

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

**THAÍS SILVA LISATCHOK**

**ESTUDO DA MITIGAÇÃO DE *CROSSTALK* EM PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO POR MEIO DE SIMULAÇÕES NO *SOFTWARE*  
*EMCOS STUDIO***

**FLORIANÓPOLIS, 2025.**

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

**THAÍS SILVA LISATCHOK**

**ESTUDO DA MITIGAÇÃO DE *CROSSTALK* EM PLACAS DE  
CIRCUITO IMPRESSO POR MEIO DE SIMULAÇÕES NO *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  
Engenheira em Eletrônica.

Orientador:  
Prof. Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr

**FLORIANÓPOLIS, 2025.**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Lisatchok, Thaís Silva

Estudo da mitigação de *crosstalk* em placas de circuito impresso por meio de simulações no *software* EMCoS *Studio* / Thaís Silva Lisatchok; orientação de Luis Carlos Martinhago Schlichting; coorientação de Geraldo José Adabo - Florianópolis, SC, 2025.

122 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. *Crosstalk*. 2. Compatibilidade eletromagnética. 3. Simulação bidimensional. 4. Integridade dos sinais. 5. EMCoS *Studio*. I. Martinhago Schlichting, Luis Carlos. II. Adabo, Geraldo José. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Estudo da mitigação de *crosstalk* em placas de circuito impresso por meio de simulações no *software* EMCoS *Studio*.

**ESTUDO DA MITIGAÇÃO DE CROSSTALK EM PLACAS DE CIRCUITO  
IMPRESSO POR MEIO DE SIMULAÇÕES NO SOFTWARE EMCOS STUDIO**

**THAÍS SILVA LISATCHOK**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira em Eletrônica 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, 04 de Setembro, 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **LUIS CARLOS MARTINHAGO SCHLICHTING**  
Data: 15/09/2025 15:55:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr

Documento assinado digitalmente  
 **GERALDO JOSE ADABO**  
Data: 16/09/2025 11:57:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Geraldo José Adabo, Dr  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Documento assinado digitalmente  
 **REGINALDO STEINBACH**  
Data: 15/09/2025 19:21:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

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

Documento assinado digitalmente  
 **JOABEL MOIA**  
Data: 15/09/2025 18:31:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Joabel Moia, Dr  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

À minha querida avó, minha eterna *Dindinha*, que sempre acreditou em mim e me impulsionou a seguir o caminho do conhecimento. Sua sabedoria, carinho e apoio foram fundamentais para o meu crescimento. Embora não esteja mais fisicamente ao meu lado, sua presença continua viva a me guiar e me motivar a alcançar novas conquistas. Este trabalho é um reflexo do seu legado e da sua fé em mim.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, sabedoria e paciência ao longo de minha jornada estudantil. Sem sua orientação divina, eu não teria superado os desafios que encontrei ao longo dos anos de meus estudos.

À minha mãe, que, com tanto amor e dedicação, enfrentou dias de muito sol para me proporcionar a sombra. Ela, que sempre acreditou na educação como a chave para o meu futuro. Sou imensamente grata por sua força, carinho e por me ensinar o valor do esforço e da persistência. Me amo muito você, Biju.

Ao meu irmão, meu melhor amigo, que sempre esteve ao meu lado, especialmente nas rotinas corridas de estudo. Recordo com carinho os incontáveis momentos em que, quando morávamos juntos, ele aparecia com o café da manhã na cama, além das inúmeras demonstrações de carinho, “te amo mais”.

Ao meu paidrinho, que sempre acreditou em mim e me apoiou em todas as fases da minha vida. Seu incentivo foi essencial para minhas conquistas.

À toda a minha família, que, de diferentes formas contribuíram no meu caminho. Apesar de não citar todos os nomes, quero expressar minha gratidão. Mesmo com a distância, sempre me fizeram sentir acolhida, presente e apoiada.

Ao meu namorado, Guido, agradeço por ter surgido na minha vida, trazendo mais significado e leveza. Sua gentileza, fé e confiança em mim, especialmente nos momentos de dúvida, me fortaleceram. Obrigada pelo apoio, tornando cada desafio mais fácil de ser enfrentado, sua parceria foi fundamental. Agradeço também à sua família, que me acolheu com afeto desde o início, me fazendo sentir em casa. Por meio de vocês, ganhei uma segunda família.

Ao Professor Schlichting, meu orientador, minha eterna gratidão. Desde o início desta jornada, muito antes de ser oficialmente orientada, sempre admirei a sua dedicação e personalidade. Seu apoio constante foi essencial para minha trajetória. Agradeço também ao meu coorientador, Professor Adabo, por sua contribuição valiosa a meu trabalho, e pelo apoio dedicado, mesmo à distância. Sou grata por aprender com vocês, tanto profissionalmente quanto como ser humano.

Aos meus amigos de Florianópolis, que sempre estiveram ao meu lado, tornando essa jornada mais leve e sendo refúgio nos dias estressantes. Por fim, aos meus amigos de infância, meu carinho e gratidão por estarem presentes em tantas fases da minha vida.

"Sê humilde para evitar o orgulho, mas voa alto para alcançar a sabedoria".  
Santo Agostinho

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a modelagem e a simulação bidimensional de campos elétricos em placas de circuito impresso (PCIs), com foco na análise do fenômeno de *crosstalk*, um dos principais responsáveis por falhas de integridade de sinal em sistemas eletrônicos. A proposta surge da necessidade de compreender, em maior profundidade como o acoplamento indesejado entre trilhas condutoras influencia a distribuição dos campos eletromagnéticos, especialmente em aplicações de alta frequência e elevada densidade de circuitos, nas quais pequenas variações geométricas podem comprometer o desempenho do sistema. Para esse fim, foram desenvolvidos modelos bidimensionais no *software* EMCoS *Studio*, representando diferentes configurações de trilhas, com variações em espaçamento, presença ou não de plano de referência e uso de trilhas de guarda. As simulações mostraram coerência com os princípios teóricos da compatibilidade eletromagnética e forneceram uma visualização espacial detalhada que favorece a identificação de pontos críticos no projeto de PCIs. Conclui-se que, por meio do *software* EMCoS *Studio*, foi possível realizar uma análise mais aprofundada e precisa dos fenômenos eletromagnéticos. A simulação no *software* proporcionou uma visualização detalhada e controlada, permitindo a avaliação de múltiplas variáveis de forma mais eficiente e segura, e, assim, oferecendo novas perspectivas para o diagnóstico e mitigação de interferências em projetos reais. Dessa forma, verifica-se que o trabalho contribui para ampliar a compreensão dos mecanismos de *crosstalk* em PCIs e reforça a importância do uso de ferramentas de simulação na etapa de concepção de sistemas eletrônicos.

**Palavras-chave:** *Crosstalk*; Compatibilidade eletromagnética; Campos elétricos; Modelagem; Simulação bidimensional; EMCoS *Studio*; Integridade dos sinais.

## ABSTRACT

This work aims at the two-dimensional modeling and simulation of electric fields in printed circuit boards (PCBs), focusing on the analysis of the crosstalk phenomenon, one of the main causes of signal integrity failures in electronic systems. The proposal stems from the need to understand more deeply how the undesired coupling between conductive traces influences the distribution of electromagnetic fields, especially in high-frequency and high-density circuit applications, in which small geometric variations can compromise system performance. To this end, two-dimensional models were developed in the EMCoS Studio software, representing different trace configurations, with variations in spacing, presence or absence of a reference plane, and the use of guard traces. The simulations showed consistency with the theoretical principles of electromagnetic compatibility and provided a detailed spatial visualization that favors the identification of critical points in PCB design. It is concluded that, through the EMCoS Studio software, it was possible to carry out a more in-depth and accurate analysis of electromagnetic phenomena. The simulation in the software provided a detailed and controlled visualization, allowing for the evaluation of multiple variables more efficiently and safely, thus offering new perspectives for diagnosing and mitigating interference in real projects. Therefore, it is verified that this work contributes to expanding the understanding of crosstalk mechanisms in PCBs and reinforces the importance of using simulation tools in the design stage of electronic systems.

**Keywords:** Crosstalk; Electromagnetic compatibility; Electric fields; Modeling; Bidimensional simulation; EMCoS Studio; Signal integrity.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Diagrama em blocos do problema de acoplamento .....                                                        | 26 |
| Figura 2 – Distribuição do campo elétrico e magnético entre trilhas paralelas em uma PCI com plano de referência..... | 31 |
| Figura 3 – Representação esquemática das regiões de campo próximo e campo distante.....                               | 32 |
| Figura 4 – Representação elétrica genérica de uma PCI.....                                                            | 34 |
| Figura 5 – Comparação da distribuição do campo elétrico em função da altura da trilha .....                           | 35 |
| Figura 6 – Representação das linhas de força do campo elétrico e propagação entre trilhas condutoras .....            | 36 |
| Figura 7 – Ilustração dos efeitos de <i>crosstalk</i> entre trilhas em uma PCI.....                                   | 37 |
| Figura 8 – Interface de modelagem no EMCoS <i>Studio</i> .....                                                        | 39 |
| Figura 9 – Visualização de ferramentas de pós-processamento 2D no SimDAT .....                                        | 40 |
| Figura 10 – Representação esquemática de duas trilhas paralelas sem plano de referência .....                         | 44 |
| Figura 11 – Representação esquemática de duas trilhas paralelas com plano de referência inferior .....                | 45 |
| Figura 12 – Representação esquemática de trilhas paralelas com trilha de guarda sem plano de referência inferior..... | 45 |
| Figura 13 – Representação esquemática de trilhas paralelas com trilha de guarda com plano de referência inferior..... | 46 |
| Figura 14 – Representação esquemática de trilhas paralelas com trilha de guarda sem plano de referência inferior..... | 46 |
| Figura 15 – Lista de variáveis do projeto 1a.....                                                                     | 47 |
| Figura 16 – Modelagem final do projeto 1a .....                                                                       | 49 |
| Figura 17 – Project tree do projeto 1a .....                                                                          | 50 |
| Figura 18 – <i>Calculation Task</i> do projeto 1a.....                                                                | 51 |
| Figura 19 – Simulação no SimDATA do projeto 1a.....                                                                   | 53 |
| Figura 20 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1a .....                        | 57 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1a .....                                             | 57 |
| Figura 22 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1b .....                            | 58 |
| Figura 23 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1b .....                                             | 58 |
| Figura 24 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1c .....                            | 59 |
| Figura 25 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1c.....                                              | 59 |
| Figura 26 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1d .....                            | 60 |
| Figura 27 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1d .....                                             | 60 |
| Figura 28 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1e ( <i>off</i> ).....              | 61 |
| Figura 29 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1e ( <i>off</i> ) ....                               | 61 |
| Figura 30 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1e ( <i>on</i> ).....               | 62 |
| Figura 31 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1e ( <i>on</i> ) ....                                | 62 |
| Figura 32 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2a desconectada .....               | 63 |
| Figura 33 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2a desconectada.....                                 | 63 |
| Figura 34 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2b desconectada .....               | 64 |
| Figura 35 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2b desconectada.....                                 | 64 |
| Figura 36 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2d desconectada .....               | 65 |
| Figura 37 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2d desconectada.....                                 | 65 |
| Figura 38 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e ( <i>off</i> ) desconectada..... | 66 |
| Figura 39 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e ( <i>off</i> ) desconectada.....                  | 66 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 40 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (on) desconectada..... | 67 |
| Figura 41 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (on) desconectada.....                  | 67 |
| Figura 42 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2a conectada.....         | 68 |
| Figura 43 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2a conectada .....                         | 68 |
| Figura 44 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2b conectada.....         | 69 |
| Figura 45 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2b conectada .....                         | 69 |
| Figura 46 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2d conectada.....         | 70 |
| Figura 47 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2d conectada .....                         | 70 |
| Figura 48 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (off) conectada .....  | 71 |
| Figura 49 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (off) conectada.....                    | 71 |
| Figura 50 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (on) conectada .....   | 72 |
| Figura 51 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (on) conectada.....                     | 72 |
| Figura 52 – Distribuição escalar do campo elétrico em dBV/m (configurações 1a, 1b e 1d) .....                   | 77 |
| Figura 53 – Distribuição escalar do campo elétrico em V/m (configurações 1a, 1b e 1d) .....                     | 78 |
| Figura 54 – Visualização superior com transparência (configurações 1a, 1b e 1d) ..                              | 79 |
| Figura 55 – Visualização superior com wireframe (configurações 1a, 1b e 1d) .....                               | 80 |
| Figura 56 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1a, 1b e 1d) .....                         | 81 |
| Figura 57 – Distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1b e 1c) .....                                | 83 |
| Figura 58 – Visualização superior com wireframe (configurações 1b e 1c) .....                                   | 84 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 59 – Visualização superior com transparência (configurações 1b e 1c) .....                                                      | 85  |
| Figura 60 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1b e 1c) .....                                                    | 86  |
| Figura 61 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1e <i>off</i> e 1e <i>on</i> ) .....                 | 88  |
| Figura 62 – Visualização superior com wireframe (configurações 1e <i>off</i> e 1e <i>on</i> ) ....                                     | 89  |
| Figura 63 – Visualização superior com transparência (configurações 1e <i>off</i> e 1e <i>on</i> ) .....                                | 90  |
| Figura 64 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1e <i>off</i> e 1e <i>on</i> ) .....                              | 91  |
| Figura 65 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1a, 2a desconectada e 2a conectada) .....            | 94  |
| Figura 66 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1a, 2a desconectada e 2a conectada) .....                         | 95  |
| Figura 67 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1b, 2b desconectada e 2b conectada) .....            | 96  |
| Figura 68 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1b, 2b desconectada e 2b conectada) .....                         | 97  |
| Figura 69 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1d, 2d desconectada e 2d conectada) .....            | 98  |
| Figura 70 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1d, 2d desconectada e 2d conectada) .....                         | 99  |
| Figura 71 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2a, 2b e 2d com plano desconectado) .....            | 101 |
| Figura 72 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2a, 2b e 2d com plano desconectado) .....                         | 102 |
| Figura 73 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2a, 2b e 2d com plano conectado) .....               | 104 |
| Figura 74 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2a, 2b e 2d com plano conectado) .....                            | 105 |
| Figura 75 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações <i>off</i> 1e, 2e desconectada e 2e conectada) ..... | 107 |
| Figura 76 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações <i>off</i> 1e, 2e desconectada e 2e conectada) .....              | 108 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 77 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações <i>on</i> 1e, 2e desconectada e 2e conectada) ..... | 110 |
| Figura 78 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações <i>on</i> 1e, 2e desconectada e 2e conectada) .....              | 111 |
| Figura 79 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2e <i>off</i> e 2e <i>on</i> desconectada) .....    | 113 |
| Figura 80 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2e <i>off</i> e 2e <i>on</i> desconectada).....                  | 114 |
| Figura 81 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2e <i>off</i> e 2e <i>on</i> conectada).....        | 116 |
| Figura 82 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2e <i>off</i> e 2e <i>on</i> conectada).....                     | 117 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Critérios de EMC .....                                  | 25 |
| Quadro 2 – Principais causas de perda de integridade de sinal..... | 29 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Parâmetros geométricos das configurações simuladas ..... | 43 |
|---------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                                                                                                       |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CISPR | <i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i> (Comitê Internacional Especial de Perturbações Radioelétricas) |
| DAE   | Departamento Acadêmico de Eletrotécnica                                                                                               |
| EMC   | <i>Electromagnetic Compatibility</i>                                                                                                  |
| EMI   | <i>Electromagnetic Interference</i>                                                                                                   |
| FCC   | <i>Federal Communications Commission</i> (Comissão Federal de Comunicações – EUA)                                                     |
| IEC   | <i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)                                               |
| IFSC  | Instituto Federal de Santa Catarina                                                                                                   |
| MAS   | <i>Method of Auxiliary Sources</i>                                                                                                    |
| MoM   | <i>Method of Moments</i> (MoM)                                                                                                        |
| PCB   | <i>Printed Circuit Board</i>                                                                                                          |
| PCI   | Placa de Circuito Impresso                                                                                                            |
| PEEC  | <i>Partial Element Equivalent Circuit</i>                                                                                             |
| SI    | <i>Signal Integrity</i>                                                                                                               |

