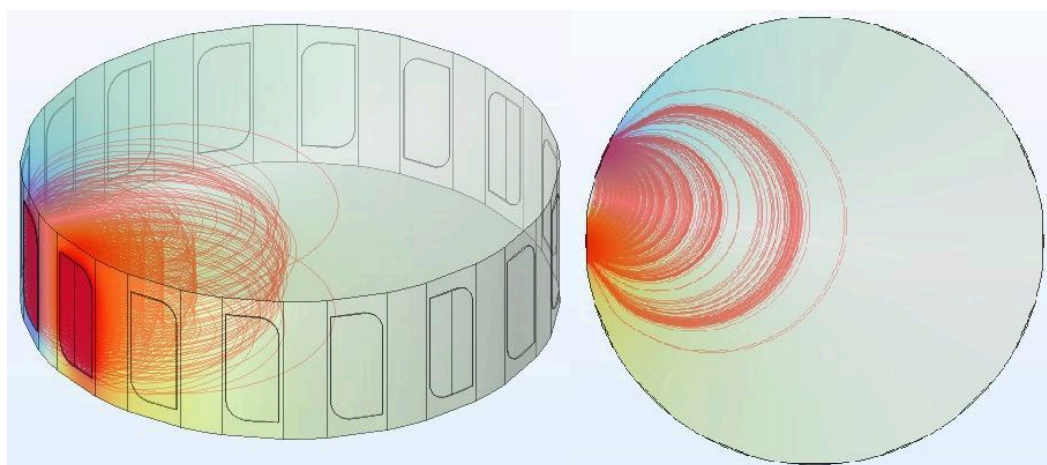
Figura 11 – Parametrização do *solver*.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Além da distribuição do potencial elétrico na ROI, o Comsol também permite a visualização de linhas corrente (densidade de corrente), facilitando, assim, a visualização de regiões com alta e/ou baixa concentração de campo elétrico (Figura 12). Os valores de tensão, corrente e impedância na fronteira da ROI (terminais/eletrodos) podem ser facilmente obtidas, utilizando funções proprietárias do Módulo AC/DC.

Figura 12 – Linhas de corrente – densidade de corrente.



Fonte: Elaboração própria (2024).

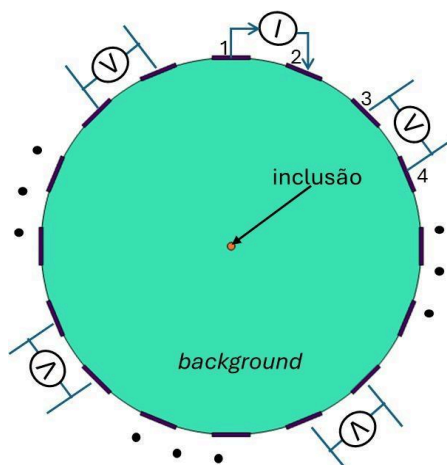
3.3. Avaliação da sensibilidade do sensor

A sensibilidade em sensores de tomografia elétrica pode ser definida como a capacidade do sensor “sentir” objetos (inclusões) na ROI. Como a distribuição de potencial e densidade de corrente não é uniforme (ver Figuras 13 e 14), a sensibilidade do sensor é afetada pela posição (e tamanho) da inclusão. Uma maneira de avaliar a sensibilidade é por meio da geração de imagens (Mapas de Sensibilidade) que representam a relação entre os diferentes valores de tensão em um par de eletrodos e a posição de uma pequena inclusão. Conhecendo-se os valores de σ e ϵ do *background* (ROI sem inclusões) e da inclusão, pode-se, numericamente, avaliar a resposta do sensor para n (píxeis) posições desse objeto na ROI.

Na Figura 13, pode-se observar o procedimento para a geração do mapa de sensibilidade. Os eletrodos 1 e 2 são utilizados para injetar corrente (par emissor) na ROI; os demais pares adjacentes (pares receptores, 3 e 4, 4 e 5, 5 e 6, ..., 15 e 16) são utilizados para medição de tensão. Este procedimento é repetido para n posições da inclusão. Neste trabalho, utilizou-se o software Matlab para, em conjunto com o Comsol, automatizar a geração dos mapas.

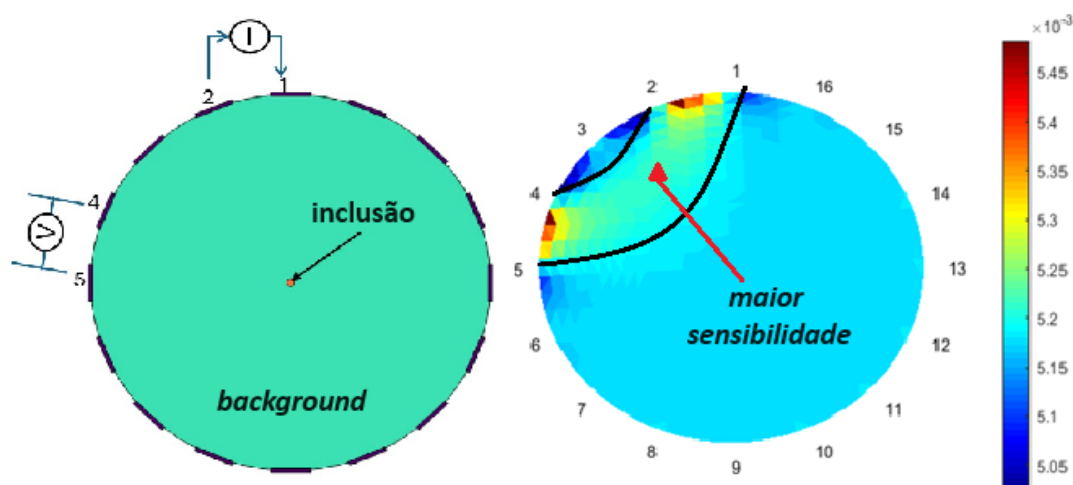
Como exemplo, a Figura 14 representa o mapa de sensibilidade gerado quando os eletrodos 1 e 2 são utilizados como par emissor e os eletrodos 4 e 5, como receptores. Nota-se que os maiores valores de tensão medidos no par 3 e 4 são obtidos quando a inclusão foi posicionada próximo aos eletrodos emissores e receptores e na região contornada.

Figura 13 – Procedimento para geração dos mapas de sensibilidade.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 14 – Exemplo da geração do mapa de sensibilidade para os eletrodos 4 e 5.



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.4. Processo de fabricação dos sensores

A maioria das tecnologias convencionais de manufatura (processos de usinagem, por exemplo) envolvem considerável desperdício da matéria prima. Ao contrário dos processos com remoção de material, a manufatura aditiva (AM) ou impressão 3D compreende um processo no qual várias camadas de material são depositadas nos planos X-Y sucessivamente uma sobre a outra, gerando o plano Z. A maior vantagem da AM é a capacidade para fabricar objetos com geometria complexa em um tempo de produção relativamente baixo.

Neste trabalho, a estrutura (recipiente e duto isolante) das propostas 1 e 2 foram fabricados por impressão 3D com filamento ABS (do inglês *acrylonitrile butadiene styrene*). A impressora utilizada foi o modelo GT Max, parametrizada para executar a fabricação com preenchimento de 30%.

Os 16 eletrodos, que são parafusos T (“cabeça de martelo”) de aço inoxidável de seção retangular filetada, foram fixados (encaixados) na estrutura isolante. Além do encaixe por pressão (ou interferência), utilizou-se uma cola para vedação para prevenir vazamentos. Para aumentar a impermeabilidade das estruturas, realizou-se um tratamento com acetona, que ajuda a criar uma superfície lisa para o ABS, evitando infiltrações de líquidos. O tratamento foi realizado com a colaboração da técnica responsável pelo laboratório de química do IFSC, onde a peça impressa foi enclausurada em um recipiente com acetona por um período aproximado de 15 minutos, Figura 15. Após o tratamento, a peça passou por um processo de

secagem ao ar livre, necessário para permitir que a peça, ainda amolecida ao sair do tratamento, endurecesse novamente.

Figura 15 - Tratamento de acetona.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4. RESULTADOS

4.1. Sensores fabricados

Foram fabricados dois sensores para realização dos testes, o sensor base (proposta 1) e o sensor protótipo (proposta 2). Para conectá-los ao sistema TIE foram utilizados cabos de silicone 3x24 AWG 600V com terminais do tipo olhal (conectados ao parafuso-eletrodo) e do tipo ilhós tubular para a conexão na *protoboard*, Figura 16. Realizou-se o teste de continuidade entre as ponteiros do cabo após a montagem do sensor na *protoboard*.

Figura 16- Conexão do sensor protótipo ao sistema TIE.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Também se realizou um teste para ver se ocorreria infiltrações e/ou vazamentos, deixando os sensores com água durante 72 horas. Na Figura 17, pode-se observar a proposta 1 durante o teste de estanqueidade. Constatou-se que não ocorreram infiltrações e nem vazamentos. O mesmo procedimento foi repetido para a proposta 2.

Figura 17 - Teste de estanqueidade.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.2. Avaliação da influência da malha e validação do modelo

Como apontado na Subseção 3.2.3, a avaliação da malha de discretização é passo indispensável quando se deseja resolver um problema físico, utilizando simulação numérica. Para tanto, seguindo os procedimentos e parametrizações apontados na Seção 3.2, a resposta do sensor protótipo foi avaliada considerando cinco diferentes refinamentos de malha. O par de eletrodos 1_2 foi utilizado como emissor e os pares 3_4 (mais próximo da fonte) e 8_9 (mais distante da fonte), como receptores. Na Tabela 2, pode-se observar os valores de impedância (módulo) estimados. De acordo com os resultados, há pouca ou nenhuma variação de impedância. Também foi observado o tempo de processamento para a finalização da simulação; como esperado, quanto mais refinada a malha, mais tempo decorrerá para a finalização da simulação. Buscando um equilíbrio entre precisão e tempo de simulação, optou-se por utilizar a malha fina (160.131 elementos e 12 segundos de processamento) em todas as demais simulações.

A modelagem numérica é uma ferramenta que tem ajudado a compreender e dimensionar os mais diversos tipos de equipamentos. Porém, esses modelos só podem ser considerados válidos quando a comparação destes resultados com resultados experimentais apresente determinado grau de concordância, estabelecido conforme o grau de detalhe que se necessita para compreensão dos fenômenos de interesse. (Mota, 2015, p.59)

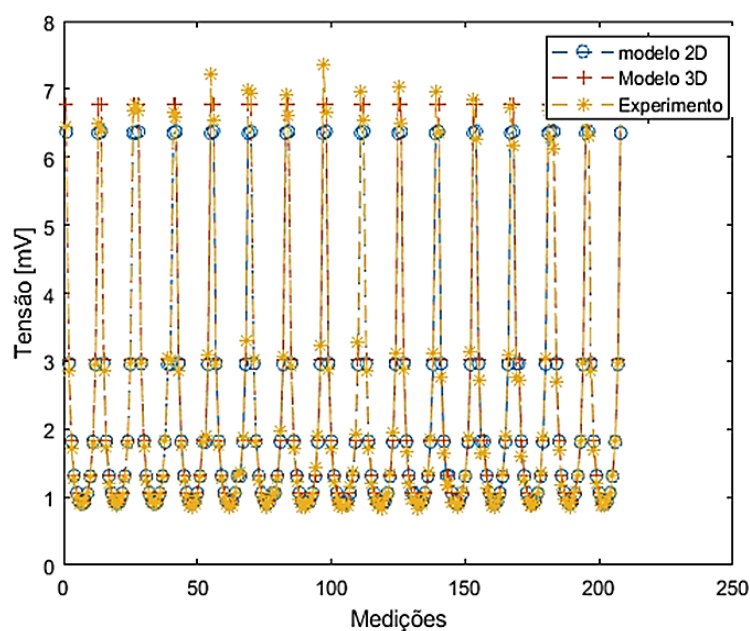
Tabela 2 – Valores de impedância para diferentes refinamentos da malha.

$Z_{elec} [\Omega]$	Refinamento				
	Normal	Fina	Mais fina	Extra fina	Extremamente fina
Z_{3-4}	2,988	2,99	2,99	2,989	2,99
Z_{8-9}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
n° elem.	103.028	160.131	399.200	991.520	3.360.174
Tempo [s]	9	12	25	54	183

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para a validação do modelo implementado no Comsol-Matlab, os resultados de simulação foram comparados com os resultados experimentais obtidos utilizando o sistema TIE e o sensor base. No experimento, o sensor base foi preenchido com água salina ($\sigma \cong 0,77 S/m$) e excitado por uma corrente alternada (0,58 mA @10 kHz). Na Figura 18, pode-se observar o perfil de medição estimado e experimental. Nota-se boa concordância entre os valores medidos e simulados, principalmente para as tensões medidas nos eletrodos mais distantes da fonte (eletrodos emissores).

Figura 18 - Validação do modelo implementado no Comsol.

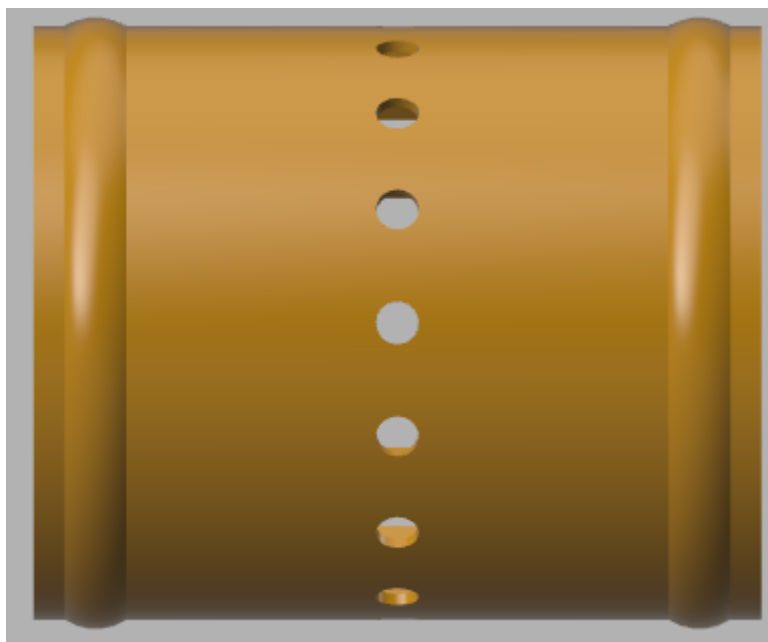


Fonte: Elaboração própria (2024).

