

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIA TECNOLÓGICO – CCT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA – PPGPEE**

**YVES SANTOS BORGES**

**ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM TRILHAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA**

**JOINVILLE**

**2023**

**YVES SANTOS BORGES**

**ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM TRILHAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciência Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Dr. Pedro Bertemes Filho

**JOINVILLE**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Borges, Yves Santos

Análise de curto-circuito em trilhas de circuito impresso  
utilizando espectroscopia de impedância elétrica / Yves  
Santos Borges. -- 2023.

69 p.

Orientador: Pedro Bertemes Filho

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2023.

1. Espectroscopia de impedância elétrica. 2. Detecção de  
falhas. 3. Placa de circuito impresso. I. Bertemes Filho, Pedro.  
II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica. III. Título.

**YVES SANTOS BORGES**

**ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM TRILHAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciência Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Dr. Pedro Bertemes Filho

**BANCA EXAMINADORA**

Pedro Bertemes Filho, Dr.  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Ana Teruko Yokomizo Watanabe, Dra.  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Luciano de Souza Ribeiro Bueno, Dr.  
Centro Universitário Católica de Santa Catarina

Joinville, 27 de julho de 2023.

Dedico este trabalho aos meus pais, e a todos que me incentivaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Pedro Bertemes Filho, por sua orientação, compreensão e por incentivar-me nesta pesquisa.

À minha família, que sempre me apoiou em minhas escolhas com amor e motivação.

Aos Professores, que me instruíram na minha caminhada acadêmica, por ensinar, orientar e compartilhar o conhecimento.

Aos Colegas, que compartilharam a construção do conhecimento por meio do companheirismo.

Ao incentivo da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

Aos Colaboradores da UDESC, que proporcionaram condições para o exercício de minha formação.

Segundo a tradição filosófica, “Aquele que não é um bom aprendiz não será um bom mestre”. (Autor desconhecido, citado por estudiosos da filosofia)

## RESUMO

Os dispositivos eletrônicos integram tecnologias essenciais no cotidiano da sociedade contemporânea, estando presente em diferentes soluções, como a comunicação, o transporte, a automação, entre outros. Essa popularização, se deve ao avanço tecnológico em áreas como a elétrica e o estudo de materiais. Mas para que as melhorias nos eletrônicos continuem surgindo e a segurança na qualidade exista, é importante haver estudos direcionados aos componentes que compõem um dispositivo eletrônico. A placa de circuito impresso, está entre um dos principais componentes, no qual tem como função de comportar e fazer a conexão dos componentes eletrônicos por meio de trilhas. Nesse sentido esse trabalho tem como objeto analisar o comportamento de potenciais curtos-circuitos em trilhas de placas de circuito impresso, visto que essa pode ser uma falha prejudicial ao desempenho de eletrônicos. Para essa análise foi desenvolvido protótipos de placas de face simples com diferentes níveis de curto-circuito e como ferramenta de medição foi adotada a espectroscopia de impedância elétrica. Embora essa técnica seja inovadora para medições com essa finalidade, ela se mostrou eficiente e capaz de realizar a detecção de níveis de curto-circuito em trilhas, com base na análise dos dados, utilizando ferramentas estatísticas e de aprendizado de máquina. O uso da espectroscopia de impedância para essa finalidade pode ser utilizado em trabalhos futuros, para fins de comparação de resultados em outros modelos de placas de circuito impresso e até mesmo direcionada a uma placa de aplicação comercial.

**Palavras-chave:** Espectroscopia de Impedância Elétrica. Detecção de Falhas. Placa de Circuito Impresso.

## **ABSTRACT**

Electronic devices are essential technologies in the daily life of contemporary society, being present in different solutions such as communication, transportation, automation, among others. This popularization is due to technological advances in areas such as electricity and the study of materials. But for improvements in electronics to continue to emerge and for quality safety to exist, it is important to study the components that make up an electronic device. The printed circuit board is one of the main components whose function is to hold and connect electronic components by means of tracks. In this sense, this work aims to analyze the behavior of potential short circuits in printed circuit board tracks, since this can be a fault that is detrimental to the performance of electronics. For this analysis, prototypes of single-sided boards with different short-circuit levels were developed and electrical impedance spectroscopy was used as the measurement tool. Although this technique is innovative for measurements for this purpose, it proved to be efficient and capable of detecting short-circuit levels in tracks, based on data analysis using statistical and machine learning tools. The use of impedance spectroscopy for this purpose could be used in future work to compare results on other models of printed circuit boards and even on a commercial application board.

**Keywords:** Electrical Impedance Spectroscopy. Fault Detection. Printed Circuit Board.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de projetos de placas de circuito impresso .....	18
Figura 2 - Circuito equivalente de uma PCI com base em uma linha de transmissão .....	19
Figura 3 – Interação de linhas de campo magnético entre trilhas em uma PCI .....	21
Figura 4 – Representação de um acoplamento eletromagnético entre trilhas de uma PCI.....	22
Figura 5 – Curva de tensão e corrente sobrepostas .....	24
Figura 6 – Exemplo de modelagem de circuito equivalente .....	28
Figura 7 - Exemplo de gráfico de Bode.....	28
Figura 8 - Exemplo de diagrama de Nyquist .....	29
Figura 9 - Ilustração dos principais parâmetros das trilhas projetadas.....	34
Figura 10 - Modelos das placas de circuito impresso desenvolvidas para medição .	35
Figura 11 - Apresentação da montagem do sistema de medição .....	38
Figura 12 - Histogramas, dados de módulo e fase.....	41
Figura 13 – Curvas de módulo e fase característica das medições realizadas.....	42
Figura 14 - Valores de correlação de Sperman, considerando a razão entre, módulo e fase, em relação ao espectro da frequência.....	43
Figura 15 - Dendrogramas, comparação de resultados em diferentes faixas de frequência .....	44
Figura 16 - Comparativo entre gráfico de dispersão e dendrograma .....	45
Figura 17 - Valores de módulo e fase em relação ao espectro da frequência.....	46
Figura 18 - Exemplo de caso.....	47
Figura 19 - Mapeamento perceptual, agrupamento de trilha pelo seu isolamento ....	47
Figura 20 - Mapeamento perceptual, agrupamento de trilha sua espessura .....	48
Figura 21 - Mapeamento perceptual, agrupamento entre trilhas com e sem falha....	48
Figura 22 - Infográfico, resultados dos algoritmos de aprendizagem de máquina ....	49
Figura 23 - Criando modelos de curva equivalente - ZView.....	50
Figura 24 - Circuito equivalente.....	51
Figura 25 - Coleta de dados na modelagem do circuito equivalente - ZView.....	52
Figura 26- Representação da distância entre pontos de medição de uma placa .....	53
Figura 27 - Placa de suporte de cabos.....	59
Figura 28 – Esquemático de dimensões do projeto das trilhas .....	60

Figura 29 - Dendrograma, datos de módulo entre 200 KHz a 1 MHz.....	66
Figura 30 - Dendrograma, datos de fase entre 200 KHz a 1 MHz.....	67
Figura 31 - Dendrograma, datos de módulo entre 2 MHz a 5 MHz.....	68
Figura 32 - Dendrograma, datos de fase entre 2 MHz a 5 MHz.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apresentação de informações das trilhas por agrupamento de trilhas, com características comuns .....	36
Tabela 2 - Apresentação de informações das trilhas por agrupamento de trilhas, com características comuns .....	37
Tabela 3 - Valores dos componentes que representam o circuito equivalente .....	52
Tabela 4 – Informações de cotas e razão das trilhas .....	61
Tabela 5 - Dados de estatística descritiva: medições de módulo.....	64
Tabela 6 - Dados de estatística descritiva: medições de fase.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
EIE	Espectroscopia de Impedância Elétrica
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
iNEMI	<i>International Electronics Manufacturing Initiative</i>
IPC	<i>Institute of Printed Circuits</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS .....	17
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO .....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Impedância.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Compatibilidade eletromagnética .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Cuidados para o desempenho de eletrônicos .....</b>	<b>22</b>
2.2	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA.....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Sinais de corrente e tensão alternada .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Representação da impedância.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Análise e interpretação de dados .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Representação gráfica .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Representação por circuito equivalentes e equações .....</b>	<b>27</b>
2.3	ANÁLISE DE DADOS MULTIVARIADO .....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Componentes principais.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Similaridade de dados .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Aprendizado de máquina.....</b>	<b>30</b>
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS .....	30
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
3.1	INVESTIGAÇÃO BIBLIOGRÁFICA .....	33
3.2	PROJETO DE CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO..	34
3.3	MEDIÇÕES UTILIZANDO A ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA .....	36
3.4	TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....	39
3.5	LEVANTAMENTO DE RESULTADOS.....	39
3.6	COMPORTAMENTO DO SISTEMA.....	40
3.7	DETERMINAÇÃO DA MELHOR FAIXA DE FREQUÊNCIA.....	42
3.8	ANALISANDO CORRELAÇÕES.....	44
3.9	ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA.....	49

3.10	MODELAGEM DE CIRCUITO EQUIVALENTE .....	50
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>54</b>
4.1	TRABALHOS FUTUROS .....	54
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS TRILHAS USADAS PARA MEDIÇÃO E DA PLACA DE SUPORTE DE CABOS.....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE C – DENDROGRAMA DOS DADOS DE MEDIÇÃO DISTRIBUIDOS EM GRUPO DE MÓDULO E FASE.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dispositivos inventados no final século XIX, como o telégrafo, o telefone e o rádio, foram os precursores do uso e avanço dos sistemas eletrônicos (GILLES; MURRAY, 1999); entretanto esses e os demais dispositivos eletrônicos inventados posteriormente apresentavam conexões entre diferentes componentes por meio de cabos ou barramentos individuais, o que tornava as suas confecções artesanais, suscetíveis a erros e demandavam espaço físico considerável (LEBLANC; ALFANO, 1993; GILLES; MURRAY, 1999).

No começo do século XX, foram registradas patentes e o uso da placa de circuito impresso (PCI) como forma de proporcionar melhorias aos projetos de equipamentos eletrônicos. Sua principal atribuição era conectar os componentes elétricos por meio de trilhas condutoras (GILLES; MURRAY, 1999; WHITNEY, 2004), o que trouxe ao produto eletrônico a diminuição de seu tamanho físico, a redução de tempo de produção, maior confiabilidade e duração do produto, e proporcionou a oportunidade de tornar a sua produção padronizada e automatizada (ENGE; MULLER, 1992; HOFFMANN, 2010).

Atualmente, há diferentes processos para a confecção de PCI, envolvendo métodos subtrativos como os químicos e a fresagem, ou métodos aditivos (FLORENÇO; CORREA; AMORIM, 2014). Logo, a partir das novas tecnologias e das demandas emergentes, o foco de melhorias dos eletrônicos e das PCIs abrem espaço para novos tópicos, tais como: a miniaturização de componentes; o trabalho com sistemas que demandem processadores com sinais em alta frequência; o desenvolvimento e a aplicação de materiais mais eficientes e menos poluentes; e o aperfeiçoamento dos processos de produção e de qualidade dos produtos fabricados (RONALD DRESLINSKI et al., 2010; RIGO et al., 2020). A partir do resultado dessas e de outras demandas, surgiram certificações e organizações que atuam globalmente em prol dessas melhorias.

As principais organizações que delimitam convenções para os mercados de fabricantes e comercial são a *International Electronics Manufacturing Initiative* (iNEMI) e *Institute of Printed Circuits* (IPC). Certificações como a RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) restringem ou delimitam o uso de substâncias perigosas em equipamentos elétricos, e são fornecidas pela FCC

(*Federal Communications Commission*), que estabelece normas para equipamentos de telecomunicações, entre outros, e são exemplos de certificações que garantem padrões de qualidade (PAUL, 2006).

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Dentre os desafios para desenvolver eletrônicos de qualidade, focar nos elementos básicos do produto é um fator essencial; por essa razão, a PCI merece atenção, seja na etapa de projeto ou de produção (BOGATIN, 2018). Os desafios encontrados na produção de PCIs para atribuir qualidade ao eletrônico estão associados aos tipos de materiais utilizados, à miniaturização de componentes e à demanda por sinais de alta frequência, entre outros fatores.

Para que se desenvolvam PCIs que entreguem o desempenho esperado dos eletrônicos, é importante dimensionar as condições de compatibilidade eletromagnética (*electromagnetic compatibility* - EMC) e de integridade de sinal em que o sistema será submetido (PAUL, 2006). Nesse sentido, o foco deste trabalho está na análise da integridade de sinal entre trilhas de PCI em condições de possíveis curtos-circuitos, que estão associados a efeitos de EMC indesejados.

Como técnica de análise para classificar a integridade de trilhas em PCIs, utilizou-se a espectroscopia de impedância elétrica (EIE), por ser empregada no meio científico para determinar características elétricas de materiais condutores (ABTAHI, 2014; TABUENCA, 2009), embora se observou a carência de publicações cruzando o uso da EIE em aplicações de análise de defeitos em PCIs ou eletrônicos. Além disso, apresenta-se como uma técnica não degradante para a medição do material e que pode ser replicada facilmente em condições de ensaios dentro e fora de laboratório.

Uma vez validada a espectroscopia de impedância elétrica como técnica de análise e inspeção de qualidade, é possível implantar processos de inspeções em todo o ciclo de vida de produção de uma PCI. Desta forma, pode-se dar mais confiabilidade aos processos de produção, o que evita futuras peças com defeitos ou baixo padrão de qualidade e desperdício de recursos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Correlacionar as medições feitas por meio da técnica de espectroscopia de impedância elétrica em uma trilha de placa de circuito impresso com a presença de potencial curto-circuito.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver modelos de placas de circuito impresso para simular defeitos de diferentes níveis de curto-circuito em trilhas de placas de circuito impresso.
- b) Realizar medições com a técnica de espectroscopia de impedância elétrica nas trilhas das placas.
- c) Correlacionar a análise de dados coletados por meio estatístico e com aprendizado computacional, com a presença de potencial curto-circuito em trilhas de placas de circuito impresso.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho organiza-se da seguinte forma:

Capítulo 2: apresenta uma breve contextualização teórica sobre as principais subáreas abordadas nesse trabalho. Sendo, análise de qualidade em placas de circuito impresso, a técnica de medição de espectroscopia de impedância elétrica e a análise de dados multivariados.

Capítulo 3: disserta sobre o protocolo experimental escolhido para esse trabalho e os resultados desenvolvidos ao longo do trabalho.

Capítulo 4: conclui o trabalho e cita possibilidades de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

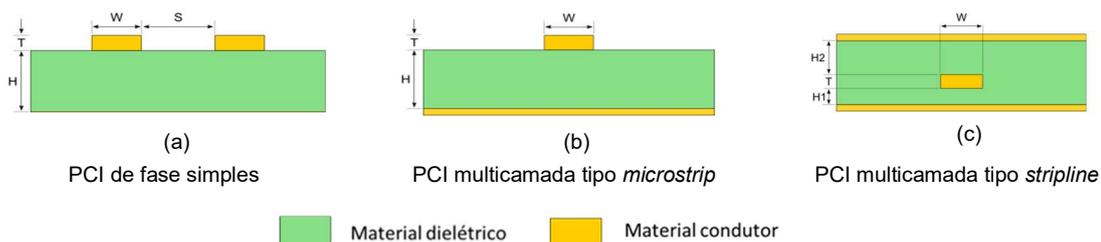
Neste capítulo são apresentadas bases teóricas necessárias para a compreensão da proposta deste trabalho. Primeiramente são apresentados conceitos do comportamento de placas de circuito impresso, em operação com corrente alternada e com base no seu *design* de projeto. Posteriormente, são abordados conceitos da técnica de espectroscopia de impedância para análise de materiais elétricos. Além disso, aborda-se o tema de estatística para análise multivariada, visto que os dados de medições de espectroscopia de impedância elétrica em PCI, são influenciadas por múltiplos parâmetros e variáveis. Para finalizar, é apresentado um subtópico, apresentando trabalhos relacionados.

### 2.1 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

A placa de circuito impresso (PCI) é um elemento fundamental para concepção de um eletrônico, o qual cumpre a função de conectar componentes elétricos por meio de trilhas condutoras. O material base de composição da placa deve cumprir o papel dielétrico, para isolar trilhas umas das outras (GILLES, MURRAY, 1999; WHITNEY, 2004).

Os processos de produção atuais permitem que uma PCI possa ser formada por uma camada, fase na qual recebe as trilhas condutoras, ou multicamadas (*multilayer*). Ressalta-se que um projeto *multilayer* pode ser do tipo *stripline*, em que há trilhas inseridas entre o material dielétrico obtendo-se mais de um plano de retorno; ou *microstrip*, onde as trilhas estão apenas nas camadas externas e se há apenas um plano de retorno (THIERAUF, 2004). Na imagem a seguir, Figura 1, apresenta-se exemplos dos diferentes tipos de PCI com vista de corte transversal.

Figura 1 - Exemplo de projetos de placas de circuito impresso

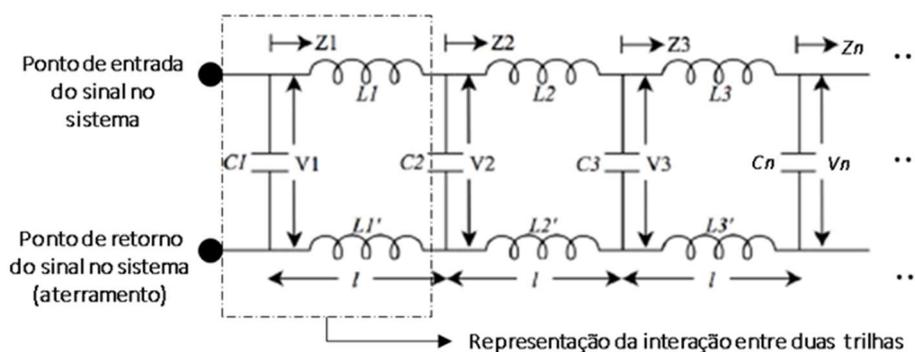


Fonte: Adaptado de Montrose (1999).