## SUMÁRIO

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                             | <b>20</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa.....</b>                                          | <b>21</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Definição do Problema.....</b>                                  | <b>22</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivo Geral.....</b>                                         | <b>22</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Objetivos Específicos.....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>1.5</b> | <b>Estrutura do Trabalho.....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>2</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                  | <b>25</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Compatibilidade Eletromagnética.....</b>                        | <b>25</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Integridade de Sinais.....</b>                                  | <b>28</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Campo Elétrico.....</b>                                         | <b>29</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Campo Próximo e Campo Distante.....</b>                         | <b>31</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Placas de Circuito Impresso (PCIs).....</b>                     | <b>33</b> |
| <b>2.6</b> | <b><i>Crosstalk</i>.....</b>                                       | <b>35</b> |
| <b>2.7</b> | <b><i>Software EMCoS Studio</i>.....</b>                           | <b>38</b> |
| 2.7.1      | Trabalho anterior na instituição sobre o <i>EMCoS Studio</i> ..... | 40        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA.....</b>                                            | <b>42</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Planejamento das Simulações.....</b>                            | <b>42</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Modelagem Bidimensional.....</b>                                | <b>47</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Critérios de Análise.....</b>                                   | <b>53</b> |
| <b>4</b>   | <b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>                            | <b>56</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Modelagem das Configurações Simuladas.....</b>                  | <b>56</b> |
| 4.1.1      | Configuração 1a (sem plano de referência).....                     | 56        |
| 4.1.2      | Configuração 1b (sem plano de referência).....                     | 57        |
| 4.1.3      | Configuração 1c (sem plano de referência).....                     | 58        |
| 4.1.4      | Configuração 1d (sem plano de referência).....                     | 59        |
| 4.1.5      | Configuração 1e (sem plano, trilha de guarda <i>off</i> ).....     | 60        |

|            |                                                                                     |            |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.6      | Configuração 1e (sem plano, trilha de guarda <i>on</i> ).....                       | 61         |
| 4.1.7      | Configuração 2a (plano de referência desconectado).....                             | 62         |
| 4.1.8      | Configuração 2b (plano de referência desconectado).....                             | 63         |
| 4.1.9      | Configuração 2d (plano de referência desconectado).....                             | 64         |
| 4.1.10     | Configuração 2e (plano de referência desconectado, trilha de guarda <i>off</i> )... | 65         |
| 4.1.11     | Configuração 2e (plano de referência desconectado, trilha de guarda <i>on</i> )...  | 66         |
| 4.1.12     | Configuração 2a (plano de referência conectado).....                                | 67         |
| 4.1.13     | Configuração 2b (plano de referência conectado).....                                | 68         |
| 4.1.14     | Configuração 2d (plano de referência conectado).....                                | 69         |
| 4.1.15     | Configuração 2e (plano de referência conectado, trilha de guarda <i>off</i> ).....  | 70         |
| 4.1.16     | Configuração 2e (plano de referência conectado, trilha de guarda <i>on</i> ).....   | 71         |
| <b>4.2</b> | <b>Análise Comparativa dos Resultados.....</b>                                      | <b>72</b>  |
| 4.2.1      | Comparação entre Diferentes Distâncias entre Trilhas.....                           | 74         |
| 4.2.2      | Comparação entre Diferentes Comprimentos de Trilha.....                             | 82         |
| 4.2.3      | Comparação entre Presença ou Ausência de Trilha de Guarda.....                      | 86         |
| 4.2.4      | Comparação entre Presença ou Ausência de Plano de Referência.....                   | 91         |
| 4.2.5      | Comparação Internas entre Configurações com Plano de Referência Desconectado.....   | 100        |
| 4.2.6      | Comparação Internas entre Trilhas com Plano de Referência Conectado.                | 103        |
| 4.2.7      | Comparações entre Configurações sem Trilha de Guarda Conectada.....                 | 105        |
| 4.2.8      | Comparações entre Configurações com Trilha de Guarda Conectada.....                 | 108        |
| 4.2.9      | Comparação da Trilha de Guarda com Plano de Referência Desconectado.....            | 111        |
| 4.2.10     | Comparação da Trilha de Guarda com Plano de Referência Conectado...                 | 114        |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                                    | <b>118</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>                                        | <b>119</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                             | <b>121</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A miniaturização progressiva de dispositivos eletrônicos e o aumento da densidade de circuitos em placas de circuito impresso (PCIs) têm exigido soluções cada vez mais avançadas para garantir a integridade dos sinais e a Compatibilidade Eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility* - EMC) dos sistemas. Em ambientes de alta frequência, é comum que interações indesejadas entre trilhas condutoras próximas comprometam o desempenho do circuito, fenômeno conhecido como *crosstalk*.

De acordo com Caniggia e Maradei (2008), o *crosstalk* ocorre devido ao acoplamento eletromagnético, tanto indutivo quanto capacitivo, entre trilhas paralelas, sendo potencializado pela alta velocidade de comutação dos sinais e pela proximidade física entre os condutores. Essa interferência pode alterar a forma de onda original do sinal, afetar a temporização de circuitos digitais e gerar falhas de comunicação em sistemas embarcados. Bogatin (2010) acrescenta que esse tipo de ruído é particularmente preocupante em circuitos que não contam com um plano de referência adequado, pois a corrente de retorno tende a circular por caminhos imprevisíveis, aumentando a emissão e a suscetibilidade a interferências.

A integridade de sinal é um fator crucial que depende diretamente da geometria do *layout* da placa, dos materiais utilizados e da existência de planos de terra contínuos. Consoante Paul (2006), mesmo pequenas descontinuidades ou variações no trajeto da trilha podem gerar reflexões e distorções, comprometendo a fidelidade do sinal recebido. Em sistemas que operam acima de centenas de MHz, as trilhas passam a se comportar como linhas de transmissão, e seus efeitos parasitas, como resistência, capacitância e indutância distribuídas, tornam-se relevantes para o comportamento global do circuito (Montrose, 2000).

Nesse contexto, torna-se fundamental a utilização de ferramentas de simulação para se prever o comportamento dos campos eletromagnéticos e auxiliar no processo de projeto e validação de PCIs. O uso de simulações computacionais permite não apenas reduzir os custos com prototipagem, mas também antever problemas de EMC ainda na fase de desenvolvimento. Neste trabalho, serão realizadas simulações bidimensionais visando ampliar a confiabilidade das análises e

facilitar a interpretação dos fenômenos de acoplamento eletromagnético.

O *software* EMCoS *Studio* oferece recursos avançados para a análise de compatibilidade eletromagnética por meio de técnicas numéricas como o *Method of Auxiliary Sources* (MAS), o *Method of Moments* (MoM) e o *Partial Element Equivalent Circuit* (PEEC). Segundo o próprio fabricante (EMCoS Studio, 2025), essas técnicas permitem simular com precisão os campos elétricos e magnéticos em configurações complexas de trilhas, considerando materiais, geometrias e condições de excitação realistas. Além disso, sua interface gráfica 2D permite observar a propagação dos campos por meio de linhas de campo e mapas de calor, facilitando a interpretação dos resultados e a identificação de regiões críticas.

Este trabalho tem como objetivo explorar a modelagem e simulação bidimensional de campos elétricos em placas de circuito impresso com foco na análise do *crosstalk*. Para isso, serão desenvolvidos modelos representando diferentes configurações de trilhas, com ou sem plano de referência, com ou sem trilha de guarda, além de variações no espaçamento entre elas. Os resultados serão avaliados em termos de distribuição espacial dos campos e intensidade do acoplamento. Dessa forma, espera-se que essas análises contribuam para decisões mais assertivas em projetos, garantindo que atendam de forma eficaz aos requisitos de EMC.

## 1.1 Justificativa

A confiabilidade de sistemas eletrônicos modernos depende diretamente da integridade dos sinais que circulam pelas trilhas condutoras de PCIs. Com a crescente demanda por circuitos mais compactos e de alta frequência, torna-se cada vez mais crítico a mitigação de interferências eletromagnéticas internas, como o *crosstalk*. Esse fenômeno, resultante do acoplamento indesejado entre trilhas próximas, pode comprometer significativamente o desempenho de um sistema eletrônico, especialmente em ambientes sensíveis ou de alta complexidade. Embora existam diversas estratégias de mitigação, sua efetividade depende da correta identificação das regiões críticas nas PCIs, o que exige uma análise detalhada do comportamento dos campos eletromagnéticos.

Nesse contexto, a modelagem bidimensional surge como uma ferramenta poderosa para a visualização precisa da distribuição espacial dos campos elétricos e

magnéticos. Diferente das análises convencionais manuais, a representação 2D permite interpretar de forma mais detalhada e realista os efeitos de acoplamento entre trilhas, apoiando decisões de projeto mais fundamentadas e evitando erros futuros. Assim, este trabalho se justifica pela necessidade de se aprofundar a análise de *crosstalk* em PCIs utilizando o *software* EMCoS *Studio*, contribuindo para o desenvolvimento de circuitos eletrônicos mais robustos e confiáveis frente às exigências da EMC.

A escolha da abordagem de simulação computacional foi motivada pela necessidade de se obter maior exatidão e controle sobre as variáveis envolvidas, além de possibilitar a visualização detalhada da distribuição espacial dos campos elétricos, algo nem sempre viável em ambientes experimentais físicos.

## **1.2 Definição do Problema**

O avanço tecnológico na eletrônica embarcada e na miniaturização de circuitos tem exposto os projetos de placas de circuito impresso a interferências internas cada vez mais críticas, como o *crosstalk*. Embora as abordagens manuais possam oferecer uma análise desses efeitos, elas frequentemente não capturam todos os aspectos complexos do comportamento espacial dos campos eletromagnéticos envolvidos, limitando a identificação de regiões críticas e a eficácia das soluções propostas.

Surge então a seguinte questão: a análise bidimensional por meio do EMCoS *Studio* é capaz de fornecer uma representação mais informativa dos efeitos de *crosstalk* em PCIs, superando as limitações das análises tradicionais? Com base nisso, busca-se investigar se o uso da modelagem 2D pode contribuir significativamente para a visualização, interpretação e mitigação dos efeitos de acoplamento entre trilhas condutoras em diferentes configurações de placas.

## **1.3 Objetivo Geral**

Modelar e simular, em duas dimensões, o comportamento dos campos elétricos em PCIs, com foco na análise do *crosstalk*, utilizando-se o *software* EMCoS *Studio*.

## 1.4 Objetivos Específicos

Com base no objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos que orientam o desenvolvimento deste trabalho:

- a) Compreender os princípios teóricos relacionados ao *crosstalk* e à integridade de sinal em PCIs;
- b) Explorar os recursos de modelagem do *software* EMCoS *Studio* aplicados à simulação de campos elétricos em diferentes configurações de trilhas;
- c) Desenvolver modelos 2D de PCIs variando parâmetros como espaçamento entre trilhas, uso de planos de referência e trilhas de guarda;
- d) Analisar os mapas de calor e linhas de campo gerados nas simulações bidimensionais, identificando regiões críticas de acoplamento entre trilhas;
- e) Utilizar os resultados das simulações bidimensionais para aprofundar a compreensão dos efeitos de acoplamento eletromagnético em PCIs.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, abordando a motivação do estudo, a justificativa para sua realização, a definição do problema, os objetivos estabelecidos e a estrutura adotada para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 corresponde à fundamentação teórica, na qual são abordados os conceitos essenciais para a compreensão do fenômeno de *crosstalk*, compatibilidade eletromagnética, integridade de sinal e as características do *software* utilizado.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo o processo de modelagem bidimensional no *software* EMCoS *Studio*, as configurações simuladas e os critérios utilizados para análise dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações realizadas, com a visualização dos campos elétricos por meio de mapas de calor e linhas de campo, seguidos da análise crítica dos efeitos observados.

Por fim, o Capítulo 5 expõe as considerações finais do trabalho, destacando as conclusões alcançadas e sugestões para possíveis estudos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para o entendimento do trabalho. São abordados os princípios da EMC, a integridade de sinal em PCIs e o fenômeno de *crosstalk*. Também são discutidas as principais técnicas de mitigação dessa interferência e os recursos oferecidos pelo *software* EMCoS *Studio* para simulação bidimensional de campos elétricos. Esses fundamentos servem de base para a análise dos resultados e para a justificativa da metodologia adotada.

### 2.1 Compatibilidade Eletromagnética

A EMC refere-se à capacidade de dispositivos eletrônicos funcionarem corretamente em um ambiente eletromagnético, sem gerar nem sofrer interferências que comprometam sua operação ou a de outros equipamentos (Paul, 2006). Esse conceito se torna crítico conforme a densidade de equipamentos e a frequência de operação aumentam, o que é comum em sistemas embarcados, automação industrial e dispositivos de comunicação, pois o aumento da densidade de componentes e a miniaturização dos circuitos elevam significativamente o risco de interferências internas e externas (Paul, 2006).

Segundo Paul (2006), para que um sistema seja considerado compatível eletromagneticamente, ele deve atender simultaneamente a três critérios fundamentais:

- não causa interferência em outros sistemas;
- não ser susceptível a interferências externas;
- não gerar interferência sobre si mesmo.

O quadro 1 resume esses critérios.

**Quadro 1 – Critérios de EMC**

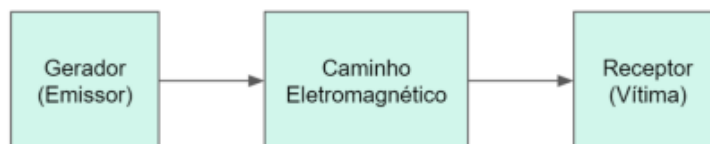
| <b>Critérios</b>    | <b>Descrição</b>                                     |
|---------------------|------------------------------------------------------|
| Emissão controlada  | O equipamento não gera ruído excessivo para o meio   |
| Imunidade adequada  | Resiste a perturbações do ambiente                   |
| Autocompatibilidade | Funcionamento estável mesmo com seus próprios sinais |

Fonte: Adaptado de Paul (2006).

A observância desses critérios torna-se cada vez mais desafiadora à medida que os circuitos se tornam menores, mais rápidos e mais integrados. A miniaturização dos componentes, o aumento da densidade de interconexões e o uso de sinais com transições abruptas tornam os sistemas mais suscetíveis a interferência eletromagnética, tanto conduzida quanto irradiada. Mesmo distúrbios de baixa energia podem afetar circuitos sensíveis, especialmente se o acoplamento ocorrer em frequências críticas de operação (Paul, 2006).

Conforme Paul (2006), a compatibilidade eletromagnética está diretamente relacionada a três elementos fundamentais: geração, transmissão e recepção de energia eletromagnética. Esses elementos representam os blocos centrais do problema de acoplamento, conforme ilustrado na Figura 1. O gerador é a fonte das emissões eletromagnéticas; o meio de acoplamento pode ser o espaço (radiação), os condutores (condução) ou o dielétrico (acoplamento capacitivo); e o receptor é o circuito que, ao receber essa energia, pode se comportar de maneira indesejada, resultando em mau funcionamento.

**Figura 1 – Diagrama em blocos do problema de acoplamento**



Fonte: Adaptado de Paul (2006).

O fenômeno conhecido como Interferência Eletromagnética (EMI - *Electromagnetic Interference*) corresponde exatamente a esse processo de acoplamento indesejado. Segundo Montrose (1999), a EMI ocorre quando há transmissão de energia entre dispositivos eletrônicos, seja por meio conduzido (pelas trilhas e cabos) ou irradiado (pelo espaço ao redor). Essa interferência só se torna problemática quando a energia recebida atinge intensidade suficiente para alterar o funcionamento do receptor (Paul, 2006).

Para mitigar a ocorrência de interferências e garantir a funcionalidade adequada dos sistemas eletrônicos, Paul (2006) propõe três estratégias fundamentais:

- suprimir as emissões na fonte;
- tornar o caminho de acoplamento ineficiente;

- aumentar a imunidade do receptor.

Esses princípios mostram que a EMC não depende exclusivamente da blindagem ou do uso de filtros, mas de uma abordagem sistêmica desde o início do projeto, com foco no controle dos campos eletromagnéticos gerados e recebidos.

