

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

GIOVANNA LIZ SOUZA

**CROSSTALK ENTRE TRILHAS DE UMA PLACA DE CIRCUITO
IMPRESSO: medição com rastreador de campo próximo e aplicação
de técnicas de mitigação**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

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

GIOVANNA LIZ SOUZA

**CROSSTALK ENTRE TRILHAS DE UMA PLACA DE CIRCUITO
IMPRESSO: medição com rastreador de campo próximo e aplicação
de técnicas de mitigação**

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

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos
Martinhago Schlichting

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Souza, Giovanna Liz

Crosstalk entre Trilhas de uma Placa de Circuito Impresso: medição com rastreador de campo próximo e aplicação de técnicas de mitigação / Giovanna Liz Souza; orientação de Luis Carlos Martinhago Schlichting. - Florianópolis, SC, 2026.

68 p.

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

Inclui Referências.

1. Compatibilidade eletromagnética. 2. Crosstalk.
3. PCI. I. Martinhago Schlichting, Luis Carlos. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Crosstalk entre Trilhas de uma Placa de Circuito Impresso: medição com rastreador de campo próximo e aplicação de técnicas de mitigação.

**CROSSTALK ENTRE TRILHAS DE UMA PLACA DE CIRCUITO
IMPRESSO: medição com rastreador de campo próximo e aplicação
de técnicas de mitigação**

GIOVANNA LIZ SOUZA

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

Florianópolis, XX de Dezembro, 2025.

Banca Examinadora:

Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Reginaldo Steinbach, Msc.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Paulo Ricardo Telles Rangel, Msc.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha filha, Manoá.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder forças nos momentos de fraqueza, sabedoria nas horas de dúvida e perseverança diante dos desafios. A Ele entrego cada conquista, cada aprendizado e cada superação ao longo desta caminhada.

Ao meu pai, Sergio, por sempre acreditar em mim e sonhar ao meu lado. À minha mãe, Blanca, por ser meu porto seguro nos dias difíceis e me apoiar em todas as decisões.

Agradeço à minha filha, Manoá, que mesmo tão pequena já é, e continua sendo, a minha maior motivação todos os dias. E que um dia, quando crescer, ela possa se espelhar em mim e veja na mamãe uma mulher perseverante. Ao meu marido, Neville, que me incentivou e fez os dias ficarem mais leves durante esse período.

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, pelo compromisso com a educação e por proporcionarem uma formação de excelência.

Ao meu orientador, Dr. Luis Carlos Martinhago Schlichting, pela paciência, encorajamento constante e pela sensibilidade ao longo do processo.

À minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado, acreditando no meu potencial.

Por fim agradeço aos meus filhos de quatro patas, Lud e Tochico, por me encherem de amor todos os dias e fazer da nossa casa um lar mais feliz.

“Só se vê bem com o coração. O essencial é invisível aos olhos.”
Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

O avanço tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento de circuitos cada vez mais compactos e operando em frequências elevadas, o que intensifica os desafios relacionados à compatibilidade eletromagnética (EMC). Entre os problemas mais relevantes está o *crosstalk*, uma interferência gerada pela proximidade entre trilhas condutoras, capaz de comprometer a integridade do sinal e o desempenho do sistema. Este estudo busca compreender o impacto do *crosstalk* em placas de circuito impresso (PCI) por meio de revisão bibliográfica e análise experimental de diferentes configurações de trilhas, avaliadas com o uso de um rastreador de campo próximo. O foco está na identificação e comparação de técnicas que contribuam para a mitigação desse fenômeno.

Palavras-chave: Compatibilidade eletromagnética. PCI. *Crosstalk*.

ABSTRACT

Technological advances have driven the development of increasingly compact circuits operating at higher frequencies, which intensifies the challenges related to electromagnetic compatibility (EMC). Among the most significant issues is *crosstalk*, an interference caused by the proximity of conductive traces, capable of compromising signal integrity and overall system performance. This study aims to investigate the impact of *crosstalk* in printed circuit boards (PCBs) through a literature review and experimental analysis of different trace configurations, evaluated using a near-field scanner. The focus is on identifying and comparing techniques that contribute to the mitigation of this phenomenon.

Keywords: Electromagnetic Compatibility. PCB. Crosstalk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linhas de campo elétrico de duas cargas positivas.....	19
Figura 2 - Regiões de campo de uma antena.....	22
Figura 3 - Linhas de fluxo magnético em trilhas sobre plano de referência em placas de duas camadas.....	23
Figura 4 - Elementos de um problema de compatibilidade eletromagnética.....	25
Figura 5-Modelo geral de linha de transmissão de três condutores.....	27
Figura 6 - Efeito do espaçamento entre trilhas na redução do acoplamento eletromagnético.....	29
Figura 7 - Aumento de espaçamento e utilização de trilha de guarda.....	30
Figura 8 - Rastreador automático de campo próximo utilizado nas medições.....	33
Figura 9 - Interface do software de controle do rastreador automático de campo próximo.....	34
Figura 10 - Mapa de calor resultante da medição do campo elétrico sobre a placa .	34
Figura 11 - Setup.....	35
Figura 12- Placa 1.....	37
Figura 13-Placa 2.....	37
Figura 14-Placa 3.....	37
Figura 15- Placa 4.....	38
Figura 16- Placa 5.....	38
Figura 17- Placa 6.....	38
Figura 18- Placa 7.....	39
Figura 19- Placa 8.....	39
Figura 20- Placa 9.....	40
Figura 21- Placa 10.....	40
Figura 22-Placa 1 - D-C em 2MHz.....	42
Figura 23-Placa 1 - D-C em 10MHz.....	43
Figura 24-Placa 2 - D-NC em 2MHz.....	44
Figura 25- Placa 2 - D-NC em 10MHz.....	44
Figura 26- Placa 3 - D-S em 2MHz.....	45
Figura 27-Placa 3 - D-S em 10MHz.....	45
Figura 28-Placa 4 - 6D-C em 2MHz.....	46
Figura 29-Placa 5 - 6D-NC em 2MHz.....	48
Figura 30-Placa 5 - 6D-NC em 10MHz.....	48
Figura 31-Placa 6 - 6D-S em 2MHz.....	50
Figura 32-Placa 6 - 6D-S em 10MHz.....	50
Figura 33-Placa 7 - 8D-C em 2MHz.....	51
Figura 34-Placa 7 - 8D-C em 10MHz.....	51
Figura 35-Placa 8 - 8D-S em 2MHz.....	52
Figura 36-Placa 8 - 8D-S em 10MHz.....	53
Figura 37-Placa 9 - TG-C em 2MHz.....	54

Figura 38-Placa 9- TG-C em 10MHz.....	55
Figura 39-Placa 10 - TG-S em 2MHz.....	55
Figura 40-Placa 10 - TG-S em 10MHz.....	56
Figura 41-Placa 11 - TG-NC em 2MHz.....	57
Figura 42-Placa 11 - TG-NC em 10MHz.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Placas de Circuito Impressos (PCIs).....	38
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
FEXT	<i>Far-End Crosstalk</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LabCEM	Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética
NEXT	<i>Near-End Crosstalk</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
SI	<i>Signal Integrity</i> (Integridade de Sinal)
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Definição do Problema.....	16
1.3	Objetivo Geral.....	16
1.4	Objetivos Específicos.....	16
1.5	Estrutura do Trabalho.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Campo elétrico.....	18
2.2	Campo magnético.....	19
2.3	Campo Próximo e Campo Distante.....	20
2.4	Placas de Circuito Impresso (PCI).....	22
2.5	Integridade do Sinal.....	24
2.6	Compatibilidade Eletromagnética.....	25
2.7	Crosstalk.....	26
2.7.1	Técnicas de redução de <i>crosstalk</i>	28
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Rastreador automático de campo próximo.....	31
3.2	Setup para medições.....	35
3.3	Placas de Circuito impresso utilizadas para ensaio.....	36
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	42
4.1	Análise e discussão dos resultados individualmente.....	42
4.1.1	Placa 1.....	42
4.1.2	Placa 2.....	44
4.1.3	Placa 3.....	45
4.1.4	Placa 4.....	46
4.1.5	Placa 5.....	48
4.1.6	Placa 6.....	49
4.1.7	Placa 7.....	51
4.1.8	Placa 8.....	52
4.1.9	Placa 9.....	54
4.1.10	Placa 10.....	55
4.1.11	Placa 11.....	57
4.2	Comparação dos resultados.....	58
4.2.1	Comparação entre placas D, 6D e 8D sem plano de referência.....	59
4.2.2	Comparação entre placas D, 6D e 8D com plano de referência conectado 60	
4.2.3	Comparação entre as placas D (conectada, não conectada e sem plano) na mesma escala.....	61
4.2.4	Comparação das placas com trilha de guarda.....	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica tem impulsionado o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos cada vez mais compactos e com maior desempenho. Essa tendência resulta em placas de circuito impresso (PCI) com alta densidade de componentes e operação em frequências elevadas, o que torna o projeto físico dessas placas um desafio crescente para os engenheiros eletrônicos.

Um dos principais aspectos a serem considerados nesses projetos é a Compatibilidade Eletromagnética (EMC – *Electromagnetic Compatibility*). Segundo Paul (2006), a EMC diz respeito à capacidade de um equipamento eletrônico operar adequadamente em seu ambiente eletromagnético, sem causar ou sofrer interferências indesejadas.

Outro conceito essencial é a Integridade de Sinal (SI – *Signal Integrity*). De acordo com Liz (1999), a SI está relacionada à qualidade com que os sinais elétricos percorrem as trilhas de uma PCI, evitando distorções, ruídos ou perdas que possam comprometer o desempenho funcional dos sistemas.

Com o aumento das frequências de operação e a constante miniaturização dos circuitos, garantir a integridade dos sinais e o correto comportamento eletromagnético das placas tornou-se uma tarefa cada vez mais desafiadora. Entre os fenômenos que mais influenciam esses aspectos está o *crosstalk*, interferência causada pela proximidade entre trilhas condutoras, capaz de induzir sinais indesejados em linhas adjacentes e comprometer o funcionamento do sistema (PAUL, 2006).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar o fenômeno do *crosstalk* em placas de circuito impresso, por meio de estudo teórico e experimental, utilizando um rastreador de campo próximo para avaliar diferentes configurações de trilhas e identificar soluções que contribuam para a mitigação desse efeito.

1.1 Justificativa

Os problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética (EMC – *Electromagnetic Compatibility*) têm afetado o desempenho de dispositivos eletrônicos há décadas. A presença de interferências eletromagnéticas pode

comprometer diretamente a integridade de sinal (SI – *Signal Integrity*) dos circuitos, resultando em falhas no funcionamento dos equipamentos e dificuldades no cumprimento das normas regulatórias exigidas para comercialização (ARMSTRONG, 2010).

Com o avanço das tecnologias e a demanda por dispositivos operando em altas frequências e com maior densidade de componentes, os desafios relacionados à EMC e SI tornam-se cada vez mais críticos. A má gestão desses fatores no início do projeto pode acarretar retrabalhos, atrasos no desenvolvimento e aumento de custos, além de prejudicar o desempenho final do produto. Segundo Bogatin (2018), a falta de atenção aos problemas de integridade de sinal nas etapas iniciais de design pode resultar em sistemas eletrônicos com funcionamento inadequado e alto nível de interferência.

Entre os fenômenos que mais contribuem para essas dificuldades está o *crosstalk*, interferência causada pelo acoplamento eletromagnético entre trilhas adjacentes de placas de circuito impresso (PCI). Esse efeito tende a se intensificar com a redução do espaçamento entre as trilhas e com o aumento da frequência de operação, podendo gerar ruídos indesejados, erros de comunicação e degradação no desempenho dos sistemas (PAUL, 2006; SERPA; BEZERRA, 2022).

Do ponto de vista da integridade de sinal, Bogatin (2023) ressalta que o *crosstalk* é uma das principais causas de falhas em projetos de alta velocidade, exigindo cuidados especiais na definição do roteamento das trilhas e no uso de técnicas de mitigação. Ishikawa (2015) complementa que a análise experimental do acoplamento entre trilhas é essencial para compreender o impacto real do fenômeno, visto que simulações nem sempre capturam todas as variáveis presentes em ambientes práticos.

Diante desse cenário, este trabalho se justifica pela necessidade de realizar um estudo sobre o *crosstalk* em placas de circuito impresso, investigando o fenômeno de forma teórica e experimental com auxílio de um rastreador de campo próximo. Com o rastreador, pretende-se visualizar o *crosstalk* e os efeitos da aplicação de técnicas de mitigação. A compreensão e a mitigação desse efeito são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas eletrônicos mais confiáveis, eficientes e compatíveis com os requisitos de EMC.

1.2 Definição do Problema

O fenômeno do *crosstalk* em placas de circuito impresso ocorre devido ao acoplamento eletromagnético entre trilhas adjacentes, sendo intensificado pela redução do espaçamento físico entre condutores e pelo aumento da frequência de operação. Esse efeito pode induzir sinais indesejados em linhas vizinhas, comprometendo a integridade do sinal e o desempenho de sistemas eletrônicos.

Considerando esse contexto, este trabalho busca responder à seguinte questão: de que forma o *crosstalk* entre trilhas adjacentes de uma placa de circuito impresso pode ser visualizado e estudado utilizando um rastreador de campo eletromagnético, e de que maneira as técnicas aplicadas contribuem para a mitigação deste fenômeno?

1.3 Objetivo Geral

Analisar o fenômeno do *crosstalk* em diferentes configurações de trilhas de placas de circuito impresso (PCI), por meio de estudo teórico e experimental com o uso de rastreador de campo próximo.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos são definidos:

a) Realizar uma revisão teórica abrangendo os principais conceitos relacionados, incluindo campos elétricos e magnéticos, integridade de sinal, compatibilidade eletromagnética (EMC) e *crosstalk* em placas de circuito impresso.

b) Projetar e confeccionar placas de circuito impresso com diferentes configurações de trilhas, a fim de possibilitar testes comparativos.

c) Realizar medições experimentais com o uso de um rastreador de campo próximo para avaliar a intensidade do *crosstalk* entre trilhas em diferentes cenários.

d) Interpretar os resultados obtidos, destacando as principais conclusões e discutindo técnicas que possam contribuir para a mitigação do *crosstalk*.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a proporcionar uma compreensão clara e sequencial do tema abordado.

