

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Daniel Alexi Braga Fonseca

Estudo da utilização de uma linha de transmissão planar com *stub* para
determinação da quantidade de água em óleo de transformadores de potência

Juiz de Fora

2023

Daniel Alexi Braga Fonseca

Estudo da utilização de uma linha de transmissão planar com *stub* para determinação da quantidade de água em óleo de transformadores de potência

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Ulysses Roberto Chaves Vitor

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Fonseca, Daniel Alexi Baga.

Estudo da utilização de uma linha de transmissão planar com *stub* para determinação da quantidade de água em óleo de transformadores de potência / Daniel Alexi Braga Fonseca. – 2023.

61 f. : il.

Orientador: Ulysses Roberto Chaves Vitor

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2023.

1. Linha de transmissão. 2. Óleo de transformador. 3. Detecção de água. I. Vitor, Ulysses Roberto Chaves, orient. II. Título.

Daniel Alexi Braga Fonseca

Estudo da utilização de uma linha de transmissão planar com stub para determinação da quantidade de água em óleo de transformadores de potência

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 21 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ulysses Roberto Chaves Vitor - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Úrsula do Carmo Resende

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 07/12/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Ulysses Roberto Chaves Vitor, Professor(a)**, em 21/12/2023, às 12:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Bessa dos Santos, Professor(a)**, em 21/12/2023, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **URSULA DO CARMO RESENDE RESENDE, Usuário Externo**, em 23/12/2023, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1614346** e o código CRC **BDE7D19C**.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a utilização de uma linha de transmissão planar com *stub* na medição da quantidade de água em óleo de transformadores de potência. O teor de água é um dos indicadores da qualidade do óleo, que em alguns casos pode chegar a gerar falhas no equipamento, ocasionando grandes prejuízos. Além disso, os modelos atuais de medição da qualidade do óleo necessitam de deslocamento de equipamentos e de pessoal, ocasionando maiores custos para essas atividades. Isso torna este estudo de grande relevância para o meio acadêmico e industrial. Para as medições foram realizadas 3 baterias de medições, onde a cada bateria procurou-se trazer uma evolução para melhores resultados. Em cada medição, foi acrescentada a água e, através da variação dos resultados expostos no analisador de redes, a análise foi realizada. Por fim, notou-se que a utilização do coeficiente de transmissão para os valores de máximo obtidos em cada curva chegou em melhores resultados e também com melhores aproximações em modelos de regressão. Embora ainda existam muitos desafios, os resultados promissores abrem portas para a montagem de sistemas capazes de enviar os dados para um monitoramento constante.

Palavras-chave: palavra-chave; palavra-chave; palavra-chave.

ABSTRACT

In this work, a study on the use of a planar transmission line with a stub for measuring the amount of water in power transformer oil is presented. Water content is one of the indicators of oil quality, which in some cases can lead to equipment failures, resulting in significant losses. Additionally, current models for oil quality measurement require equipment and personnel displacement, leading to higher costs for these activities. This makes this study highly relevant for both academic and industrial environments. For the measurements, three measurement sets were performed, with each set aiming to bring an improvement for better results. In each measurement, water was added, and the analysis was carried out through the variation of results displayed on the network analyzer. Finally, it was observed that the use of the transmission coefficient for the maximum values obtained in each curve led to better results and also better approximations in regression models. Although there are still many challenges, the promising results open doors for the assembly of systems capable of sending data for constant monitoring..

Keywords: keyword; keyword; keyword.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Distribuição dos campos (a) elétrico e (b) magnético.	16
Figura 2	– Modelo de circuitos elétricos para a linha de transmissão.	16
Figura 3	– Modelo para cálculo da impedância de entrada.	18
Figura 4	– Estrutura de uma <i>stripline</i>	21
Figura 5	– Campos elétrico e magnético na microfita.	22
Figura 6	– Modelo de meio homogêneo para a microstrip.	23
Figura 7	– Transformador de potência trifásico.	24
Figura 8	– Perfil de S_{21} para a linha de transmissão com <i>stub</i>	28
Figura 9	– Perfil da linha de transmissão com <i>stub</i> curvo.	30
Figura 10	– Estrutura montada para simulação.	31
Figura 11	– Média do campo elétrico no tempo ao longo da LT.	32
Figura 12	– S_{21} simulado para a linha de transmissão com <i>stub</i>	33
Figura 13	– Campo elétrico visto do perfil da linha de transmissão.	34
Figura 14	– Máquina prototipadora LPKF.	35
Figura 15	– Placa confeccionada.	36
Figura 17	– Dispositivo montado.	37
Figura 18	– Óleo mineral de transformador.	38
Figura 20	– Experimento sendo realizado.	39
Figura 21	– Micropipeta utilizada nas medições.	41
Figura 22	– Calibragem sendo realizada.	42
Figura 23	– Fluxograma para o procedimento de medição.	43
Figura 24	– S_{21} da primeira bateria de medições.	44
Figura 25	– S_{21} para faixa do (a) quarto nulo e (b) quinto nulo.	45
Figura 26	– Variação da frequência de nulo para o quinto nulo.	46
Figura 27	– Variação da amplitude para as frequências de nulo.	47
Figura 28	– Variação de S_{21} para cada máximo.	48
Figura 29	– Curva aproximada da primeira bateria para (a) primeiro máximo, (b) segundo máximo, (c) terceiro máximo e (d) quarto máximo.	49
Figura 30	– Segunda bateria de medições.	50
Figura 31	– S_{21} para a faixa do (a) quarto nulo e (b) quinto nulo.	51
Figura 32	– Variação da frequência de nulo para o quinto nulo na segunda bateria.	52
Figura 33	– Curva aproximada da primeira bateria para (a) primeiro máximo, (b) segundo máximo, (c) terceiro máximo e (d) quarto máximo.	53
Figura 34	– Terceira bateria de medições.	54
Figura 35	– S_{21} para a faixa do (a) quarto nulo e (b) quinto nulo.	55
Figura 36	– Curva aproximada da terceira bateria para (a) primeiro máximo, (b) segundo máximo, (c) terceiro máximo e (d) quarto máximo.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da linha projetada.	30
Tabela 2 – Dimensões da cavidade.	37
Tabela 3 – Valores para regressão linear da primeira bateria de medições.	47
Tabela 4 – Valores para regressão linear na segunda bateria de medições.	52
Tabela 5 – Valores para regressão linear na terceira bateria de medições.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
RL	Perda por retorno
LT	Linha de transmissão
LTP	Linha de transmissão planar
TEM	Transversal Eletromagnética
FN	Frequência de Nulo
Hz	Hertz

LISTA DE SÍMBOLOS

R'	Resistência por unidade de comprimento.
C'	Capacitância por unidade de comprimento.
G'	Condutância por unidade de comprimento.
L'	Indutância por unidade de comprimento.
∂	Derivada parcial.
γ	Constante de propagação.
ω	Frequência angular.
α	Coefficiente de propagação.
β	Constante de fase.
Z_0	Impedância característica.
Z_L	Impedância na carga.
Γ	Coefficiente de reflexão.
dB	Decibéis.
ϵ_e	Permissividade elétrica efetiva.
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa.
$tg\delta$	Tangente de perdas.
ϵ'	Parte real da permissividade elétrica.
ϵ''	Parte imaginária da permissividade elétrica.
σ	Condutividade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	MOTIVAÇÃO	10
1.2	OBJETIVO	10
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	TEORIA	15
2.1	LINHAS DE TRANSMISSÃO	15
2.1.1	Modelo de circuitos elétricos	15
2.1.2	Impedância característica	18
2.1.3	Impedância de entrada	18
2.1.4	Coefficiente de reflexão e VSWR	19
2.1.5	Tipos de linha de transmissão	20
2.1.6	Microfita	22
2.2	ÓLEO DE TRANSFORMADOR	24
3	METODOLOGIA	28
3.1	SENSOR BASEADO EM LINHA DE TRANSMISSÃO PLANAR	28
3.2	SIMULAÇÃO	30
3.3	FABRICAÇÃO	34
3.4	MEDIÇÕES	37
4	RESULTADOS	44
4.1	PRIMEIRA BATERIA DE MEDIÇÕES	44
4.2	SEGUNDA BATERIA DE MEDIÇÕES	48
4.3	TERCEIRA BATERIA DE MEDIÇÕES	54
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Os transformadores de potência, desempenhando uma função vital no contexto da infraestrutura elétrica, têm a responsabilidade fundamental de viabilizar a transmissão eficaz de eletricidade entre diferentes níveis de tensão. Notavelmente, em sistemas de elevada potência, esses dispositivos são meticulosamente projetados para operar de maneira contínua, frequentemente estendendo seu ciclo de funcionamento por décadas, sem sofrer interrupções. Assim, a preservação da qualidade do óleo utilizado nesses transformadores surge como uma variável crítica, sendo indispensável não apenas para manter a eficiência operacional e a segurança do equipamento, mas também para prevenir possíveis contratemplos no fornecimento ininterrupto de energia elétrica.

O óleo de transformador, exercendo simultaneamente as funções de isolante elétrico e agente de resfriamento, enfrenta desafios ao longo do tempo em decorrência de fatores como a presença de contaminantes, abrangendo desde a água até partículas e gases. A degradação gradual do óleo não apenas compromete o desempenho operacional dos transformadores, mas também pode resultar na geração de gases prejudiciais, afetando negativamente a eficiência e a longevidade desses componentes essenciais.

Em resposta a esses desafios, emergem os sensores fundamentados em linhas de transmissão planares como uma alternativa viável e eficaz para avaliar a qualidade do óleo em transformadores. Conhecidos por sua agilidade, precisão e custo-benefício, esses sensores demonstram a capacidade de conduzir análises em tempo real do óleo, permitindo identificar modificações na concentração de contaminantes com rapidez e assertividade. A técnica da linha de transmissão planar, ao empregar uma geometria específica, destaca-se por sua sensibilidade às propriedades elétricas do óleo, revelando potencial como uma ferramenta valiosa para monitorar a integridade desses equipamentos críticos para a oferta contínua e confiável de energia elétrica.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a aplicação de um sensor baseado em linha de transmissão planar (LTP) para medir a quantidade de água presente no óleo de transformador. Especificamente, pretende-se: Projetar e construir uma linha de transmissão planar que servirá como sensor, utilizando técnicas de fabricação de circuitos impressos; Realizar simulações da linha para verificar a consistência com a teoria e a resposta de coeficiente de transmissão; Realizar testes experimentais para avaliar o desempenho do sensor; Estudar formas de traduzir os resultados em métodos de aferição da quantidade de água para um determinado volume de óleo; Verificar possibilidades de aplicações reais.

Apesar de almejar resultados que comprovem a eficácia do uso de LTP com *stub* como um sensor, o objetivo não é alcançar um modelo final neste momento, o qual incluiria um estudo minucioso sobre precisão e erros nas medições. Essa análise mais aprofundada deve ser considerada como uma perspectiva para futuros trabalhos, que exigirão a coleta abrangente de dados em conjunto com o uso de técnicas avançadas de instrumentação.

Ao alcançar esses objetivos, espera-se contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas e precisas para a medição da qualidade do óleo de transformador, aumentando a eficiência e a segurança dos sistemas elétricos e ajudando a prevenir falhas e interrupções no fornecimento de energia.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa nesse campo assume grande relevância devido à importância crítica dos transformadores no funcionamento confiável das redes elétricas e à necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do óleo isolante como um indicador de sua saúde operacional. A seguir, serão apresentados trabalhos recentes

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram divulgados relacionados ao monitoramento da qualidade de óleos de transformadores. Devido à vasta variedade de propriedades importantes para os óleos, diversas técnicas foram criadas e buscam a identificação de possíveis falhas ou até mesmo de compostos que possam indicar tais falhas. Em (1), são apresentados alguns métodos do monitoramento da qualidade do óleo no transformador de potência *offline* e *online*, tais como a análise de Furan, a análise de tensão interfacial, a tensão de ruptura dielétrica do óleo, o teste de resistência de isolamento, a medição do fator de dissipação, dentre outros. Esse artigo aborda sobre diversos gases que podem provocar falhas no transformador e isso é um sinal da importância de ampliar futuramente os experimentos da técnica desta dissertação com esses gases. Além disso, ao comparar métodos *offline* aos *online*, é possível identificar uma defasagem entre eles, estando os métodos online muito menos aplicáveis até o momento.

Partindo para técnicas recentes, percebe-se atualmente uma grande utilização da espectroscopia nesta área. Isso pode ser visto em (2), (3), (4). Em (2), foi utilizado um método já normatizado para determinação de elementos em óleos isolantes utilizando a espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado. Diferente do trabalho que está sendo aqui realizado, essa técnica verificou e destacou a influência de teor de cobre para os óleos, relacionando o mesmo com a tangente de perdas. Isso é um bom complemento para esta dissertação, que no momento mantém o foco apenas em medições sobre o teor de água. Entretanto, uma vez que a técnica aqui apresentada tenha bons resultados, estudos similares podem ser feitos para aumentar o escopo dos resultados. No trabalho, ainda é apresentada uma forma de minimizar o problema encontrado no óleo através de um processo para redução do teor de cobre. Embora essa técnica tenha

apresentado bons resultados, sabe-se que há influência de demais componentes no óleo, o que não é trabalhado no artigo.

Já em (3) é apresentada a utilização da espectroscopia no infravermelho próximo com uma abordagem mais voltada para a composição dos grupos estruturais do meio. O trabalho avaliou a correlação dos picos de absorção ao longo da frequência escolhida com o envelhecimento do óleo. Embora esse artigo apresente resultados ao longo do texto, a falta de gráficos e tabelas dificultam a dimensão e precisão da técnica. Além disso, não são apresentados registros fotográficos do experimento ou um esquemático do que foi reproduzido, o que dificulta a compreensão sobre a complexidade da aplicação real da técnica.

Enquanto isso, o artigo (4) apresentou o método da espectroscopia da impedância sequencial-paralela ressonante para relacionar a dependência da impedância do sistema do transformador com as características de tangente de perdas, permitindo assim determinar a impedância do óleo e caracterizar seu estado.

Um artigo muito interessante na área de qualidade de óleos de transformadores é (5). Nele é possível ver a importância de uma técnica que apresente resultados mais rápidos sobre a qualidade do óleo. Embora tenha sido apresentada uma redução considerável da nova técnica em relação à instrumentos tradicionais, o tempo alcançado ainda foi de 16 minutos em laboratório. Quando o experimento é realizado em campo, o tempo para a medição é maior. Além disso, a técnica necessita da extração de uma parte de papel isolante junto ao óleo, o que torna o processo mais invasivo.

No artigo (6) é mostrado que as impurezas no óleo do transformador atenuam um sinal ultrassônico, podendo estabelecer uma correlação entre os sinais de teste e os fatores de perda do dielétrico. Mostrou também que essa forma de teste não prejudica o óleo e pode servir como uma forma de monitoramento online. É interessante notar como mais uma vez os resultados são obtidos a partir de um processo de absorção no sistema. Esse mesmo princípio é adotado na espectroscopia e também será apresentado nesta dissertação. Para alcançar o resultado final no artigo, é utilizado um método computacional de redes neurais para a previsão dos resultados. Isso indica que uma grande quantidade de dados é necessária para que haja bons resultados.

Além das técnicas apresentadas nos artigos acima, em (7) é feita a comparação entre dois métodos de medição da tangente de perdas, o Método da Onda Quadrada Portátil e a Ponte Convencional. O artigo apresenta resultados similares entre os dois métodos e destaca ainda que a tangente de perdas é muito sensível a vários produtos contaminantes no óleo, porém não é capaz de determinar qual é o componente particular. O que será apresentado nesta dissertação é aplicada apenas a um composto, a água. Entretanto, espera-se que em trabalhos futuros possa-se alcançar resultados com outros compostos que também são conhecidos por influenciar na qualidade do óleo do transformador.

Em (8) é destacado a importante relação entre a qualidade do óleo com a presença de água. O trabalho apresenta a influência da temperatura nos isolantes, e a presença de água gera impactos perceptíveis nos resultados. A análise é feita através da permissividade complexa, o que casa de forma interessante com esta dissertação.

Além de determinar a qualidade do óleo para previsão de futuras falhas, é importante notar que também podem ser estudados problemas relacionados às perdas. O artigo (9) determinou a potência total perdida no transformador, destacando as perdas no papel e no óleo. O resultado apresentado é importante pois mostra que as maiores perdas aconteceram no óleo e isso é justificado pelo maior volume de óleo em relação ao papel. Isso corrobora com esta dissertação, que busca em um primeiro momento analisar os impactos da quantidade de água apenas no óleo. Futuramente, além da análise do envelhecimento óleo, poderão ser estudados impactos atuais transformador, mesmo sem falhas.

Se tratando da quantidade de água em óleo, o artigo (10) trás resultados relativos à medição desse teor. Para isso, foi utilizado um sensor capacitivo mergulhado no óleo do transformador, que é capaz de identificar a variação da água a partir da variação do Ganho de Tensão do sistema montado. Esse ganho, por sua vez, sofre tais variações por conta da mudança da permissividade elétrica relativa. O artigo apresenta bons resultados, entretanto o dispositivo montado possui grandes dimensões, o que torna necessário extrair parte do óleo do transformador para as medições e também gera maiores dificuldade de deslocamento para o campo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, oferecendo uma organização lógica e sequencial para a apresentação dos temas abordados. O primeiro capítulo, chamado de Introdução, oferece uma visão geral do conteúdo da dissertação. São apresentadas a motivação, objetivo, revisão bibliográfica, além desta estrutura.

Em seguida, no capítulo Teoria, são apresentados os fundamentos das linhas de transmissão com o foco final na microfita e são exploradas informações mais detalhadas sobre os óleos utilizados nos transformadores de potência. Esse capítulo é essencial para o entendimento do trabalho, uma vez que os resultados se baseiam no estudo teórico das linhas de transmissão e suas interações com o óleo e a água.