Segundo Paul (2006), uma PCI pode ser representada como uma estrutura sólida para comportar uma linha de transmissão, formada por trilhas e/ou planos condutores de alimentação, compartilhando um substrato comum. Uma linha de transmissão é formada por um ou mais condutores, que tendem a estar conectados paralelamente entre si, por um ou mais pontos com a finalidade de transmitir energia ou informação em forma de onda eletromagnética, de modo que essa informação, normalmente, seja tratada em níveis de tensão, no qual é derivada de um campo magnético.

Na premissa em que um capacitor é a junção de dois condutores em paralelo com diferença de potencial entre as suas cargas, a linha de transmissão pode ser representada como uma sequência de inúmeros capacitores associados em paralelo. A segunda premissa, é de que um condutor pode assumir a condição de um indutor, sendo assim a cada seção de uma linha de transmissão também há uma indutância. O equivalente de uma linha de transmissão pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Circuito equivalente de uma PCI com base em uma linha de transmissão



Fonte: Adaptado de Montrose (1999).

Onde C representa a capacitâncias; L representa a indutância; V representa a diferença de potencial elétrico; Z representa o valor de impedância; e l representa a relação de distância.

### 2.1.1 Impedância

Define-se a impedância como a oposição que a linha de transmissão apresenta em função da propagação do fluxo eletromagnético (PAUL, 2006), além de que é uma propriedade elétrica crítica para a integridade do sinal transmitido. Ao atentar ao fato de que em corrente contínua o valor da

impedância é determinado apenas por valores resistivos, em corrente alternada a impedância assume reatância indutiva ( $X_L$ ) ou capacitiva ( $X_C$ ). A seguir apresenta-se as equações de reatância, equações (1) e (2):

$$X_L = \omega \cdot L \quad (1)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3)$$

Sendo:  $f$  o valor da frequência em Hertz [Hz];  $L$  o valor da indutância em Henry [H];  $C$  o valor da capacitância em Farad [F];  $\omega$  o valor de frequência angular [Rad/s].

Destaca-se que o valor de reatância equivalente do sistema analisado vincula-se ao valor da frequência, conforme análise da equação (1) e (2), entretanto, em faixas de frequências elevadas, dependendo do circuito em kHz ou MHz, formam-se reatâncias indutivas e capacitivas parasitas (RITCHEY; ZASIO, 2003). A reatância indutiva parasita, tende a bloquear o fluxo eletromagnético, e a capacitiva tende a aterrar a energia, de modo que a impedância parasita, comporta-se de modo constante para o campo eletromagnético em todas as faixas de frequência elevadas.

Pode-se simplificar a impedância ( $Z_0$ ) de uma linha de transmissão conforme o equacionamento a seguir (EDWARDS, 2016), equação (4):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (4)$$

Sendo:  $L_0$  o valor da indutância parasita em função do comprimento entre as trilhas analisadas [H/m];  $C_0$  o valor da capacitância parasita em função do comprimento entre as trilhas analisadas [F/m].

Vale destacar que os valores  $L_0$  e  $C_0$  em trilhas são influenciados pelo tipo de material e da geometria do projeto da PCI. Nesse sentido os cálculos de  $Z_0$  são complexos e apresentados por equacionamentos aproximados, para cálculos de controle de impedância. Montrose (1999), por exemplo, apresenta o equacionamento de  $Z_0$  para projetos de placas tipo multicamada tipo *microstrip* e *stripline*, conforme apresentadas na Figura 1.

### 2.1.2 Compatibilidade eletromagnética

Segundo Montrose (1999), a compatibilidade eletromagnética (*electromagnetic compatibility* - EMC) é a capacidade de um sistema eletrônico operar em condições normais sem causar interferências eletromagnéticas a outros dispositivos ou a si mesmo. A EMC de eletrônicos é exigida por certificações na maioria de países, tais como, ISO, CISPR e FCC (PAUL, 2006).

A ocorrência da EMC é melhor compreendida em uma PCI, de acordo com Paul (2006), quando se identifica os seguintes elementos em um sistema eletrônico operante: (1) gerador do sinal, (2) caminho de transmissão do sinal e (3) receptor da energia eletromagnética ocasionado pelo sinal emitido. Nesse contexto, o receptor, que recebeu o sinal por meio conduzido ou radiado, pode ter um comportamento desejado ou indesejado, como, por exemplo, a geração de interferência eletromagnética. Destaca-se que a interferência pode propagar-se pelas emissões do tipo irradiada magneticamente ou conduzida por meio de material, metálico como trilhas ou elementos parasitas.

Quando as trilhas de PCI são alimentadas, gera-se campos magnéticos em torno do sinal emitido e do seu retorno. Ressalta-se, que o campo magnético gerado não se limita entre os sinais e o retorno, mas se propaga por toda superfície circundante (BOGATIN, 2018), coincidindo com trilhas adjacentes, no qual se pode gerar interferências. A Figura 3, apresenta um exemplo da interação das linhas de campo magnético geradas entre as trilhas de uma PCI.

Figura 3 – Interação de linhas de campo magnético entre trilhas em uma PCI

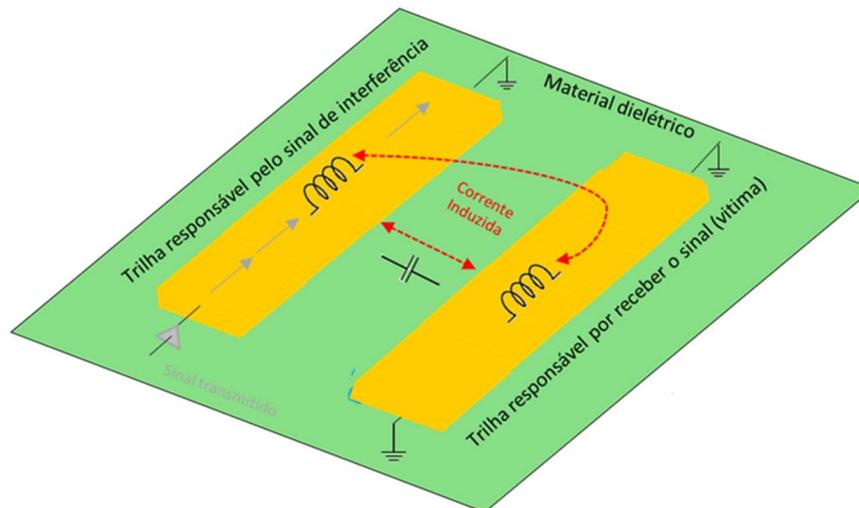


Fonte: Adaptado de Paul (2016).

Não há o correto acoplamento eletromagnético entre as trilhas, cabos ou outros componentes de um sistema eletrônico, o que gera comportamentos indesejados devido ao surgimento de campos magnéticos. Denota-se desse efeito o nome de *crosstalk* (BOGATIN, 2018). A Figura 4, apresenta a interação

entre as trilhas, onde nesse caso pode-se propagar interferência dos campos magnéticos gerados pela trilha em que o sinal é transmitido para trilha receptora (vítima), havendo nesse caso uma indutância mútua entre as trilhas ou acoplamento capacitivo.

Figura 4 – Representação de um acoplamento eletromagnético entre trilhas de uma PCI



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 2.1.3 Cuidados para o desempenho de eletrônicos

Para reduzir efeitos indesejados como o *crosstalk*, é imprescindível atenção do projetista ao desenvolver o design de projeto da PCI. Algumas considerações a serem cumpridas, nesse sentido: (1) evitar o agrupamento próximo de componentes eletrônicos em um mesmo circuito que tenham diferença significativa de trabalho em relação a faixa de frequência ou potência (IPC-2221, 2017); (2) aumentar o distanciamento e a isolação de trilhas que levem sinais de alta frequência (MONTROSE, 1999); (4) em alguns projetos do faz-se necessário criar planos de referência exclusivos (THIERAUF, 2004; MORRISON, 2007); e (5) também se pode projetar trilhas de guarda, no qual receberam o sinal de *crosstalk* propositalmente no lugar de outros (BOGATIN, 2018).

Além dos cuidados que o projetista deve ter com o desempenho do eletrônico em seu projeto, o usuário deve manter cuidados de uso e limpeza, pois, essas condições podem desencadear falhas relacionadas ao desgaste prematuro e que por consequência trazem interferências eletromagnéticas do

equipamento em operação. Exemplos de casos extremos de falhas, são: (1) a corrosão de trilhas advinda de alguma etapa de produção ou por contaminantes externos na fase de operação do eletrônico (YAN et al., 2017; LEE; YAO; LEE, 2020); (2) outro fator relevante é a fuga de corrente entre trilhas, que em caso extremos podem causar curto-circuito, fato que ocorre principalmente em trilhas responsáveis por sinais de corrente alternada ou de alta frequência em virtude de contaminantes que interferem no isolamento entre as trilhas (AMBAT, 2003).

## 2.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

A técnica de espectroscopia de impedância elétrica (EIE) possibilita a caracterização elétrica de um corpo de prova; inclui a dinâmica do seu sistema de medição mediante eletrodos (leva-se em conta parâmetros como o seu material e disposição) e fluido de condução (se for o caso), por meio na análise da interação entre o material analisado e a aplicação de um potencial alternado. Essa medição é possível em virtude do fenômeno elétrico da impedância, que ocorre mediante a capacidade de um material em resistir à passagem de uma corrente elétrica alternada (LASIA, 2014). Vale ressaltar que parâmetros associados ao sinal alternado, como a faixa de frequência, o range de potencial e o formato impactam nos resultados obtidos.

Publicações científicas sobre a EIE são registradas desde 1960 (ORAZEM, TRIBOLLET, 2011). Atualmente, a técnica é utilizada em ampla gama de estudos, relacionados a diferentes objetos, tais como materiais condutores e semicondutores (TAIT, 1994; MANSFELD, 2003; XIA et al., 2020), reações químicas (NARAYANAN et al., 1993) e o comportamento de amostras biológicas (OLARTE-ECHEVERRI et al., 2010). A técnica é bem estabelecida para a caracterização de sistemas que tendem a ter comportamento de estado estacionário durante o período de análise (DE CARVALHO; DE ANDRADE; BUENO, 2006).

### 2.2.1 Sinais de corrente e tensão alternada

Os sinais de corrente e tensão alternada, base para a técnica de EIE, variam com o tempo de forma periódica. Entre os modelos de sinais periódicos, o modelo com forma senoidal é o que mais facilita o trabalho com a modelagem

matemática e por esse motivo é usado na maioria dos casos (YUAN et al., 2010). As Equações (5) e (6) representam a modelagem de uma onda senoidal de tensão ( $V_{(\omega,t)}$ ) e corrente ( $I_{(\omega,t)}$ ), em função do tempo em segundos (t).

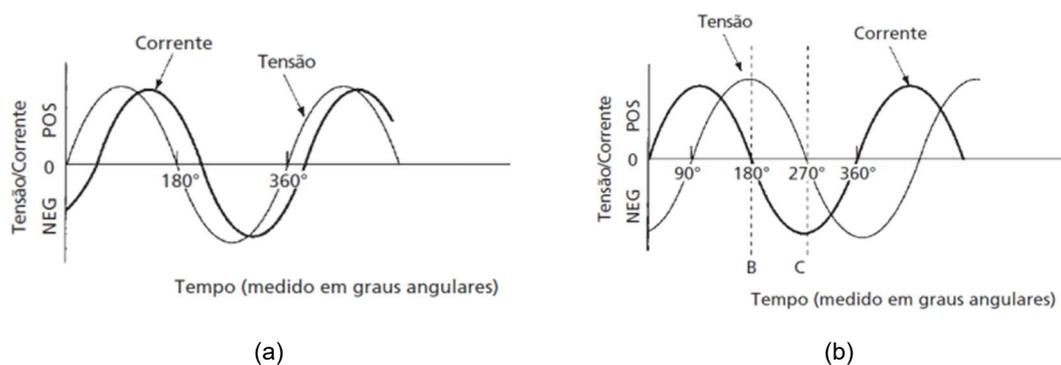
$$V_{(\omega,t)} = V_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta) \quad (5)$$

$$I_{(\omega,t)} = I_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi) \quad (6)$$

Sendo:  $\theta$  e  $\varphi$  : o valor de ângulo de fase.

Os valores de ângulo de fase das Equações (5) e (6) provêm do deslocamento que o sinal alternado sofrerá ao interagir com o sistema medido, devido à sua característica elétrica intrínseca apenas a cargas capacitivas ou indutivas. Isso representa que em cargas capacitivas o sinal de corrente adianta-se em relação à tensão, conforme ilustrado na Figura 5.a, e em cargas indutivas o sinal de tensão adianta-se em relação à corrente, conforme ilustrado na Figura 5.b. Um valor de ângulo de fase positivo equivale a carga indutiva, valor negativo a carga capacitiva, e no último caso, o valor nulo representa uma carga apenas resistiva.

Figura 5 – Curva de tensão e corrente sobrepostas



(a) Curva de tensão adiantada da corrente

(b) Curva de corrente adiantada da tensão

Fonte: Torres (2012).

As retas verticais representadas na Figura 5.b, por B e C, indicam os pontos que cada curva tem o valor nulo no instante de meio período, representados pelo ângulo de fase de  $180^\circ$  e  $270^\circ$ . Ao empregar esses pontos como referência, a impedância desse sinal, nesse caso, tem uma

correspondente de ângulo de fase de  $+90^\circ$ , sendo o cálculo baseado na diferença entre os valores do ângulo de fase do sinal de tensão sobre a corrente.

### 2.2.2 Representação da impedância

Na técnica de espectroscopia de impedância, o valor da impedância medida é oriundo dos sinais de tensão e corrente, resultado da interação entre o sinal referencial injetado no sistema. Com base nas Equações (5) e (6), o valor da impedância  $Z$  resulta da razão da representação do sinal de tensão ( $V_{(\omega.t)}$ ) pela corrente ( $I_{(\omega.t)}$ ), conforme apresentado a seguir pela Equação (7).

$$Z = \frac{V_{(\omega.t)}}{I_{(\omega.t)}} = \frac{V_0 \cdot \text{sen}(\omega.t + \theta)}{I_0 \cdot \text{sen}(\omega.t + \varphi)} \quad (7)$$

A notação do valor da impedância é amplamente simplificado na literatura por valores de números complexos, que tem como base a relação de Euler, ao relacionar a representação de números complexos com a trigonometria, conforme apresentado na Equação (8).

$$e^{j\alpha} = \cos(\alpha) + j \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (8)$$

Sendo:  $j$  a unidade imaginária,  $j = \sqrt{-1}$ .

Ao realizar as substituições devidas de termos semelhantes da Equação (8), na (7), e ao simplificar de forma algébrica, obtém-se como base a notação padrão para representar valores de impedância, Equação (9).

$$Z = |Z| \cdot e^{j\alpha} = Z' + j \cdot Z'' \quad (9)$$

Nessa representação, a parte real ( $Z'$ ) do conjugado da impedância é equivalente a  $|Z| \cdot [\cos(\alpha)]$  e a parte imaginária ( $Z''$ ) a  $|Z| \cdot [\text{sen}(\alpha)]$ , de modo que a representação de  $Z$  por meio do valor de módulo ( $|Z|$ ) e ângulo de fase ( $\alpha$ ) também sejam válidas, conforme apresentado pelas Equações (10) e (11).

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{Z'}{Z''} \right) \quad (11)$$

### 2.2.3 Análise e interpretação de dados

A técnica de EIE é aplicada frequentemente a sistemas que não foram estudados anteriormente; entretanto, para que se possa ter confiança nos dados experimentais obtidos, é importante adotar protocolos de instrumentação e pesquisas corretos. Yuan et al. (2010) e Lasia (2014) destacam quatro critérios teóricos que devem ser obedecidos para a validação dos dados: (1) linearidade, (2) causalidade, (3) estabilidade e (4) finitude.

**Critério de linearidade:** denomina-se um sistema como linear quando a sua resposta é a soma de sinais de entrada individuais. Isso implica que o sistema pode ser modelado por equacionamento diferencial linear. Na prática, isso acarreta que a impedância do sistema deve ser proporcional à amplitude do sinal de corrente alternada injetada; além disso, os sistemas lineares não podem apresentar histerese na sua resposta em  $\omega = 0$ .

**Critério de causalidade:** a resposta do sistema deve ser inteiramente determinada pela perturbação aplicada; ou seja, a saída depende apenas dos valores de entrada atuais e passados. Um sistema causal não pode prever qual será o seu sinal de entrada futuro. Isso significa que, se o sistema estiver em repouso e uma perturbação for aplicada em  $t = 0$ , a resposta deve ser nula para todo  $t < 0$ ; no plano complexo, estabelece-se o mesmo princípio para todo  $t < 0$ ,  $\omega = 0$ .

**Critério de estabilidade:** determina-se a estabilidade de um sistema pela sua resposta às entradas. Um sistema estável permanece estável, a menos que seja excitada por fonte externa, e deve voltar ao seu estado original após a perturbação, independentemente da entrada. O sistema é estável se a sua resposta à excitação impulsiva se aproxima de 0 em tempos longos ou quando cada entrada limitada produz uma saída limitada. A impedância  $Z(t)$  deve satisfazer as seguintes condições: considera-se  $s = a + jb$ ,  $Z(t) \in \mathbb{R}$  quando  $s \in \mathbb{R}$ , sendo que  $a \rightarrow 0$  e  $\mathbb{R}[Z(t)] \geq 0$ ; esta última condição garante que não existem resistências negativas no sistema. As medições de impedância também

devem ser estacionárias, ou seja, a impedância medida não deve ser dependente do tempo.

Critério de finitude: os conjugados da impedância devem ter valor finito em toda a faixa de frequências ( $0 < \omega < \infty$ ). Em particular, a impedância deve tender a um valor real constante para  $\omega \rightarrow 0$  e  $\omega \rightarrow \infty$ .

#### **2.2.4 Representação gráfica**

De um modo geral, a espectroscopia de impedância elétrica de um sistema pode ser representada pelo diagrama de Nyquist e pelo gráfico de Bode, que descrevem informações da impedância em função da frequência (YUAN et al., 2010).

O diagrama de Nyquist representa os dados experimentais na forma de pontos em um plano cartesiano, com coordenadas baseadas nos conjugados da impedância, em que cada ponto corresponde a uma medida em determinada frequência.

