

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

LUIZ FERNANDO ASSIS SENE

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO
UTILIZANDO O SOFTWARE EMCOS STUDIO**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

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

LUIZ FERNANDO ASSIS SENE

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO
UTILIZANDO O SOFTWARE EMCOS STUDIO**

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 em Engenharia Eletrônica.

Orientador:
Prof. Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Sene, Luiz Fernando Assis Sene
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO
UTILIZANDO O SOFTWARE EMCOS STUDIO / Luiz Fernando Assis Sene
Sene; orientação de Luis Carlos Martinhago Schlichting
Schlichting. - Florianópolis, SC, 2025.
84 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. EMCOS Studio. I. Schlichting, Luis Carlos Martinhago
Schlichting. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
III. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO
IMPRESSO UTILIZANDO O SOFTWARE EMCOS STUDIO.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO O SOFTWARE EMCOS STUDIO

LUIZ FERNANDO ASSIS SENE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em 2025 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de março 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ CARLOS MARTINHAGO SCHLICHTING**
Data: 08/04/2025 17:15:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.

Documento assinado digitalmente
 **MAURO TAVARES PERACA**
Data: 09/04/2025 07:50:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Mauro Tavares Peraça, Dr.



Assinado digitalmente por REGINALDO
STEINBACH:03922601901
Localização: Campus Florianópolis -
IFSC
Data: 2025.04.08 17:43:48-03'00'

Prof. Reginaldo Steinbach, Me.

Dedico este trabalho a minha vó, Adaíla.

AGRADECIMENTOS

Agraço ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), aos professores e a todos os trabalhadores envolvidos.

Aos membros da banca por aceitarem o convite.

Ao meu orientador, Dr. Luis Carlos Martinhago Schlichting, por seu suporte, incentivo e compreensão, que foram tão necessários não somente para a conclusão deste trabalho, mas para minha vida.

A toda minha família. Em especial a minha vó Adaíla, minha mãe Andreia, minha tia Liane e meu Pai Atila, por todo suporte e inabalável crença em mim.

Aos meus irmãos e meu sobrinho, por serem minha motivação.

Por fim agradeço ao meu Vô, Luiz Manoel, pelo exemplo que foi em vida.

RESUMO

A constante miniaturização de componentes eletrônicos e o aumento das frequências em que estes devem operar são um dos principais responsáveis para os problemas de compatibilidade eletromagnética. O efeito de *crosstalk* gerado pela influência de uma trilha sobre outra pode levar a comportamentos indesejáveis de todo o sistema. Como este efeito está relacionado a campos eletromagnéticos sua detecção pode ser um desafio em fases finais de um projeto. Este trabalho, portanto, visa analisar como utilizar o *software* EMCoS Studio para a modelagem e simulação de placas de circuito impresso. Para tanto foram modelados e simulados 3 modelos de placas similares, em função do uso de um plano de referência para mitigar efeitos de *crosstalk* e 3 modelos tendo como base a técnica de trilha de guarda. O objetivo dessas simulações foi verificar o campo elétrico irradiado. Todas essas placas tiveram o campo elétrico de suas correspondentes físicas medidas através de um rastreador de campo próximo. De forma a verificar os resultados, tanto os simulados quanto os práticos, foram analisados pelos mapas de calor gerados. Os resultados obtidos confirmam pelo comportamento dos mapas de calor, a viabilidade do uso do software.

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

ABSTRACT

The constant miniaturization of electronic components and the increase in the frequencies at which they must operate are among the main factors responsible for electromagnetic compatibility issues. The crosstalk effect, caused by the influence of one trace on another, can lead to undesirable behaviors throughout the system. Since this effect is related to electromagnetic fields, its detection can be a challenge in the final stages of a project. Therefore, this work aims to analyze how to use the EMCoS Studio software for the modeling and simulation of printed circuit boards. For this purpose, three similar board models were modeled and simulated, considering the use of a reference plane to mitigate crosstalk effects, and three models based on the guard trace technique. The objective of these simulations was to assess the radiated electric field. All these boards had the electric field of their physical counterparts measured using a near-field scanner. To verify the results, both simulated and practical, they were analyzed through the generated heat maps. The results confirm, through the behavior of the heat maps, the viability of using the software. .

Keywords: Electromagnetic compatibility. *Crosstalk*. EMCoS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas de campo de duas partículas com cargas iguais.....	20
Figura 2 – Linhas de campo de em uma trilha de PCI.....	23
Figura 3 – A compatibilidade eletromagnética segundo Liz.....	24
Figura 4 – Categorização da Compatibilidade Eletromagnética.....	26
Figura 5 – Escolhendo tipo de projeto.....	31
Figura 6 – Definindo variáveis.....	32
Figura 7 – Utilizando um plano.....	32
Figura 8 – Construindo o dielétrico.....	33
Figura 9 – Utilizando a ferramenta <i>Line</i>	33
Figura 10 – Utilizando o <i>Strip</i>	34
Figura 11 – Ligando <i>line</i> e <i>plate</i>	34
Figura 12 – Utilizando <i>Union</i>	35
Figura 13 – Criando uma superfície fina.....	35
Figura 14 – Propriedades da superfície fina.....	36
Figura 15 – Criando um substrato dielétrico finito.....	36
Figura 16 – Propriedades do substrato dielétrico finito.....	37
Figura 17 – Definindo fio e fonte.....	37
Figura 18 – Área de campo próximo.....	38
Figura 19 – Ativando o Ground.....	38
Figura 20 – Definindo o espaço livre como ar.....	39
Figura 21 – Definindo os parâmetros de <i>Task</i>	39
Figura 22 – Interface SimDat.....	40
Figura 23 – Estrutura do Rastreador.....	41
Figura 24 – Interface do Software de controle.....	42
Figura 25 – Interface do software comparador.....	42
Figura 26 – Pocket VNA.....	43
Figura 27 – Amplificador.....	43
Figura 28 – Setup para medições em 400kHz.....	44
Figura 29 – Setup para medições em 1GHz.....	45
Figura 30 – Placa e suporte.....	45
Figura 31 – Modelo de placa utilizada.....	46
Figura 32 – Placa 1 modelos A, B e C.....	47
Figura 33 – Esquemático dos modelos da placa 1.....	48

Figura 34 – Placa 2 modelo A e B.....	48
Figura 35 – Placa 2 modelo C.....	49
Figura 36 – Esquemático dos modelos da Placa 2.....	49
Figura 37 – Placa 1 A em 400kHz.....	51
Figura 38 – Placa 1 A em 1GHz.....	51
Figura 39 – Placa 1 A em 400kHz simulado.....	52
Figura 40 – Linhas de campo da Placa 1 A em 400kHz simulado.....	53
Figura 41 – Placa 1 A em 1GHz simulado.....	53
Figura 42 – Linhas de campo da Placa 1 A em 1GHz simulado.....	54
Figura 43– Placa 1 B em 400kHz.....	54
Figura 44– Placa 1 B em 1GHz.....	55
Figura 45– Placa 1 B em 400kHz simulado.....	55
Figura 46– Linhas de campo da Placa 1 B em 400kHz.....	56
Figura 47– Placa 1 B em 1GHz simulado.....	56
Figura 48– Linhas de campo Placa 1 B em 1GHz simulado.....	57
Figura 49– Placa 1 C em 400kHz.....	57
Figura 50– Placa 1 C em 1GHz.....	58
Figura 51– Placa 1 C em 400KHz simulado.....	59
Figura 52– Linhas de campo da Placa 1 C em 400KHz simulado.....	59
Figura 53– Placa 1 C em 1GHz simulado.....	60
Figura 54– Linhas de campo da Placa 1 C em 1GHz simulado.....	60
Figura 55– Placa 2 modelo A em 400KHz.....	61
Figura 56– Placa 2 modelo A em 1GHz.....	62
Figura 57– Placa 2 modelo A em 400kHz simulado.....	62
Figura 58– Linhas de campo da Placa 2 modelo A em 400kHz simulado.....	63
Figura 59– Placa 2 modelo A em 1GHz simulado.....	63
Figura 60– Linhas de campo da Placa 2 modelo A em 1GHz simulado.....	64
Figura 61– Placa 2 modelo B em 400KHz.....	64
Figura 62– Placa 2 modelo B em 1GHz.....	65
Figura 63– Placa 2 modelo B em 400kHz simulado.....	65
Figura 64– Linhas de campo da Placa 2 modelo B em 400kHz simulado.....	66
Figura 65– Placa 2 modelo B em 1GHz simulado.....	66
Figura 66 – Linhas de campo da Placa 2 modelo B em 1GHz simulado.....	67
Figura 67 – Placa 2 modelo C em 400kHz.....	67
Figura 68 – Placa 2 modelo C em 1GHz.....	68

Figura 69– Placa 2 modelo C em 400kHz simulado.....	68
Figura 70– Linhas de campo da Placa 2 modelo C em 400kHz simulado.....	69
Figura 71 – Placa 2 modelo C em 1GHz simulado.....	69
Figura 72 – Linhas de campo da Placa 2 modelo C em 1GHz simulado.....	70
Figura 73– Placa 1 A, B e C na mesma escala (400kHz).....	72
Figura 74– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 1 (400kHz).....	72
Figura 75– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 2 (400kHz).....	72
Figura 76– Placa 1 A, B e C na mesma escala (1GHz).....	74
Figura 77– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 1 (1GHz).....	74
Figura 78– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 2 (1GHz).....	74
Figura 79– Placa 2 modelos A, B e C (400kHz).....	77
Figura 80– Placa 2 modelos A, B e C (400kHz simulado 1).....	77
Figura 81– Placa 2 modelos A, B e C (400kHz simulado 2).....	77
Figura 82– Placa 2 modelos A, B e C (1GHz).....	79
Figura 83– Placa 2 modelos A, B e C (1GHz simulado 1).....	79
Figura 84 – Placa 2 modelos A, B e C (1GHz simulado 2).....	79
Figura 85 – Placa 1 A e Placa 2 A (400kHz).....	80
Figura 86 – Placa 1 A e Placa 2 A (1GHz).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limite de emissão para equipamentos classe A.....	28
Tabela 2 – Limite de emissão para equipamentos classe B.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CISPR	<i>Comite International Special des Perturbations Radioelectriques</i> (Comitê Internacional Especial de Rádio Interferência)
EMC	Electromagnetic Compatibility (Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	Electromagnetic <i>Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
GRF	Grupo de Reelaboração do Ensino de Física
IEM	Interferência Eletromagnética
MAS	<i>Method of Auxiliary Sources</i>
MOM	<i>Method of Moments</i>
MTL	<i>Transmission Line Methods</i>
PCI	Placa de circuito impresso
VHF	<i>Very High Frequency</i> (Frequência Muito Alta)
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> (Analisador Vetorial de Redes)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Justificativa.....	16
1.2	Definição do Problema.....	16
1.3	Objetivo Geral.....	17
1.4	Objetivos Específicos.....	17
1.5	Estrutura do Trabalho.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Campo Elétrico.....	18
2.2	Campo Magnético.....	19
2.3	Placas de circuito impresso.....	20
2.3.1	Integridade de sinal.....	21
2.3.1.1	<i>Crosstalk.....</i>	<i>22</i>
2.4	Compatibilidade Eletromagnética.....	23
2.4.1	Interferência Eletromagnética.....	25
2.4.1.1	<i>Interferência Conduzida.....</i>	<i>26</i>
2.4.1.2	<i>Interferência Radiada.....</i>	<i>26</i>
2.4.2	Normas.....	27
2.5	EMCoS Studio 2020.....	29
2.5.1	Métodos de simulação.....	30
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	EMCoS Studio 2020.....	31
3.2	Equipamentos utilizados em bancada.....	40
3.2.1	Rastreador Automático de Campo Próximo.....	40
3.2.2	Pocket VNA.....	42
3.2.3	LNA9037BAT.....	43
3.3	Setup para medições.....	43
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	46
4.1	Desenvolvimento.....	48
4.1.1	Resultados obtidos na placa 1.....	48
4.1.1.1	<i>Placa 1 modelo A em bancada.....</i>	<i>49</i>
4.1.1.2	<i>Placa 1 modelo A simulado.....</i>	<i>50</i>
4.1.1.3	<i>Placa 1 modelo B em bancada.....</i>	<i>52</i>
4.1.1.4	<i>Placa 1 modelo B simulado.....</i>	<i>53</i>
4.1.1.5	<i>Placa 1 modelo C em bancada.....</i>	<i>56</i>
4.1.1.6	<i>Placa 1 modelo C simulado.....</i>	<i>57</i>
4.1.2	Resultados obtidos na Placa 2.....	59
4.1.2.1	<i>Placa 2 modelo A em bancada.....</i>	<i>59</i>
4.1.2.2	<i>Placa 2 modelo A simulado.....</i>	<i>60</i>
4.1.2.3	<i>Placa 2 modelo B.....</i>	<i>63</i>
4.1.2.4	<i>Placa 2 modelo B em bancada.....</i>	<i>63</i>
4.1.2.5	<i>Placa 2 modelo B simulado.....</i>	<i>64</i>
4.1.2.6	<i>Placa 2 modelo C em bancada.....</i>	<i>66</i>
4.1.2.7	<i>Placa 2 modelo C simulado.....</i>	<i>67</i>
4.2	Análise e comparação.....	69
4.2.1	Análise e comparação da placa 1.....	69

4.2.2	Análise e comparação da Placa 2.....	73
4.2.3	Diferença entre placa 1 e 2 sem referência.....	78
4.2.4	Diferenças entre 400kHz e 1GHz.....	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	81

1 INTRODUÇÃO

Um bom projeto se inicia com um bom planejamento. De acordo com Moreira (2013), é na fase de planejamento de um projeto onde seus objetivos são definidos, bem como prazos para implementação, recursos necessários, custos e lucratividade.

Pensando nos desafios ao se planejar um projeto eletrônico, podemos levar em conta os efeitos eletromagnéticos inerentes à natureza da eletrônica. Sobre o eletromagnetismo Nussenzveig (2018) diz que com a descoberta do efeito magnético da corrente e a constatação do fenômeno da indução eletromagnética, por Faraday, foi possível para Maxwell prever o efeito de simetria entre os campos elétricos e magnéticos.

Esta simetria pode se tornar um problema quando analisamos pelo ponto de vista da Compatibilidade Eletromagnética.” A Compatibilidade Eletromagnética está relacionada com a geração, transmissão e recepção da energia eletromagnética.” (Liz, 1999, p.4).

Um problema comum neste campo é o de *crosstalk*. Serpa e Bezerra (2022) definem o *crosstalk* como o resultado do acoplamento, tanto indutivo quanto capacitivo, que ocorre devido à proximidade entre dois ou mais condutores. Este efeito pode, portanto, levar à perda da integridade do sinal.

A interferência causada por efeitos eletromagnéticos pode levar a resultados inesperados quando ocorre a implementação do projeto. Dessa forma uma das práticas que podem auxiliar na prevenção desses efeitos ou mesmo nas correções seria visualizar o comportamento dos campos elétricos e magnéticos no objeto de estudo.

Pensando nisso, este trabalho pretende utilizar o *software* **EMCoS** para observar os efeitos dos campos elétricos e magnéticos nas trilhas condutoras em placas de circuito integrado e como seu impacto pode interferir na integridade do sinal. Para isso, simulações das placas em questão foram feitas no *software* e confrontadas frente aos resultados práticos.

1.1 Justificativa

De acordo com Paul (2006), a interferência nos sinais em sistemas eletrônicos é cada vez mais preocupante, e cabe a área da compatibilidade eletromagnética evitar que a resposta do sistema eletrônico seja comprometida ou alterada pelo acoplamento não intencional de um sinal do sistema.

Entretanto o conceito de eletromagnetismo pode ser de difícil compreensão. As leis do eletromagnetismo estão relacionadas com grandezas vetoriais e campos de força, esses vetores campos dependem, portanto, de sua localização no espaço, em termos de coordenadas x , y e z e variam em relação ao tempo. (Paul, 2006).

Algumas vezes no estudo da Física muitas vezes se faz necessário "ver com os olhos da mente", seja visualizando um evento, explorando mentalmente uma figura ou comparando representações mentais pictóricas, ou seja, pensar em imagens (Pereira, 2011, p. 22).

Tendo isto em mente, o uso de ferramentas visuais pode auxiliar em muito compreender a natureza dos fenômenos eletromagnéticos e seu comportamento no objeto de estudo.

Este trabalho, portanto, busca demonstrar de forma visual os efeitos dos campos eletromagnéticos nas trilhas de PCBs e sua correspondência no mundo real, objetivando auxiliar na compreensão e resolução de problemas desta natureza.

1.2 Definição do Problema

Uma forma de analisar e estudar problemas de compatibilidade eletromagnética é observar como o sistema se comporta no que se refere a esta área. Para isto, é possível utilizarmos de simulações em softwares para termos uma ideia de como o circuito se comportará.

Porém uma simulação mal feita, ou um software inadequado pode levar a erros sistemáticos, prejudicando o andamento do projeto e uma incorreta

interpretação do seu funcionamento. É possível modelar, simular e analisar o *crosstalk* utilizando o software EMCoS?

1.3 Objetivo Geral

Modelar e simular placas de circuito impresso no *software* **EMCoS** e analisar o comportamento dos campos elétricos resultantes das simulações.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral se destacam os seguintes objetivos:

- a) Fundamentar os conhecimentos sobre os efeitos da interferência eletromagnética em circuitos através do estudo teórico;
- b) Compreender a quais interferências eletromagnéticas podem estar sujeitas uma PCI;
- c) Entender como utilizar o *software* **EMCoS** para modelar as PCIs de forma que se tornem próximas às utilizadas na bancada, tanto em *layout* quanto em relação aos materiais que as compõem;
- d) Analisar e compreender como o software oferece os resultados das suas simulações;
- e) Realizar em bancada o mesmo circuito utilizado na simulação;
- f) Comparar os resultados obtidos na simulação na e prática, a fim de averiguar a eficácia do software e dos modelos utilizados.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é exposto o problema e como ele será abordado ao longo dos próximos capítulos.

A revisão bibliográfica é apresentada no segundo capítulo. O objetivo deste capítulo é demonstrar uma base sólida de conhecimentos adquiridos por literatura

para que o problema possa ser analisado, e uma metodologia definida para abordagem da questão.

No terceiro capítulo é exposto a metodologia utilizada para atingir o objetivo proposto, descrevendo métodos, equipamentos e práticas. Em seguida, no quarto capítulo, são demonstrados os resultados obtidos pela metodologia descrita anteriormente. É apresentado também uma análise do significado desses resultados, tendo como base os conhecimentos obtidos nas partes anteriores, de forma a compreender se o objetivo descrito no capítulo um foi atingindo.

No quinto e último capítulo é apresentado um panorama sobre o problema exposto e se o trabalho pode cumprir seu objetivo, são também propostas algumas ideias para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A longo deste capítulo abordaremos os principais temas relacionados a este trabalho. Inicialmente apresentaremos os principais conceitos teóricos relacionados aos campos elétricos e magnéticos. A seguir discorreremos sobre placas de circuito impresso. Por fim serão expostos temas como integridade de sinal, efeito *crosstalk* e compatibilidade eletromagnética.

2.1 Campo Elétrico

Segundo GREF (2005) o campo elétrico pode ser pensando como uma região ao redor de uma carga elétrica onde essa carga pode exercer sua influência.

Essa relação pode ser descrita pela seguinte equação:

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

Onde:

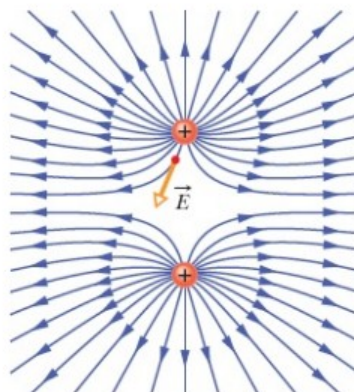
E = campo elétrico em determinado ponto no espaço (N/C)

F = força eletrostática que está atuando em uma carga de teste (N)

q = carga de teste (C)

Uma forma comum de visualizar o campo elétrico é imaginar que ele é formado por linhas de força chamadas linhas do campo elétrico. Sobre isso Halliday, Resnick e Walker (2006) dizem que esse método de compreensão da força do campo elétrico, embora não possua valor físico real segue como um método conveniente de visualizar este conceito. A figura 1 fornece uma visualização deste conceito de linhas de campo.