O terceiro capítulo, denominado Metodologia, apresenta os procedimentos experimentais, destacando os materiais e equipamentos utilizados na condução dos experimentos. Também são mostrados os resultados relativos às simulações realizadas.

Posteriormente, no capítulo Resultados, todos os dados obtidos são apresentados de maneira sistemática, acompanhados de interpretações correspondentes derivadas das

medições realizadas.

Por último, o quinto capítulo, Conclusão, põe um fim à dissertação com uma reflexão acerca dos resultados alcançados, ressaltando as implicações e as possibilidades de trabalhos futuros.

2 TEORIA

2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são peças fundamentais dos sistemas de telecomunicações, utilizadas para transmitir sinais elétricos de um ponto a outro. Elas estabelecem conexões entre vários dispositivos, como antenas, amplificadores, filtros e outros componentes, com o intuito de garantir a mínima perda e distorção ao transmitir os sinais. A estrutura desse tipo de linha é projetada de modo a propagar ondas eletromagnéticas no modo transversal eletromagnético (TEM), onde não há componentes do campo elétrico ou magnético na direção de propagação. Isso requer, pelo menos, dois condutores paralelos, geralmente envolvidos por um material isolante dielétrico homogêneo, como o ar (12).

As soluções para os problemas com linhas de transmissão podem ser dadas tanto a partir do modelo de circuitos elétricos quanto pela análise dos campos (12). O primeiro se mostra mais simples e é muito utilizada na análise das LT's. A seguir será apresentado o modelo de circuitos elétricos em linhas de transmissão.

2.1.1 Modelo de circuitos elétricos

Primeiramente, é importante destacar o motivo pelo qual o modelo de circuitos elétricos pode ser utilizado. Para isso, deve-se lembrar que a linha de transmissão é sempre formada por pelo menos dois condutores e que seu modo de propagação é o TEM (Transversal Eletromagnético) (14). Esse tipo de propagação é caracterizado pela ortogonalidade entre os campos elétrico e magnético e a direção de propagação da onda. Na Figura 1, é possível ver que o campo elétrico se direciona entre os condutores e o magnético ao redor dos mesmos, resultado obtido através de um software de simulação (CST Studio).

Com tais pontos destacados, é observado que em cada posição da linha há um potencial e uma corrente definidos exclusivamente pelos campos elétrico e magnético, respectivamente, presentes na seção transversal da linha. Essa relação pode ser vista pelas equações (13):

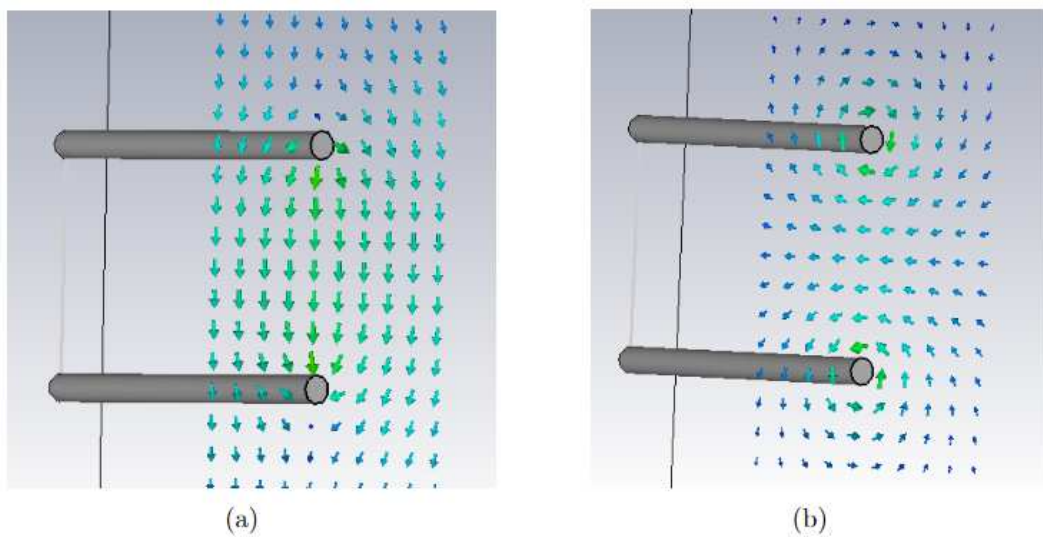
$$V = - \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.1)$$

$$I = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.2)$$

Nas equações, V é o potencial elétrico, \mathbf{E} é o vetor campo elétrico, I é a corrente e \mathbf{H} é o vetor campo magnético. Dessa forma, a propagação da onda eletromagnética pode ser representada pela propagação da tensão e da corrente (14).

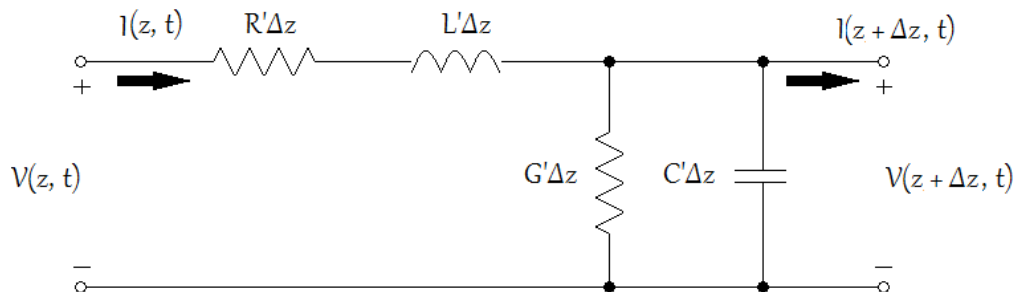
Uma parte da linha com comprimento infinitesimal Δz pode então ser modelada com o circuito da Figura 2, onde R' , L' , G' e C' são respectivamente a resistência em série, a indutância em série, a condutância em paralelo e a capacitância em paralelo, todos por unidade de comprimento (12). É importante destacar o que esses elementos indicam: a resistência R representa a resistência nos condutores devido a condutividade finita dos mesmos. A indutância L significa a auto indutância nos condutores. A condutância G aparece devido ao dielétrico não ser perfeito, ou seja, está sujeito à correntes de fuga. E capacitância C ocorre devido à proximidade entre os condutores (12).

Figura 1 – Distribuição dos campos (a) elétrico e (b) magnético.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software CST Studio (2023).

Figura 2 – Modelo de circuitos elétricos para a linha de transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É interessante notar que a Figura 2 apresenta um circuito que pode ser resolvido através das análises de malhas e de nós, que são conhecidas técnicas da teoria de circuitos.

Assim, aplicando a Lei de Kirchhoff e considerando o limite de $\Delta z \rightarrow 0$, chega-se nas expressões (14):

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -Ri(z, t) - L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = -Gv(z, t) - C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Em um sinal senoidal estacionário e com a utilização de fasores, as equações 2.3 e 2.4 se tornam (14):

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (2.5)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (2.6)$$

Isolando $I(z)$ e $V(z)$ e substituindo nas equações, chega-se então em (14):

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(z) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C)I(z) = 0 \quad (2.8)$$

É possível identificar claramente que as equações acima possuem o perfil de equações da onda, tanto para a tensão quanto para a corrente. Sabe-se portanto, que a solução para ambas as equações é (14):

$$V_s(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (2.9)$$

$$I_s(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (2.10)$$

onde, $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$ é a constante de propagação, dada em m^{-1} . Essa constante pode ser separada em sua parte real, representando o coeficiente de perdas (Np/m), e sua parte imaginária, representando a constante de fase (rad/m). Entende-se a solução das equações 2.9 e 2.10 como o resultados de ondas que se propagam em sentidos opostos. Essa interpretação é extremamente interessante em linhas de transmissão, uma vez que descasamentos nos terminais da linha impactam no surgimento de sinais refletidos. No domínio do tempo, as equações 2.9 e 2.10 se tornam:

$$V(z, t) = V_0^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + V_0^- e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \quad (2.11)$$

$$I(z, t) = I_0^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + I_0^- e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \quad (2.12)$$

2.1.2 Impedância característica

Neste ponto, é importante inserir o conceito de impedância característica. A impedância característica (Z_0) representa a relação entre a onda de tensão e a de corrente que se propagam no sentido positivo, para qualquer ponto da linha (13).

A impedância característica pode ser um valor complexo, é expressa em ohms e pode ser calculada usando a equação (12):

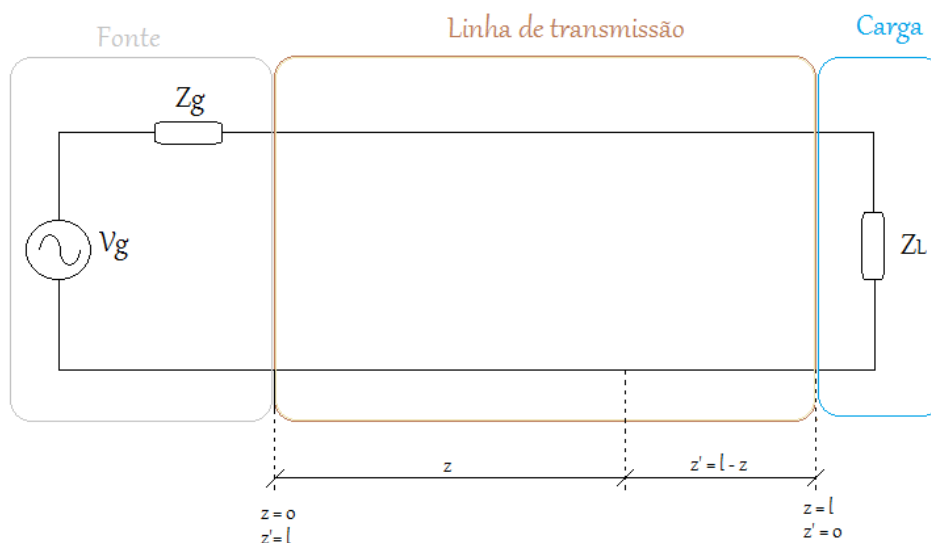
$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.13)$$

onde ω é a frequência angular da onda. Além dela, também é muito utilizada a admitância característica, que é o inverso da impedância, ou seja $\frac{1}{Z_0}$.

2.1.3 Impedância de entrada

O cálculo da impedância de entrada em um ponto é geralmente dado em função da distância em relação à carga. Assim, a Figura 3 representa a forma inicial que deve-se considerar para o cálculo. Nela, pode-se perceber que a referência z' se aplica na divisão da linha de transmissão com a carga, tendo nesse ponto seu valor zero. No ponto de divisão da linha de transmissão com a fonte, seu valor representa o comprimento total da linha, l .

Figura 3 – Modelo para cálculo da impedância de entrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Através de algumas manipulações matemáticas a partir das equações 2.9 e 2.10, chega-se na expressão da impedância de entrada, extremamente útil para projetos de casamento de impedância (13).

$$Z(z') = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma z'}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma z'} \quad (2.14)$$

É interessante notar que a impedância apresenta valores complexos, incluindo perdas, o que se aproxima de situações reais. Entretanto, é possível trabalhar em problemas em que se aproxima as perdas de zero e, nesses casos, a equação 2.14 se simplifica para (13):

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tan \beta l}{Z_0 + Z_L \tan \beta l} \quad (2.15)$$

2.1.4 Coeficiente de reflexão e VSWR

Além da impedância de entrada, outra importante propriedade das linhas de transmissão é o coeficiente de reflexão. Quando uma onda eletromagnética atinge uma interface entre dois meios com diferentes impedâncias, parte da energia da onda é refletida de volta à fonte e parte é transmitida. O coeficiente de reflexão é uma medida da razão entre a amplitude da onda refletida e a amplitude da onda incidente (15).

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} \quad (2.16)$$

O coeficiente de reflexão é frequentemente representado pela letra grega Γ e, a partir de algumas manipulações matemáticas, pode ser calculado a partir das impedâncias da carga e da linha em questão, Z_L e Z_0 , por meio da equação (12):

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.17)$$

O coeficiente de reflexão é uma quantidade adimensional, com valores que variam entre -1 e 1. Quando $\Gamma = 0$, toda a energia é transmitida e não há reflexão. Quando $\Gamma = 1$, toda a energia é refletida e não há transmissão. Quando $\Gamma = -1$, a fase da onda refletida é invertida em relação à fase da onda incidente (15).

O coeficiente de reflexão é uma propriedade importante em muitas aplicações, incluindo em sistemas de antenas, dispositivos de radar e transmissão de dados. Para que esses sistemas funcionem corretamente, é necessário minimizar o coeficiente de reflexão, de modo a maximizar a transmissão de energia entre os meios de origem e destino. Isso pode ser alcançado através do uso de técnicas de casamento de impedância, que ajustam as impedâncias dos meios de origem e destino para minimizar o coeficiente de reflexão.

Além de afetar a transmissão de energia entre os meios de origem e destino, o coeficiente de reflexão também está relacionado às perdas de retorno. As perdas de retorno referem-se à perda de potência causada pela reflexão de energia nas interfaces entre dois meios. Essas perdas podem resultar em uma diminuição na eficiência do sistema, bem como em uma diminuição da qualidade do sinal transmitido.

A perda de retorno deve ser expressa em decibéis (dB), que é uma unidade logarítmica. A equação para a perda de retorno em dB (RL) é (12):

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (2.18)$$

As perdas de retorno podem também ser expressas em termos de VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), que é uma medida da relação entre o pico de tensão na linha de transmissão e o mínimo de tensão na linha. O VSWR pode ser calculado a partir do coeficiente de reflexão por meio da seguinte equação (16):

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.19)$$

Quando o coeficiente de reflexão é zero, o VSWR é 1, o que indica que toda a energia é transmitida sem perdas. Quanto maior o valor do VSWR, maior é a perda de energia na linha de transmissão. É importante notar que valor do VSWR depende exclusivamente do módulo do coeficiente de reflexão, ou seja, nenhuma informação em relação à fase é visualizada sobre seu valor.

Em resumo, o coeficiente de reflexão e as perdas de retorno estão intimamente relacionados e são importantes para a transmissão eficiente de energia e sinal em linhas de transmissão. O VSWR e a perda de retorno em dB são medidas comuns para avaliar as perdas de retorno, e reduzir seus valores é fundamental para garantir a eficiência do sistema. O uso de técnicas de casamento de impedância é essencial para minimizar o coeficiente de reflexão e, por sua vez, minimizar as perdas de retorno e melhorar a qualidade do sinal transmitido.

2.1.5 Tipos de linha de transmissão

As linhas de transmissão são elementos essenciais para a comunicação, permitindo que sinais sejam transportados sem perda significativa de energia ou qualidade. Existem diferentes tipos de linhas de transmissão, cada um com suas próprias características e aplicações específicas. Entre tanto, as três mais comuns podem ser destacadas abaixo:

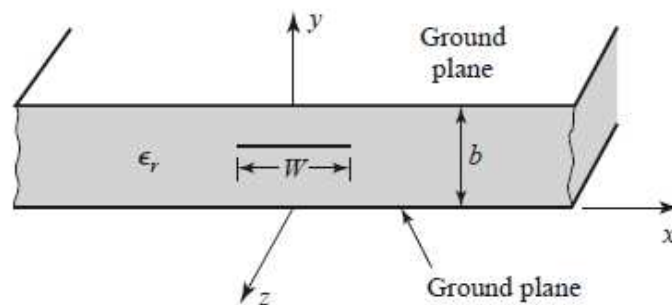
- Cabo coaxial: Ele é composto por um condutor central cercado por um isolante dielétrico, seguido por uma malha metálica e uma capa externa. Essa configuração

permite a transmissão de sinais de alta frequência com pouca perda de energia. Por isso, é frequentemente utilizado em redes de televisão a cabo, transmissões de dados e telefonia (14).

- Linha paralela: Ela consiste em dois condutores paralelos separados por um isolante dielétrico. Alguns exemplos são as linhas aéreas e telefônicas vistas em áreas rurais e as linhas planas de entrada de uma antena no telhado até um receptor de televisão (14).
- Linhas formadas por planos paralelos: Como o próprio nome diz, esse tipo de LT é formada pois planos condutores paralelos separados por um plano dielétrico. Esse tipo de linha é muito comum para aplicações em frequências de microondas, onde a fabricação dessas linhas se torna muito simples (14).

Em (14), os planos paralelos também são identificados como *striplines* ou *microstrips*. Entretanto, em outras literaturas como (12), essas estruturas são identificadas separadamente. Dessa forma, uma *stripline* é vista como uma fina tira condutora que está centrada entre dois planos terra condutores, largos e com certa separação. A região entre os planos de terra é preenchida com um material dielétrico. Essa configuração garante a propagação do modo TEM para esse tipo de LT. Na Figura 4 é possível conferir sua estrutura.

Figura 4 – Estrutura de uma *stripline*.



Fonte: (12).

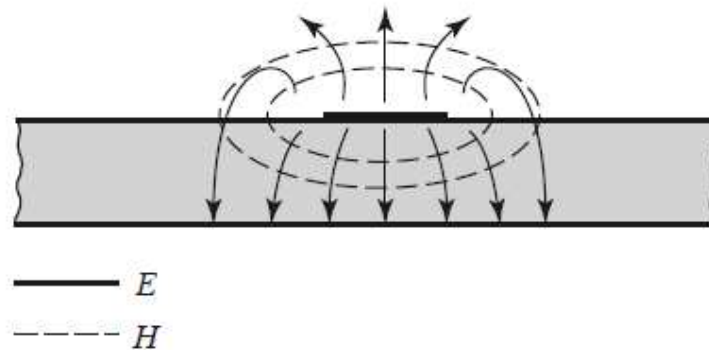
Já a microfita é uma linha de transmissão que consiste em um substrato dielétrico plano com uma linha de transmissão condutiva impressa em sua superfície. Ela é comumente usada em antenas de satélite, sistemas de radar e dispositivos de comunicação sem fio. A microfita apresenta uma largura de banda mais ampla do que o cabo coaxial, mas também pode ter perdas significativas devido à absorção do substrato.