O gráfico de Bode é uma alternativa de representação da impedância, e descreve dependências do módulo e fase em função da frequência. Nesse modelo são geradas duas curvas, que podem ser apresentadas em gráficos distintos ou mesclados. Normalmente, o gráfico de Bode é apresentado em escala logarítmica ao longo da gama de frequências medida, sendo que o valor correspondente destes pontos é intercalado em décadas. Ambos os gráficos começam normalmente numa frequência e terminam numa frequência baixa, o que permite encontrar a resistência inicial mais rapidamente em uma análise visual.

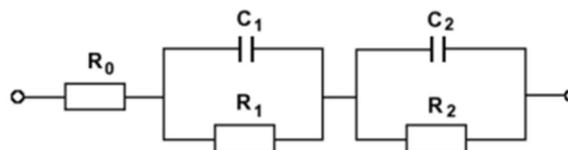
#### **2.2.5 Representação por circuito equivalentes e equações**

A análise dos dados EIE é normalmente efetuada por meio da sua adaptação a um modelo de circuito elétrico equivalente. O circuito baseia-se na combinação de componentes básicos como resistores, capacitores e/ou indutores – associados em série ou em paralelo. Para verificar comportamentos específicos, em alguns casos, adota-se elementos simbólicos para elementos dos circuitos (tais como elementos de difusão Warburg e elementos de fase constante). O conceito fundamental ao empregar-se um modelo, é de que cada

componente do circuito correlaciona um comportamento físico do processo estudado e tem um comportamento de impedância característico (LASIA, 2002).

O circuito modelado por aproximação fornece dados de impedância característica, na qual pode ser comparada com os dados reais. Desta forma, é possível determinar o grau de representação do modelo de circuito proposto, para posteriormente poderem ser realizadas modelagens matemáticas do sistema com base no circuito equivalente. Para exemplificação, a Figura 6 representa a construção de um circuito formado por resistores e capacitores.

Figura 6 – Exemplo de modelagem de circuito equivalente

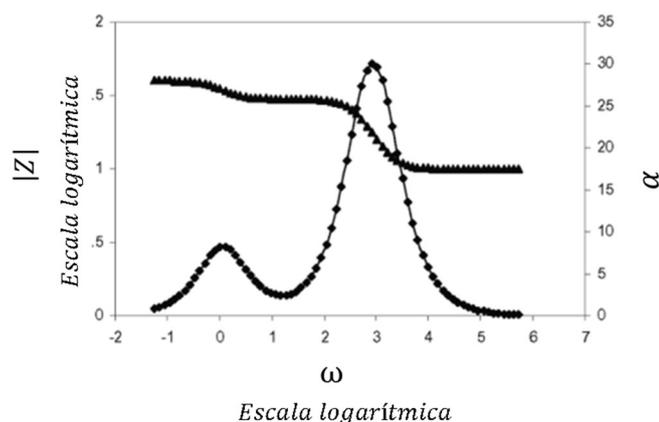


Fonte: Adaptado de Yuan et al. (2010)

Valores dos componentes considerados no exemplo:  $R_0=10 \Omega$ ;  $R_1=20 \Omega$ ;  $C_1=0,0001 \text{ F}$ ;  $R_2=20 \Omega$ ;  $C_2=0,1 \text{ F}$ .

O gráfico de Bode, Figura 7, e o diagrama de Nyquist, Figura 8, representa o comportamento da impedância do circuito representado na Figura 6, com sinais variando na faixa de frequências de 100 kHz a 0,01 Hz.

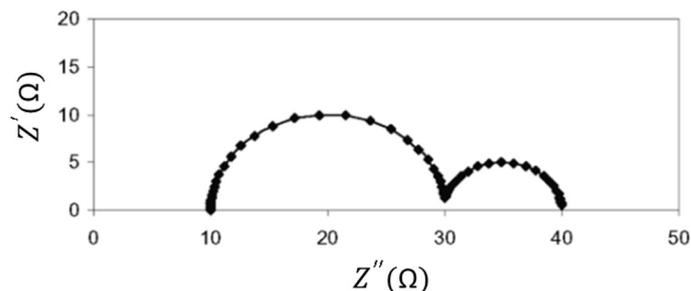
Figura 7 - Exemplo de gráfico de Bode



Fonte: Adaptado de Yuan et al. (2010)

Representação com comportamento da impedância pelo gráfico de Bode, faixa de frequência variando de 100 kHz a 0,01 Hz. Neste exemplo, por apresentar a curva de módulo e a fase em função de  $\omega$ , no mesmo gráfico, faz-se necessário 2 eixos de escala (eixos verticais). Legenda: ( $\blacklozenge$  -  $|Z|$ ) e ( $\blacktriangle$  -  $\alpha$ ).

Figura 8 - Exemplo de diagrama de Nyquist



Fonte: Adaptado de Yuan et al. (2010)

Representação com comportamento da impedância pelo diagrama de Nyquist, a faixa de frequência varia de 100 kHz a 0,01 Hz.

### 2.3 ANÁLISE DE DADOS MULTIVARIADO

O projeto de *design* de uma PCI tem vários parâmetros que devem ser levados em considerações, que por consequência impactam no desempenho do sistema eletrônico derivado desta PCI. Visto que a abordagem metodológica deste trabalho leva em consideração a análise de trilhas com diferentes espessuras e isolamentos, além do fato que o comportamento de qualquer trilha medida varia a cada faixa de frequência, no aspecto da EIE a análise em questão torna-se um caso de análise de dados multivariado. Nesse sentido, apresentam-se algumas técnicas de manipulação de dados multivariados, que foram aplicadas nesse trabalho.

#### 2.3.1 Componentes principais

A análise de componentes principais é um dos métodos multivariados mais simples. O objetivo da análise é tornar os problemas com determinada dimensão inicial, com menor dimensão. Isso significa que o novo modelo terá correlação com os dados anteriores. Vale ressaltar que nem sempre essa lógica predomina, pois muitas variáveis originais são reduzidas a um menor número. Se as variáveis originais são não correlacionadas, então a análise não chega a um resultado satisfatório. (MANLY; ALBERTO, 2019). Um dos principais benefícios em empregar essa técnica é a possibilidade de diminuição da complexidade do modelo analisado e permitir auxiliar em manipulações computacionais, visto que o número de variáveis manipuladas pode ser reduzido consideravelmente.

### **2.3.2 Similaridade de dados**

A análise de agrupamentos é uma técnica analítica para desenvolver subgrupos significativos de indivíduos ou objetos. Especificamente, o objetivo é classificar uma amostra considerável de entidades em agrupamentos menores que tenham características mútuas. Exemplos de ferramentas que auxiliam nessa classificação são o mapeamento perceptual e o dendrograma (JR, BLACK, 2009).

### **2.3.3 Aprendizado de máquina**

A inteligência artificial se propõe a capacitar máquinas a executar tarefas de maneira semelhante ao comportamento humano na tomada de decisões. Dentro desse contexto, o aprendizado de máquina emerge como um subcampo da inteligência artificial com o objetivo de capacitar programas de computador a aprimorar seu desempenho em tarefas específicas (MITCHELL, 1997).

Para que o aprendizado de máquina possa ser desenvolvido com sucesso, é essencial acumular conhecimento sobre um domínio específico, com base em um conjunto de dados relevante. Esse processo pode ser decomposto em sete etapas fundamentais: coleta de dados, preparação dos dados, escolha do modelo, treinamento, avaliação, ajuste de parâmetros e implementação (LENZ, 2020).

Dentro do aprendizado de máquina, existem dois paradigmas amplamente explorados: o aprendizado supervisionado e o aprendizado não supervisionado (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2009). O aprendizado supervisionado envolve a tarefa de treinar um modelo com dados rotulados, permitindo que ele faça previsões ou classificações com base nesses rótulos. Por outro lado, o aprendizado não supervisionado lida com a exploração de padrões e estruturas ocultas em conjuntos de dados não rotulados.

## **2.4 TRABALHOS RELACIONADOS**

Ao investigar publicações relacionadas diretamente ao uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) na análise e caracterização de componentes eletrônicos ou Placas de Circuitos Impressos (PCIs), não foram encontradas publicações nos principais mecanismos de busca, como IEEE

Xplore e Google Scholar, por exemplo. Embora a EIE seja uma técnica comumente empregada em estudos de defeitos de corrosão e curto-circuito em materiais condutores, isso destaca a oportunidade de direcionar mais atenção para a aplicação dessa técnica na caracterização de falhas em PCIs.

Publicações como as de Das e Reddy (2022), Gong et al. (2022) e Shi e Kanou (2015) utilizaram a Espectroscopia de Impedância no domínio do tempo e da frequência para analisar cabos elétricos, com foco em sistemas de geração e distribuição de energia que apresentam falhas de fuga de energia e/ou curto-circuito. Esses estudos obtiveram sucesso na modelagem matemática e propuseram sistemas para a identificação de falhas. Visto que os sistemas de geração e distribuição operam com base nos mesmos princípios teóricos e fundamentais da eletrônica, argumenta-se que a análise de curto-circuito em PCIs, usando a EIE, é viável.

No contexto da inspeção, manutenção e avaliação de desempenho em placas de circuito impresso, é crucial definir o parâmetro que se pretende diagnosticar, a fim de selecionar a melhor técnica de aplicação. Portanto, ao lidar com falhas relacionadas à compatibilidade eletromagnética e às trilhas de circuito impresso, é possível incluir o curto-circuito e a corrosão como exemplos. Embora este trabalho esteja focado no estudo de casos de curto-circuito, é importante observar que ambas as falhas, corrosão e curto-circuito, compartilham técnicas de investigação comuns.

Embora o uso de técnicas de inspeção por imagens possa parecer simples, elas desempenham um papel fundamental no levantamento de falhas de corrosão e curto-circuito. Publicações de Ambat (2003), Le et al. (2020) e Lee et al. (2016) empregaram técnicas de imagem para identificar corrosões em PCIs, incluindo microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e feixe de íons focalizados, entre outras. O trabalho de Cui et al. (2022) teve como objetivo investigar o comportamento de um novo modelo de MOSFET sob condições de estresse causadas por curto-circuito e sobrecarga. Algumas das avaliações realizadas neste estudo envolveram técnicas de inspeção por imagens, as mesmas usadas para a detecção de corrosão. Um dos métodos que mais impactaram essa avaliação foi a identificação de falhas por fuga térmica e a análise das áreas do componente com alterações físico-químicas.

Ling et al. (2018) exploraram a possibilidade do comissionamento virtual de falhas por meio de modelos computacionais, com foco na identificação do efeito de crosstalk em PCIs, uma técnica que pode prevenir falhas em estágios iniciais de um projeto. Yousif (2021) também se concentrou na identificação do efeito de crosstalk em PCIs, mas por meio de uma metodologia experimental, utilizando a técnica de Analisador Vetorial de Redes.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Yin (2014), o estudo de caso é uma abordagem de pesquisa na qual se concentra na investigação de uma situação específica, evento, pessoa, grupo ou organizações. Podendo envolver coleta de dados quantitativos e/ou qualitativos para auxiliar na compreensão do caso em questão. Com base na definição de um estudo de caso, esse trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, no qual se limita a parâmetros de confecção das PCIs confeccionadas, utilizando a EIE como meio de medição para analisar potenciais curtos-circuitos. Nesse sentido esse trabalho limita-se ao estudo de um objeto de estudo com características pré-definidas, que forneceram dados qualitativos por meio de medições.

O desenvolvimento desse trabalho pode ser dividido nas seguintes etapas: investigação bibliográfica de trabalhos correlacionados; projeto de confecção de PCIs, objeto de estudo do trabalho; medições com as PCIs confeccionadas utilizando a espectroscopia de impedância elétrica; tratamento e análise dos dados obtidos; e levantamento de resultados.

#### 3.1 INVESTIGAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa de investigação bibliográfica foi realizada com o intuito de levantar trabalhos correlacionados, ao tema de estudo de falhas em PCI ou eletrônicos que utilizassem a espectroscopia de impedância como principal técnica. Visando coletar informações que contribuíssem no desenvolvimento das etapas seguintes do trabalho. Para isso, foi utilizado diferentes mecanismos de buscas acadêmico, tais como: IEEE Xplore, Scopus e Google Scholar, por exemplo. E separados artigos, dissertações e tese.

Os critérios de pesquisa, foram inicialmente estabelecidos através do tema proposto, definindo palavras chaves, tais como: espectroscopia de impedância elétrica, detecção de falhas, placas de circuito impresso e *crosstalk*. Após a definição de palavras chaves, realizou-se a coleta de dados na base e analisou-se os dados utilizando um critério bem claro de inclusão e exclusão para o estudo.

Os critérios de inclusão e exclusão devem ser definidos anteriormente ao início da uma revisão bibliográfica, com o objetivo de definir de forma clara e

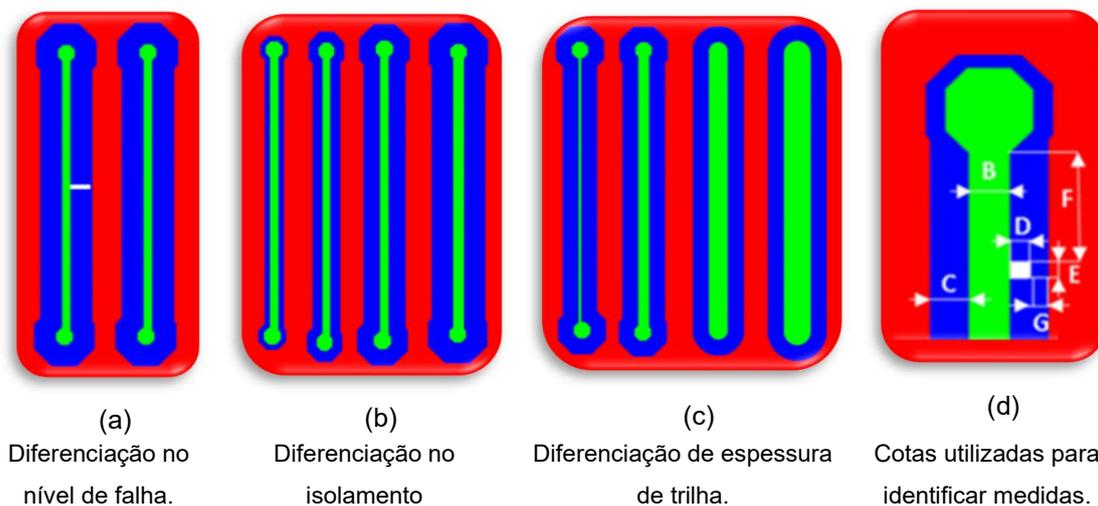
replicável, os estudos que serão ou não selecionados para a análise mais aprofundada de trabalhos (LINARES-ESPINÓS et al. 2018). Os trabalhos que tiveram leitura executadas na íntegra ou parcialmente, tiveram os seguintes critérios validados: (a) publicações com menos de 10 anos e (b) inicialmente o título ou resumo, teriam que estar de acordo com o tema de investigação.

Os resultados obtidos, foram fundamentais para o desenvolvimento do Capítulo 2, de embasamento teórico, e auxílio da elaboração metodológica experimental como o levantamento de resultados.

### 3.2 PROJETO DE CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

A confecção de PCIs, para comportar trilhas em cobre, que foram os objetos de estudos nesse trabalho, tiveram diferentes parâmetros considerados para estudo: (1) nível de curto-circuito da trilha, (2) isolamento da trilha com o plano de referência (aterramento) e (3) espessura da trilha. A figura a seguir, Figura 9, ilustra os principais parâmetros considerados.

Figura 9 - Ilustração dos principais parâmetros das trilhas projetadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base nas cotas disponíveis, na Figura 9.d, nota-se a espessura da trilha está correlacionada a cota B, o isolamento correlacionado cota C e o nível de falha representado pela área branca, área entre a região de isolamento (em azul), na qual faz o papel de potencial curto-circuito.

O objetivo em alterar esses parâmetros foi em verificar empiricamente na etapa de medição, a sua correlação no valor de impedância medido. Com o levantamento teórico feito anteriormente, já se esperava que o efeito de nível de

curto-circuito e isolamento tivessem correlação direta com o efeito de *crosstalk* (MONTROSE, 1999).

Para comportar todas as trilhas usadas no projeto inicial, foram desenvolvidas PCIs, sendo o material isolante da placa de fenolite e as trilhas de cobre. Ao todo foram produzidas 19 placas, onde cada placa comporta 12 trilhas. Cada placa recebeu trilhas com diferentes espessuras, porém com mesmo nível de isolamento e nível de falha. A Figura 10, apresenta as placas em estado final após processadas e com pinos soldados, projetados para auxiliar no processo de medição.

Ao todo foram desenvolvidas 228 trilhas diferentes umas das outras. O Apêndice A, fornece os valores de dimensões de cada trilha que foi usada no projeto<sup>1</sup>.

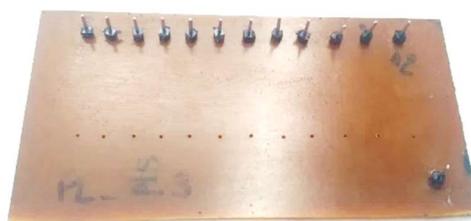
Figura 10 - Modelos das placas de circuito impresso desenvolvidas para medição



(a)  
Placa de circuito impresso com trilhas sem a presença de falha



(b)  
Placa de circuito impresso com trilhas com a presença de falha (curto-circuito)



(c)  
Parte inferior da placa de circuito impresso

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

<sup>1</sup> Além das informações apresentadas nesse documento, é possível acessar informações extras: (1) projeto de confecção das PCIs, (2) resultados das medições e (3) os códigos dos algoritmos desenvolvidos nesse trabalho, por meio do seguinte endereço eletrônico: <https://github.com/YVESSB/InvestigacaoFalhaEmTrilhasPCB.git>.

Por meio da Tabela 1, é possível identificar os agrupamentos e características de trilhas confeccionadas. Os valores da tabela representam o número de trilhas confeccionadas com as características de espessura, isolamento e a presença de falha. Vale destacar que no isolamento de 0,5 mm, os grupos de trilhas de mesma espessura tiveram um nível de diferenciação de apenas 3 níveis de falha (potencial curto-circuito) e os de isolamento de 10, 15 e 20 mm, 4 níveis.