Como o sensor proposto foi projetado de maneira tal a permitir o seu acoplamento a uma tubulação, decidiu-se avaliar a influência do comprimento da estrutura isolante (figura 19) nos valores de tensão (medidos nos eletrodos) e no espalhamento das linhas de corrente. Na Figura 20, pode-se observar os perfis de tensão para sensores com diferentes comprimentos. Nota-se que ao aumentar o comprimento do sensor, os valores de tensão nos eletrodos diminuem; esse efeito fica mais evidente para os pares de eletrodos distantes da fonte (par emissor). No entanto, percebe-se que a diferença entre os valores medidos são praticamente os mesmos para os sensores com 120 e 140 mm de comprimento.

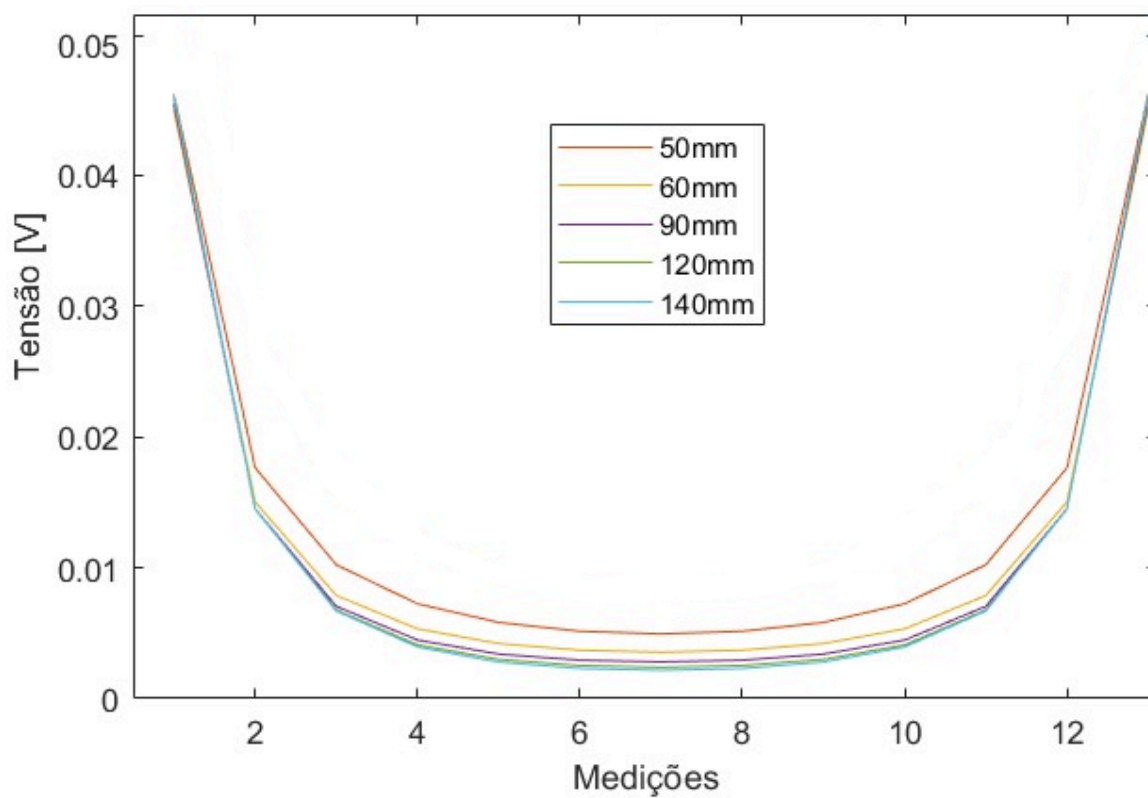
O sensor protótipo foi fabricado com o comprimento de 140 mm, garantindo assim, como pode-se observar na Figura 21, o completo desenvolvimento das linhas de corrente.

Figura 19 – Estrutura isolante.



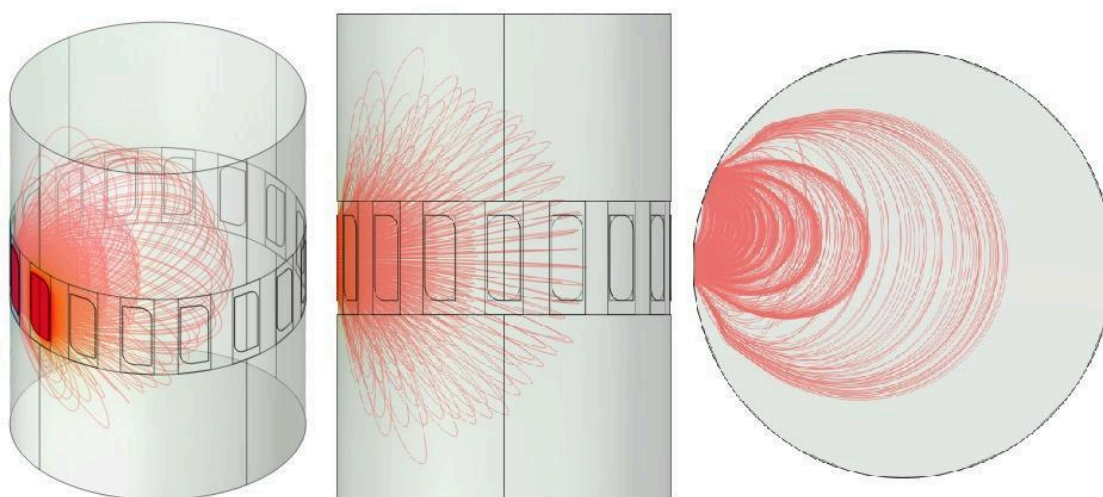
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 20 – Perfis de tensão nos eletrodos para sensores com diferentes comprimentos.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 21 – Observação das linhas de corrente para o sensor com 140 mm de comprimento.

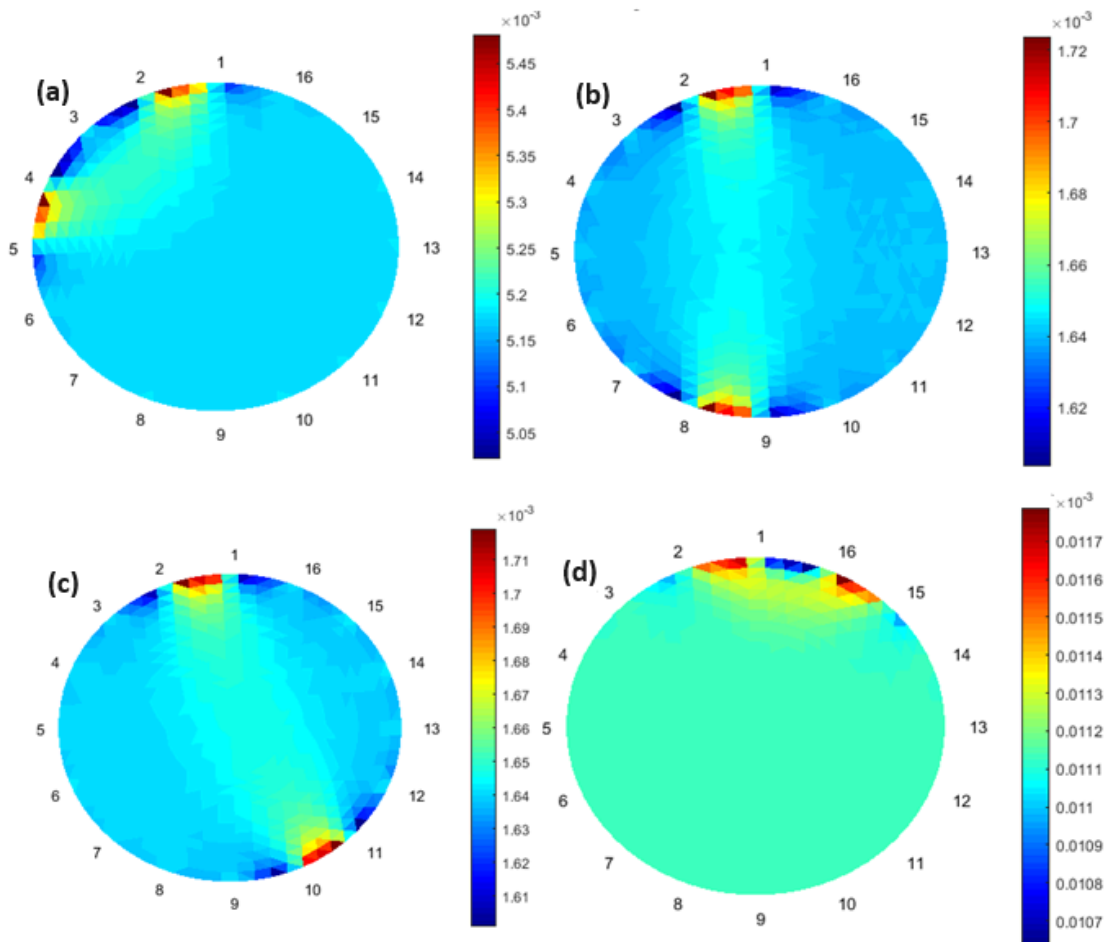


Fonte: Elaboração própria (2024).

4.3. Distribuição da sensibilidade

Como apontado na Seção 3.3, a avaliação da distribuição de sensibilidade na ROI é uma estratégia eficaz para garantir bons resultados nas reconstruções de imagens. Utilizando o procedimento já discutido, foram gerados os mapas de sensibilidade para a seção transversal (plano médio dos eletrodos) do sensor protótipo. Na Figura 22, a escala de cores, à direita da imagem, varia de azul intenso (menor sensibilidade) ao vermelho intenso (maior sensibilidade). Pode-se notar que os sensores possuem maior sensibilidade próximo aos pares de eletrodos (emissor-receptor), porém a distribuição de sensibilidade não é uniforme.

Figura 22 - Mapa de sensibilidade 2D, utilizando o par 1_2 como emissor e os pares receptores (a) 4_5, (b) 8_9, (c) 10_11 e (d) 15_16.

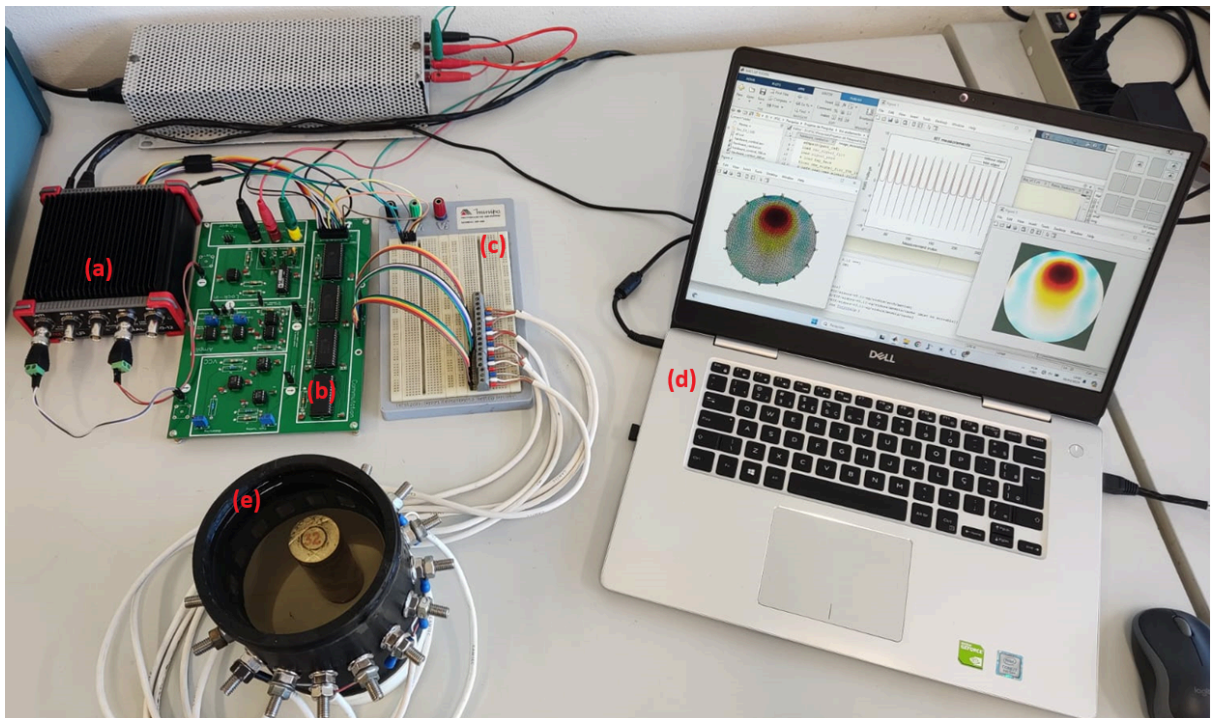


Fonte: Elaboração própria (2024).

4.4. Resultados experimentais

Todos os experimentos foram realizados, utilizando o sistema TIE (Figura 23) composto por: (a) uma Redpitaya para geração do sinal de excitação, controle do chaveamento e leitura de tensão; (b) uma placa para conversão tensão-corrente, chaveamento e medição dos potenciais elétricos; (c) uma protoboard para facilitar a conexão do sensor protótipo (e); (d) um computador para a geração das imagens. Sendo a Redpitaya uma ferramenta de aquisição de dados versátil que oferece integração perfeita e alto desempenho, pode ser usada como analisador de espectro, gerador de sinal e osciloscópio, todos acessíveis por meio de uma interface web. Utilizou-se o Método Adjacente como protocolo e o *software* EIDORS para a reconstrução das imagens.