O capítulo um apresenta a introdução, contemplando a contextualização do tema, a definição do problema, a justificativa, os objetivos e a organização geral do trabalho.

O capítulo dois corresponde à fundamentação teórica, na qual são discutidos os principais conceitos relacionados à pesquisa, com base em referências científicas previamente publicadas.

O capítulo três descreve a metodologia adotada, detalhando os procedimentos, métodos e recursos utilizados para a realização do estudo.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos a partir das análises e experimentos realizados, seguidos de uma discussão fundamentada nos conceitos abordados na revisão teórica.

Por fim, o capítulo cinco reúne as conclusões e considerações finais, destacando os principais achados da pesquisa e sugerindo possíveis direções para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo reúne os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa, organizados de forma a proporcionar uma compreensão progressiva do tema. Inicialmente, são revisados os conceitos de campo elétrico e campo magnético, que constituem a base física para a análise dos fenômenos eletromagnéticos. Em seguida, são apresentadas as características e particularidades de placas de circuito impresso (PCI). A partir disso, discutem-se a integridade de sinal e a compatibilidade eletromagnética (EMC), aspectos essenciais para o desempenho de sistemas eletrônicos modernos. Por fim, é abordado o *crosstalk* em trilhas de PCI, fenômeno de acoplamento indesejado que representa o foco principal desta pesquisa.

2.1 Campo elétrico

O campo elétrico é uma grandeza vetorial que descreve a força exercida sobre uma carga elétrica em determinado ponto do espaço, resultante da presença de cargas elétricas ou da variação temporal de um campo magnético (MORRISON, 2007). Em circuitos impressos, o campo elétrico se estabelece entre condutores e planos de referência, formando linhas de fluxo que indicam a direção e a intensidade da força elétrica. Esse comportamento é essencial para compreender os mecanismos de acoplamento capacitivo entre trilhas, os quais podem causar interferências indesejadas e comprometer a integridade do sinal (MONTROSE, 2000).

Segundo Halliday (2006), a intensidade do campo elétrico é expressa pela relação:

$$E = \frac{F}{q}$$

Em que:

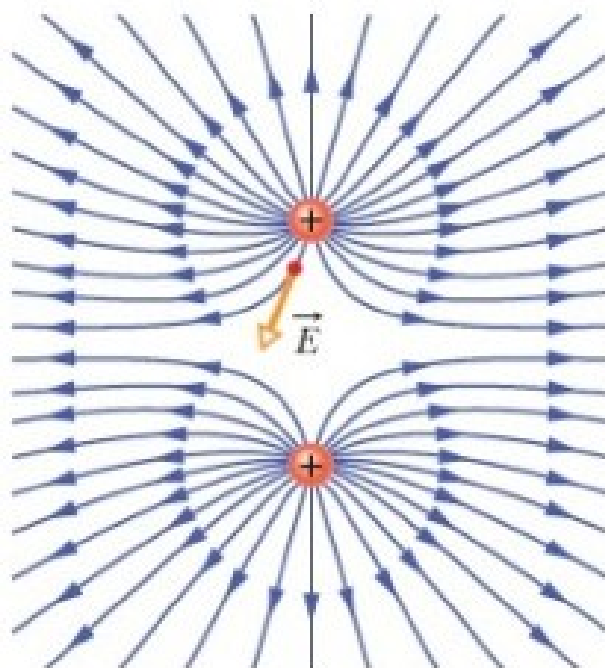
E é o campo elétrico em um ponto do espaço (N/C);

F é a força elétrica que atua sobre a carga de teste nesse ponto (N);

q é a carga de teste (C).

A Figura 1 ilustra as linhas de campo elétrico gerada por duas cargas positivas, evidenciando o comportamento de repulsão entre elas (HALLIDAY, 2006). Observa-se que as linhas de campo saem de cada carga e se afastam entre si, representando a direção da força que atuaria sobre uma carga de teste positiva. Esse padrão demonstra a distribuição do campo em regiões de potencial semelhante, sendo análogo ao comportamento do campo elétrico entre condutores paralelos próximos em uma placa de circuito impresso.

Figura 1 - Linhas de campo elétrico de duas cargas positivas



Fonte: Adaptado de Halliday, Resnick e Walker (2006)

2.2 Campo magnético

O campo magnético é uma grandeza vetorial associada ao movimento de cargas elétricas, sendo gerado por correntes elétricas ou pela variação temporal de um campo elétrico (MORRISON, 2007). Esse campo está intrinsecamente relacionado ao campo elétrico por meio das equações de Maxwell, que descrevem o comportamento das interações eletromagnéticas fundamentais.

Segundo Morrison (2007), a relação entre o campo magnético e a corrente elétrica é expressa pela Lei de Ampère-Maxwell, uma das quatro equações de Maxwell:

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta E}{\delta t}$$

Em que:

B é campo magnético (N.s/C) ;

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo;

J é a densidade de corrente elétrica (A/m²);

ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo;

E é o campo elétrico (N/C).

2.3 Campo Próximo e Campo Distante

A propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre ocorre em regiões distintas ao redor da fonte emissora, denominadas campo próximo e campo distante. Cada uma delas apresenta características diferentes em relação à distribuição espacial e à relação entre os campos elétrico e magnético. A compreensão dessas regiões é fundamental para interpretar medições realizadas com rastreadores de campo próximo e para compreender os mecanismos de acoplamento eletromagnético em circuitos.

Segundo Balanis (2016), o campo próximo corresponde à região mais próxima da antena, condutor ou estrutura que origina a radiação. Nessa zona, predominam os campos reativos, ou seja, componentes do campo que armazenam energia elétrica e magnética alternadamente, sem efetiva propagação de potência. O comportamento dos campos depende fortemente da geometria e das dimensões

físicas da fonte, e as intensidades dos campos elétrico (E) e magnético (H) variam de maneira não uniforme. Nessas condições, a relação entre os campos elétrico e magnético não é fixa e, portanto, não segue a impedância característica do espaço livre, que só se estabelece na região de campo distante.

O campo distante, também chamado de região de radiação, é onde a energia eletromagnética se propaga de forma estável. Nessa região, as linhas de campo elétrico e magnético são mutuamente perpendiculares e ortogonais à direção de propagação, e a relação entre elas é constante, obedecendo à impedância do meio. As frentes de onda tornam-se aproximadamente planas e a densidade de potência diminui com o quadrado da distância (BALANIS, 2016).

A transição entre o campo próximo e o campo distante não ocorre de forma abrupta, mas por meio de uma região intermediária, denominada campo próximo radiativo (ou região de Fresnel). Segundo Balanis(2016), essa zona de transição é limitada por distâncias que dependem da dimensão da antena e do comprimento de onda, sendo expressas aproximadamente por:

$$R_1 < 0,62\sqrt{D^3/\lambda}$$

e

$$R_2 \approx \frac{2D^2}{\lambda}$$

onde:

R1 é o limite do campo próximo reativo,

R2 é o início do campo distante,

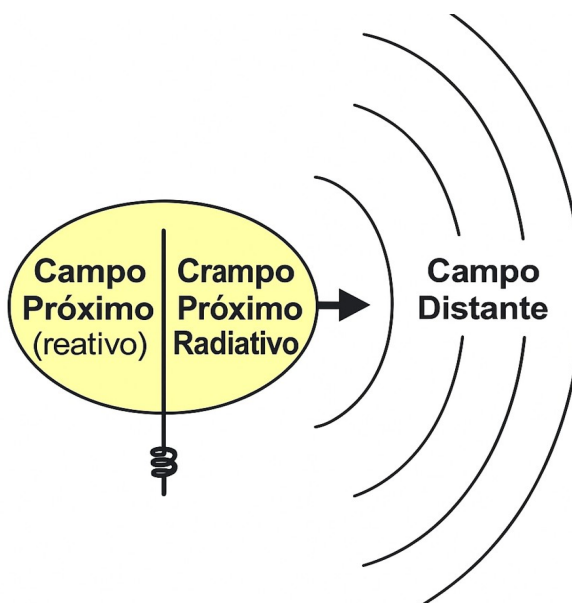
D é a maior dimensão física da antena,

λ é o comprimento de onda.

A figura 2 ilustra as diferentes regiões de campo eletromagnético ao redor de uma antena. A região mais próxima à fonte corresponde ao campo próximo reativo,

onde predominam componentes que armazenam energia elétrica e magnética. Em seguida, encontra-se o campo próximo radiativo, caracterizado pela transição entre os campos reativos e a propagação efetiva de energia. Por fim, o campo distante representa a região onde a onda eletromagnética é totalmente radiada e as frentes de onda tornam-se aproximadamente planas (BALANIS 2016).

Figura 2 - Regiões de campo de uma antena



Fonte: Adaptado de Balanis (2016).

2.4 Placas de Circuito Impresso (PCI)

A placa de circuito impresso (PCI) é o elemento responsável por realizar as interconexões elétricas entre os componentes de um sistema eletrônico, além de fornecer suporte mecânico e estrutural. Sua construção é composta por trilhas condutoras, normalmente de cobre, fixadas sobre um material dielétrico. Em PCIs de duas camadas, como a que será usada neste trabalho, uma das faces é utilizada para as trilhas de sinal, enquanto a outra atua como plano de referência (geralmente o plano de terra), permitindo o retorno da corrente elétrica e contribuindo para o controle da integridade do sinal (PAUL, 2006).

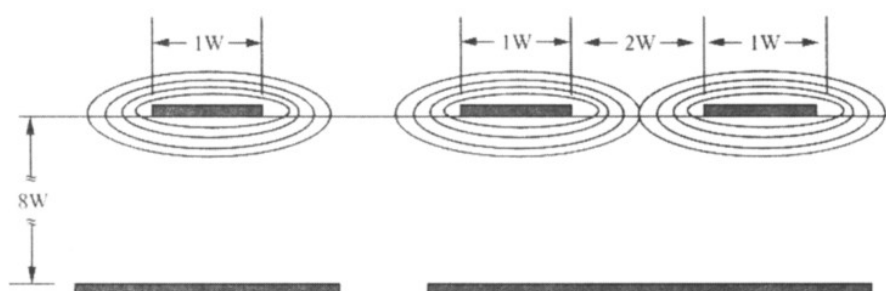
Segundo Bogatin (2018), o comportamento eletromagnético da PCI está diretamente relacionado à geometria das trilhas, ao espaçamento entre condutores e

à proximidade em relação ao plano de referência. Quando um sinal percorre uma trilha, forma-se um campo elétrico entre ela e o plano de terra, e um campo magnético em torno da trilha, ambos confinados na região entre condutor e plano. Essa distribuição de campos é determinante para a propagação do sinal e para o acoplamento entre trilhas adjacentes, fenômeno que origina o crosstalk em altas frequências (BOGATIN, 2018).

De acordo com Montrose (2000), o campo elétrico se propaga perpendicularmente à superfície do condutor, enquanto o campo magnético forma laços concêntricos ao redor da trilha. A interação entre esses campos define o comportamento de transmissão da linha e o nível de interferência entre sinais vizinhos. Assim, compreender as características geométricas e eletromagnéticas da PCI é essencial para o projeto de circuitos de alta frequência e para a mitigação dos efeitos do crosstalk.

A Figura 3 apresenta as linhas de fluxo magnético em uma placa de circuito impresso de duas camadas, ilustrando a interação entre a trilha de sinal e o plano de referência. Observa-se que, quanto menor a distância entre trilha e plano, maior o cancelamento do fluxo magnético, resultando em menor emissão e melhor confinamento da energia eletromagnética. Esse comportamento é fundamental para o controle da integridade do sinal e para a redução do crosstalk em frequências elevadas (MONTROSE, 2000).

Figura 3 - Linhas de fluxo magnético em trilhas sobre plano de referência em placas de duas camadas



Fonte: Adaptado de Montrose (2000).

2.5 Integridade do Sinal

A integridade do sinal refere-se à capacidade de um sinal elétrico manter suas características originais — forma de onda, amplitude e temporização — ao se propagar por uma trilha em uma placa de circuito impresso. A preservação dessas características é essencial para o funcionamento confiável de circuitos digitais e de alta frequência, pois distorções na forma de onda podem comprometer a interpretação lógica de níveis de tensão e gerar falhas de comunicação entre dispositivos (BOGATIN, 2018).

Em baixas frequências, o sinal pode ser tratado como uma simples variação de tensão, e o comportamento da trilha é dominado por efeitos resistivos. Entretanto, em altas frequências, as trilhas passam a se comportar como linhas de transmissão, onde os efeitos de capacitância e indutância distribuídas tornam-se significativos. Nessa condição, a propagação é regida pelas leis do campo eletromagnético, e fatores como descontinuidades, reflexões, interferências e acoplamentos entre trilhas influenciam diretamente a integridade do sinal (MORRISON, 2007).

Segundo Paul (2006), a degradação da integridade do sinal pode ocorrer por diversos mecanismos, entre eles a reflexão devido à falta de terminação adequada, o ruído de modo comum e o acoplamento entre condutores próximos. Esse último fenômeno está associado ao *crosstalk*, que resulta do acoplamento capacitivo e indutivo entre trilhas vizinhas, causando distorção e interferência nos sinais transmitidos. Assim, o controle da integridade do sinal requer o entendimento da interação entre o campo elétrico e magnético na PCI, bem como o projeto geométrico adequado das trilhas e planos de referência.

Em síntese, garantir a integridade do sinal envolve equilibrar parâmetros elétricos e geométricos da PCI, mantendo o confinamento dos campos e minimizando o acoplamento indesejado. O projeto adequado de espaçamento entre trilhas, largura dos condutores e posicionamento do plano de referência reduz o ruído eletromagnético e melhora a qualidade da transmissão de dados, tornando-se

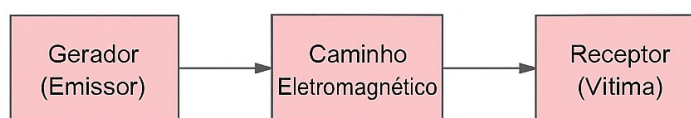
um requisito fundamental para evitar o crosstalk e preservar o desempenho do sistema eletrônico (MONTROSE, 2000).