Tabela 1 - Apresentação de informações das trilhas por agrupamento de trilhas, com características comuns

Trilhas com falhas (nível de falha diferentes)					Trilhas sem falha				
0,25	3	4	4	4	0,25	1	1	1	1
0,50	3	4	4	4	0,50	1	1	1	1
0,75	3	4	4	4	0,75	1	1	1	1
1,00	3	4	4	4	1,00	1	1	1	1
1,25	3	4	4	4	1,25	1	1	1	1
1,50	3	4	4	4	1,50	1	1	1	1
1,75	3	4	4	4	1,75	1	1	1	1
2,00	3	4	4	4	2,00	1	1	1	1
2,25	3	4	4	4	2,25	1	1	1	1
2,50	3	4	4	4	2,50	1	1	1	1
2,75	3	4	4	4	2,75	1	1	1	1
3,00	3	4	4	4	3,00	1	1	1	1
<b>Isolamento [mm]</b>					<b>Isolamento [mm]</b>				
0,5 1,0 1,5 2,0					0,5 1,0 1,5 2,0				

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.3 MEDIÇÕES UTILIZANDO A ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA

Embora tenha sido confeccionado o total de 228 trilhas para estudo, nem todas foram utilizadas para medições. Em virtude disso, a Tabela 2, apresenta apenas os grupos de trilhas que foram separados para medição e análise de dados. No caso das trilhas de isolamento de 2 mm e com falha, foi escolhido apenas as que tinham nível menor. Ao longo do trabalho será adotado que, o nível de falhas das trilhas de mesma espessura, pertencem a um mesmo grupo de observação, e não classificadas em níveis de falha 1, 2, 3 ou 4, proporcional a área de potencial curto-circuito projetada.

Tabela 2 - Apresentação de informações das trilhas por agrupamento de trilhas, com características comuns

Trilhas com falhas (nível de falha diferentes)					Trilhas sem falha				
0,25	3	4	4	1	0,25	1	1	1	1
-	-	-	-	-	0,50	1	1	1	1
0,75	3	4	4	1	0,75	1	1	1	1
-	-	-	-	-	1,00	1	1	1	1
1,25	3	4	4	1	1,25	1	1	1	1
-	-	-	-	-	1,50	1	1	1	1
1,75	3	4	4	1	1,75	1	1	1	1
-	-	-	-	-	2,00	1	1	1	1
2,25	3	4	4	1	2,25	1	1	1	1
-	-	-	-	-	2,50	1	1	1	1
2,75	3	4	4	1	2,75	1	1	1	1
-	-	-	-	-	3,00	1	1	1	1
<b>Isolamento [mm]</b>					<b>Isolamento [mm]</b>				
0,5 1,0 1,5 2,0					0,5 1,0 1,5 2,0				

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As medições feitas utilizaram o analisador de impedância modelo MFIA 500kHz/5MHz, da *Zurich Instruments*<sup>2</sup>, padrão ouro. Segue listado a seguir, os parâmetros condicionados ao instrumento no momento das medições:

- Faixa de frequência selecionada: 1000 kHz a 5 MHz;
- Número de pontos para medições discretas: 100;
- Os valores de frequência de amostragem, foram espaçados em escala logarítmica de forma automática pelo analisador;
- O analisador forneceu sinal de corrente senoidal para o sistema de amostra. Selecionado a opção de ajuste de ganho automático do sinal.
- A medição foi feita a dois fios, ou seja, com dois pontos de fixação na amostra.

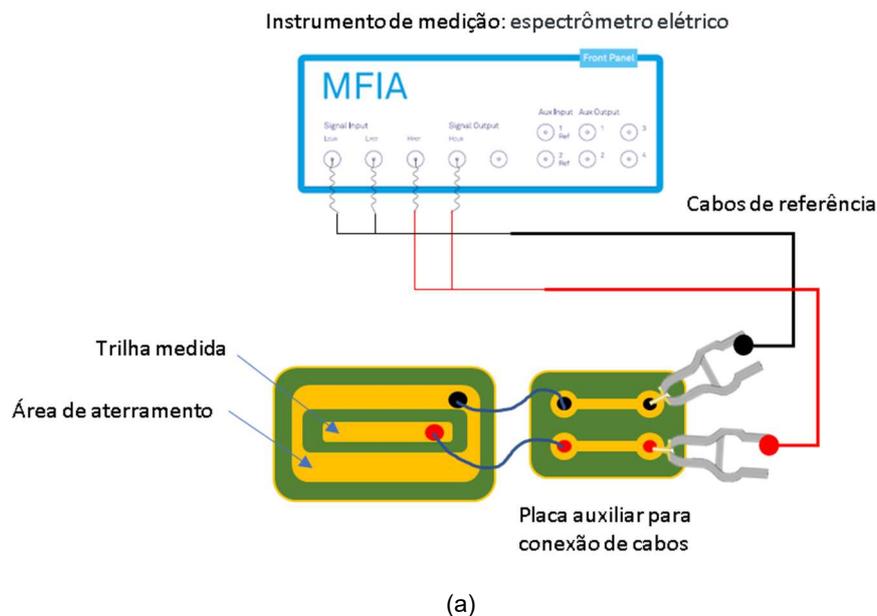
A Figura 11a apresenta o esquemático de elementos presentes no sistema de instrumentação utilizado. Para garantir que os cabos do analisador tivessem o menos de interferência mecânica e/ou eletromagnética até chegar aos pontos de conexão das trilhas, para medição de fato, foi desenvolvido uma

<sup>2</sup> Para mais informações sobre o analisador de impedância utilizado, acesse endereço eletrônico do fabricante: <https://www.zhinst.com>.

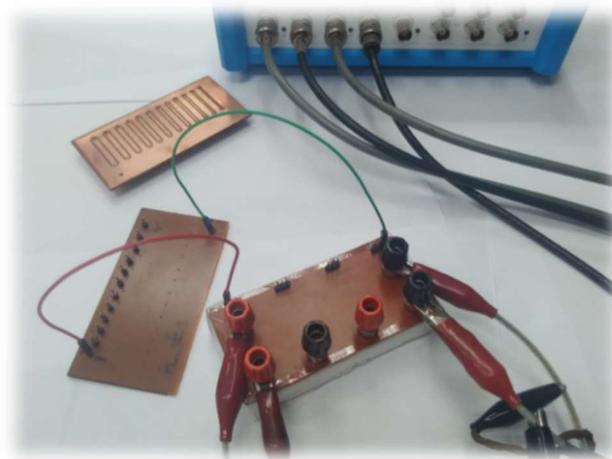
placa para unir os cabos do instrumento até os pinos, por meio do auxílio de conectores. O resultado prático de uma medição pode ser visto na Figura 11b.

Os detalhes construtivos inerente a placa desenvolvida para auxiliar na conexão dos cabos, pode ser consultado no Apêndice A.

Figura 11 - Apresentação da montagem do sistema de medição



Esquemático representando o sistema de medição



(b)

Imagem do momento da medição de trilhas, com o analisador de impedância.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao ser medido a impedância de determinada trilha, foi gerado um arquivo com 5 medições, da mesma trilha, para análise posterior. A redundância de

informação é uma forma de garantir e possibilitar a análise de acurácia e/ou precisão de um instrumento de medição.

### 3.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Embora aqui esteja sendo apresentado um protocolo experimental dos procedimentos e parâmetros para as medições, foi necessário haver medições de teste iniciais, seguidas de uma análise primária das informações coletadas. Apenas ao ser validado a qualidade dessas medições como apropriadas para estudo, foi adotado os parâmetros indicados nos tópicos anteriores. Nesse sentido, segue algumas observações relevantes:

- a) Observou-se que as medições sem a placa auxiliar, para suporte dos cabos, inviabilizavam as medições. Em virtude da presença de interferências, derivando ruídos e não obedecendo as condições de causalidade e estabilidade do sistema (ver tópico 2.2.3).
- b) A medições não são estáveis em baixas frequências. Medições abaixo de 10 kHz foram desconsideradas para avaliação de acompanhamento das medições.
- c) r

Após finalizar todas as medições previstas, das trilhas selecionadas, foi iniciado o tratamento dos dados. Nos quais, pode ser descrito pelas seguintes etapas:

- a) Os arquivos individuais de cada medição, foram concatenados em apenas um arquivo, visando melhor tratamento das informações.
- b) Uma vez constatado que as 5 medições de cada trilha, tinham bom índice de acurácia e precisão, por meio do desvio padrão, foi retirado a média dessas cinco amostragens. Esse resultado foi utilizado nas análises.
- c) Não foi necessário aplicar tratamento nos dados coletados ou refazer alguma medição. Como exemplo de forma de tratar um sinal, temos algoritmos de filtro digitais ou até mesmo a aplicação simples da técnica de média móvel, amplamente utilizada em sistemas de instrumentações.

### 3.5 LEVANTAMENTO DE RESULTADOS

No desenvolvimento deste trabalho foi empregado ferramentas comuns na análise de dados de EIE, como o gráfico de Bode e a proposta de um modelo

de circuito equivalente, utilizando o *software* de análise numérica Zview<sup>3</sup>. Além disso optou-se por trazer técnicas amplamente utilizadas em análise de dados multivariados, como é o caso para apresentação dos dados utilizando mapeamento perceptual e dendrograma.

Com o propósito de fazer uma classificação binária, entre trilhas sem ou com falhas, optou-se em utilizar algoritmos de aprendizado de máquina por reforço, no qual cumprem essa finalidade para modelos mais complexos (LENZ, 2020). Foram utilizados mais de um modelo de algoritmo para fins de comparação. Para identificar o algoritmo com melhor desempenho utilizou-se os critérios quantitativos de F1Score, acurácia e precisão. Representado pelas equações a seguir:

$$F1_{SCORE} = \frac{VP}{VP + \frac{1}{2}(FP + FN)} \quad (12)$$

$$acurácia = \frac{VP + VN}{N} \quad (13)$$

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \quad (14)$$

Sendo: *VP*: valor verdadeiro positivo; *VN*: valor verdadeiro negativo; *FP*: valor falso positivo; *FN*: valor falso negativo.

O procedimento adotado para desenvolvimento dos algoritmos baseou-se no trabalho de Escovedo e Koshiyama (2020). Nesse sentido 60% dos dados, foram balanceados e separados para treino, o restante para teste de desempenho. Além disso, foram feitos testes com os dados normalizados e sem normalização.

### 3.6 COMPORTAMENTO DO SISTEMA

Ao se trabalhar com dados de qualquer natureza, o pesquisador deve conhecer as características básicas dos dados. Pois, desta forma, se pode

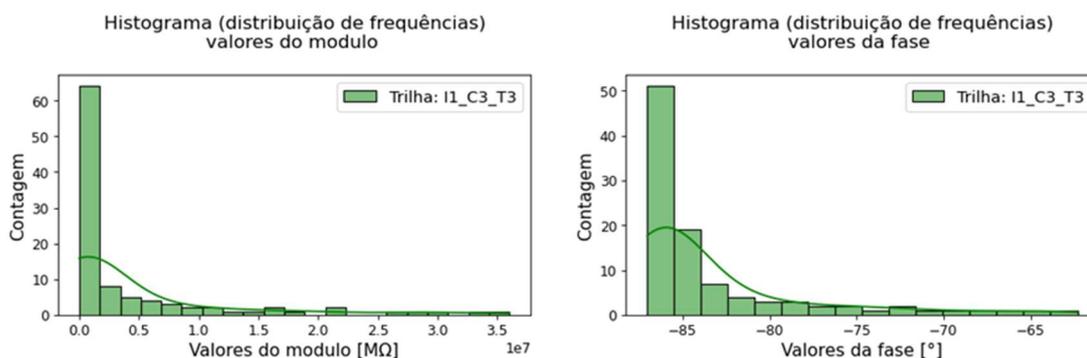
---

<sup>3</sup> Para mais informações sobre o *software* de análise numérica Zview, acesse endereço eletrônico do fornecedor: <https://www.scribner.com>.

otimizar tempo em tomadas de decisões aplicando métodos de análise adequados para seu objetivo (MANLY; ALBERTO, 2019). O Apêndice B apresenta informações da estatística descritiva dos dados analisados. Com essas informações é possível saber em que faixa de valores de módulo e fase será trabalhado, em detrimento dos parâmetros de isolamento e espessura de trilha por exemplo.

Os histogramas a seguir, derivam da análise de uma trilha genérica escolhida, porém, o comportamento de distribuição encontrado se mostrou comum para todas as trilhas. A distribuição dos valores de módulo e fase não apresentam uma distribuição normal, um dos motivos disso é porque optou-se em fazer a aquisição de dados em escala de frequência com espaçamento de amostragem logarítmico.

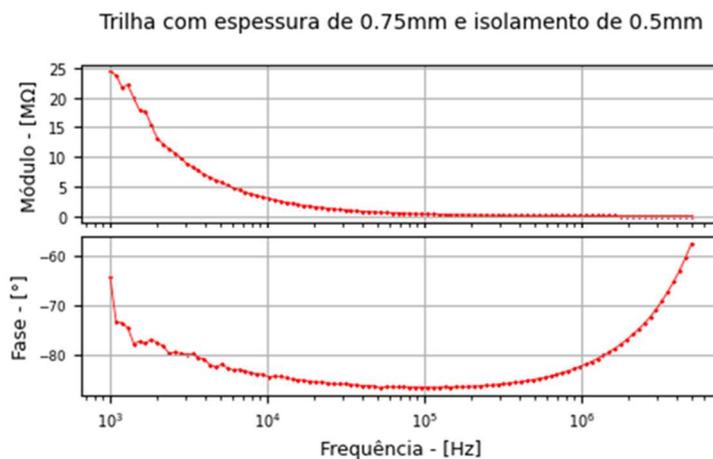
Figura 12 - Histogramas, dados de módulo e fase



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao longo deste trabalho, optou-se por apresentar os dados por meio do gráfico de Bode. Por meio da Figura 13, é possível observar o comportamento padrão dos valores de módulo e fase da impedância de uma trilha escolhida, porém esse comportamento foi característico em todas as medições. Analisando o gráfico, é possível observar que o valor de modo de fase permanece negativo, nos instantes da medição, indicando um acoplamento entre plano positivo (trilha) e plano de acoplamento (aterramento) da PCI como uma interação capacitiva. Outro fator importante a ser ressaltado é que os padrões observados satisfazem os critérios estabelecidos no tópico 2.2.3. Exemplo disso é que o sinal de módulo dente a valor nulo e o de fase ao infinito, em valores de frequência elevada, satisfazem o critério de finitude.

Figura 13 – Curvas de módulo e fase característica das medições realizadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.7 DETERMINAÇÃO DA MELHOR FAIXA DE FREQUÊNCIA

Uma das justificativas para não se trabalhar em baixas frequências com as nossas medições, foi o elevado nível de ruído apresentado. Outro fator negativo mencionado em algumas literaturas (LASIA, 2014), é o tempo maior de medição que frequências menores demandam.

Uma forma para se encontrar uma faixa de frequência adequada, foi a utilizada por Sánchez e Bertemes Filho (2019), cuja abordagem foi por meio da análise de correlação entre um parâmetro do problema analisado e os dados de impedância. De forma análoga iremos aplicar-se essa abordagem, considerando a correção, com os seguintes dados: (1) todos os valores de impedância apenas das trilhas sem falha e (2) dados da razão da área de região da trilha pelo isolamento.

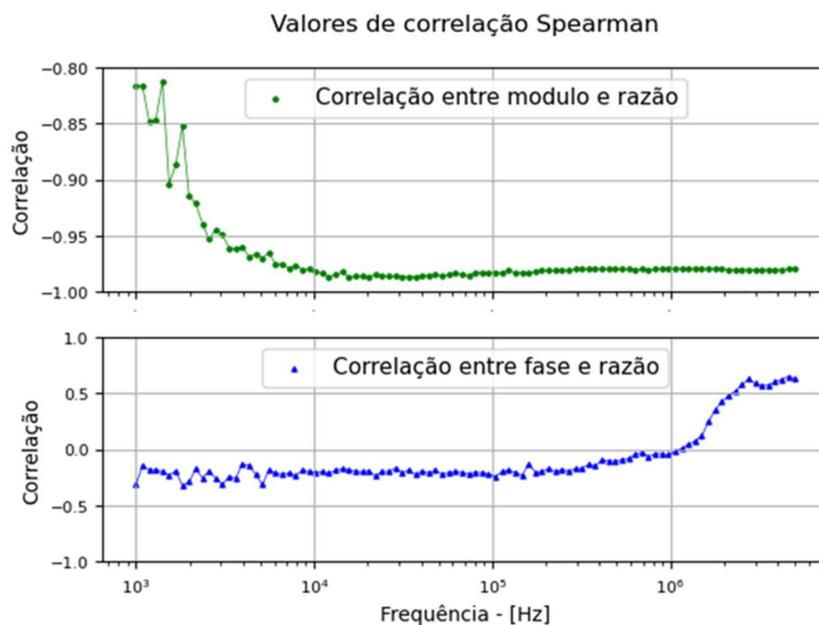
Para coletarmos o valor da área de cada trilha e do seu isolamento respectivo e calcular o valor da razão, foi desenvolvido um algoritmo. Esse algoritmo utiliza a imagem do projeto de concepção de cada trilha para o cálculo da razão, por meio do valor unitário que cada região tem em cada imagem, representado pelo conjunto de pixels.

Com os valores da razão (área da trilha pela de isolamento), valores disponíveis no Apêndice B, é possível calcular a correlação em cada ponto de frequência em que se fez uma medição de impedância. Analisando a Figura 14, observa-se que a correlação em relação ao módulo permanece estável a partir

de 10 kHz e que analisando a fase, temos uma correlação significativa em frequências maiores que 2 MHz. Isso representa que as os valores de impedância das medições feitas em frequência maior que 2 MHz, tem correlação significativa em relação a razão da área da trilha em função da área de isolamento.

Foi utilizado a correlação de Sparman para análise, pois foi constatado que a distribuição dos dados não são normais, em relação a análise de estatística descritiva.