Nas PCIs, a EMC está fortemente vinculada ao *layout* físico e ao comportamento dos campos elétricos e magnéticos gerados pelas trilhas de sinal e pelos planos condutores. O modo como as trilhas são roteadas, a proximidade entre condutores, a continuidade do plano de terra e a presença de vias influenciam diretamente na emissão de interferência e na imunidade a perturbações externas (Bogatin, 2018). Pequenas variações na geometria do traçado podem resultar em significativas mudanças no acoplamento de campo elétrico entre trilhas, impactando negativamente a integridade de sinal e a compatibilidade eletromagnética do sistema. Essa abordagem contribui para compreender como decisões geométricas no *layout*, como o espaçamento entre trilhas, a presença de planos de retorno e o uso de trilhas de guarda impactam diretamente a EMC e a integridade do sistema. Ao correlacionar a densidade de campo com a ocorrência de acoplamento capacitivo, é possível propor recomendações de projeto para minimizar interferências internas, reforçando a autocompatibilidade do circuito (Montrose, 1999).

Bogatin (2018) destaca que "qualquer interconexão mal projetada pode se tornar uma fonte significativa de interferência". Isso é especialmente relevante em dispositivos de alta densidade, em que o espaço para roteamento é limitado e as trilhas frequentemente compartilham trajetos paralelos por longas distâncias, facilitando o surgimento de *crosstalk* capacitivo e acoplamento de modo diferencial. A consequência pode ser uma distorção dos sinais digitais ou o disparo incorreto de circuitos lógicos sensíveis.

Por fim, embora a EMC muitas vezes esteja associada a normas regulatórias internacionais (como CISPR, FCC e IEC), seu princípio básico é de engenharia preventiva: evitar que um sistema interfira ou receba interferência. Incorporar boas práticas de EMC desde o início do projeto não apenas aumenta as chances de aprovação em testes laboratoriais, mas também reduz falhas de campo, custos com retrabalho e riscos à confiabilidade do produto final (Rohde & Schwarz, 2023).

## 2.2 Integridade de Sinais

A integridade de sinais (*Signal Integrity* – SI) refere-se à capacidade de um sinal elétrico manter sua forma, nível de tensão e temporização adequada enquanto se propaga pelas trilhas de uma placa de circuito impresso (PCI). Em sistemas digitais de alta velocidade, mesmo pequenas distorções, como oscilações, atrasos ou variações nos níveis lógicos, podem causar erros de interpretação dos dados ou falhas intermitentes no funcionamento do circuito (Bogatin, 2018).

À medida que as frequências ultrapassam a faixa das centenas de *megahertz*, as trilhas deixam de se comportar como meros condutores ôhmicos e passam a atuar como linhas de transmissão, nas quais os sinais se propagam em formato de ondas eletromagnéticas guiadas. Nesse regime, torna-se essencial considerar atenção especial a efeitos como impedância característica, reflexões, *ringing* e acoplamentos indesejados, especialmente o *crosstalk* capacitivo, que é quando um sinal afeta outra trilha próxima devido à interação de seus campos elétricos (Paul, 2006).

Montrose (2000) destaca que problemas de integridade de sinal são frequentemente causados por aspectos físicos do *layout* da PCI, como geometria inadequada da trilha, presença de vias mal posicionadas, descontinuidades no plano de terra e ausência de terminações adequadas. Esses elementos, embora muitas vezes negligenciados em projetos simples, tornam-se críticos à medida que se trabalha com sinais rápidos e circuitos compactos. Além disso, fatores como capacitância e indutância parasita, que em frequências mais baixas podem ser desprezados, assumem papel central no comportamento do sinal em alta velocidade. A combinação de todos esses elementos pode levar à distorção da forma de onda, interferência entre sinais e perda de confiabilidade do sistema.

Com base nas considerações apresentadas, é possível sintetizar as principais causas associadas à perda de integridade de sinal, bem como seus efeitos característicos, conforme sistematizado por Montrose (2000) e apresentado no Quadro 2.

**Quadro 2 – Principais causas de perda de integridade de sinal**

| Causa                      | Efeito                                                |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Impedância desacoplada     | Reflexões e distorção do sinal                        |
| Trilhas muito próximas     | Acoplamento entre sinais<br>( <i>crosstalk</i> )      |
| Ausência de plano de terra | Corrente de retorno mal definida,<br>aumento de ruído |
| Transições abruptas        | <i>Overshoot, undershoot, ringing</i>                 |

Fonte: Adaptado de Montrose (2000).

## 2.3 Campo Elétrico

O campo elétrico é uma grandeza vetorial fundamental na eletrostática e na análise de circuitos de alta frequência, sendo definido como a força por unidade de carga elétrica em um ponto no espaço. Essa relação é expressa por  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ , em que  $\vec{E}$  representa o campo elétrico,  $\vec{F}$  é a força elétrica, e  $q$  é a carga de teste (Sadiku, 2013). Essa definição clássica fornece a base conceitual para o entendimento de como cargas interagem em um meio dielétrico ou condutor.

No que se refere as placas de circuito impresso (PCIs), o campo elétrico surge como resultado da diferença de potencial entre condutores, como entre uma trilha de sinal e o plano de referência (geralmente GND), ou entre trilhas paralelas que conduzem sinais distintos (Balanis, 2012). Esse campo está diretamente relacionado à propagação dos sinais elétricos e ao seu retorno pelo plano de terra, formando um sistema de linhas de campo que depende da geometria das trilhas, do material dielétrico e da continuidade do plano de retorno (Johnson; Graham, 2003).

À medida que a frequência de operação aumenta, os efeitos do campo elétrico tornam-se mais evidentes e mais complexos. Isso ocorre porque, em altas frequências, as trilhas deixam de se comportar como simples fios condutores e passam a funcionar como linhas de transmissão, nas quais a capacitância entre condutores tem papel fundamental no desempenho do sinal. O campo elétrico em uma PCI tende a se concentrar entre a trilha e o plano de referência abaixo dela. No entanto, quando há outras trilhas próximas ou interrupções no plano de retorno, as

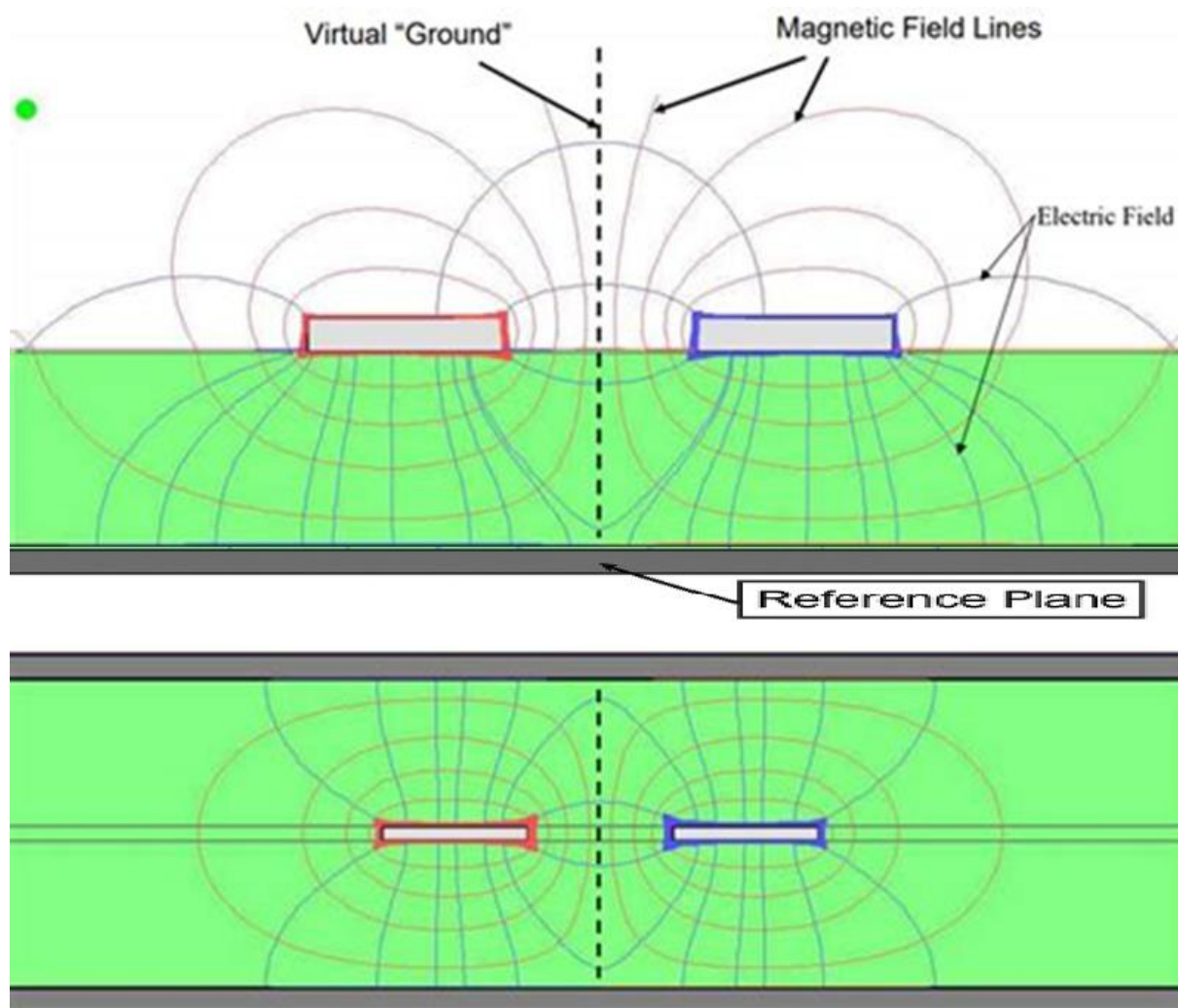
linhas de campo se redistribuem e podem alcançar trilhas vizinhas, dando origem ao fenômeno conhecido como *crosstalk* capacitivo (Bogatin, 2018).

Segundo Johnson e Graham (2003), esse tipo de acoplamento indesejado ocorre quando uma variação de tensão em uma trilha induz um campo elétrico suficientemente intenso para perturbar o sinal em uma trilha adjacente. Além disso, conforme Bogatin (2018), o acoplamento elétrico entre condutores paralelos é uma das principais causas de interferência em sistemas digitais de alta velocidade e deve ser cuidadosamente controlado por meio de técnicas de *layout*, como o aumento do espaçamento entre trilhas e o uso de planos de terra contínuos.

Além disso, a distribuição do campo elétrico também influencia diretamente a integridade do sinal e o comportamento do sistema como um todo. Balanis (2012) explica que campos elétricos não uniformes e mal confinados podem representar perdas por radiação e interferência em outros circuitos. Por isso, o controle do campo elétrico não é apenas uma questão de eficiência, mas também de EMC, visto que determinados sinais podem ultrapassar os limites de emissão definidos por normas técnicas.

Na Figura 2 é possível visualizar a distribuição do campo elétrico e campo magnético entre duas trilhas paralelas sobre um plano de referência. Observa-se que parte das linhas de campo, ao invés de se concentrarem exclusivamente entre cada trilha e o plano, se estendem até a trilha vizinha, caracterizando o acoplamento capacitivo responsável pelo *crosstalk*.

**Figura 2 – Distribuição do campo elétrico e magnético entre trilhas paralelas em uma PCI com plano de referência**



Fonte: Adaptado de Li (2024).

## 2.4 Campo Próximo e Campo Distante

O comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por condutores energizados pode ser analisado em duas regiões distintas: o campo próximo (*near field*) e o campo distante (*far field*), conforme descrito por Balanis (2012). Essa classificação está relacionada à distância da fonte em relação ao comprimento de onda do sinal e influencia diretamente a maneira como os campos elétrico e magnético se comportam e interagem com o meio.

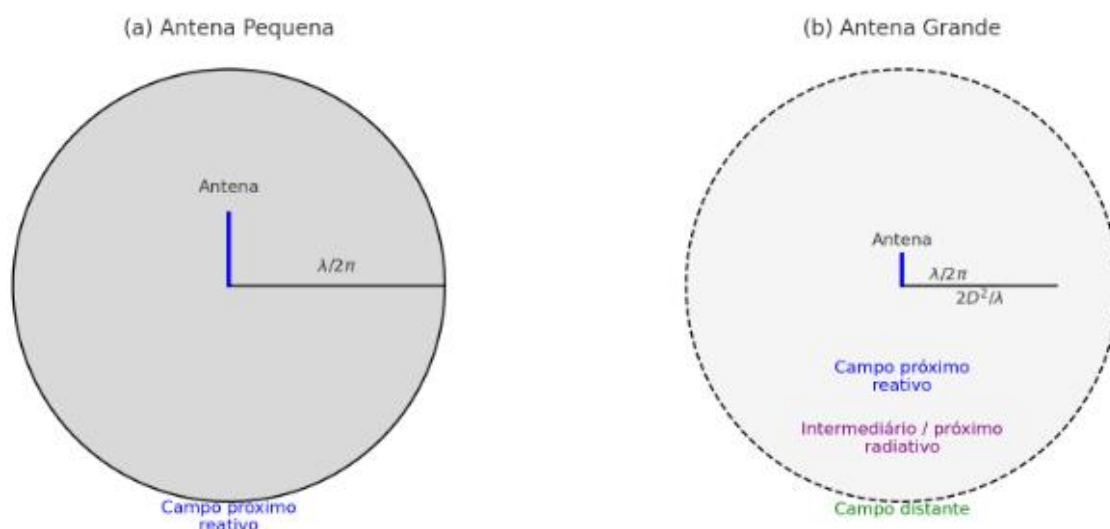
O campo próximo é a região localizada a até aproximadamente  $\frac{\lambda}{2\pi}$  da fonte, em que  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal no meio. Nessa faixa, os campos elétrico

e magnético estão fortemente acoplados à fonte e apresentam comportamento predominantemente reativo, ou seja, a energia é armazenada e circula ao redor do condutor, não sendo efetivamente irradiada para o espaço. Essa região é especialmente sensível a variações na geometria do condutor e no meio dielétrico, e é onde predominam os efeitos de acoplamento capacitivo e indutivo, relevantes para a análise de interferências em sistemas eletrônicos (Balanis, 2012).

Já o campo distante caracteriza-se por campos elétrico e magnético que se propagam de forma independente como ondas eletromagnéticas, mantendo uma relação de fase fixa e obedecendo às leis típicas de radiação. Nessa região, a energia eletromagnética é efetivamente transferida para o espaço, com intensidade decaindo proporcionalmente ao inverso da distância ( $\frac{1}{r}$ ), e os efeitos de acoplamento próximo são desprezíveis (Balanis, 2012). Entre essas duas regiões, em antenas maiores, pode existir uma zona intermediária, chamada de campo próximo radiativo ou região de Fresnel, qual ocorrem transições gradativas entre o comportamento reativo e o de radiação plena (Keller, 2022).

Na Figura 3 é possível visualizar-se de forma comparativa essas regiões para dois cenários distintos: (a) uma antena pequena em relação ao comprimento de onda, em que predomina o campo próximo reativo, e (b) uma antena grande, na qual é possível identificar três zonas distintas, o campo próximo reativo, o campo próximo radiativo (intermediário) e o campo distante.

**Figura 3 – Representação esquemática das regiões de campo próximo e campo distante**



Fonte: Adaptado de Keller (2022).

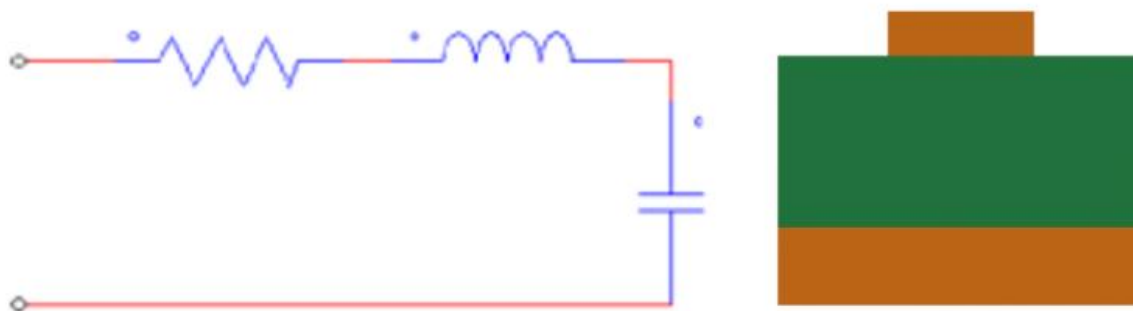
## 2.5 Placas de Circuito Impresso (PCIs)

As placas de circuito impresso (PCIs), ou *Printed Circuit Boards* (PCBs), são plataformas utilizadas para interconectar mecanicamente e eletricamente os componentes de um circuito eletrônico. De maneira geral, elas são compostas, em sua forma mais básica, por uma base isolante (geralmente de fibra de vidro do tipo FR-4) e por uma ou mais camadas condutoras de cobre, nas quais são formadas as trilhas responsáveis pela condução dos sinais elétricos (Haper, 2000).