2.1.6 Microfita

Embora nos anos de 1940 algumas linhas de transmissão do tipo *stripline* já haviam sido criadas, foi apenas em 1951 que R. M. Barrett relatou essas estruturas. Um ano após isso, Grieg e Engelmann apresentaram a microfita (19). Com o tempo, a tecnologia evoluiu e as microfitas passaram a ser utilizadas em aplicações comerciais e em dispositivos de comunicação sem fio.

Diferentemente das *striplines*, as microfitas apresentam uma face da fita voltada para um substrato, dielétrico, e a outra face se mantém voltada para o ar. Os campos nas linhas de transmissão se formam entre e ao redor dos condutores. A consequência disso nas microfitas é que os campos devem se propagar em dois meios diferentes e, assim, terão duas velocidades de fase diferentes. A Figura 5 apresenta a distribuição dos campos analisando a seção transversal. Isso faz com que, na verdade, a propagação na microfita ocorra em um modo híbrido TM-TE. Porém, como na maioria das aplicações o dielétrico é muito fino, ou seja, muito menor que o comprimento de onda, a intensidade dos campos se mantém muito maior no dielétrico que no ar e a propagação pode ser vista como quase-TEM (12).

Figura 5 – Campos elétrico e magnético na microfita.

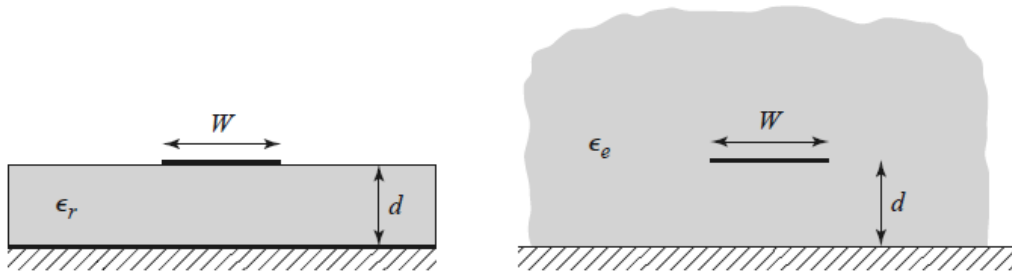


Fonte: (12).

Como forma de análise e projeto, os dois meios de propagação, substrato e o ar, podem ser substituídos por apenas um, que represente um efeito combinado. Isso é equivalente a inserir a fita um meio homogêneo, capaz de concentrar todo o campo nele, e pode ser visualizado na Figura 6. Dessa forma, a permissividade elétrica desse novo meio é vista como uma permissividade elétrica efetiva (ϵ_{eff}), e seu valor depende diretamente da permissividade elétrica relativa do substrato e das dimensões da microfita. A equação abaixo apresenta o cálculo necessário (12).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{W}}} \quad (2.20)$$

Figura 6 – Modelo de meio homogêneo para a microstrip.



Fonte: (12).

Uma vez que o ar possui a permissividade relativa próxima a um e o substrato um valor maior (ϵ_r), a permissividade efetiva se mantém entre 1 e ϵ_r (12).

Em um projeto de microfita, um dos parâmetros mais importantes a ser calculado é a impedância característica. Quanto mais próximo seu valor em relação à fonte e à carga, menores serão as perdas por reflexão. Para esse cálculo, utiliza-se as equações:

- $\frac{W}{d} < 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) \quad (2.21)$$

- $\frac{W}{d} > 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1}{\frac{W}{d} + 1.393 + 0.0667 \ln \left(\frac{W}{d} \right) + 1.444} \quad (2.22)$$

É interessante notar que as dimensões e a permissividade elétrica efetiva são apresentadas como parâmetros de entrada, sendo necessário seu conhecimento prévio.

Até o momento, foram apresentados os cálculos para a determinação de parâmetros a partir do modelo de circuitos elétricos e também para o projeto dimensional da linha com base na permissividade elétrica da placa. Para deixar esta dissertação mais objetiva, foi desconsiderada parte da demonstração da teoria de eletromagnetismo, assim como a teoria da propagação de ondas eletromagnéticas. Entretanto, aqui é necessário apresentar uma medida fundamental no entendimento das linhas de transmissão, a tangente de perdas, $tg\delta$. Essa medida é vista como a razão entre a parte real e imaginária da permissividade elétrica e pode ser visualizada na equação:

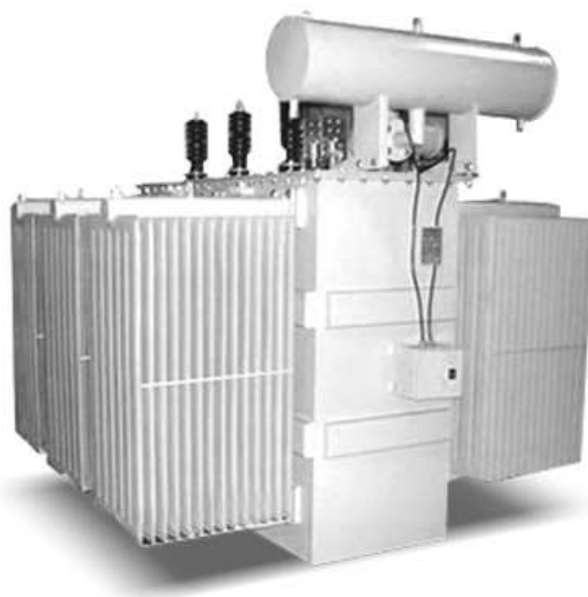
$$tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \quad (2.23)$$

Pela equação é possível ver a relação da tangente de perdas com a condutividade e com a frequência. Na próxima seção, será apresentado as características e importância dos óleos de transformadores de potência, ao qual é o material principal de análise.

2.2 ÓLEO DE TRANSFORMADOR

Os óleos de transformador são fundamentais para o funcionamento adequado de equipamentos elétricos, como transformadores e capacitores. Eles desempenham diversas funções importantes, incluindo a isolação elétrica, a dissipação de calor e a proteção contra a corrosão. Os transformadores de potência, por sua vez, são dispositivos elétricos estáticos, ou seja sem partes móveis contínuas, usados em sistemas de energia elétrica para transferir energia entre circuitos através do uso de indução eletromagnética. Quando sua operação é para potências acima de 500kVA, sua denominação passar a ser transformador de potência (17). A Figura 7 representa um transformador de potência trifásico.

Figura 7 – Transformador de potência trifásico.



Fonte:
<https://www.energitrafo.com.br/transformador-a-oleo/>.

A qualidade dos óleos de transformador é crucial para garantir a segurança e a confiabilidade desses equipamentos. Óleos de baixa qualidade podem levar a falhas no sistema elétrico, resultando em danos materiais e trazendo riscos físicos a humanos.

Dentre as características mais importantes dos óleos de transformador estão sua viscosidade, ponto de fulgor, ponto de fluidez, acidez, teor de umidade e rigidez dielétrica

(20) (21) (22). Essas propriedades são determinantes para a performance dos óleos de transformador e, por consequência, para o funcionamento adequado dos equipamentos elétricos.

Existem duas principais formas de gerar isolamento para o transformador: isolamento líquido e isolamento sólido (22).

O isolamento líquido é uma forma comum de isolamento em transformadores. Nessa técnica, é utilizado um óleo isolante, geralmente o óleo mineral, que é capaz de isolar a alta tensão presente no núcleo do transformador. Esse óleo também ajuda a dissipar o calor gerado durante a operação do transformador, mantendo a temperatura do equipamento sob controle.

O isolamento sólido, por outro lado, utiliza materiais sólidos como isolantes, como papel impregnado com resina ou polímeros. Esse tipo de isolamento é utilizado em transformadores de alta tensão e em equipamentos elétricos que operam em condições extremas, como altas temperaturas ou em ambientes sujeitos a radiação ionizante.

Ambas as técnicas de isolamento são importantes para garantir a segurança e eficiência do transformador e do sistema elétrico como um todo. É importante que o isolamento seja feito com materiais de qualidade e que sejam realizadas inspeções regulares para garantir a integridade do isolamento e a confiabilidade do equipamento elétrico.

Os transformadores de potência são projetados para operar com óleos isolantes específicos que oferecem uma série de propriedades desejáveis, como boa estabilidade térmica e elétrica, baixa viscosidade e boa capacidade de transferência de calor (20). Existem alguns tipos de óleos usados em transformadores de potência (20):

Óleo mineral: é o tipo de óleo isolante mais comum e é derivado do petróleo. Ele tem um alto ponto de fulgor e é altamente resistente à oxidação. O óleo mineral é uma escolha econômica e é amplamente utilizado em transformadores de potência devido à sua disponibilidade e baixo custo (23).

Óleo ester sintético: é uma alternativa ao óleo mineral e geralmente formado a partir de uma molécula com mais de um grupo funcional de álcool com ácidos carboxílicos. Os óleos sintéticos algumas vantagens sobre os óleos minerais, como maior estabilidade térmica, menor viscosidade e maior resistência à oxidação. Eles também são menos inflamáveis do que os óleos minerais e oferecem melhor desempenho em temperaturas extremas. No entanto, os óleos sintéticos tendem a ser mais caros do que os óleos minerais. É importante destacar que a utilização de óleos vegetais em transformadores de potência ainda não é tão difundida quanto a dos óleos minerais, uma vez que há alguns desafios a serem superados em relação à compatibilidade com materiais e a possibilidade de contaminação do óleo (23).

Além desses dois tipos principais, há também os óleos vegetais que são obtidos a

partir de grãos ou sementes de plantas. As mais comuns são a semente de girassol, a soja, o milho e a colza (22). Após diversos processos obtém-se então o óleo refinado.

Uma das principais maneiras de avaliar a qualidade do óleo de transformadores é por meio de testes físico-químicos. Esses testes avaliam as características físicas e químicas do óleo, como sua viscosidade, acidez, cor, teor de água, teor de gases dissolvidos, entre outras propriedades. Esses testes são importantes porque as características do óleo podem afetar a sua capacidade de isolamento elétrico, a sua estabilidade térmica e a sua vida útil.

Um dos testes mais comuns é o teste de rigidez dielétrica, que mede a capacidade do óleo de resistir a um campo elétrico (2). Esse teste avalia a rigidez dielétrica do óleo, que é a tensão elétrica máxima que o óleo pode suportar antes de ocorrer uma descarga elétrica. O resultado desse teste indica se o óleo é capaz de fornecer um isolamento elétrico adequado, o que é essencial para a operação segura e confiável do transformador.

Outro teste importante é o teste de teor de água, que mede a quantidade de água presente no óleo. A presença de água pode afetar negativamente a rigidez dielétrica do óleo e reduzir sua capacidade de isolamento elétrico. O teste de teor de água é importante porque o óleo deve ser mantido seco para garantir sua eficácia como isolante elétrico (23).

Além disso, o teste de teor de gases dissolvidos pode indicar a presença de problemas no transformador, como descargas parciais ou superaquecimento. O resultado desse teste pode ajudar a identificar a necessidade de manutenção preventiva do transformador.

Medir a qualidade do óleo de transformadores de potência é uma tarefa importante, mas que pode apresentar desafios. Isso ocorre porque a qualidade do óleo pode ser afetada por diversos fatores, como idade do transformador, condições de operação, contaminação e outros.

Uma das dificuldades encontradas na medição da qualidade do óleo de transformadores é a variação das condições de operação. Os transformadores de potência operam em condições diversas, incluindo variação de temperatura, carga e níveis de umidade. Essas variações podem afetar a qualidade do óleo de transformadores de potência, tornando mais difícil a avaliação da sua qualidade.

Outra dificuldade é que o óleo pode sofrer contaminação por diversas fontes, como partículas metálicas, gases e umidade. A contaminação do óleo pode afetar suas propriedades físicas e químicas, como a viscosidade, a acidez e a rigidez dielétrica. É importante que sejam feitas análises do óleo para identificar a presença de contaminação e realizar ações corretivas, como filtragem ou substituição do óleo.

Além disso, alguns equipamentos e testes utilizados na medição da qualidade do óleo podem apresentar limitações. Por exemplo, o teste de rigidez dielétrica é uma técnica que pode fornecer informações importantes sobre a qualidade do óleo, mas pode não detectar problemas como a presença de partículas ou outras formas de contaminação,

como apresentado na seção de Estudo Bibliográfico. É importante, portanto, utilizar diferentes técnicas e testes para obter uma avaliação mais completa da qualidade do óleo de transformadores de potência.

Com base no que foi apresentado, fica evidente a importância do óleo isolante em transformadores de potência, uma vez que ele desempenha um papel crítico na operação, confiabilidade e durabilidade dos equipamentos. Para garantir que o óleo esteja em boas condições, é preciso realizar testes regulares para avaliar a qualidade do óleo. Nesse sentido, é necessário implementar uma metodologia confiável e eficiente para a medição da qualidade do óleo de transformadores. A seguir, é apresentado o método utilizado neste trabalho para a medição da quantidade de água no óleo que, como foi dito, é um indicador direto da qualidade do mesmo.

3 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é apresentar a metodologia utilizada no desenvolvimento do sensor, descrevendo as etapas e os procedimentos adotados para atingir os objetivos propostos. Para isso, são detalhados os passos necessários para o desenvolvimento do modelo matemático da linha de transmissão planar, a construção do sensor e os testes experimentais realizados.

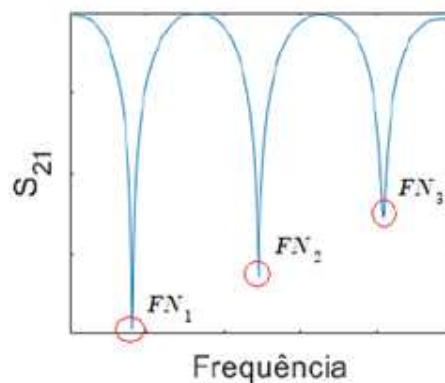
São abordados, ainda, aspectos relacionados à seleção de materiais e equipamentos, assim como à metodologia de coleta e análise de dados. São exploradas também as potenciais aplicações práticas do dispositivo desenvolvido. Como complemento, uma simulação computacional é conduzida por meio do software CST Studio, a fim de adquirir maior previsibilidade para os resultados iniciais, ainda sem a utilização do óleo.

As limitações e os desafios enfrentados na utilização da metodologia adotada, bem como as possíveis melhorias que poderão ser implementadas em trabalhos futuros, também são apresentadas.

3.1 SENSOR BASEADO EM LINHA DE TRANSMISSÃO PLANAR

O trabalho se baseou na produção de uma linha de transmissão planar ao qual sua resposta em frequência seja sensível a variações de materiais sobre a placa. A utilização de um *stub* pode ser um facilitador nessa medição, uma vez que sua implementação gera faixas de frequências com máximos e mínimos de transmissão. A Figura 8 apresenta esse perfil, onde FN (Frequência de Nulo) representa as frequências de nulo.

Figura 8 – Perfil de S_{21} para a linha de transmissão com *stub*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse perfil carrega informações importantes sobre o meio de propagação. Os pontos

onde há mínima transmissão, chamados de frequências de nulo, possuem uma relação direta com a parte real da permissividade elétrica, ou seja, à medida que seu valor altera, há um deslocamento desses pontos. Já os pontos de máximo, onde há máxima transmissão, sua amplitude (S_{21}) mantém maior relação com a parte imaginária da permissividade elétrica, ou seja, sobre as perdas ao longo da transmissão. Comumente essas perdas são analisadas pela tangente de perdas. Na prática, tanto os pontos de máximo quanto de mínimo sofrem influência da parte real e imaginária da permissividade, entretanto os pontos de mínimo possuem valores muito baixos para uma análise de perdas. O comprimento de onda para cada nulo pode ser dado por:

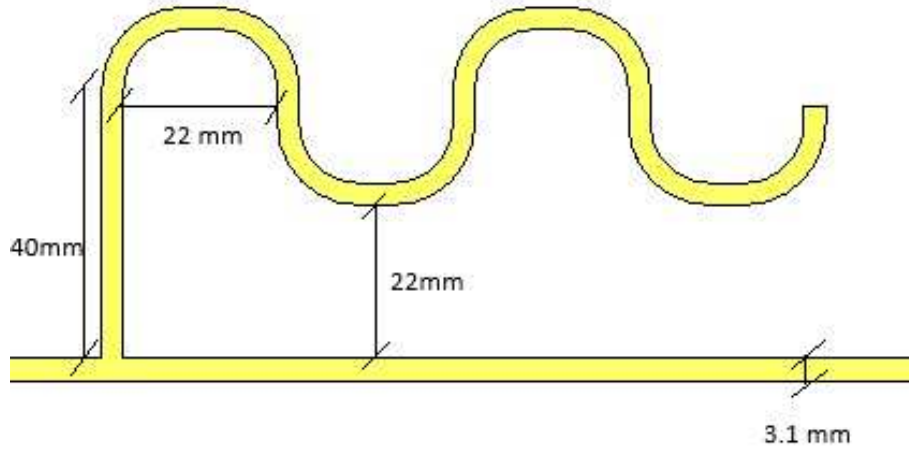
$$\lambda_n = \frac{v}{FN_n} = \frac{4L'}{(2n - 1)} \quad (3.1)$$

onde λ_n e FN_n são o comprimento de onda e frequência de nulo de ordem n , respectivamente.