2.6 Compatibilidade Eletromagnética

A compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility – EMC*) é a área do eletromagnetismo que estuda as condições necessárias para que dispositivos eletrônicos possam operar corretamente em um mesmo ambiente, sem causar interferência a outros equipamentos e sem serem afetados por perturbações externas. Um sistema é considerado compatível quando seus níveis de emissão estão abaixo dos limites aceitáveis e sua imunidade é suficiente para resistir às perturbações presentes (MORRISON, 2007).

Segundo Paul (2006), a ocorrência de problemas de EMC pode ser compreendida pela relação entre três elementos fundamentais: a fonte emissora, o caminho de acoplamento e o receptor. Essa relação é apresentada na Figura 4, que ilustra o processo de acoplamento eletromagnético em um sistema, onde a energia gerada por uma fonte é transmitida através de um meio de acoplamento e captada por um receptor, resultando em interferência indesejada.

Figura 4 - Elementos de um problema de compatibilidade eletromagnética.



Fonte: Adaptado de Paul (2006).

As interferências podem ocorrer de duas formas principais: conduzidas e irradiadas.

- A interferência conduzida ocorre quando a energia eletromagnética é transmitida por meios condutores, como cabos, trilhas de circuito impresso ou planos de referência, afetando diretamente circuitos sensíveis conectados ao mesmo sistema elétrico.

- Já a interferência irradiada ocorre quando campos elétricos e magnéticos se propagam pelo espaço e são acoplados a outros condutores, gerando correntes ou tensões indesejadas.

Segundo Montrose (2000), essas formas de acoplamento são influenciadas pelas características físicas do circuito impresso, como o comprimento e o espaçamento das trilhas, a continuidade do plano de terra e a geometria dos condutores. Trilhas longas, paralelas e sem plano de retorno próximo tendem a atuar como antenas, facilitando tanto a emissão quanto a recepção de energia eletromagnética.

Para garantir a compatibilidade eletromagnética em sistemas de alta frequência, é essencial empregar técnicas adequadas de projeto, como a minimização das áreas de loop, o uso de planos de referência contínuos, o controle da impedância das trilhas e o roteamento cuidadoso dos sinais críticos. Essas medidas reduzem o acoplamento indesejado entre condutores e aumentam a imunidade do sistema, prevenindo efeitos como o *crosstalk*, que será abordado no item seguinte (MONTROSE, 2000).

2.7 Crosstalk

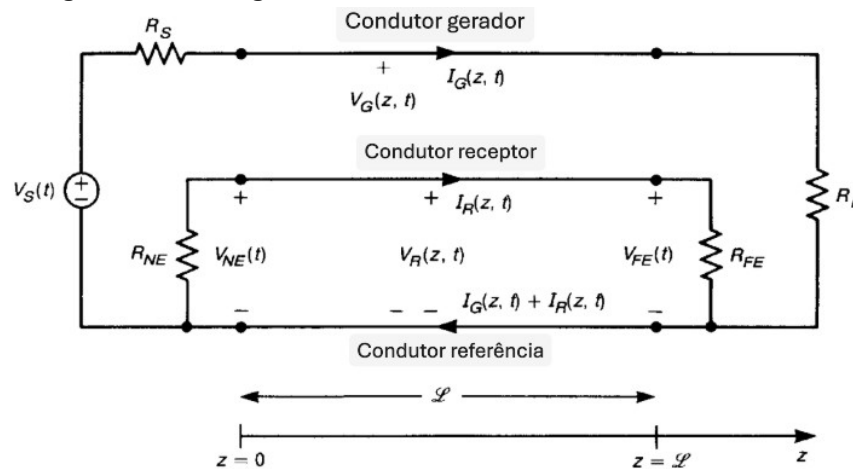
O *crosstalk* é o fenômeno de interferência eletromagnética que ocorre quando parte do sinal transmitido por uma trilha (condutor agressor) é indesejavelmente acoplada a uma trilha vizinha (condutor vítima). Esse acoplamento resulta da interação entre os campos elétrico e magnético gerados pelo sinal propagante, podendo causar distorções, ruído e erros de comunicação em circuitos de alta velocidade (BOGATIN, 2018).

O acoplamento entre trilhas pode ser de natureza capacitiva ou indutiva. O acoplamento capacitivo ocorre devido à variação do campo elétrico entre condutores próximos, provocando a transferência de corrente de deslocamento proporcional à taxa de variação da tensão. Já o acoplamento indutivo é causado pela variação do

campo magnético associado à corrente na trilha agressora, induzindo uma tensão na trilha vítima proporcional à taxa de variação da corrente (MONTROSE, 2000).

A Figura 5 apresenta o modelo geral de uma linha de transmissão de três condutores, conforme proposto por Paul (2006). Nessa representação, o condutor superior atua como trilha agressora, enquanto o inferior representa a trilha vítima, ambos acoplados por campos elétricos e magnéticos em relação ao condutor de referência. As tensões observadas nas extremidades do condutor receptor correspondem ao *Near-End Crosstalk* e ao *Far-End Crosstalk*, conforme a posição de medição do sinal induzido.

Figura 5-Modelo geral de linha de transmissão de três condutores



Segundo Paul (2006), o *crosstalk* é geralmente classificado em dois tipos principais:

Near-End Crosstalk (NEXT): interferência observada na extremidade da trilha vítima mais próxima da fonte do sinal. Ocorre predominantemente por acoplamento capacitivo.

Far-End Crosstalk (FEXT): interferência medida na extremidade oposta da trilha vítima, sendo resultado combinado dos acoplamentos capacitivo e indutivo.

A intensidade do *crosstalk* depende de diversos fatores geométricos e elétricos, como o espaçamento entre trilhas, largura dos condutores, altura em relação ao plano de referência, frequência do sinal e comprimento paralelo de acoplamento. À medida que a frequência aumenta, a energia eletromagnética se

concentra mais nas vizinhanças das trilhas, intensificando o acoplamento e reduzindo a integridade do sinal (MORRISON, 2007).

Em PCBs de duas camadas, como as utilizadas neste trabalho, a ausência de múltiplos planos de referência e o roteamento paralelo de sinais favorecem a ocorrência de *crosstalk*. A compreensão desse fenômeno é fundamental para o projeto de circuitos com bom desempenho eletromagnético, permitindo o controle de interferências e a mitigação de ruídos indesejados por meio do espaçamento adequado entre trilhas e da utilização de planos de terra eficientes (MONTROSE, 2000).

2.7.1 Técnicas de redução de *crosstalk*

A mitigação do *crosstalk* em placas de circuito impresso (PCBs) depende essencialmente do controle geométrico e eletromagnético das trilhas de sinal. Fatores como o espaçamento entre condutores, a altura em relação ao plano de referência, o roteamento paralelo entre sinais adjacentes e o uso de planos de terra contínuos influenciam diretamente o nível de acoplamento entre linhas.

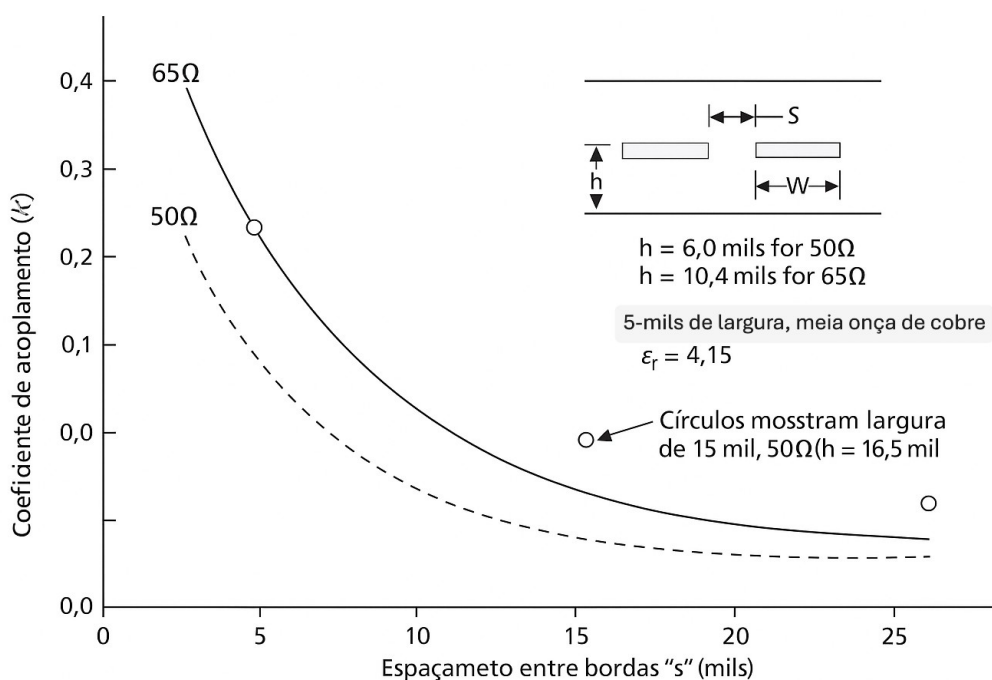
Segundo Paul (2006), a forma mais direta de reduzir o *crosstalk* é aumentar a separação entre trilhas. O acoplamento capacitivo ocorre devido à capacitância mútua entre condutores próximos, enquanto o acoplamento indutivo é resultado do fluxo magnético compartilhado. Quanto menor o espaçamento, maior será o acoplamento eletromagnético entre os sinais. Por isso, uma das práticas mais difundidas em layout de alta frequência é a regra de 3W, que recomenda manter uma distância mínima entre trilhas de três vezes a largura da trilha (3W). Esse espaçamento reduz o campo elétrico que alcança o condutor vizinho, diminuindo o *crosstalk* capacitivo e indutivo (BOGATIN, 2018).

Em aplicações críticas, como linhas de alta velocidade ou sinais diferenciais, pode-se adotar espaçamentos ainda maiores — até 5W ou 10W, conforme a sensibilidade do circuito e o nível de ruído admissível (THIERAUF, 2004). Além do espaçamento lateral, a altura da trilha em relação ao plano de referência também é

determinante: quanto mais próxima a trilha estiver do plano, mais confinados ficam os campos elétrico e magnético, reduzindo a emissão e o acoplamento com trilhas adjacentes (MONTROSE, 2000).

A Figura 6 ilustra esse comportamento, mostrando que o aumento do espaçamento entre as trilhas resulta em menor interação entre os campos e, conseqüentemente, menor interferência entre sinais vizinhos. O gráfico apresenta curvas obtidas para linhas de 50 Ω e 65 Ω , indicando como o coeficiente de acoplamento diminui à medida que a distância entre as trilhas aumenta. As medições consideram trilhas com largura de 5 mils (aproximadamente 0,127 mm) e cobre de meia onça por pé quadrado, equivalente a uma espessura aproximada de 17 μm , parâmetros típicos em placas de circuito impresso.

Figura 6 - Efeito do espaçamento entre trilhas na redução do acoplamento eletromagnético



Fonte: Adaptado de Thierauf (2004).

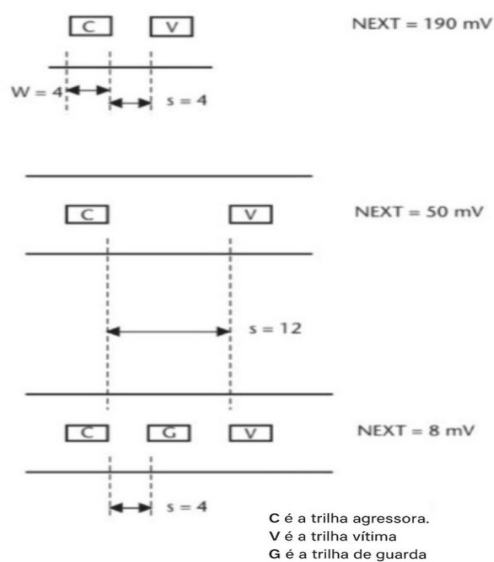
Outra técnica eficaz consiste na utilização de planos de referência contínuos, preferencialmente planos de terra sólidos. De acordo com Montrose (2000), esses planos proporcionam um caminho de retorno de corrente de baixa indutância, confinando o campo magnético entre a trilha e o plano e reduzindo o acoplamento indutivo. Qualquer descontinuidade no plano — como fendas, aberturas ou

mudanças abruptas de camada — força o retorno da corrente a percorrer caminhos mais longos, ampliando o loop de acoplamento e aumentando o crosstalk.

Outra prática amplamente utilizada é a inserção de trilhas de guarda, que consistem em condutores aterrados posicionados entre duas trilhas de sinal paralelas. A função da trilha de guarda é interceptar parte das linhas de campo elétrico entre os sinais, redirecionando-as ao plano de referência e reduzindo a capacitância mútua. Segundo Thierauf (2004), o uso de trilha de guarda é especialmente eficiente para reduzir o crosstalk capacitivo em linhas longas e paralelas. Contudo, para que sejam eficazes, essas trilhas devem estar firmemente conectadas ao plano de terra por meio de múltiplos vias de aterramento distribuídos ao longo do percurso (BOGATIN, 2018).

A Figura 7 exemplifica essa técnica, mostrando uma trilha de guarda entre duas linhas de sinal paralelas sobre um plano de referência. Quando bem implementada, essa configuração reduz significativamente a interferência mútua entre as linhas.

Figura 7 - Aumento de espaçamento e utilização de trilha de guarda



Fonte: Adaptado de Thierauf (2004).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho tem caráter experimental e aplicado, pois busca analisar o fenômeno de *crosstalk* em trilhas de placas de circuito impresso (PCI) por meio de medições práticas realizadas em laboratório. Segundo Gil (2002), a pesquisa aplicada tem como objetivo gerar conhecimentos voltados à solução de problemas específicos, com interesse prático e contextualizado, enquanto a pesquisa experimental caracteriza-se pela manipulação direta das variáveis envolvidas, com o propósito de observar seus efeitos sobre determinado fenômeno.