Em aplicações de baixa frequência, essas trilhas se comportam de maneira semelhante a simples fios condutores. À medida que a frequência de operação aumenta, no entanto, os efeitos parasitas se tornam mais significativos, fazendo com que as trilhas assumam o comportamento de linhas de transmissão. Dessa forma, fenômenos como reflexões, perdas por dissipação, acoplamentos eletromagnéticos e radiações indesejadas passam a impactar diretamente a integridade dos sinais (Johnson; Graham, 2003).

Para representar de forma mais precisa o comportamento dessas trilhas em altas frequências, utiliza-se um modelo elétrico equivalente que leva em consideração os efeitos distribuídos ao longo do percurso condutor. Esse modelo é composto por quatro elementos principais: resistência, que representa as perdas ôhmicas do cobre; indutância, associada ao campo magnético gerado pela corrente elétrica; capacitância, relacionada ao acoplamento elétrico entre a trilha e o plano de referência (ou entre trilhas vizinhas); e condutância, que modela perdas no dielétrico da placa (Paul, 2006). Embora este último componente seja geralmente desprezado em análises iniciais, ele se torna relevante em situações de alta frequência e dielétricos com perdas significativas. A Figura 4 ilustra uma representação simplificada desse modelo, utilizada como base teórica para diversas análises de integridade de sinal.

**Figura 4 – Representação elétrica genérica de uma PCI**



Fonte: Adaptado de Bogatin (2018).

Conforme Bogatin (2018), os elementos parasitas introduzidos pela geometria e materiais da placa afetam diretamente o desempenho do circuito. A resistência causa perdas térmicas, a indutância gera atrasos e oscilações, e a capacitância pode levar ao acoplamento de sinais, o que é especialmente crítico em circuitos digitais de alta velocidade. De acordo com Bogatin (2018):

*“toda interconexão em um sistema digital de alta velocidade deve ser tratada como uma linha de transmissão acima de uma determinada frequência crítica, mesmo que tenha apenas alguns centímetros de comprimento”. (Tradução nossa).*

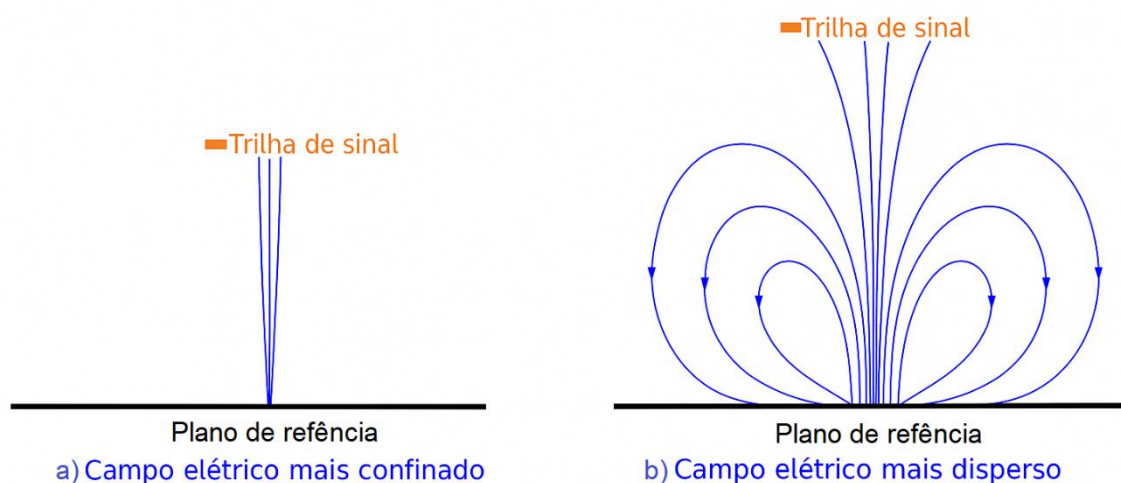
A influência da geometria das trilhas é um aspecto essencial para a mitigação desses efeitos. Fatores como largura, espessura, espaçamento entre trilhas e a distância até o plano de referência influenciam diretamente a impedância característica da linha e o comportamento do campo elétrico (Hall; Hall; McCall, 2000). Trilhas muito próximas, por exemplo, tendem a compartilhar linhas de campo elétrico, favorecendo o surgimento de interferência entre sinais, fenômeno conhecido como *crosstalk*. Por outro lado, a presença de um plano de referência contínuo e próximo à trilha fornece um caminho eficiente de retorno para a corrente elétrica, contribuindo para a estabilidade do campo eletromagnético e a redução de emissões (Johnson; Graham, 1993).

Além do espaçamento e da largura, a altura da trilha em relação ao plano de referência também desempenha um papel determinante. Quanto menor essa distância, mais confinado fica o campo elétrico entre a trilha e o plano, reduzindo a possibilidade de acoplamento com trilhas adjacentes e minimizando o *crosstalk* capacitivo. Por outro lado, um aumento dessa altura provoca maior dispersão das linhas de campo, ampliando a suscetibilidade à interferência. Esse comportamento

está diretamente ligado à região de campo próximo reativo, predominante nas frequências e geometrias típicas de trilhas em PCIs, e que é foco das análises realizadas neste trabalho (Bogatin, 2018).

Na Figura 5 é possível visualizar de forma comparativa a distribuição do campo elétrico para dois cenários: (a) trilha posicionada próxima ao plano de referência, com campo mais confinado; e (b) trilha afastada do plano, apresentando campo mais disperso e suscetível a acoplamentos indesejados.

**Figura 5 – Comparação da distribuição do campo elétrico em função da altura da trilha**



Fonte: Adaptado de Bogatin (2018).

## 2.6 Crosstalk

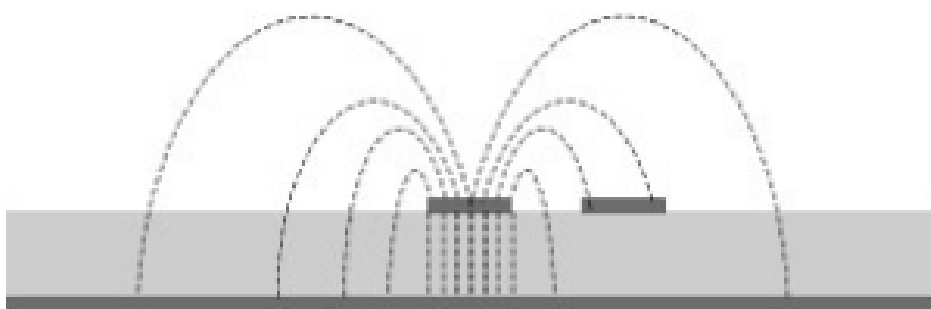
O *crosstalk*, é o fenômeno de interferência mútua entre sinais transmitidos por trilhas adjacentes em uma PCI. Essa interferência ocorre devido ao acoplamento eletromagnético, que pode ser capacitivo (campo elétrico) ou indutivo (campo magnético). O efeito é particularmente problemático em sistemas de alta frequência e com alta densidade de trilhas, onde o espaço físico é limitado e os sinais operam com tempos de subida muito rápidos (Caniggia; Maradei, 2008).

O *crosstalk* capacitivo ocorre quando a variação de tensão em uma trilha agressora induz um deslocamento de carga na trilha vizinha (vítima), por meio do campo elétrico entre elas; por outro lado, o *crosstalk* indutivo decorre das variações de corrente, que induzem campos magnéticos acoplados à trilha adjacente. Embora ambos os efeitos possam coexistir, em regimes de frequências elevadas e em análises de campo próximo, o efeito capacitivo tende a predominar (Paul, 2006).

Bogatin (2018) enfatiza que, na ausência de um plano de referência contínuo sob as trilhas, a corrente de retorno se dispersa pelo substrato, o que amplia o campo irradiado e intensifica o *crosstalk*. O autor ainda sugere que a forma mais eficaz de minimizar esse efeito é fornecendo à corrente de retorno um caminho plano, uniforme e extenso, visto que qualquer desvio desse caminho ideal resulta em um aumento significativo do ruído entre as trilhas. Montrose (1999), por sua vez, alerta que o uso inadequado de trilhas de guarda, especialmente quando não conectadas corretamente ao plano de terra, pode não só falhar em reduzir o *crosstalk*, como até agravá-lo.

A Figura 6 apresenta uma representação das linhas de força do campo elétrico entre trilhas condutoras adjacentes, ilustrando como o campo se propaga pelo ambiente e evidencia a possibilidade de acoplamento entre sinais.

**Figura 6 – Representação das linhas de força do campo elétrico e propagação entre trilhas condutoras**



Fonte: Adaptado de Bogatin (2018).

Durante a propagação de um sinal ao longo de uma trilha condutora em uma PCI, a variação de tensão associada a esse sinal gera um campo elétrico variável, que se estende até trilhas adjacentes. Esse campo pode induzir correntes ruidosas na trilha vizinha, fenômeno caracterizado como *crosstalk* capacitivo como dito anteriormente. Esse tipo de acoplamento ocorre sem necessidade de contato

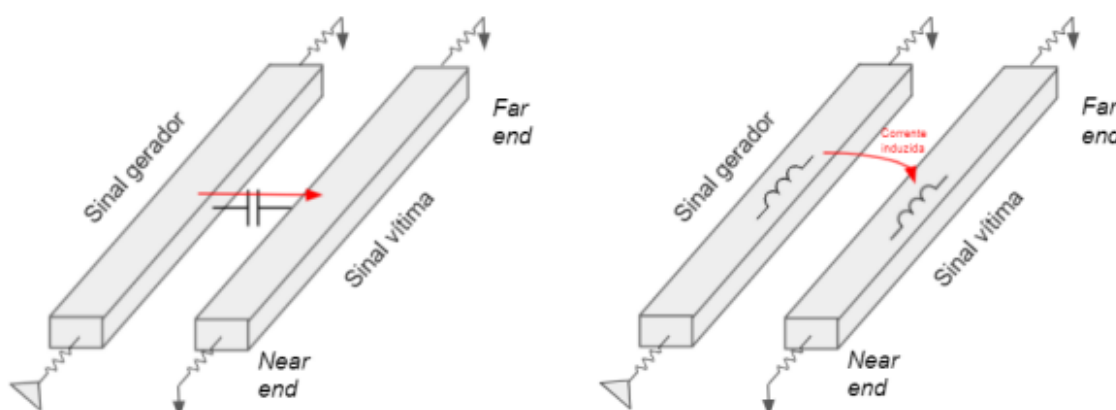
físico entre as trilhas, sendo mediado pela capacitância mútua existente entre elas (Caniggia; Maradei, 2008; Paul, 2006).

Na Figura 7, à esquerda, observa-se o acoplamento capacitivo, no qual rápidas variações de tensão no sinal gerador produzem um campo elétrico variável que se estende até a trilha adjacente, estabelecendo uma capacitância parasita entre os condutores. Essa interação resulta na indução de uma tensão no sinal vítima, efeito que tende a ser mais evidente na extremidade oposta à fonte (*far end*), devido à propagação da perturbação ao longo da linha de transmissão. Esse fenômeno pode comprometer a integridade do sinal, provocar reflexões e ocasionar falhas de comunicação, especialmente em sistemas de alta velocidade ou com espaçamento reduzido entre trilhas (Bogatin, 2018).

Enquanto ao lado direito, é ilustrado o acoplamento indutivo, causado pela variação de corrente no sinal gerador, que produz um campo magnético variável. Esse campo intercepta o loop de corrente da trilha vizinha, induzindo uma tensão por meio do acoplamento magnético. Nessa modalidade, o efeito é mais perceptível na extremidade próxima à fonte (*near end*), onde a variação de corrente e o fluxo magnético são mais intensos (Paul, 2006).

O termo *near end* refere-se ao ruído medido na trilha vítima no ponto mais próximo à fonte geradora, enquanto *far end* diz respeito ao ruído medido no ponto mais distante. Na prática, ambos os mecanismos de acoplamento ocorrem simultaneamente, sendo a predominância de um ou outro influenciada pela geometria das trilhas, pela distância entre condutores e pela configuração do plano de retorno de corrente (Mudavath; Naik, 2018).

**Figura 7 – Ilustração dos efeitos de *crosstalk* entre trilhas em uma PCI**



Fonte: Adaptado Mudavath e Naik (2018).

## 2.7 Software EMCoS Studio

O EMCoS *Studio* é um *software* de simulação eletromagnética desenvolvido para análise de EMC, SI e acoplamentos parasitas em sistemas eletrônicos. A ferramenta permite a modelagem bidimensional de estruturas condutoras e dielétricas, fornecendo uma visão detalhada da propagação e acoplamento dos campos elétricos e magnéticos em ambientes complexos (EMCoS Studio, 2025).

A sua principal contribuição é a possibilidade de visualizar e quantificar a distribuição espacial dos campos eletromagnéticos, auxiliando na identificação de regiões críticas de acoplamento e na avaliação de estratégias de mitigação, como o uso de trilhas de guarda ou ajustes no espaçamento entre condutores.

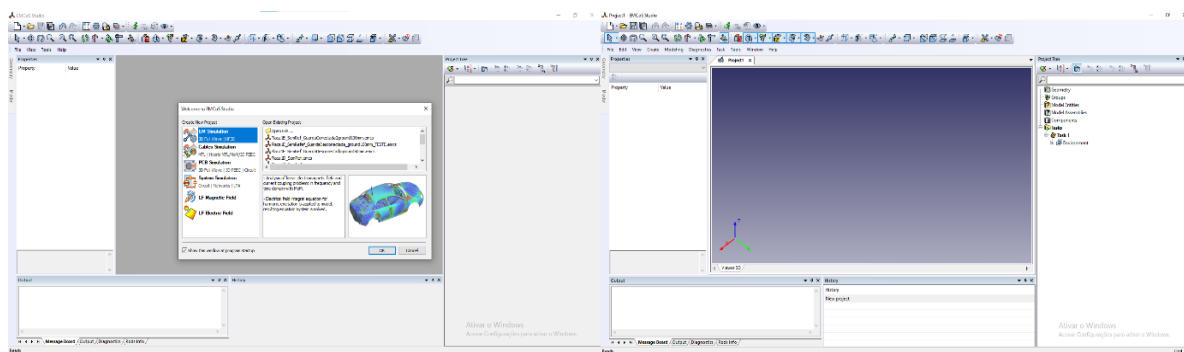
De acordo com o fabricante, esse programa permite modelar de forma rápida problemas de EMC e, com sua interface gráfica intuitiva, resolvê-los com precisão (EMCoS Studio, 2025). Dentre suas aplicações relevante para este estudo, destacam-se:

- modelagem de placas de circuito impresso;
- construção de modelos 2D representando trilhas condutoras e substrato dielétrico;
- análise de propagação de ondas eletromagnéticas;
- definição de propriedades elétricas como permitividade e condutividade;
- visualização dos vetores de campo elétrico;
- simulação em múltiplas frequências;
- identificação de pontos críticos de acoplamento;
- análise de integridade de sinal em alta frequência;
- estudo de reflexões e distorções em linhas de transmissão;
- observação da distribuição de campos entre trilhas condutoras;
- investigação do impacto de planos de referência e trilhas de guarda;
- antecipar falhas de integridade de sinal em *layouts*.

A modelagem das estruturas é realizada diretamente na interface principal do EMCoS *Studio*, que permite ao usuário construir representações bidimensionais

precisas de placas de circuito impresso. A interface gráfica possui ferramentas CAD especializadas para o ambiente eletromagnético, permitindo desenhar geometrias condutoras, posicionar trilhas, adicionar regiões dielétricas e definir as propriedades elétricas de cada material, como a permissividade relativa e a condutividade dos substratos. Após a construção da geometria, é possível configurar parâmetros essenciais da simulação, como a definição das portas de excitação, as bordas de terminação, a malha computacional e o conjunto de frequências em que a estrutura será analisada. O *software* também oferece suporte à varredura em múltiplas frequências, facilitando a análise de fenômenos espectrais (EMCoS Studio, 2025). A Figura 8 ilustra a interface principal do EMCoS *Studio*, onde é realizada a modelagem geométrica das trilhas, substratos e planos condutores, com a definição dos materiais, pontos de excitação e limites de simulação.