Figura 1 – Linhas de campo de duas partículas com cargas iguais



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

2.2 Campo Magnético

Quando uma corrente elétrica passa por um condutor, este tem suas propriedades alteradas, gerando na região ao seu redor um campo magnético, o mesmo campo também pode ser observado em matérias com propriedades magnéticas, como ímãs. (Oliveira e Santos, 2015).

Siqueira (2021) aponta que foi Maxwell que observou que o campo elétrico ao atravessar uma superfície condutora gera uma variação de fluxo elétrico e essa variação de fluxo elétrico por sua vez induz um campo magnético na superfície em questão.

Pela equação de Maxwell o campo magnético pode ser definido da seguinte forma:

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

Onde:

B = campo magnético (N.s/C)

μ_0 = permeabilidade no espaço livre

J = densidade de corrente (A/m²)

ϵ_0 = permissividade no espaço livre

E = campo elétrico (N/C)

2.3 Placas de circuito impresso

Placas de circuito impresso são componentes comuns na eletrônica. Segundo Melo, Rios e Gutierrez (2001) se trata de um componente básico largamente utilizado em toda a indústria eletrônica, é formada por uma placa ou cartão que servem como base para que o cobre seja depositado formando uma trilha. De acordo com o autor o objetivo é que a placa se comporte como um isolante (dielétrico) enquanto as trilhas por sua vez, devem conectar eletricamente os componentes dispostos na placa.

Uma PCI é uma estrutura dielétrica cujo objetivo é fornecer uma base para que componentes mecanicamente suportados e interconexões estejam eletricamente conectados. (MONTROSE, 2000).

Ainda sobre os componentes de uma PCI Montrose (2000) aponta que os materiais utilizados na placa se tornam parte do circuito, podendo influenciar comprimento, largura e espaçamento dos traços. Lembra ainda que em frequências altas, acima de 500MHz, as dimensões das linhas de transmissão influenciam no comportamento do circuito, logo no seu desempenho, pois os traços de sinais passam a apresentar resistência, capacitância e indutância.

Um método comum de fabricação de PCI é descrito por Melo, Rios e Gutierrez (2001):

O processo mais utilizado para a obtenção de uma PCI, conhecido como “subtrativo”, tem como ponto de partida um laminado, que sofre prensagem com uma folha de cobre sobre uma ou ambas as faces, conforme se pretenda obter uma placa de simples ou dupla face. Na sequência, é feita a limpeza química do cobre, que recebe uma camada de material sensível à luz ultravioleta, conhecido como photo resist. Em seguida, procede-se à deposição de um filme que reproduz a morfologia do circuito desejado, sendo que o mesmo é exposto à luz ultravioleta (revelação fotográfica) (Melo, Rios e Gutierrez, 2001, p.116).

Em relação a disposição das trilhas na placa, Thieruf (2004) afirma que elas podem estar acima da superfície da placa, recebendo a denominação *microstrip*, ou envolta pelo material isolante do qual é formada a placa, sendo então denominada *stripline*.

2.3.1 Integridade de sinal

A integridade de sinal está relacionada com a qualidade do mesmo, ou seja, a capacidade dele de manter suas características, ao sair do emissor, quando o receptor o recebe, sem perdas ou degradações. Segundo Paul (2006) a integridade de sinal está relacionada com a garantia de que a forma de onda se mantenha igual ou próxima no receptor ao que era no emissor, sendo crítico que esse sinal não seja corrompido pela linha de transmissão.

De acordo com Pinho *et al.* (2025) quando um circuito digital é submetido a frequências da ordem de MHz as trilhas passam a se comportar como antenas, gerando problemas de compatibilidade eletromagnética de dois tipos, integridade de sinal e irradiação eletromagnética. Alguns fatores podem contribuir para este efeito como a topologia e o comprimento da trilha e o tempo de subida e descida do sinal.

Estes fatores podem levar o sinal a ter diversos problemas, entre eles o de *crosstalk*. Podendo por fim, afetar o pleno funcionamento do equipamento (PINHO *et al.*, 2025).

Para Caniggia e Maradei (2008) as principais preocupações em termos de integridade de sinal são:

- Reflexões ocorridas devido a descontinuidades nas interconexões
- Ruído induzido por conexões vizinhas (*crosstalk*)
- Ruído produzidos pela comutação de dispositivos digitais

Para estes autores, se estes problemas não forem mitigados podem levar a um mal funcionamento do sistema.

2.3.1.1 *Crosstalk*

Caniggia e Maradei (2008) definem o *crosstalk* como o acoplamento eletromagnético entre trilhas paralelas, ocorrido devido à alta velocidade de comutação dos componentes e a alta densidade de trilhas.

Para Bogatin (2018) quando uma rede carrega um sinal uma parte de sua tensão ou corrente pode passar para uma rede adjacente, mesmo que o sinal na primeira se mantenha íntegro, ele pode aparecer como ruído na segunda.

Sobre este tema, quando relacionado a trilhas paralelas Montrose (1999) acredita que a maior preocupação em relação a *crosstalk* é prevenir que o ruído elétrico na trilha geradora causa uma interferência prejudicial a trilha vítima.

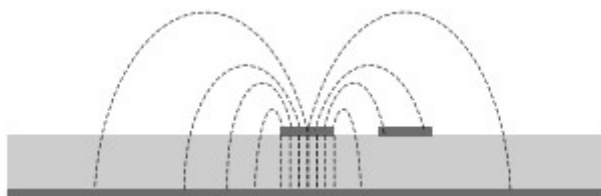
Dois tipos de ambientes podem levar a ocorrência de *crosstalk*. Quando as interconexões são linhas de transmissão uniformes, como é comum placas de circuito impresso, e quando não o são, como em conectores e componentes eletrônicos encapsulados (BOGATIN, 2010).

Quando um sinal se propaga por uma trilha gera campos eletromagnéticos que não estão contidos pelo meio transmissor e pelo seu retorno. Podendo desta forma afetar outros meios de transmissão e conseqüentemente o sinal deste meio. (BOGATIN, 2010).

A figura 2 é uma representação em desenho das linhas de força do campo e propagação pelo ambiente.

Por fim Bogatin (2010) sugere que a melhor forma de minimizar o *crosstalk* é oferecendo a corrente de retorno um caminho plano, uniforme e grande, qualquer caminho diferente deste resulta em um aumento do ruído entre as trilhas.

Figura 2 – Linhas de campo de em uma trilha de PCI



Fonte: Adaptado de Bogatin (2018)

2.4 Compatibilidade Eletromagnética

O tema EMC mostra sua relevância quando paramos para analisar o quanto o mundo de hoje é dependente de equipamentos eletrônicos, desde

dispositivos cotidianos como televisões e *smartphones* ao controle de satélites. Como visto nas seções anteriores, devido à natureza de seu funcionamento, estes equipamentos não apenas geram campos eletromagnéticos, mas também sofrem interferências desses campos, logo para o pleno funcionamento de um equipamento eletrônico é necessário que o mesmo não sofra interferências de nenhum tipo, pois podem gerar resultados inesperados no seu funcionamento.

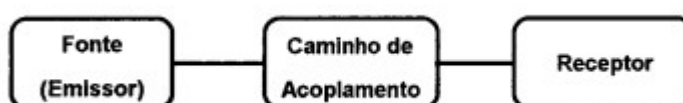
Sobre o tema EMC Soares (2013) nos diz que apenas quando o sistema ou equipamento é imune a sinais do ambiente que possam interferir em seu funcionamento e quando também não é causa de interferência eletromagnética em outros dispositivos no mesmo ambiente é que podemos dizer que o mesmo é eletromagneticamente compatível.

Paul (2006) define um sistema como eletromagneticamente compatível quando os seguintes critérios são satisfeitos:

- Não causar interferência em outros sistemas.
- Não é susceptível as emissões de outros sistemas.
- Não causa interferência em si mesmo.

Para Liz (1999) a Compatibilidade Eletromagnética está associada a geração, transmissão e recepção de energia eletromagnética, no sentido que uma fonte produz uma emissão, e um caminho de acoplamento transfere a energia do emissor para o receptor, se esta energia altera o comportamento do receptor levando a um resultado não desejado, é dito que ocorreu uma interferência eletromagnética no mesmo, ainda que esta seja de forma não intencional. A figura 3 é uma representação gráfica da relação entre essas entidades.

Figura 3 – A compatibilidade eletromagnética segundo Liz



Fonte: Liz (1999, p.4).

Por fim, Liz (1999) sugere três formas de evitar essa interferência, sendo elas:

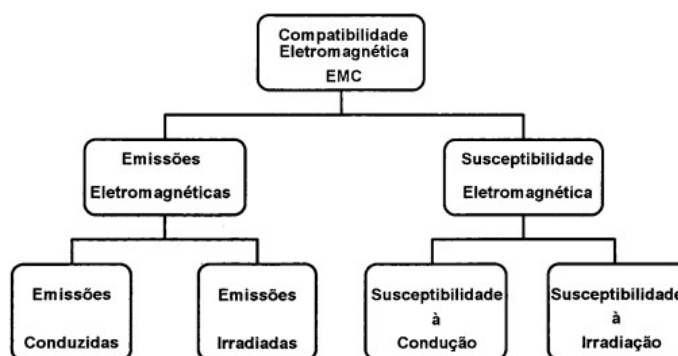
- Tornar o caminho de acoplamento o mais ineficiente possível.
- Tornar o receptor menos suscetível a energia emitida pelas fontes emissoras.
- Reduzir as emissões da fonte de emissão.

2.4.1 Interferência Eletromagnética

Segundo Sanches (2014) fatores como menor potência e aumento da velocidade do *clock* de sistemas digitais aumentam a exposição do equipamento em relação a interferência eletromagnética. Sobre este tema ainda o autor diz que o equipamento fica mais vulnerável especialmente em relação a outros aparelhos que irradiem frequências superiores a faixa de VHF (30MHz a 300MHz), pois estão relacionados com transições na ordem de nanossegundos, o que leva a placa de circuito impresso a apresentar um comportamento similar ao de uma antena, transmitindo e recebendo ruído.

Sobre interferências que ocorrem em sistemas embarcados Benfica (2007) nos diz que essas interações devem ser abordadas do ponto de vista elétrico e eletromagnético de forma a garantir que essas interações não prejudiquem o funcionamento de nenhum componente. Diz ainda que, podemos então categorizar essa interferência por dois pontos de vista, o da emissão e o da suscetibilidade a interferência, sendo ainda que cada ponto de vista pode ser abordado pelo seu caráter elétrico e eletromagnético. Considerando que o caráter elétrico se refere a energia conduzida e o eletromagnético a energia irradiada, podemos visualizar essa divisão conforme a imagem abaixo:

Figura 4 – Categorização da Compatibilidade Eletromagnética



Fonte: Liz (1999, p. 4).

2.4.1.1 Interferência Conduzida

Uma IEM é dita de forma conduzida quando ocorre por meio da condução, ou seja, sua energia é propagada por um meio metálico ou por elementos parasitas. Essa condução pode ocorrer de forma proposital, por uma trilha em uma PCI ou acidental, como resultado de um acoplamento capacitivo. Devido a este caráter reduzir sua emissão é difícil, pois envolve saber todos os caminhos que o ruído (onda eletromagnética) pode tomar. Portanto é necessário saber o comportamento de todos componentes quando sujeitos a altas frequências, bem como o impacto do *layout* da placa de circuito impresso nessa condução, entre outros fatores. (SCHLICHTING, 2003).

2.4.1.2 Interferência Radiada

Correntes elétricas ao “circularem” pelos elementos do sistema, como trilhas e terminais de componentes semicondutores em *loops*, ou seja, em caminhos fechados, acabam por gerar campos eletromagnéticos, por sua vez estes campos podem interagir com o sistema através de meios não metálicos, como o ar. A este tipo de IEM chamamos de interferência radiada. Prevenir ou minimizar estas interferências, assim como na conduzida, não é tarefa fácil, pois estes efeitos dependem de fatores como o comportamento eletromagnético dos materiais envolvidos no sistema, desde seus componentes até os que os cercam. (SCHLICHTING, 2003).

2.4.2 Normas

Para garantir que todos os equipamentos apresentem compatibilidade eletromagnética foram criadas normas para sua manufatura de forma a garantir que diversos dispositivos em um mesmo ambiente possam existir sem interferir um no outro. Sobre este tema Bittar e Raizer (2005) nos dizem que um produto atinge a compatibilidade eletromagnética quando opera em um ambiente sem interferir em outros no mesmo local, e sem se deixar ser interferido também. Sobre este tema ainda afirmam que existem diversos critérios de normas, cabendo a cada país decidir qual adotará.

Para Liz (2003) existem basicamente dois tipos de normas:

- Normas impostas por órgãos governamentais.
- Normas ditadas pelo fabricante.

Um equipamento em conformidade com normas de agências governamentais significa que ele possui suas emissões e sua suscetibilidade em conformidade com a referida norma. Ao passo que as normas ditadas pelo próprio fabricante buscam garantir um produto confiável e com qualidade. (LIZ, 2003).

Bittar e Raizer (2005) apontam ainda que no Brasil não há um órgão global responsável por apenas por CEM, porém a CEM é um item cobrado por órgãos regulamentadores de qualquer área onde a compatibilidade eletromagnética é relevante. Salientam também que estes testes são obrigatórios apenas para itens sob a regulamentação da ANATEL e da ANVISA.

No Brasil o ato nº1120 de 19 de fevereiro de 2018 em seu art. 1º aprova os requisitos técnicos para CEM para avaliar dispositivos de telecomunicação.

De acordo com a ANATEL (2018) alguns fundamentos normativos internacionais são utilizados como base para sua avaliação técnica. Para medir a emissão de ruídos é utilizado a CISPR22, para emissões de equipamentos industriais, científicos e médicos a CISPR11. Em relação a emissão ainda, ela define os equipamentos em duas classes:

4.1.5. Equipamento classe A: equipamento com características próprias para instalação em estações de telecomunicações. Estes equipamentos podem causar problemas de radiointerferência se instalados em ambientes ou áreas residenciais. (ANATEL, 2018).

4.1.6. Equipamento classe B: equipamento destinado ao uso em ambiente doméstico ou residencial com características próprias para as instalações do usuário, para a instalação em redes de acesso ou para situações de local não fixo de uso (exemplos: equipamento portátil alimentado por baterias). Estes equipamentos podem ser utilizados em estações de telecomunicações. (ANATEL, 2018).

Apresenta também limites para emissões a partir da porta de energia elétrica do dispositivo, de acordo com a classe de equipamento. Na tabela 1 podemos verificar os limites para equipamentos classe A.

Tabela 1 – Limite de emissão para equipamentos classe A

Emissão	Frequência MHz	Limite de quase pico dB(μ V)	Limite medio dB(μ V)
Conduzida	0,15 a 0,50	79	66
	0,50 a 30	73	60
Radiada	30 a 230	40	
	230 a 1000	47	

Fonte: Adaptado de ANATEL (2018).

Na tabela 2 estão expostos os limites para equipamentos classe B

Tabela 2 – Limite de emissão para equipamentos classe B

Emissão	Frequência MHz	Limite de quase pico dB(μ V)	Limite medio dB(μ V)
Conduzida	0,15 a 0,50	66 a 56 (decrece linearmente com o logaritmo da frequência)	56 a 46 (decrece linearmente com o logaritmo da frequência)
	0,50 a 5	56	46
	5 a 30	60	50
Radiada	30 a 230	40	30
	230 a 1000	47	37

Fonte: Adaptado de ANATEL (2018).

Por fim, a respeito da imunidade a perturbações eletromagnéticas, a ANATEL se baseia na CISPR24 para definir as qualificações técnicas, limites e métodos para sua norma.

2.5 EMCoS Studio 2020

O EMCoS Studio é um software desenvolvido especialmente para engenheiro que precisam lidar com problemas EMC em grandes projetos como automóveis, aviões e sistemas de computador. Sua abordagem de desenvolvimento hierárquica envolve vários métodos de simulação até agora isolados, preenchendo as lacunas entre eles, aumentando a eficácia de seus resultados. Para tanto o EMCoS oferece suporte para toda a cadeia de desenvolvimento, fornecendo ajuda para os conceitos iniciais do projeto, simulações de testes de bancada e cálculo do comportamento do projeto como um todo. No campo de EMI possui recursos sofisticados para o cálculo de antenas. (EMCoS, 2025)

Este programa permite modelar de forma rápida problemas de EMC e com sua interface gráfica, resolve-os com precisão. (EMCoS, 2025).

Ainda de acordo com o fabricante, estes são alguns dos exemplos de sua aplicação:

- Problemas de radiação e EMC de sistemas de fios complexos.
- Problemas de acoplamentos de cabos.
- Modelagem de PCB em ambientes complexos.
- Recursos de teste de bancada para EMI e imunidade.
- Simulações de veículos híbridos e elétricos.
- Soluções para exposição humana a baixas frequências.

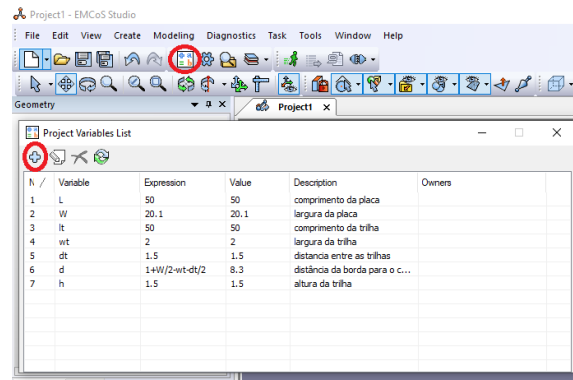
2.5.1 Métodos de simulação

Segundo o fabricante, é utilizado o método de circuito equivalente de elementos parciais (PEEC 3D), para o cálculo de *Crosstalk*, interferência eletromagnética e imunidade contra campos eletromagnéticos. Outros métodos de análise computacional também são utilizados como:

- Método dos momentos (MoM).
- Método das fontes auxiliares (MAS).
- Métodos de linhas de transmissão (TLM).
- Análise de Rede (SPICE; PSPICE; HSPICE; LTspice; ELDO; SIMetrix; TSReady).

Na figura 6 são criadas variáveis para o para os parâmetros globais do projeto.

Figura 6 – Definindo variáveis

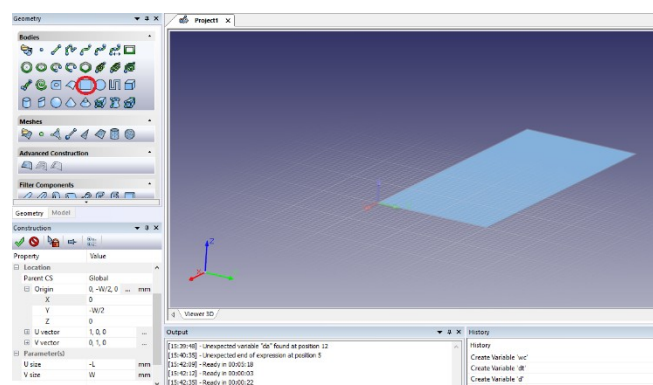


Fonte: Elaboração própria (2025).

Os círculos vermelhos demonstram por onde acessar a tabela de variáveis e dentro desta tabela por onde adicioná-las. Como também se pode observar é possível utilizar expressões no lugar de valores já fixos. Em relação a unidade, é a mesma para todo projeto, podendo ser definida nas opções, neste caso está em milímetros.

Este programa possui um sistema de modelagem 3d, permitindo que se crie de forma muito próxima a real, o objeto de estudo. Para tanto são oferecidas algumas ferramentas, na figura 7 temos um exemplo de como criar um plano para ser utilizado como referência.

Figura 7 – Utilizando um plano



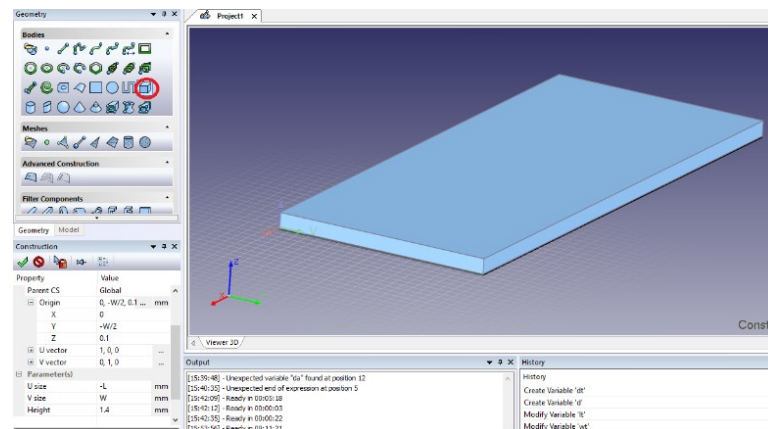
Fonte: Elaboração própria (2025).