Dessa forma, o presente estudo foi desenvolvido a partir de experimentos conduzidos no Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética (LabCEM) do IFSC – Campus Florianópolis, utilizando o Rastreador Automático de Campo Próximo como principal ferramenta de medição. As etapas metodológicas foram organizadas de modo a permitir a análise sistemática do acoplamento eletromagnético entre trilhas adjacentes em uma PCI de duas camadas.

Os resultados obtidos nos experimentos foram posteriormente comparados e analisados de forma qualitativa, considerando-se a influência das dimensões físicas e do espaçamento entre condutores sobre o *crosstalk*. As medições e análises visaram não apenas a observação do fenômeno, mas também a compreensão das técnicas de mitigação.

3.1 Rastreador automático de campo próximo

O equipamento de rastreamento automático de campo próximo foi empregado neste trabalho para monitorar o campo eletromagnético gerado nas proximidades das placas de circuito impresso (PCI) durante os ensaios experimentais. Sua principal função é automatizar o processo de medição, permitindo que as varreduras sejam realizadas de forma precisa e controlada em toda a superfície da placa. Todo o equipamento foi projetado e montado em um Trabalho de Conclusão de Curso do

Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial no Instituto Federal de Santa Catarina (LUIZ, 2022).

A estrutura do rastreador é composta por um sistema baseado em Controle Numérico Computadorizado (CNC), responsável por deslocar a antena de medição nos eixos X e Y. Esse mecanismo possibilita a execução de varreduras matriciais sobre a área da amostra, com resolução e espaçamento configuráveis conforme os parâmetros definidos pelo operador. Na extremidade do eixo móvel está fixada uma antena sensora, capaz de detectar as variações do campo elétrico próximo à superfície analisada.

O rastreador é interligado a um conjunto de instrumentos eletrônicos que compõem o sistema de medição. Dentre eles, destaca-se o gerador de funções, utilizado para excitar a trilha agressora da placa sob teste, e o analisador de espectro HAMEG HMS-X, responsável por receber o sinal proveniente da antena e apresentar os resultados de intensidade do campo. O sistema inclui ainda uma fonte de alimentação, responsável por fornecer energia aos componentes eletrônicos do rastreador, e um microcontrolador, que coordena os motores e realiza a comunicação com o computador.

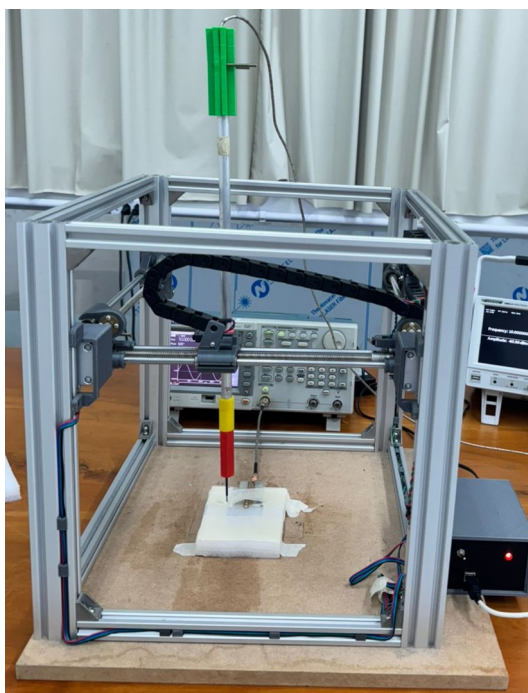
O controle do movimento e o gerenciamento das medições são realizados por meio de um software dedicado, desenvolvido especificamente para o rastreador. Por meio dessa interface, o operador pode definir parâmetros como limites de varredura e resolução de amostragem. A comunicação entre o microcontrolador e o computador ocorre via porta USB, garantindo a sincronização entre o movimento da sonda e a aquisição dos dados.

A distância entre a antena sensora e a superfície da placa de circuito impresso é mantida constante durante a realização das medições, sendo definida em 2,8 cm entre a ponta da antena e a mesa de apoio das amostras. Esse posicionamento é ajustado manualmente antes do início dos ensaios, por meio da regulagem mecânica da altura da antena. Após o ajuste inicial, essa distância permanece fixa ao longo de toda a varredura, sendo a antena deslocada apenas nos

eixos X e Y pelo sistema CNC, garantindo que todas as medições sejam realizadas sob as mesmas condições geométricas.

A Figura 8 apresenta o rastreador utilizado nas medições, composto pela estrutura de CNC, antena de campo próximo e instrumentos eletrônicos integrados.

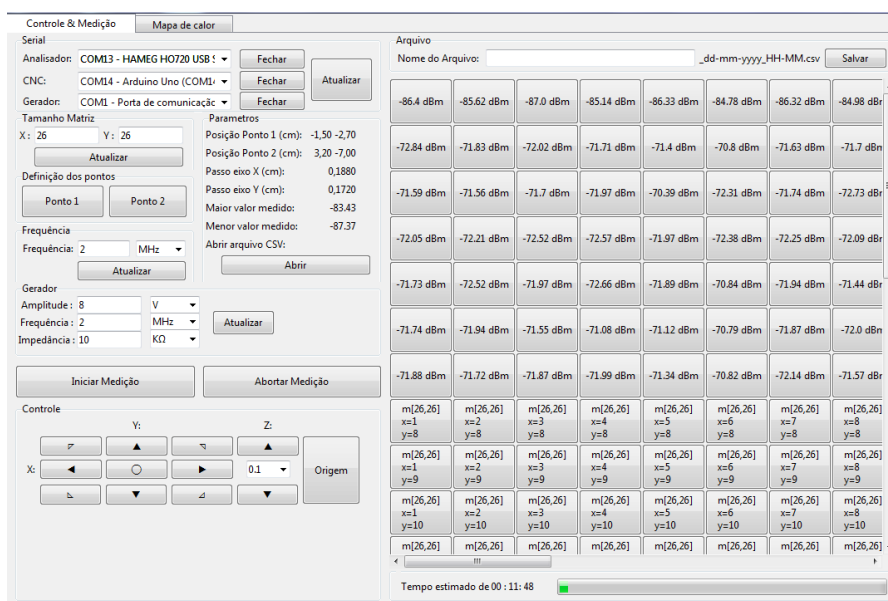
Figura 8 - Rastreador automático de campo próximo utilizado nas medições



Fonte: Autoria própria (2025).

A interface do software de controle pode ser observada na Figura 9. Nessa tela inicial, o usuário insere os parâmetros de ensaio, como amplitude, frequência e impedância, além de definir os pontos de referência (ponto 1 e ponto 2) que delimitam a área de varredura sobre a PCI. Após a configuração, o sistema inicia automaticamente a medição do campo elétrico em toda a região selecionada.

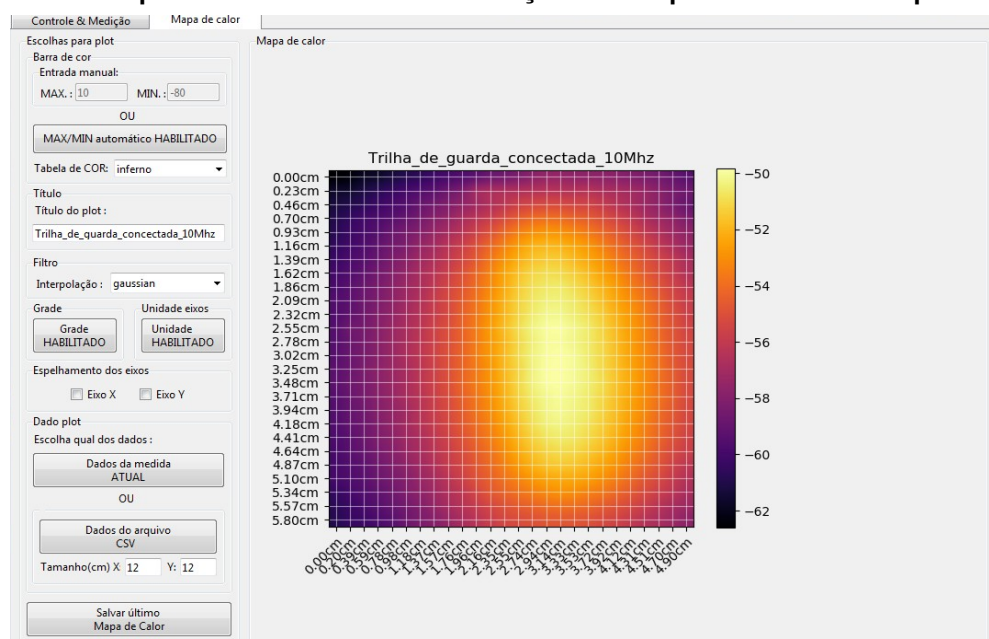
Figura 9 - Interface do software de controle do rastreador automático de campo próximo



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao término do processo, o software permite exportar os resultados obtidos em formato .csv, contendo os valores numéricos do campo medido em cada ponto da matriz, além da geração automática de um mapa de calor representando a distribuição espacial do campo elétrico sobre a placa, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Mapa de calor resultante da medição do campo elétrico sobre a placa



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Setup para medições

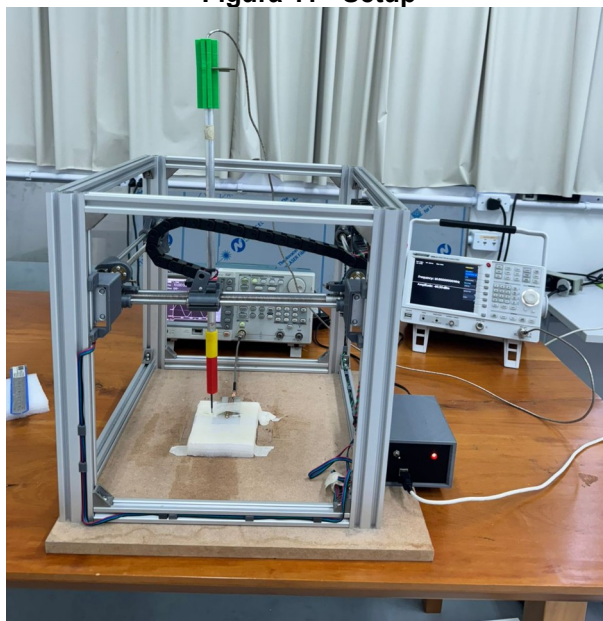
As medições foram realizadas no Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética (LabCEM), utilizando o sistema de rastreamento automático descrito anteriormente, conectado a um computador para aquisição e processamento dos dados por meio do software de controle do rastreador.

O experimento foi conduzido com o objetivo de observar o comportamento da compatibilidade eletromagnética em duas frequências distintas, 2 MHz e 10 MHz, sem a intenção de comparar diretamente os resultados entre elas. A escolha dessas frequências permitiu avaliar o comportamento do acoplamento eletromagnético e dos campos próximos em diferentes regiões do espectro.

Durante as medições, o gerador de funções foi configurado com os seguintes parâmetros: amplitude de 8V e impedância de saída de 10 k Ω , sendo alterado apenas o valor da frequência entre as duas medições.

Todo o conjunto experimental foi montado sobre a bancada de medições do LabCEM, como mostra na Figura 11, e devidamente interligado ao computador, que registrou os valores de campo obtidos em cada ponto da varredura.

Figura 11 - Setup



Fonte: Autoria própria(2025).

3.3 Placas de Circuito impresso utilizadas para ensaio

Foram selecionadas dez placas de circuito impresso (PCIs) com diferentes características, com o objetivo de analisar o comportamento do *crosstalk* em distintas condições de acoplamento eletromagnético. As variações entre as placas estão relacionadas ao espaçamento entre as trilhas paralelas, à presença ou ausência de plano de referência e à conexão elétrica desse plano.

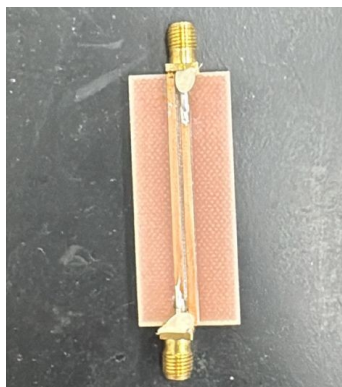
As placas foram classificadas de acordo com três distanciamentos entre trilhas, definidos como D, 6D e 8D, cujos valores físicos correspondem a:

- D = 0,6 mm
- 6D = 3,6 mm
- 8D = 4,8 mm

Essas variações de espaçamento permitem avaliar como a distância entre trilhas influencia o nível de acoplamento eletromagnético e, conseqüentemente, o *crosstalk*.

As três primeiras placas apresentam o espaçamento D entre as trilhas, conforme ilustrado nas Figuras 12, 13 e 14. Cada uma delas foi projetada com uma condição distinta de referência, permitindo avaliar o efeito do plano de retorno no acoplamento eletromagnético. As variações são respectivamente:

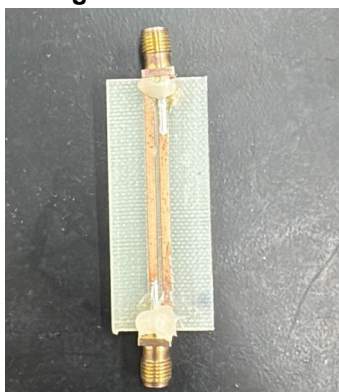
- Espaçamento D, com plano de referência conectado (Placa 1);
- Espaçamento D, com plano de referência não conectado (Placa 2);
- Espaçamento D, sem plano de referência (Placa 3).

Figura 12- Placa 1

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13-Placa 2

Fonte: Autoria própria (2025).

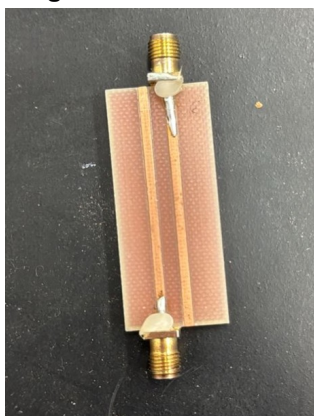
Figura 14-Placa 3

Fonte: Autoria própria (2025).