Figura 23 – Sistema TIE utilizado nos experimentos: (a) Redpitaya, (b) placa TIE, (c) protoboard; (d) computador e (e) sensor protótipo.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Para avaliar a capacidade do sensor (juntamente com os demais componentes do sistema TIE) de reconstruir imagens, foram realizados uma série de experimentos nos quais foram posicionados na ROI, objetos de metal e nylon. Como o sensor está cheio de água

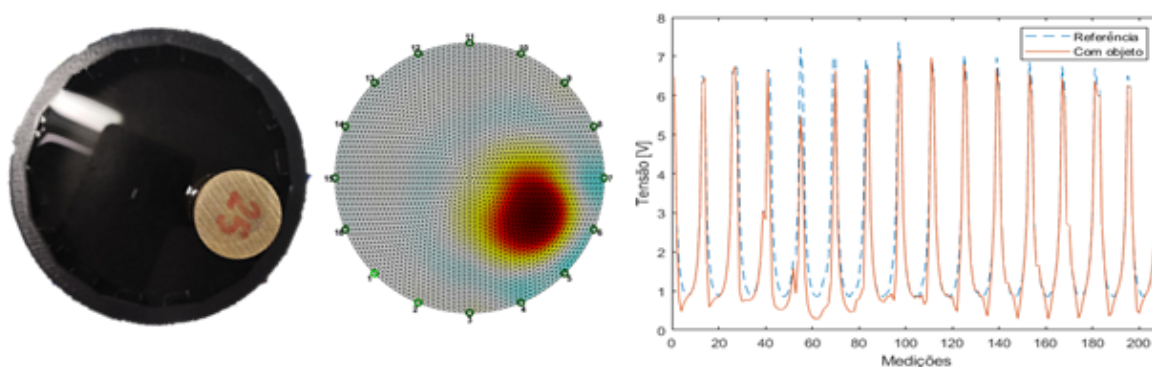
salina, espera-se que as seções transversais das inclusões com maior e menor condutividade (metal e nylon, respectivamente) apareçam nas imagens reconstruídas.

Foram realizados 6 experimentos com o sensor base e 10 experimentos com o sensor protótipo. Nesta subseção, serão apresentados apenas dois resultados para cada tipo de sensor. Os demais resultados estão disponíveis no Apêndice B.

Nas Figuras 24 e 25, pode-se observar as imagens e perfis de tensão obtidos a partir da inclusão de um tarugo de latão e da inclusão de dois tarugos de metal (latão e aço 1020) e dois bastões de nylon no interior do sensor base. Observa-se que o sistema foi capaz de reconstruir a imagem com considerável precisão de posicionamento, tamanho e forma dos objetos. Como o foco deste trabalho não é a implementação e/ou avaliação de algoritmos de reconstrução de imagem, não se buscou melhorar a imagem a partir da parametrização do *software* EIDORS. Quanto aos perfis de tensão, observa-se que o sensor foi capaz de “sentir” a presença e diferentes objetos. Para as inclusões de metal, nota-se a diminuição da tensão sobre os eletrodos devido ao aumento da condutividade na região onde se encontra o metal (condutividade maior que a condutividade da água); para as inclusões de nylon (condutividade menor que a condutividade da água), percebe-se o efeito contrário.

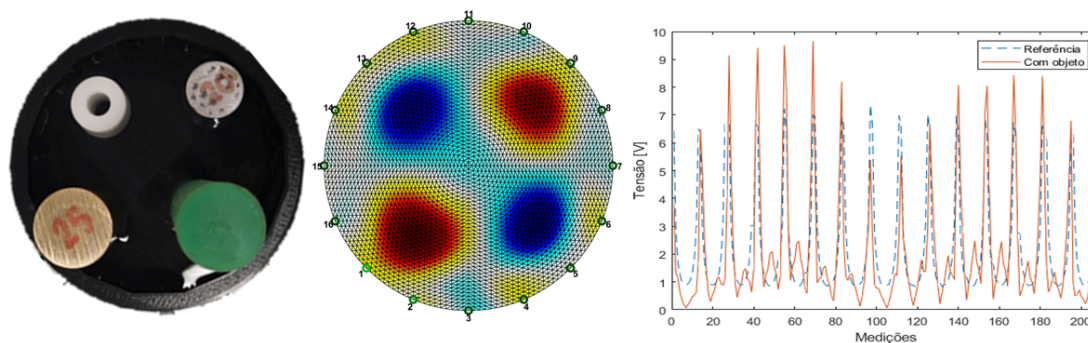
Nas Figuras 26 e 27, pode-se observar as imagens e perfis de tensão obtidos a partir da inclusão de um tubo de alumínio e da inclusão de dois dutos de metal (aço inoxidável) um bastão de nylon no interior do sensor protótipo. Todas as observações feitas para o sensor base podem ser estendidas para o sensor protótipo. Para os 16 eletrodos, existem um total de 208 medições (13 para cada par de eletrodos injetores).

Figura 24 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de um tarugo de latão.



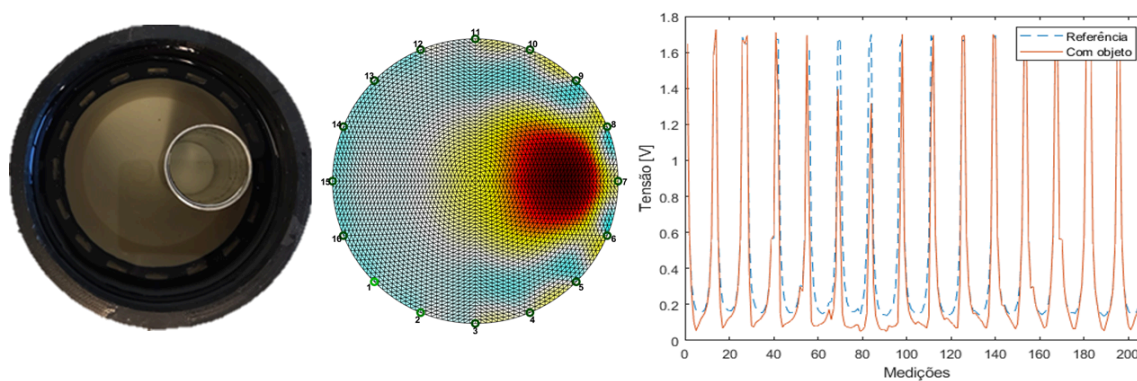
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 25 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de dois tarugos de metal e dois bastões de nylon.



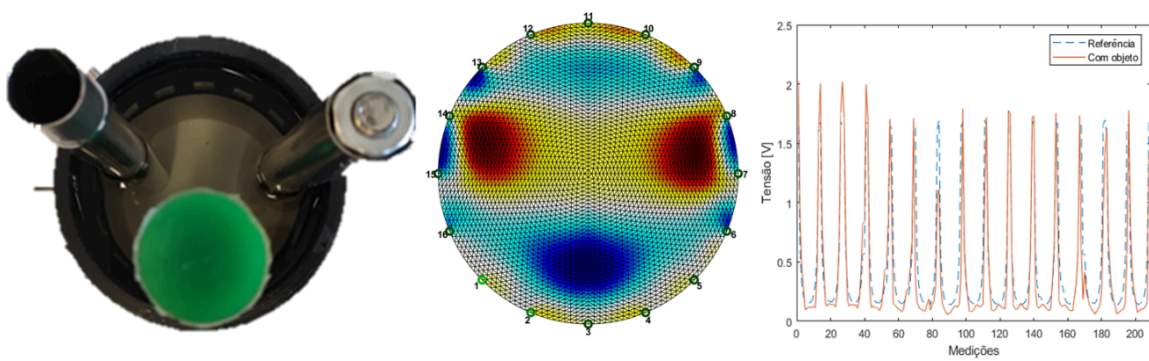
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 26 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de um tubo de alumínio.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 27 - Imagem reconstruída e perfil de tensão obtidos a partir da inclusão de um tarugo de dois dutos de metal e um de bastão de nylon.



Fonte: Elaboração própria (2024).

5. CONCLUSÃO

A TIE é uma técnica de obtenção de imagens não invasiva. Esse método baseia-se em medidas da impedância elétrica realizadas na superfície de um objeto de interesse, permitindo a reconstrução de imagens que refletem a distribuição de propriedades elétricas no interior do objeto.

Os objetivos propostos, incluindo o desenvolvimento de um sensor TIE, a utilização de softwares de modelagem e simulação, e a fabricação de um protótipo funcional, foram alcançados. O sensor projetado mostrou-se capaz de monitorar escoamentos multifásicos com boa precisão, conforme validado pelos resultados experimentais.

Apesar das limitações apresentadas na seção 3.1 para este trabalho, os resultados foram satisfatórios pela fabricação de dois protótipos de sensores, a validação da simulação numérica com resultados experimentais, e a demonstração de que o sensor detecta objetos condutores e isolantes.

Baseando-se na experiência adquirida durante o desenvolvimento deste trabalho, algumas recomendações podem ser sugeridas:

- Construir um sensor para aplicações de Tomografia por Impedância Elétrica com parâmetros otimizados obtidos através de simulação multifísica. Podendo variar seus parâmetros e quantidade de eletrodos para verificar a distribuição da sensibilidade.
- Construir um sensor usinado para aplicações de TIE com parâmetros otimizados, para obter melhores resultados.
- Melhorar o teste de estanqueidade para verificar se apenas o tratamento de acetona foi suficiente para impermeabilizar o sensor.

REFERÊNCIAS

ADEDIGBA, A. G. **Two-phase flow of gas-liquid mixtures in horizontal helical pipes**. 2007. Tese (Doutorado) – Cranfield University, School of Engineering, 2007.

ARISTOVICH, Kirill; SANTOS, Gustavo; PACKHAM, Brett; HOLDER, David. **A method for reconstructing tomographic images of evoked neural activity with electrical impedance tomography using intracranial planar arrays**. *Physiological Measurement*, v. 35, p. 1095, mai. 2014. DOI: 10.1088/0967-3334/35/6/1095.

BARROS, Tiago Rodrigues de. **Simulação numérica de um sensor de tomografia capacitiva para análise de escoamento bifásico ar-água**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/795792>. Acesso em: 28 ago. 2024.

CAMARGO, Erick Dario León Bueno de. **Desenvolvimento de algoritmo de imagens absolutas de tomografia por impedância elétrica para uso clínico**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. DOI: 10.11606/T.3.2013.tde-26062014-205827. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-26062014-205827/pt-br.php>. Acesso em: 28 ago. 2024.

DANÉS, Leandro Henschel. **Medição de parâmetro de escoamento bifásico gás-líquido utilizando sensores de impedância**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/875205>. Acesso em: 28 ago. 2024.

DJAMDJI, F.; GORVIN, A. C.; FREESTON, I. L.; TOZER, R. C.; MAYES, I. C.; BLIGHT, S. R. **Electrical impedance tomography applied to semiconductor wafer characterization**. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 7, n. 3, p. 391–395, mar. 1996. DOI: 10.1088/0957-0233/7/3/021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/021>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FIGUEROA, Teodora Pinheiro. **Proposta de uma nova estratégia de sensoriamento por impedância elétrica adaptada à reconstrução tomográfica**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001121367>. Acesso em: 28 ago. 2024.

HARIKUMAR, R.; PRABU, R.; RAGHAVAN, S. **Electrical Impedance Tomography (EIT) and its medical applications: A review**. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, [S.l.], v. 3, p. 193-198, 2013. ISSN 2231-2307. Disponível em: <http://www.ijscce.org/wp-content/uploads/papers/v3i4/D1821093413.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2024.

HEWITT, G. F.; FALCONE, Claudio Alimonti Gioia. **Multiphase Flow Metering; principles and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009.

KENDOUSH, A. A.; SARKIS, Z. A. **A non-intrusive autotransformer technique for the measurement of void fraction**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 13, p. 92–97, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0894177796000167>. Acesso em: 28 ago. 2024.

KIM, K. Y.; KIM, B. S.; KIM, M. C.; LEE, Y. J.; VAUHKONEN, M. **Image reconstruction in time-varying electrical impedance tomography based on the extended Kalman filter**. IOP Publishing, v. 12, n. 8, p. 1032–1039, jul. 2001. DOI: 10.1088/0957-0233/12/8/307. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/8/307>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MOTA, Francisco Rafael Moreira da. **Tomometria capacitiva aplicada à medição de fração de água em escoamentos bifásicos**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/169641>. Acesso em: 28 ago. 2024.

PACHECO, Nicolas Medeiros. **Otimização dos parâmetros de construção de sensores para tomografia capacitiva**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/321>. Acesso em: 28 ago. 2024.

PALADINO, Emilio Ernesto. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

ROSA, E. S. **Escoamento Multifásico Isotérmico: modelos de multifluido e de mistura**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ROCHA, M. L. **Um modelo de pesos para a reconstrução de imagens em tomografia por impedância elétrica via mínimos quadrados ponderados aplicável ao monitoramento de fluxo em dutos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

SCHLUCHTER, A. **A 16-Channel Electrical Impedance Tomography System Using the Red Pitaya**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Califórnia, San Diego. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/7969r8kb>. Acesso em: 28 ago. 2024.

SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. 2008. Technische Universität Dresden. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2965385>. Acesso em: 28 ago. 2024.