Figura 14 - Valores de correlação de Sparman, considerando a razão entre, módulo e fase, em relação ao espectro da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

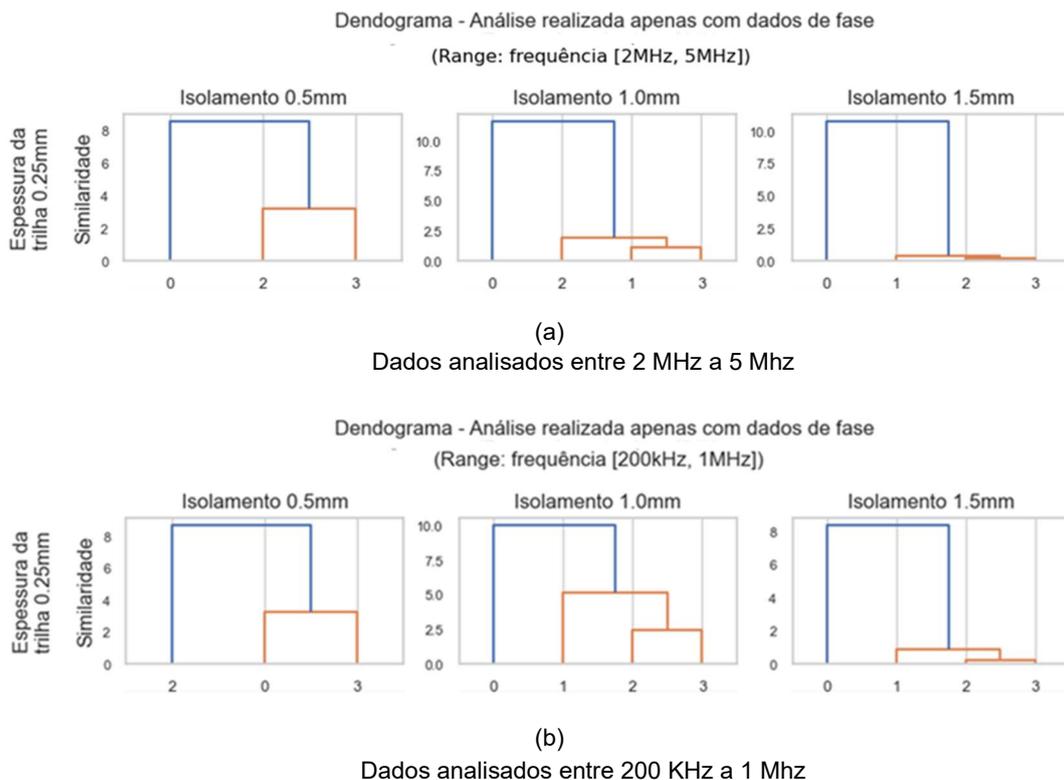
Uma das formas que temos para validar os valores obtidos, de faixas de frequência, é por meio dos dendrogramas. Os dendrogramas foram gerados com base em um algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado, que calcula a similaridade dos dados, ou seja, por meio separação de um conjunto em função das suas variáveis. Nesse caso, vale ressaltar que em cada faixa de frequência que se faz uma medição com a EIE, se obtém um valor de impedância distinto.

Analisando os dendrograma da Figura 15a, que representam amostras de agrupamentos de algumas trilhas, que levaram em consideração os dados de

módulo e fase da impedância, nas faixas de 2 MHz a 5 MHz, estes tiveram melhor agrupamento em relação aos dendrogramas da Figura 15b, que considerou dados entre a faixa de 200 kHz a 1 MHz.

Em outras palavras, podemos dizer que os dendrogramas da Figura 15a, tiveram uma similaridade significativa entre os grupos de trilhas sem e com falhas, por meio da análise de dados de impedância. E que a faixa em que se analisa os dados, considerando as características da trilha escolhida, influencia nos resultados de análise dos dados.

Figura 15 - Dendrogramas, comparação de resultados em diferentes faixas de frequência



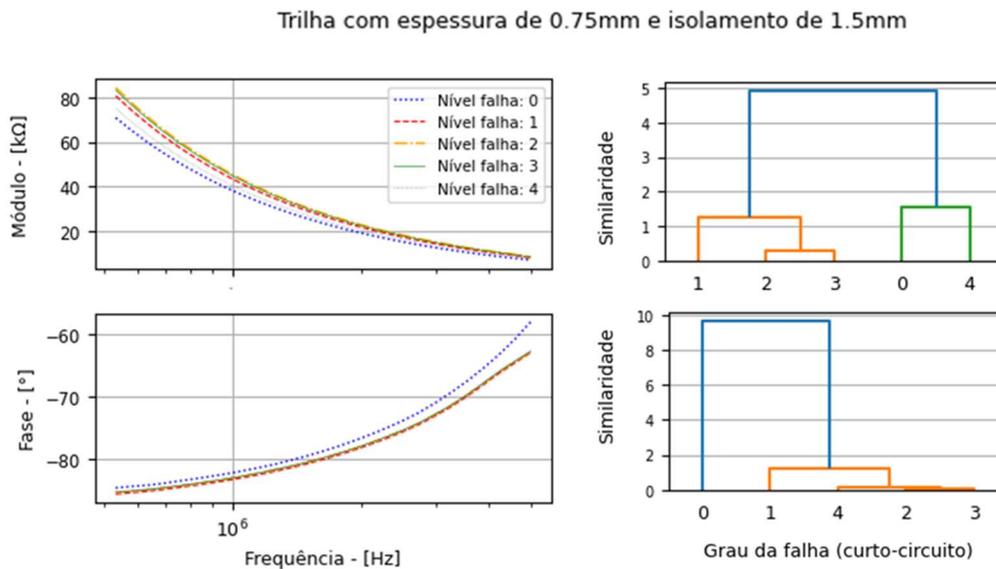
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.8 ANALISANDO CORRELAÇÕES

Os gráficos de dendrograma podem ser usados para auxiliar a visualização de dados disponibilizados de outra forma. A Figura 16 apresenta a análise dos mesmos dados de forma diferente. Analisando o gráfico de Bode, com o valor de módulo, é possível observar que a linha sem falha em azul, fica

próxima da trilha com nível 4 de falha, e isso também pode ser observado na interpretação do dendrograma correspondente.

Figura 16 - Comparativo entre gráfico de dispersão e dendrograma

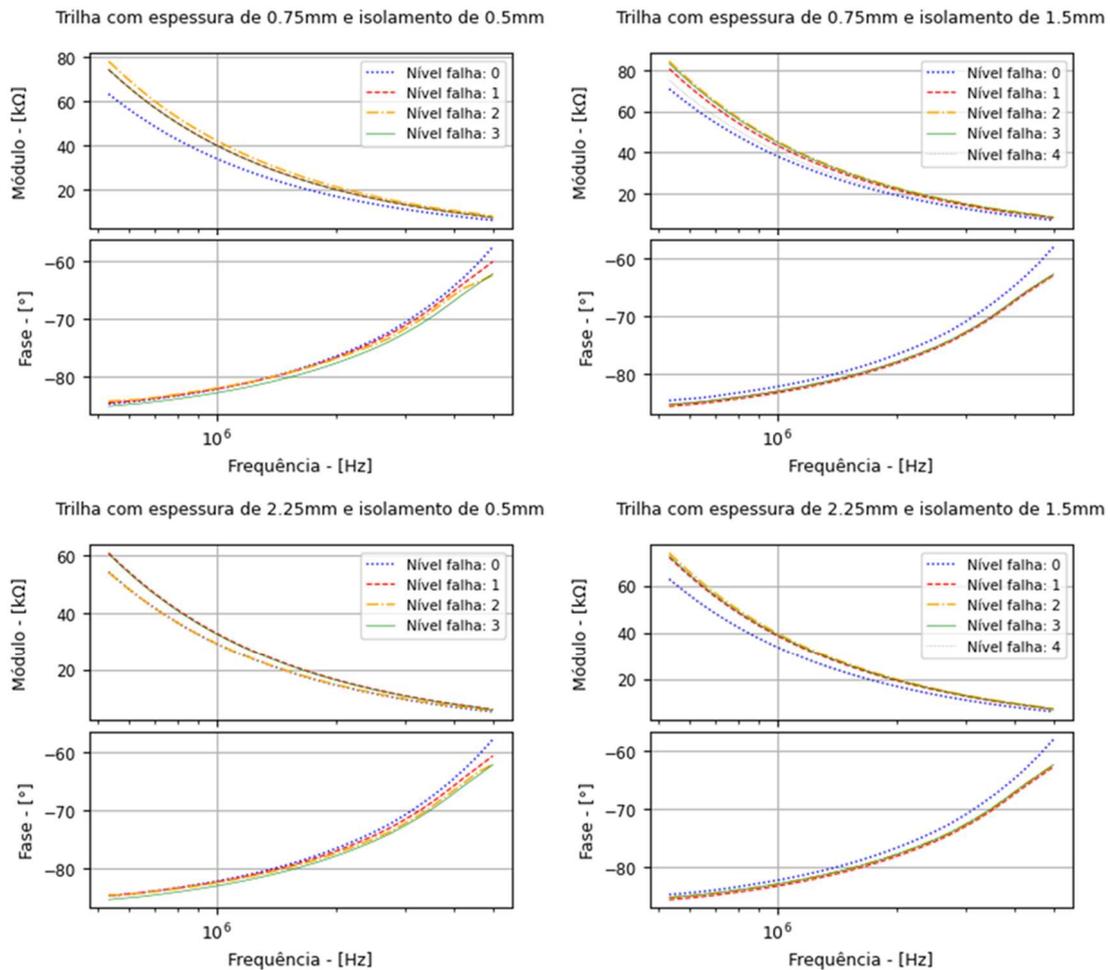


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No Apêndice C, são apresentados os dendrograma para todos os grupos de trilhas analisados. Essa análise deve levar em conta separadamente os dados de módulo e fase, semelhante a interpretação de um gráfico de Bode. Os dendrogramas gerados, priorizaram as faixas de 2 MHz a 5 MHz, e de 200 kHz a 1 MHz.

A seguir, por meio da Figura 17, são apresentados gráficos de Bode de agrupamentos de trilhas semelhantes, porém com níveis de falhas distintos. Observa-se que o potencial curto-circuito faz com que a trilha tenha um deslocamento em crescente no eixo de módulo e o inverso ocorre com a fase, fazendo com que a capacitância tenda a aumentar.

Figura 17 - Valores de módulo e fase em relação ao espectro da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Uma forma não habitual para se trabalhar com análise de dados, provenientes da EIE, é o mapeamento perceptual. Para que esse mapeamento seja possível, temos que aplicar a técnica de componentes principais em nossos dados. No qual consistem em tornar nossos dados em dimensões menores.

Para melhor compreensão, pegando como base o exemplo da Figura 18. Supondo que temos dados de quatro trilhas, e medições de impedância em 40 pontos de frequência diferente. Isso torna nosso problema com 80 variáveis para cada trilha (rótulo – variável categórica). Se por exemplo, quisermos fazer uma análise de similaridade (usando um gráfico de dendrograma) para saber se temos um agrupamento significativo dentre essas 4 trilhas, teremos que trabalhar com 320 variáveis e com um problema de 80 dimensões.

Figura 18 - Exemplo de caso

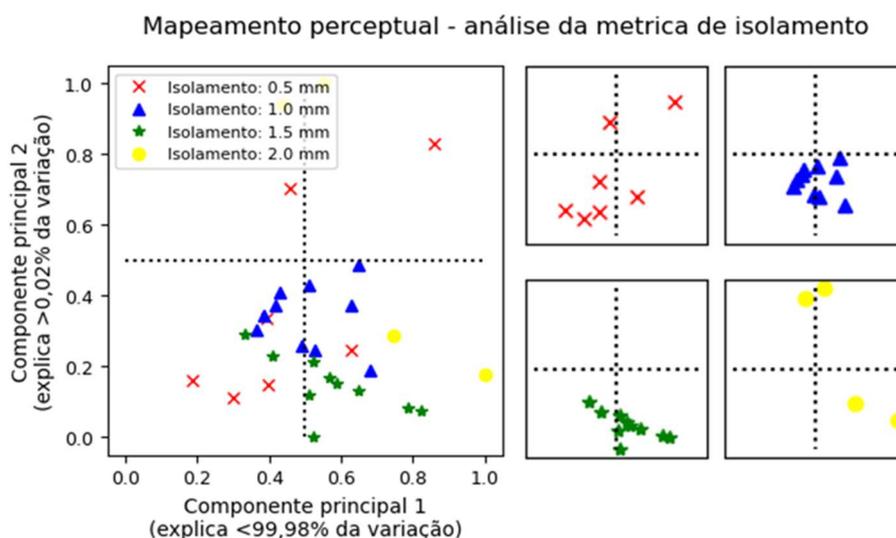
Trilha	VALORES DE MÓDULO					VALORES DE FASE				
	Freq1	Freq2	...	Freq40	.....	Freq1	Freq2	...	Freq40	.....
I2_C0_3										
I2_C1_3	M1	M2	...	...		F'1	F'2	...	...	
I2_C2_3	M3	M4	...	...		F'3	F'4	...	...	
I2_C3_3										

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para elaboração dos gráficos a seguir foram usados os dados de trilha em que cada exemplo irá trabalhar, na faixa de 2 MHz à 5 MHz. Esses dados foram simplificados a apenas duas colunas, referentes a cada trilha analisada. Essas componentes nesse caso são denominadas de componentes principais 1 e 2, e para elaboração do mapeamento perceptual, são usadas como valores para um plano cartesiano. Nos casos a seguir além dessa metodologia adotada, empregou-se a normalização dos dados, fazendo com que o range de cada eixo seja no valor de 0 à 1.

A Figura 19 apresenta a distribuição de trilhas de nível de isolamento diferentes, porém de mesma espessura. Nessa análise analítica, nota-se que o agrupamento de trilhas com menor isolamento é mais localizado.

Figura 19 - Mapeamento perceptual, agrupamento de trilha pelo seu isolamento

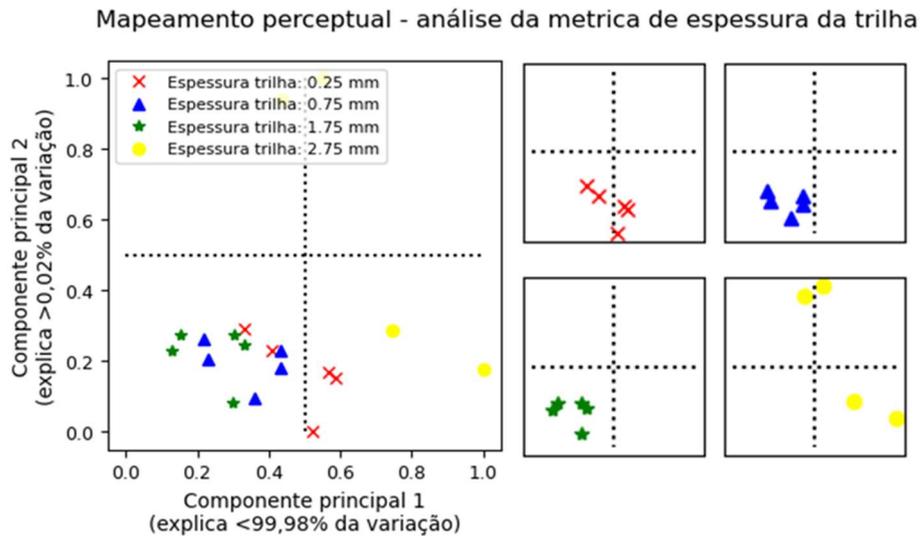


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já na Figura 20, apresenta-se a distribuição de trilhas de mesma espessura, porém isolamento diferentes. Em comparação ao gráfico anterior, os

agrupamentos nesse caso está melhor, sugerindo que a análise correta de se analisar os dados, devem ser por trilhar do mesmo nível de isolamento.

Figura 20 - Mapeamento perceptual, agrupamento de trilha sua espessura

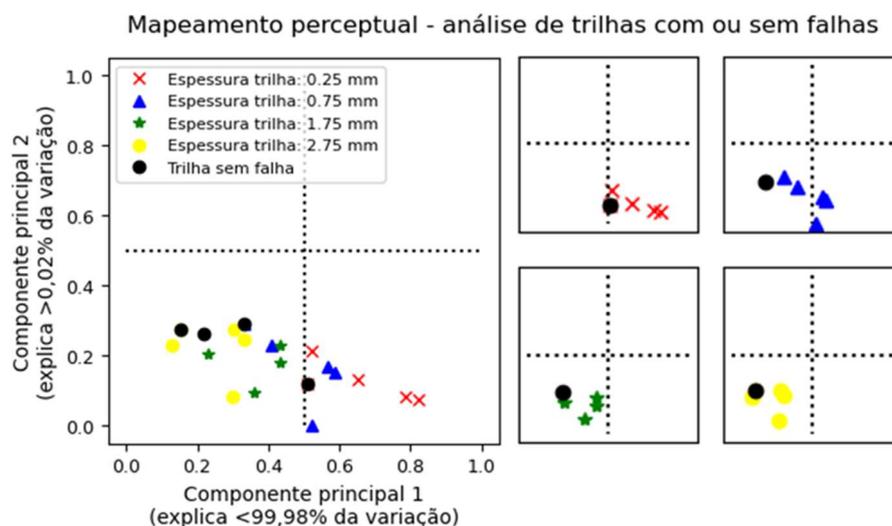


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 21 é o mesmo do anterior, porém nesse caso destacamos as trilhas em boas condições. Nota-se que em ambos os casos a trilha sem falha, apresenta-se à esquerda na distribuição por grupo.

O mapeamento perceptual permite a redução de complexidade do problema estudado e permite que o analisador possa reconhecer padrões e validar correlações possíveis dos dados.