Os parâmetros para para o projeto da linha de transmissão a ser utilizada são a impedância característica da linha (Z_0), a largura da fita (W), a altura do substrato (d) e a permissividade efetiva (ϵ_{eff}). A definição de quais são parâmetros de entrada depende de algumas restrições do projeto, como por exemplo, as placas disponíveis e os equipamentos de medição. Considerando assim, que a impedância de saída dos equipamentos de medição é de 50Ω , e que as placas disponíveis são de FR4, com valor de permissividade estimada em 4.3 e com espessura de 1.6 mm, o único parâmetro em aberto é a largura da fita. Dessa forma, através da Equação 2.22, chega-se em um valor de 3.1 mm para W .

Após o projeto da linha, é realizado o projeto do *stub*. Para isso é necessário determinar sua largura e comprimento. Como sua impedância deve ser a mesma que a da linha, a largura também precisa se manter a mesma, tornando necessário apenas definir o comprimento L' . Este é um ponto muito importante, pois seu valor está diretamente ligado às frequências de nulo que serão analisadas. Através da Equação 3.1, é possível notar que quanto maior o valor de L' , mais baixa é a frequência do primeiro nulo encontrado. Assim, é possível projetar um comprimento para o stub que seja o suficiente para medir a permissividade a partir de uma frequência mínima. Para o caso desta linha, com um comprimento de 100 mm, seria possível determinar ϵ_r já em frequências próximas a 400 MHz. Por outro lado, quanto maior o valor para L' , maior é a área da placa utilizada, e isso não é algo desejável. A Figura 9 representa a LT projetada.

Para um estudo mais apropriado, é desejável um projeto inicial realizado em simulação. A simulação permite validar previamente o conceito e a realizar ajustes que seriam mais demorados e custosos comparados à confecção real. A seguir, é apresentado o capítulo de simulação.

Figura 9 – Perfil da linha de transmissão com *stub* curvo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 – Dimensões da linha projetada.

Medida	Sigla	Valor
Comprimento da fita	L	85,7
Espessura da fita	t	0,035
Comprimento do <i>stub</i>	L'	100
Altura do substrato	h	1,6
Constante Dielétrica	ϵ_r	4,3
Tangente de perdas	$tg\delta$	0,0025

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 SIMULAÇÃO

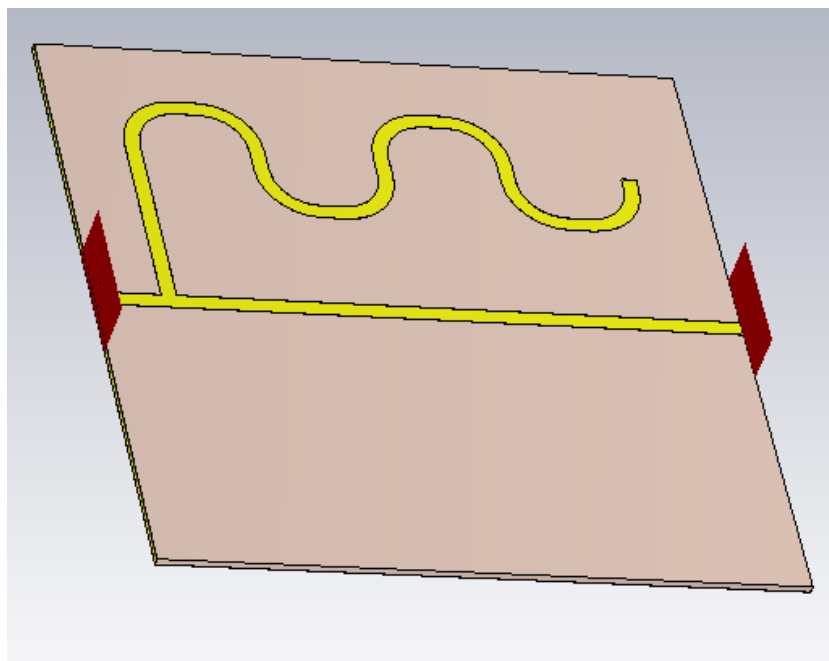
Uma vez que foi realizado um projeto de uma linha de transmissão planar, a melhor forma de verificar sua resposta inicialmente é através de uma simulação. Existem diversos softwares de simulação dedicados a problemas eletromagnéticos, como o HFSS,

FEKO, COMSOL, CST Studio, PathWave Design Studio, dentre outros. Para este trabalho foi escolhido o CST Studio em todas as simulações realizadas. Através desse software, é possível verificar as respostas em frequência e análise dos campos que serão aqui apresentados.

Os dados da Tabela 1 foram utilizados como parâmetros para construção do sólido na simulação. Além disso, devido às limitações de frequência do VNA que seria utilizado nas medições, foi definida uma faixa de simulação variando entre 200MHz e 4GHz. Embora a frequência máxima seja relativamente baixa e limite os resultados, sua simulação mostra-se mais simples do ponto de vista do simulador, uma vez que a região de simulação é definida por pequenas células, chamadas de "Meshcells", que são proporcionais à frequência de simulação. Quanto maior a quantidade de células, maior e mais demorada a simulação será. Além disso, a versão estudante do software gera uma limitação de 100.000 células. Na configuração final, a simulação apresentou 88.000 células.

A Figura 10 apresenta o sólido construído junto à interface do programa. Um ponto importante a se destacar são os *stubs*. Seu formato não linear foi pensado para ter um maior aproveitamento da placa, uma vez que um *stub* de 10cm necessitaria de pelo menos esse comprimento a mais na placa para comportá-lo. Com a estrutura curvada, a placa pôde ser consideravelmente reduzida. Na imagem, é possível notar estruturas retangulares nas extremidades da linha. Essas estruturas são chamadas de "Portas", e são responsáveis por injetar ou receber um sinal.

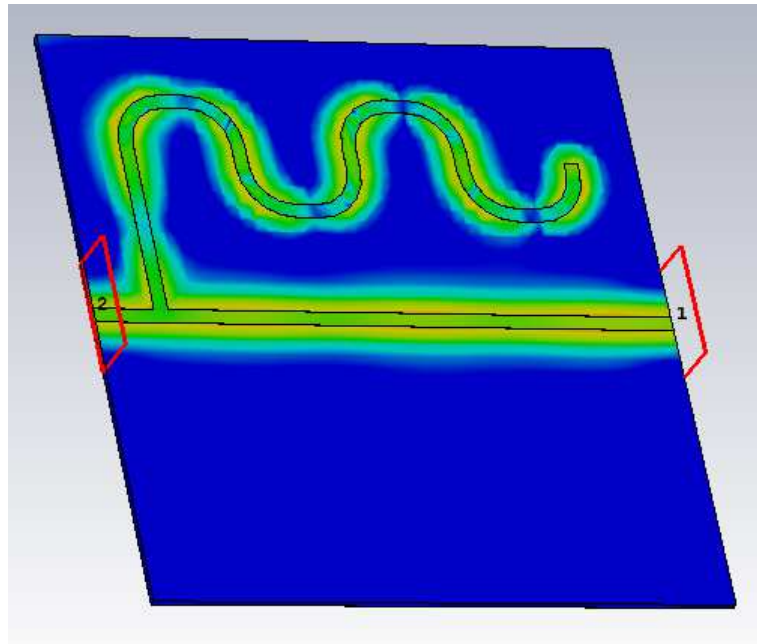
Figura 10 – Estrutura montada para simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software CST Studio.

Um cuidado especial foi tomado para que as curvas do *stub* não fizessem com que, em alguns trechos, as linhas se aproximassem paralelamente. Uma aproximação maior poderia gerar grandes efeitos capacitivos, alterando de forma indesejada as repostas. Não foram feitos testes para verificar os efeitos de uma maior aproximação, entretanto, através da resposta do campo elétrico, percebe-se baixa intensidade dos campos nas regiões de proximidade, como na Figura 11.

Figura 11 – Média do campo elétrico no tempo ao longo da LT.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software CST Studio.

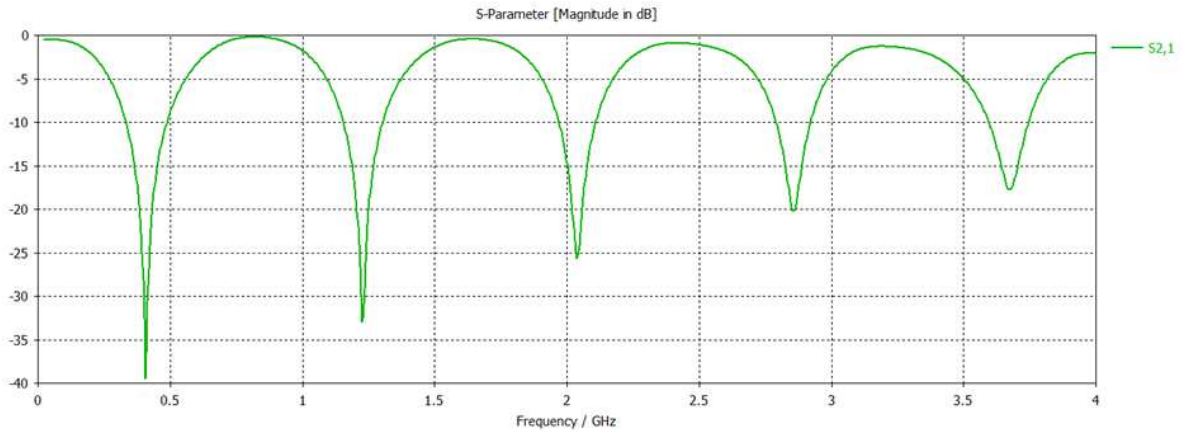
Com o sólido construído, foi rodada a simulação, com a solução no domínio do tempo, uma precisão de -30dB e com uma porta casada em 50 Ohms. Esse casamento na porta é especialmente importante para refletir um comportamento real onde a entrada do próximo sistema se encontra com uma determinada impedência. Uma vez que o dispositivo apresenta duas portas, é possível obter 4 respostas, sendo elas: S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22} . Pela teoria da matriz de espalhamento, esses parâmetros podem ser calculados por (12):

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \Big|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j} \quad (3.2)$$

onde, V_i^- é a onda de tensão refletida na porta i , e V_j^+ é a onda de tensão refletida na porta j . Ainda deve-se atentar ao fato de que todas as portas devem estar “caladas”, agindo simplesmente como cargas casadas, com exceção da porta j , responsável pela inserção do

senal. Sendo assim, a resposta de S_{21} entregue pelo software de simulação pode ser visto na Figura 12

Figura 12 – S_{21} simulado para a linha de transmissão com *stub*.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software CST Studio.

Para este trabalho, são utilizados prioritariamente as respostas de S_{21} , pois seu valor reflete a proporção de sinal que chega a segunda porta e isso será utilizado futuramente para montagem de um cenário de medição. Dessa forma, através do coeficiente de reflexão, é possível ver um perfil com diversos valores de máximo e mínimo, já esperados. Neste ponto é importante citar que a escolha de um *stub* com 10 cm de comprimento foi essencial para ter uma resposta com mais nulos dentro da faixa de frequência trabalhada. Caso o *stub* fosse menor, a distância entre cada nulo seria maior e, conseqüentemente, uma menor quantidade apareceria para essa faixa. Um questionamento pode surgir com isso: qual é a necessidade de uma quantidade maior de nulos? A resposta para isso envolve a quantidade de informações que é desejado extrair. Quanto mais máximos e nulos, maiores são os pontos onde uma análise pode ser feita. Além disso, é desejável um nulo próximo à frequência de 4 GHz, pois em teoria é uma frequência onde os efeitos da adição de água em óleo podem ser mais notáveis.

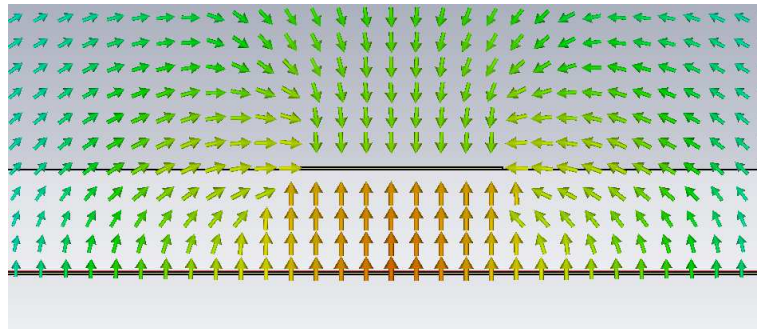
Através da Figura 12 é perceptível que, à medida que a frequência aumenta, os pontos de máximo vão reduzindo seu valor. Isso ocorre devido às perdas aumentarem no dielétrico à medida que a frequência aumenta. A simulação é capaz de identificar esse efeito pois o material inserido no substrato, fibra de vidro, apresenta um valor para a tangente de perdas (0,0025). Caso esse valor fosse zero, a curva de S_{21} apresentaria seus máximos muito mais próximo de 0dB.

Outra característica vista é o aumento do valor de S_{21} para os nulos com o aumento da frequência. Como os nulos indicam que a onda refletida no *stub* chegou em fase oposta

à onda presente na linha principal, quanto mais próximo de 0dB o valor do nulo, maior o indicativo que onda refletida no *stub* sofreu grandes perdas em relação à linha principal. Com o aumento da frequência as perdas aumentam, o que também gera esse efeito.

Por fim, é importante identificar através das simulações, a presença do campo elétrico fora do substrato da placa, ou seja, na parte superior. Isso foi discutido durante a seção de Teoria, mas sua identificação na simulação trás mais segurança ao projeto e também pode carregar algumas informações. Para isso, foi realizada a simulação e selecionada a frequência de 2 GHz para a verificação dos campos. Utilizando um plano frontal à placa, chegou-se na Figura 13. Nela, os campos se apresentam de maneira similar à teoria e indicam que um material colocado nessa porção superior pode alterar os resultados. Através das cores, também é possível verificar a intensidade dos campos, que claramente é muito menor fora do substrato. Pode-se concluir, dessa forma, que alterações no material do substrato gerariam maior sensibilidade. Entretanto, as mudanças de substrato são construtivamente muito mais complexas e diversas barreiras mecânicas aparecem no caminho. Dessa forma, foi descartada essa opção.

Figura 13 – Campo elétrico visto do perfil da linha de transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software CST Studio.

3.3 FABRICAÇÃO

A etapa de fabricação se inicia com a finalização das simulações. Com os resultados positivos, a confecção do dispositivo se torna mais confiável, com a expectativa de apenas alguns desvios. Uma das formas de fabricar o dispositivo simulado, é através do uso de uma máquina prototipadora. A máquina prototipadora consegue ter grande precisão e sua velocidade de fabricação é consideravelmente rápida. Para utilizá-la, é necessário um arquivo no formato .gbr (Gerber), o que pode ser exportado pelo software CST Studio. Para isso, são selecionadas as faces da fita superior e do ground e gerados arquivos separados para cada. Na máquina prototipadora, os arquivos são selecionados e o dispositivo pode

ser gerado. Neste trabalho foi utilizada uma máquina prototipadora LPKF, similar a Figura 14.

Figura 14 – Máquina prototipadora LPKF.



Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/prod/lpkf-laser-electronics/product-9183-435763.html>

Seguindo a simulação, foi utilizado para a confecção uma placa dupla face com substrato de fibra de vidro (FR-4) e com condutores de cobre. As dimensões novamente podem ser consultadas através da Tabela 1. Dessa forma, a Figura 15 apresenta a placa confeccionada.

Embora a simulação insira uma porta diretamente na linha de transmissão, na prática é necessário acrescentar um conector. Dessa forma, foi escolhido o conector SMA de montagem em painel fêmea reta através do furo, com impedância de 50 Ohms e com capacidade de operação até 18GHz. Para ligá-lo à placa, é necessária uma atenção maior à solda, uma vez que grandes ruídos podem aparecer quando se trabalha em altas frequências e a solda não fica aplicada da maneira correta. Garantindo isso, a resposta da placa deve sofrer uma baixa interferência do conector nos resultados.

Até este ponto, foi discutido apenas sobre a placa e sua confecção. Entretanto, o objetivo principal deste trabalho é a medição da quantidade de água em óleo de transformador, ou seja, para isso é necessário também construir uma estrutura que comporte esses materiais. Foi pensado em uma série de opções para isso, sendo possível tanto inserir a placa em recipiente com o óleo quanto inserir um recipiente de óleo acima da placa.

A primeira opção se tornou pouco viável devido à dificuldade em isolar o conector

Figura 15 – Placa confeccionada.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

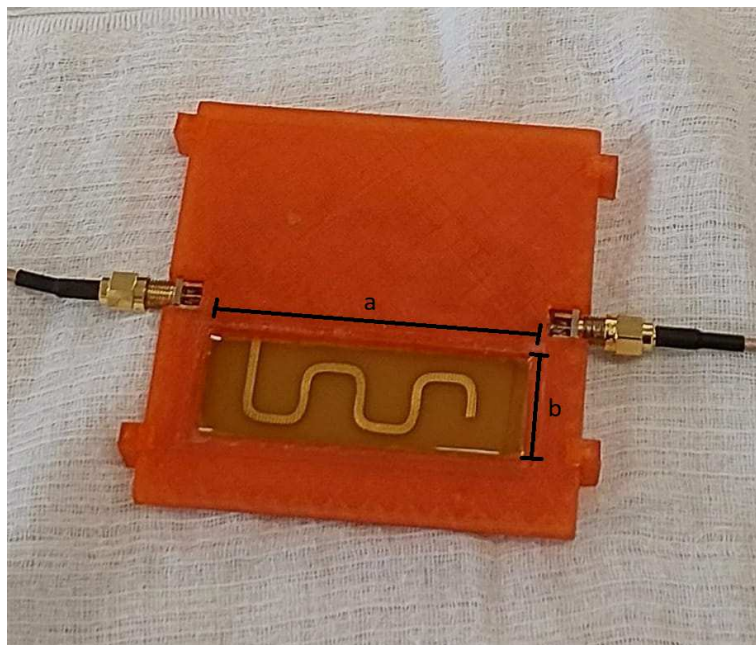
do óleo. Esse contato poderia fazer com que o óleo escorresse para dentro do conector e alterasse as respostas de maneira indesejada. Assim, optou-se por não trabalhar dessa forma.