As três seguintes possuem espaçamento “6D”, correspondente a seis vezes da distância inicial, como mostram as Figuras 15, 16 e 17. Assim como no grupo anterior, cada placa apresenta uma condição distinta em relação ao plano de referência, sendo elas respectivamente:

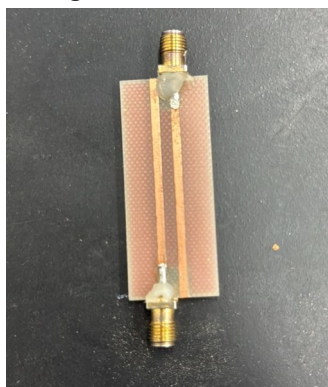
- Espaçamento 6D, com plano de referência conectado (Placa 4);
- Espaçamento 6D, com plano de referência não conectado(Placa 5);
- Espaçamento 6D, sem plano de referência (Placa 6).

Figura 15- Placa 4



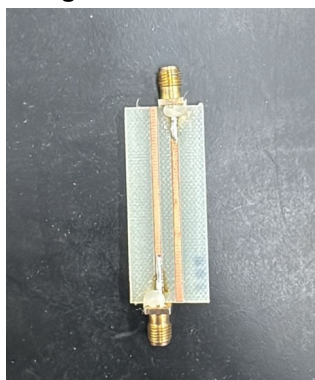
Fonte: Aatoria própria (2025).

Figura 16- Placa 5



Fonte: Aatoria própria (2025).

Figura 17- Placa 6

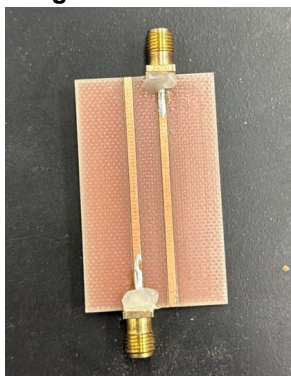


Fonte: Aatoria própria (2025).

E outras duas apresentam espaçamento “8D”, equivalente a oito vezes a distância do primeiro conjunto, como mostram as Figuras 18 e 19. As variações deste grupo são respectivamente:

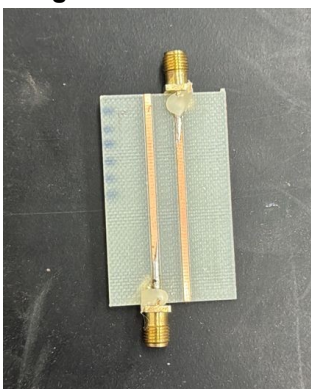
- Espaçamento 8D, com plano de referência conectado (Placa 7);
- Espaçamento 8D, sem plano de referência (Placa 8).

Figura 18- Placa 7



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 19- Placa 8



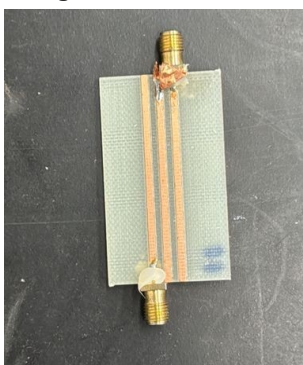
Fonte: Autoria própria (2025).

Além dessas oito placas, foram incluídas mais duas placas, uma com trilha de guarda entre as trilhas agressora e vítima e outra sem, como mostram as Figuras 20 e 21, sendo utilizadas para comparação dos resultados. Para a medição da versão conectada, foi utilizada a mesma placa da Figura 20, porém com a adição de uma solda para conectar a trilha de guarda ao conector.

As variações deste conjunto são:

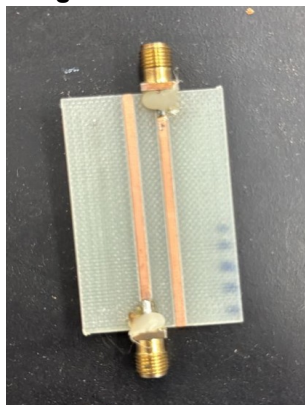
- Placa com trilha de guarda conectada (Placa 9);
- Placa sem trilha de guarda (Placa 10);
- Placa com trilha de guarda não conectada (Placa 9).

Figura 20- Placa 9



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 21- Placa 10



Fonte: Autoria própria (2025).

Em cada grupo de espaçamento, foram avaliadas algumas situações distintas:

- Com plano de referência conectado;
- Com plano de referência não conectado;
- Sem plano de referência;

- Com trilha de guarda.

As medições de todas as placas em bancadas foram realizadas para duas frequências de excitação, 2 MHz e 10 MHz.

A Tabela 1 apresenta um resumo das placas utilizadas e as siglas que serão adotadas ao longo do trabalho para facilitar a identificação de cada configuração.

Tabela 1-Placas de Circuito Impressos (PCIs)

Placa	Descrição da placa	Sigla utilizada
1	Espaçamento D, com plano de referência conectado	D-C
2	Espaçamento D, com plano de referência não conectado	D-NC
3	Espaçamento D, sem plano de referência	D-S
4	Espaçamento 6D, com plano de referência conectado	6D-C
5	Espaçamento 6D, com plano de referência não conectado	6D-NC
6	Espaçamento 6D, sem plano de referência	6D-S
7	Espaçamento 8D, com plano de referência conectado	8D-C
8	Espaçamento 8D, sem plano de referência	8D-S
9	Placa com trilha de guarda conectada	TG-C
10	Placa sem trilha de guarda	TG-S
11	Placa com trilha de guarda não conectada	TG-NC

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas medições realizadas nas dez placas de circuito impresso (PCIs) selecionadas para o estudo, utilizando o rastreador de campo próximo.

Cada placa apresenta configurações específicas de espaçamento entre trilhas e de presença ou ausência de plano de referência e ausência ou presença da trilha de guarda, de modo a permitir a análise comparativa do comportamento do *crosstalk* em diferentes condições físicas.

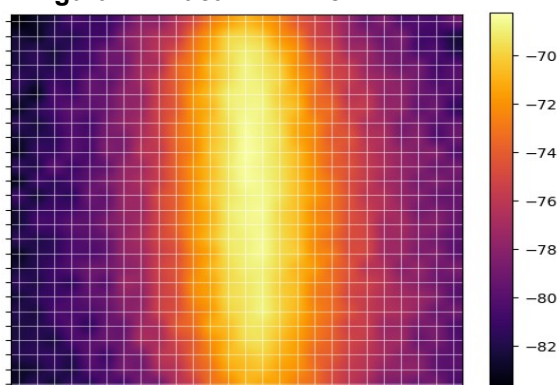
Os resultados são exibidos individualmente para cada amostra, com base nos mapas de calor gerados a partir das varreduras de campo elétrico próximo.

4.1 Análise e discussão dos resultados individualmente

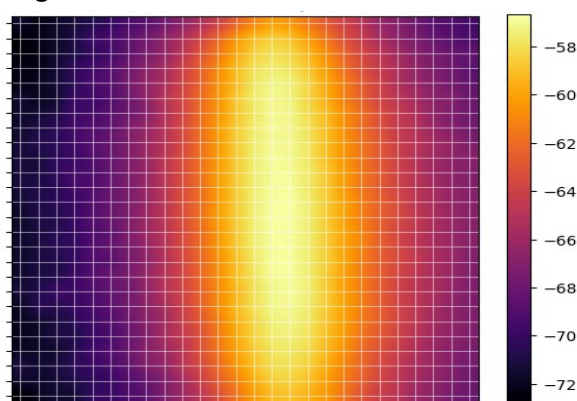
Nos próximos tópicos apresentaremos os resultados obtidos individualmente por cada uma das placas de circuito impresso que foram avaliadas experimentalmente em bancada para duas frequências distintas.

4.1.1 Placa 1

A Placa 1 corresponde à placa D-C, que possui o plano de referência conectado e espaçamento entre trilhas D. As Figuras 22 e 23 mostram os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 22-Placa 1 - D-C em 2MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 23-Placa 1 - D-C em 10MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

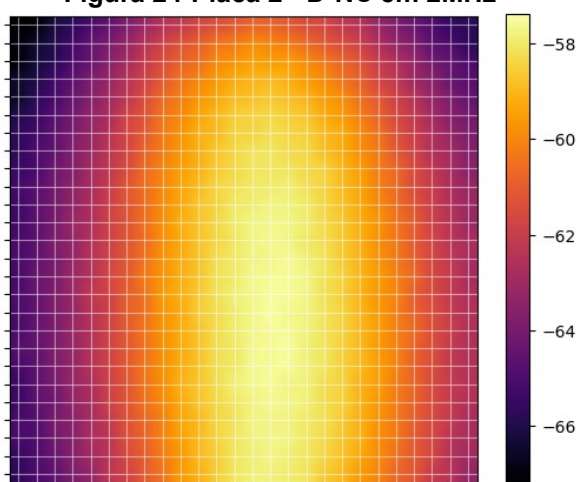
Em ambos os casos, observa-se que a intensidade do campo elétrico é maior na região central da placa, onde está localizada a trilha agressora, diminuindo gradualmente em direção às bordas. Esse comportamento se repete nas duas frequências analisadas, mantendo um padrão semelhante de distribuição espacial do campo elétrico.

Na frequência de 10 MHz, a região central apresenta níveis mais elevados de intensidade do campo elétrico quando comparada à de 2 MHz. Esse resultado indica uma maior concentração de campo elétrico nas proximidades da trilha agressora em frequências mais elevadas, embora a distribuição espacial do campo permaneça praticamente a mesma.

4.1.2 Placa 2

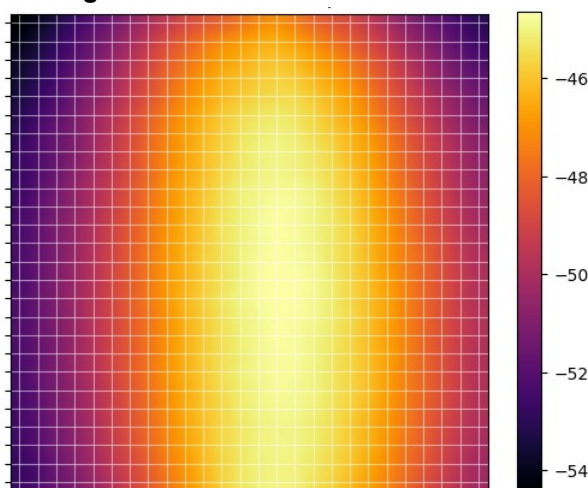
A Placa 2 corresponde à placa D-NC, que possui plano de referência, porém não conectado à referência elétrica do circuito. O espaçamento entre trilhas é o mesmo utilizado na placa anterior. As Figuras 24 e 25 apresentam os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 24-Placa 2 - D-NC em 2MHz



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25- Placa 2 - D-NC em 10MHz



Fonte: Autoria própria (2025).

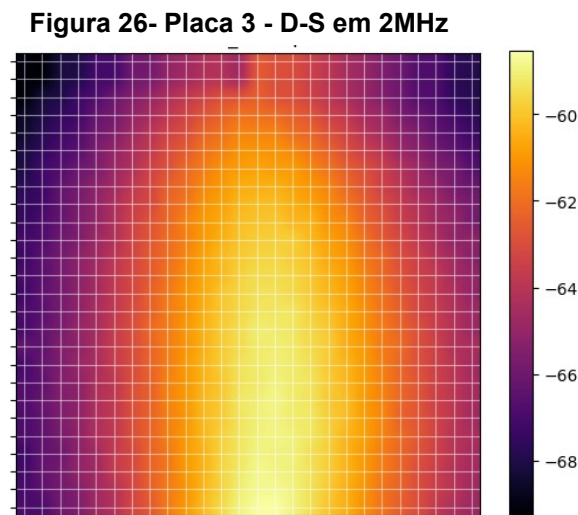
Em ambas as frequências analisadas, observa-se que a intensidade do campo elétrico é maior na região central da placa, onde se encontra a trilha agressora, diminuindo gradualmente em direção às bordas. Assim como observado

na placa D-C, o formato da distribuição espacial do campo elétrico permanece praticamente o mesmo entre 2 MHz e 10 MHz, porém com níveis mais elevados de intensidade na frequência de 10 MHz.

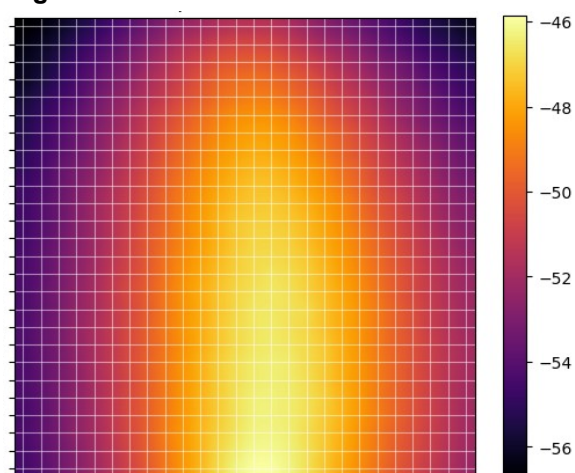
Ao comparar com o caso da placa com plano de referência conectado, nota-se que a ausência de conexão do plano resulta em valores mais elevados de intensidade do campo elétrico em toda a área de varredura. Esse comportamento indica que a falta de ligação do plano à referência elétrica reduz sua capacidade de atenuar os campos gerados pelas trilhas, favorecendo maiores níveis de campo elétrico nas proximidades da placa e, conseqüentemente, condições mais propícias à ocorrência de crosstalk.

4.1.3 Placa 3

A Placa 3 corresponde à placa D sem plano de referência. As Figuras 26 e 27 mostram os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.



Fonte: Autoria própria(2025).

Figura 27-Placa 3 - D-S em 10MHz

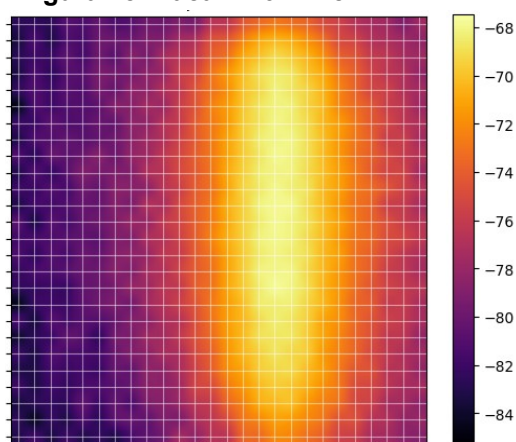
Fonte: Autoria própria(2025).