Figura 21 - Mapeamento perceptual, agrupamento entre trilhas com e sem falha

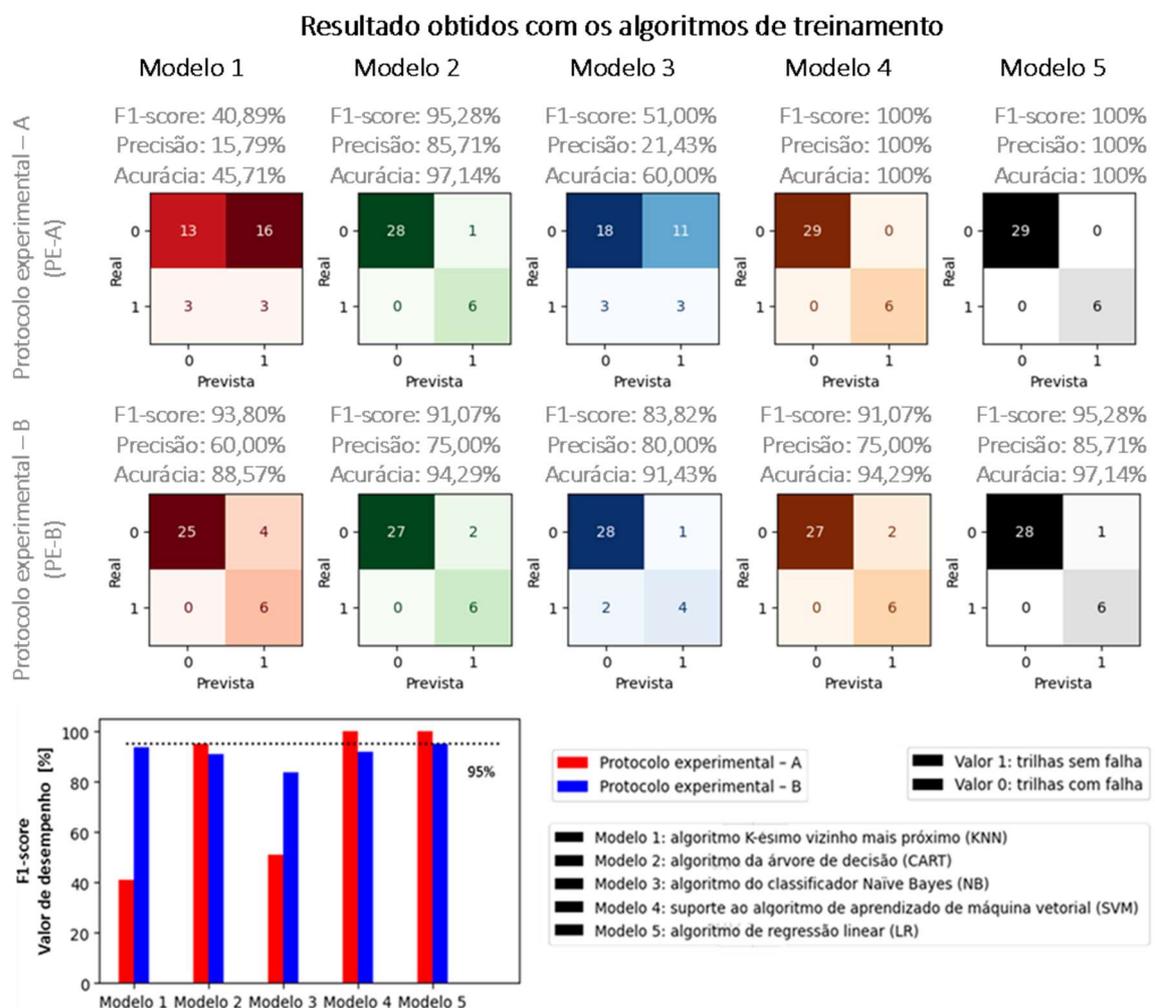


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.9 ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

Analisando os resultados obtidos por meio de algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado, apresentado na Figura 22, é possível observar que o modelo de regressão linear e algoritmo de suporte ao aprendizado de máquina vetorial foram os que tiveram melhor desempenho, com base na métrica de F1-Score, no qual faz uma junção das métricas de precisão e acurácia. Embora que o modelo de regressão linear tenha a vantagem, de apresentar bom resultado com os dados de entrada normalizados e sem normalização.

Figura 22 - Infográfico, resultados dos algoritmos de aprendizagem de máquina



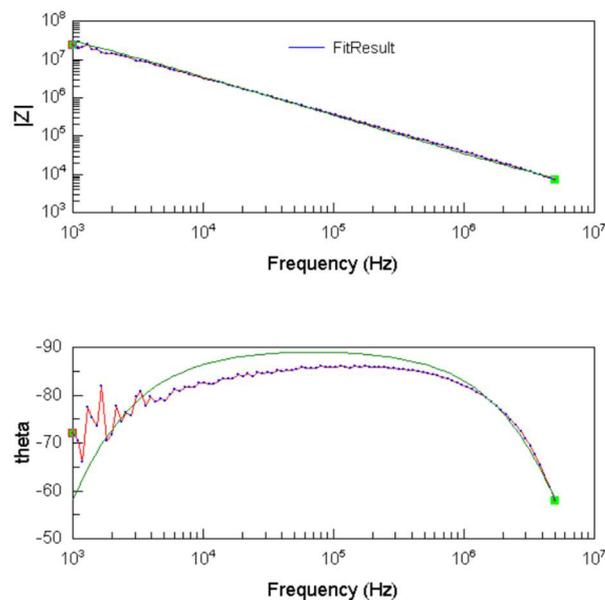
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.10 MODELAGEM DE CIRCUITO EQUIVALENTE

Devido à complexidade para modelar um circuito equivalente de amostras de medições de EIE, foi utilizado o *software* ZView para auxiliar nessa atividade. O programa em questão possui alguns modelos de circuito já pronto no qual ele apenas faz a modelagem dos valores de componentes do circuito escolhido, por meio do auxílio do algoritmo computacional baseado no método dos mínimos quadrados não linear ZView (2023).

A Figura 23, apresenta imagem retirada do programa ZView. Cujo, a curva em azul é proveniente da medição de uma trilha, enquanto a curva verde é uma aproximação da interpolação feitas pelo programa com base nos pontos de medição discretizados fornecidos. O arquivo gerado pelo analisador de impedância tem compatibilidade com o programa, facilitando a utilização do programa.

Figura 23 - Criando modelos de curva equivalente - ZView

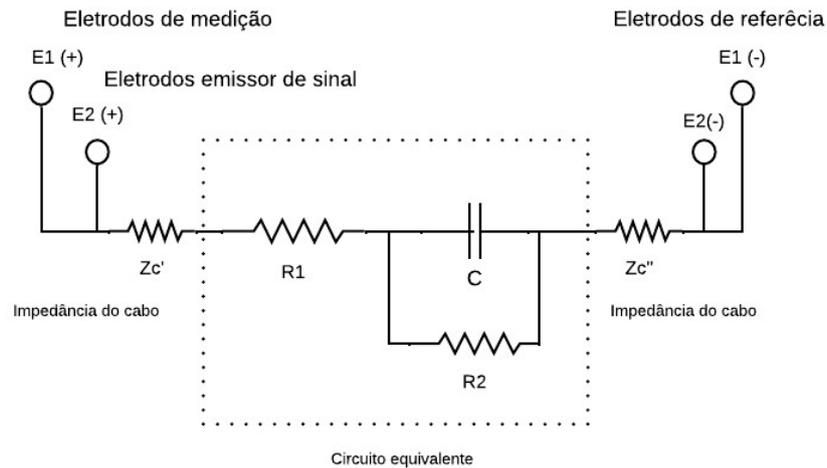


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O modelo disponível no programa que melhor se adaptou as curvas das trilhas médias está representado na Figura 24. O circuito acima pode ser descrito como a ligação de um resistor ( $R_1$ ) associado em serie com um capacitor ( $C$ ), associado em paralelo com o um resistor ( $R_2$ ). No exemplo da imagem a seguir,

sugere que o sistema em questão está conectado ao analisador de impedância, fazendo a medição de que poderia ser uma trilha.

Figura 24 - Circuito equivalente



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

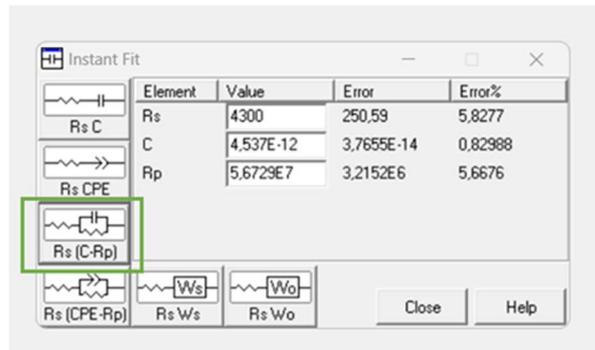
A equação de valor de impedância desse circuito é apresentada a seguir:

$$Z_{equivalente} = R1 + \frac{R2}{1 + R2 \cdot C \cdot \omega \cdot j} \quad (15)$$

Sendo:  $R1$  e  $R2$  valores das resistências ôhmica [ $\Omega$ ];  $C$  valor do capacitor [F]; e  $j$ : unidade imaginária  $j = \sqrt{-1}$ .

Além de modelar a curva de aproximação, o programa, também fornece os valores de componentes, com base no circuito escolhido. Conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Coleta de dados na modelagem do circuito equivalente - ZView



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O processo de levantamento dos valores de componentes, foram feitos para vários grupos de trilhas. Resultado disso pode ser observado no resumo da Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos componentes que representam o circuito equivalente

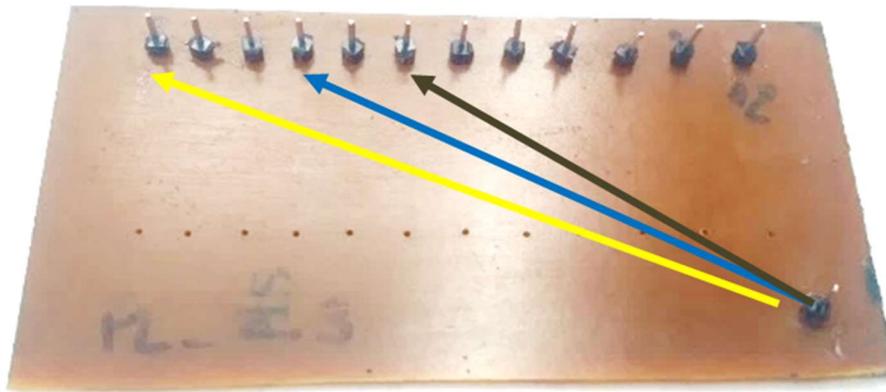
TRILHA	R1	C	R2	Isolamento [mm]	Trilha [mm]
I2_CO_T3	4300	4,53E-12	5,67E+07	10	0,75
I2_C1_T3	4279	4,09E-12	9,52E+07	10	0,75
I2_C2_T3	4176	4,31E-12	7,56E+07	10	0,75
I2_C3_T3	4111	4,33E-12	6,86E+07	10	0,75
I2_C4_T3	4005	4,43E-12	7,47E+07	10	0,75
I3_CO_T3	4165	4,67E-12	5,44E+07	15	0,75
I3_C1_T3	4300	4,54E-12	5,67E+07	1,5	0,75
I3_C2_T3	4479	3,81E-12	1,37E+08	15	0,75
I3_C3_T3	4441	3,87E-12	1,20E+08	15	0,75
I3_C4_T3	3997	4,33E-12	9,18E+07	15	0,75
I2_CO_T9	3587	5,50E-12	4,21E+07	10	2,25
I2_C1_T9	3578	4,92E-12	7,60E+07	10	2,25
I2_C2_T9	3557	4,94E-12	8,31E+07	10	2,25
I2_C3_T9	3444	5,07E-12	8,61E+07	10	2,25
I2_C4_T9	3454	5,27E-12	5,85E+07	10	2,25
I3_CO_T9	3681	5,24E-12	5,21E+07	15	2,25
I3_C1_T9	3761	4,42E-12	2,71E+08	15	2,25
I3_C2_T9	3948	4,37E-12	1,64E+08	15	2,25
I3_C3_T9	3911	4,45E-12	1,03E+08	15	2,25
I3_C4_T9	3335	5,14E-12	1,01E+08	15	2,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base nos dados da Tabela 3 é possível identificar correlações com os termos de  $R_1$ ,  $R_2$  e  $C$  da Equação 15.

O termo  $R_1$  sofre pouca variação dos valores de trilhas analisados. Isso se deve a variação de resistência elétrica característica de cada trilha. A Figura 26 exemplifica por meio de setas, a distância entre o ponto comum de uma placa em relação aos demais, isso ocasiona em distância distintas e por consequência valores de resistência diferentes entre cada ponto de medição de uma mesma placa além de fatores como impedância de cabos e resistência da solda localizada por exemplo.

Figura 26- Representação da distância entre pontos de medição de uma placa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O termo de  $R_2$  no circuito equivalente opera como um resistor de descarga do capacitor,  $C$ . Baseando-se no fato de que existe uma distância de isolamento entre uma trilha e seu plano de terra gera diferença de potencial e assim uma capacitância equivalente. A resistência de  $R_2$  é proveniente do meio de isolamento entre as trilhas, no caso das medições feitas não foram usadas máscara de solda na confecção das placas, sendo assim, o único meio isolante entre uma trilha e o plano de aterramento é a meio atmosférico nas medições feitas. Analisando a Tabela 3, é possível observar que há uma pouca diferença do valor de  $C$ , em relação a trilhas de mesmo isolamento, e  $R_2$  é um valor padrão para todas as trilhas.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos gerais e específicos foram cumpridos. Foi possível correlacionar os dados de impedância de uma trilha de circuito impresso com os parâmetros de projeto da trilha, como espessura da trilha e isolamento, e principalmente com a identificação de falha de curto-circuito. Sendo por meio dos métodos tradicionais como o gráfico de Bode, pelo dendrograma ou pelos resultados dos algoritmos de aprendizagem de máquina.

Foi possível observar em nível empírico e teórico que medições realizadas, no objeto de estudo, as trilhas de um PCI, se comportam de maneira adequada aos padrões da técnica de EIE (YUAN et al., 2010; LASIA, 2014). Cumprindo os critérios de linearidade, causalidade, estabilidade e finitude.

A vantagem em se utilizar o aprendizado de máquina para uma atividade de classificação, neste caso, permite que esse processo seja automatizado em processos de inspeção de qualidade e seja uma ferramenta de apoio a tomada de decisões de profissionais da área.

Visto que as equações de impedância de placas de circuito mais complexas são em grande parcela aproximações (MONTROSE, 1999), a técnica de espectroscopia de impedância possibilita o equacionamento desses sistemas.

### 4.1 TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados sejam satisfatórios e positivos para o estudo de caso em questão, modelo de face simples, a técnica deve ser empregada em outros modelos de PCIs, como em modelo *multilayer* e até mesmo de produtos comerciais, desta forma o método pode ser considerado de aplicação geral. Seguindo esse princípio, uma vez validado a técnica para aplicações gerais em projetos de PCIs, há uma oportunidade para o mercado industrial, que necessita de técnicas de inspeção de degradantes e que possam ser implantadas em escala (caso factível ao modelo e uso da EIE).

## REFERÊNCIAS

- ABTAHI, F. **ASPECTS OF ELECTRICAL BIOIMPEDANCE SPECTRUM ESTIMATION**. Tese (Doutorado) — KTH, 2014.
- AMBAT, R. **A review of corrosion and environmental effects on electronics. Management**, 2003.
- CARVALHO, L. A. de; ANDRADE, A. R. de; BUENO, P. R. Espectroscopia de impedância eletroquímica aplicada ao estudo das reações heterogêneas em ânodos dimensionalmente estáveis. **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 796–804, 2006.
- CUI, R. *et al.* Review of Methodologies for Evaluating Short-Circuit Robustness and Reliability of SiC Power MOSFETs. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 10, n. 4, p. 4665–4679, 1 ago. 2022.
- DAS, A.; REDDY, C. C. An Analytical Approach to Locate Short Circuit Fault in a Cable Using Sweep Frequency Response Analysis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1 maio 2022.
- Engel, M. A., & Muller, M. The PCB—A historical and technical overview. **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, v. 15, n.1, p. 3-10, 1992.
- ESCOVEDO, Tatiana, KOSHIYAMA Adriano S. “**Introdução a Data Science — Algoritmos de Machine Learning e métodos de análise**”. São Paulo, Ed. Casa do Código, 2020.
- FLORENÇO, Heitor Medeiros; CORREA, Edgard de Faria; AMORIM, Leonardo Gomes de Paiva. **Fundamentos dos Circuitos Impressos**. Natal: EDUFRRN, 2014. ISBN 978-85-425-0222-0.
- GILLES, Ken; MURRAY, Jerry. **The Definitive History of the Printed Circuit**. PC Fab, p. 1-16, 1999.
- GOEDE, R. M. A historical perspective on printed circuit board technology. **Proceedings of the IEEE**, v. 91, n. 3, p. 461-474, 2003.
- GÓMEZ SÁNCHEZ, J. A.; BERTEMES FILHO, P. Modified carbon-paste-surface electrode for NaCl and KCl solution measurements. **Measurement Science and Technology**, v. 30, n. 10, p. 105103, 9 ago. 2019.
- GONG, L. *et al.* Location of Cable Joint with Moisture Based on Short-Circuit Response. **4th International Conference on Power and Energy Technology**, ICPET 2022, p. 127–131, 2022.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning**. Springer, Nova Iorque. 2009.

Hoffmann, K. H. Historical review of flexible and rigid-flex circuit technology. **Circuit World**, v. 36, n. 4, p. 19-27, 2010.

IPC (Association Connecting Electronics Industries). **IPC-2221A**: Generic Standard on Printed Board Design. Washington: IPC, 2017.

JR., Joseph F H. *et al.* **Análise multivariada de dados**. Grupo A, 2009. E-book. ISBN 9788577805341. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577805341/>. Acesso em: 5 jul. 2023.

LASIA, A. Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications. **Modern Aspects of Electrochemistry**, p. 143–248, 21 nov. 2002.

LASIA, A. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. **Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications**, v. 9781461489337, p. 1–367, 1 ago. 2014.

Lasia, Andrzej. “Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications.” *Modern Aspects of Electrochemistry*. Springer US, Boston: Springer, p. 143–248.

Leblanc, R. J., & Alfano, R. R. The evolution of printed wiring board technology: A review. **IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology**, Part A, v.16, n. 5, p. 634-646, 1993.

LEE, D. *et al.* Evaluation of the anti-corrosion capacity for various electronics by way of accelerated corrosion testing platform. Proceedings of Technical Papers - International Microsystems, Packaging, Assembly, and Circuits Technology Conference, **IMPACT**, p. 159–163, 2016.

LEE, D.; YAO, L.; LEE, J. An Effective Accelerated Method to Verify the Creep Corrosion Failure Occurrence on Electronics. Proceedings of Technical Papers - International Microsystems, Packaging, Assembly, and Circuits Technology Conference, **IMPACT**, v. 2020- Oct., p. 82–86, out. 2020.