No campo *Bodies* existem diversas opções de modelos geométricos para serem usados, para este caso foi selecionado o *Plate*, conforme destacado na

imagem. Uma vez escolhido pode-se definir o tamanho livremente na área de projetos, ou utilizando a aba *Construction*, definir pontos iniciais e tamanhos.

A seguir o dielétrico da PCI será modelado. No campo *Bodies* será escolhido o *Box*, que será feito utilizando as mesmas variáveis e pontos iniciais do anterior, com o acréscimo de que agora será levado em conta a altura do *Plate* criado e a sua própria, conforme exemplificado pela figura 8.

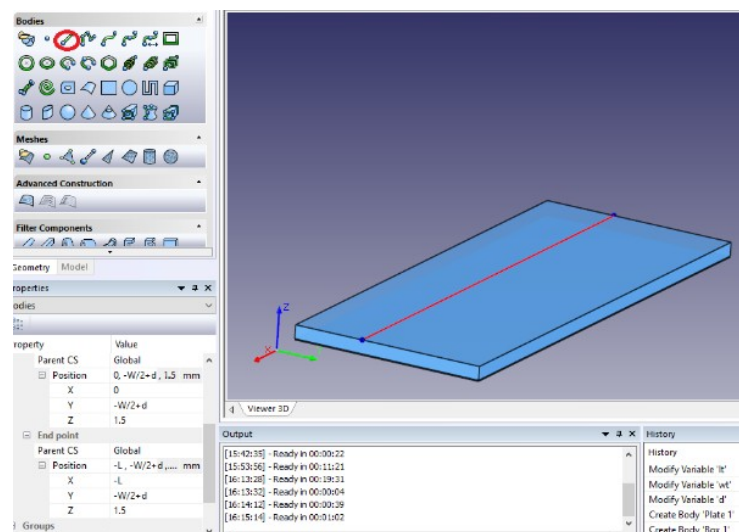
Figura 8 – Construindo o dielétrico



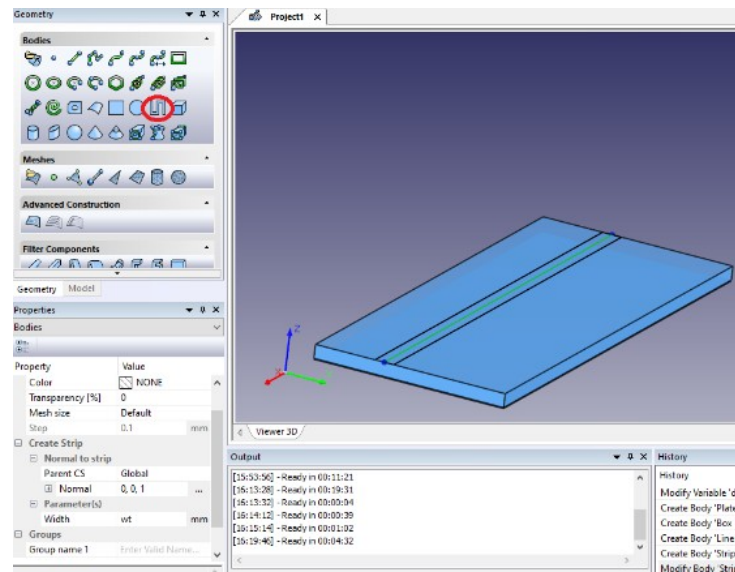
Fonte: Elaboração própria (2025).

Para finalizar a etapa de modelagem é necessário criar as trilhas. Primeiramente será utilizado a ferramenta *Line* para marcar onde a trilha estará e nela será adicionado o modelo *Strip*, formando assim uma trilha, como pode ser visto nas figuras 9 e 10.

Figura 9 – Utilizando a ferramenta *Line*



Fonte: Elaboração própria (2025).

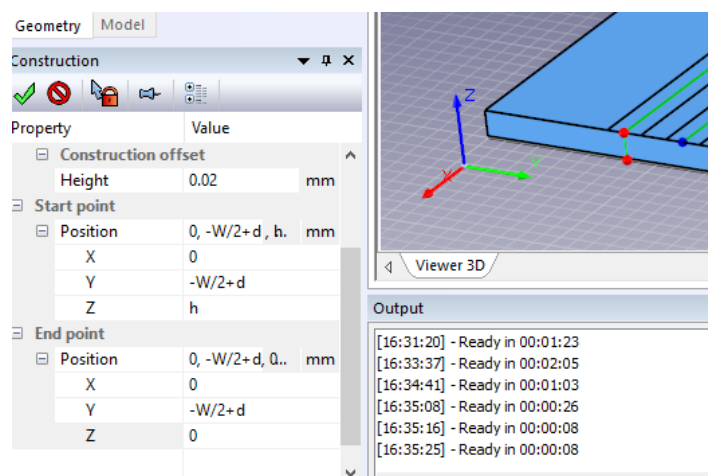
Figura 10 – Utilizando o *Strip*

Fonte: Elaboração própria (2025).

A largura da trilha é definida nas propriedades do *Strip*, no parâmetro *Width*.

O mesmo procedimento será feito para adicionar uma segunda trilha, distante 1.5mm da primeira.

Por fim utilizaremos a ferramenta *Line* mais uma vez para ligar uma das linhas já marcadas ao *Plate* feito inicialmente, ligando o que será uma trilha a sua futura referência, como exibido na figura 11.

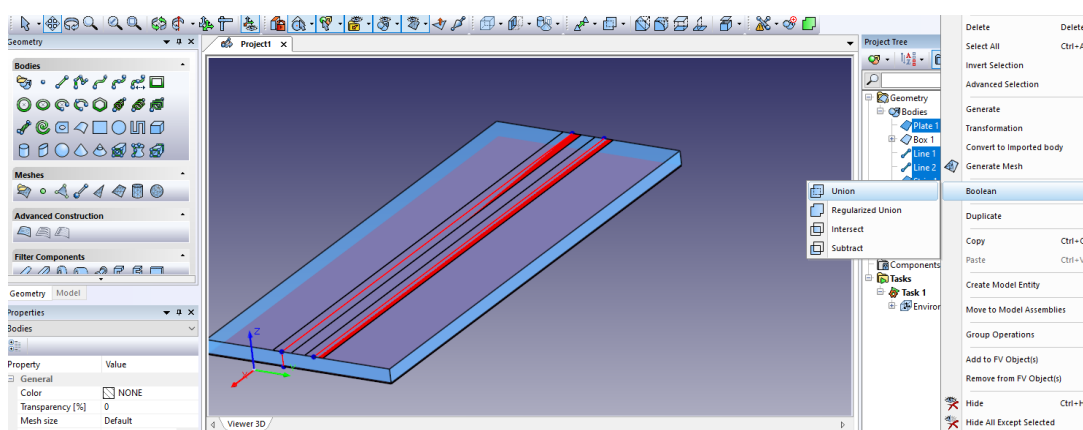
Figura 11 – Ligando *line* e *plate*

Fonte: Elaboração própria (2025).

Neste momento do projeto, já temos o modelo da PCI, porém ela existe ainda apenas como um desenho. Nas etapas seguintes daremos propriedades a cada um dos modelos, de forma que esse desenho em 3d se aproxime de uma placa do mundo real, em termos de características e comportamentos.

Em *Project Tree* temos listados todas as entidades do nosso modelo. Considerando que trilhas e referência são feitas do mesmo material, iremos inicialmente unir suas entidades, *Plate*, *Strip* e *Line* em uma entidade apenas, a fim de facilitar a atribuição das características do cobre. Isso será feito utilizando a ferramenta *Union*, este processo pode ser visto na figura 12.

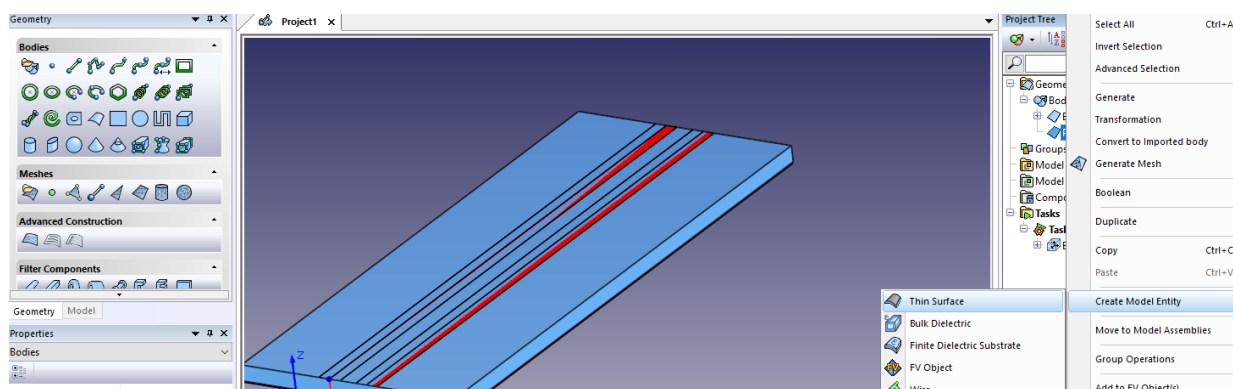
Figura 12 – Utilizando *Union*



Fonte: Elaboração própria (2025).

Da união de todas essas entidades nasceu uma entidade apenas chamada *Plate 1*. Nela será atribuído as propriedades de uma superfície fina composta de cobre, como é possível observar na figura 13. Dessa forma teremos as trilhas e a referência.

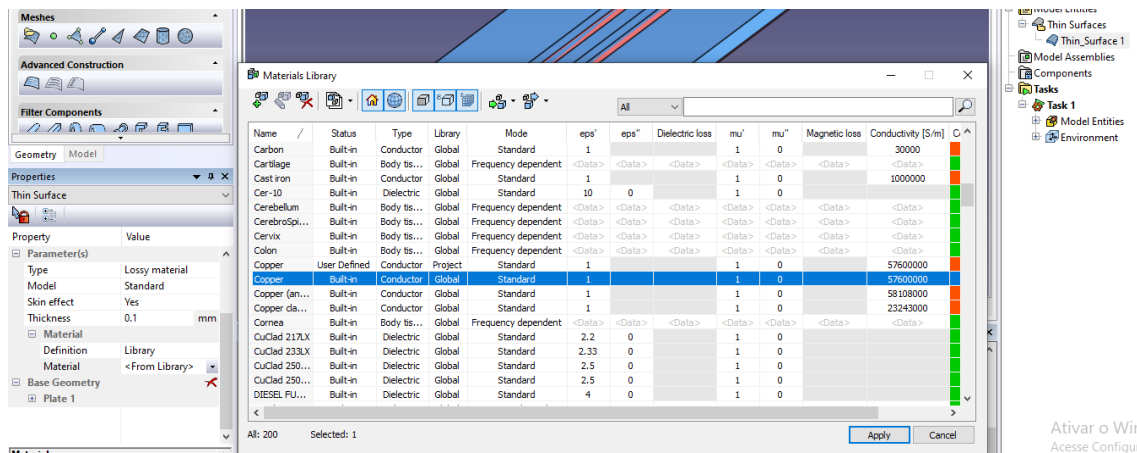
Figura 13 – Criando uma superfície fina



Fonte: Elaboração própria (2025).

Nas propriedades da nova entidade chamada *Thin_Surface 1* é onde essa superfície recebe características importantes. Nessas propriedades seu material é definido como do tipo que perde energia, como visto abaixo seu parâmetro *Type* como *Lossy Material*. E dentro da biblioteca disponibilizada pelo software, entre as diversas opções de material é escolhido o cobre, no inglês, *cooper*, todo esse processo pode ser visto na figura 14.

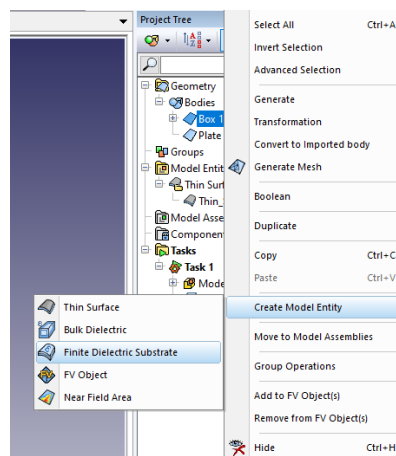
Figura 14 – Propriedades da superfície fina



Fonte: Elaboração própria (2025).

A seguir atribuiremos a entidade *Box* as particularidades do dielétrico, no caso será o FR-4, de acordo com a figura 15. Entretanto ao invés de se tornar uma superfície fina, se tornara um substrato dielétrico finito.

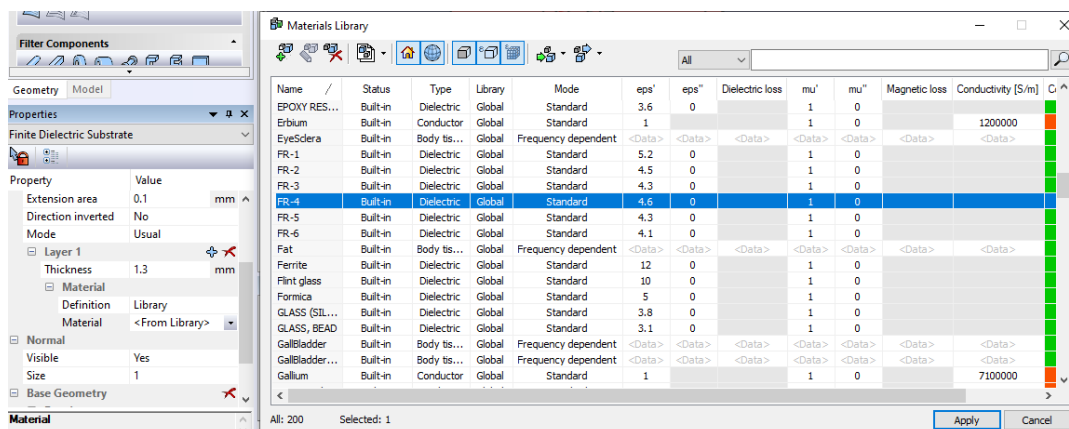
Figura 15 – Criando um substrato dielétrico finito



Fonte: Elaboração própria (2025).

Na figura 16, de forma semelhante ao feito para o cobre, atribuiremos ao dielétrico as propriedades do FR-4 que constam na biblioteca do software.

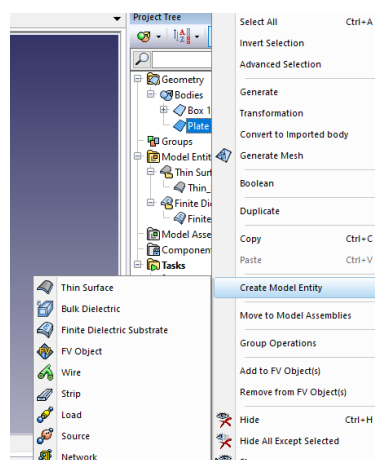
Figura 16 – Propriedades do substrato dielétrico finito



Fonte: Elaboração própria (2025).

Por fim, para finalizar o modelo é necessário transformar a linha feita anteriormente para ligar a trilha ao plano de referência em um fio de fato, e adicionar uma fonte a esse fio, para estimular o sistema. Como essa linha agora faz parte da entidade *Plate 1* será nesse objeto que tanto um fio será criado, quanto uma fonte. As duas opções podem ser visualizadas na mesma aba na figura 17, respectivamente *wire* e *source*. Nenhuma alteração foi realizada nas propriedades do fio. A fonte é de 1V de amplitude com uma impedância de alimentação interna de 50Ω.

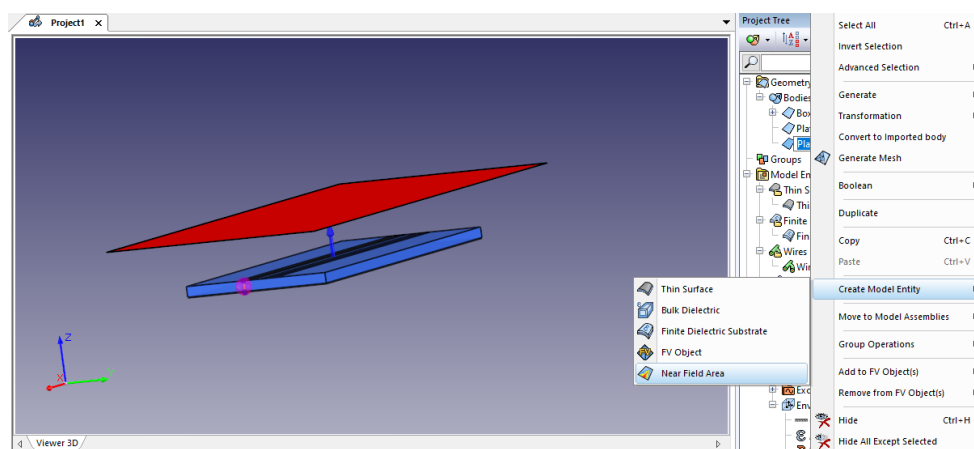
Figura 17 – Definindo fio e fonte



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a finalização da modelagem do objeto, foi criado um plano como base para uma área de campo próximo. Este plano tem como objetivo agir como uma antena, sua criação é semelhante ao plano de referência, entretanto, neste caso, foi feito maior que o objeto de estudo e acima dele, de forma a captar o comportamento do campo para além da placa. Na figura 18 é possível observar esse novo plano e como defini-lo como uma área de campo próximo.

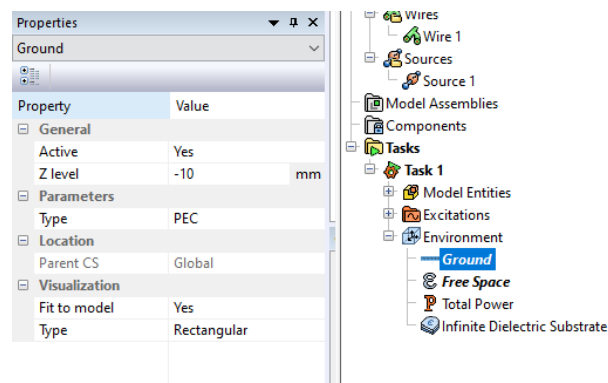
Figura 18 –Área de campo próximo



Fonte: Elaboração própria (2025).

Uma vez que o objeto está modelado e a antena posicionada, falta cuidar dos parâmetros do ambiente. Para começar é adicionado um plano terra. Este plano estará posicionado 10mm abaixo do objeto para facilitar a sua visualização. Para isso basta selecionar a guia *Ground* em *Project Tree* e suas propriedades estarão disponíveis, como mostra a figura 19.

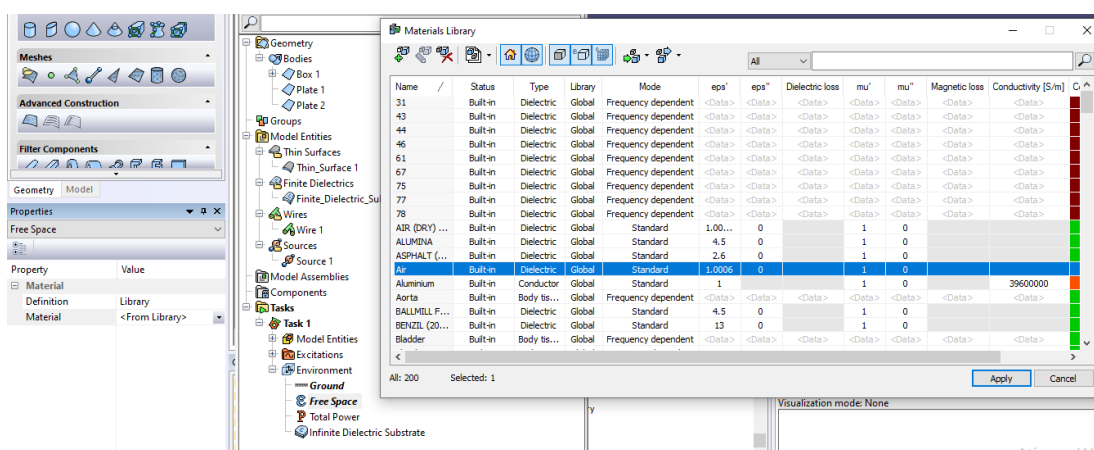
Figura 19 – Ativando o Ground



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na mesma guia também podemos definir com o que o espaço ao redor será preenchido, entre as opções disponíveis na biblioteca do EMCoS, para este trabalho foi utilizado o Ar, como pode ser visto na figura 20.