Na frequência de 2 MHz, observa-se uma região de maior intensidade do campo elétrico distribuída sobre grande parte da área da placa, com maior concentração na região central inferior. A ausência de um plano de referência contribui para que o campo elétrico se espalhe de forma mais ampla pela superfície da placa, resultando em níveis de campo menos confinados quando comparados aos casos com plano de referência.

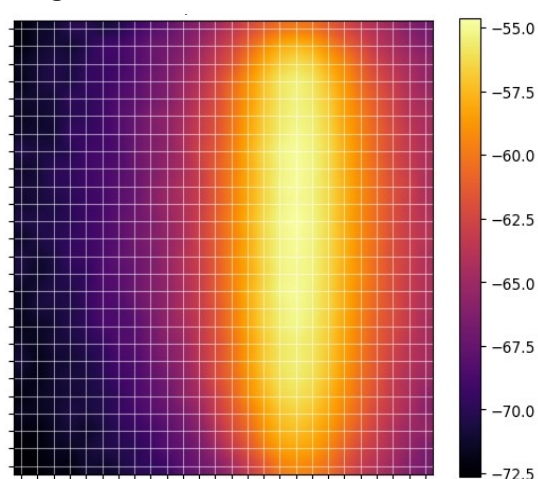
Quando a frequência é aumentada para 10 MHz, a intensidade do campo elétrico torna-se ainda mais elevada, especialmente ao longo do eixo central da placa, mantendo um padrão de distribuição semelhante ao observado em 2 MHz, porém com maiores valores em toda a área analisada. Esse comportamento evidencia que, na ausência de um plano de referência, o aumento da frequência está associado a uma intensificação dos campos elétricos próximos às trilhas, criando condições mais favoráveis à ocorrência de crosstalk.

4.1.4 Placa 4

A Placa 4 corresponde à placa 6D-C, que possui o plano de referência conectado e espaçamento entre trilhas de 6D. As Figuras 28 e 29 mostram os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 28-Placa 4 - 6D-C em 2MHz

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 29-Placa 4 - 6D-C em 10MHz

Fonte: Autoria própria (2025)

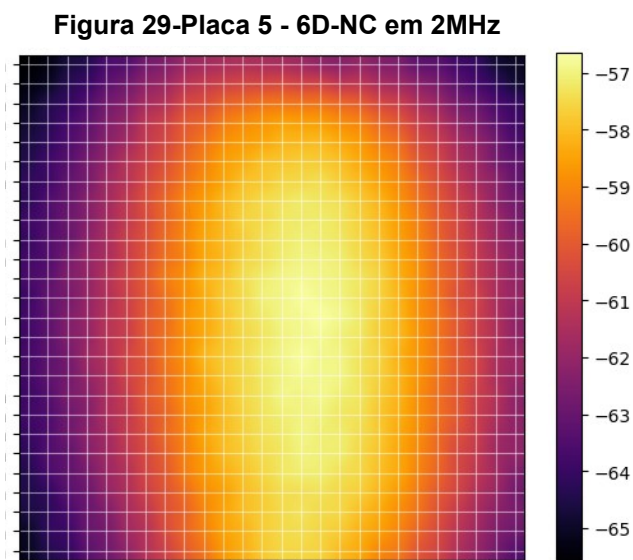
Nas duas frequências analisadas, observa-se uma região de maior intensidade do campo elétrico mais à direita, ao longo da trilha agressor, com diminuição gradual da intensidade na lateral esquerda. O formato da distribuição espacial do campo elétrico é semelhante ao observado nas placas anteriores com plano de referência conectado, evidenciando o confinamento do campo nas proximidades da trilha.

Ao comparar as frequências, nota-se que, em 10 MHz, a intensidade do campo elétrico atinge níveis mais elevados, mantendo, entretanto, o mesmo padrão de distribuição espacial. Esse comportamento indica que, embora o aumento da frequência esteja associado à intensificação dos campos elétricos, o plano de

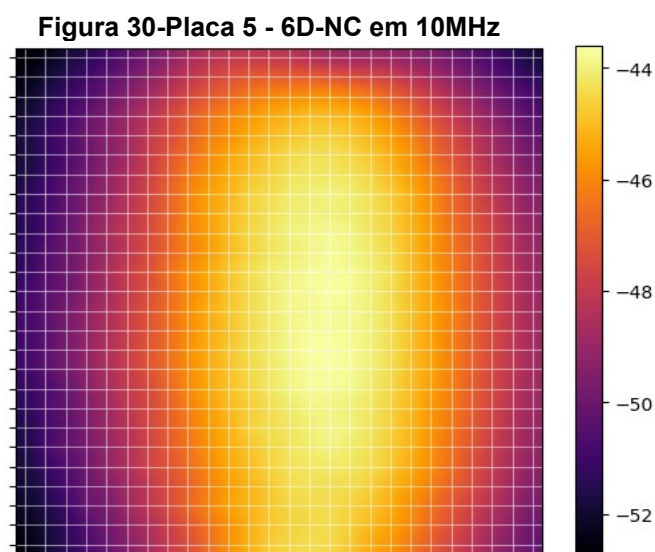
referência conectado continua exercendo um papel importante na contenção do campo próximo, contribuindo para a mitigação dos efeitos de crosstalk.

4.1.5 Placa 5

A Placa 5 corresponde à placa 6D-NC, que possui plano de referência, porém sem conexão elétrica com a referência do circuito. O espaçamento entre trilhas é de 6D. As Figuras 30 e 31 mostram os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2025).

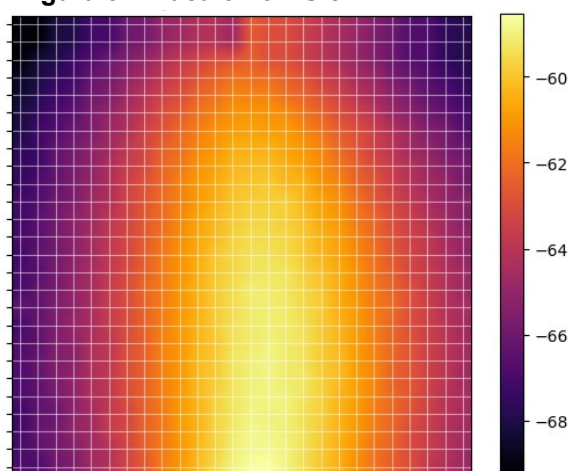


Em ambas as frequências analisadas, observa-se uma região central de maior intensidade do campo elétrico, com formato semelhante ao observado na placa com plano de referência conectado. No entanto, os níveis de intensidade do campo elétrico são ligeiramente mais elevados em toda a área de varredura, indicando que a ausência de conexão do plano reduz sua eficiência na contenção dos campos gerados pelas trilhas.

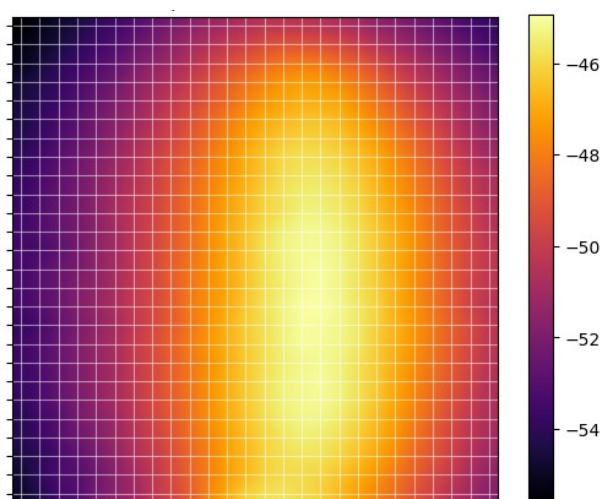
Com o aumento da frequência de 2 MHz para 10 MHz, ocorre uma intensificação geral da intensidade do campo elétrico, especialmente nas regiões próximas à trilha agressora. Ainda assim, o padrão de distribuição espacial do campo permanece semelhante, concentrando-se predominantemente na região central da placa, o que evidencia a influência do espaçamento entre trilhas na configuração do campo, mesmo na ausência de conexão elétrica do plano de referência.

4.1.6 Placa 6

A Placa 6 corresponde à placa 6D sem plano de referência. As Figuras 32 e 33 apresentam os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 31-Placa 6 - 6D-S em 2MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 32-Placa 6 - 6D-S em 10MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

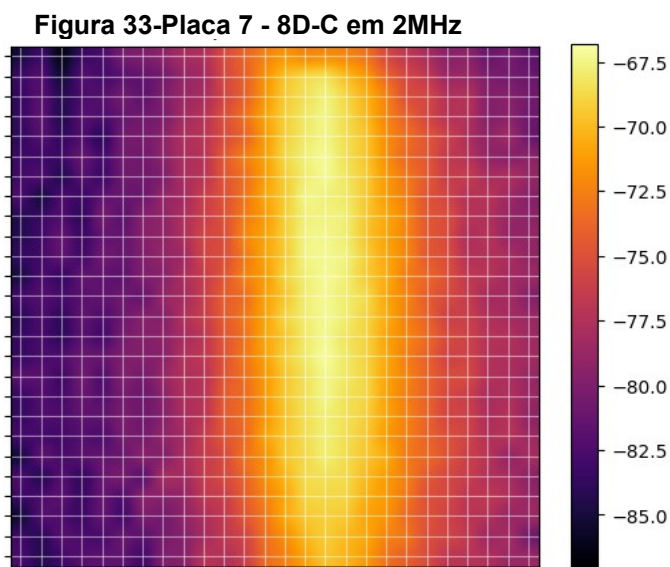
Em ambas as frequências analisadas, observa-se uma região de maior intensidade do campo elétrico concentrada na região central da placa, com redução gradual em direção às bordas. A ausência de um plano de referência contribui para que o campo elétrico se distribua de forma mais ampla e menos confinada sobre a superfície da placa, quando comparado aos casos com plano de referência.

Ao comparar os dois mapas, nota-se que o aumento da frequência para 10 MHz resulta em uma intensificação significativa da intensidade geral do campo elétrico, mantendo-se, entretanto, o mesmo formato de distribuição espacial. Esse comportamento evidencia que a ausência do plano de referência favorece a

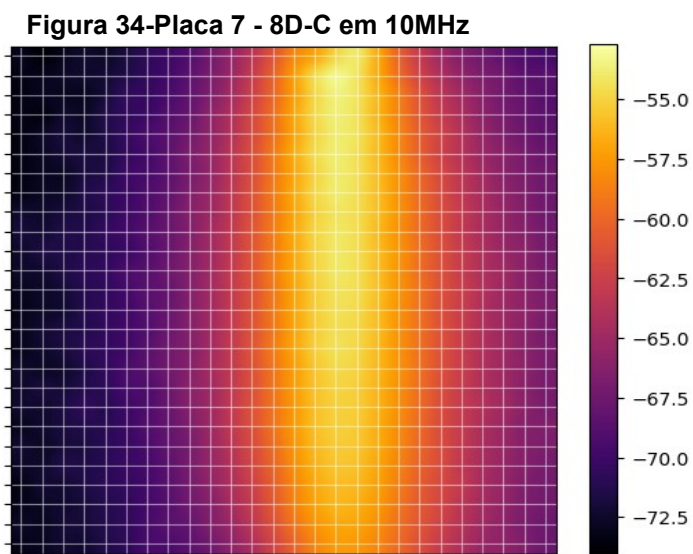
ampliação dos campos elétricos próximos às trilhas, criando condições mais propícias à ocorrência de crosstalk.

4.1.7 Placa 7

A Placa 7 corresponde à placa 8D-C, que possui o plano de referência conectado e espaçamento entre trilhas de 8D. As Figuras 34 e 35 apresentam os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2025).



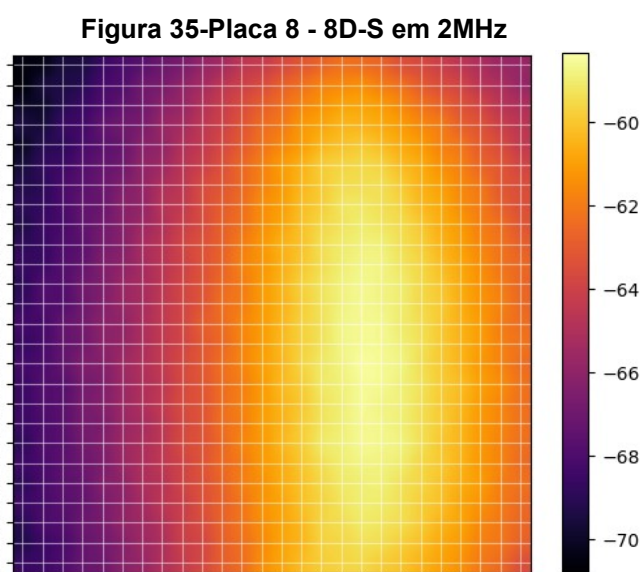
Fonte: Autoria própria (2025).

Nas duas frequências analisadas, observa-se que a intensidade do campo elétrico permanece concentrada na região central da placa, ao longo da trilha agressora, com redução gradual em direção às bordas. O formato da distribuição espacial do campo elétrico é bastante uniforme, o que evidencia a boa contenção do campo próximo proporcionada pela presença do plano de referência conectado.