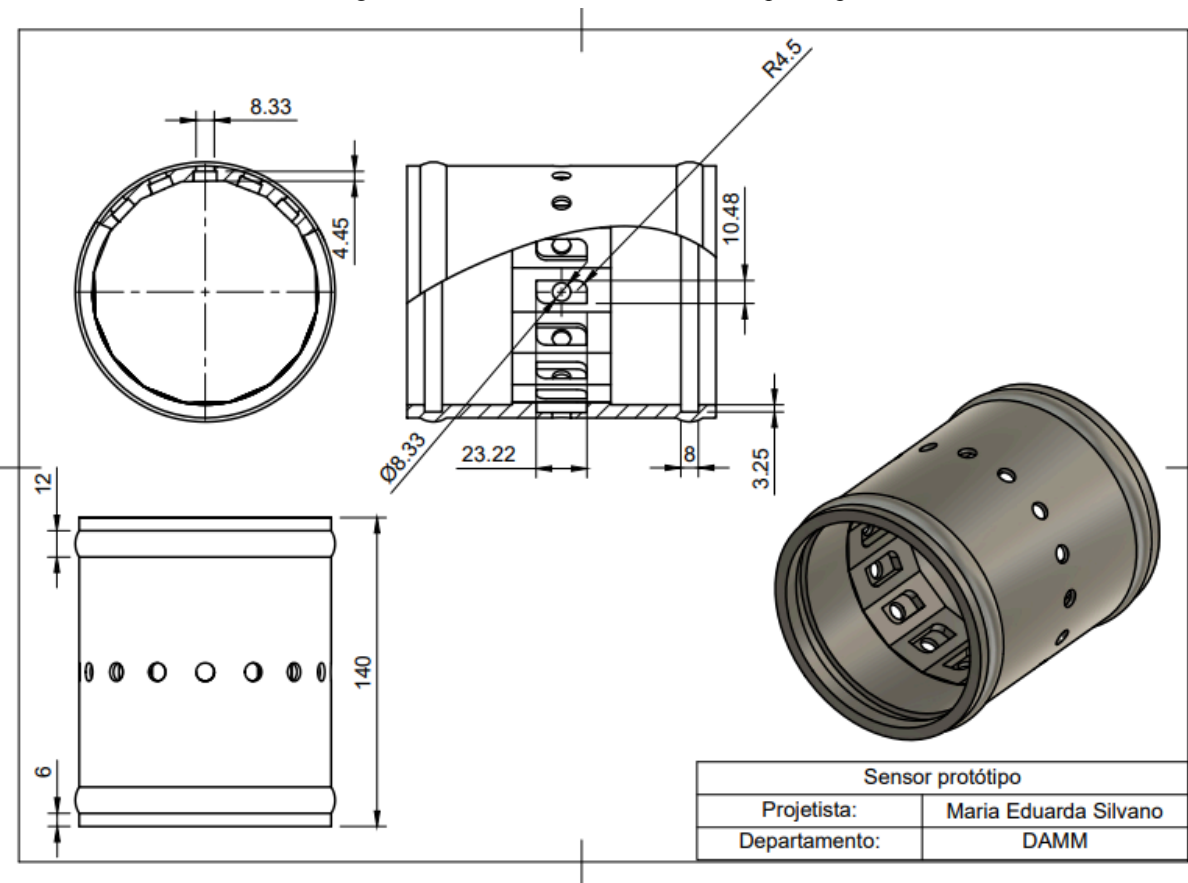
SILVA, J. P. C.; LIMA, C. R. **Tomografia por impedância elétrica aplicada a ensaios não destrutivos utilizando o método de otimização topológica**. *Mecânica Computacional*, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, v. XXIX, p. 6243–6256, nov. 2010. ISSN 2591-3522. Disponível em: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3445>. Acesso em: 28 ago. 2024.

VILAR, G.; WILLIAMS, R. A.; WANG, M. **Design of an Electrical Impedance Tomography Sensor for Flow Measurement in an Oscillatory Baffled Reactor**. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 7, n. 3, p. 718, mar. 1996. DOI:

10.1088/0957-0233/7/3/021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/021>. Acesso em: 28 ago. 2024.

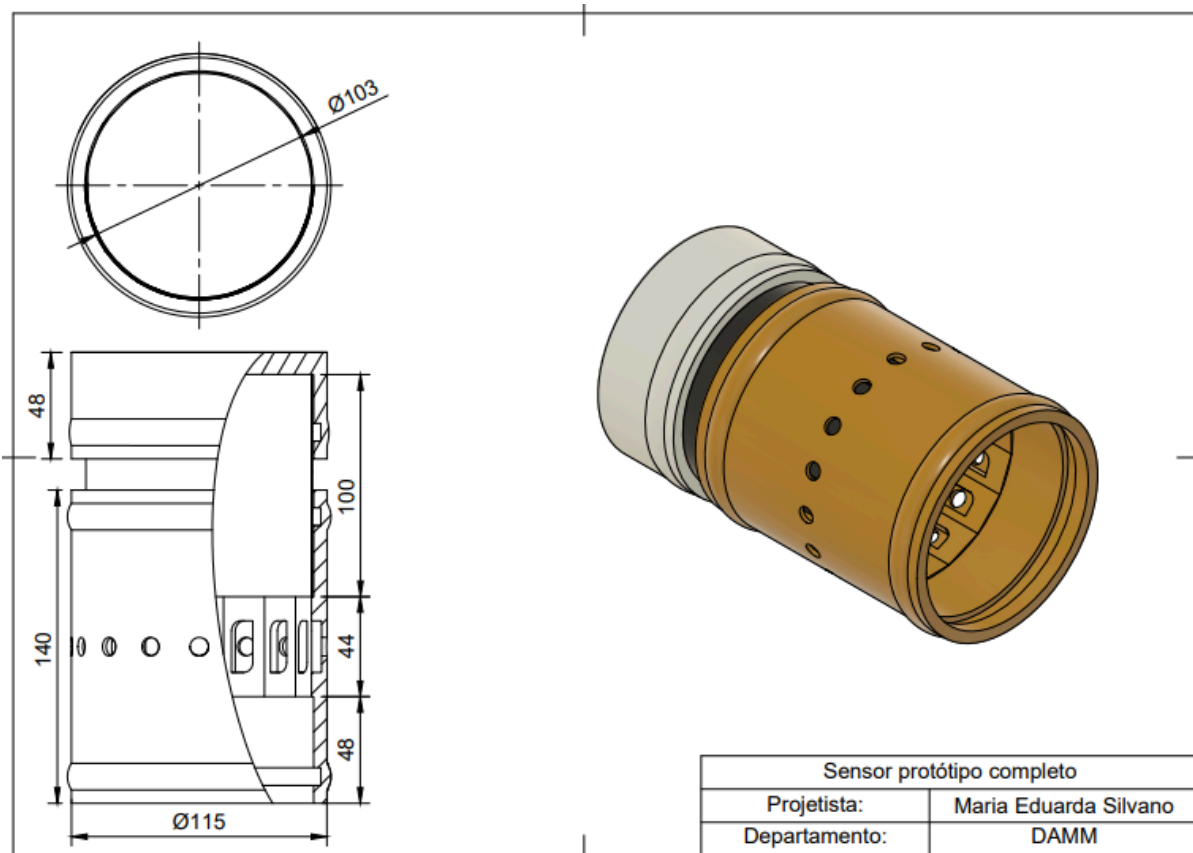
VILHUNEN, T.; HEIKKINEN, L. M.; SAVOLAINEN, T.; VAUHKONEN, P. J.; LAPPALAINEN, R.; KAIPIO, J. P.; VAUHKONEN, M. **Detection of faults in resistive coatings with an impedance-tomography-related approach.** *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 13, n. 6, p. 865–872, mai. 2002. DOI: 10.1088/0957-0233/13/6/306. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/>

Apêndice A – Folhas de Projeto
Figura A1 - Folha de desenho do sensor protótipo.



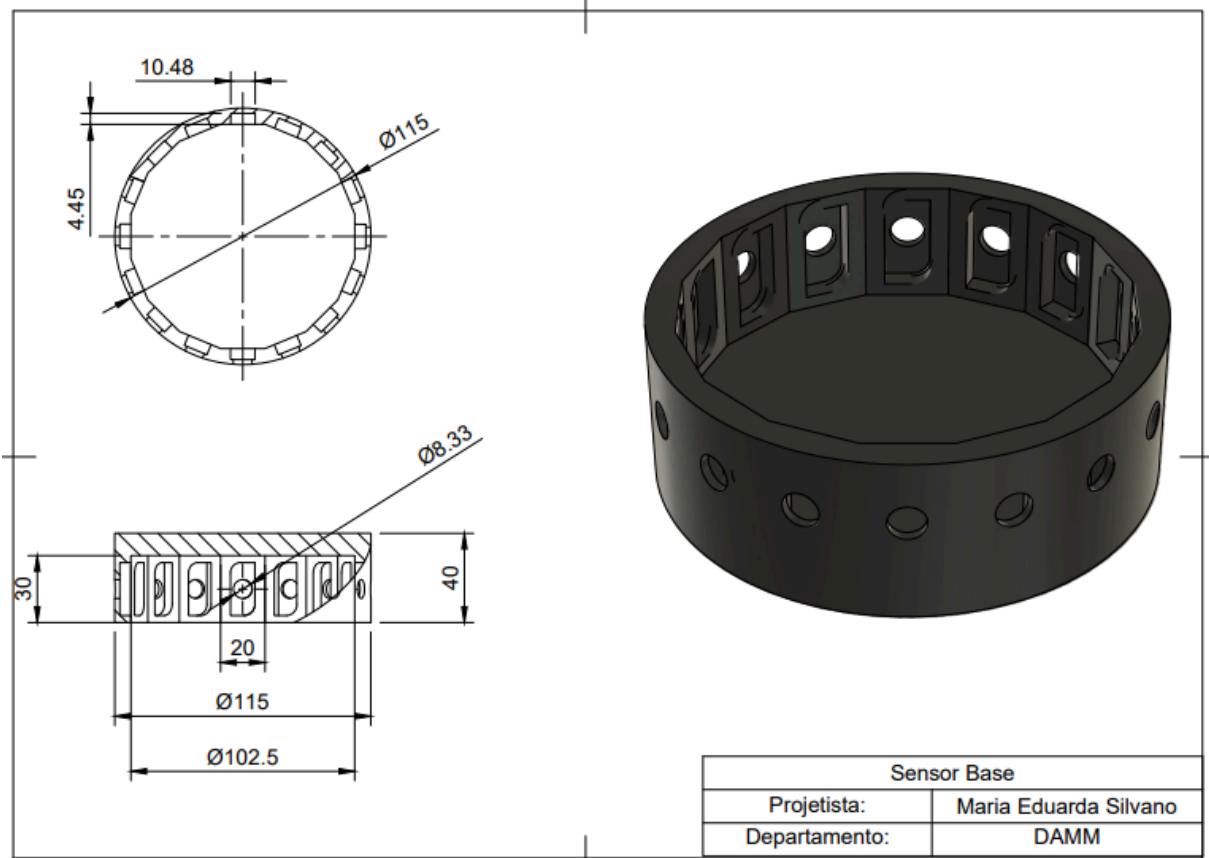
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura A2 - Folha de desenho do sensor protótipo completo.



Fonte: Elaboração própria (2024).

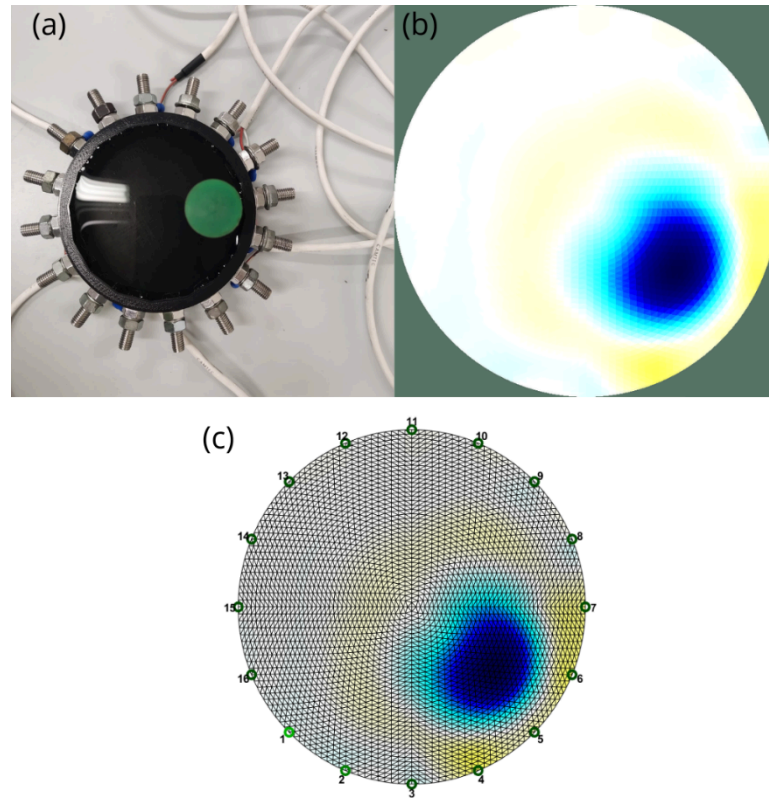
Figura A3 - Folha de desenho do sensor base.



Fonte: Elaboração própria (2024).

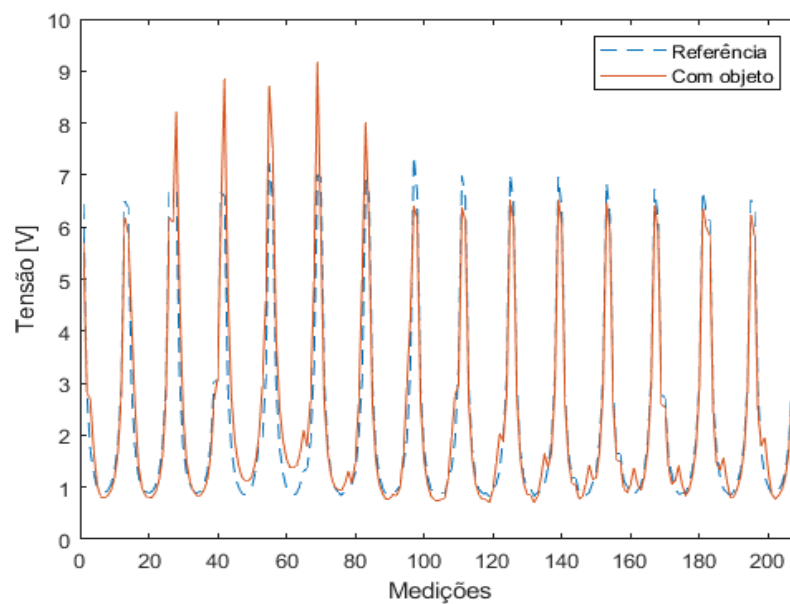
Apêndice B – Resultados Experimentais

Figura B1 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de nylon. (a) sensor base; (b) e (c) imagens reconstruídas.