Figura 20 – Definindo o espaço livre como ar

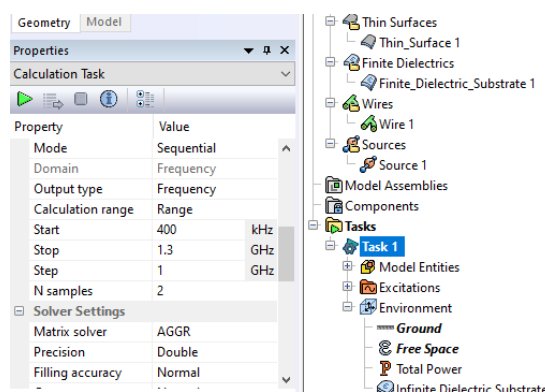


Fonte: Elaboração própria (2025).

O último passo para a simulação começar é definir seus limites, neste exemplo serão calculadas duas amostras, em 400kHz e 1GHz, O motivo da escolha dessas frequências é a distância entre as duas, o que permite observar o sistema sobre estímulos muito diferentes. Ao mesmo tempo eram valores possíveis de serem medidos em bancada e permitiu explorar duas configurações diferentes para medir o campo elétrico em bancada, como será visto mais à frente.

Na figura 21 é possível observar como é configurado o *Task* para que o cálculo da simulação inicie.

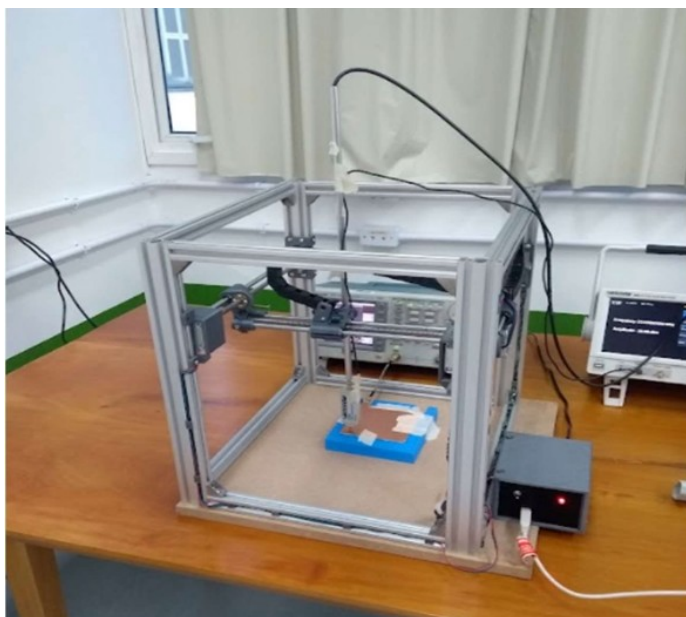
Figura 21 – Definindo os parâmetros de *Task*



Fonte: Elaboração própria (2025).

responsáveis por deslocar a antena nos eixos x e y. Um gerador de funções com o objetivo de alimentar o dispositivo a ser analisado. Um analisador de espectro HAMEG HMS-X que está conectado a antena. Por fim possui um microcontrolador que se comunica via USB com um computador. O computador possui um software desenvolvido especialmente para o rastreador, por onde todo o controle dessa estrutura é feito. Na figura 23 podemos observar toda esta estrutura. Todo o equipamento foi projetado e montado e um Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial no Instituto Federal de Santa Catarina. O equipamento atingiu o objetivo e permite o rastreamento automático do campo elétrico e magnético do objeto em estudo e seus resultados são superiores ao medido de forma manual. (Luiz, 2022).

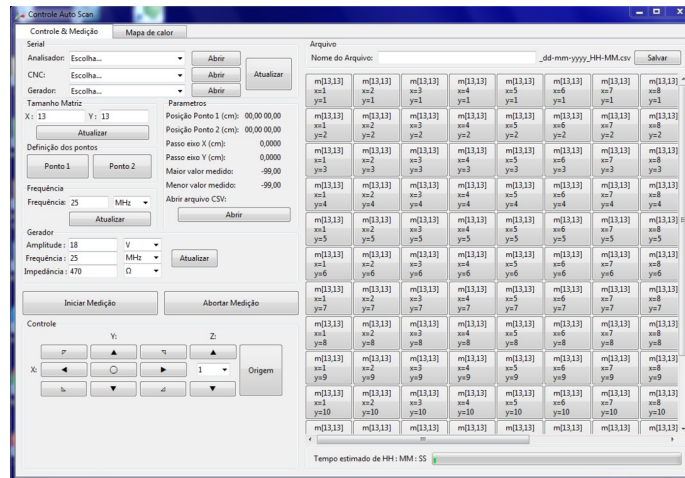
Figura 23 –Estrutura do Rastreador



Fonte: Elaboração própria (2025).

A figura 24 mostra a tela inicial do software responsável pelo controle.

Figura 24 –Interface do Software de controle

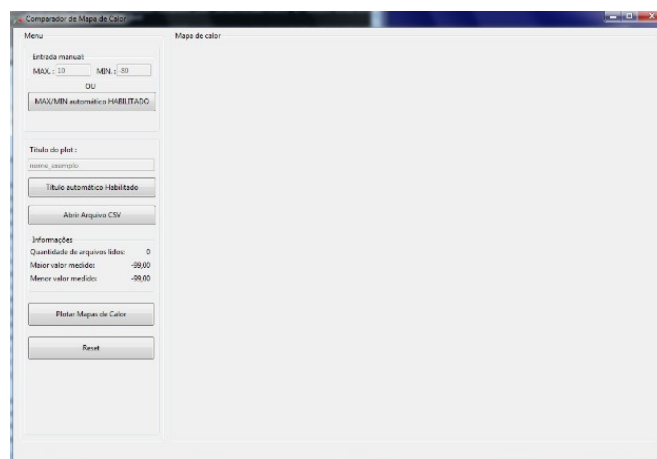


Fonte: Elaboração própria (2025).

Uma vez feita toda a medição o software é capaz de exportar os resultados como um arquivo .csv e como imagem em forma de mapa de calor.

Um segundo software desenvolvido também para suprir as necessidades do rastreador é capaz de analisar os arquivos .csv e gerar imagens em forma de mapa de calor, atribuindo a mesma escala para todos os arquivos. Na imagem 25 é possível ver a interface inicial deste software.

Figura 25 –Interface do software comparador



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.2 Pocket VNA

O Pocket VNA, que pode ser visto na figura 26, foi utilizado para gerar a onda necessária na trilha geradora para as medições em 1GHz, uma vez que o

gerador de função não possuía tal capacidade. Este modelo em questão possui duas portas bidirecionais, capazes de medir S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} simultaneamente. Possui uma banda de 400kHz até 4GHz. Através de um software próprio deste equipamento, foi possível utilizá-lo como gerador de ondas na frequência de interesse.

Figura 26 – Pocket VNA



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.2.3 LNA9037BAT

O LNA9037BAT, exemplificado na figura 27, é um amplificador de sinal, capaz de operar na faixa de 100kHz a 6GHz, foi utilizado tanto para ampliar o sinal do Pocket VNA quanto o sinal medido pela antena quando conectada ao gerador de funções. Em ambos os casos o seu objetivo era de amplificar o sinal conectado a ele, de forma que o analisador de espectro pudesse distingui-lo com maior clareza.

Figura 27 – Amplificador



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.3 Setup para medições

Dois setups diferentes foram utilizados para realizar as medições. Um para 400kHz e outro para 1GHz. As duas configurações foram necessárias devido a limitações dos equipamentos, o que comprometia as leituras feitas.

Para medições em 400 kHz o sinal captado pela antena se mostrava muito fraco, gerando mapas de calor incompatíveis com os resultados esperados. Para resolver este problema foi conectado o amplificador entre a antena e o analisador de espectro, amplificando o sinal captado pela antena. A figura 28 exemplifica o resultado desta montagem. O gerador de funções foi programado para gerar um sinal de 400kHz com 1V de amplitude.

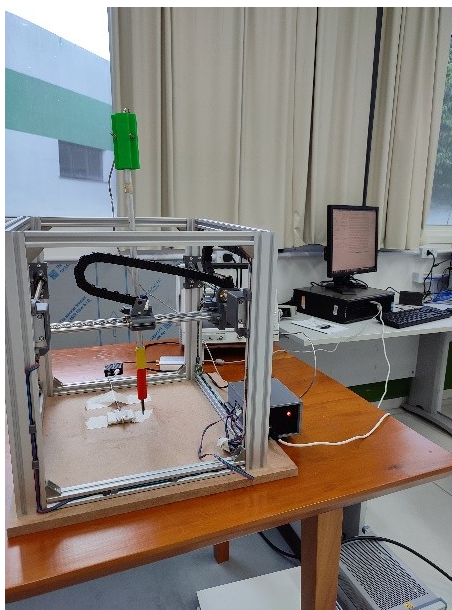
Figura 28 – Setup para medições em 400kHz



Fonte: Elaboração própria (2025).

Nas medições com frequência em 1GHz o gerador de funções não era capaz de gerar uma onda nesta especificação. Portanto o Pocket VNA foi conectado na trilha geradora e programado para gerar o sinal em 1GHz, entretanto o sinal era fraco demais para ser captado pela antena, logo o amplificador dessa vez foi conectado entre o Pocket VNA e a trilha, como é possível observar na figura 29.

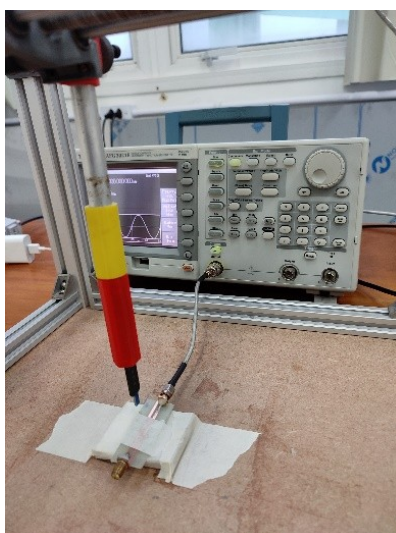
Figura 29 – Setup para medições em 1GHz



Fonte: Elaboração própria (2025).

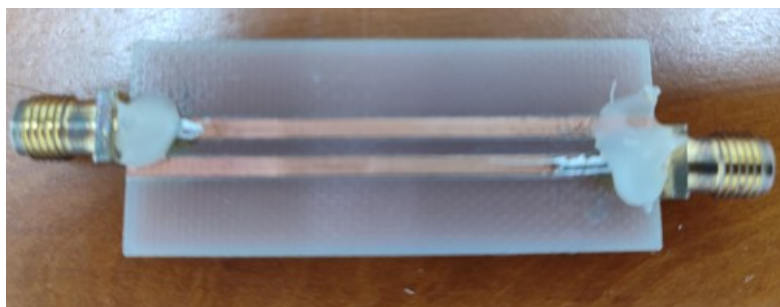
No centro do rastreador foi feito um suporte para a PCI e demarcado o local onde ela era disposta de forma a padronizar as medições. Na figura 30 podemos observar esse suporte e na 31 um exemplo das placas utilizadas.

Figura 30 – Placa e suporte



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 31 – Modelo de placa utilizada



Fonte: Elaboração própria (2025).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

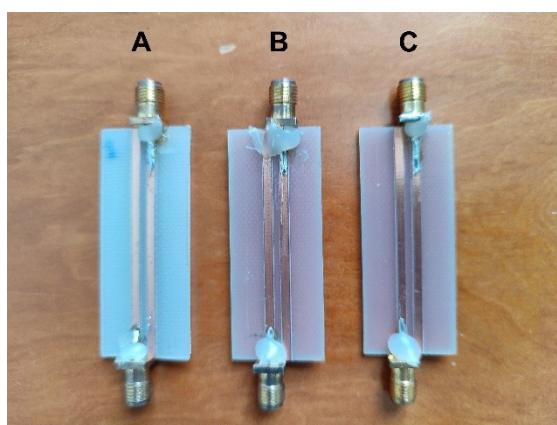
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos tanto nas simulações quanto nas medições feitas em bancada, em relação ao campo elétrico. Esses resultados serão apresentados em forma de mapa de calor, onde é esperado que sejam observados a dispersão desse campo e a influência do sinal na trilha geradora, na trilha vítima, o chamado *crosstalk*.

Dois principais modelos de placa foram utilizados. A placa 1, de dimensões 50x20.1mm, é formada por duas trilhas com 2mm de largura cada, distantes uma da outra 1.5mm. Três variações dessa placa foram utilizadas:

- Sem plano de referência (modelo A)
- Com plano de referência, porém desconectado (modelo B)
- Com plano de referência conectado (modelo C)

Na figura 32 pode observar as placas citadas.

Figura 32 – Placa 1 modelos A, B e C

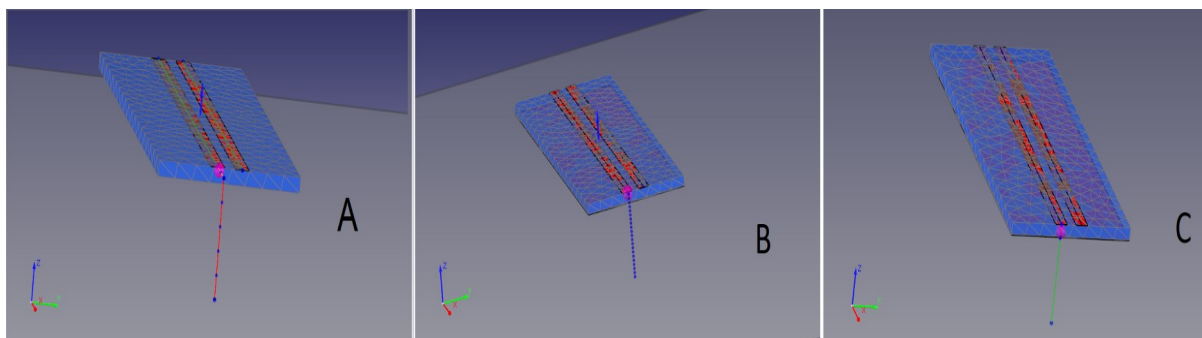


Fonte: Elaboração própria (2025)

Na figura 33 é possível visualizar o esquemático de cada uma dessas placas. Na primeira imagem temos o modelo, sem o plano de referência, a fonte, representada pela esfera rosa, esta conectada entre a trilha geradora e o *ground*. A segunda imagem demonstra a placa com o plano de referência desconectado, a fonte novamente esta conectada entre a trilha geradora e o *ground*. Por fim na última

imagem está representado o modelo C, existe uma ligação entre a trilha geradora e o plano de referência, representado pelo fio azul, neste mesmo fio está conectada a fonte, representada pela esfera rosa.

Figura 33 – Esquemático dos modelos da placa 1



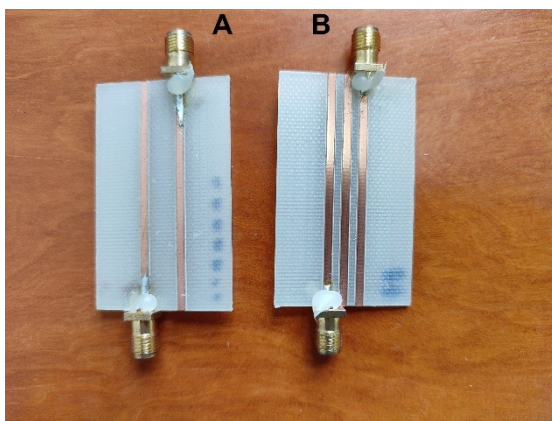
Fonte: Elaboração própria (2025)

A segunda placa, chamado de placa 2, possui dimensões 50x30.2mm, e é constituído por duas trilhas de 2mm de largura cada, distantes 5mm uma da outra e sem plano de referência. Esse modelo possui também 3 variações:

- Com duas trilhas (modelo A)
- Com uma trilha de guarda com 2mm de largura distante 1.5mm de cada trilha, desconectada (modelo B)
- Com uma trilha de guarda com 2mm de largura distante 1.5mm de cada trilha, conectada (modelo C)

A figura 34 exibe as placas utilizadas.

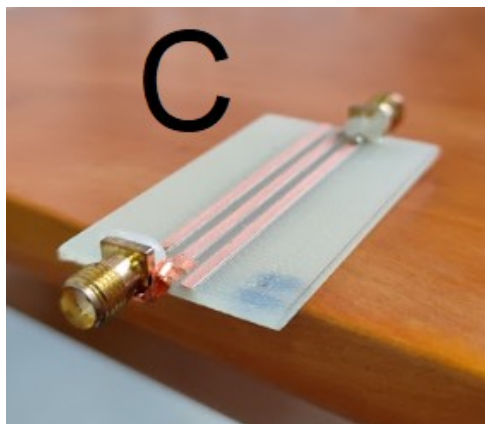
Figura 34 – Placa 2 modelo A e B



Fonte: Elaboração própria (2025)

Enquanto na figura 35 temos uma visão da placa com trilha de guarda e sem referência, com uma ligação feita entre a trilha de guarda e a trilha geradora por uma fita de cobre.

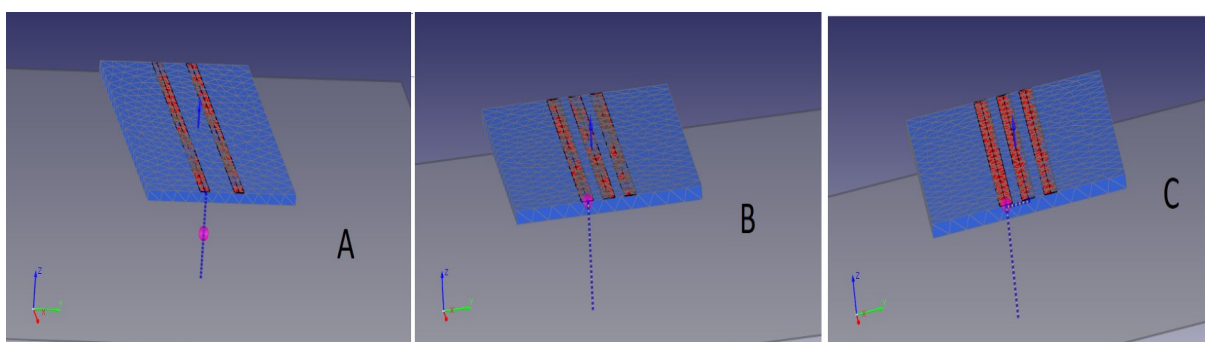
Figura 35 – Placa 2 modelo C



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na figura 36 está exemplificado o esquemático dos modelos da placa 2. A primeira imagem é o modelo A da placa, sem trilha de guarda, a fonte está conectada entre a trilha geradora e o *ground*, sua localização é simbolizada pela esfera rosa. A segunda imagem é o modelo B, com trilha de guarda desconectada. O modelo C está na terceira imagem, onde é possível observar um fio azul conectando a trilha de guarda a geradora, e entre este fio e o *ground* a fonte, representada pela esfera rosa.

Figura 36 – Esquemático dos modelos da Placa 2



Fonte: Elaboração própria (2025)

Todas essas placas foram simuladas e medidas em bancada para duas frequências diferentes, 400kHz e 1GHz.

Para aproximar a simulação de como feito na prática, foi posicionado o campo de área próximo a uma distância aproximada da medida entre a antena do

rastreador e a placa, 0.7mm. Esta foi a menor distância que pode ser utilizada devida à altura do conector nas placas. Para que uma área maior pudesse ser medida a antena deveria passar por cima do conector sem que houvesse contato entre eles.

4.1 Desenvolvimento

Nos próximos tópicos apresentaremos os resultados obtidos segundo a metodologia descrita anteriormente. Para todos os resultados, práticos e simulados, deve-se sempre considerar que o sinal entra pela parte superior direita da placa, conforme é possível observar nas figuras 32 e 34 seus conectores. Para facilitar a visualização das simulações foi ocultando o plano terra, embora ele esteja presente em todas as modelagens.