LENZ, Maikon Lucian *et al.* **Fundamentos de Aprendizagem de Máquina**. Porto Alegre: Grupo A, Bookman, 2020.

LINARES-ESPINÓS, E.; HERNÁNDEZ, V.; DOMÍNGUEZ-ESCRIG, J. L.; *et al.* Methodology of a systematic review. **Actas Urológicas Españolas (English Edition)**, v. 42, n. 8, p. 499–506, 2018. AEU.

LING, F.; CAI, K.; SEN, B. Fast Full Board Crosstalk Scan for Signal Integrity Sign-Off for High Speed PCB Designs. 2018 **IEEE Symposium on**

**Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity, EMC, SI and PI 2018**, 17 out. 2018.

MANLY, Bryan F. J.; ALBERTO, Jorge A. N. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. [Recurso eletrônico]. Grupo A, 2019. ISBN 9788582604991. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582604991/>. Acesso em: 5 jul. 2023.

MANSFELD, F. The use of electrochemical techniques for the investigation and monitoring of microbiologically influenced corrosion and its inhibition – a review. **Materials and Corrosion**, v. 54, n. 7, p. 489–502, 1 jul. 2003.

MITCHELL, T. **Machine learning**. Lexington: McGraw-Hill Science, 1997.

NARAYANAN, S. R. *et al.* Electrochemical Impedance Spectroscopy of Lithium-Titanium Disulfide Rechargeable Cells. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 140, n. 7, p. 1854–1861, 1 jul. 1993.

NOOR, K. B. M. Case study: A strategic research methodology. **American Journal of Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1602–1604, 2008.

OLARTE-ECHEVERRI, G. *et al.* Espectroscopia de impedancia eléctrica en cáncer invasivo del cuello uterino en mujeres de Caldas (Colombia), 2008-2009. **Rev. colomb. obstet. ginecol**, p. 28–33, 2010.

ORAZEM, M. E.; TRIBOLLET, B. **Electrochemical Impedance Spectroscopy**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

PAUL, C. R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2. ed. [S.l.]: Wiley Interscience, 2006. ISBN 9780471755005,0471755001.

RIGO, Cezar Antonio *et al.* Printed circuit board design methodology for embedded systems targeting space applications. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 2, p. 257-264, 2020.

SHI, Q.; KANOUN, O. Wire fault diagnosis in the frequency domain by impedance spectroscopy. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 64, n. 8, p. 2179–2187, 1 ago. 2015.

TABUENCA, J.G. Multichannel bioimpedance measurement. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

TAIT, W. STEPHEN. **An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists**, 1994.

TORRES, Gabriel. **Eletrônica para Autodidatas, Estudantes e Técnicos**. Novaterra, 2012. 452 p. ISBN 8561893060.

Whitney, D. The printed circuit board industry: Production and markets. **Journal of Electronic Materials**, v. 33, n. 7, p. 823-828, 2004.

XIA, D.-H. *et al.* Review—Electrochemical Probes and Sensors Designed for Time-Dependent Atmospheric Corrosion Monitoring: Fundamentals, Progress, and Challenges. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 167, n. 3, p. 037513, 2020.

YAN, L. *et al.* The corrosion behavior of PCB-ImAg in industry polluted marine atmosphere environment. **Materials and Design**, v. 115, p. 404–414, 2017.

YIN, R. K. **Case Study Research: Design and Methods**. Sage Publications, 2014.

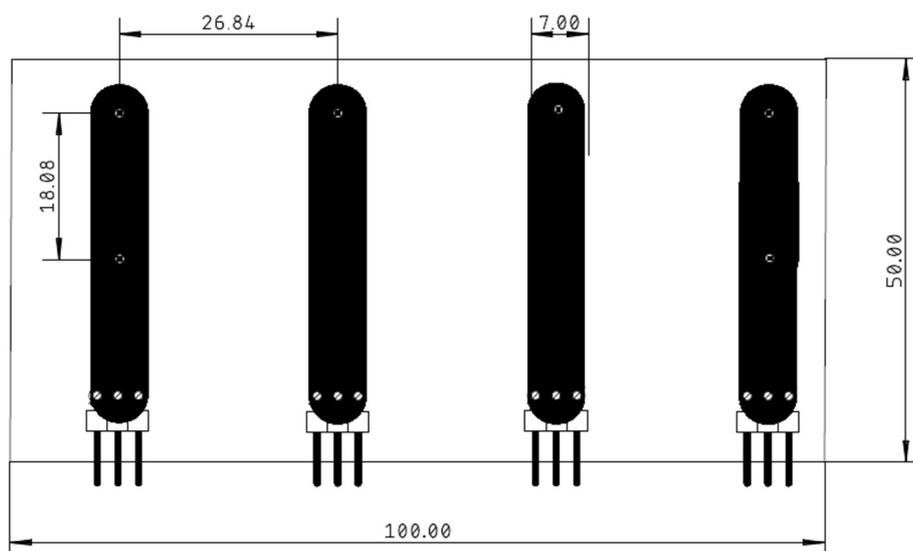
YOUSIF, S. **Estudo de técnicas aplicadas à redução do efeito Crosstalk em placas de circuito impresso**. 2021.

YUAN, X. Z. *et al.* Electrochemical impedance spectroscopy in PEM fuel cells: Fundamentals and applications. **Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Applications**, p. 1–420, 2010.

ZView® 4.0. Impedance / Gain-Phase Graphing & Analysis Software. **Operating Manual**. Scribner Associate, Inc. 2023.

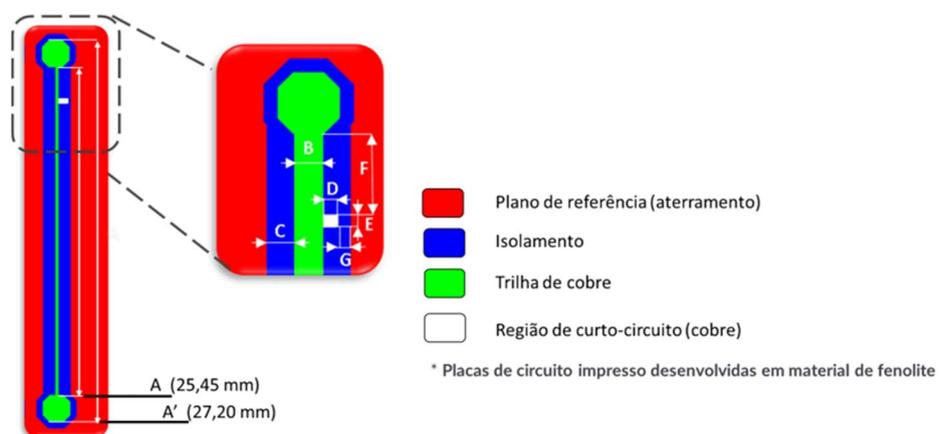
## APÊNDICE A – DIMENCIONAMENTO DAS TRILHAS USADAS PARA MEDIÇÃO E DA PLACA DE SUPORTE DE CABOS

Figura 27 - Placa de suporte de cabos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 28 – Esquemático de dimensões do projeto das trilhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 4 – Informações de cotas e razão das trilhas

Identificação da trilha	*Razão	Cotas [mm]							
		A'	A	B	C	D	E	F	G
I1_CO_T1	0,34	27,20	25,45	0,25	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T10	2,35	27,20	25,45	2,50	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T11	2,56	27,20	25,45	2,75	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T12	2,84	27,20	25,45	3,00	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T2	0,56	27,20	25,45	0,50	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T3	0,78	27,20	25,45	0,75	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T4	0,99	27,20	25,45	1,00	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T5	1,23	27,20	25,45	1,25	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T6	1,47	27,20	25,45	1,50	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T7	1,67	27,20	25,45	1,75	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T8	1,94	27,20	25,45	2,00	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_CO_T9	2,16	27,20	25,45	2,25	5,00	X	4,00	11,52	X
I1_C1_T11	2,57	27,20	25,45	2,75	5,00	0,20	4,00	11,52	4,80
I1_C1_T3	0,79	27,20	25,45	0,75	5,00	0,20	4,00	11,52	4,80
I1_C1_T5	1,23	27,20	25,45	1,25	5,00	0,20	4,00	11,52	4,80
I1_C1_T7	1,68	27,20	25,45	1,75	5,00	0,20	4,00	11,52	4,80
I1_C1_T9	2,17	27,20	25,45	2,25	5,00	0,20	4,00	11,52	4,80
I1_C2_T1	0,34	27,20	25,45	0,25	5,00	0,30	4,00	11,52	4,70
I1_C2_T11	2,58	27,20	25,45	2,75	5,00	0,30	4,00	11,52	4,70
I1_C2_T3	0,79	27,20	25,45	0,75	5,00	0,30	4,00	11,52	4,70
I1_C2_T5	1,24	27,20	25,45	1,25	5,00	0,30	4,00	11,52	4,70
I1_C2_T7	1,69	27,20	25,45	1,75	5,00	0,30	4,00	11,52	4,70
I1_C2_T9	2,17	27,20	25,45	2,25	5,00	0,30	4,00	11,52	4,70
I1_C3_T1	0,35	27,20	25,45	0,25	5,00	0,40	4,00	11,52	4,60
I1_C3_T11	2,58	27,20	25,45	2,75	5,00	0,40	4,00	11,52	4,60
I1_C3_T3	0,79	27,20	25,45	0,75	5,00	0,40	4,00	11,52	4,60
I1_C3_T5	1,24	27,20	25,45	1,25	5,00	0,40	4,00	11,52	4,60
I1_C3_T7	1,69	27,20	25,45	1,75	5,00	0,40	4,00	11,52	4,60
I1_C3_T9	2,17	27,20	25,45	2,25	5,00	0,40	4,00	11,52	4,60
I2_CO_T1	0,16	27,20	25,45	0,25	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T10	1,13	27,20	25,45	2,50	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T11	1,23	27,20	25,45	2,75	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T12	1,35	27,20	25,45	3,00	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T2	0,27	27,20	25,45	0,50	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T3	0,37	27,20	25,45	0,75	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T4	0,48	27,20	25,45	1,00	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T5	0,58	27,20	25,45	1,25	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T6	0,70	27,20	25,45	1,50	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T7	0,80	27,20	25,45	1,75	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T8	0,92	27,20	25,45	2,00	10,00	X	4,00	11,52	X
I2_CO_T9	1,03	27,20	25,45	2,25	10,00	X	4,00	11,52	X

Identificação da trilha	*Razão	Cotas [mm]							
		A'	A	B	C	D	E	F	G
I2_C1_T1	0,16	27,20	25,45	0,25	10,00	0,20	4,00	11,52	9,80
I2_C1_T11	1,24	27,20	25,45	2,75	10,00	0,20	4,00	11,52	9,80
I2_C1_T3	0,38	27,20	25,45	0,75	10,00	0,20	4,00	11,52	9,80
I2_C1_T5	0,59	27,20	25,45	1,25	10,00	0,20	4,00	11,52	9,80
I2_C1_T7	0,80	27,20	25,45	1,75	10,00	0,20	4,00	11,52	9,80
I2_C1_T9	1,03	27,20	25,45	2,25	10,00	0,20	4,00	11,52	9,80
I2_C2_T1	0,16	27,20	25,45	0,25	10,00	0,40	4,00	11,52	9,60
I2_C2_T11	1,24	27,20	25,45	2,75	10,00	0,40	4,00	11,52	9,60
I2_C2_T3	0,38	27,20	25,45	0,75	10,00	0,40	4,00	11,52	9,60
I2_C2_T5	0,59	27,20	25,45	1,25	10,00	0,40	4,00	11,52	9,60
I2_C2_T7	0,80	27,20	25,45	1,75	10,00	0,40	4,00	11,52	9,60
I2_C2_T9	1,04	27,20	25,45	2,25	10,00	0,40	4,00	11,52	9,60
I2_C3_T1	0,17	27,20	25,45	0,25	10,00	0,60	4,00	11,52	9,40
I2_C3_T11	1,24	27,20	25,45	2,75	10,00	0,60	4,00	11,52	9,40
I2_C3_T3	0,38	27,20	25,45	0,75	10,00	0,60	4,00	11,52	9,40
I2_C3_T5	0,59	27,20	25,45	1,25	10,00	0,60	4,00	11,52	9,40
I2_C3_T7	0,81	27,20	25,45	1,75	10,00	0,60	4,00	11,52	9,40
I2_C3_T9	1,04	27,20	25,45	2,25	10,00	0,60	4,00	11,52	9,40
I2_C4_T1	0,17	27,20	25,45	0,25	10,00	0,80	4,00	11,52	9,20
I2_C4_T11	1,24	27,20	25,45	2,75	10,00	0,80	4,00	11,52	9,20
I2_C4_T3	0,38	27,20	25,45	0,75	10,00	0,80	4,00	11,52	9,20
I2_C4_T5	0,59	27,20	25,45	1,25	10,00	0,80	4,00	11,52	9,20
I2_C4_T7	0,81	27,20	25,45	1,75	10,00	0,80	4,00	11,52	9,20
I2_C4_T9	1,04	27,20	25,45	2,25	10,00	0,80	4,00	11,52	9,20
I3_C0_T1	0,10	27,20	25,45	0,25	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T10	0,72	27,20	25,45	2,50	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T11	0,80	27,20	25,45	2,75	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T12	0,87	27,20	25,45	3,00	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T2	0,17	27,20	25,45	0,50	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T3	0,24	27,20	25,45	0,75	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T4	0,30	27,20	25,45	1,00	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T5	0,37	27,20	25,45	1,25	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T6	0,45	27,20	25,45	1,50	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T7	0,52	27,20	25,45	1,75	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T8	0,59	27,20	25,45	2,00	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C0_T9	0,66	27,20	25,45	2,25	15,00	X	4,00	11,52	X
I3_C1_T1	0,11	27,20	25,45	0,25	15,00	0,30	4,00	11,52	14,70
I3_C1_T11	0,81	27,20	25,45	2,75	15,00	0,30	4,00	11,52	14,70
I3_C1_T3	0,24	27,20	25,45	0,75	15,00	0,30	4,00	11,52	14,70
I3_C1_T5	0,38	27,20	25,45	1,25	15,00	0,30	4,00	11,52	14,70
I3_C1_T7	0,52	27,20	25,45	1,75	15,00	0,30	4,00	11,52	14,70
I3_C1_T9	0,67	27,20	25,45	2,25	15,00	0,30	4,00	11,52	14,70
I3_C2_T1	0,11	27,20	25,45	0,25	15,00	0,60	4,00	11,52	14,40

Identificação da trilha	*Razão	Cotas [mm]							
		A'	A	B	C	D	E	F	G
I3_C2_T11	0,81	27,20	25,45	2,75	15,00	0,60	4,00	11,52	14,40
I3_C2_T3	0,24	27,20	25,45	0,75	15,00	0,60	4,00	11,52	14,40
I3_C2_T5	0,38	27,20	25,45	1,25	15,00	0,60	4,00	11,52	14,40
I3_C2_T7	0,52	27,20	25,45	1,75	15,00	0,60	4,00	11,52	14,40
I3_C2_T9	0,67	27,20	25,45	2,25	15,00	0,60	4,00	11,52	14,40
I3_C3_T1	0,11	27,20	25,45	0,25	15,00	0,90	4,00	11,52	14,10
I3_C3_T11	0,81	27,20	25,45	2,75	15,00	0,90	4,00	11,52	14,10
I3_C3_T3	0,24	27,20	25,45	0,75	15,00	0,90	4,00	11,52	14,10
I3_C3_T5	0,38	27,20	25,45	1,25	15,00	0,90	4,00	11,52	14,10
I3_C3_T7	0,52	27,20	25,45	1,75	15,00	0,90	4,00	11,52	14,10
I3_C3_T9	0,67	27,20	25,45	2,25	15,00	0,90	4,00	11,52	14,10
I3_C4_T1	0,11	27,20	25,45	0,25	15,00	12,00	4,00	11,52	3,00
I3_C4_T11	0,81	27,20	25,45	2,75	15,00	12,00	4,00	11,52	3,00
I3_C4_T3	0,25	27,20	25,45	0,75	15,00	12,00	4,00	11,52	3,00
I3_C4_T5	0,38	27,20	25,45	1,25	15,00	12,00	4,00	11,52	3,00
I3_C4_T7	0,52	27,20	25,45	1,75	15,00	12,00	4,00	11,52	3,00
I3_C4_T9	0,67	27,20	25,45	2,25	15,00	12,00	4,00	11,52	3,00
I4_C0_T1	0,08	27,20	25,45	0,25	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T10	0,53	27,20	25,45	2,50	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T11	0,58	27,20	25,45	2,75	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T12	0,64	27,20	25,45	3,00	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T2	0,13	27,20	25,45	0,50	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T3	0,17	27,20	25,45	0,75	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T4	0,22	27,20	25,45	1,00	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T5	0,27	27,20	25,45	1,25	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T6	0,33	27,20	25,45	1,50	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T7	0,38	27,20	25,45	1,75	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T8	0,43	27,20	25,45	2,00	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C0_T9	0,48	27,20	25,45	2,25	20,00	X	4,00	11,52	X
I4_C1_T1	0,08	27,20	25,45	0,25	20,00	0,50	4,00	11,52	19,50
I4_C1_T11	0,59	27,20	25,45	2,75	20,00	0,50	4,00	11,52	19,50
I4_C1_T3	0,18	27,20	25,45	0,75	20,00	0,50	4,00	11,52	19,50
I4_C1_T5	0,28	27,20	25,45	1,25	20,00	0,50	4,00	11,52	19,50
I4_C1_T7	0,38	27,20	25,45	1,75	20,00	0,50	4,00	11,52	19,50
I4_C1_T9	0,48	27,20	25,45	2,25	20,00	0,50	4,00	11,52	19,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

\* A razão corresponde ao valor da área da trilha pela área de isolamento.