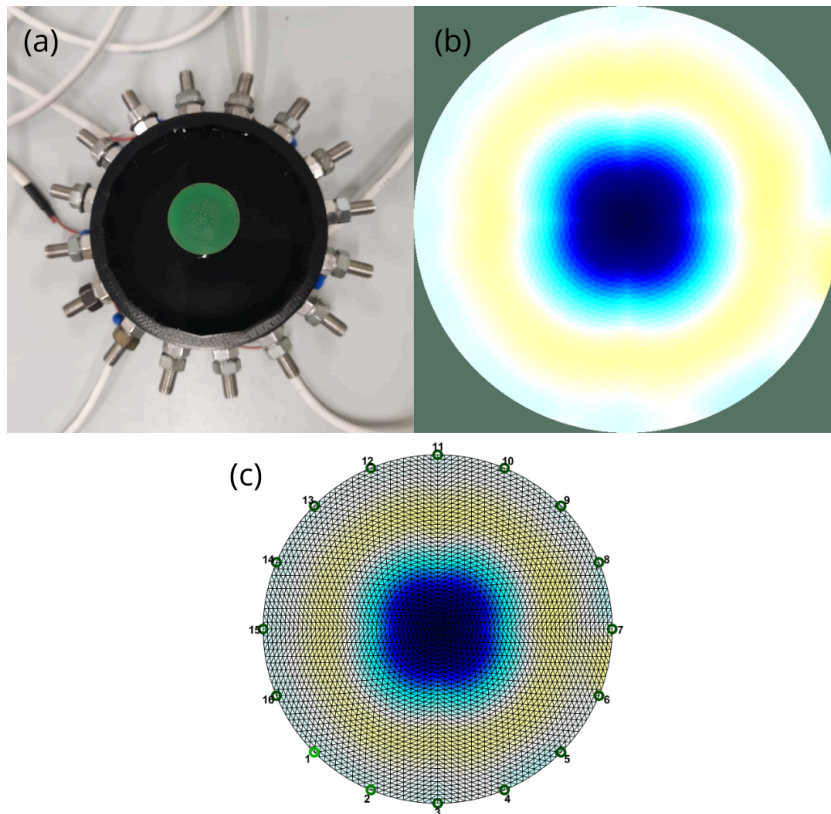
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B2 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de nylon.



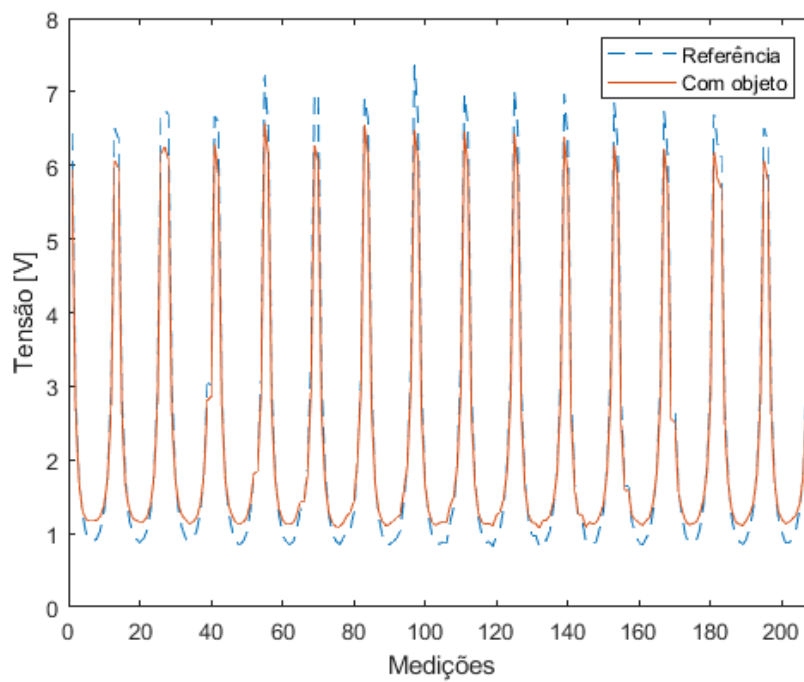
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B3 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de nylon. (a) sensor base; (b) e (c) imagens reconstruídas.



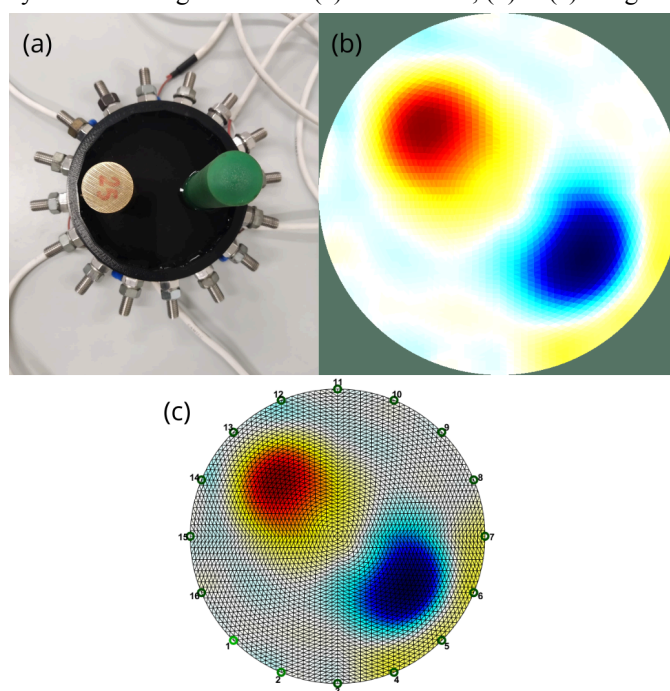
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B4 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de nylon.



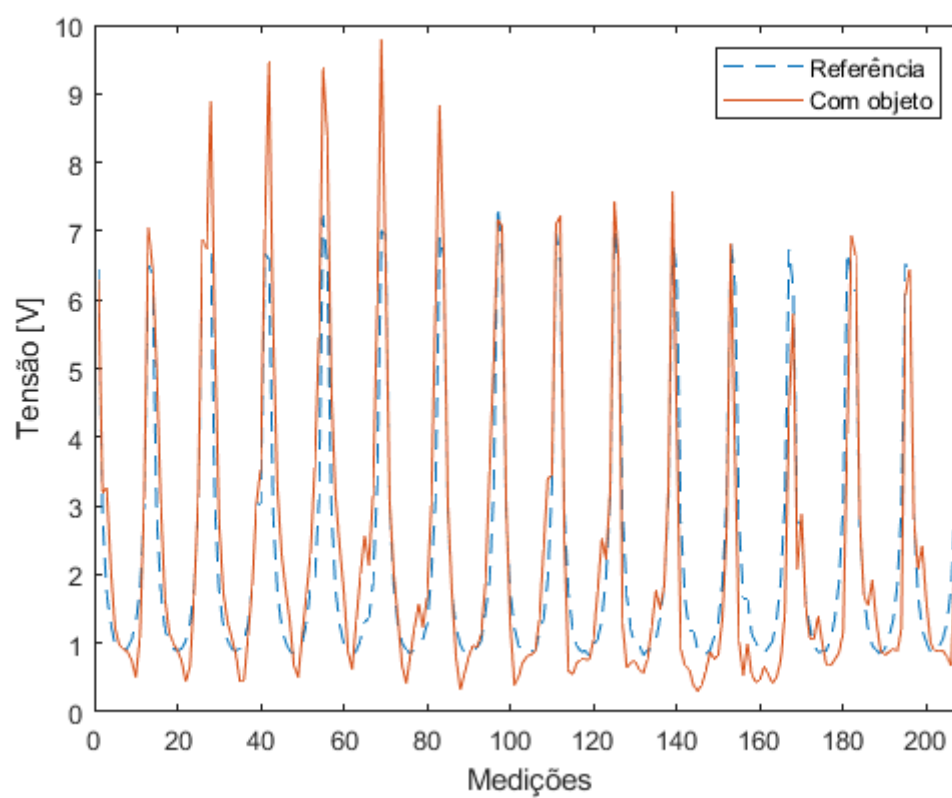
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B5 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de nylon e um tarugo de latão . (a) sensor base; (b) e (c) imagens reconstruídas.



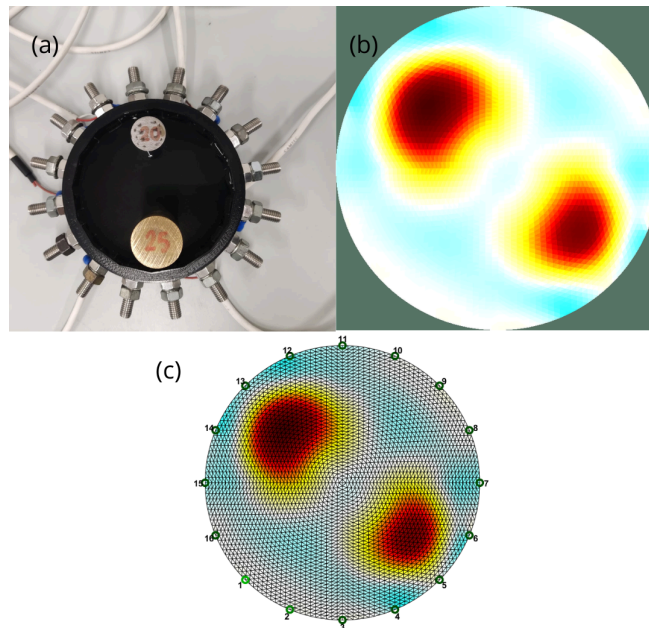
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B6 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de nylon e um tarugo de latão.



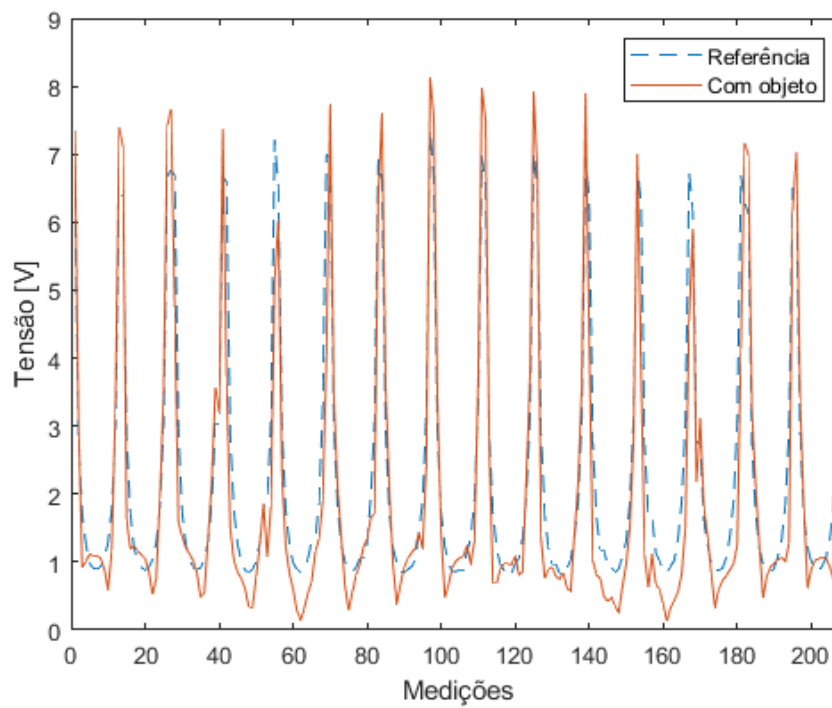
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B7 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de dois tarugos de metal . (a) sensor base; (b) e (c) imagens reconstruídas.



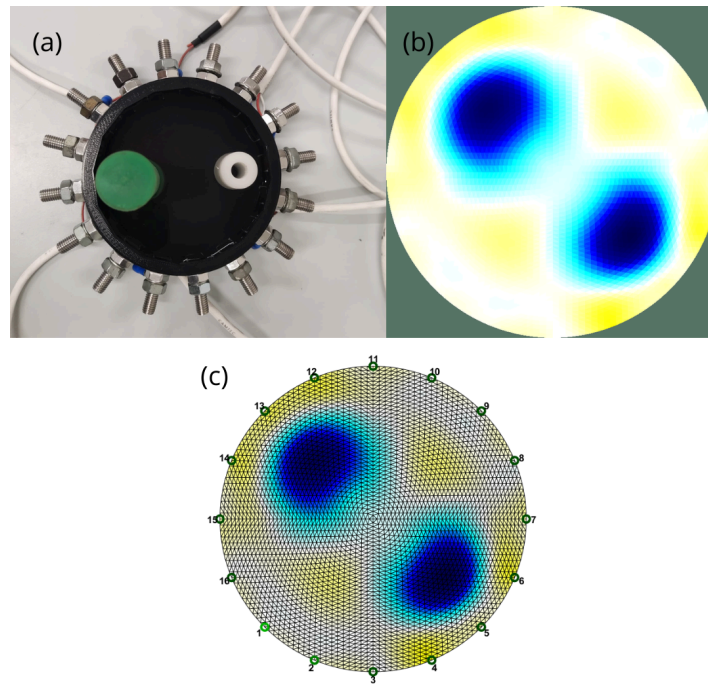
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B8 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de dois tarugos de metal.



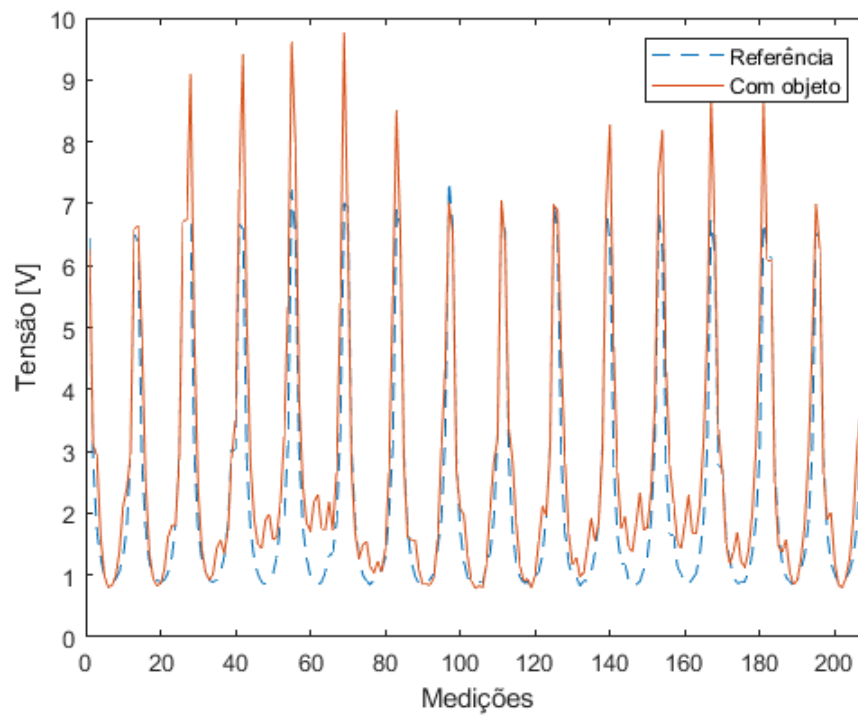
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B9 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de dois tarugos de nylon. (a) sensor base; (b) e (c) imagens reconstruídas.