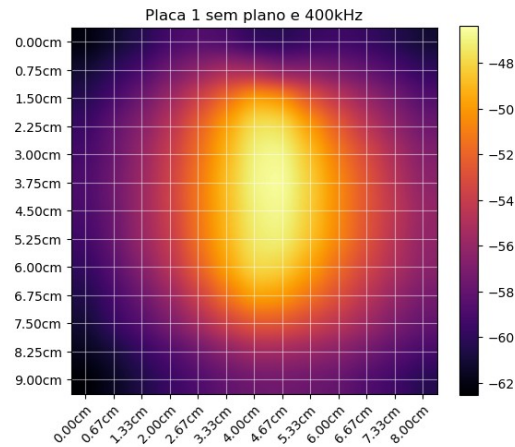
4.1.1 Resultados obtidos na placa 1

A seguir os resultados obtidos em todos os modelos da placa 1.

4.1.1.1 Placa 1 modelo A em bancada

Na figura 37 podemos observar o campo elétrico medido em bancada da referida placa (Placa 1 A) em 400kHz, podemos notar a área de maior intensidade, na cor branca e amarela sobre as trilhas, evidenciando o efeito de *crosstalk* e ao redor dele o padrão quase elíptico na cor laranja, representando a atenuação do campo elétrico nas áreas adjacentes a PCI. Como o espaço medido foi maior muito maior do que o tamanho da placa, é possível notar que o campo continua a se espalhar muito além da região onde é gerado, sua atenuação pode ser notada pelo padrão de cores roxas e azuis, denotando menor intensidade em relação ao centro.

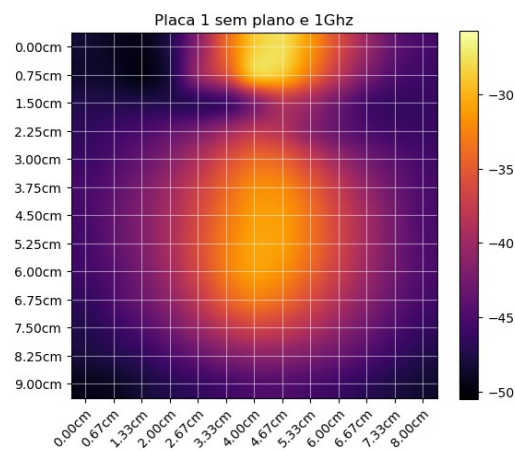
Figura 37 – Placa 1 A em 400kHz



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na figura 38 podemos notar que a região de maior intensidade continua sobre a placa, embora esteja menos intensa. A distribuição do campo elétrico medido continua semelhante à figura 37, com ele perdendo intensidade conforme se distancia de sua origem. Acima, na região correspondente ao conector pode-se notar um campo até mais intenso que na trilha, este efeito está associado aos A indutância da própria trilha, entre outros problemas de EMC, que se tornam muito mais evidentes com o aumento da frequência.

Figura 38 – Placa 1 A em 1GHz

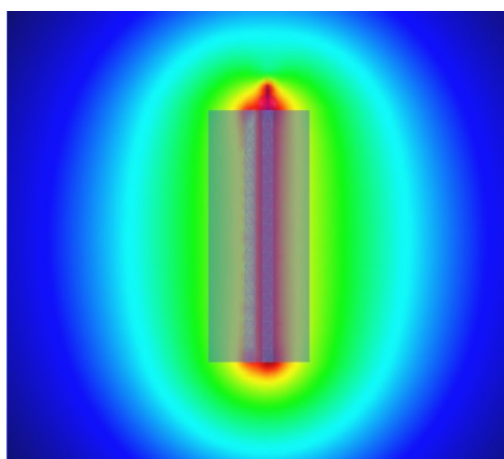


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.1.2 Placa 1 modela A simulado

A figura 39 demonstra um recorte da simulação da placa 1 A em 400kHz, onde podemos visualizar seu campo elétrico e a placa, com suas trilhas. Conforme o padrão observado na figura 37, o campo é muito mais intenso sobre a trilha geradora e sobre a vítima, demonstrando o *crosstalk*. Quanto mais distante este campo está das trilhas mais ele se atenua.

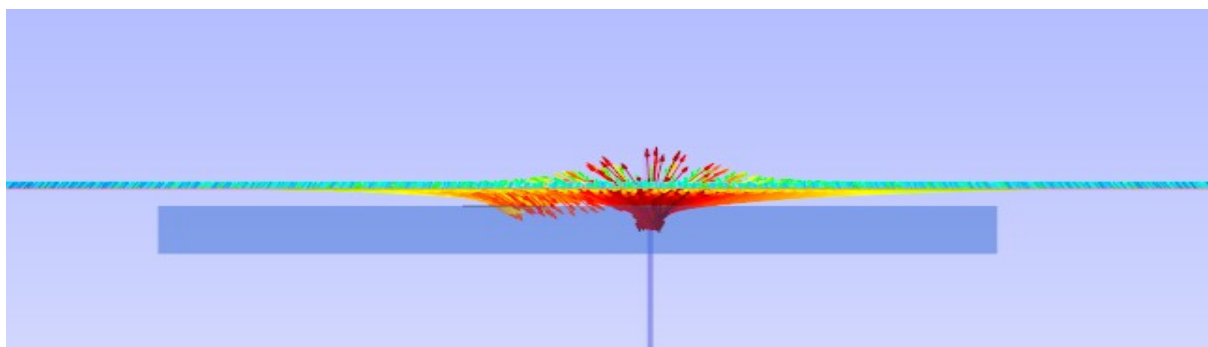
Figura 39 – Placa 1 A em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Em seguida na figura 40, podemos observar esta mesma simulação sobre outro ângulo. Ao utilizar flechas que indicam as linhas do campo e sua intensidade pela cor, no lugar do mapa de calor, e observando por um recorte lateral, temos uma visão de como o campo está se comportando no momento. Sobre a trilha geradora as flechas indicam que este campo está saindo dela e com muita intensidade. Enquanto na trilha da esquerda, a vítima, as linhas estão entrando, ainda que com menor intensidade demonstrando o *crosstalk*. A intensidade da linha diminui continuamente, ao se afastar da região das trilhas.

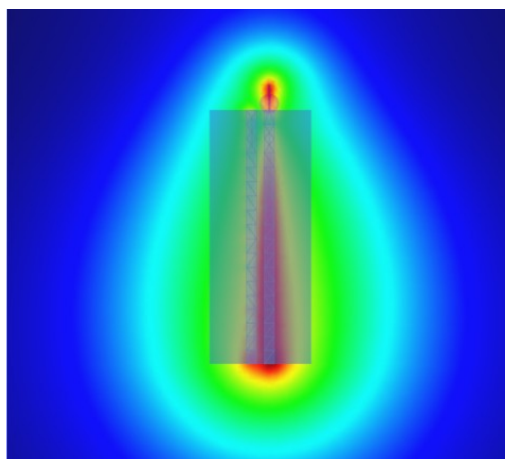
Figura 40 – Linhas de campo da Placa 1 A em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

A figura 41 demonstra o campo observado por uma vista superior da placa 1 sobre um sinal de 1GHz. O campo elétrico de maior intensidade está sobre a trilha geradora e conforme avança se expande chegando a afetar a trilha vítima. Próximo a fonte o campo toma um padrão circular, semelhante ao observado quando medido em bancada na figura 38. Exemplificando os efeitos do aumento da frequência e da indutância da própria trilha.

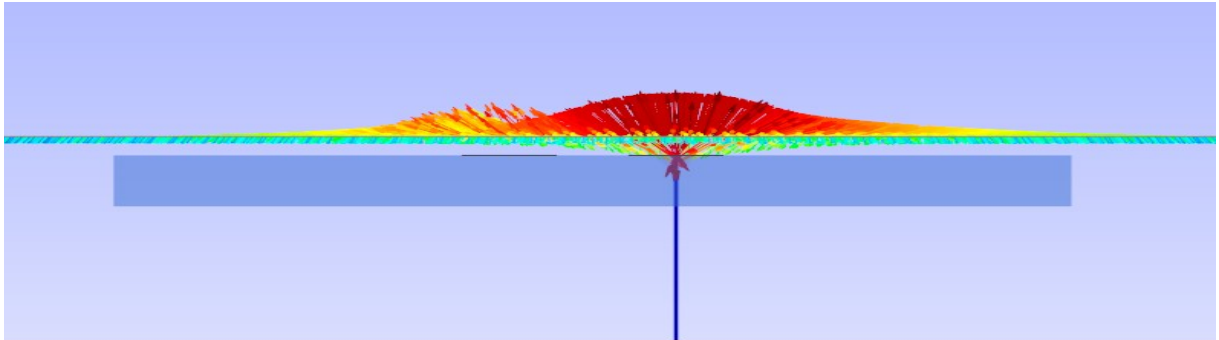
Figura 41 – Placa 1 A em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

Na figura 42 ao observar as linhas de campo pela lateral da placa, podemos notar um campo de grande intensidade saindo da trilha geradora, e inclusive da vítima, enquanto um campo, de menor intensidade, mas muito maior do que no resto da placa, entra pela trilha vítima, o que demonstra a influência da trilha agressora, em trilhas vizinhas.

Figura 42 – Linhas de campo da Placa 1 A em 1GHz simulado

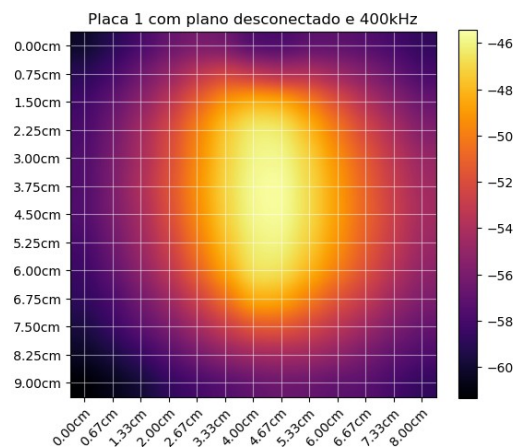


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.1.3 Placa 1 modelo B em bancada

A figura 43 demonstra o resultado obtido na placa 1 B em bancada, quando sujeita a 400kHz. É possível perceber um campo de grande intensidade na região central, onde localizada a placa, logo este campo, embora originalmente sobre apenas uma trilha, está afetando de forma contundente a trilha vizinha e a região da placa, conforme o esperado.

Figura 43– Placa 1 B em 400kHz

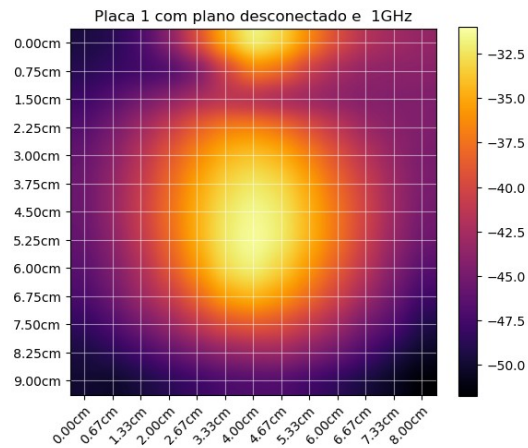


Fonte: Elaboração própria (2025).

Na figura 44, é visualizado o comportamento desta placa sob um sinal de 1GHz. O campo mantém sua intensidade, principalmente mais perto do final das trilhas. Na parte superior sua leve atenuação, bem como o aparecimento de um campo

com maior intensidade sobre o conector, exemplifica a influência da alta frequência no sistema.

Figura 44– Placa 1 B em 1GHz

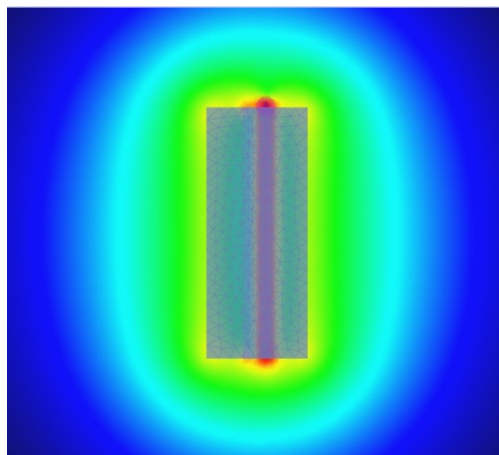


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.1.4 Placa 1 modelo B simulado

A simulação da placa em 400kHz pode ser vista na figura 45, sob a perspectiva do campo de calor. Um campo muito forte está sobre a trilha, na trilha vizinha um campo de intensidade um pouco menor e levemente mais intenso nas regiões do início e fim da trilha. Ao redor de toda a placa um campo tão intenso quanto pode ser observando, demonstrando o efeito do plano de referência desconectado.

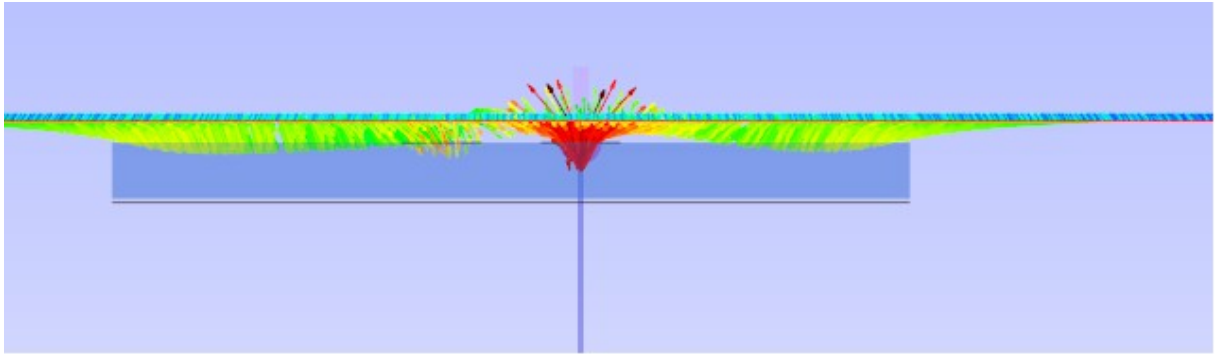
Figura 45– Placa 1 B em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

As linhas de campo podem ser vistas na figura 46. O campo está saindo da trilha geradora, e em toda a placa as linhas possuem relativa densidade de campo entrando. Com mais força sobre a trilha vítima.

Figura 46– Linhas de campo da Placa 1 B em 400kHz

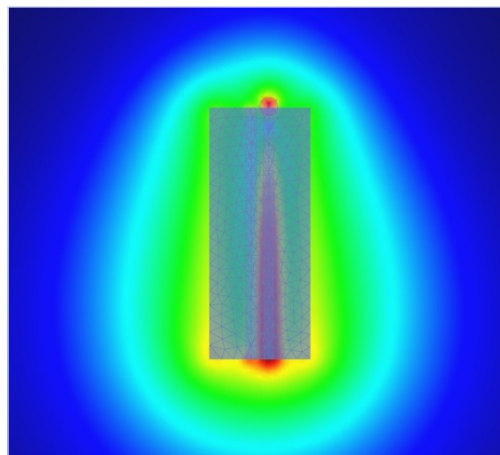


Fonte: Elaboração própria (2025).

O equivalente em 1GHz para mapa de calor pode ser visto na figura 47. Sobre a trilha geradora o campo apesar de intenso é mais retilíneo, e ao longo da trilha começa a se expandir. Aumentando sua influência sobre a trilha vítima. Este padrão também pode ser observado nas bordas da placa, que ao final o campo embora de mesma intensidade, possui uma área maior.

No início da trilha geradora também podemos visualizar um campo circular, com um centro de grande intensidade, o que está de acordo com a figura 44.

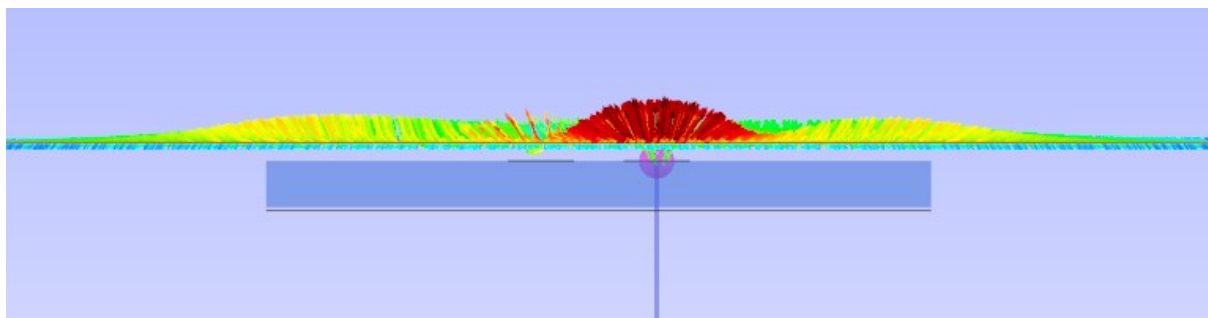
Figura 47– Placa 1 B em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

O recorte lateral com as linhas de campo para 1 GHz pode ser visto na figura 48. Uma grande intensidade de campo entrando pela geradora. E saindo por toda a superfície da placa mais atenuado. Sobre a trilha vítima é possível notar linhas mais fortes, confirmando o observado anteriormente.

Figura 48– Linhas de campo Placa 1 B em 1GHz simulado

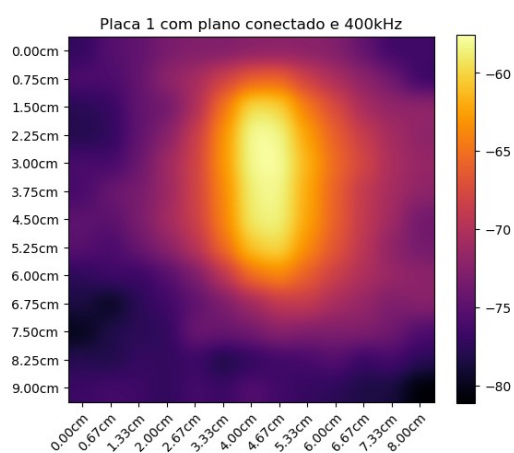


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.1.5 Placa 1 modelo C em bancada

A olhar para a figura 49 podemos ver o campo elétrico medido em bancada para placa 1 modelo C em 400kHz. Podemos notar um campo de grande intensidade, porém mais contido, sobre a placa, quase demarcando seus limites. Enquanto ao seu redor todo o campo está com muito menos intensidade.

Figura 49– Placa 1 C em 400kHz

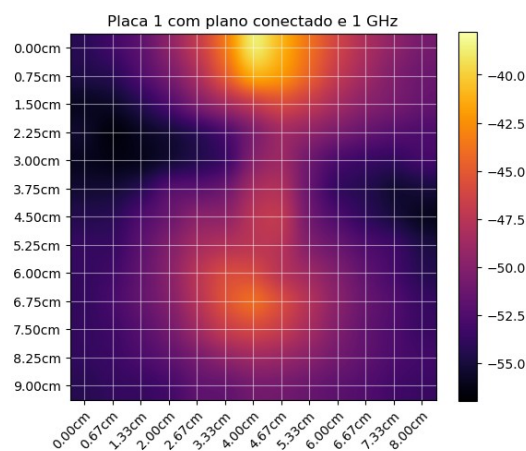


Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao olhar para figura 50, podemos ver seu resultado submetido a 1GHz. Pode-se observar um campo de pouca intensidade sobre a placa. Sendo o campo sobre o conector de muito maior intensidade. Ao final da placa podemos notar um outro campo, de formato circular, este campo está sobre o conector da trilha vítima.

É possível perceber o impacto do plano quando submetido a frequências maiores, diminuindo em muito a intensidade sobre a placa, porém, resultando em outros campos sobre os conectores.

Figura 50– Placa 1 C em 1GHz

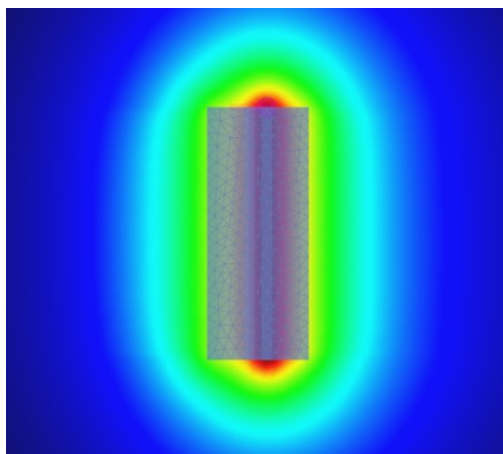


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.1.6 Placa 1 modelo C simulado

Na figura 51 o mapa de calor simulado para 400kHz pode ser visto. A maior parte da energia do campo elétrico está sobre a trilha geradora, porém seu campo ainda toca a trilha vítima.