**Figura 8 – Interface de modelagem no EMCoS Studio**



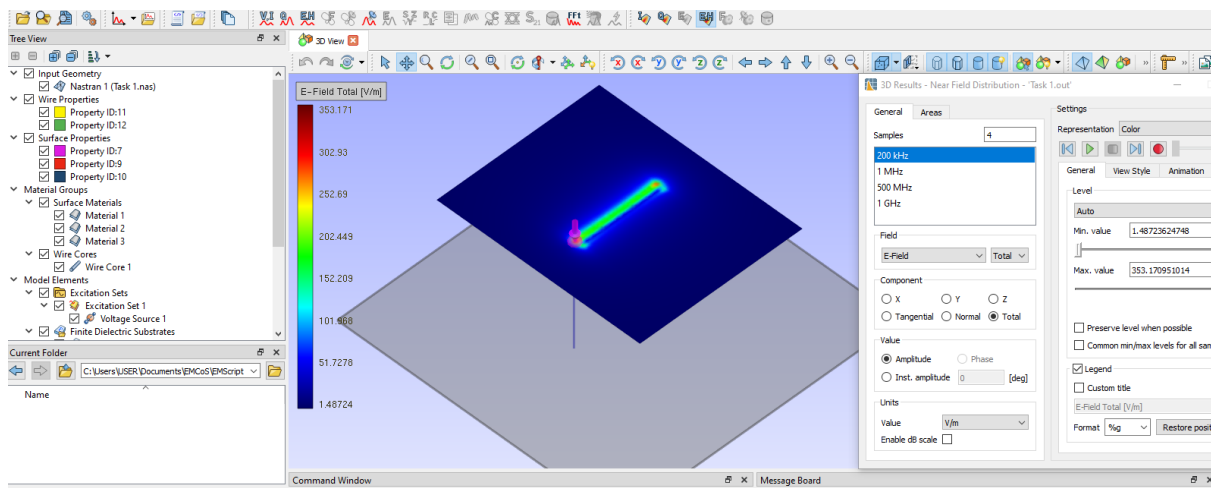
Fonte: Adaptado EMCoS Studio (2025).

Após a simulação, o pós-processamento dos resultados é feito por meio de um módulo complementar chamado EMCoS SimDAT, integrado ao ambiente do *software*. O SimDAT é responsável pela análise dos campos gerados e fornece uma ampla gama de recursos gráficos e numéricos para interpretação dos dados simulados. Ele permite a visualização vetorial dos campos elétricos e magnéticos, bem como a geração de mapas de intensidade, distribuição de linhas de campo e representação da densidade de energia (EMCoS Studio, 2025).

A interface do SimDAT facilita a identificação de regiões críticas de acoplamento entre trilhas condutoras. Por meio da análise gráfica do campo elétrico, torna-se possível observar zonas de alta concentração de linhas de campo entre condutores paralelos, indicando a presença de acoplamento capacitivo. Além disso, é possível realizar medições pontuais, gerar comparações entre diferentes frequências

e investigar os efeitos de alterações geométricas no *layout* da PCI (EMCoS Studio, 2025). A Figura 9 apresenta a visualização vetorial de campo elétrico no ambiente SimDAT, onde os vetores e linhas de campo evidenciam a distribuição e a intensidade dos campos ao longo da estrutura analisada.

**Figura 9 – Visualização de ferramentas de pós-processamento 2D no SimDAT**



Fonte: Adaptado EMCos Studio (2025).

### 2.7.1 Trabalho anterior na instituição sobre o EMCoS Studio

O *software* EMCoS Studio já havia sido objeto de estudo aprofundado no âmbito do Curso de Engenharia Eletrônica do IFSC por Sene (2025), em seu Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Modelagem e simulação de placa de circuito impresso utilizando o *software* EMCoS Studio. Nesse estudo, o autor apresentou detalhadamente a metodologia de utilização do programa, descrevendo de forma sequencial as etapas necessárias para a modelagem e simulação de placas de circuito impresso, desde a definição das variáveis geométricas até a configuração completa das simulações (Sene, 2025).

Como resultado desse trabalho, o próprio autor elaborou também um manual de utilização do EMCoS Studio, disponibilizado internamente na instituição, que sistematiza os procedimentos necessários para a correta configuração das simulações. O manual contempla, entre outros aspectos:

- Inicialização de projetos e definição de variáveis geométricas e elétricas;
- Modelagem do substrato e criação de trilhas condutoras;

- uso de ferramentas como *Union* para consolidação de entidades geométricas;
- atribuição de propriedades dielétricas e condutivas aos elementos do modelo;
- inclusão de planos de referência, fios e fontes de excitação;
- definição do ambiente de simulação e dos parâmetros de frequência;
- utilização do módulo SimDAT para análise dos resultados, com destaque para mapas de calor, vetores de campo e comparação em diferentes escalas;
- metodologias complementares, como a aplicação de chanfros, trilhas não retilíneas e comparação sistemática dos resultados obtidos.

Esse manual também ressalta que a utilização de metodologias complementares, como a aplicação de chanfros e a construção de trilhas não retilíneas, possibilita ampliar a abrangência da análise e observar de forma mais precisa os efeitos eletromagnéticos em diferentes configurações de placas de circuito impresso (Sene, 2025).

De acordo com o autor, a integração dessas etapas no processo de simulação permite obter resultados mais consistentes e comparáveis, uma vez que o manual orienta a padronização de parâmetros e escalas de visualização no módulo SimDAT. Essa padronização é fundamental para a correta interpretação dos fenômenos de acoplamento eletromagnético e para a comparação entre diferentes cenários de projeto (Sene, 2025).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para a análise bidimensional de campos elétricos em placas de circuito impresso, com foco na investigação do fenômeno de *crosstalk*. A escolha da abordagem por simulação computacional foi motivada pela necessidade de obter maior precisão e controle sobre as variáveis envolvidas, além de permitir a visualização detalhada da distribuição espacial dos campos elétricos, aspecto difícil de alcançar em ensaios práticos convencionais.

A implementação computacional foi realizada utilizando o *software* EMCoS *Studio*, por meio de simulações bidimensionais controladas. Esta abordagem exigiu o domínio da ferramenta e a adaptação da modelagem física ao domínio 2D, envolvendo etapas como criação da geometria, definição de materiais e configuração dos parâmetros eletromagnéticos. A metodologia adotada permitiu aprofundar a análise do acoplamento capacitivo entre trilhas condutoras, com visualização direta das linhas de campo elétrico e comparação entre diferentes configurações geométricas com elevado grau de controle e repetibilidade.

#### 3.1 Planejamento das Simulações

Com base nas observações realizadas durante a etapa experimental, foram definidas as configurações a serem simuladas no ambiente bidimensional do *software* EMCoS *Studio*. O objetivo principal foi investigar, de forma controlada, os efeitos das variações geométricas sobre o acoplamento capacitivo entre trilhas condutoras em uma Placa de Circuito Impresso, com foco na distribuição do campo elétrico.

As simulações foram organizadas em duas etapas principais: a primeira considerou estruturas sem plano de referência, e a segunda, modelos com plano de referência metálico contínuo posicionado abaixo das trilhas.

Na primeira etapa, as simulações foram realizadas com cinco diferentes configurações geométricas, denominadas 1a, 1b, 1c, 1d e 1e. As quatro primeiras (1a a 1d) utilizaram duas trilhas paralelas, enquanto a configuração 1e introduziu uma terceira trilha intermediária para funcionar como trilha de guarda, com duas condições: desconectada (*off*) ou conectada à referência da fonte de excitação (*on*). As variáveis

manipuladas incluem o comprimento das trilhas (L), a largura da placa (W), a largura das trilhas (wt), a distância entre trilhas (dt), a distância da trilha externa à borda da placa (d) e a altura da trilha (h) em relação ao plano inferior.

A Tabela 1 apresenta os valores adotados para cada configuração simulada:

**Tabela 1 – Parâmetros geométricos das configurações simuladas**

| Variáveis         | Nº de trilhas | L (mm) | W(mm) | wt (mm) | d(mm) | dt(mm) | h(mm) |
|-------------------|---------------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| 1a                | 2             | 40     | 20,1  | 2       | 7,65  | 0,8    | 1,5   |
| 1b                | 2             | 40     | 20,1  | 2       | 7,25  | 1,6    | 1,5   |
| 1c                | 2             | 120    | 20,1  | 2       | 7,25  | 1,6    | 1,5   |
| 1d                | 2             | 40     | 20,1  | 2       | 6,45  | 3,2    | 1,5   |
| 1e ( <i>off</i> ) | 3             | 40     | 30,2  | 2       | 10,5  | 1,6    | 1,5   |
| 1e ( <i>on</i> )  | 3             | 40     | 30,2  | 2       | 10,5  | 1,6    | 1,5   |

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Essas configurações foram escolhidas para representar cenários de projeto típicos em que o *crosstalk* pode ocorrer, permitindo observar separadamente os efeitos da distância entre trilhas, do comprimento das interconexões e da presença de uma trilha de guarda conectada ou não ao plano de terra. Essa diversidade de casos simulados proporcionou uma base comparativa para avaliar o comportamento dos campos elétricos e identificar estratégias mais eficazes de mitigação da interferência capacitiva.

Na segunda etapa, foram simuladas as mesmas configurações das placas 1a, 1b, 1d, 1e (*on*) e 1e (*off*), mas com a inclusão de um plano de cobre contínuo posicionado abaixo das trilhas, simulando um plano de referência. A configuração 1c não foi incluída nesta etapa. O objetivo foi observar como a presença desse plano influencia a distribuição do campo elétrico e o nível de acoplamento entre as trilhas.

As configurações com plano de referência foram denominadas 2a, 2b, 2d, 2e (*off*) e 2e (*on*), mantendo os mesmos parâmetros geométricos das respectivas configurações anteriores, com a adição do plano inferior.

Em seguida, com a intenção de complementar a descrição dos parâmetros apresentados na Tabela 1, as Figuras 10 a 14 ilustram, de forma esquemática, os diferentes arranjos geométricos concebidos para posterior modelagem no EMCoS *Studio*. Cada figura corresponde a uma topologia específica, desenvolvida para isolar o impacto de determinada variável de projeto sobre a distribuição do campo elétrico e, conseqüentemente, sobre a interferência mútua entre sinais adjacentes. Ao apresentar tais configurações de forma clara e comparativa, busca-se estabelecer uma base conceitual que facilite a compreensão das análises desenvolvidas nas próximas seções, bem como evidenciar a relação entre decisões geométricas de *layout* e a compatibilidade eletromagnética do sistema.

A Figura 10 mostra duas trilhas paralelas sem plano de referência. Conforme Bogatin (2018, p. 112-114), a ausência de um plano de referência contínuo sob trilhas paralelas faz com que a corrente de retorno se espalhe, aumentando a indutância do loop e a interferência eletromagnética. Além disso, essa condição eleva o *crosstalk*, pois os campos elétricos e magnéticos não são confinados adequadamente. Planos de terra contínuos oferecem um caminho de retorno de baixa indutância, reduzindo o ruído e melhorando a integridade do sinal.

**Figura 10 – Representação esquemática de duas trilhas paralelas sem plano de referência**



Fonte: Adaptado Schlichting (2025).

A Figura 11 representa a mesma estrutura da Figura 10, mas com a inclusão de um plano de referência metálico contínuo posicionado abaixo das trilhas. Esse plano metálico serve como caminho de baixa impedância para a corrente de retorno, permitindo o confinamento dos campos entre o condutor e o plano de terra. Dessa forma, há uma redução significativa na dispersão de campo elétrico entre as trilhas adjacentes, o que atenua o acoplamento eletromagnético e melhora a integridade do sinal, conforme discutido por Johnson e Graham (2003), que enfatizam a importância dos planos de referência contínuos para minimizar ruídos e preservar a integridade dos sinais em altas frequências.

**Figura 11 – Representação esquemática de duas trilhas paralelas com plano de referência inferior**



Fonte: Adaptado Schlichting (2025).

A Figura 12 apresenta uma configuração que incorpora uma trilha de guarda posicionada entre os dois condutores de sinal, sem a presença de plano de referência inferior. A trilha de guarda, quando conectada ao plano de terra, funciona como uma barreira eletrostática entre os sinais interceptando as linhas de campo elétrico que se propagariam entre as trilhas adjacentes. Essa técnica é especialmente eficaz na mitigação do *crosstalk* capacitivo, proporcionando isolamento adicional entre canais de sinal (Bogatin, 2018).

**Figura 12 – Representação esquemática de trilhas paralelas com trilha de guarda sem plano de referência inferior**



Fonte: Adaptado Schlichting (2025).

A Figura 13 combina os dois recursos de mitigação previamente abordados: a presença de uma trilha de guarda entre os condutores de sinal e um plano de referência metálico contínuo posicionado abaixo da estrutura. Essa configuração promove uma blindagem eletromagnética bidirecional, com confinamento tanto lateral quanto vertical dos campos elétricos. A trilha de guarda interrompe a propagação lateral do campo entre os sinais, enquanto o plano de referência limita a propagação vertical. Johnson e Graham (2003) enfatizam que essa abordagem integrada representa uma das formas mais eficazes de controle de *crosstalk* em circuitos de alta densidade e frequência, pois reduz tanto a emissão quanto a susceptibilidade a interferências, contribuindo significativamente para a integridade do sinal.

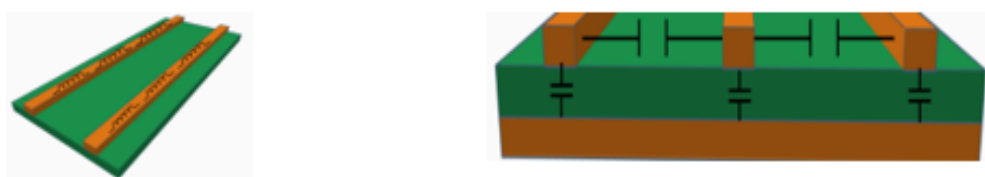
**Figura 13 – Representação esquemática de trilhas paralelas com trilha de guarda com plano de referência inferior**



Fonte: Adaptado Schlichting (2025).

Por fim, a última representação, ilustrada na Figura 14, ilustra uma modelagem conceitual equivalente, na qual são destacados elementos capacitivos e indutivos parasitas entre as trilhas condutoras. Esses elementos simbolizam a capacitância e a indutância mútua que surgem naturalmente entre interconexões adjacentes e são empregados em modelos circuitais analíticos para a previsão e quantificação dos efeitos de *crosstalk*. Modelos como este são amplamente utilizados em análises teóricas e simulações elétricas para prever quantitativamente a magnitude das interferências entre sinais adjacentes. De acordo com Paul (2006), a representação por meio de modelos de circuito equivalente é uma ferramenta poderosa para antecipar falhas de integridade de sinal e planejar estratégias eficazes de mitigação durante a fase de projeto.

**Figura 14 – Representação esquemática de trilhas paralelas com trilha de guarda sem plano de referência inferior**



Fonte: Adaptado Schlichting (2025).

Esse planejamento criterioso permite estabelecer uma base sólida para as simulações, garantindo que os efeitos de cada variação geométrica possam ser analisados de forma isolada e comparativa. A seguir, são descritos os procedimentos adotados para a construção dos modelos no ambiente do *software* EMCoS *Studio*, incluindo a definição dos materiais, a aplicação da excitação elétrica e os parâmetros de simulação utilizados.

### 3.2 Modelagem Bidimensional

A modelagem das configurações simuladas foi realizada no ambiente bidimensional do software EMCoS *Studio*, conforme a metodologia apresentada por Sene (2025), que descreve de forma detalhada o processo de construção de placas de circuito impresso no programa. Nesse ambiente, é possível representar estruturas eletromagnéticas com elevada precisão. Cada configuração descrita na seção anterior foi construída como uma seção plana contendo as trilhas condutoras, o substrato dielétrico e, quando aplicável, o plano de referência metálico posicionado abaixo das trilhas.