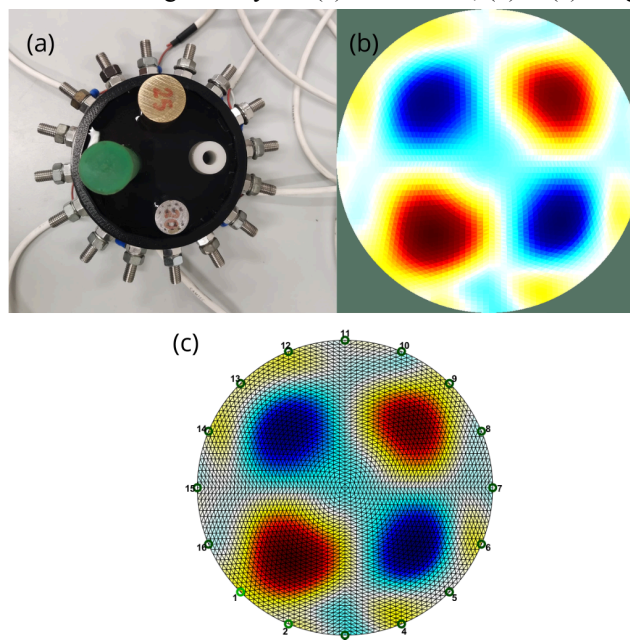
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B10 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de dois tarugos de nylon.



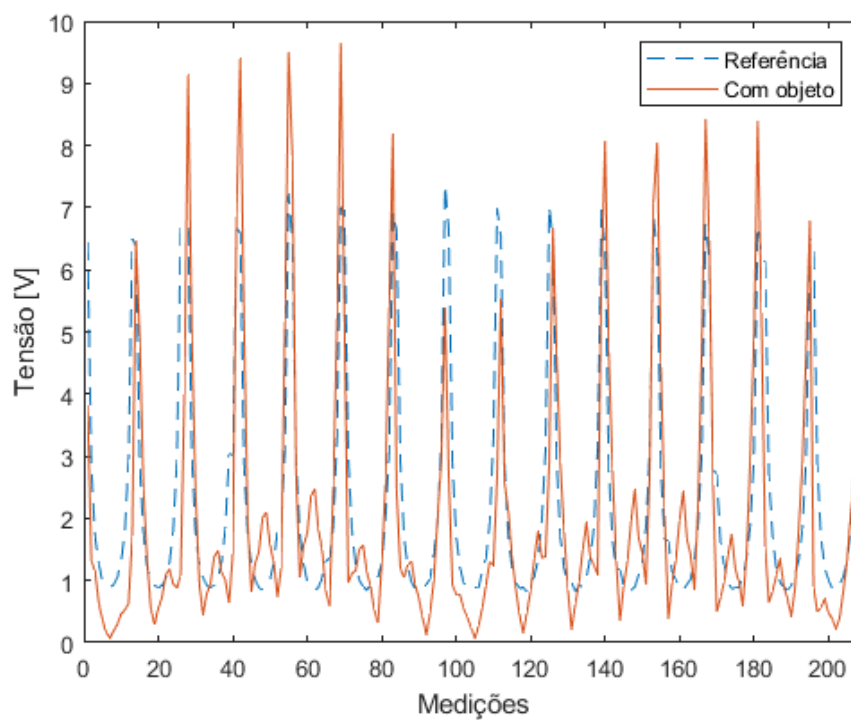
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B11 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de dois tarugos de metal e dois tarugos de nylon. (a) sensor base; (b) e (c) imagens reconstruídas.



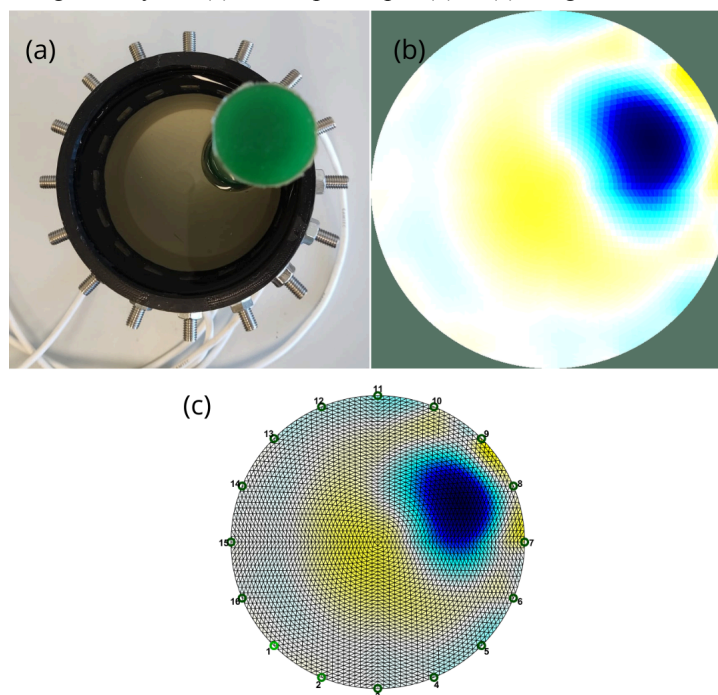
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B12 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de dois tarugos de metal e dois tarugos de nylon.



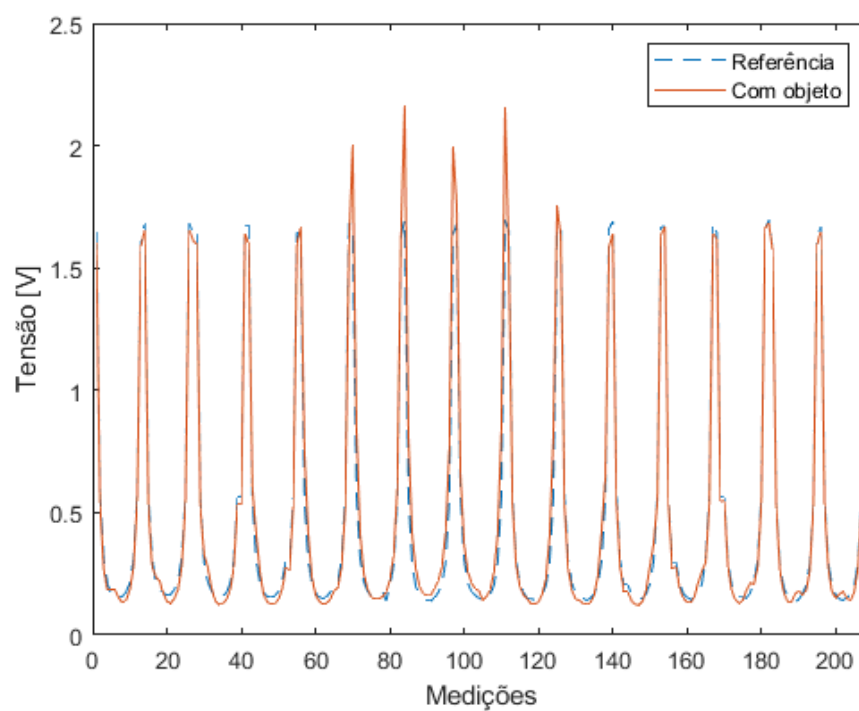
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B13 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugos de nylon. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



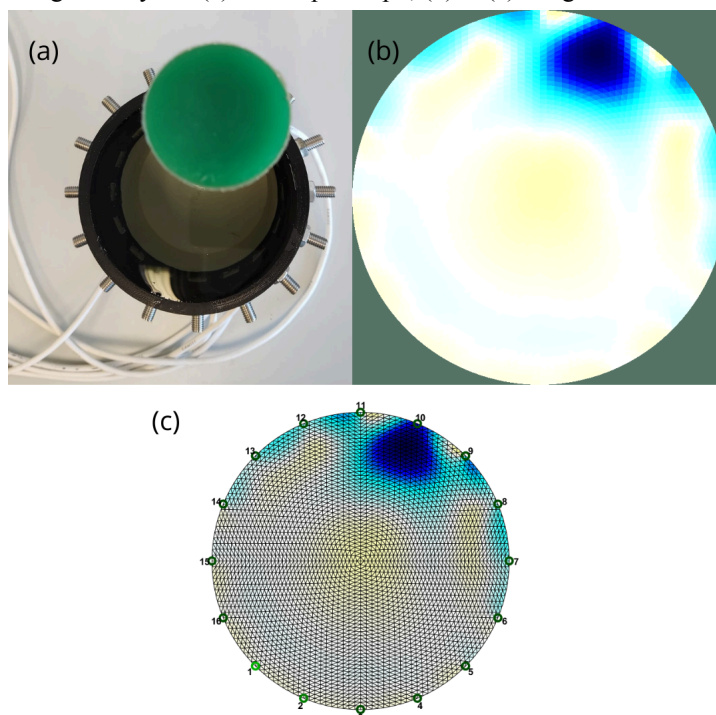
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B14 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de nylon.



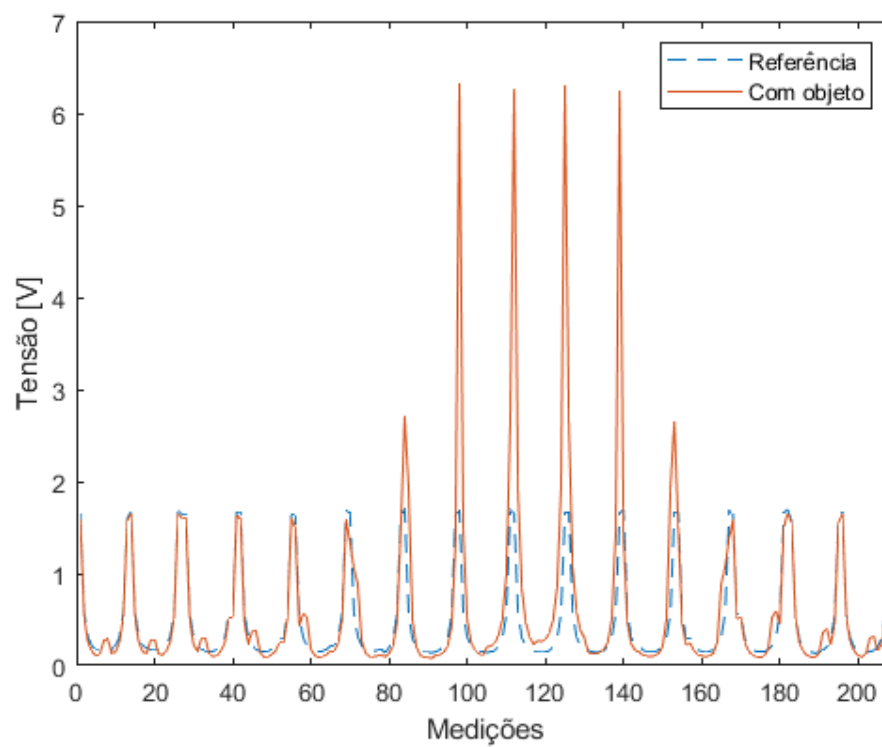
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B15 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugos de nylon. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



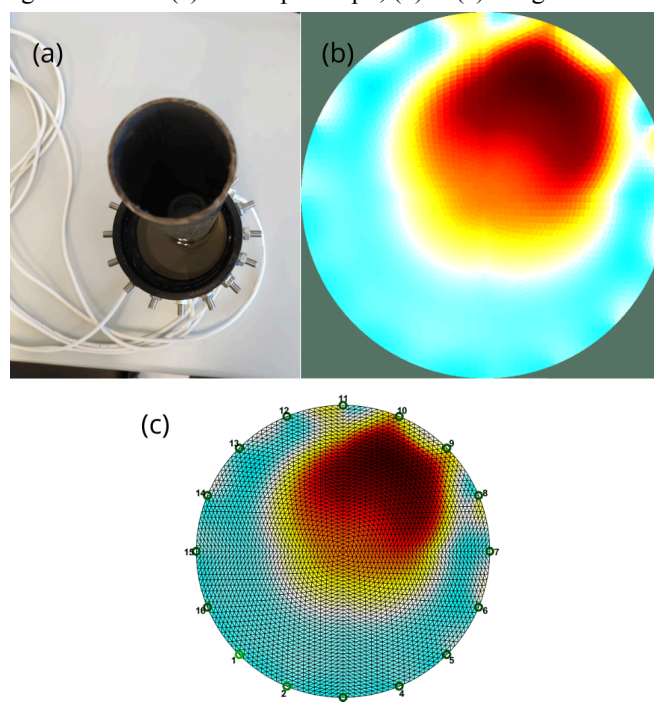
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B16 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de nylon.