A segunda opção pareceu ser mais simples e eficaz, e foi a escolhida. A possibilidade de produzir o recipiente a partir de uma impressora 3D abriu as portas para a construção de uma estrutura que envolvesse a placa, deixando apenas espaço para o óleo ser inserido. Neste caso, o desafio maior seria em isolar essa região aberta das demais. Sendo assim, foi utilizado cola quente, com quantidade suficiente para vedar a região e ao mesmo tempo não reduzir o volume de óleo que poderia ser inserido. Seguindo isso, a estrutura foi construída de modo a gerar um fácil encaixe, como apresentado na Figura 16.

O espaço para preencher com o óleo poderia ser posicionado de diversas formas, pegando toda a placa ou apenas algumas partes. Partindo da ideia de utilizar uma quantidade pequena de óleo e de que a alteração do meio de propagação do *sbut* já resultaria em mudanças na resposta da linha, foi escolhido o gap apenas nessa região. Dessa forma, as dimensões do gap são apresentadas na Tabela 2.

A partir da Figura 16, é possível ver que a construção foi realizada com sucesso.

Figura 17 – Dispositivo montado.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Tabela 2 – Dimensões da cavidade.

Medida	Sigla	Valor (mm)
Comprimento	a	71
Largura	b	23
Altura	c	4

Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

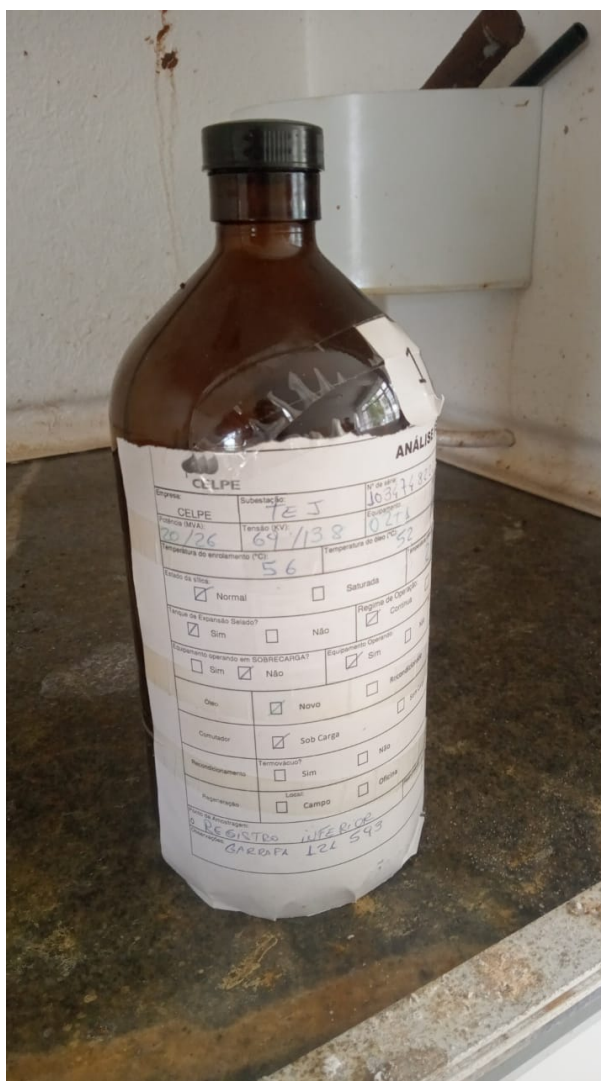
Uma vez que a placa foi construída em uma máquina prototipadora e a estrutura ao redor da placa por uma impressora 3D, o dispositivo apresentou boa precisão, o que faz com que houvessem boas expectativas em relação aos resultados. Com o dispositivo completamente montado, as medições podem ser realizadas. A seguir, serão apresentados os detalhes relacionados às medições.

3.4 MEDIÇÕES

O objetivo principal do dispositivo montado é o estudo da variação das respostas de coeficiente de transmissão à medida que é acrescentado um valor percentual de água no óleo. É possível esperar tanto variações no deslocamento das frequências de nulo, quanto na amplitude das curvas. Para isso, as respostas devem depender tanto das características elétricas dos materiais envolvidos quanto da proporção água/óleo.

Tratando da questão dos materiais envolvidos, foi separado um frasco com 400 ml de óleo mineral, que é o óleo utilizado em transformadores de potência. O óleo utilizado pode ser visualizado na Figura 17. Entretanto, o manuseio do óleo de transformador requer cuidados específicos devido às suas propriedades e potenciais riscos à saúde e ao meio ambiente. Sendo assim, foi necessário a utilização de EPIs adequados, como luvas e máscara, e uma câmara exaustora (capela), para liberação dos vapores e gases.

Figura 18 – Óleo mineral de transformador.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

A capela é um equipamento capaz de sugar o ar presente dentro dela para cima. Através de uma porta deslizante de vidro, o usuário pode inserir apenas as mãos e parte do braço dentro da câmara e manter o resto do corpo do lado de fora, fazendo com que possíveis gases nocivos não cheguem ao rosto.

Uma capela está presente no Laboratório de Caracterização Microestrutural, na

faculdade de engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Dessa forma, os experimentos foram realizados nesse local, mantendo todas as medidas de segurança necessárias. Na Figura 18, é apresentado um registro de uma medida sendo realizada.

Figura 20 – Experimento sendo realizado.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Outro material importante utilizado foi a água. Embora existam poucas referências sobre as características da água formada no óleo de transformador, espera-se que essa água não possua os minerais presentes na água que comumente é utilizada para uso residencial. Esse é um ponto importante, pois tais minerais podem afetar de maneira significativa as respostas, interferindo diretamente na condutividade do meio. Dessa forma, optou-se por fazer os experimentos tanto com a água mineral quanto com a água destilada. A água deionizada foi disponibilizada pelo Laboratório de Química Aplicada da UFJF.

Um fator impactante e essencial para os resultados é a proporção de água em óleo. Segundo (10), o ideal é que o óleo de transformador não passe de 35 ppm. Quando esse valor é excedido, alguma ação corretiva deve ser tomada, como, por exemplo, a troca do óleo. Esse é o ponto mais crítico deste trabalho, uma vez que 35 ppm equivale a 0,0035% de água em óleo, o que necessita de equipamentos com grande precisão para chegar a esse valor. Considerando a Tabela 2, onde foram apresentadas as dimensões da cavidade onde o óleo se manterá, o volume total gerado é de 4,66 mL. Utilizando a proporção indicada, seria necessário acrescentar um valor abaixo de 0,175 μL . Alcançar esse valor é um desafio, uma vez que a micropipeta disponível em laboratório possui a precisão de 2 μL .

Uma opção para contornar o problema da precisão da água inserida seria elevar o volume de óleo utilizado. Do ponto de vista da placa, aumentar o volume de óleo

significaria aumentar a altura da cavidade. Esse aumento, entretanto, poderia impactar na precisão final dos resultados, uma vez que o elétrico na parte superior da placa já possui uma intensidade baixa e decai ainda mais a medida que se afasta a placa. Isso é ainda mais impactante ao se pensar que, devido a água ser menos densa que o óleo, toda sua concentração ficará na parte mais superior.

Outra forma para solucionar esse problema seria misturar o óleo e a água em um recipiente separado e depois, com a proporção adequada, transferir a solução para a cavidade do dispositivo. Essa técnica parece ser a mais adequada, entretanto alguns obstáculos ainda ficariam presentes. O principal deles é fato de que a agitação da solução teria que ser suficiente para que a água ficasse distribuída o mais uniforme possível ao longo do volume de óleo, e a passagem para a placa deveria ser rápida o suficiente para que essa uniformidade não se perdesse. Isso tudo demandaria uma grande quantidade de óleo para treinamento, até que se chegasse em um resultado esperado. Dessa forma, essa solução será lembrada durante a discussão de trabalhos futuros.

Foi decidido utilizar a estrutura já apresentada com a micropipeta com precisão de $2 \mu L$, mostrada na Figura 19. Embora a precisão fique abaixo da esperada, os resultados apresentados para proporções maiores são utilizados e avaliados com o intuito de verificar que o dispositivo montado possui sensibilidade para as alterações na concentração de água. Futuramente melhorias podem ser feitas para que se chegue nas proporções de água desejadas.

Para as medições foi utilizado um analisador de redes FieldFox N9900A, vide Figura 20. Esse VNA destaca-se por sua capacidade multifuncional e portabilidade, oferecendo uma ampla gama de medições de alta precisão, abrangendo parâmetros S, impedância de linha e perda de inserção, tornando-se uma ferramenta essencial tanto em ambientes laboratoriais quanto em aplicações de campo. Sua interface é intuitiva e robusta, proporcionando um ótimo suporte para pesquisas acadêmicas e aplicações industriais. O VNA utilizado possui uma faixa de frequência com limite de 4GHz.

Através de todos os equipamentos e materiais utilizados, a medição pode ser efetivamente realizada. Para isso, alguns protocolos foram seguidos. Antes de tudo, o VNA precisa ser calibrado. Isso significa que os efeitos causados pelos cabos e conectores que ligam o medidor ao dispositivo devem ser cancelados, a fim de ser extraído apenas a informação da placa em questão. Para isso, deve ser configurado previamente e de forma correta a faixa de frequência de medição, que foi escolhido inicialmente para ser entre 200MHz e 4GHz. Após isso, deve ser selecionado o tipo de medição a ser feita, que no caso é S_{21} . Em conjunto, os cabos coaxiais devem ser acoplados ao VNA, com a presença de um adaptador. Uma vez que as medidas serão feitas apenas para S_{21} , a calibragem deste equipamento necessita que seja feita apenas o procedimento de *throughput*, ou seja, a conexão direta entre a saída e a entrada de RF. Ao realizar a calibragem, deve ser possível

Figura 21 – Micropipeta utilizada nas medições.



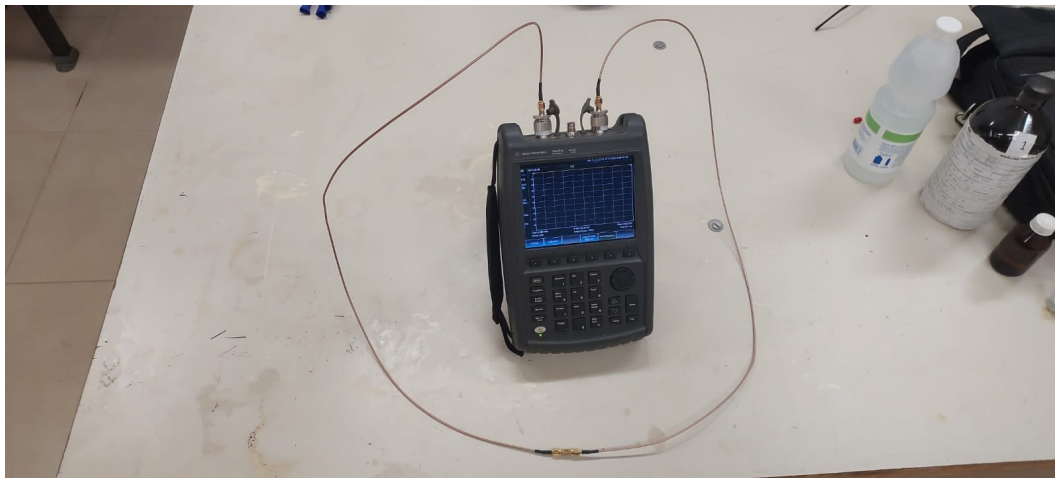
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

visualizar na tela que para todo o espectro selecionado o valor de S_{21} deve ser manter em 0 dB, ou seja, total transmissão. Caso a frequência ou qualquer outro parâmetro seja mudado, uma nova calibragem deve ser realizada. Caso contrário as repostas não corresponderão a realidade. É interessante notar que esse processo pode ser feito fora da capela, pois ainda não é utilizado o óleo. A Figura 20 apresenta um momento da calibração.

Após a calibração, o VNA já se encontra preparado para as medições. Dessa forma, o restante dos materiais deve ser preparado. Por questões de segurança, a água é separada em um recipiente, onde, no caso, foi utilizado um copo plástico de 200 mL. Como já mencionado anteriormente, as medições foram feitas tanto com água mineral quanto com água dionizada, sendo esse destaque feito nos resultados.

Em um outro recipiente, o óleo foi acrescentado. Neste ponto, tanto a capela quanto os EPI's foram utilizados. A utilização da capela é importante desde o momento que

Figura 22 – Calibragem sendo realizada.



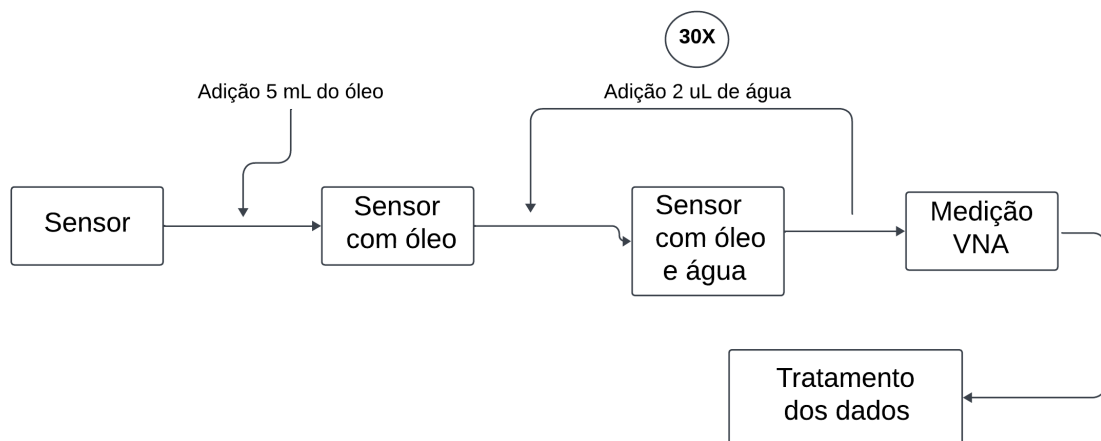
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

o óleo se expõe ao ar até o momento de ser descartado adequadamente. Com todos os equipamentos e materiais posicionados na capela, 5 mL de óleo devem ser despejados na cavidade do dispositivo com a ajuda de uma seringa com mesmo volume. Uma vez que a quantidade de óleo é muito superior a da água, pequenas variações na quantidade de óleo não geram grandes impactos nos resultados. Sendo assim, uma seringa normal foi utilizada.

A adição de água em óleo foi feita através da micropipeta. Essa tarefa, embora pareça simples, apresenta grandes desafios por se tratar de pequenas quantidades de água. Ao puxar $2\mu\text{L}$, algumas gotículas se acumulam ao longo da ponta da pipeta. Ao despejar a água no óleo, essas gotículas geram um atração com gota a ser despeja, o que dificulta o gotejamento. Dessa forma, a posição onde a gota de água cai pode sofrer variações sem o desejo de quem está realizando o experimento. Espera-se, dessa forma, que as respostas também possam sofrer certas variações, uma vez que a posição onde a gota é colocada interfere na impedância da placa. Entretanto, algumas formas de contornar esse problema serão apresentados para trabalhos futuros.

Com a gota adicionada ao óleo, os dados são salvos em um dispositivo de memória para ser tratado posteriormente. Ao total, devem ser realizadas 3 baterias de medições, ao qual variações na precisão do VNA e no tipo de água justificam essa quantidade. O fluxograma da Figura 21, representa a sequência de ações para as medições. O valor de "30X", indica que o passo de adição de gotas deve ocorrer 30 vezes. Entretanto, para a primeira bateria, o procedimento foi repetido 40 vezes, o que será melhor detalhado no capítulo a seguir.

Figura 23 – Fluxograma para o procedimento de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

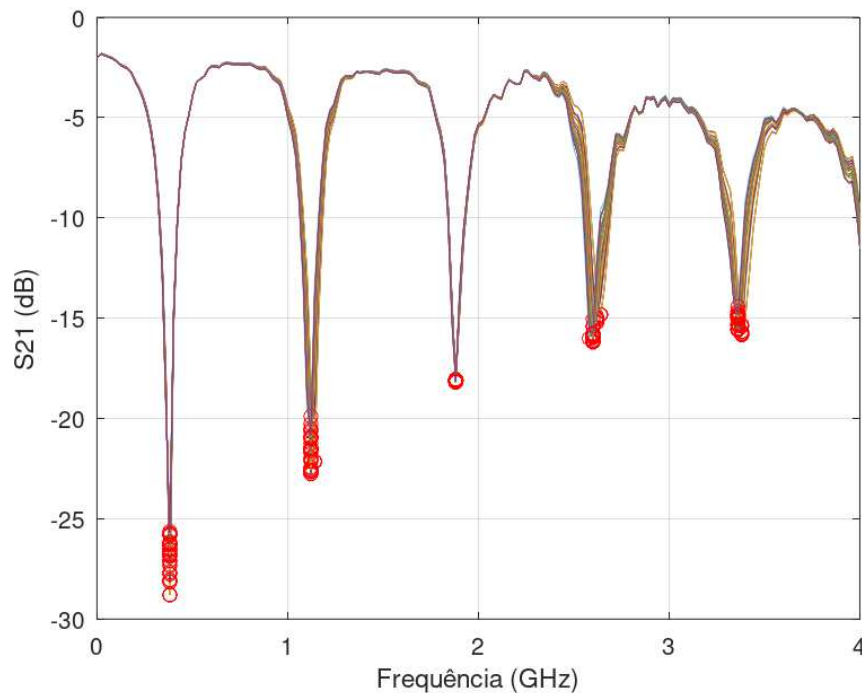
4 RESULTADOS

Este capítulo concentra-se na apresentação e análise dos dados obtidos a partir do estudo experimental conduzido, ao qual foi utilizada a linha de transmissão planar com *stub* como método de medição da quantidade de água em óleo de transformadores.