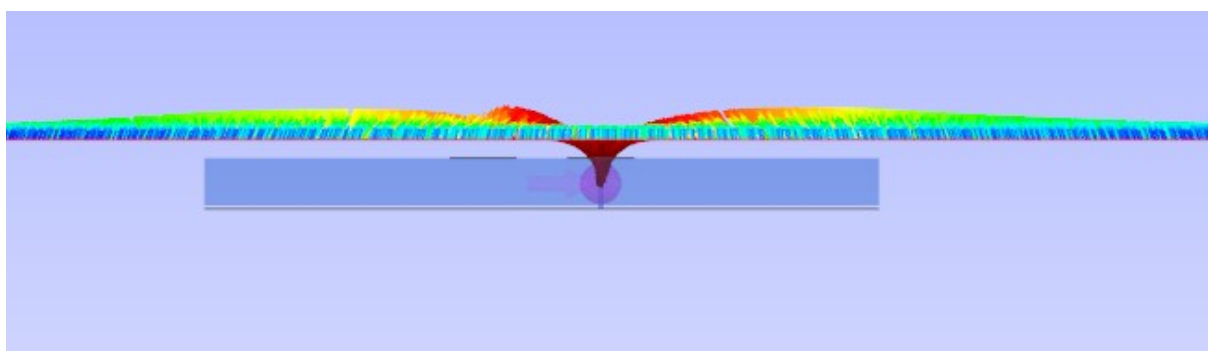
Figura 51– Placa 1 C em 400KHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao visualizar na figura 52 as linhas de campo em 400kHz. Fica claro essa interferência da geradora na vítima. Podemos notar que as linhas que deixam a trilha vítima em direção a geradora são muito maiores na borda interna, e diminuem consideravelmente da parte interna da vítima para a borda externa da mesma.

Figura 52– Linhas de campo da Placa 1 C em 400KHz simulado

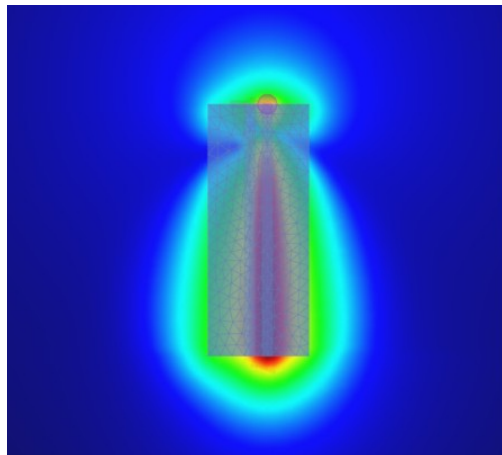


Fonte: Elaboração própria (2025).

A figura 53 demonstra a simulação da placa em 1GHz, nela podemos notar que o campo da geradora se expande conforme se aproxima do final da trilha. Embora ainda seja possível notar que ele toca a vítima, principalmente mais ao final. Seu campo possui uma área menor em comparação ao simulado em 400kHz. Novamente no início da trilha onde entra o sinal podemos notar um campo com um padrão quase

circular, a interação deste campo com o da trilha gera uma interferência destrutiva nos próprios campos elétricos, o que dá ao campo como um todo um formato de propagação diferente dos vistos anteriores.

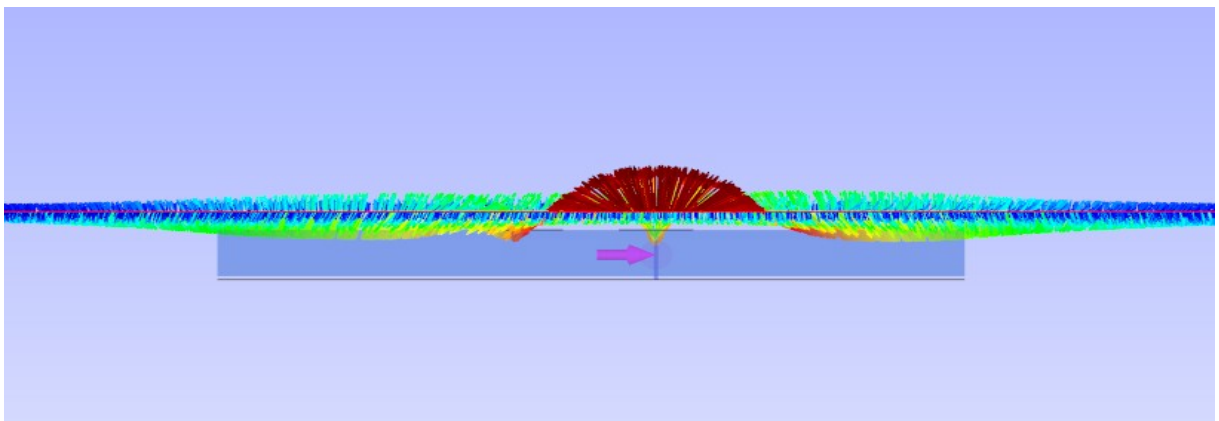
Figura 53– Placa 1 C em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

Novamente sobre o ponto de vista lateral das linhas de campo, podemos ver essa área de interferência da geradora na vítima com mais clareza. A figura 54, no lado esquerdo, próximo ao centro da placa, mostra que do centro da vítima para a borda exterior, a uma quebra abrupta de intensidade do campo que atravessa ela vindo da trilha geradora.

Figura 54– Linhas de campo da Placa 1 C em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração própria (2025).

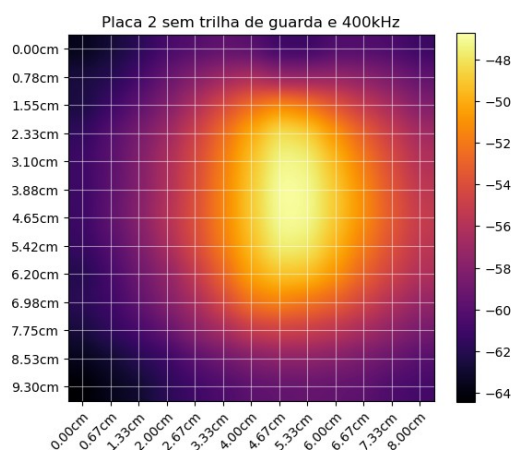
4.1.2 Resultados obtidos na Placa 2

A seguir os resultados obtidos por todos os modelos da placa 2

4.1.2.1 Placa 2 modelo A em bancada

Na figura 55 podemos observar o comportamento da placa 2 A quando sujeita a um sinal de 400kHz em bancada. Podemos notar o campo de maior intensidade sobre a região da placa e conforme se distancia da trilha geradora perde sua intensidade.

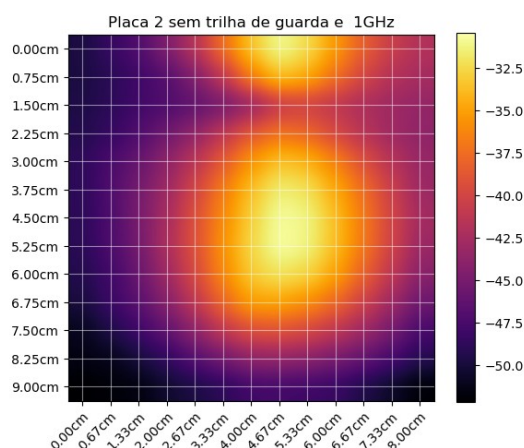
Figura 55– Placa 2 modelo A em 400KHz



Fonte: Elaboração Própria (2025).

O equivalente em 1Ghz pode ser visto na figura 56. Onde como visto em análises anteriores, um campo surge no início da trilha, sobre o conector, e na região onde este campo se encontra com o da trilha há uma interferência destrutiva nos campos elétricos de ambos.

Figura 56– Placa 2 modelo A em 1GHz

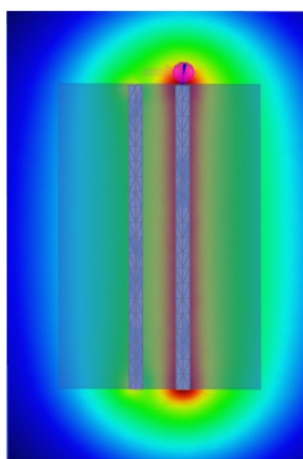


Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.1.2.2 Placa 2 modelo A simulado

A simulação da placa 2 A sobre 440kHz pode ser vista na figura 57. A parte de maior intensidade do campo está sobre a região da trilha geradora, e devido à distância da vítima, a interferência dessa trilha é muito menor.

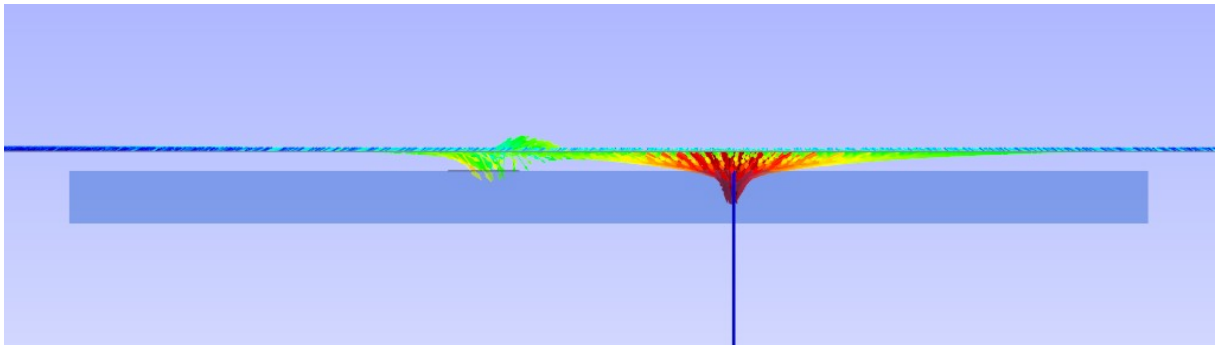
Figura 57– Placa 2 modelo A em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A figura 58 demonstra, como as linhas de campo sobre a vítima são menores, quando comparada com a placa 1 A, embora ainda existam.

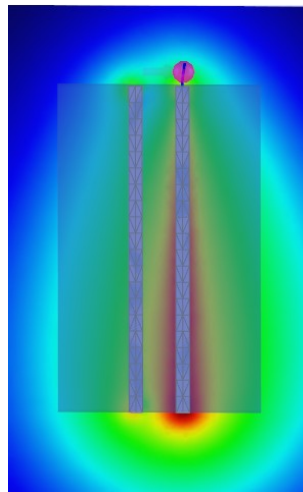
Figura 58– Linhas de campo da Placa 2 modelo A em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Para a simulação do campo de calor em 1Ghz temos na figura 59 sua exemplificação. É possível observar que o campo da trilha geradora se expande conforme avança sobre a trilha, e perto da região final é onde sua influência na vítima se torna mais forte.

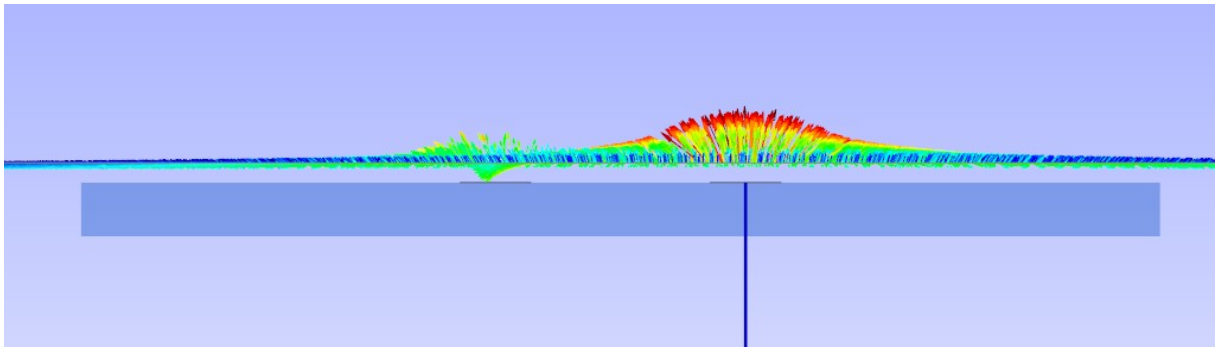
Figura 59– Placa 2 modelo A em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

As linhas de campo desse modelo em 1GHz podem ser vistas na figura 60, onde notamos o campo saindo da trilha geradora e adentrando sem tanta intensidade na trilha vítima.

Figura 60– Linhas de campo da Placa 2 modelo A em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

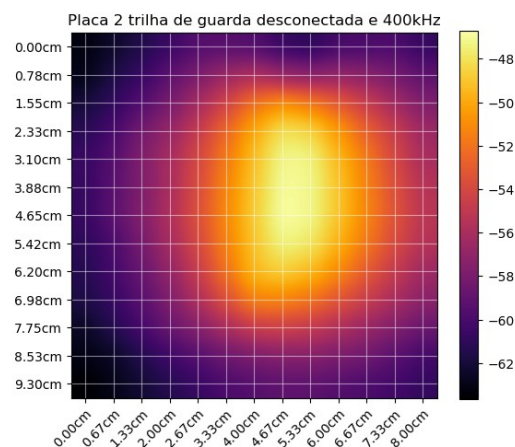
4.1.2.3 Placa 2 modelo B

A seguir os resultados para a placa com a trilha de guarda desconectada.

4.1.2.4 Placa 2 modelo B em bancada

Na figura 61 podemos visualizar a placa com a trilha de guarda desconectada em 400kHz. A maior parte da intensidade do campo está sobre a placa. E diminui ao se distanciar da trilha.

Figura 61– Placa 2 modelo B em 400KHz

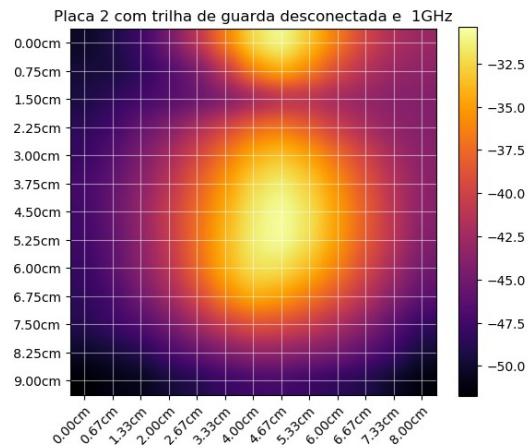


Fonte: Elaboração Própria (2025).

A figura 62 demonstra esta placa quando sujeita a um sinal de 1GHz. A influência do grande aumento da frequência é exemplificada pelo campo que aparece

sobre o conector, gerando uma interferência destrutiva nos campos elétricos quando este se encontra com o campo da trilha agressora.

Figura 62– Placa 2 modelo B em 1GHz

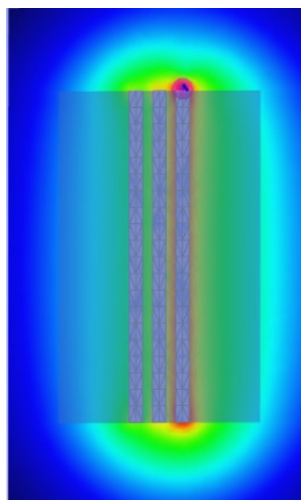


Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.1.2.5 Placa 2 modelo B simulado

Na figura 63 temos a simulação em 400kHz da placa 2 B. Olhando para o mapa de calor vemos que influência do campo da trilha agressora é mais forte sobre a trilha de guarda, que por sua vez contribui para influenciar na trilha vítima.

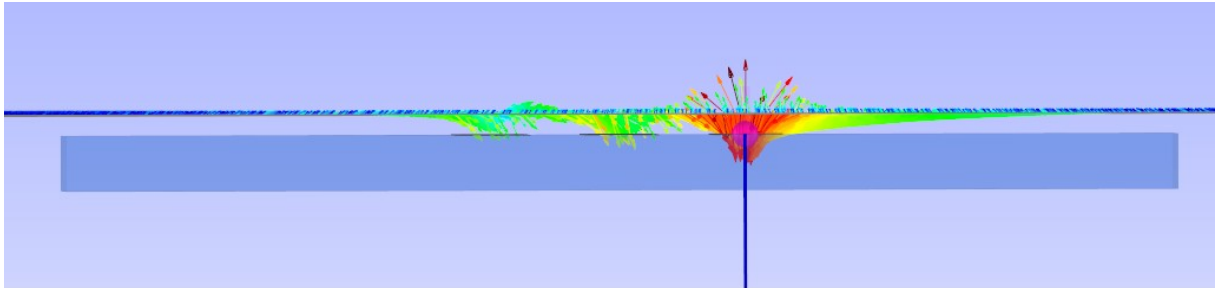
Figura 63– Placa 2 modelo B em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A figura 64, mostra essa influência através das linhas de campo. Podemos notar que o campo que sai da geradora afeta tanto a trilha de guarda quanto a trilha vítima.

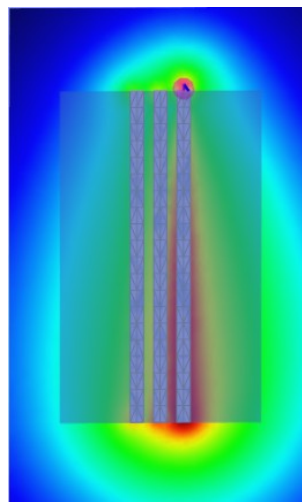
Figura 64– Linhas de campo da Placa 2 modelo B em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Para analisar o comportamento dessa placa em 1 GHz temos o campo de calor simulado na figura 65. É possível observar o campo da geradora aumentando de intensidade conforme avança pela trilha, e consequentemente sujeitando a trilha vizinha a uma maior intensidade.

Figura 65– Placa 2 modelo B em 1GHz simulado

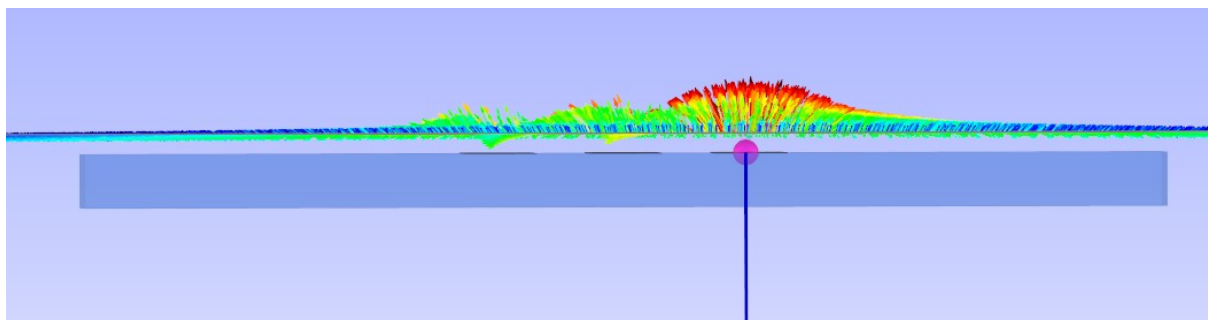


Fonte: Elaboração Própria (2025).

Na figura 66 podemos notar as trilhas de campo dessa placa saindo da geradora e entrando na de guarda e na vítima, ao mesmo tempo, também saem

algumas linhas da trilha de guarda e da vítima, que por sua vez influenciaram as vizinhas.

Figura 66 – Linhas de campo da Placa 2 modelo B em 1GHz simulado

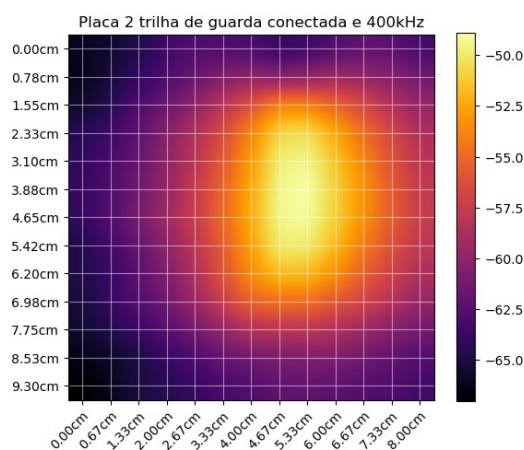


Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.1.2.6 Placa 2 modelo C em bancada

A figura 67 demonstra o resulta obtido em bancada e em 400kHz quando a trilha de guarda está conectada. A parte de grande intensidade corresponde a área sobre a placa, e está intensidade diminui conforme se distancia da placa.