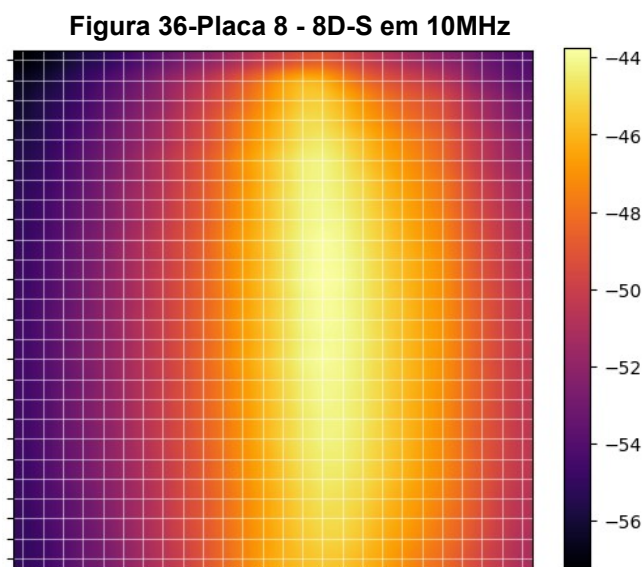
Ao comparar as frequências, nota-se que a intensidade do campo elétrico aumenta em 10 MHz, mantendo-se, entretanto, o mesmo padrão de distribuição espacial. Esse comportamento indica que, mesmo com o aumento da frequência, o plano de referência conectado continua exercendo papel relevante na contenção dos campos elétricos próximos às trilhas, contribuindo para a mitigação dos efeitos de crosstalk.

4.1.8 Placa 8

A Placa 8 corresponde à placa 8D-S, que não possui plano de referência. As Figuras 36 e 37 apresentam os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2025).



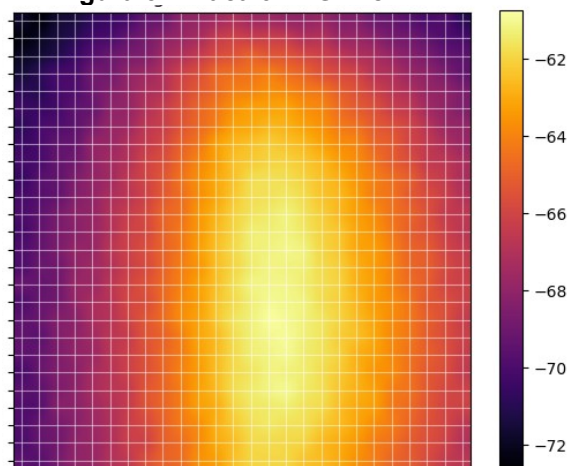
Fonte: Autoria própria (2025).

Em ambas as frequências analisadas, observa-se que a intensidade do campo elétrico é maior ao longo da região central da placa, diminuindo gradualmente em direção às bordas. O padrão de distribuição espacial do campo elétrico é semelhante ao observado nas demais placas, porém com níveis mais elevados de intensidade, em decorrência da ausência de um plano de referência que auxilie no retorno da corrente e na contenção dos campos gerados pelas trilhas.

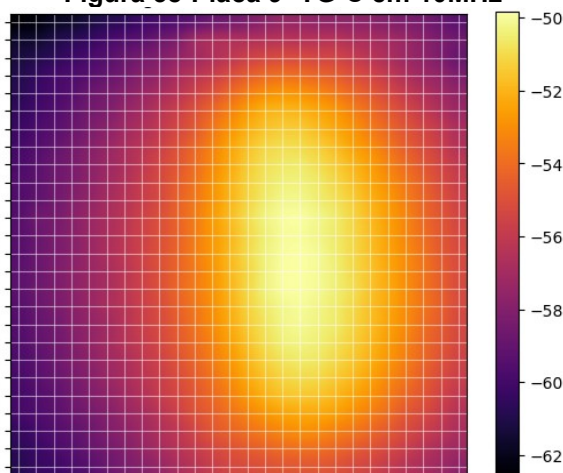
Com o aumento da frequência para 10 MHz, a intensidade geral do campo elétrico se eleva, mantendo-se o mesmo formato de distribuição espacial. Esse resultado evidencia que a ausência do plano de referência favorece a intensificação dos campos elétricos próximos às trilhas, especialmente em frequências mais elevadas, criando condições mais propícias à ocorrência de crosstalk.

4.1.9 Placa 9

A Placa 9 corresponde à placa TG-C, que possui uma trilha de guarda conectada entre a trilha agressora e a trilha vítima. As Figuras 38 e 39 apresentam os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 37-Placa 9 - TG-C em 2MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 38-Placa 9- TG-C em 10MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

Em ambas as frequências analisadas, observa-se que a intensidade do campo elétrico é maior a direita, ao longo da trilha agressora, diminuindo gradualmente em direção à borda esquerda. A presença da trilha de guarda conectada contribui para a redução da intensidade geral do campo elétrico, especialmente nas proximidades da trilha vítima, quando comparada às placas sem esse recurso.

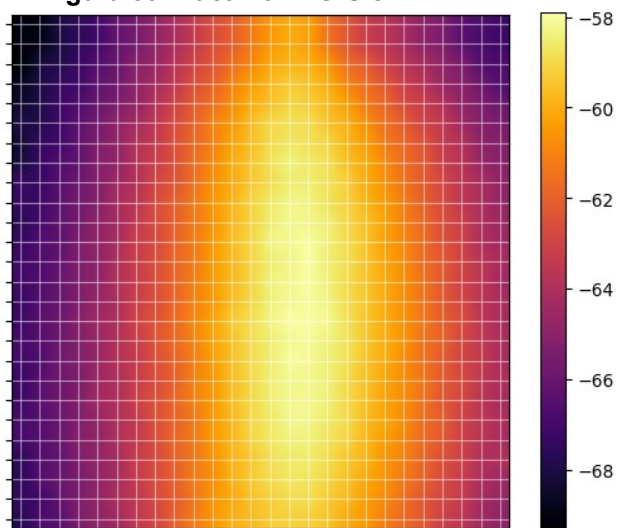
Com o aumento da frequência para 10 MHz, a intensidade do campo elétrico se eleva, mantendo-se o mesmo padrão de distribuição espacial. Ainda assim, a trilha de guarda conectada atua como um elemento que contribui para a atenuação

dos campos elétricos entre as trilhas, limitando sua propagação e, conseqüentemente, criando condições menos favoráveis à ocorrência de crosstalk.

4.1.10 Placa 10

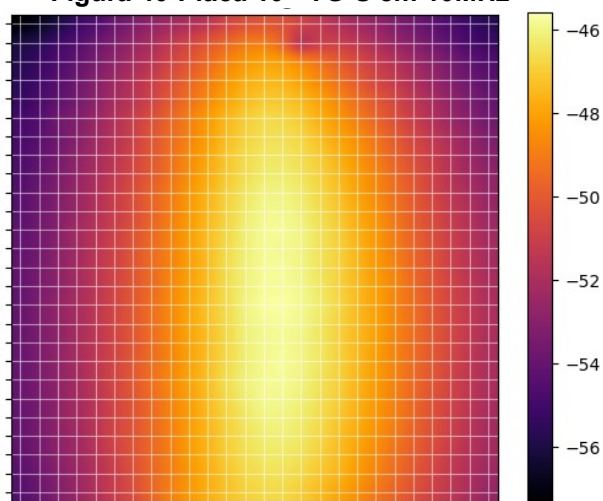
A Placa 10 corresponde à placa TG-S, que não possui trilha de guarda entre a trilha agressora e a trilha vítima. As Figuras 40 e 41 apresentam os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 39-Placa 10 - TG-S em 2MHz



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 40-Placa 10 - TG-S em 10MHz



Fonte: Autoria própria (2025).

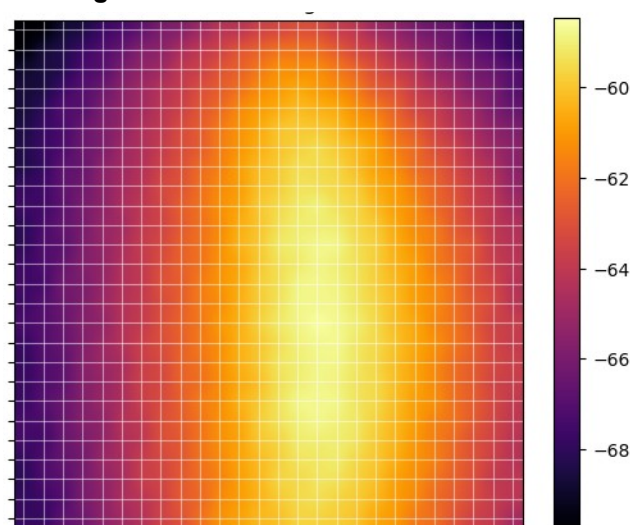
Na frequência de 2 MHz, observa-se uma intensidade do campo elétrico relativamente baixa em praticamente toda a área da placa, com uma pequena região de valores mais elevados localizada no canto superior esquerdo. Esse resultado indica uma baixa concentração de campo elétrico nas proximidades das trilhas nessa frequência.

Na frequência de 10 MHz, a intensidade do campo elétrico torna-se mais elevada e assume um padrão de distribuição característico, concentrando-se na região central da placa e diminuindo gradualmente em direção às bordas. Esse comportamento evidencia que o aumento da frequência está associado à intensificação dos campos elétricos próximos às trilhas, especialmente na ausência de elementos de mitigação, como a trilha de guarda, criando condições mais propícias à ocorrência de crosstalk.

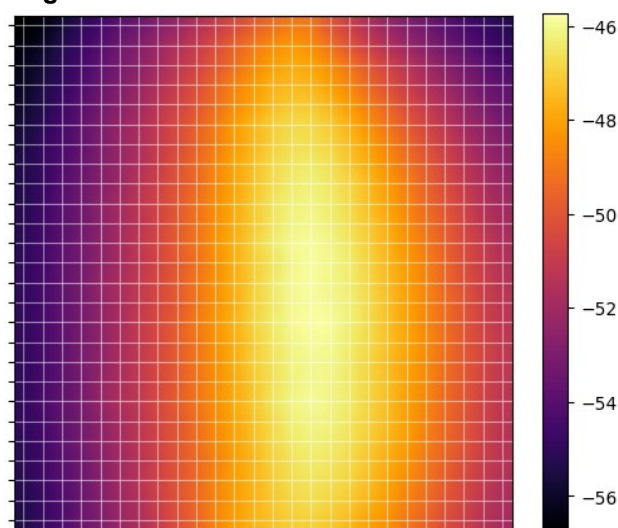
4.1.11 Placa 11

A Placa 11 corresponde à placa TG-NC, que possui uma trilha de guarda posicionada entre a trilha agressora e a trilha vítima, porém sem conexão elétrica com a referência do circuito. As Figuras 42 e 43 mostram os mapas de calor obtidos para as frequências de 2 MHz e 10 MHz, respectivamente.

Figura 41-Placa 11 - TG-NC em 2MHz



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 42-Placa 11 - TG-NC em 10MHz

Fonte: Autoria própria (2025).

Em ambas as frequências analisadas, observa-se que a intensidade do campo elétrico apresenta uma região de maior concentração no centro da placa, diminuindo gradualmente em direção às bordas. Esse comportamento é semelhante ao observado na placa com trilha de guarda conectada, porém com níveis mais elevados de intensidade do campo elétrico em toda a área de varredura.

O aumento da frequência para 10 MHz resulta em uma intensificação do campo elétrico, evidenciando a limitação da trilha de guarda quando não está eletricamente conectada à referência. Apesar da presença física da trilha, a ausência de conexão elétrica reduz sua capacidade de atenuar os campos elétricos entre as trilhas, criando condições mais propícias à ocorrência de crosstalk quando comparada ao caso da trilha de guarda conectada.

4.2 Comparação dos resultados

Para uma análise mais detalhada, foi realizada a comparação entre os resultados obtidos. As placas foram agrupadas de acordo com suas características, permitindo comparações diretas entre configurações equivalentes. Todas as comparações desta seção referem-se aos ensaios realizados na frequência de 10 MHz. Além disso, todas as figuras utilizam a mesma escala, garantindo consistência

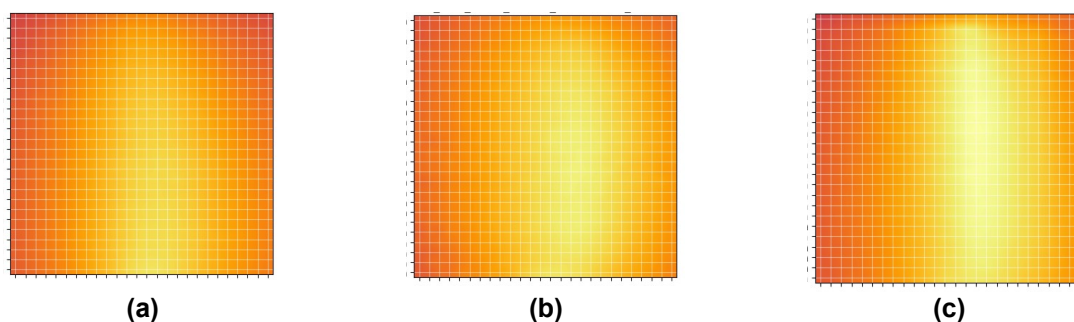
visual dos resultados e permitindo uma avaliação objetiva das diferenças entre as configurações analisadas.

4.2.1 Comparação entre placas D, 6D e 8D sem plano de referência

A Figura 44 apresenta a comparação entre as placas D, 6D e 8D na condição sem plano de referência, todas medidas na frequência de 10 MHz. Observa-se que o aumento do espaçamento entre as trilhas está associado a uma redução da influência dos campos elétricos provenientes da trilha agressora sobre a trilha vítima, o que pode ser analisado a partir da distribuição espacial e da concentração das regiões de maior intensidade nos mapas de calor.

Na placa D, que possui o menor espaçamento entre as trilhas, identifica-se uma região central bem definida e concentrada de maior intensidade do campo elétrico, evidenciando a forte influência da proximidade física entre a trilha agressora e a trilha vítima. Na placa 6D, essa região apresenta-se menos concentrada e mais dispersa, indicando uma redução da intensidade do campo elétrico nas proximidades da trilha vítima em função do aumento do espaçamento entre as trilhas.