4.1 PRIMEIRA BATERIA DE MEDIÇÕES

O procedimento adotado no primeiro experimento segue os materiais e medidas detalhados na Tabela 1. Conforme indicado na tabela, um dos parâmetros configuráveis é a quantidade de pontos gerados pelo VNA (Analisador de Rede Vetorial). Nesse contexto, o padrão do equipamento é estabelecido em 201 pontos, considerando a faixa de frequência selecionada, o que resulta em um passo de 20 MHz entre cada ponto. O primeiro conjunto de dados foi assim obtido, e os resultados são visualizados na Figura 22. Destaca-se que os pontos vermelhos na figura representam os pontos de nulo para cada medição, sendo que cada medição incorpora cinco desses pontos. Dada a extensão do conjunto de medidas, a legenda individual para cada curva foi omitida nesse contexto específico, padrão que é mantido para as apresentações subsequentes de resultados.

Figura 24 – S_{21} da primeira bateria de medições.

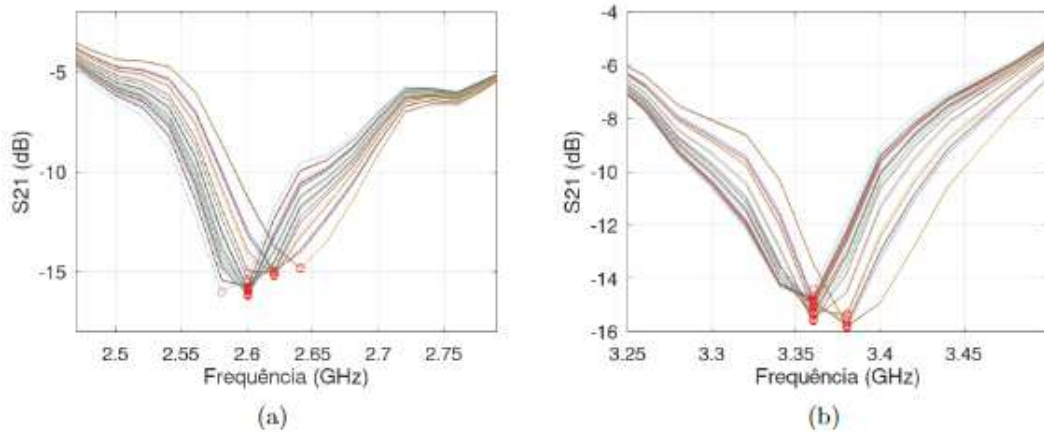


Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Este primeiro resultado trouxe grandes expectativas em relação a utilização da LT planar. Claramente as curvas apresentam variações tanto em amplitude quanto na frequência, o que já havia sido discutido durante os capítulos anteriores. O ponto importante neste momento é identificar se as variações são significativas e se seguem algum padrão.

Analisando primeiramente o deslocamento na frequência dos nulos, é perceptível que os 3 primeiros nulos quase não apresentam variações, por estarem justamente em frequências mais baixas, onde os efeitos são menores. Dessa forma, essa verificação pode ser melhor feita através do quarto e quinto nulo. Para isso, a Figura 23 apresentam um *zoom* nessas faixas. Através disso, é possível notar que grande parte dos nulos estão fixos em poucas frequências. Isso ocorreu devido a pouca quantidade de pontos das curvas, ou seja, os nulos provavelmente estão deslocados entre si a menos de 20 MHz. Montando um gráfico para a frequência de nulo em função da quantidade de água para o último nulo, que apresentado na Figura 24, essa baixa precisão do equipamento é bem visível. Dessa forma, essa primeira bateria de medições pouco trás de informações concretas em relação às frequências dos nulos, o que trás a necessidade de novas medidas com maior precisão.

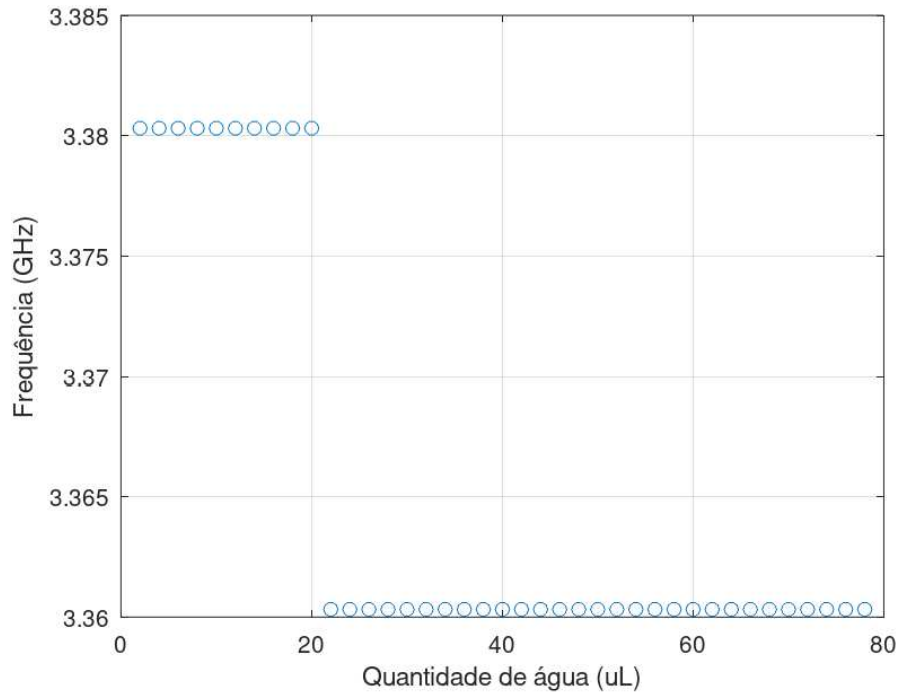
Figura 25 – S_{21} para faixa do (a) quarto nulo e (b) quinto nulo.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Ainda na análise da primeira bateria de medições, a próxima abordagem concentra-se na amplitude das curvas. Nesse contexto, a definição das frequências para essa análise é muito importante. Tanto os pontos nulos quanto os máximos podem ser considerados para essa determinação. No entanto, ao escolher os pontos nulos, é preciso considerar os possíveis efeitos no deslocamento da frequência, pois esses efeitos podem exercer uma forte interferência na amplitude da resposta, tornando sua utilização para a finalidade desejada impraticável. A Figura 25 apresenta os resultados das variações de amplitudes para o quarto e quinto nulo em função da quantidade de água. Nota-se que não há um

Figura 26 – Variação da frequência de nulo para o quinto nulo.



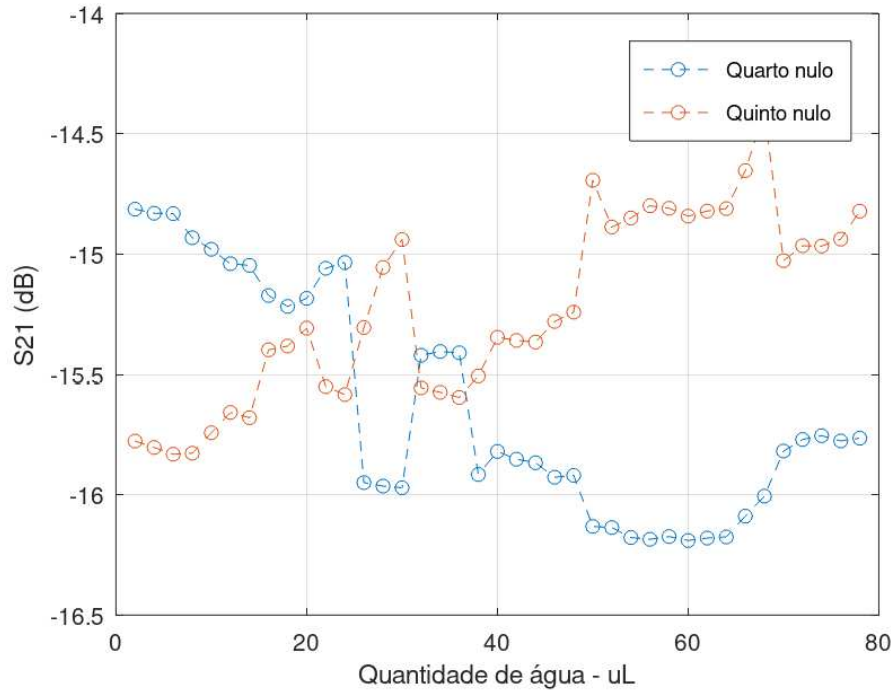
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

padrão determinado para as amplitudes dos nulos, indicando a complexidade dessa relação. Essa variação de resposta é esperada, uma vez que o aumento da quantidade de água no óleo gera um casamento de impedância diferente para essas frequências específicas, corroborando com as expectativas teóricas.

Ao direcionar a análise para os valores do máximos, observa-se uma maior propensão desses valores em apresentar um padrão nas respostas. É interessante notar que para os máximos existe uma faixa mais extensa em que a curva se aproxima de 0 dB. Isso é ilustrado na Figura 22, onde visualmente percebe-se que, entre as frequências de 600MHz e 800MHz, a amplitude sofre pouca variação e escolher um ponto para o máximo dentro dessa faixa não acarretaria em grandes erros, embora apenas um ponto tenha de fato a maior amplitude para cada curva. Optando por um valor central médio entre os nulos, a análise de amplitude pode ser conduzida de maneira mais eficiente.

Essa abordagem de medição é particularmente interessante ao considerar um potencial desenvolvimento de um protótipo futuro, já que simplifica o trabalho ao lidar com uma frequência específica em vez de uma faixa inteira. Para a faixa completa de medição, existem quatro possibilidades de máximos. A Figura 26 oferece uma comparação entre os resultados para cada uma delas, onde cada curva representa o valor de S_{21} para o ponto de máximo escolhido em função da quantidade de água inserida em 5mL de óleo.

Figura 27 – Variação da amplitude para as frequências de nulo.

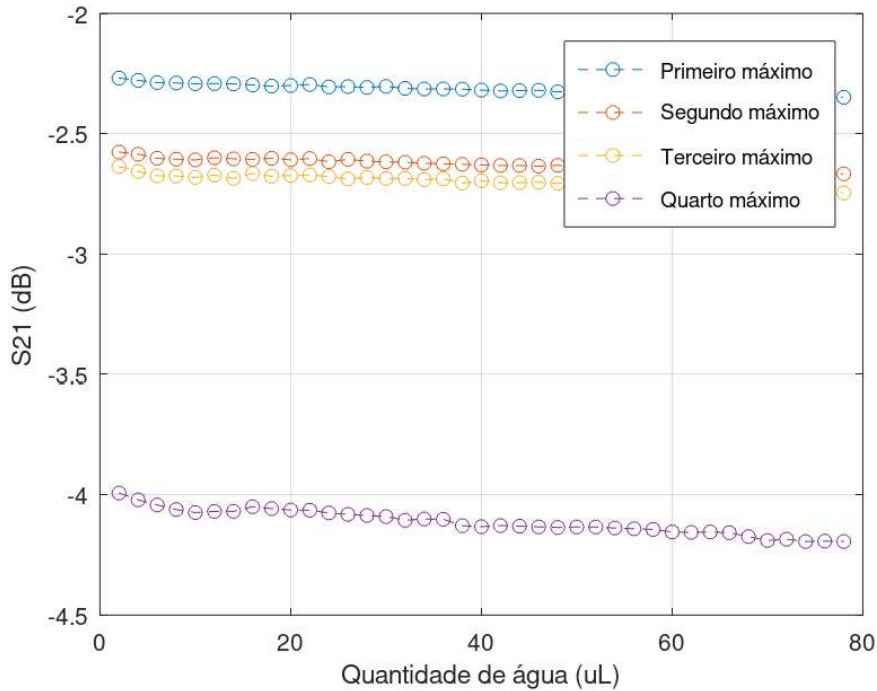


Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Todas as quatro curvas apresentam uma inclinação específica, embora os detalhes possam não ser claramente visíveis na Figura 26 devido às escalas utilizadas. Considerando que a diferença entre os máximos reside na frequência em que o valor de S_{21} foi extraído, é notável que, à medida que a frequência aumenta, as perdas também aumentam, alcançando uma diferença considerável para o quarto máximo. Dado que as curvas parecem se aproximar de uma relação linear, foi conduzida uma regressão linear para cada uma delas. Os resultados obtidos estão representados na Figura 27. Acompanhando os gráficos, apresenta-se a Tabela 2, que inclui os coeficientes para as retas e o coeficiente de determinação. Este último é uma métrica amplamente utilizada para indicar o quão bem um modelo de regressão se ajusta aos dados, oferecendo uma avaliação quantitativa da adequação do modelo aos resultados observados.

Tabela 3 – Valores para regressão linear da primeira bateria de medições.

Máximo	Coef. angular	Coef. linear	Coef. de Determinação R^2
1°	-9.0616×10^{-4}	-2.22801	0.9691
2°	-9.9695×10^{-4}	-2.5878	0.9482
3°	-9.6345×10^{-4}	-2.6577	0.8865
4°	-2.1771×10^{-3}	-4.0269	0.9475

Figura 28 – Variação de S_{21} para cada máximo.

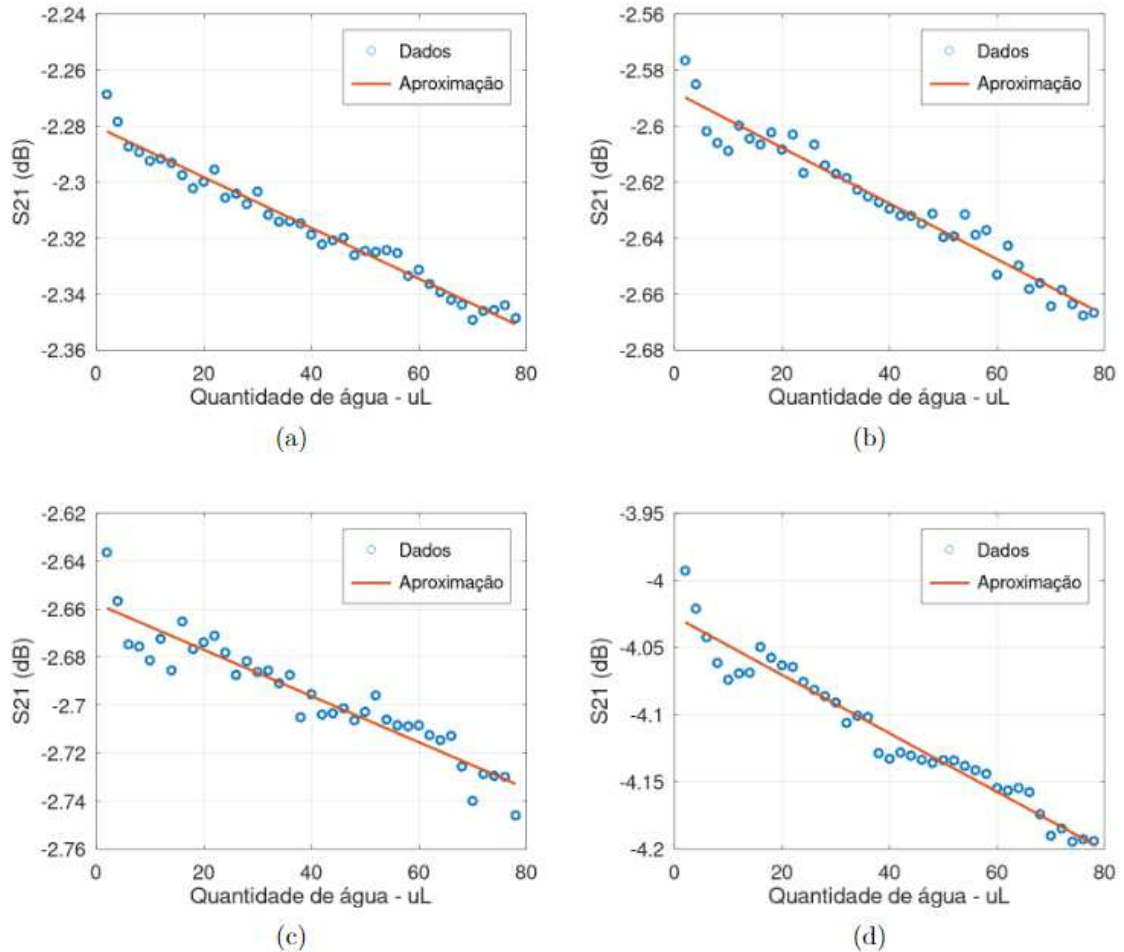
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Ao analisar os gráficos associados a cada máximo, torna-se evidente uma clara tendência de os dados seguirem uma expressão linear. Seguindo essa observação, foi conduzida a regressão linear, conforme mencionado anteriormente. O coeficiente de determinação calculado para cada curva reforça a validade dessa aproximação. Um aspecto notável é que os coeficientes angulares para as três primeiras retas não exibem uma tendência clara de aumento ou diminuição. No entanto, a reta correspondente ao último máximo revela um coeficiente angular substancialmente maior. Esse padrão de comportamento é congruente com as expectativas, uma vez que as perdas em altas frequências tendem a se tornar mais significativas, justificando a observação de uma inclinação mais acentuada na reta associada ao último máximo. Essa análise reforça a compreensão da relação linear entre os dados e a frequência, destacando nuances importantes relacionadas às perdas em diferentes faixas de frequência.