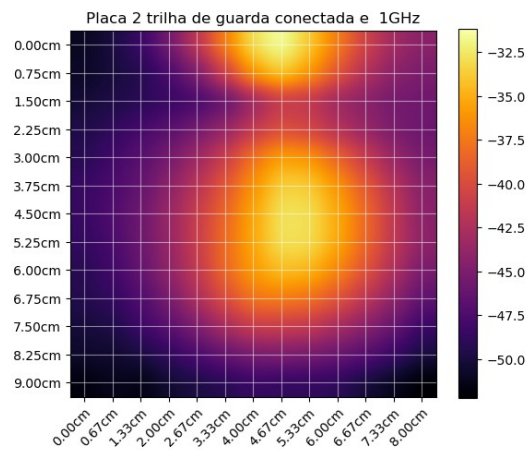
Figura 67 – Placa 2 modelo C em 400kHz



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Para o resultado em 1GHz, este pode ser visualizado na figura 68, onde surge um campo na entrada da trilha, com forte intensidade, abaixo dele está o campo elétrico da trilha geradora. Na área onde ocorre o contato entre estes dois, podemos notar uma interferência destrutiva nos campos elétricos.

Figura 68 – Placa 2 modelo C em 1GHz

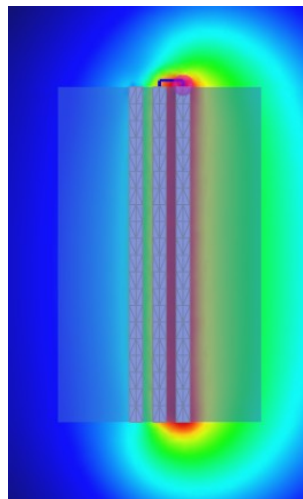


Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.1.2.7 Placa 2 modelo C simulado

Na simulação exemplificada pela figura 69 temos o mapa de calor da placa 2 C em 400kHz. Podemos notar uma forte influência do campo elétrico da trilha geradora sobre ela mesma e sobre a trilha de guarda. Entretanto a intensidade cai drasticamente ao se aproximar da trilha vítima.

Figura 69– Placa 2 modelo C em 400kHz simulado

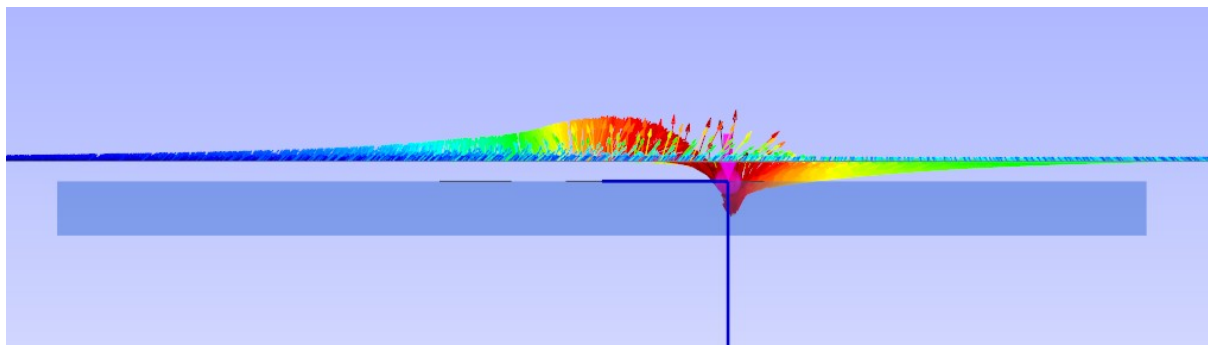


Fonte: Elaboração Própria (2025).

As linhas de campo mostradas na figura 70, confirmam este comportamento, podemos notar a diminuição da intensidade do campo que atravessa

a vítima. E mesmo algumas linhas em direção contrária que aparecem entre a geradora e a de guarda, não se manifestam próximas a vítima.

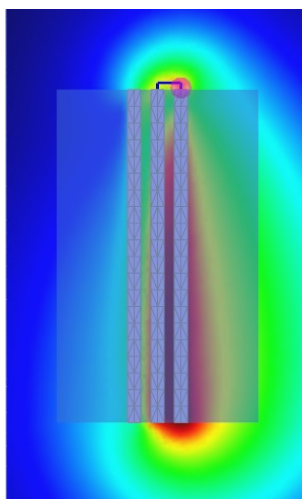
Figura 70– Linhas de campo da Placa 2 modelo C em 400kHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

O comportamento em 1GHz, pode ser visto sob a forma de mapa de calor na figura 71. Embora o campo elétrico da geradora tenda a crescer conforme avance, muito dele não é capaz de passar a trilha de guarda, gerando um formato não simétrico. E mesmo o campo gerado no início da trilha tem sua energia diminuída conforme se aproxima da trilha vítima.

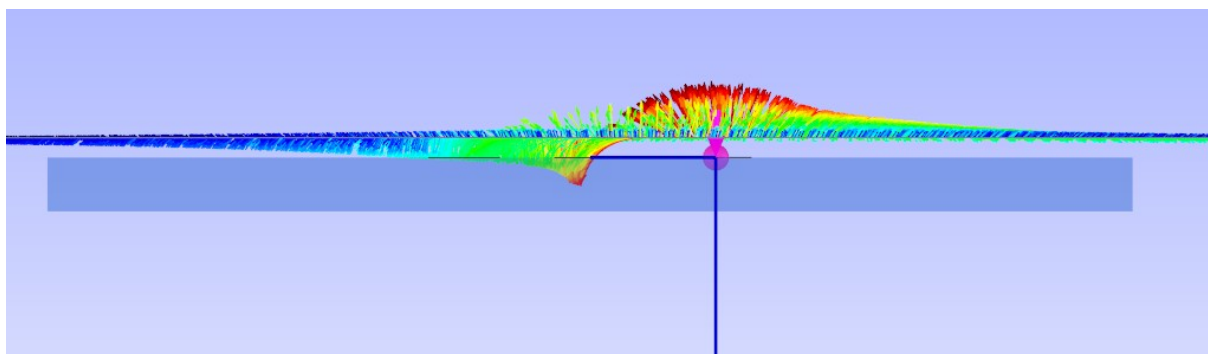
Figura 71 – Placa 2 modelo C em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Na figura 72 as linhas de campo demonstram o comportamento acima. A trilha de guarda é atravessada pela maior parte das linhas de campo, resultando em um campo elétrico muito menos intenso sobre a trilha vítima.

Figura 72 – Linhas de campo da Placa 2 modelo C em 1GHz simulado



Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.2 Análise e comparação

Os resultados apresentados anteriormente foram expostos de forma individual, ou seja, cada um na forma em que foi obtido, tanto o prático quando o simulado. Embora seja possível inferir alguns apontamentos analisando para um mesmo modelo o mapa de calor real e simulado não podemos afirmar que os modelos de placa se comportam como o esperado. Para chegar a essa conclusão devemos colocar os resultados na mesma escala. Assim compararemos o campo do modelo B com o do modelo C, ou do modelo A com o modelo B e C, por exemplo.

Infelizmente não é possível comparar na mesma escala o resultado de bancada e o de software, pois existem incertezas em relação as ondas geradas na bancada utilizando o Pocket VNA, bem como sobre o funcionamento interno do *software*. Porém, podemos comparar o prático e o teórico em termos do comportamento de seu mapa de calor.

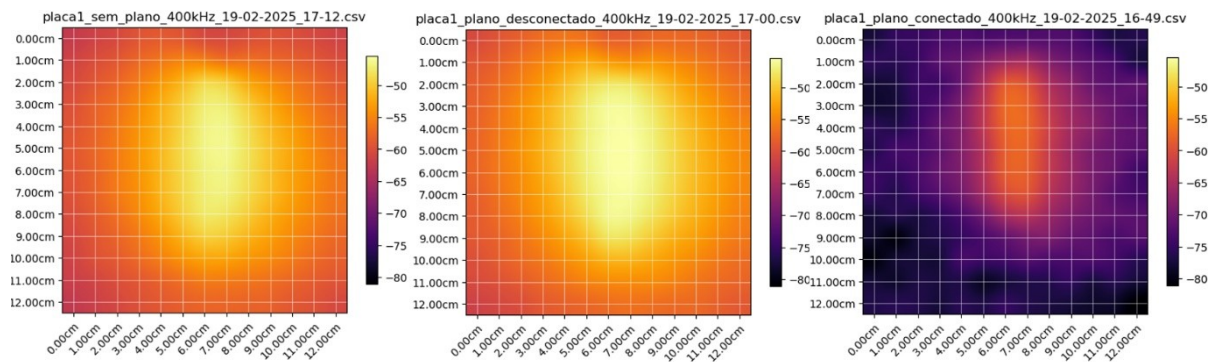
4.2.1 Análise e comparação da placa 1

A figura 73 nos mostra o campo elétrico medido em bancada, lado a lado, dos modelos A, B e C da placa 1 em 400kHz, respectivamente. Podemos notar que o

campo elétrico no primeiro modelo é menor em comparação ao segundo, devido ao segundo, embora possua um plano de referência, este está desconectado, ampliando o campo elétrico e por conseguinte os problemas de EMC. Entretanto na última imagem a diminuição do campo é muito mais nítida, comprovando a eficácia do uso de um plano de referência corretamente.

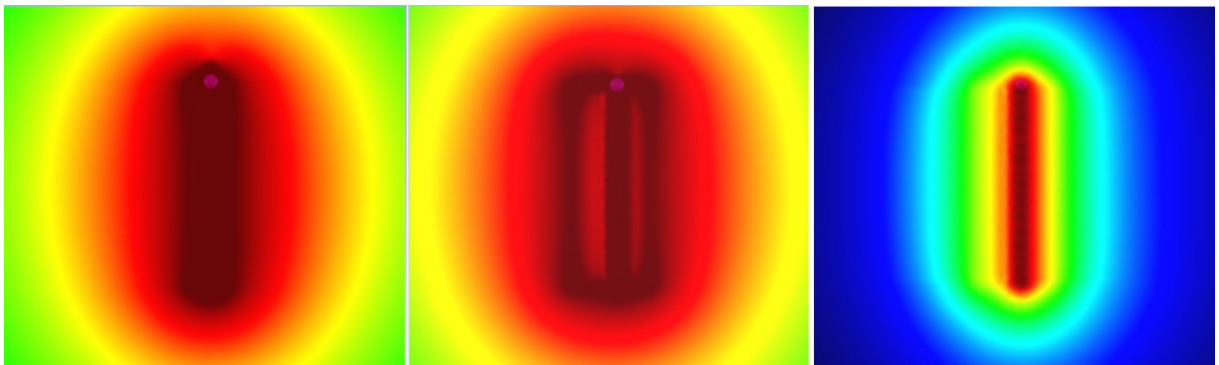
Em seguida, na figura 74 e 75 podemos observar da mesma forma os resultados das simulações na mesma escala, na primeira delas podemos observar a disposição das trilhas no mapa de calor, enquanto na segunda não. O mesmo comportamento é visto nas simulações, o modelo A tem a parte de seu campo com maior intensidade menor do que a do modelo B, onde é possível ainda ver que o campo tem mais intensidade nas bordas, efeito do plano de referência desconectado. Na última parte o campo é muito menor, estando em sua maior parte sobre a trilha geradora.

Figura 73– Placa 1 A, B e C na mesma escala (400kHz)



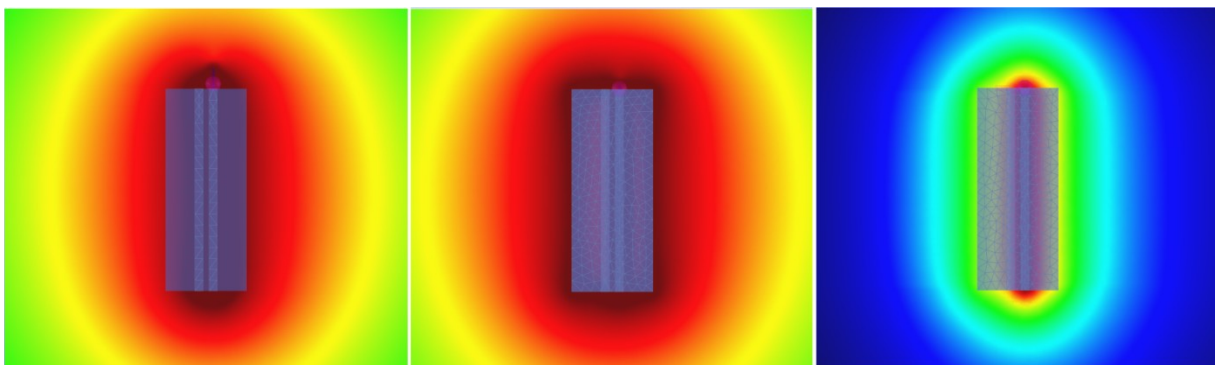
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 74– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 1 (400kHz)



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 75– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 2 (400kHz)



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para os estudos em 1GHz, na figura 74 temos os resultados das medições práticas, seguindo o mesmo padrão das placas em 400kHz, e em seguida na figura 77 e 78 o correspondente na simulação.

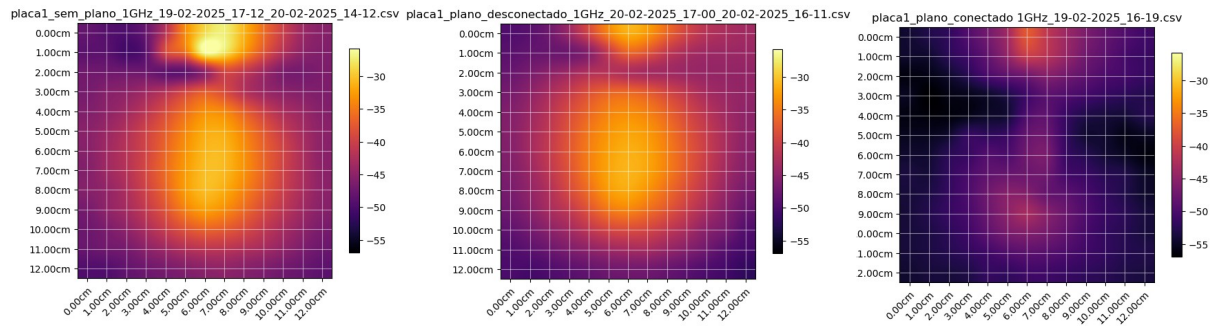
Na figura 76 pode-se notar que o campo no primeiro modelo é sutilmente menor do que no segundo ensaio. No terceiro experimento a eficácia do uso correto do plano é novamente evidenciada, exibindo um campo elétrico significativamente menor que nos outros.

Em relação ao campo que surge no conector, este também é minimizado quando a técnica de plano de referência é usada.

Já em relação as simulações este padrão se mantém. Conforme se observa na figura 77 o primeiro ensaio possui uma área de campo elétrico menor que no segundo experimento. Observando a figura 78, podemos notar que a área de maior intensidade do campo está sobre a trilha vítima também, em ambos os casos. Entretanto no modelo B essa grande intensidade se propaga por uma área maior, a partir das bordas do plano de referência.

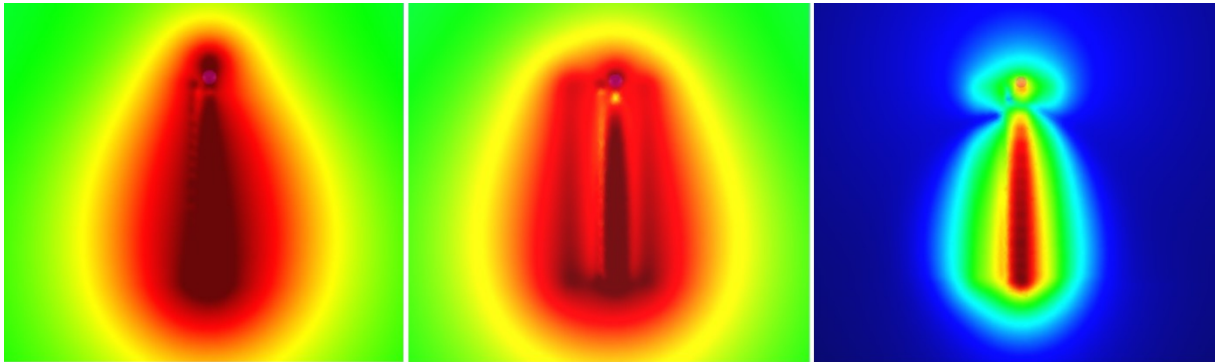
Em relação ao modelo C, não só a intensidade do campo é muito menor, como pode ser visto na figura 77, como está quase toda sobre a trilha geradora, conforme figura 78.

Figura 76– Placa 1 A, B e C na mesma escala (1GHz)



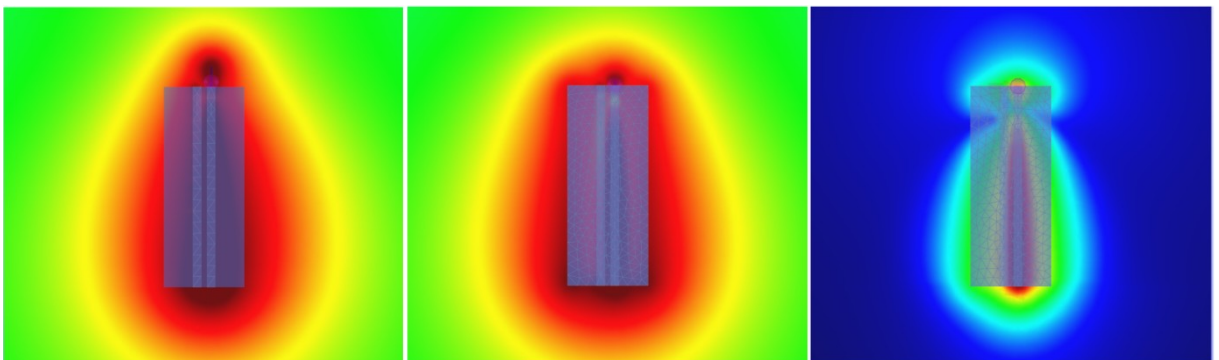
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 77– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 1 (1GHz)



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 78– Placa 1 A, B e C na mesma escala simulado 2 (1GHz)



Fonte: Elaboração própria (2025).

É possível notar na análise prática que as placas se comportaram como o esperado. O uso de um plano de referência conectado ao 0v, ou terra, fornece um caminho para todas correntes de retorno, dessa forma estas correntes circulam pelo plano e não pelas trilhas. (Liz, 2003).

Cada trilha geradora usa o espaço entre ela e a referência para transportar a energia de seu campo, a diminuição deste espaço confina melhor o campo, minimizando a quantidade de interferência do tipo *crosstalk* que este pode causar em trilhas próximas. (Morrison, 2007)

Como é possível perceber, os modelos de placa sem um plano de referência exibem um campo elétrico forte na região das trilhas.

Ao se adicionar o plano, porém sem ele estar conectado na referência do sinal, toda a superfície de cobre adicionada aumenta os problemas de acoplamento, resultando em uma área de campo elétrico maior e de maior densidade sobre as trilhas. As bordas das placas também apresentam maior intensidade, pois toda a superfície de cobre passa a agir como uma antena.

Entretanto o uso correto do plano de referência confina em muito a energia do campo elétrico, e diminui significativamente sua interferência na trilha vítima, ou seja, minimiza o *crosstalk*. Concentrando a maior parte da energia do campo, sobre a trilha geradora.

4.2.2 Análise e comparação da Placa 2

A seguir serão comparados os resultados, prático com prático, e simulado com simulado. Dessa forma será possível verificar se o sistema se comportou como o esperado.

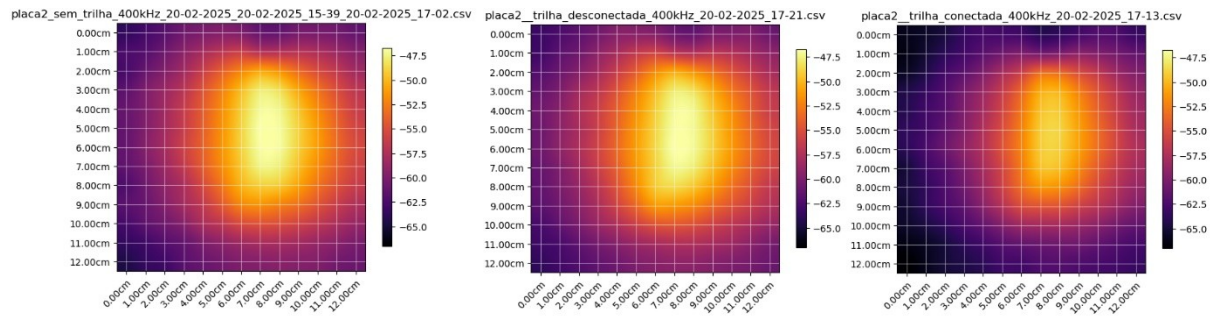
Na figura 79 é possível observar o mapa de calor, das medidas feitas para a placa 2, na frequência de 400kHz e na mesma escala. Em seguida ao observar a figura 80 e 81 são exibidos os resultados das simulações para essas condições.