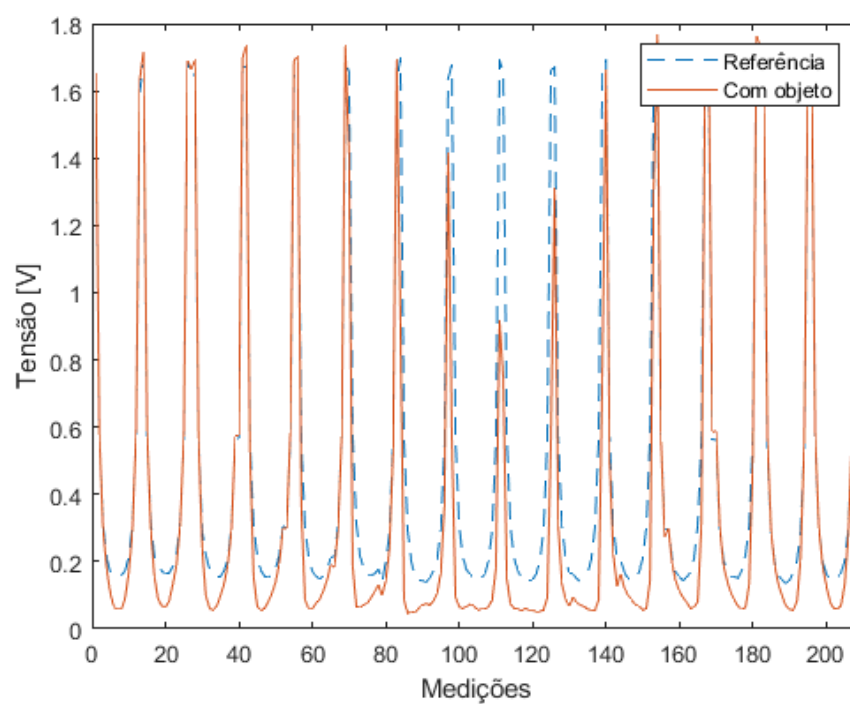
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B17 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugos de metal. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



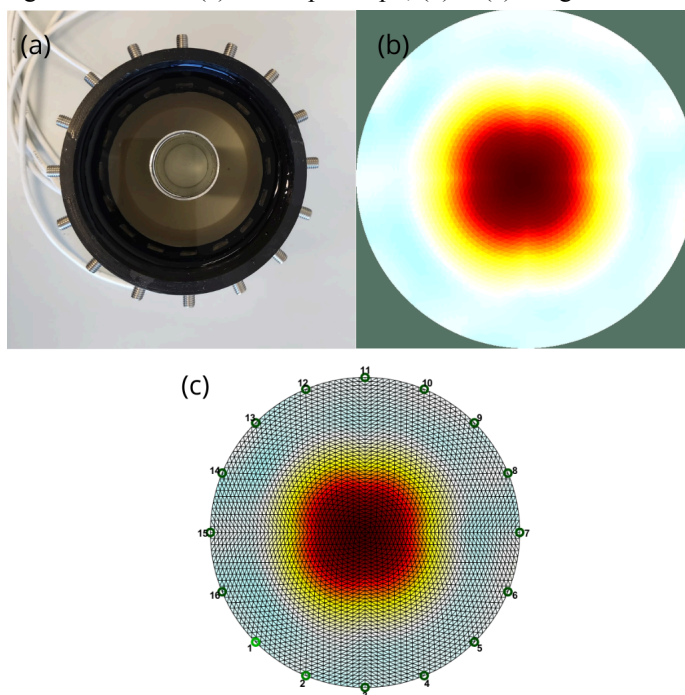
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B18 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de metal.



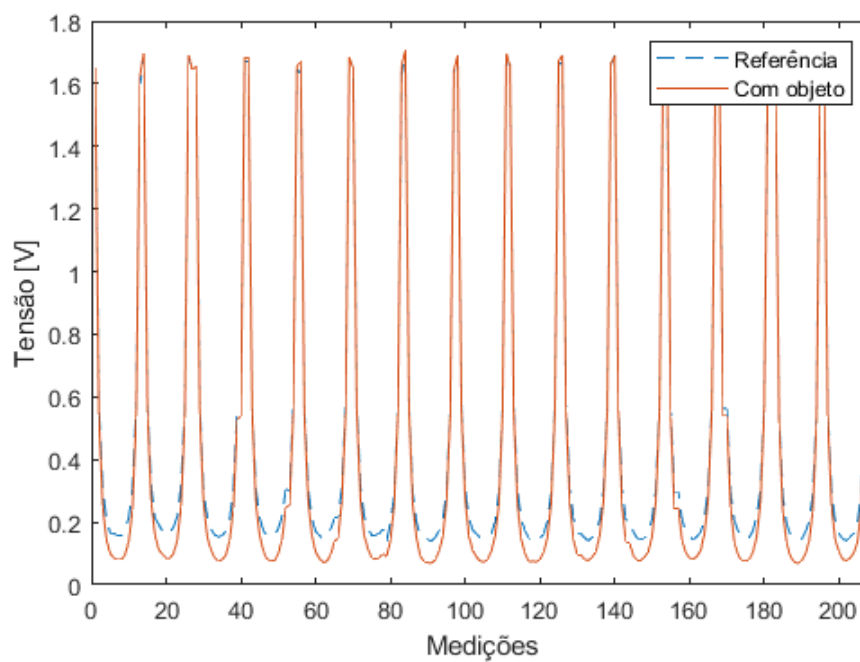
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B19 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de alumínio. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



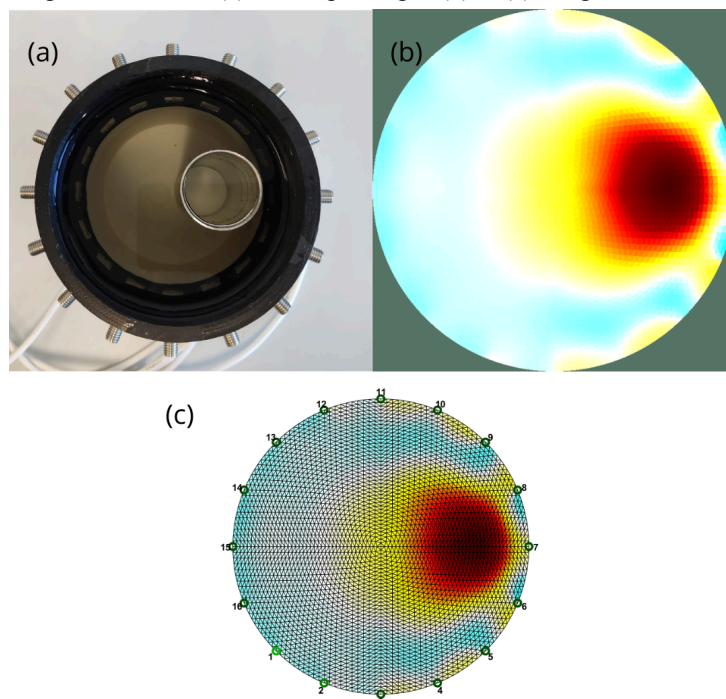
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B20 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de alumínio.



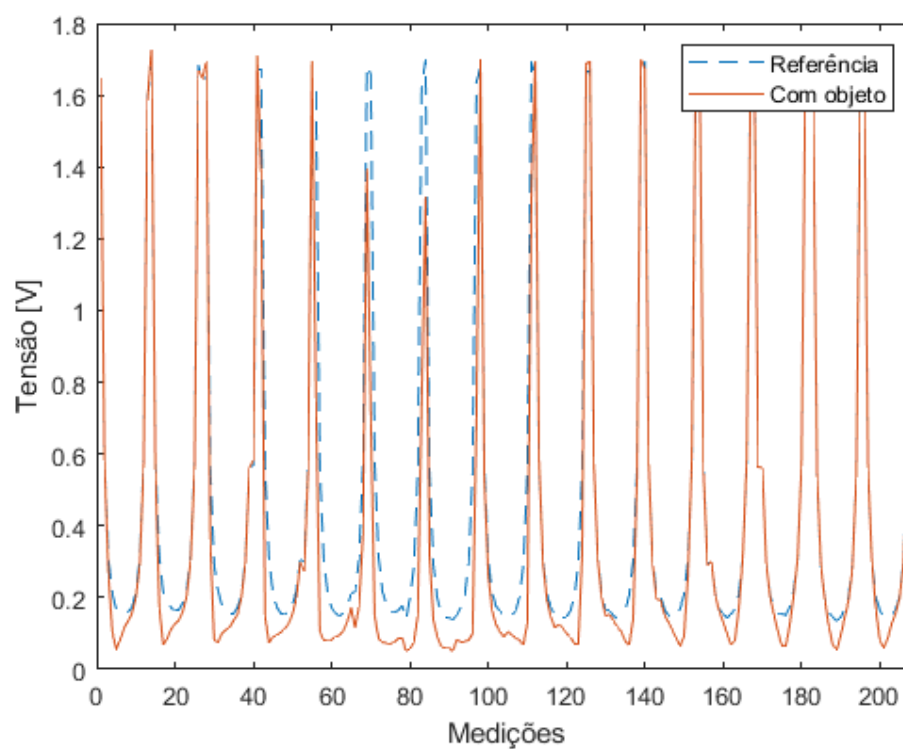
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B21 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de alumínio. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



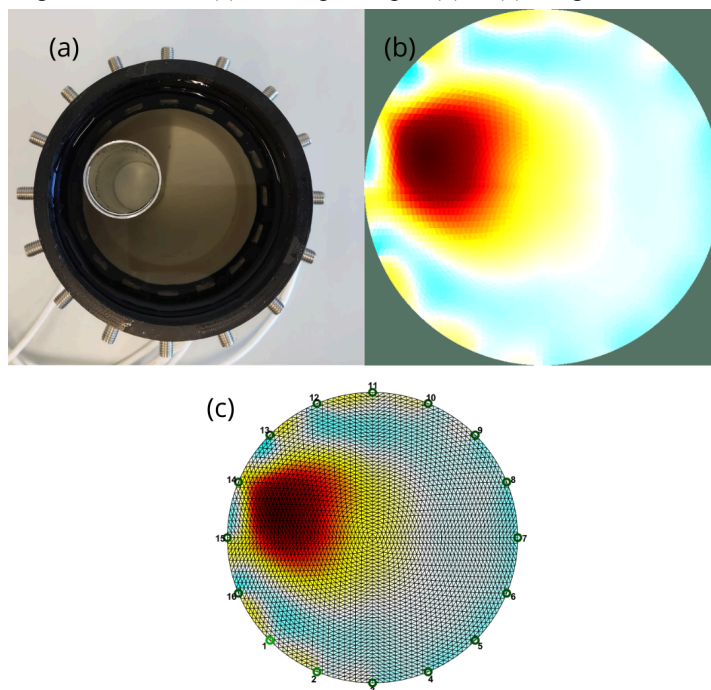
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B22 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de alumínio.



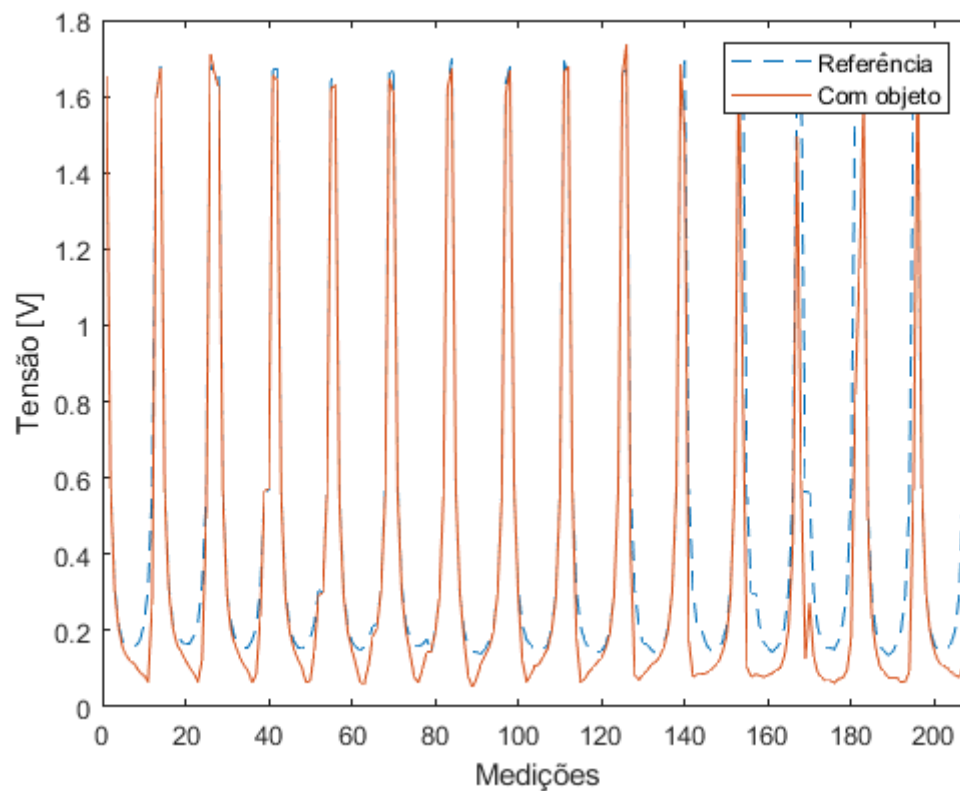
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B23 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de alumínio. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



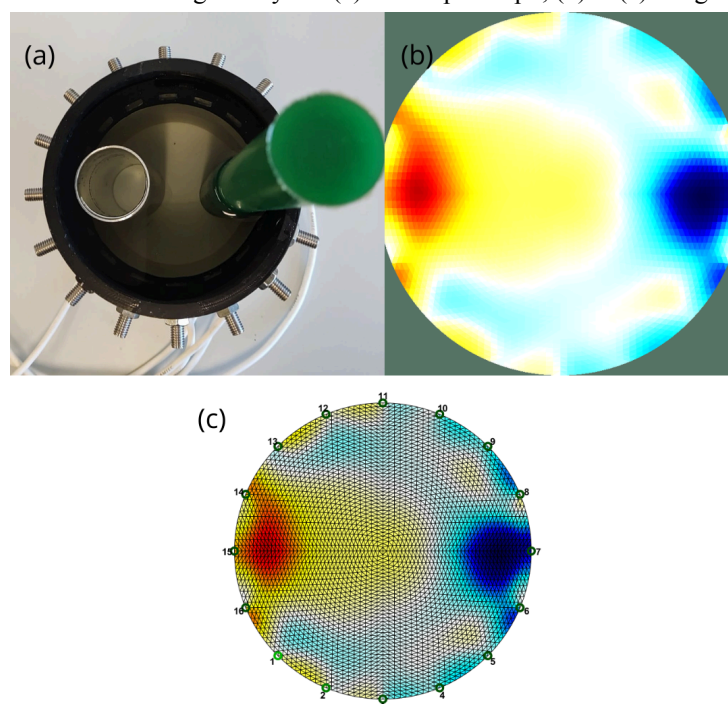
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B24 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de alumínio.