As geometrias foram criadas utilizando ferramentas nativas do *software*, como Box, para representar o substrato, e Line + Strip, para gerar as trilhas condutoras. A modelagem foi feita com base nas dimensões definidas na etapa de planejamento, aplicando valores parametrizados previamente cadastrados no projeto, com unidade padrão definida em milímetros (mm). Essa abordagem favoreceu a organização e a alteração rápida de variáveis, mantendo consistência entre as simulações.

Na Figura 15 é possível visualizar um exemplo da *Project Variables List* de uma das simulações dentro do *software*:

**Figura 15 – Lista de variáveis do projeto 1a**



| N / | Variable | Expression | Value | Description                     | Owners                           |
|-----|----------|------------|-------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1   | W        | 20.1       | 20.1  | Largura da placa                | Box 1; Line 1; Point 2; Poin...  |
| 2   | L        | 40         | 40    | Comprimento da trilha           | Box 1; Line 1; Point 2; Strip... |
| 3   | wt       | 2          | 2     | Largura da trilha               | Line 1; Point 2; Point 1; Poi... |
| 4   | d        | 7.65       | 7.65  | Distância da trilha para a b... | Line 1; Point 2; Point 1; Poi... |
| 5   | dt       | 0.8        | 0.8   | Distância entre a trilhas       |                                  |
| 6   | h        | 1.5        | 1.5   | Altura da trilha                | Line 1; Point 2; Point 1; Poi... |
|     |          |            |       |                                 |                                  |
|     |          |            |       |                                 |                                  |
|     |          |            |       |                                 |                                  |
|     |          |            |       |                                 |                                  |
|     |          |            |       |                                 |                                  |
|     |          |            |       |                                 |                                  |

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a construção da geometria base, composta pelas trilhas condutoras, substrato dielétrico e, quando aplicável, plano de referência, procedeu-se à definição das propriedades eletromagnéticas dos elementos por meio da criação dos *Model Entities*. As trilhas condutoras e o plano de referência foram definidos como entidades do tipo *Thin Surface*, representando superfícies condutoras com espessura definida. O substrato dielétrico, por sua vez, foi configurado como uma entidade do tipo *Finite Dielectric Substrate*, permitindo a simulação das propriedades isolantes típicas do material dielétrico da placa.

Em seguida, foram atribuídas as propriedades dos materiais a cada entidade, com base na biblioteca padrão do *software*. O substrato foi definido como FR-4, com permissividade relativa ( $\epsilon_r$ )  $\approx 4,4$  e espessura de 1,5 mm. Já as trilhas e os planos condutores receberam o material *cooper* (cobre), caracterizado por alta condutividade elétrica, sendo essa configuração essencial para simular o comportamento realista das interconexões nas PCIs.

Afim de viabilizar a visualização espacial do acoplamento elétrico entre trilhas, foi criada uma área de observação do campo elétrico, denominada *Near Field Area*. Essa área foi posicionada logo acima da superfície das trilhas e recebeu uma malha personalizada com passo de 1 mm, de modo a garantir alta resolução na amostragem dos resultados. Dessa forma, tornou-se possível obter mapas de campo elétrico com qualidade suficiente para identificar regiões críticas de interferência entre condutores adjacentes.

Além disso, visando assegurar o correto funcionamento do sistema durante a excitação do sinal, foi realizada a ativação do plano de referência elétrico (*Ground*) no ambiente da simulação. Esse plano foi posicionado a uma profundidade de  $Z = -50$  mm em relação ao plano da placa, permitindo o fechamento dos caminhos de corrente mesmo nos casos em que não havia um plano de referência metálico explícito modelado, esse procedimento é fundamental para a estabilidade da simulação e para a correta injeção de energia no sistema.

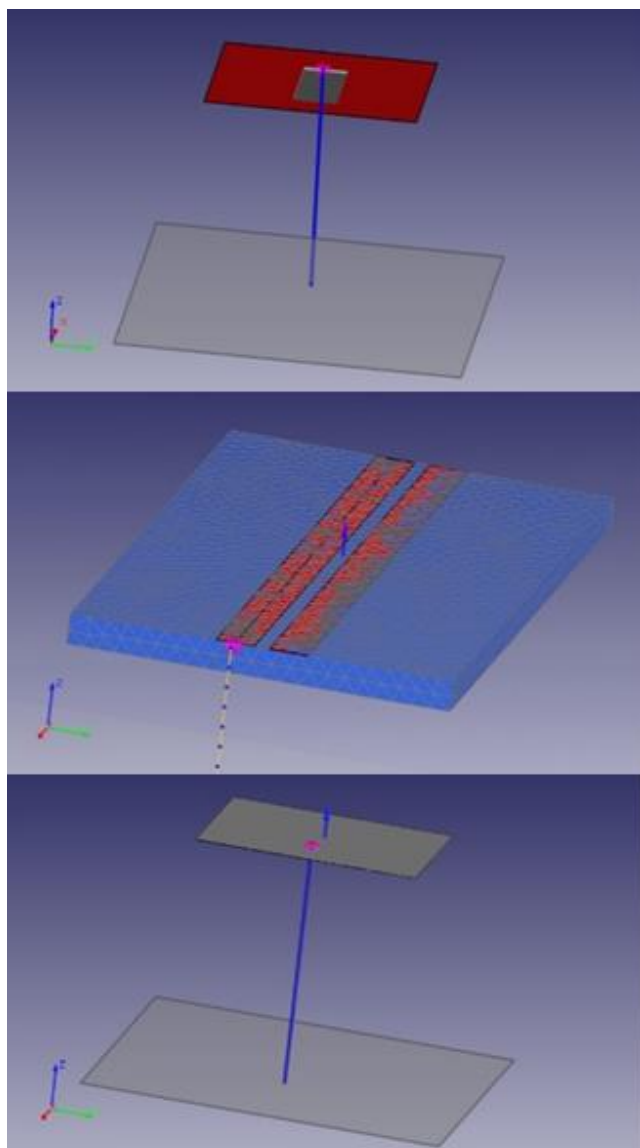
Em seguida, foi adicionada uma fonte de excitação senoidal à trilha agressora. Para isso, criou-se uma conexão vertical entre a trilha e o plano inferior por meio da ferramenta *Line*, posteriormente convertida em entidade elétrica do tipo *Wire*. Após a união com a trilha, foi atribuída à conexão uma fonte ativa (*Source*) com

impedância definida como *Feed Impedance: Active*, representando uma fonte de sinal real em operação.

Por fim, com a intenção de aproximar a simulação das condições reais de operação, o espaço ao redor da estrutura foi configurado como meio livre (*Free Space*), com as propriedades do ar atribuídas diretamente a partir da biblioteca de materiais do *software*. Essa definição foi realizada na aba *Environment*, assegurando uma representação mais fiel da propagação eletromagnética no entorno da PCI e evitando reflexões artificiais nos limites do domínio simulado.

A Figura 16 a seguir apresenta uma das placas completamente modelada no EMCoS *Studio*, com todos os elementos e parâmetros definidos conforme descrito.

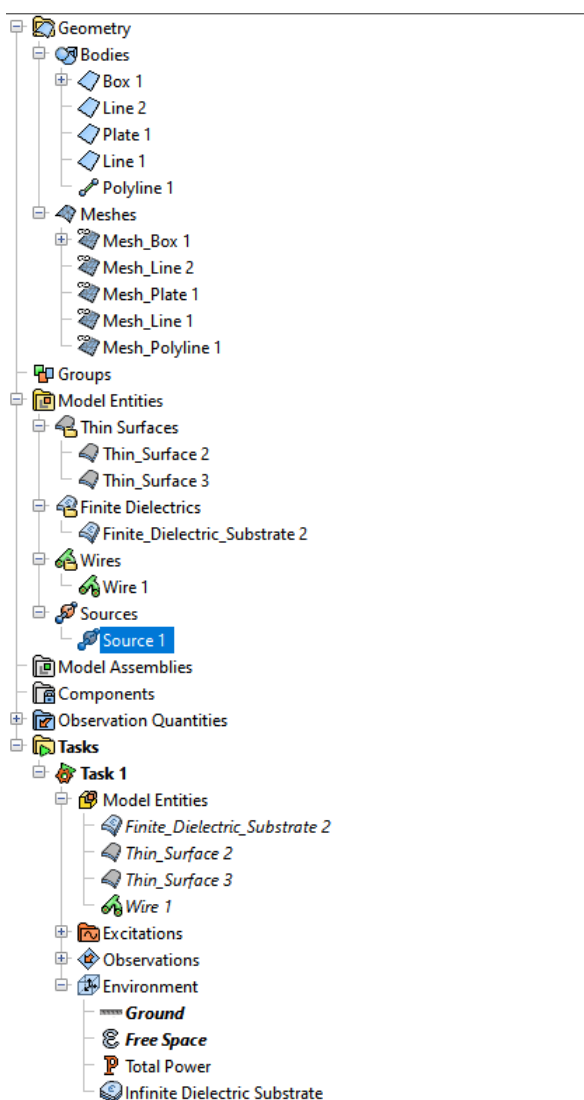
**Figura 16 – Modelagem final do projeto 1a**



Fonte: Elaboração própria (2025).

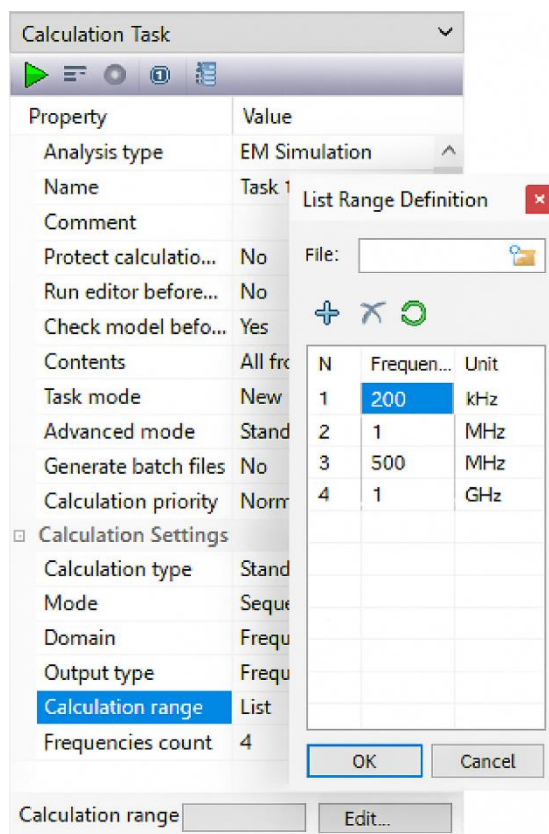
A Figura 17 a seguir apresenta o *Project Tree* de uma das placas simuladas, evidenciando a estrutura completa do modelo, desde os elementos geométricos até a definição das excitações, observações e parâmetros do ambiente.

**Figura 17 – Project tree do projeto 1a**



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a definição da geometria e dos materiais, foi configurada a *Task* responsável pela simulação do sistema. Nessa etapa, foram estabelecidos quatro valores de frequência para análise: 200 kHz, 1 MHz, 500 MHz e 1 GHz. Conforme ilustrado na Figura 18, que apresenta a seção *List Range Definition* da interface do software.

**Figura 18 – Calculation Task do projeto 1a**

Fonte: Elaboração própria (2025).

A seleção dessas frequências fundamenta-se em dois critérios principais: a ampla cobertura espectral, que permite avaliar o comportamento do sistema sob diferentes regimes de operação, e a coerência com dados experimentais previamente obtidos em bancada, garantindo maior realismo e aplicabilidade aos resultados da simulação.

Essas frequências cobrem uma ampla faixa do espectro, permitindo analisar o comportamento eletromagnético do sistema sob diferentes regimes de propagação de sinal. Frequências mais baixas, como 200 kHz e 1 MHz, representam situações em que os efeitos de propagação e acoplamento são limitados, e o campo elétrico tende a se distribuir de forma mais uniforme. Observou-se, no entanto, que nessas faixas a visualização da distribuição de campo no modelo não era suficientemente nítida, dificultando a análise detalhada do fenômeno de *crosstalk*.

Por outro lado, em frequências muito elevadas, como 1 GHz, a trilha começa a se comportar como uma linha de transmissão com características de guia

de onda, ou seja, efeitos como reflexão, descontinuidade de impedância e modos de propagação complexos tornam-se mais relevantes. Esse comportamento pode mascarar o acoplamento eletrostático entre as trilhas, prejudicando a análise direta do campo elétrico associado ao *near-field*.

Dessa forma, a frequência de 500 MHz foi escolhida como a mais adequada, pois representa um ponto de equilíbrio entre boa resolução espacial do campo e um regime em que ainda se observa o acoplamento capacitivo entre as trilhas, sem que o efeito de guia de onda seja dominante.

Evidencia-se que a utilização de múltiplas frequências também permite avaliar o sistema sob diferentes condições de estímulo, o que é essencial em projetos com requisitos de compatibilidade eletromagnética. Sendo assim, essa abordagem fornece uma visão mais completa da suscetibilidade e emissão potencial da estrutura simulada.

Após a configuração completa das *Tasks*, a simulação é executada por meio do botão *Run - Stop Calculation*, localizado na interface principal do EMCoS *Studio*. Caso todos os parâmetros estejam corretamente definidos, o *software* realiza a checagem de integridade do projeto, e a execução prossegue sem a geração de erros ou *warnings*. Ao final da simulação, o próprio *software* abre automaticamente uma ferramenta auxiliar chamada SimDATA, utilizada para a visualização e análise dos resultados computacionais.

No contexto deste trabalho, o principal resultado de interesse é o mapa de calor da distribuição do campo elétrico próximo às trilhas, o qual é acessado por meio da aba "*Near Field Distribution – 3D Results*" dentro do SimDATA. Essa visualização permite interpretar de forma qualitativa e comparativa o acoplamento capacitivo entre as trilhas condutoras para cada uma das configurações simuladas.

Dentro desse ambiente, o usuário pode selecionar a frequência de análise, escolhendo entre os valores previamente definidos no *List Range Definition*. Ademais, também é possível definir os componentes do campo a serem observados (Ex, Ey, Ez, tangencial, normal ou total), bem como a unidade de medida desejada (V/m e dB).

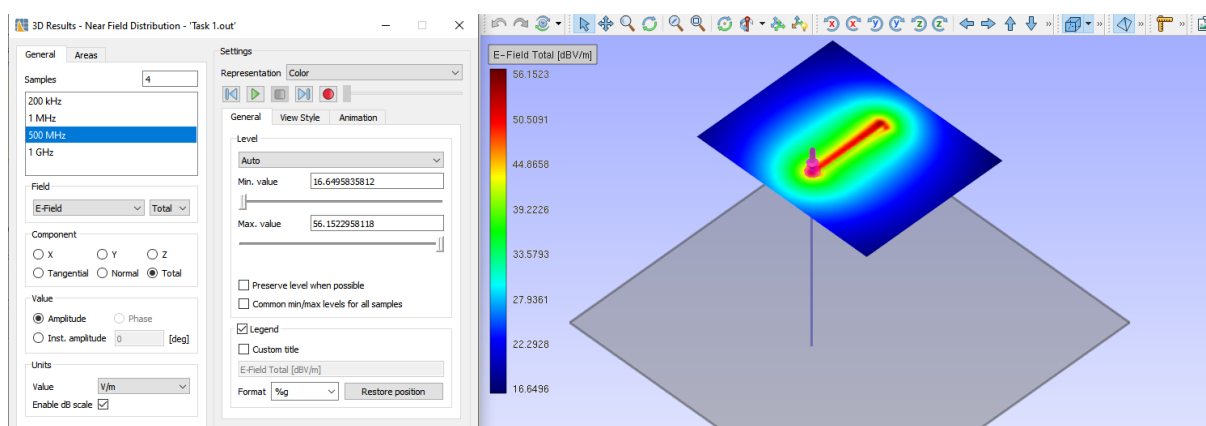
A visualização gráfica pode ser ajustada de diferentes maneiras, por meio do campo "*Representation*", permitindo exibir os resultados como mapas de cor (*Color*), setas vetoriais (*Arrow*), ou uma visualização do mapa de calor em apenas

duas cores (*Bicolor*). Além disso, o usuário pode alterar manualmente os valores mínimo e máximo da escala de campo, o que é essencial para manter a consistência na comparação entre diferentes simulações com o mesmo intervalo de frequências.