Na figura 79 é possível notar que pouca diferença existe entre o modelo A e o B, apenas uma área branca, mais intensa, sutilmente maior no modelo B. Entretanto no modelo C fica evidenciada a diminuição do campo elétrico quando este está devidamente conectado.

Quando olhamos as simulações este comportamento é reforçado. Olhando para a figura 80 o modelo B demonstra o campo elétrico de maior intensidade sobre as bordas da placa em relação ao modelo A. Ao olharmos para a figura 81, podemos notar no modelo B um campo de maior intensidade entre as trilhas de guarda e a vítima.

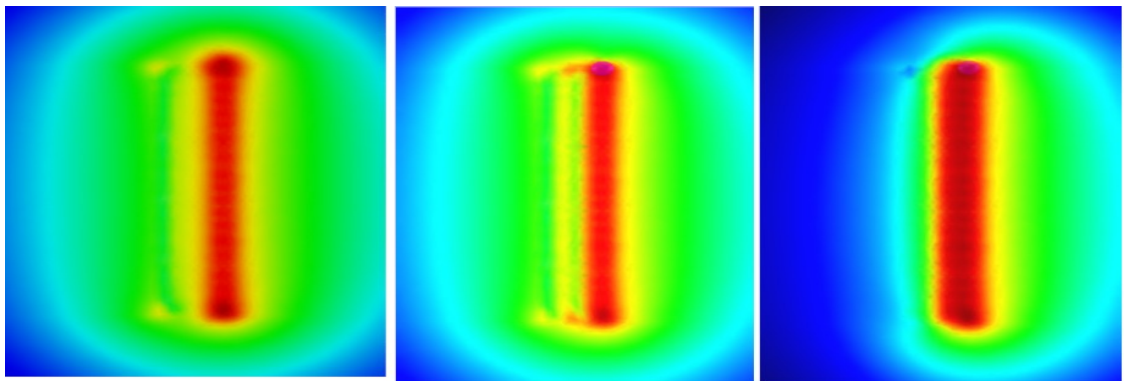
A figura 80 demonstra ainda como todo o campo fica concentrado em uma área, que olhando para a figura 81, podemos visualizar que esta área está sobre a trilha geradora e a de guarda, evitando sua influência na vítima.

Figura 79– Placa 2 modelos A, B e C (400kHz)



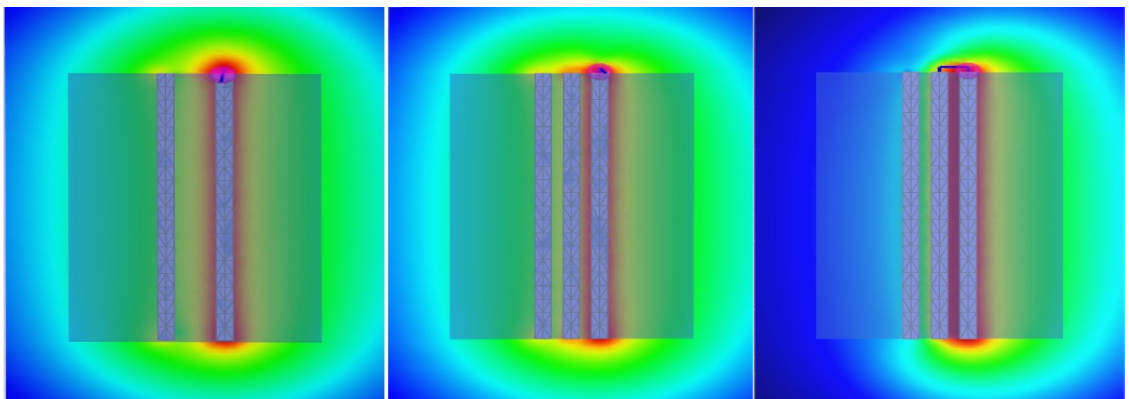
Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 80– Placa 2 modelos A, B e C (400kHz simulado 1)



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 81– Placa 2 modelos A, B e C (400kHz simulado 2)



Fonte: Elaboração Própria (2025).

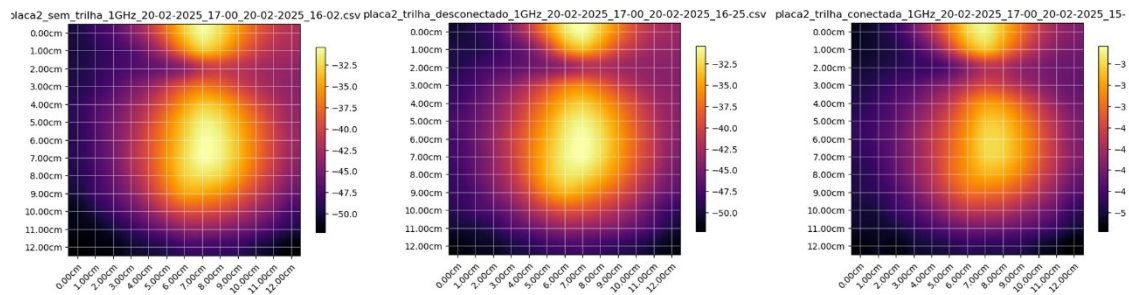
A seguir na figura 82 é exposto o resultado em escala para todas as medidas da placa 2 em 1GHz, e nas figuras 82 e 83 o resultado das simulações sobre a mesma escala.

A figura 82 mostra uma dificuldade entre diferenciar sem trilha de guarda e com a trilha de guarda desconectada. Esta dificuldade pode estar relacionada ao equipamento utilizado e as baixas energias dissipadas. Entretanto quando a trilha de guarda está conectada, sua eficiência é comprovada. Em todos os modelos o campo sobre o conector aparece, bem como a interferência destrutiva entre ele e o campo da trilha geradora. O uso da trilha de guarda também diminui o campo elétrico sobre o conector.

Em relação as simulações, é possível observar na figura 83 que novamente o campo do modelo B tende a ser mais forte nas bordas da placa e no espaço onde está a trilha de guarda do que o modelo A. A figura 84 demonstra a posição das trilhas em relação ao campo.

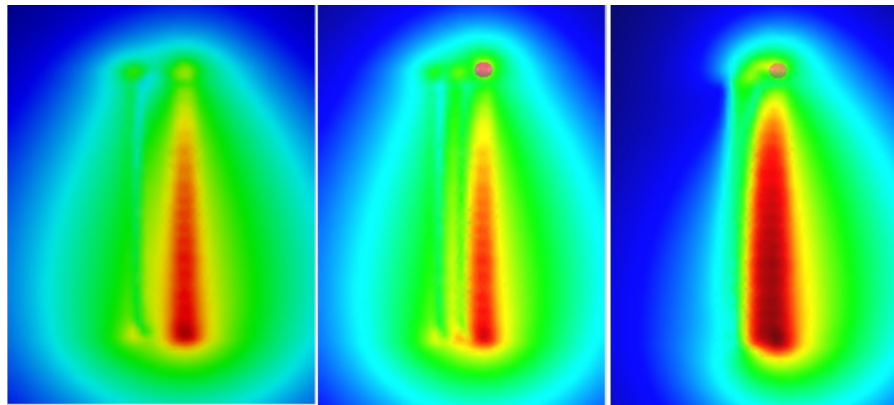
Ao conectar a trilha de guarda a maior parte da energia do campo elétrico fica confinada sobre uma região, conforme figura 83, e ao visualizar a figura 84, é possível notar que este espaço corresponde as trilhas de guarda e a geradora.

Figura 82– Placa 2 modelos A, B e C (1GHz)



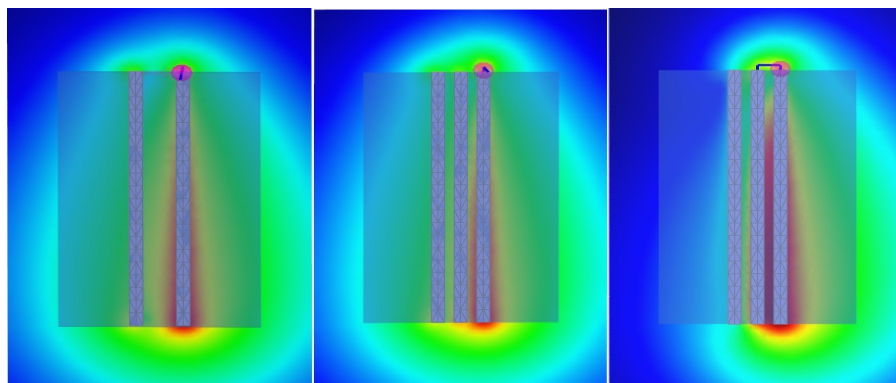
Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 83– Placa 2 modelos A, B e C (1GHz simulado 1)



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 84 – Placa 2 modelos A, B e C (1GHz simulado 2)



Fonte: Elaboração Própria (2025).

De acordo com Bogatin (2010) trilha de guarda é uma trilha colocada entre a trilha agressora e a trilha vítima com o objetivo de agir como escudo para o campo

irradiado pela agressora. Ainda segundo o autor a trilha de guarda deve estar na referência, caso contrário o ruído gerado por ela será maior ao obtido antes de seu posicionamento, porém se corretamente posicionada se mostra um método eficaz de reduzir o ruído gerado pela trilha agressora.

Sobre este prisma se pode dizer que os circuitos se comportaram como esperado.

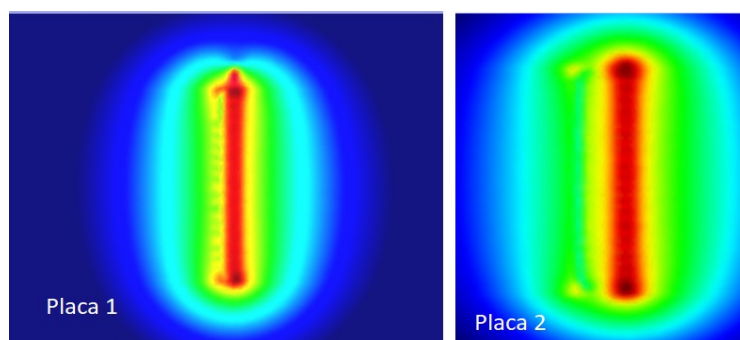
As placas sem trilha de guarda irradiaram livremente seu campo elétrico. Porém ao se comparar com as placas com trilha de guarda desconectada, podemos notar uma influência maior na trilha vítima pela maior proximidade da cor amarela a ela. Este efeito, embora de maneira sutil, pode ser visualizado nos resultados práticos pela maior intensidade da cor branca nos centros da imagem.

Ao conectar a trilha de guarda na referência não só podemos notar a diminuição da intensidade do campo pela cor, como ao olhar as simulações, é possível visualizar uma linha entre a trilha de guarda e a vítima, com uma repentina redução de energia.

4.2.3 Diferença entre placa 1 e 2 sem referência

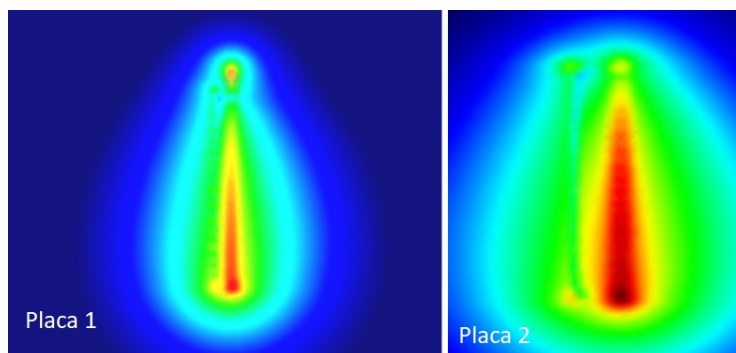
Ao comparar o obtido entre a placa 1 e a placa 2 nota-se uma grande diferença no efeito de *crosstalk*. Isso se deve ao maior distanciamento entre as trilhas. Na placa a distância entre elas é de 1.5mm enquanto na placa 2 é de 5mm. Nas figuras 85 podemos observar a comparação desses dois modelos em 400kHz, e na figura 86 em 1GHz, ambas as figuras estão na mesma escala.

Figura 85 – Placa 1 A e Placa 2 A (400kHz)



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 86 – Placa 1 A e Placa 2 A (1GHz)



Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.2.4 Diferenças entre 400kHz e 1GHz

Ao observar os resultados em 400kHz, levando em conta medições práticas na mesma escala, e simulações. É possível notar que o padrão de comportamento é o esperado. Entretanto é possível notar o impacto de uma frequência muito maior nestes sistemas. Tanto na prática quando no simulado, as deformações no formato do campo elétrico se tornam muito mais visíveis, frutos de acoplamentos indutivos e capacitivos entre os elementos do sistema, que se beneficiam com o aumento da frequência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à complexidade dos projetos de tecnologia do mundo hoje, a alta demanda pelos mesmos e pelos constantes avanços necessário, o tempo que se leva para o desenvolvimento pode fazer toda a diferença entre um projeto bem sucedido e um não.

Um projeto mal concebido pode levar a grandes prejuízos. Se uma falha for descoberta após o processo de fabricação, ou mesmo durante, pode acabar sendo tarde demais. Por isso a fase de planejamento e concepção é tão importante.

A simulação de um projeto entra então neste ponto como uma poderosa aliada, podendo prever o comportamento de todo o sistema e dando ao projetista oportunidade de antecipar falhas ou comportamentos não desejados.

Ao longo deste estudo foi buscado entender se o uso do *software* **EMCoS** poderia contribuir para antecipar e entender problemas de compatibilidade eletromagnética. Para isso foram escolhidos alguns modelos de placas simples com o objetivo de tentar reproduzir no computador o que era obtido na prática. O que parece um pouco contra intuitivo, entretanto o objetivo era entender sobre o software, sobre seu funcionamento, como utilizá-lo da maneira correta e o que ele poderia fornecer.

Em relação ao uso do software o objetivo foi alcançado, não apenas as placas puderam ser modeladas como os resultados foram satisfatórios quando comparados aos resultados práticos. Seu *software* de auxílio, **SimDAT**, também se mostrou um poderoso aliado para a visualização e comparação dos resultados obtidos. Nestes resultados é possível não apenas ver o campo elétrico gerado, mas a influência do mesmo na trilha vítima, ou seja, foi possível visualizar o efeito de *crosstalk* na mesma.

Seus resultados também oferecem um novo ponto de vista para a compreensão dos campos eletromagnéticos, permitindo uma visualização em três dimensões de conceitos que podem ser difíceis de visualizar, como as linhas de campos.

Por este ponto de vista, podemos considerar que foi obtido o resultado esperado. Não só os mapas de calor do campo elétrico simulado foram próximos aos obtidos na bancada, como ele forneceu uma visão clara sobre o comportamento desses campos ao longo de toda a placa.

Em relação aos testes de bancada, embora alguns desafios inesperados tenham aparecido, como a geração da onda de 1Ghz com força suficiente para ser medida pela antena, e a dificuldade em visualizar no analisador de espectro a baixa energia irradiada em 400kHz. No fim, ainda que em alguns casos de maneira muito sutil, podemos observar que todas as placas se comportaram como o esperado em relação ao observado pelas simulações.

A percepção de problemas de CEM que podem estar ocorrendo se torna muito mais fáceis quando podemos visualizar os campos. Por exemplo o *crosstalk*. Podemos observar nitidamente este efeito quando comparamos por exemplo a placa com a trilha de guarda fora da referência e a ligada a referência.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros pode ser interessante continuar os estudos sobre as funcionalidades deste software e outros modelos de placas ou dispositivos. Por exemplo a simulação de antenas ou tentar recriar um campo de área próximo que englobe todo o objeto de estudo, fornecendo um resultado tridimensional.

REFERÊNCIAS

- Anatel. **Ato nº 1120, de 19 de fevereiro de 2018**. 2018. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/95-atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2018/1181-ato-1120>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- BENFICA, Juliano D'Ornellas. **Plataforma para desenvolvimento de SoC (System-on-Chip) robusto à interferência eletromagnética**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- BITTAR, G. L. A, & RAIZER, A. **Compatibilidade Eletromagnética em Equipamentos de Telecomunicações no Cenário Nacional**. XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBrT'05. Campinas, SP, 2005.
- BOGATIN, Eric. **SIGNAL AND POWER INTEGRITY: simplified**. 2. ed. Boston: Pearson Education, 2010.
- CANIGGIA, Spartaco; MARADEI, Francescaromana. **SIGNAL INTEGRITY AND RADIATED EMISSION OF HIGH-SPEED DIGITAL SYSTEMS**. Chichester: John Wiley And Sons, 2008.
- GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- GODOY, Arilda Schmidt. **INTRODUÇÃO À PESQUISA QUALITATIVA E SUAS POSSIBILIDADES**. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, mar. 1995.
- GREF, GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (São Paulo). **Física 3: Eletromagnetismo**. 5. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: volume3: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006.
- LIZ, Muriel Bittencourt de. **CONTRIBUIÇÃO PARA A REDUÇÃO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM FONTES CHAVEADAS**. 2003. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- LIZ, Muriel Bittencourt de. **Introdução à Compatibilidade Eletromagnética em Conversores Estáticos**. 1999. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/81098/143022.pdf?sequence=1>. Acesso em: 08 out. 2024.
- LUIZ, A. **SISTEMA AUTOMÁTICO DE RASTREAMENTO DE CAMPO PRÓXIMO**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Santa Catarina. 2022.

MELO, Paulo Roberto de Sousa; RIOS, Evaristo Carlos Silva Duarte; GUTIERREZ, Regina Maria Vinhais. **Placas de circuito impresso: mercado atual e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.14 , p. [111]-136, set. 2001.

MONTROSE, Mark I. **Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: a handbook for designers**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
MOREIRA, Omar Moore de. **Metodologia do projeto: planejamento, execução e gerenciamento**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2013.

MORRISON, Ralph. **GROUNDING AND SHIELDING: circuits and interference**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica 3: eletromagnetismo**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2018.

OLIVEIRA, Carlos Jacinto de; SANTOS, Antonio Carlos Santana dos. **Física: eletricidade e magnetismo ii**. Fortaleza: Editora da Universidade Estadual do Ceará, 2015.

PAUL, Clayton R. **Eletromagnetismo para Engenheiros: com aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

PAUL, Clayton R.. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

PEREIRA, Jeferson André. **Fenômenos Eletromagnéticos e sua visualização: um obstáculo de aprendizagem**. 2011. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em:
<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/95812>. Acesso em: 14 out. 2024.

PINHO, Antonio Carlos et al. **ANÁLISE DE INTEGRIDADE DE SINAL, EMISSÃO ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA EM PLACA CONTROLADORA DE IMPRESSÃO**. Disponível em:
https://www.academia.edu/6831925/ANÁLISE_DE_INTEGRIDADE_DE_SINAL_EMISSÃO_ELETROMAGNÉTICA_E_TÉRMICA_EM_PLACA_CONTROLADORA_DE_IMPRESSÃO. Acesso em: 17 fev. 2025.

SANCHES, Durval. **Tópicos Especiais em Eletrônica: interferência eletromagnética - emi**. Joinville: Clube de Autores, 2014.

SCHLICHTING, Luis Carlos Martinhago. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA APLICADA AOS CONVERSORES ESTÁTICOS**. 2003. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SERPA, Francisco Silva e; BEZERRA, Wellington Oliveira Aguiar. **Estudo de blindagens para redução de crosstalk entre linhas de transmissão de microfita / Study of shields to reduce crosstalk between microstrip**

transmission lines. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 11841-11852, 15 fev. 2022. South Florida Publishing LLC.
<http://dx.doi.org/10.34117/bjdv8n2-226>.

SIQUEIRA, Felipe Coelho. **As equações de maxwell e as ondas eletromagnéticas / Maxwell's equations and electromagnetic waves**. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 7, n. 9, p. 93571-93589, 28 set. 2021. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n9-497>.

SOARES, Eduardo Prado. **Introdução a Compatibilidade Eletromagnética Automotiva**. 2013. 75 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

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