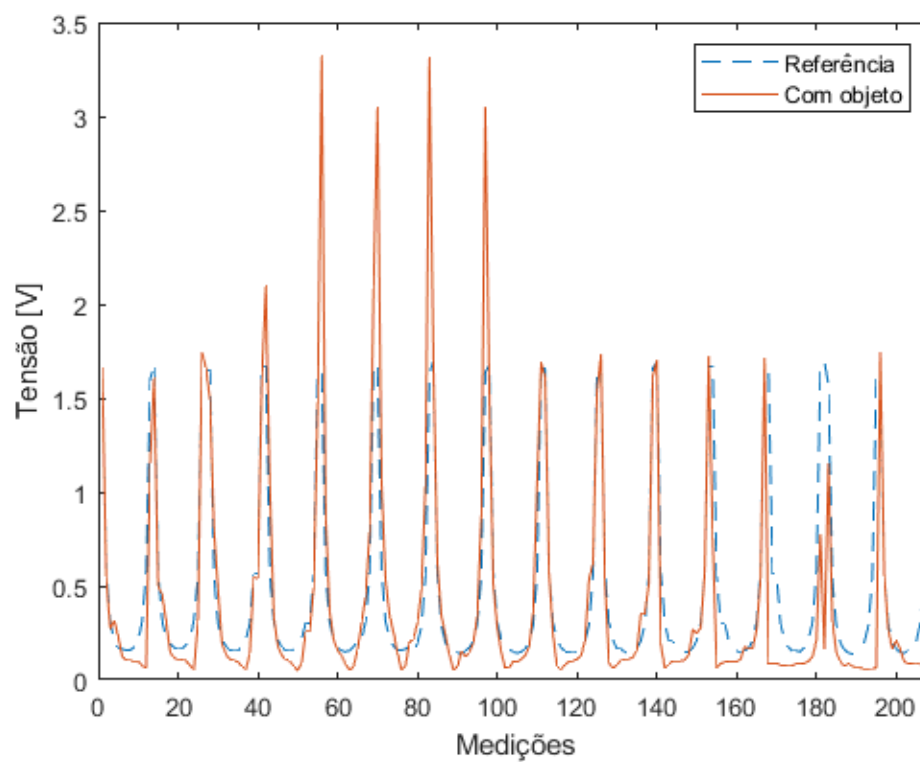
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B25 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugo de alumínio e um tarugo de nylon. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas..



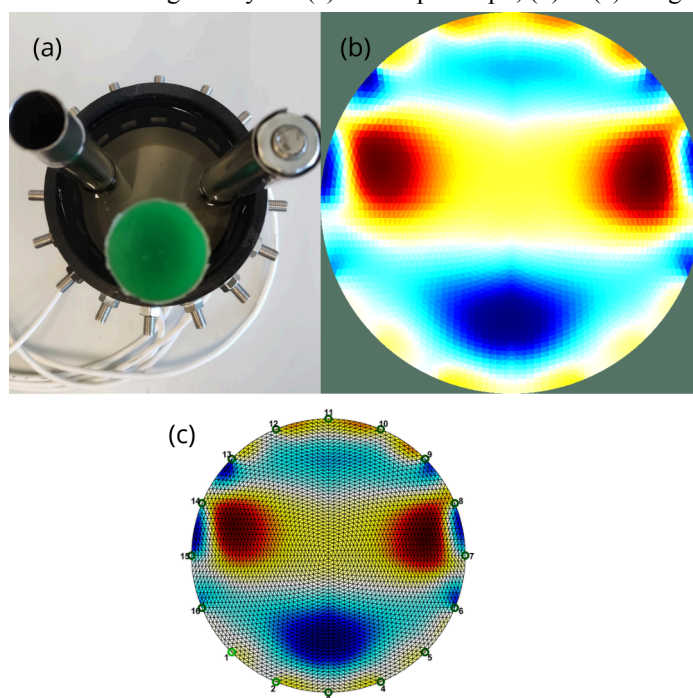
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B26 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de alumínio e um tarugo de nylon.



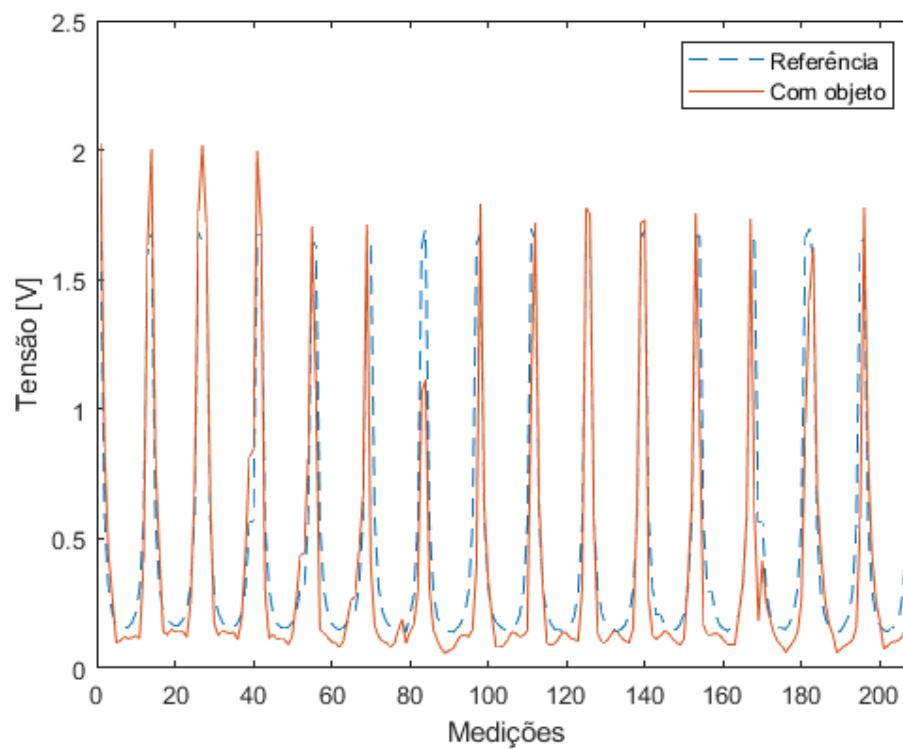
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B27 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de dois tarugos de metal e um tarugo de nylon. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas..



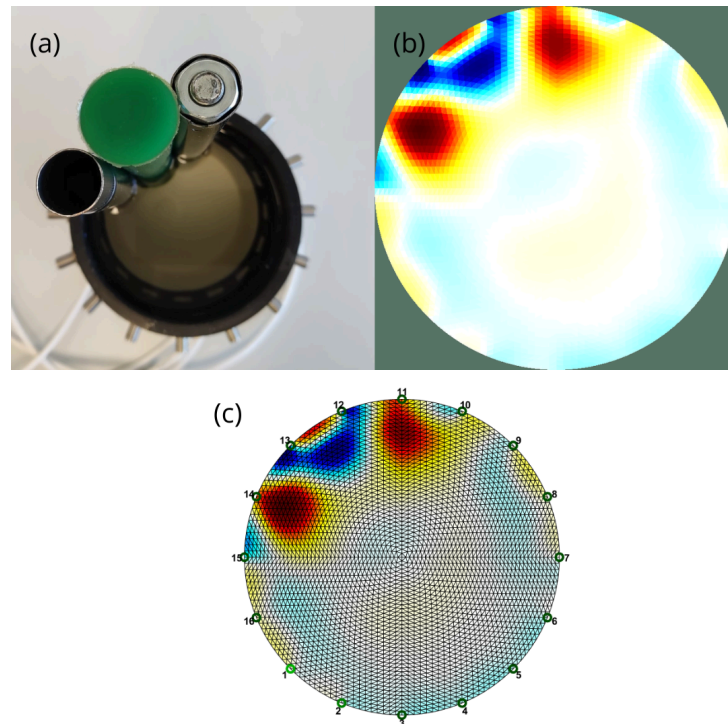
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B28 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de dois tarugos de metal e um tarugo de nylon.



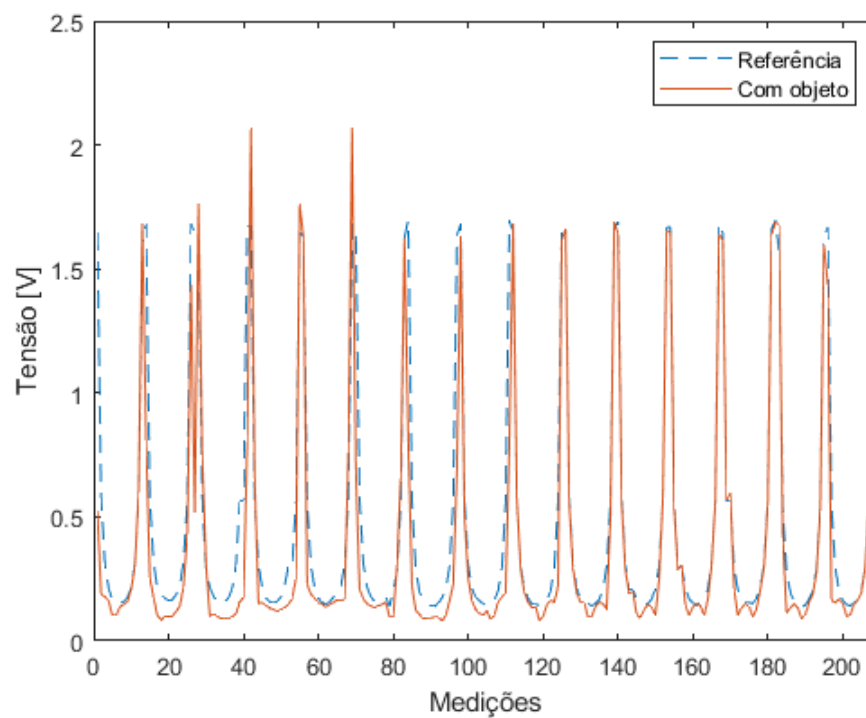
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B29 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de dois tarugos de metal e um tarugo de nylon. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas..



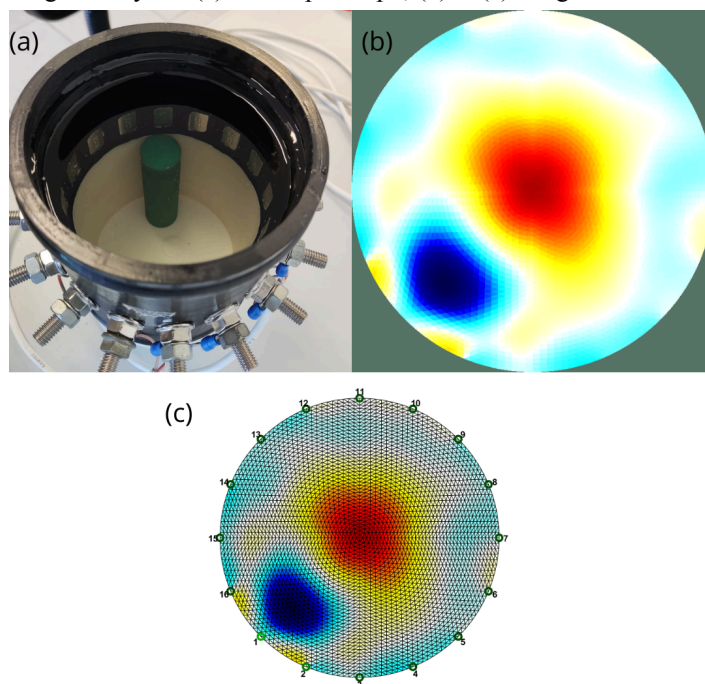
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B30 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de dois tarugos de metal e um tarugo de nylon.



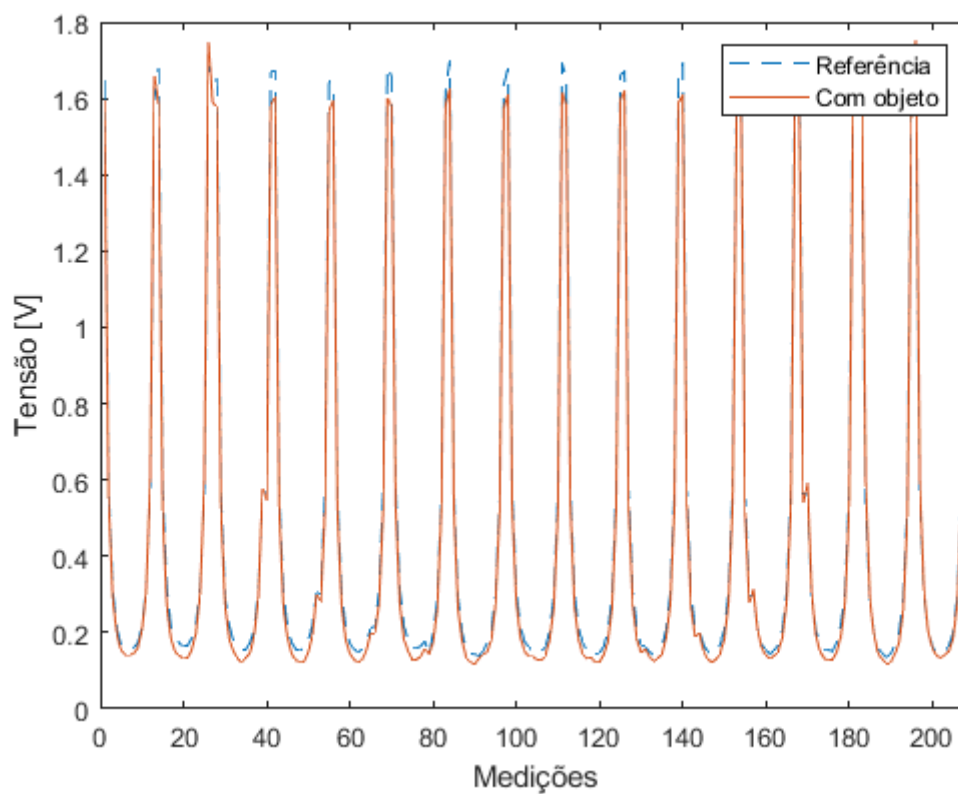
Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B31 - Imagem reconstruída a partir da inclusão de um tarugos de nylon. (a) sensor protótipo; (b) e (c) imagens reconstruídas.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura B32 – Perfil de tensão obtido a partir da inclusão de um tarugo de nylon.



Fonte: Elaboração própria (2024).