4.2 SEGUNDA BATERIA DE MEDIÇÕES

Apesar do primeiro experimento ter sido conduzido com água mineral, já foi notado que a determinação da quantidade de água em óleo por meio do coeficiente de transmissão nos pontos de máxima transmissão trouxe resultados mais consistentes. Dado que o foco desta dissertação é realizar um estudo sobre o dispositivo montado, a

Figura 29 – Curva aproximada da primeira bateria para (a) primeiro máximo, (b) segundo máximo, (c) terceiro máximo e (d) quarto máximo.



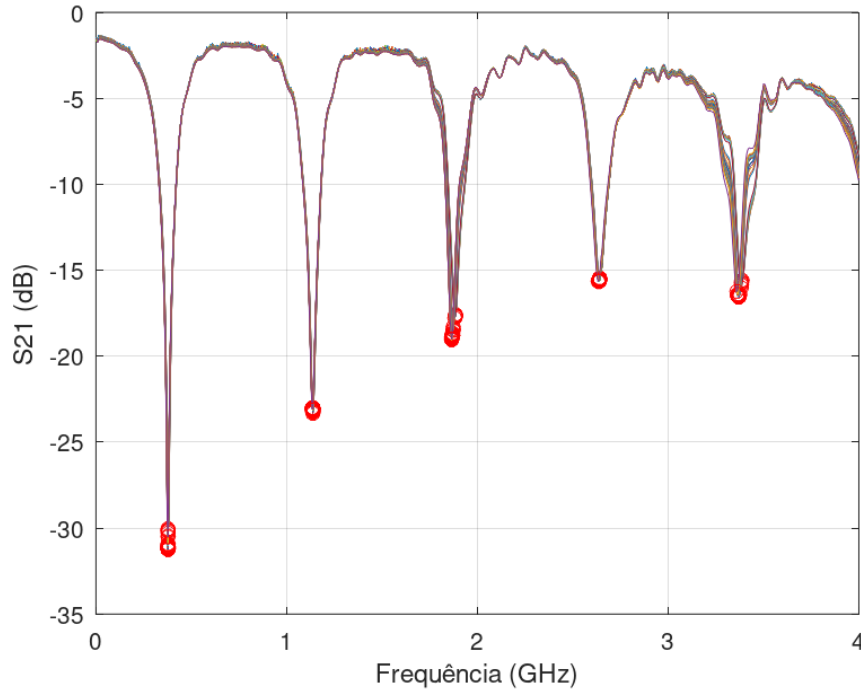
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

análise dos pontos nulos continuará sendo apresentada para extrair possíveis resultados e interpretações significativas sobre as medições. Nesse contexto, a segunda bateria de medições é apresentada a seguir.

Após uma análise que revelou a inadequação da quantidade de pontos utilizados nas medições da primeira bateria, resultando em uma baixa precisão nos resultados, optou-se por repetir a mesma medida, porém agora com cinco vezes mais pontos. Assim, se anteriormente o passo de cada medição era de 20MHz, a nova configuração reduziu esse valor para 5MHz. Seguindo os mesmos procedimentos realizados anteriormente, foi conduzida a segunda bateria de medições, cujo resultado de S_{21} pode ser conferido na Figura 28. Diferentemente da primeira bateria, foram realizadas 30 medições em vez de 40, uma decisão tomada devido ao tempo consumido durante o experimento e a não necessidade de tantas medições para atingir os objetivos propostos. Portanto, é esperado

que os resultados obtidos com 30 medições gerem conclusões similares àquelas que seriam obtidas com 40 medições.

Figura 30 – Segunda bateria de medições.



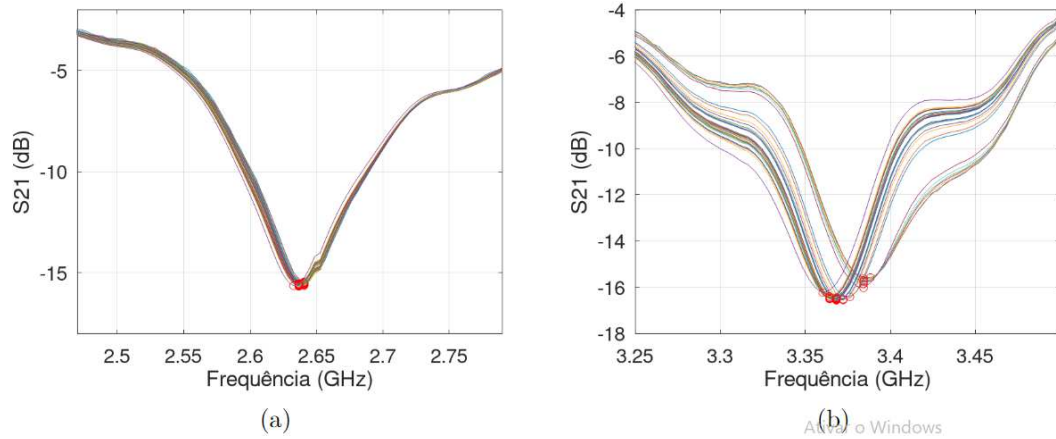
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

As curvas exibidas na Figura 28 visualmente assemelham-se aos resultados observados na Figura 22. No entanto, ao comparar essas duas figuras, tornam-se perceptíveis pequenas diferenças para cada ponto nulo. Dado que a única alteração realizada foi na precisão do equipamento, não era esperado que mudanças significativas ocorressem entre as medições.

Revisitando os resultados apresentados na Figura 23, observa-se que a escassez de pontos resultou em curvas com interpolação evidente entre eles. Com o aumento na quantidade desses pontos, foram alcançadas as novas curvas representadas na Figura 29. É notável que as respostas agora são mais precisas, as curvas tornam-se mais suaves, e isso é claramente evidenciado pelo gráfico da frequência do último nulo em função da quantidade de água inserida, apresentado na Figura 30. Nesse gráfico, observa-se um número significativamente maior de frequências de nulo identificadas. No entanto, algumas faixas ainda apresentam a mesma frequência de nulo, como entre as medidas 12 e 27. É possível que um passo menor que 5MHz pudesse proporcionar resultados ainda melhores, mas é importante destacar que a quantidade de 1201 passos representa o máximo do equipamento de medição. Reduzir ainda mais a faixa de frequência para a medição poderia

prejudicar a visualização das respostas.

Figura 31 – S_{21} para a faixa do (a) quarto nulo e (b) quinto nulo.



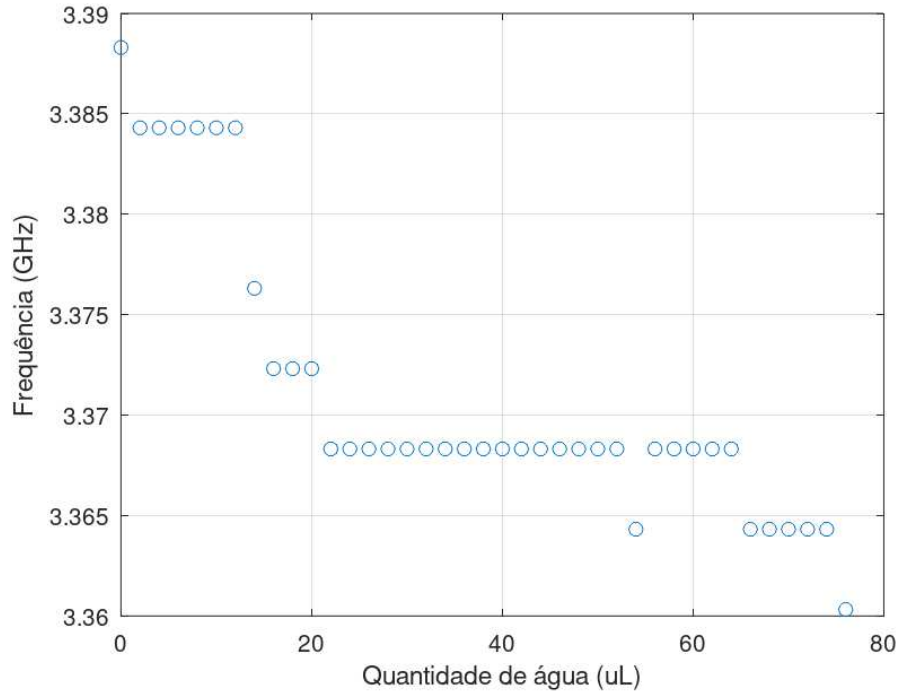
Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

Um aspecto notável neste ponto é a observação de que as baterias de medições apresentam respostas com perfis notavelmente distintos, tanto para o quarto quanto para o quinto nulo. Essa discrepância tornou-se mais evidente com as Figuras 29. Diversos fatores podem justificar essa disparidade: em primeiro lugar, a água utilizada em ambos os experimentos foi de origem mineral, retirada de uma torneira. Considerando que as amostras foram coletadas em dias diferentes, é plausível que as características elétricas da água tenham diferido, influenciando assim as variações nas respostas. Outro fator a ser considerado é a posição específica em que a água foi inserida. Dada a baixa resistência da água ao se mover pelo óleo, é possível que acúmulos de água tenham se formado em pontos distintos a cada bateria de medição, contribuindo para as variações observadas nas respostas. Essas considerações indicam a importância de controlar e documentar com mais precisão os parâmetros experimentais, ou seja, a forma como a adição da água foi realizada.

Essa segunda questão representa um desafio significativo do ponto de vista experimental. A expectativa é de que haja uma variação mínima entre as medidas para cada bateria, e uma variação excessiva pode comprometer a precisão da técnica implementada. Durante a seção de trabalhos futuros, serão discutidas algumas soluções para abordar essa questão e melhorar a consistência das medições. Apesar de reconhecer que a posição das gotas de água pode influenciar o casamento de impedância do *stub*, é antecipado que a variação não seja tão notável quando a análise se concentra nas perdas durante a propagação. Dessa forma, a próxima etapa será a análise dos máximos, explorando uma abordagem que pode ser menos sensível a variações na posição das gotas de água.

Visualmente, já é perceptível que as faixas de máximo sofreram poucas alterações

Figura 32 – Variação da frequência de nulo para o quinto nulo na segunda bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

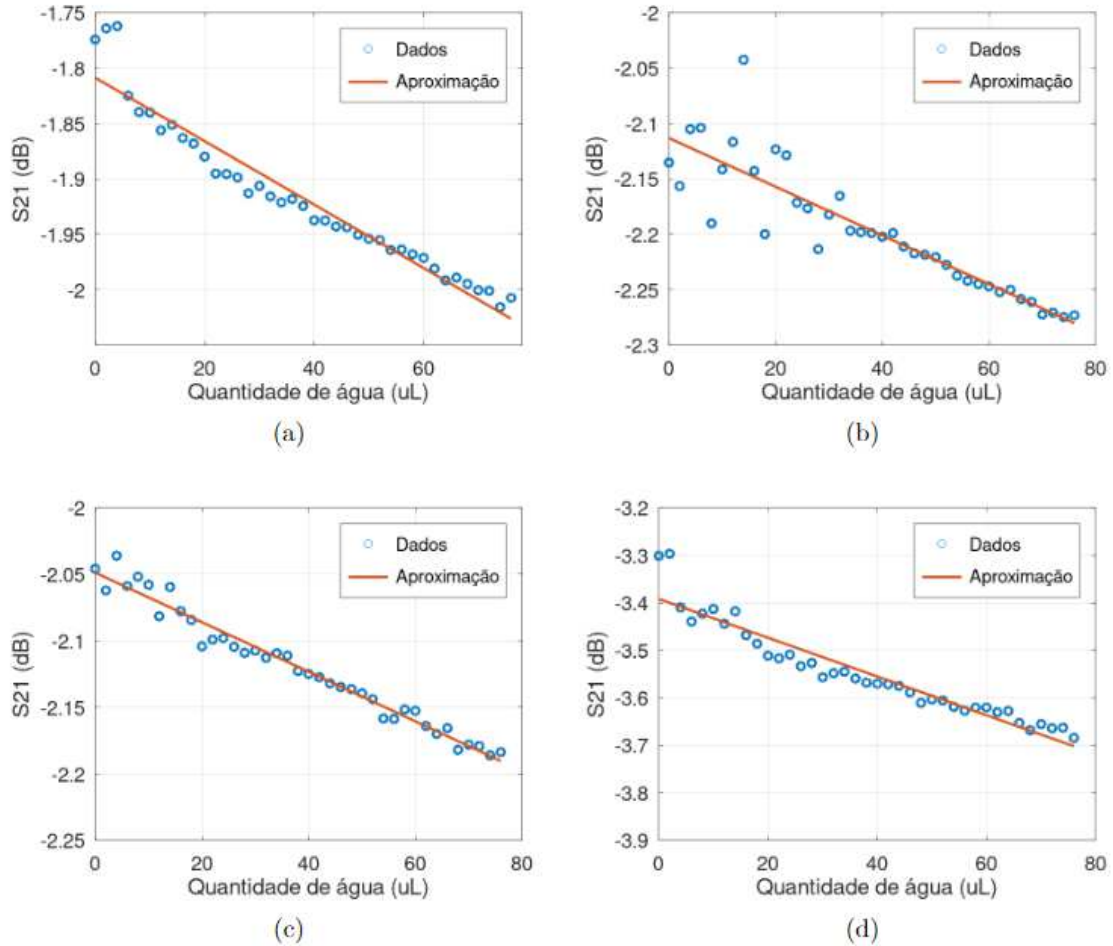
ao comparar as duas baterias. Assim, foram selecionadas as mesmas frequências para a medição do S_{21} , resultando nos gráficos apresentados na Figura 31. Mais uma vez, foi conduzida uma regressão linear, e os coeficientes das retas, juntamente com o coeficiente de determinação, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores para regressão linear na segunda bateria de medições.

Máximo	Coef. angular	Coef. linear	Coef. de Determinação R^2
1°	-2.8595×10^{-3}	-1.8088	0.9341
2°	-2.19552×10^{-3}	-2.1131	0.7993
3°	-1.8619×10^{-3}	-2.0488	0.9706
4°	-4.0760×10^{-3}	-3.3921	0.9056

É notável que, entre os quatro máximos, apenas o segundo apresenta grandes desvios na comparação entre dados e aproximação. Essa discrepância visualizada nos gráficos é corroborada pelo coeficiente de determinação, que mostra um valor abaixo de 0.9 exclusivamente para o segundo máximo. Essa variação pode ser atribuída à escolha da frequência específica, a qual, nesse caso, sofreu maiores flutuações devido ao casamento de impedância gerado pelo *stub*. Essa hipótese é sustentada pelo fato de que os demais máximos não exibem desvios significativos para menores quantidades de água.

Figura 33 – Curva aproximada da primeira bateria para (a) primeiro máximo, (b) segundo máximo, (c) terceiro máximo e (d) quarto máximo.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

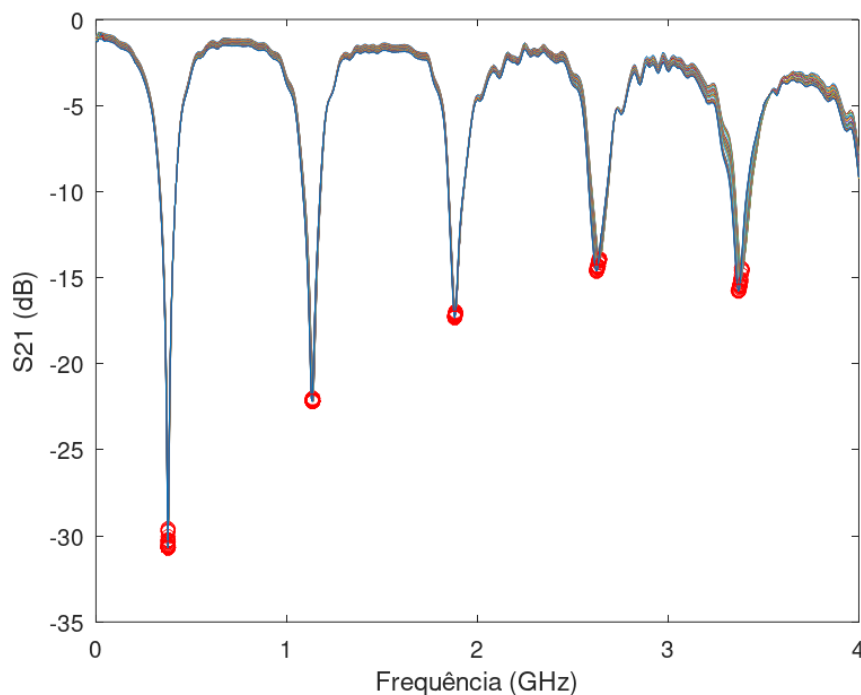
Por outro lado, de maneira não identificada pelo autor, para maiores quantidades de água, a aproximação da reta se torna consideravelmente mais precisa.

É essencial ressaltar, neste ponto, que a apresentação dos coeficientes de determinação não tem a finalidade de estabelecer uma métrica definitiva para a medição da quantidade de água em óleo. Neste estágio, esses resultados indicam apenas a presença de uma tendência linear na variação de S_{21} em uma frequência específica quando há alteração na quantidade de água. Uma conclusão definitiva exigiria um maior número de ensaios e o refinamento da técnica utilizada, reconhecendo a necessidade de uma abordagem mais abrangente e detalhada para validar e aprimorar os resultados obtidos até o momento.

4.3 TERCEIRA BATERIA DE MEDIÇÕES

Para a última bateria de medições, uma mudança significativa foi implementada, substituindo a água mineral pela água deionizada. Essa escolha estratégica visa assegurar um resultado mais fiel à realidade esperada para este experimento, uma vez que a água deionizada elimina a presença de íons e minerais que poderiam impactar nas medições. Essa modificação visa aprimorar a precisão e confiabilidade dos dados obtidos. A configuração do FieldFox permaneceu inalterada em relação ao segundo experimento, mantendo a faixa de frequência de 200MHz até 4GHz, com 30 medidas e um passo de 5MHz. Esta consistência na configuração do equipamento contribui para a comparabilidade dos resultados entre os experimentos. O resultado dessas modificações pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 34 – Terceira bateria de medições.