Na placa 8D, embora o mapa de calor apresente áreas visualmente mais claras em determinadas regiões, é importante destacar que esse aspecto está relacionado à escala de cores e à distribuição espacial do campo elétrico, e não necessariamente a um aumento do acoplamento entre as trilhas. Observa-se que o campo elétrico encontra-se mais disperso e com menor concentração nas regiões críticas, especialmente próximas à trilha vítima, o que indica uma menor influência do campo gerado pela trilha agressora. Dessa forma, a análise conjunta da distribuição espacial e da intensidade do campo elétrico evidencia que o aumento do espaçamento entre trilhas contribui para a redução dos efeitos associados ao crosstalk, mesmo na ausência de um plano de referência.

Figura 44 - Placa D (a), 6D (b) e 8D (c) sem plano de referência

Fonte: Autoria própria (2025).

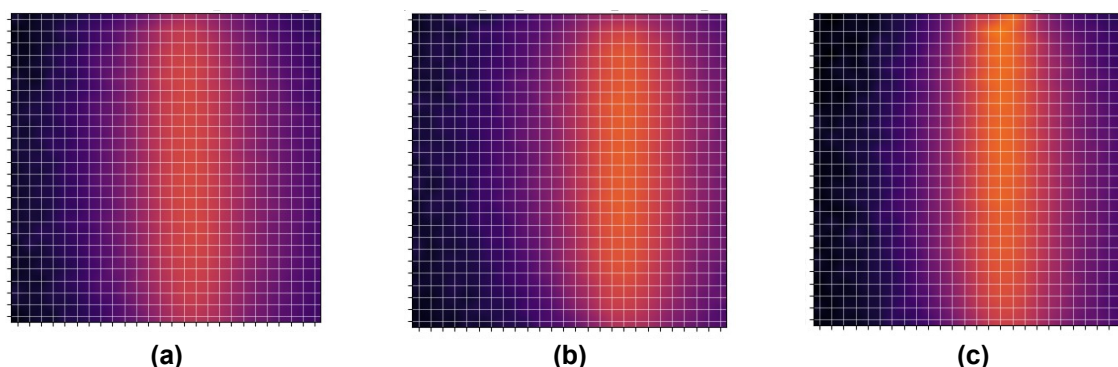
4.2.2 Comparação entre placas D, 6D e 8D com plano de referência conectado

A Figura 45 apresenta a comparação entre as placas D, 6D e 8D com o plano de referência conectado, todas medidas na frequência de 10 MHz. Nessa condição, observa-se uma redução geral da intensidade do campo elétrico em comparação às mesmas placas sem plano de referência, indicando que a presença do plano contribui para um retorno de corrente mais controlado e para a contenção dos campos próximos às trilhas.

Na placa D, mesmo com o plano de referência conectado, ainda se identifica uma região central de maior intensidade do campo elétrico devido ao pequeno espaçamento entre as trilhas, embora com valores inferiores aos observados na condição sem plano. Na placa 6D, a distribuição do campo elétrico apresenta-se mais espalhada e com níveis de intensidade reduzidos, evidenciando a influência do aumento do espaçamento aliado à presença do plano de referência.

Por fim, na placa 8D observa-se uma redução ainda mais significativa da concentração do campo elétrico nas regiões próximas à trilha vítima, resultando em um mapa de calor mais uniforme e com menores níveis de intensidade. Esse comportamento evidencia que a combinação entre maior espaçamento entre trilhas e plano de referência conectado é eficaz na contenção dos campos elétricos, criando condições menos favoráveis à ocorrência de crosstalk.

Figura 45- Placa D (a), 6D (b) e 8D (c) conectada com plano de referência



Fonte: Autoria própria (2025).

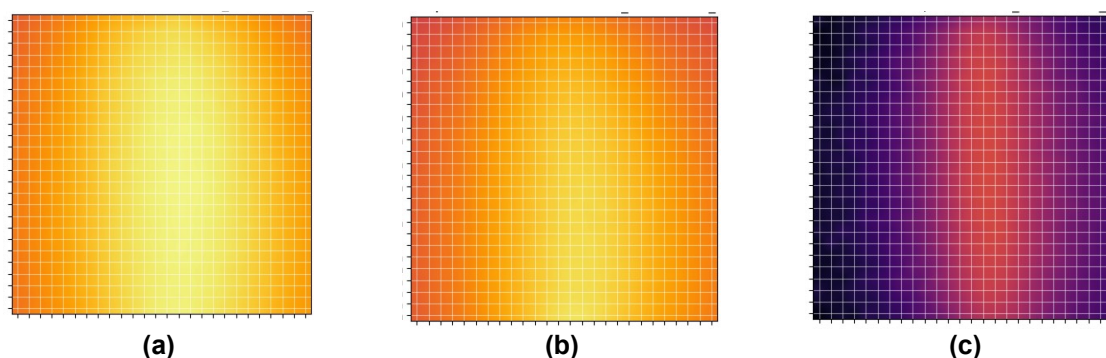
4.2.3 Comparação entre as placas D (conectada, não conectada e sem plano) na mesma escala

A Figura 46 apresenta a comparação da placa D em três condições distintas: com o plano de referência conectado, com o plano de referência não conectado e sem plano de referência. Todas as medições foram realizadas a 10 MHz e utilizando a mesma escala de amplitude, permitindo uma avaliação direta das diferenças entre os cenários.

Na condição sem plano de referência, observa-se a maior intensidade de campo acoplado, com uma região central mais ampla e brilhante, indicando um nível mais elevado de acoplamento entre as trilhas. Quando o plano está presente, mas não conectado, a distribuição do campo ainda apresenta amplitudes significativas, porém ligeiramente reduzidas em comparação ao caso sem plano. Já na configuração com o plano de referência conectado, nota-se uma diminuição expressiva da amplitude e uma distribuição mais uniforme do campo, refletindo uma condição de acoplamento menos intenso.

Essa comparação evidencia o impacto que o estado do plano de referência exerce especificamente sobre a placa D, permitindo identificar diferenças claras entre as três situações avaliadas.

Figura 46- Placa D não conectada com plano de referência (a), sem plano de referência (b) e conectada com plano de referência (c)



Fonte: Autoria própria (2025).

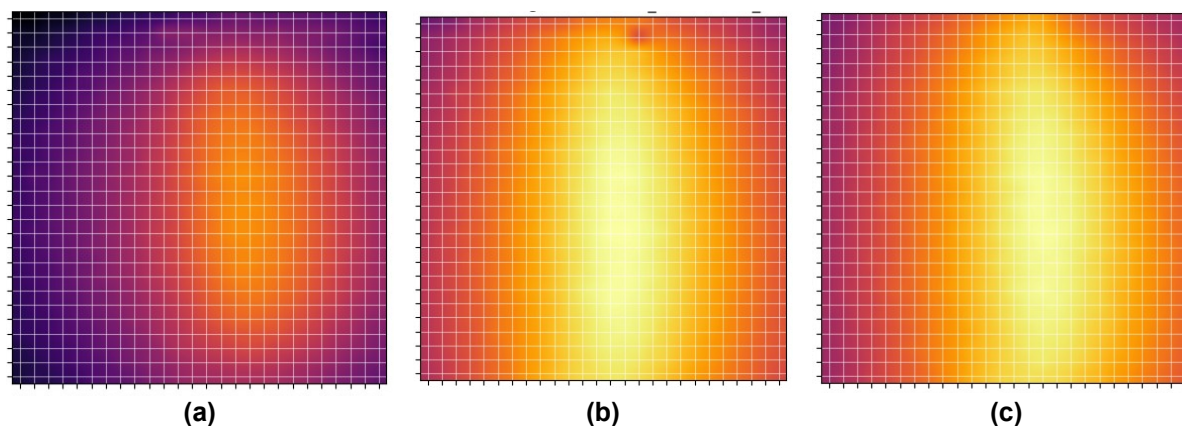
4.2.4 Comparação das placas com trilha de guarda

A Figura 47 apresenta a comparação entre três configurações de placa quanto ao uso da trilha de guarda: com trilha de guarda conectada (a), sem trilha de guarda (b) e com trilha de guarda não conectada (c). Todas as medições foram realizadas a 10 MHz e estão representadas na mesma escala de amplitude, permitindo uma análise direta do efeito de cada configuração sobre o acoplamento observado.

Na placa com trilha de guarda conectada (a), observa-se a menor intensidade de campo acoplado entre as três condições, com uma distribuição mais homogênea e amplitudes reduzidas ao longo da área varrida. Na configuração sem trilha de guarda (b), o campo apresenta uma região central mais intensa, indicando maior acoplamento entre as trilhas, já que não há nenhum elemento adicional atuando como barreira eletromagnética. Por fim, na condição com trilha de guarda não conectada (c), nota-se um comportamento intermediário: embora a presença física da trilha de guarda modifique a distribuição dos campos, sua eficácia é menor quando não está conectada ao plano de referência.

Essa comparação destaca de forma clara as diferenças entre as três configurações analisadas, evidenciando o impacto que a trilha de guarda, conectada ou não, exerce na distribuição do campo acoplado na placa.

Figura 47- Placa com trilha de guarda conectada (a), sem trilha de guarda(b) e com trilha de guarda não conectada(c)



Fonte: Autoria própria (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o fenômeno de crosstalk entre trilhas de placas de circuito impresso, integrando conceitos teóricos consolidados com medições realizadas por meio de um rastreador automático de campo próximo. Essa abordagem permitiu visualizar de forma clara como diferentes configurações físicas influenciam o acoplamento eletromagnético entre trilhas.

Os resultados mostraram que a disposição das trilhas exerce influência direta sobre o nível de crosstalk. Observou-se que menores espaçamentos entre condutores resultam em regiões de maior intensidade nos mapas de calor, indicando acoplamento mais forte entre a trilha agressora e a trilha vítima. À medida que o espaçamento foi ampliado para as configurações 6D e 8D, verificou-se uma redução consistente das amplitudes medidas, confirmando o comportamento amplamente descrito.

Outro ponto de destaque foi o papel do plano de referência. Quando conectado, o plano contribuiu de forma significativa para o confinamento dos campos e para a redução do acoplamento, independentemente do espaçamento adotado. Nas situações em que o plano estava presente, porém não conectado, a redução do acoplamento foi apenas parcial, e na ausência total de plano o campo

apresentou maior propagação e intensidades mais elevadas. Esses resultados reforçam a importância do caminho de retorno da corrente para o controle dos campos próximos.

A análise das placas com trilha de guarda também evidenciou diferenças relevantes. A trilha de guarda conectada reduziu perceptivelmente o acoplamento entre as trilhas, enquanto a versão não conectada apresentou desempenho inferior, demonstrando que sua eficácia depende diretamente de estar referenciada adequadamente ao plano. Dessa forma, ficou evidente que a simples presença física da trilha não é suficiente para mitigar o crosstalk.

De modo geral, os resultados obtidos confirmam que práticas de projeto como o aumento do espaçamento entre trilhas, o uso adequado de planos de referência e a implementação correta de trilhas de guarda contribuem de maneira efetiva para reduzir o acoplamento indesejado entre condutores. Além disso, a utilização do rastreador de campo próximo demonstrou-se um recurso eficiente para observar o comportamento dos campos próximos e permitiu compreender, de maneira visual e comparativa, os efeitos das diferentes configurações analisadas.

Assim, este trabalho contribui para o entendimento prático do crosstalk em placas de circuito impresso, evidenciando a relação entre parâmetros físicos da placa e o comportamento eletromagnético observado. Os resultados apresentados servem como referência para a aplicação de boas práticas de projeto e para a continuidade de estudos experimentais voltados à melhoria da integridade de sinal e da compatibilidade eletromagnética em sistemas eletrônicos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, uma possibilidade relevante é a realização de novos ensaios em outros modelos de PCBs em frequências mais elevadas do que as utilizadas neste trabalho, de modo a avaliar como o efeito do crosstalk se comporta nessas condições.

Outra sugestão é a utilização do software EMCOS Studio para análise de *crosstalk* em placas de circuito impresso. Nessa perspectiva, propõe-se comparar os resultados obtidos com o rastreador automático de campo próximo às simulações das mesmas placas modeladas no ambiente do software. Essa abordagem permitiria validar os modelos de simulação, refinar a interpretação dos mapas de campo e ampliar a compreensão dos mecanismos de acoplamento presentes nas diferentes configurações avaliadas.

REFERÊNCIAS

- ARMSTRONG, Keith. **EMC for Systems and Installations**. Newnes, 2010.
- BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 4. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- BOGATIN, Eric. **Signal and Power Integrity – Simplified**. 3rd ed. Pearson, 2023.
- CLAYTON, Paul R. **Electromagnetic Compatibility Engineering**. Wiley, 2009.
- FERRARI, Giuseppe; CANAVERO, Flavio. **Electromagnetic Compatibility in Integrated Circuits**. Springer, 2015.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- HARDIN, Robert. **PCB Design for Real-World EMI Control**. Prentice Hall, 1997.
- ISHIKAWA, Akira. **Electromagnetic Compatibility Design of High-Speed Digital Circuits**. Wiley, 2015.
- JOHNSON, Howard W.; GRAHAM, Martin. **High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic**. Prentice Hall, 1993.
- KIM, Dae Hyun et al. **Effects of Return Current Discontinuities on High-Speed Digital Signal Integrity**. IEEE Transactions on Advanced Packaging, v. 27, n. 3, p. 398–406, 2004.
- LIZ, L. **Compatibilidade Eletromagnética**, 1999.

MONTROSE, M. I. **Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: A Handbook for Designers**. 2nd ed. New York: IEEE Press/Wiley-Interscience, 2000.

MORRISON, R. **Grounding and Shielding: Circuits and Interference**. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2007.

OTT, Henry W. **Electromagnetic Compatibility Engineering**. Wiley, 2009.

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.

SERPA, F.; BEZERRA, A. **Trabalho de TCC sobre Crosstalk**, 2022.

THIERAUF, Stephen C. **High-Speed Circuit Board Signal Integrity**. Artech House, 2004.

WADDELL, Brian C. **Transmission Line Design Handbook**. Artech House, 1991.

WILLY, Ralph. **Electromagnetic Interference and Compatibility**. CRC Press, 2004.

LUIZ, A. **SISTEMA AUTOMÁTICO DE RASTREAMENTO DE CAMPO PRÓXIMO**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Santa Catarina. 2022.