## APÊNDICE B – DADOS DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS

Tabela 5 - Dados de estatística descritiva: medições de módulo

	Largura trilha	Isolamento	N	Média	Desvio- padrão	Shapiro-Wilk	
						W	p
Módulo [Ω]	0.25	0.5	300	4.41e+6	7.88e+6	0.619	< .001
		1.0	500	4.44e+6	7.95e+6	0.617	< .001
		1.5	500	4.93e+6	9.13e+6	0.601	< .001
	0.75	0.5	400	3.78e+6	6.75e+6	0.620	< .001
		1.0	500	3.90e+6	6.89e+6	0.624	< .001
		1.5	500	4.37e+6	7.96e+6	0.610	< .001
	1.25	0.5	400	3.53e+6	6.40e+6	0.613	< .001
		1.0	500	3.69e+6	6.57e+6	0.620	< .001
		1.5	500	4.11e+6	7.45e+6	0.613	< .001
	1.75	0.5	400	3.33e+6	5.92e+6	0.621	< .001
		1.0	500	3.44e+6	6.06e+6	0.627	< .001
		1.5	500	3.91e+6	7.08e+6	0.613	< .001
	2.25	0.5	400	3.01e+6	5.41e+6	0.617	< .001
		1.0	500	3.29e+6	5.82e+6	0.625	< .001
		1.5	500	3.81e+6	6.93e+6	0.610	< .001
	2.75	0.5	400	2.92e+6	5.15e+6	0.626	< .001
		1.0	500	3.16e+6	5.58e+6	0.625	< .001
		1.5	500	3.60e+6	6.55e+6	0.610	< .001

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

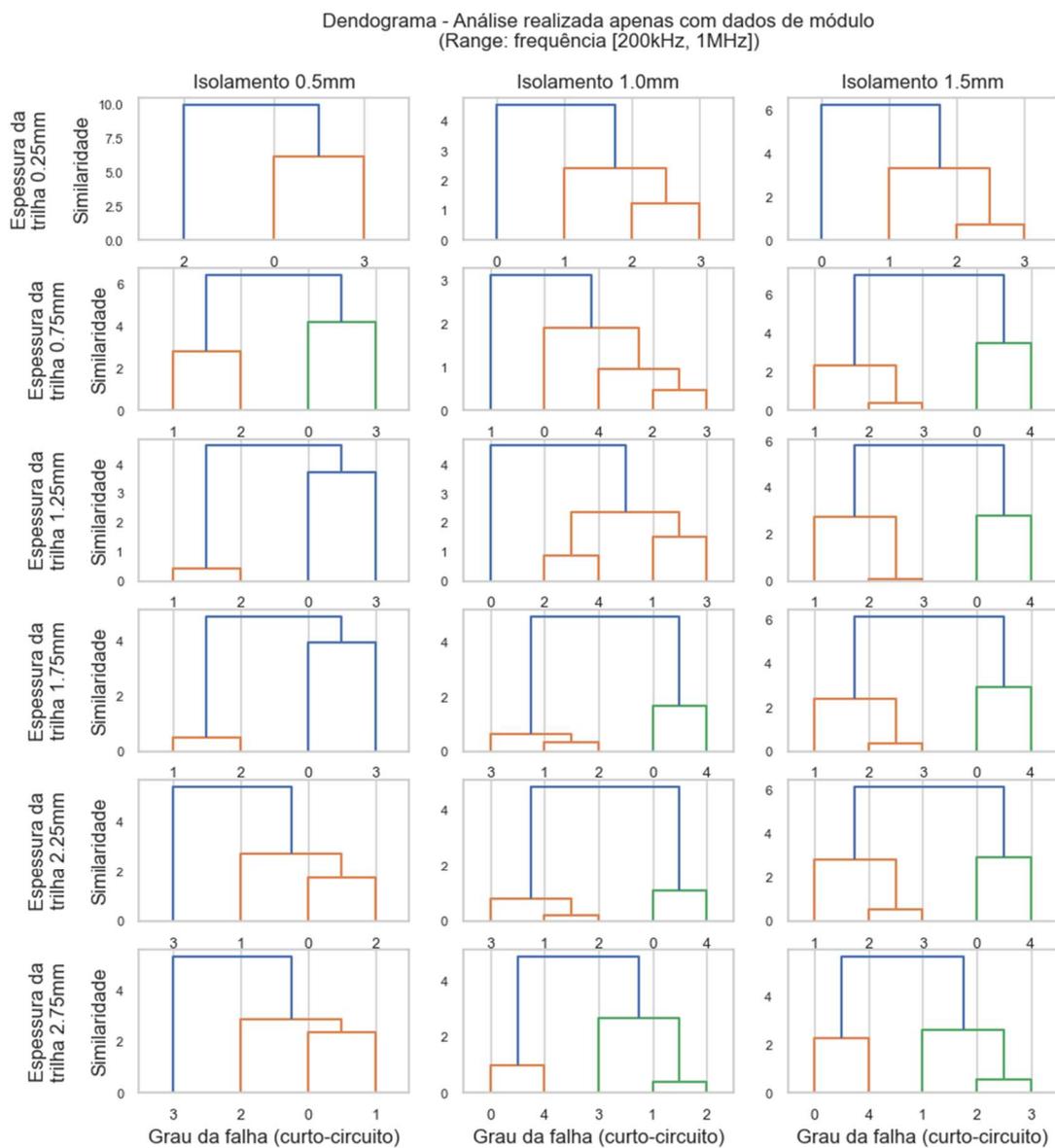
Tabela 6 - Dados de estatística descritiva: medições de fase

	Largura trilha	Isolamento	N	Média	Desvio-padrão	Shapiro-Wilk	
						W	p
Fase [°]	0.25	0.5	300	-81.5	5.83	0.805	< .001
		1.0	500	-81.4	5.57	0.810	< .001
		1.5	500	-82.5	5.62	0.755	< .001
	0.75	0.5	400	-81.6	5.89	0.800	< .001
		1.0	500	-81.6	5.52	0.800	< .001
		1.5	500	-82.6	5.68	0.763	< .001
	1.25	0.5	400	-81.9	5.86	0.788	< .001
		1.0	500	-81.5	5.65	0.799	< .001
		1.5	500	-82.7	5.57	0.756	< .001
	1.75	0.5	400	-81.9	5.88	0.794	< .001
		1.0	500	-81.7	5.54	0.799	< .001
		1.5	500	-82.8	5.53	0.751	< .001
	2.25	0.5	400	-81.5	6.12	0.811	< .001
		1.0	500	-81.8	5.52	0.793	< .001
		1.5	500	-82.8	5.55	0.754	< .001
2.75	0.5	400	-81.5	6.24	0.796	< .001	
	1.0	500	-81.7	5.58	0.796	< .001	
	1.5	500	-82.4	5.54	0.777	< .001	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

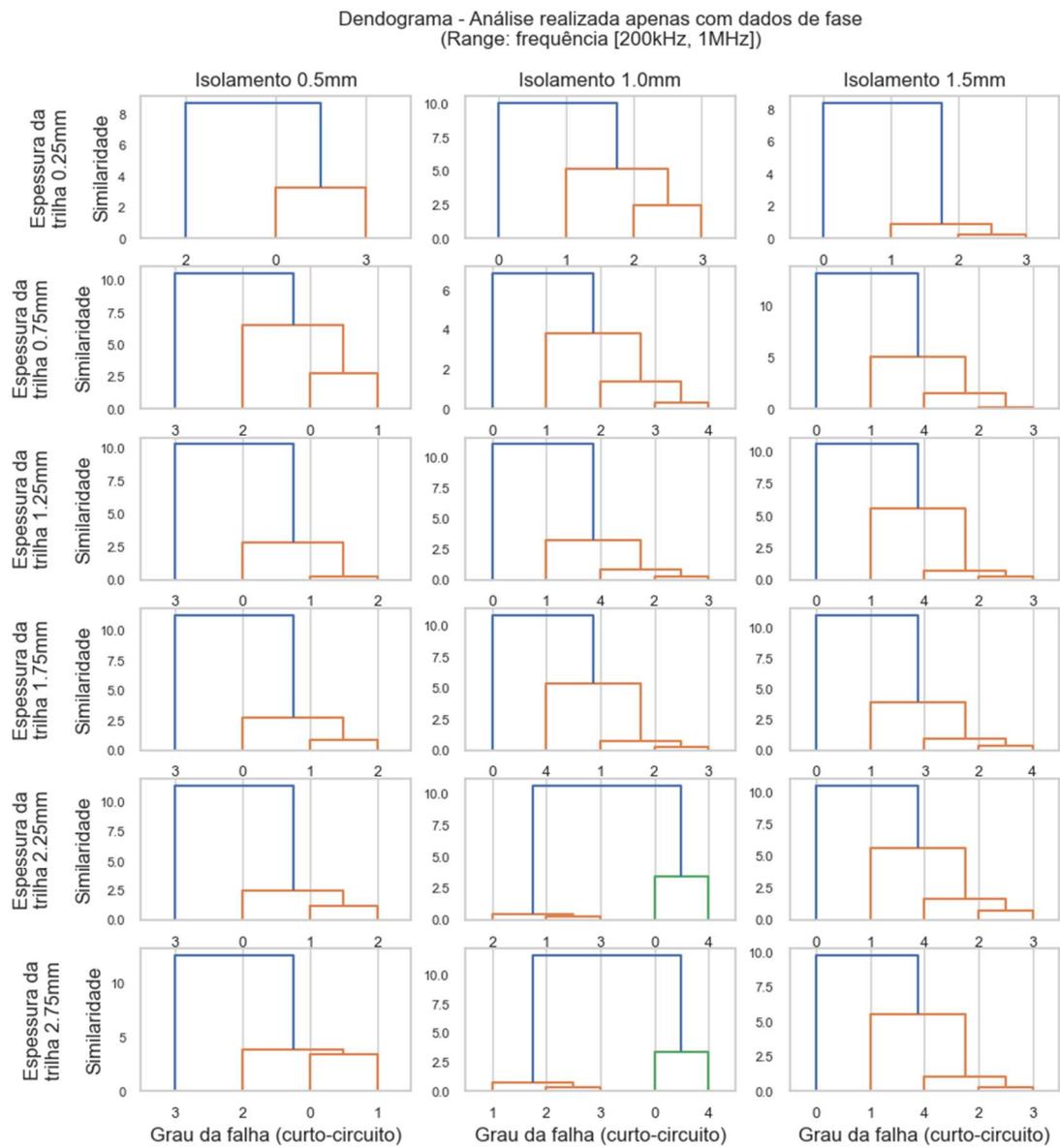
## APÊNDICE C – DENDROGRAMA DOS DADOS DE MEDIÇÃO DISTRIBUIDOS EM GRUPO DE MÓDULO E FASE

Figura 29 - Dendrograma, dados de módulo entre 200 KHz a 1 MHz



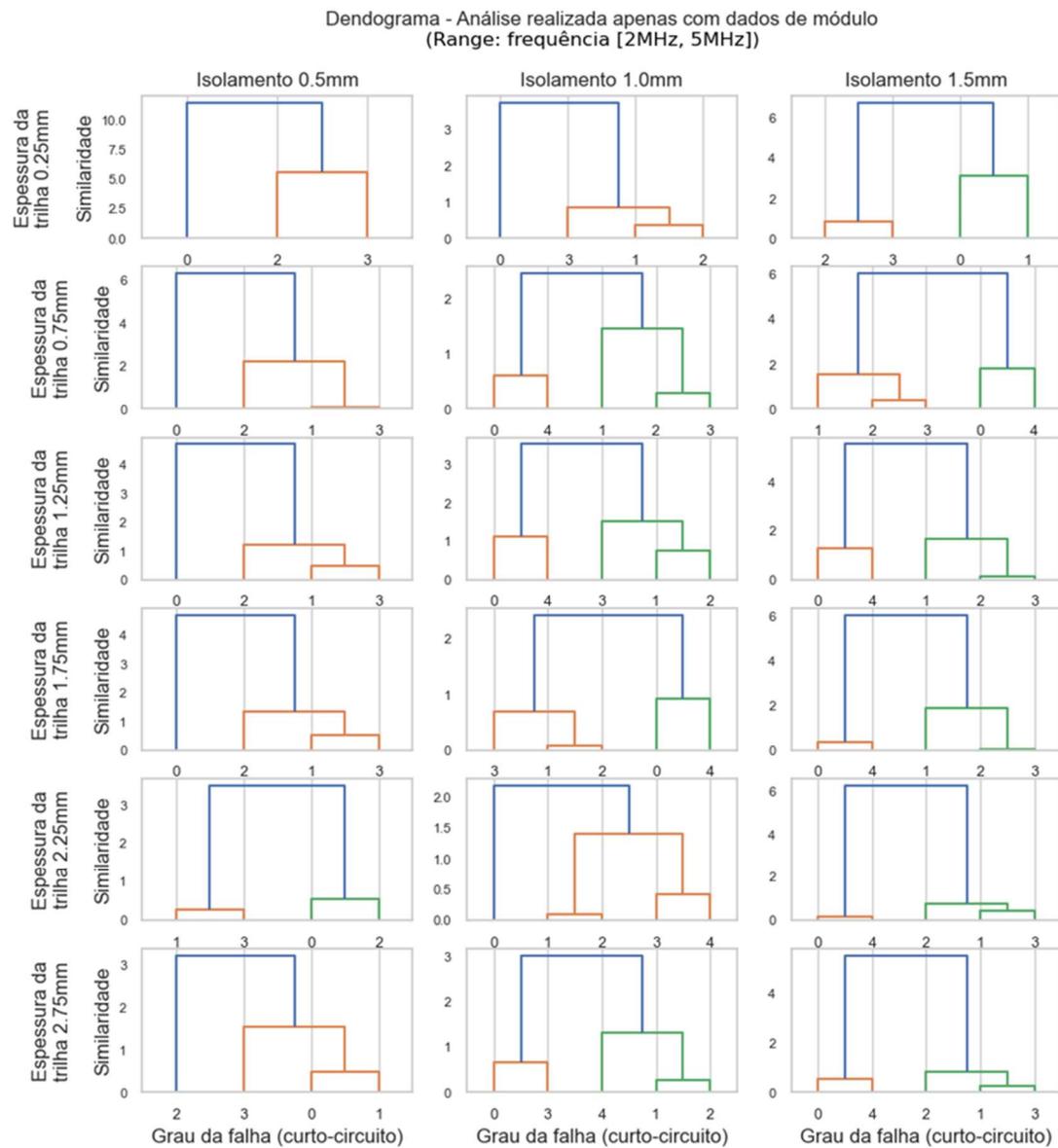
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 30 - Dendrograma, dados de fase entre 200 KHz a 1 MHz



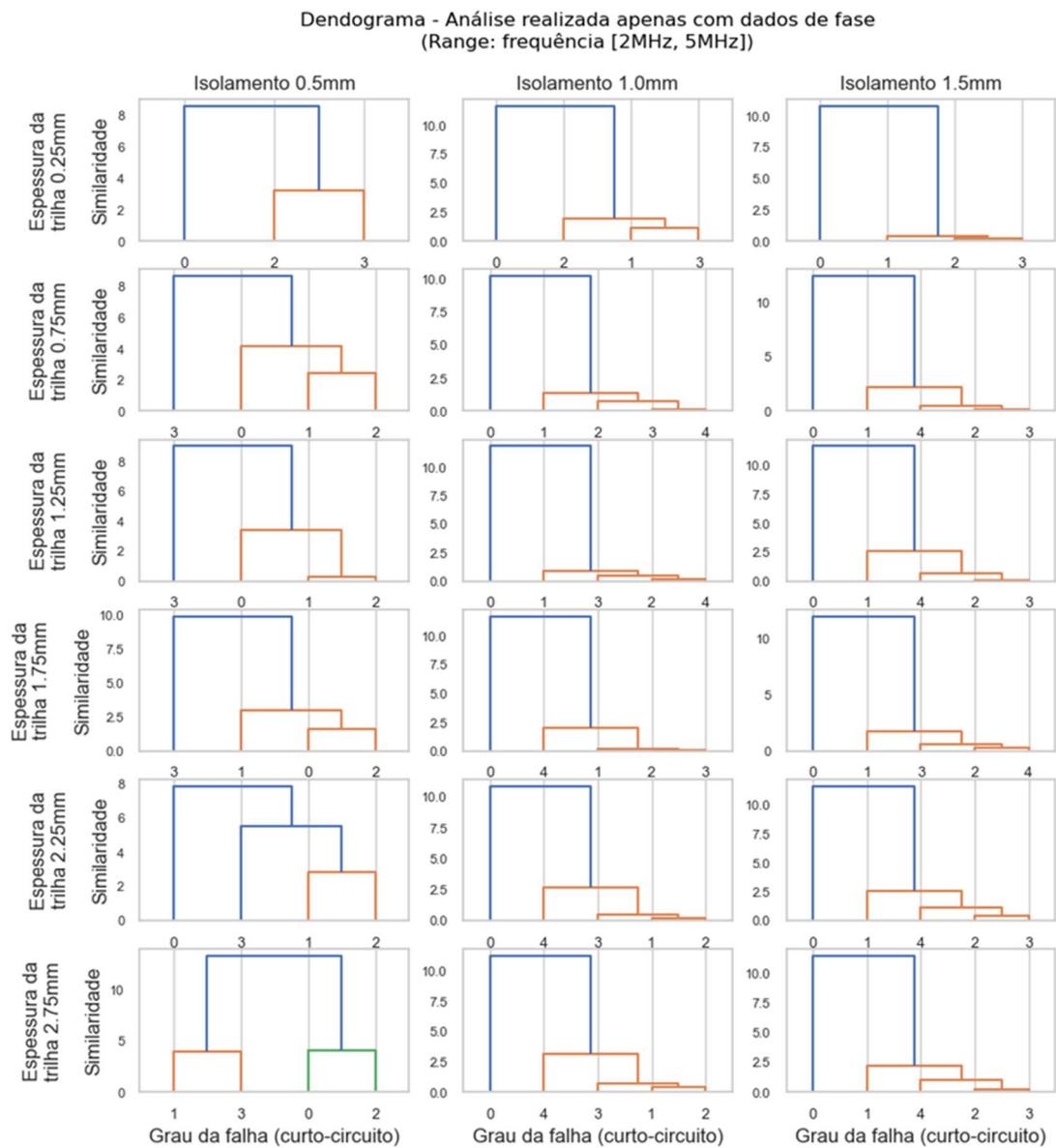
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 31 - Dendrograma, dados de módulo entre 2 MHz a 5 MHz



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 32 - Dendrograma, dados de fase entre 2 MHz a 5 MHz



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).