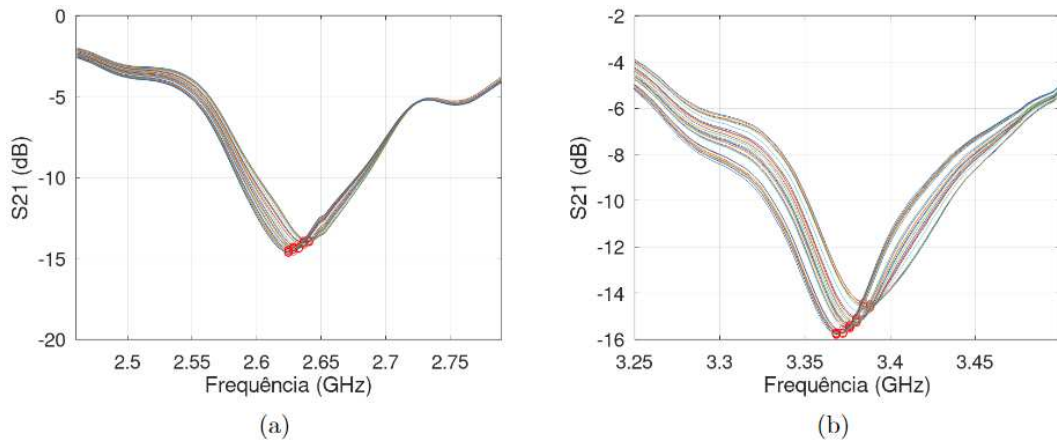


Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

A transição para a água deionizada é perceptível visualmente, evidenciando uma redução notável na variação das medições. As curvas agora exibem uma maior coesão e semelhança entre si, indicando uma estabilidade e consistência aprimoradas nos resultados. Esse fenômeno pode ser explicado devido os minerais previamente presentes, que exerciam uma influência significativa nas características elétricas da água, contribuindo para as disparidades observadas nas medições anteriores. A adoção da água deionizada, claramente melhorou os resultados.

Através da Figura 33, é possível observar como as curvas efetivamente se aproximaram mais e aparentemente seguem um padrão mais bem definido. Embora essa resposta apresente melhores resultados em relação às outras duas baterias, as experiências anteriores indicam que pode haver uma grande variação nos resultados dependendo da forma como as gotas se agrupam no óleo. No entanto, é importante notar como é possível realizar ajustes para obter medições mais precisas. Algumas técnicas concebidas para abordar essa variabilidade serão apresentadas como trabalhos futuros, no capítulo de conclusão.

Figura 35 – S_{21} para a faixa do (a) quarto nulo e (b) quinto nulo.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

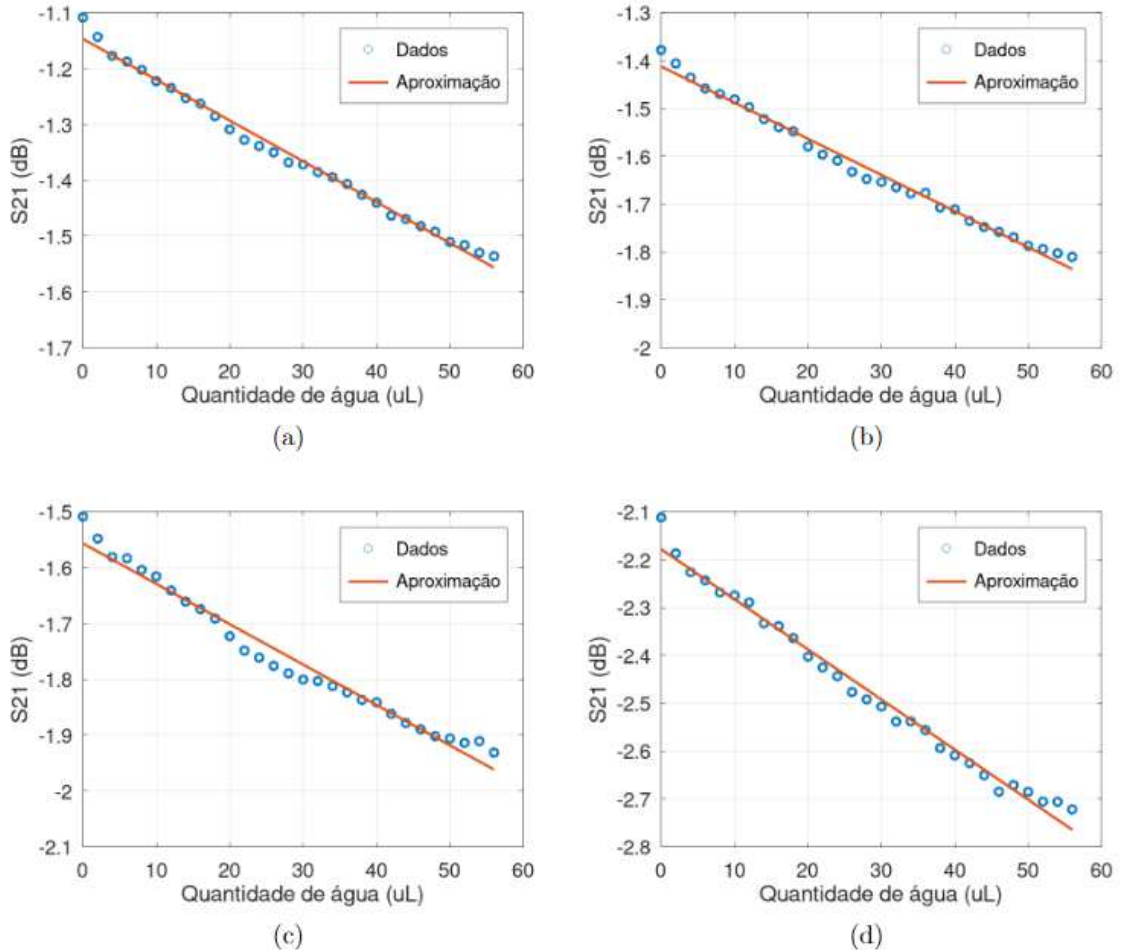
Por fim, a última análise a ser realizada neste trabalho será sobre os coeficientes de transmissão para as faixas de máximo. Até o momento, observou-se que essa abordagem resultou em resultados mais previsíveis e que podem ser aplicados em um modelo real para a medição da quantidade de água em óleo. Sendo assim, a Figura 34 apresentam os respectivos resultados para cada máximo já mencionado. Como complemento, a Tabela 5 mostra os valores dos coeficientes calculados para a regressão linear realizada em cada curva.

Tabela 5 – Valores para regressão linear na terceira bateria de medições.

Máximo	Coef. angular	Coef. linear	Coef. de Determinação R^2
1°	-7.3062×10^{-3}	-1.1468	0.9906
2°	-7.5518×10^{-3}	-1.4123	0.9884
3°	-7.2250×10^{-3}	-1.5569	0.9731
4°	-0.0104	-2.1784	0.9857

Diferentemente dos resultados da segunda bateria, as respostas para a terceira não apresentaram grandes oscilações, o que resultou em curvas muito próximas aos dados quando aplicada a regressão linear. Esses resultados são particularmente significativos,

Figura 36 – Curva aproximada da terceira bateria para (a) primeiro máximo, (b) segundo máximo, (c) terceiro máximo e (d) quarto máximo.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2023)

destacando a robustez da técnica para a medição da quantidade de água em óleo, sem depender de abordagens muito elaboradas para o experimento. Um ponto notável é que todos os quatro máximos apresentam o mesmo comportamento, o que pode aumentar a precisão da medição dependendo do tratamento de dados utilizado. Esses resultados são tão expressivos que a pior aproximação linear foi registrada pelo terceiro nulo, com um coeficiente de determinação de 0.9731, que está dentro dos valores encontrados em (10).

Dessa forma, observou-se, por meio dos experimentos realizados, que a utilização dos coeficientes de transmissão para as frequências de máximo proporcionou resultados mais robustos em comparação às frequências de nulos. A obtenção de uma expressão matemática com boa aproximação sobre os dados é essencial, uma vez que, na prática, a proporção água/óleo deve ser reduzida. Embora haja essa diferença, não há motivos para acreditar que os resultados apresentados para a proporção maior não sejam replicados

quando a proporção for menor. Assim, a técnica demonstra um grande potencial para o que está proposto, fornecendo uma base sólida para futuras aplicações em escalas proporcionais mais realistas.

5 CONCLUSÃO

Este estudo proporcionou resultados significativos ao analisar os valores do coeficiente de transmissão nas frequências correspondentes aos máximos de transmissão. Essa análise considerou os efeitos das perdas durante a propagação da onda ao longo da linha de transmissão. Inicialmente, a suposição era de que a análise das frequências de nulo poderia também ser promissora, dada a elevada permissividade elétrica relativa da água. No entanto, ficou evidente que as perdas geram uma resposta mais consistente e de fácil interpretação.

O propósito deste estudo foi investigar a eficácia do uso de linhas de transmissão planares com *stub* na determinação da quantidade de água presente em óleos de transformadores. A expectativa era compreender como as respostas provenientes da transmissão ao longo da linha poderiam resultar em padrões úteis para a caracterização do meio. Nesse aspecto, os resultados obtidos neste trabalho foram notáveis. A escolha de uma frequência representativa para cada faixa de máximo permitiu a identificação de expressões lineares bem ajustadas aos dados. A presença de água no óleo é um fator que impacta negativamente na qualidade do óleo de transformadores. Assim, este estudo representa um avanço em uma área de grande interesse tanto para pesquisadores quanto para empresas do setor.

Atualmente, as empresas adotam protocolos que envolvem a realização periódica de ensaios nos óleos de transformadores para avaliar sua qualidade. Esse procedimento implica no deslocamento de funcionários e recursos materiais, acarretando custos significativos para as organizações. Diante desse cenário, a perspectiva de um monitoramento contínuo do óleo durante o funcionamento do transformador desperta grande interesse. O dispositivo apresentado neste estudo é projetado para desempenhar um papel nessa aplicação futura, e os resultados aqui obtidos alimentam boas expectativas nesse sentido. A adoção dessa tecnologia tem o potencial não apenas de aprimorar a eficiência operacional, mas também de reduzir consideravelmente os custos associados aos métodos tradicionais de avaliação da qualidade do óleo em transformadores.

Apesar dos bons resultados, ainda existem diversos desafios. Um ponto crítico reside na precisão das medidas alcançadas. Considerando que a quantidade máxima aceitável de água em um óleo de transformador é aproximadamente 35 *ppm*, é importante notar que essa marca não foi atingida com os equipamentos disponíveis e a técnica empregada. No entanto, vale ressaltar que essa limitação não desqualifica os experimentos realizados, uma vez que a consistência observada nas regressões ao longo de todas as medidas sugere que esse padrão pode ser extrapolado para quantidades menores de água, embora seja necessário realizar experimentos mais precisos para validar essa inferência. Outra consideração relevante diz respeito à definição de pontos ideais para a inserção da água no óleo. As

respostas apresentaram variações consideráveis com base nessas posições, o que representa um desafio quando se leva em conta a fluidez da água no óleo, isto é, sua capacidade de deslocamento fácil. Embora isso possa parecer uma questão complexa, a implementação de uma cavidade que cubra apenas a linha de transmissão ou a realização da mistura de água com óleo em um recipiente separado são soluções potencialmente viáveis e menos complexas.

Com aprimoramentos na execução metodológica, diversas oportunidades de estudo surgem para aproximar este trabalho de uma aplicação prática. A escolha de utilizar frequências específicas nas faixas de máximo, em vez de identificar diretamente o valor máximo, foi estrategicamente pensada para permitir que um eventual protótipo empregue um gerador de sinal mais simples nessas frequências, aliado a um *powermeter* na extremidade oposta. Com o conhecimento da curva do coeficiente de transmissão em relação à quantidade de água no óleo, seria possível determinar essa quantidade de maneira direta. Portanto, uma extensa bateria de medições poderia ser conduzida para desenvolver um modelo mais realista e adaptado às condições práticas. Além disso, considerando que o envelhecimento do óleo é influenciado por diversos fatores além da presença de água, estudos adicionais poderiam ser conduzidos utilizando óleos envelhecidos realistas, gerando curvas aproximadas para esses cenários específicos. Essas sugestões representam caminhos para futuras pesquisas, ampliando o escopo e a aplicabilidade do dispositivo proposto.

É interessante notar, que embora este trabalho foque na questão do óleo de transformador, a concentração de materiais em outras soluções também podem utilizar a técnica aqui apresentada. Isso também abre uma porta para diversos estudos serem feitos.

Em síntese, este estudo proporcionou avanços na análise da quantidade de água em óleos de transformadores por meio de linhas de transmissão planares com *stub*. Os resultados obtidos, especialmente ao utilizar as frequências de máximo, indicam um potencial promissor para a aplicação prática dessa abordagem. Contudo, reconhece-se os desafios, como a necessidade de maior precisão nas medidas, a busca por pontos ideais de inserção da água e a consideração de outros fatores no envelhecimento do óleo. As limitações identificadas ressaltam a importância de pesquisas futuras e refinamentos experimentais. As sugestões apresentadas para trabalhos futuros, como a utilização de frequências únicas e a exploração de óleos envelhecidos reais, destacam caminhos para a evolução dessa abordagem e sua aplicabilidade no cenário prático. Este estudo contribui não apenas para a compreensão da técnica proposta, mas também para o estímulo de pesquisas subsequentes que visem aprimorar e consolidar ainda mais essa metodologia de análise.

REFERÊNCIAS

- 1 Jin L, Kim D, Abu-Siada A, Kumar S. **Oil-Immersed Power Transformer Condition Monitoring Methodologies: A Review**. *Energies*. 2022; 15(9):3379. <https://doi.org/10.3390/en15093379>
- 2 Y. Qian, Y. Zhao, L. Li and S. Fan, **Diagnosis and Remedial Procedure of Transformer Insulation Resistance Decline Induced by Deteriorated Oil**, 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China, 2018, pp. 3366-3369, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602020.
- 3 Y. Qian, Y. Wang, Y. Zhao, S. Fan, Q. Fu and H. Wang, **Application of Infrared Spectroscopy in Oil Quality Detection**, 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279670.
- 4 A. Baklanov, G. Tkachenko and I. Lankin, **Development of a Method for a Comprehensive Assessment of the Functional State of Power Oil Transformers**, 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2021, pp. 871-875, doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446326.
- 5 D. Wang et al., **A New Testing Method for the Dielectric Response of Oil-Immersed Transformer**, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 12, pp. 10833-10843, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2959500.
- 6 B. Li, Q. Zhou, Y. Liu and J. Chen, **A Novel Nondestructive Testing Method for Dielectric Loss Factor of Transformer Oil Based on Multifrequency Ultrasound**, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 5, pp. 1659-1665, Oct. 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3190821.
- 7 W. Bassi and H. Tatizawa, **Conductivity and Dielectric Dissipation Factor ($\tan \delta$) Measurements of Insulating Oils of New and Aged Power Transformers—Comparison of Results Between Portable Square Wave and Conventional Bridge Methods**, in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 37, no. 5, pp. 14-25, September/October 2021, doi: 10.1109/MEI.2021.9514646.
- 8 Zukowski P, Rogalski P, Kierczynski K, Koltunowicz TN. **Precise Measurements of the Temperature Influence on the Complex Permittivity of Power Transformers Moistened Paper-Oil Insulation**. *Energies*. 2021; 14(18):5802. <https://doi.org/10.3390/en14185802>
- 9 Nadolny Z. **Determination of Dielectric Losses in a Power Transformer**, *Energies*. 2022; 15(3):993. <https://doi.org/10.3390/en15030993>
- 10 J. M. Guerrero, A. E. Castilla, J. A. S. Fernández and C. A. Platero, **Transformer Oil Diagnosis Based on a Capacitive Sensor Frequency Response Analysis**, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7576-7585, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3049192.
- 11 Victor. Ulysses R. C. **Internet via Rede Elétrica: Modelagem de Canal Baseada em Interferômetro**, (2008). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco.

- 12 Pozar, David M. (2005); **Microwave Engineering**, Third Edition (Intl. Ed.); John Wiley & Sons, Inc.; pp. 170-1745.
- 13 Sadiku, Mathew N. O. (2000); **Elements of Eletromagnetism**, Third Edition; OUP US.
- 14 Cheng, David K. (1989); **Field and Wave Electromagnetics**, Second Edition, Prentice Hall
- 15 Ludwig Reingol, Bretchko Pavel (2008). **RF Circuito Design: Theory and Application**. Second Edition, Prentice Hall.
- 16 Steer, Michael. **Microwave and RF Design** (Third Edition, 2019). NC State University, 2019
- 17 Harlow, James H. (2012). **Electric Power Transformer Engineering**. Third Edition, CRC Press.
- 18 FONSECA, D. A. B.; Pereira, F. ; MEDEIROS, A. ; U.R.C. Vitor . **Técnica de Medição da Permissividade Elétrica Relativa de Placas FR4**. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2019, Petropolis - RJ. Técnica de Medição da Permissividade Elétrica Relativa de Placas FR4, 2019.
- 19 Anand K., Verma. **Introdution to Modern Planar Transmission Lines**. IEEE Press, 2021.
- 20 Silvar, Ana Cristina Morais (2006). **Microemulsões aplicadas ao tratamento de Óleos isolantes**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- 21 Vasconcellos, Vagner (2016). **Compactação e Elevação da Vida Útil de Transformadores de Distribuição Empregando Óleo Vegetal Isolante**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- 22 Malaquias, Paulo Eduardo (2017). **Estudo da Degradação do Papel Isolante Através de Ensaios de Envelhecimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas.
- 23 Lestro, Lorrán Pitta Magalhães **Transformadores de potência à óleo isolante**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.