Também estão disponíveis opções de estilo visual como *Smooth*, *Wireframe*, *Light* e *Transparency*, que modificam a forma como a malha e os resultados são renderizados, proporcionando maior clareza na visualização dos campos. Por fim, há a possibilidade de se criar animações ao longo do tempo ou varredura de frequência, ajustando o número total de quadros (*frames*), o que contribui para a observação dinâmica da evolução do campo elétrico na estrutura.

A Figura 19 a seguir mostra um exemplo da visualização final obtida no SimDATA, evidenciando o campo elétrico na configuração 1a a 500 MHz:

**Figura 19 – Simulação no SimDATA do projeto 1a**



Fonte: Elaboração própria (2025).

A utilização do módulo SimDAT é destacada também por Sene (2025) como etapa essencial para a interpretação dos resultados de simulação, uma vez que possibilita a visualização detalhada da distribuição espacial do campo elétrico e a identificação de regiões críticas de acoplamento entre as trilhas condutoras. Sendo assim, esse recurso foi empregado como base para a análise comparativa entre as diferentes configurações simuladas, fornecendo subsídios para a avaliação do *crosstalk* em cada cenário.

### 3.3 Critérios de Análise

Com as simulações devidamente configuradas e executadas, foi possível

obter mapas de distribuição do campo elétrico nas proximidades das trilhas condutoras para todas as configurações analisadas. A interpretação desses resultados seguiu critérios qualitativos e comparativos, com foco principal na identificação e avaliação dos efeitos de acoplamento capacitivo entre trilhas adjacentes, caracterizando o fenômeno de *crosstalk*.

Para se garantir uma comparação justa entre diferentes configurações, as análises foram realizadas sempre sobre a mesma frequência de operação (500 MHz), que se mostrou mais adequada à visualização do acoplamento capacitivo, conforme discutido anteriormente. Dessa forma, evitou-se a influência de regimes de propagação distintos que poderiam mascarar ou amplificar artificialmente os efeitos observados.

A análise foi conduzida considerando os seguintes critérios:

- **Forma e distribuição das linhas de campo elétrico:** Observou-se se os campos se concentravam entre as trilhas (indicando forte acoplamento) ou se permaneciam mais confinados ao entorno da trilha agressora, o que é desejável para evitar interferência.
- **Alcance lateral do campo elétrico:** Foi avaliado até que ponto as linhas de campo da trilha agressora se estendiam lateralmente em direção à trilha vítima ou à borda da placa. Quanto maior o alcance, maior o risco de acoplamento indesejado.
- **Presença de regiões de alta densidade de campo (*hot spots*):** Áreas com alta intensidade de campo foram identificadas como zonas críticas de interferência, especialmente quando localizadas próximas à trilha vítima.
- **Comparação da intensidade do campo entre diferentes configurações:** Para cada par de simulações, foi utilizado o mesmo intervalo de coloração (valores mínimo e máximo da escala) nos mapas de calor, garantindo uniformidade visual e facilitando a comparação entre os casos.

- **Efeito da distância entre trilhas:** Considerou-se a variação do espaçamento entre as trilhas condutoras, verificando como essa alteração impactava a distribuição dos campos no espaço entre elas.
- **Impacto da presença ou ausência de plano de referência:** Analisou-se visualmente o impacto da introdução de um plano metálico contínuo posicionado abaixo das trilhas, comparando os casos com e sem esse elemento. Além disso, foi observada a diferença entre os cenários em que esse plano estava eletricamente conectado ao sistema de terra e os em que permanecia desconectado.
- **Influência da trilha de guarda:** Nas configurações que incluíam uma trilha intermediária adicional, foi observada sua interação com o campo elétrico ao redor das trilhas principais. Avaliaram-se separadamente os casos em que essa trilha de guarda estava desconectada (*off*) e os em que estava conectada (*on*) ao terminal de referência.

Esses critérios orientaram a extração e documentação dos resultados a partir do SimDATA, fornecendo subsídios para a próxima etapa deste trabalho, dedicada à apresentação e discussão comparativa dos mapas obtidos para cada configuração simulada.

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos nas 16 simulações realizadas no *software* EMCoS *Studio*, com foco na visualização da distribuição do campo elétrico nas diferentes configurações geométricas. Os mapas foram extraídos da interface SimDATA, utilizando-se a frequência de 500 MHz e os mesmos parâmetros de visualização para garantir uniformidade comparativa entre os diferentes cenários.

### 4.1 Modelagem das Configurações Simuladas

Esta subseção apresenta as visualizações das geometrias criadas no ambiente do EMCoS *Studio*. As Figuras 20 a 51 destacam a disposição das trilhas, o posicionamento do substrato dielétrico, conexões elétricas, e, quando aplicável, o plano de referência metálico.

As figuras foram agrupadas da seguinte forma, em três grupos principais:

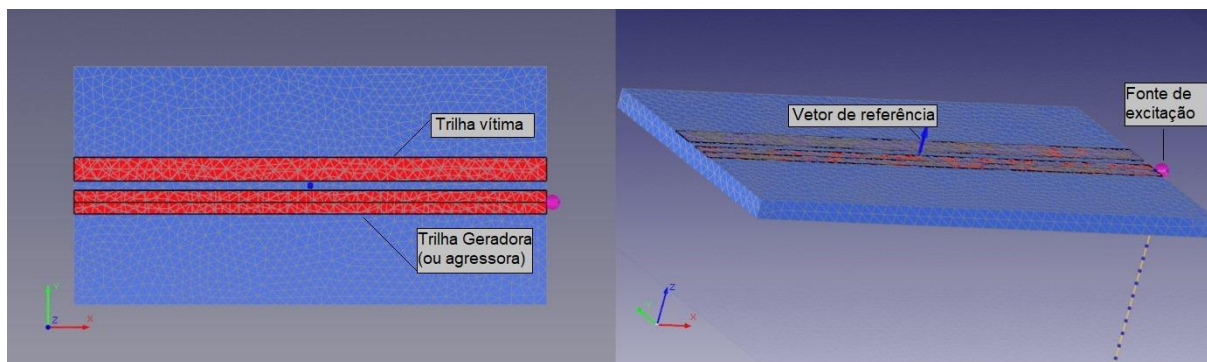
- simulações sem plano de referência (1a a 1e);
- simulações com plano de referência desconectado em relação a referência da fonte de excitação (2a a 2e - plano de referência desconectado);
- simulações com plano de referência conectado em relação a referência da fonte de excitação (2a a 2e - plano de referência conectado);

#### 4.1.1 Configuração 1a (sem plano de referência)

A configuração 1a representa o cenário com duas trilhas paralelas sem plano de referência, com distância mínima entre trilhas (0,8 mm). Essa configuração foi escolhida para simular uma condição crítica de acoplamento eletromagnético.

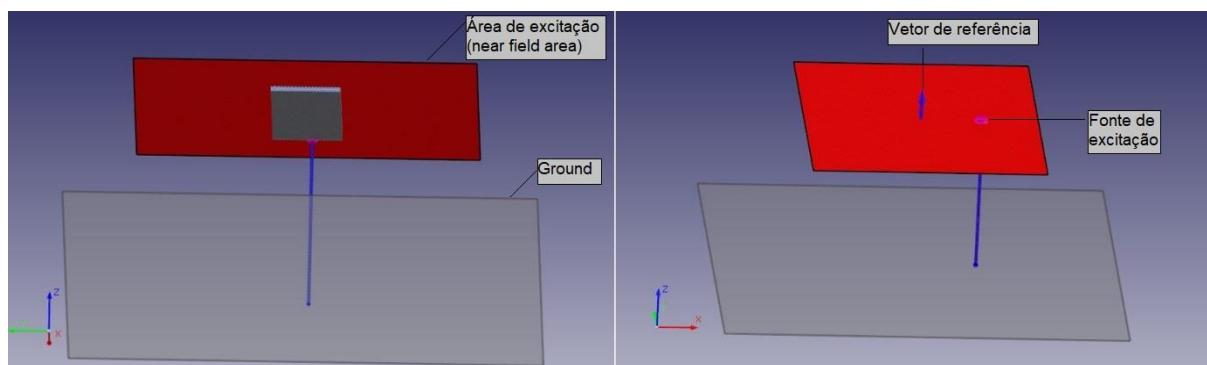
A seguir, nas Figuras 20 e 21 são apresentadas as visualizações da modelagem desenvolvida no EMCoS *Studio*, destacando-se a distribuição das trilhas, a conexão da fonte de excitação e a malha aplicada no substrato dielétrico.

**Figura 20 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1a**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 21 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1a**

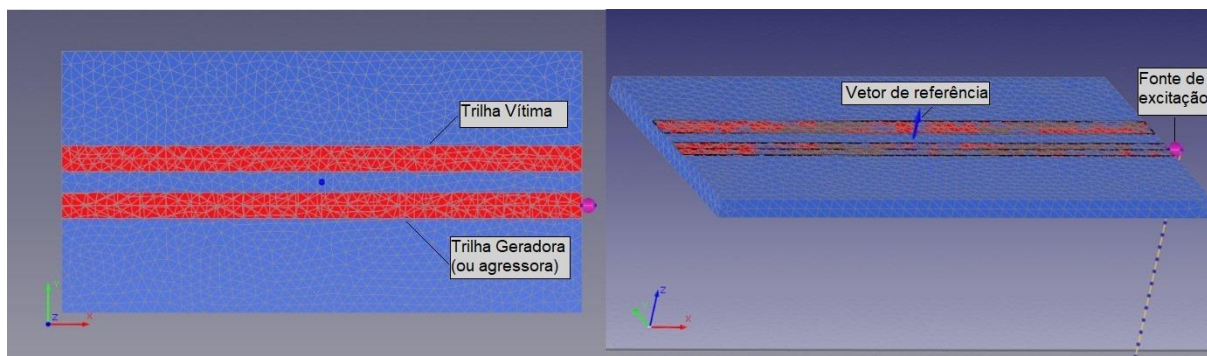


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.2 Configuração 1b (sem plano de referência)

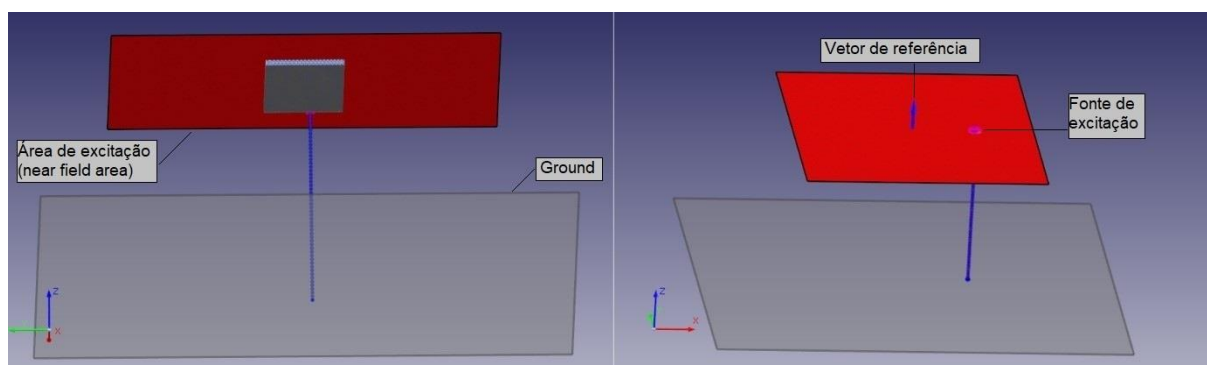
A configuração 1b mantém as mesmas dimensões da configuração 1a, com exceção da distância entre as trilhas condutoras, que foi aumentada de 0,8 mm para 1,6 mm. Essa modificação visa avaliar o impacto direto do espaçamento entre trilhas na formação do campo elétrico e no possível acoplamento capacitivo. As Figuras 22 e 23 mostram a visualização superior da modelagem, com a fonte aplicada, e a estrutura completa montada no ambiente do EMCoS *Studio*.

**Figura 22 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1b**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 23 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1b**

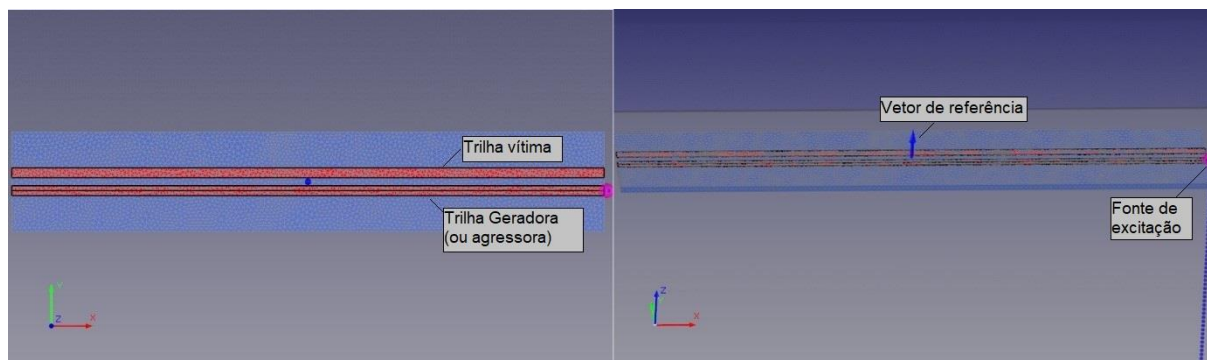


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.3 Configuração 1c (sem plano de referência)

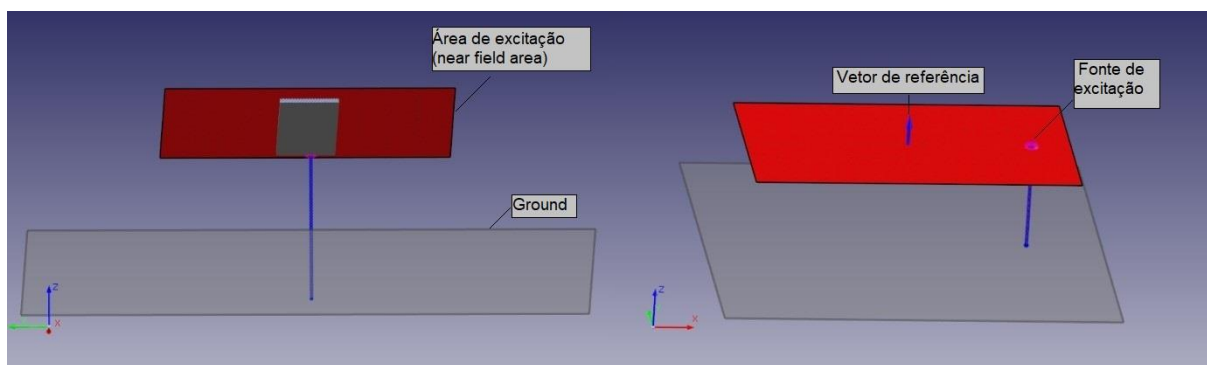
A configuração 1c foi elaborada com o objetivo de se analisar a influência do comprimento da trilha na distribuição do campo elétrico. Para isso, a distância entre trilhas foi mantida igual à da configuração 1b (1,6 mm), enquanto o comprimento foi ampliado de 40 mm para 120 mm. As Figuras 24 e 25 apresentam os detalhes da modelagem criada para essa configuração.

**Figura 24 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1c**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 25 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1c**

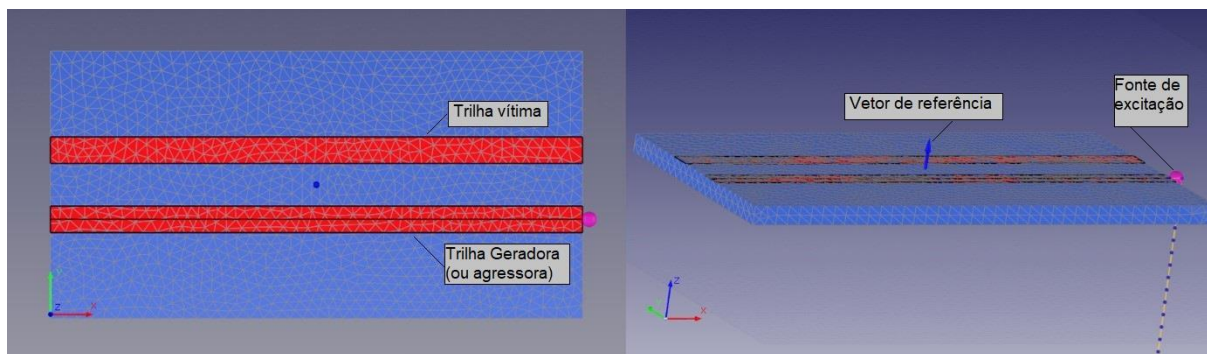


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.4 Configuração 1d (sem plano de referência)

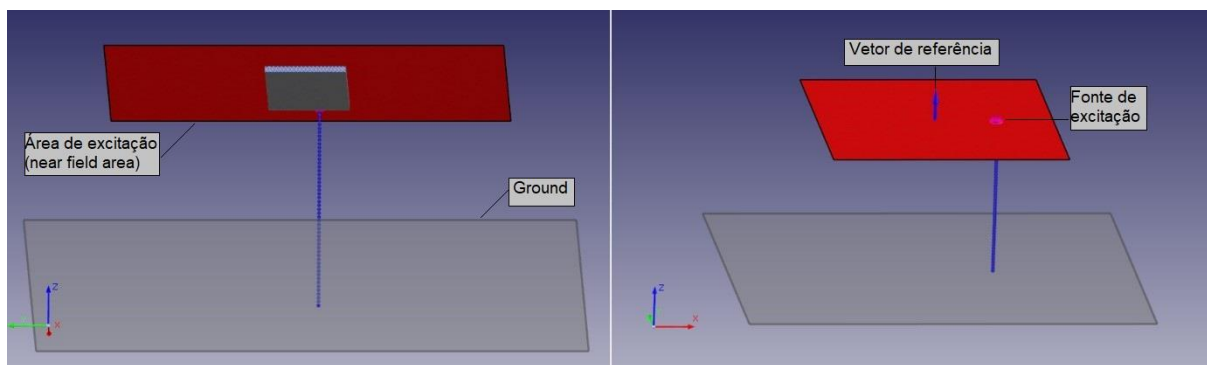
A configuração 1d foi projetada para representar uma situação com maior distância entre trilhas. Nesse caso, a separação foi aumentada para 3,2 mm, possibilitando-se investigar como esse afastamento influencia a distribuição do campo elétrico e a possível redução do acoplamento entre sinais. A seguir, nas Figuras 26 e 27, são exibidas as visualizações superiores e completas da geometria simulada.

**Figura 26 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1d**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 27 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1d**

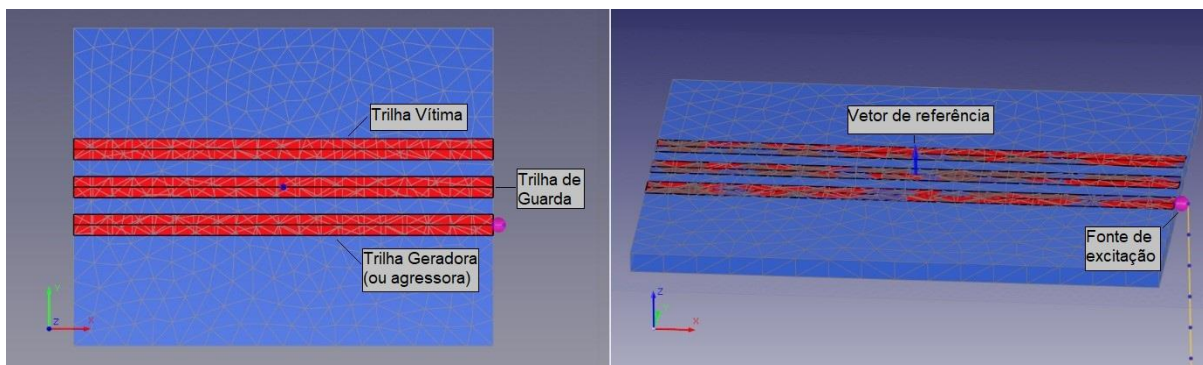


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.5 Configuração 1e (sem plano, trilha de guarda *off*)

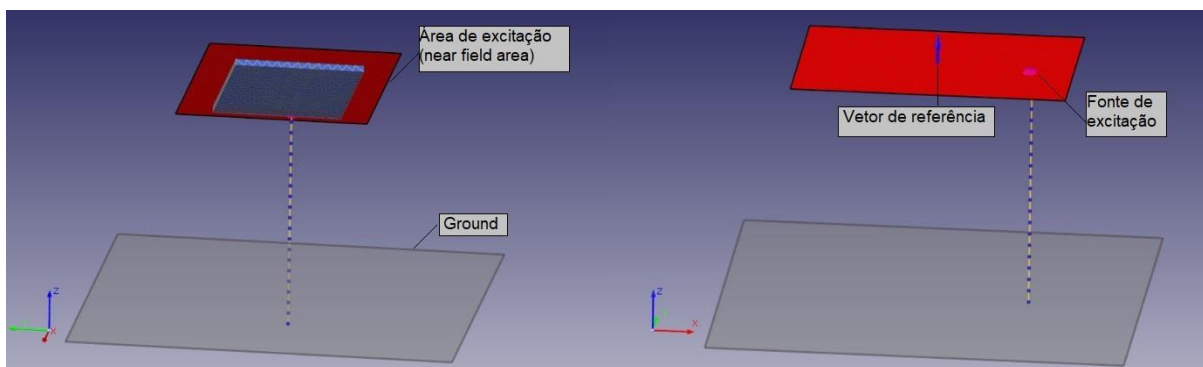
A configuração 1e (*off*) introduz uma terceira trilha central entre duas trilhas de sinal, funcionando como trilha de guarda. Nessa variação, a trilha de guarda foi deixada desconectada de qualquer potencial de referência, permanecendo eletricamente flutuante. O modelo mantém a distância entre trilhas adjacentes em 1,6 mm e o comprimento das trilhas em 40 mm. O objetivo é investigar se a simples presença física da trilha de guarda, mesmo sem conexão elétrica, exerce influência sobre a distribuição do campo elétrico entre os condutores de sinal. As Figuras 28 e 29 apresentam a visualização do modelo e da estrutura final da simulação.

**Figura 28 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1e (off)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 29 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1e (off)**

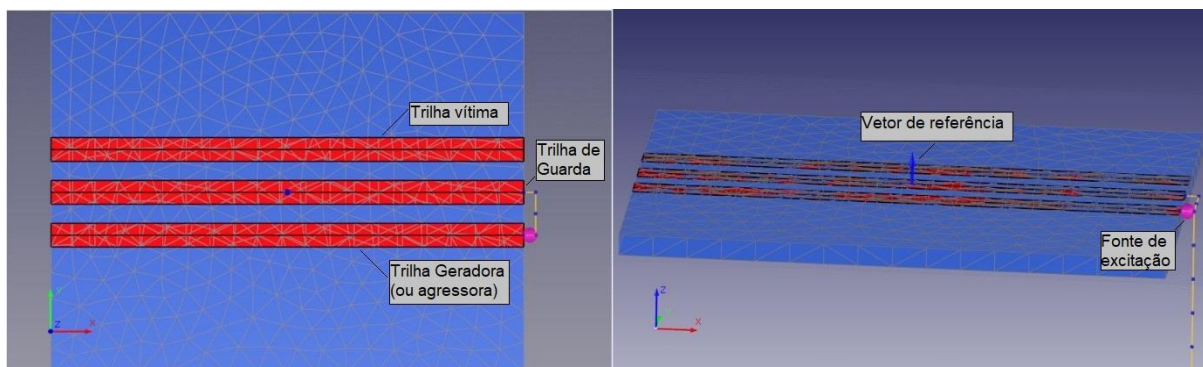


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.6 Configuração 1e (sem plano, trilha de guarda on)

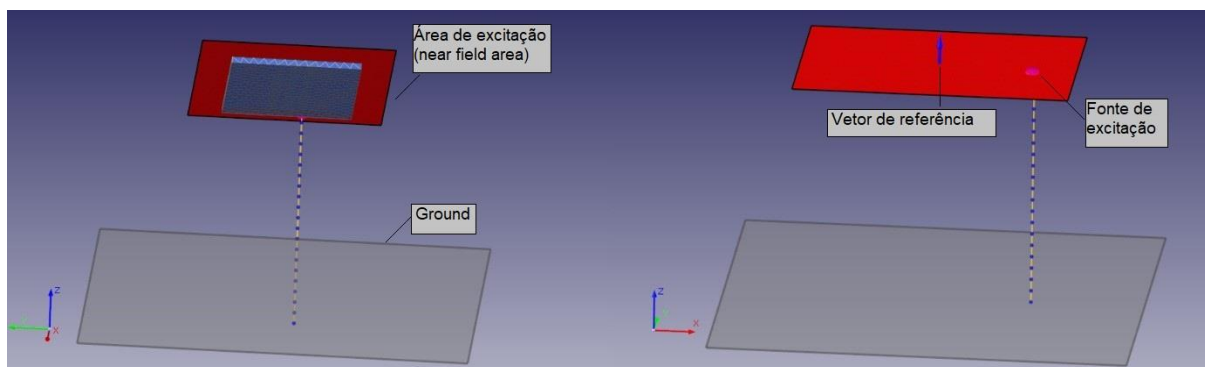
Nesta variação da configuração 1e (*on*), a trilha de guarda central foi conectada à referência da fonte de excitação, funcionando como uma barreira eletrostática entre os condutores adjacentes. O modelo mantém os mesmos parâmetros da variação anterior de espaçamento entre trilhas e comprimento, permitindo uma comparação direta entre as duas situações. A conexão tem como intuito observar se há atenuação do acoplamento capacitivo por meio do escoamento do campo elétrico para a referência. A seguir, nas Figuras 30 e 31, são mostradas as visualizações superiores e completas da estrutura simulada.

**Figura 30 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 1e (on)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 31 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 1e (on)**

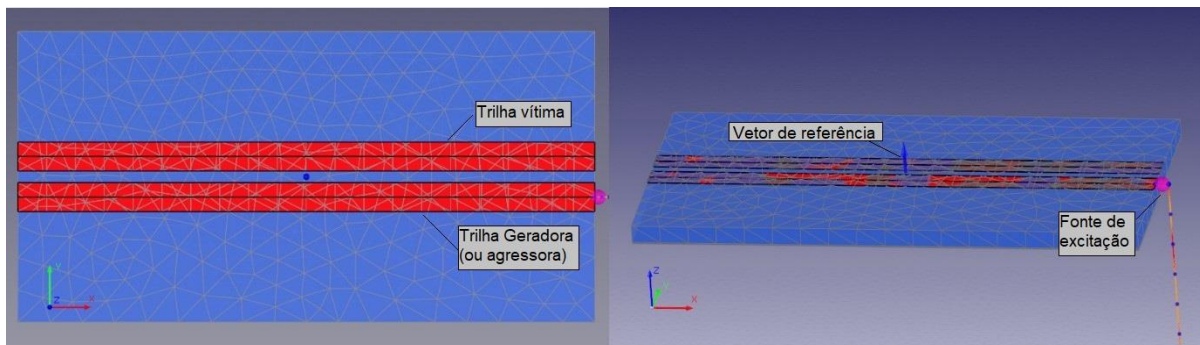


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.7 Configuração 2a (plano de referência desconectado)

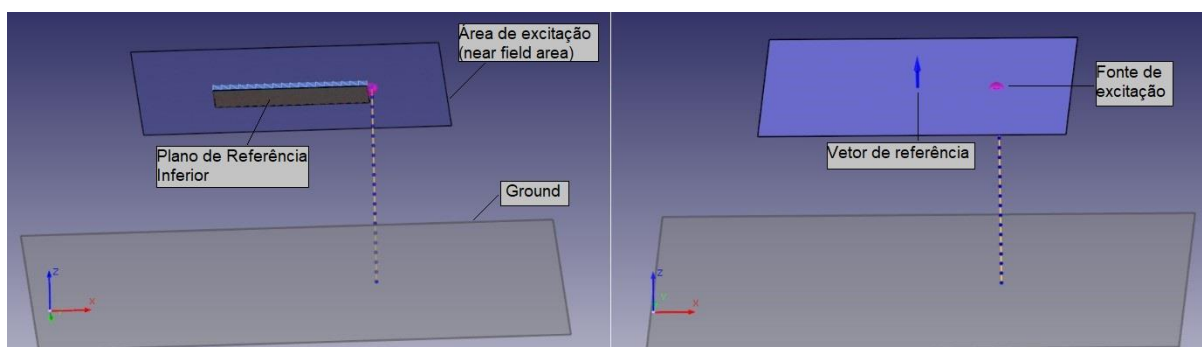
A configuração 2a é equivalente à 1a, com a única diferença sendo a adição de um plano de referência metálico posicionado abaixo das trilhas, porém sem conexão elétrica com o sistema. O restante da estrutura foi mantido inalterado. A seguir, nas Figuras 32 e 33, apresenta-se a modelagem utilizada.

**Figura 32 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2a desconectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 33 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2a desconectada.**

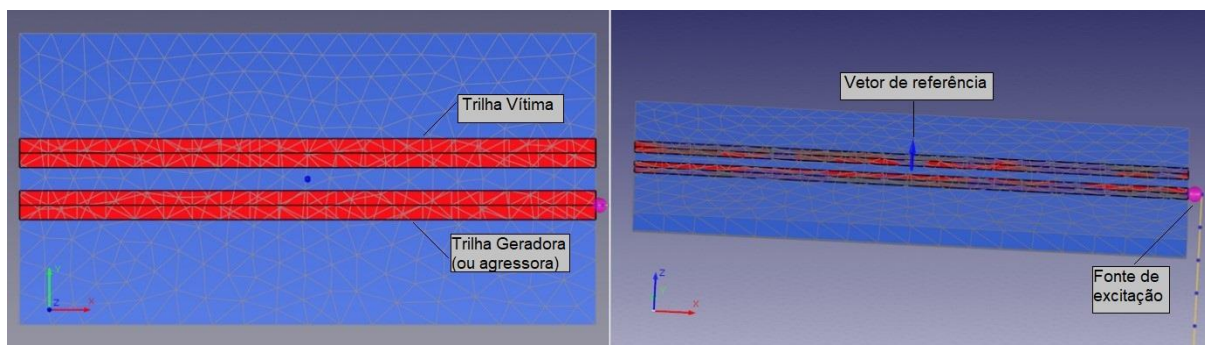


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.8 Configuração 2b (plano de referência desconectado)

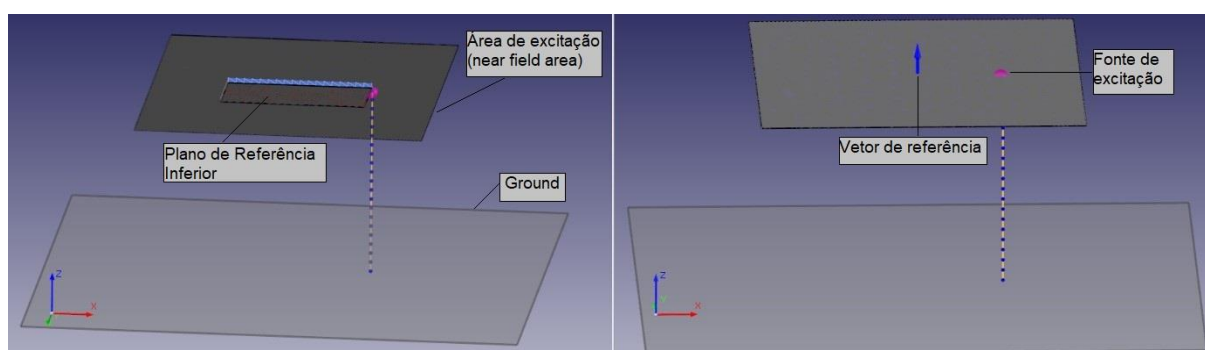
A configuração 2b repete a geometria da 1b, alterando apenas a inserção do plano metálico inferior, que permanece desconectado eletricamente. Essa modificação, apresentada nas Figuras 34 e 35, visa avaliar o impacto da presença física do plano na distribuição do campo elétrico.

**Figura 34 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2b desconectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 35 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2b desconectada.**

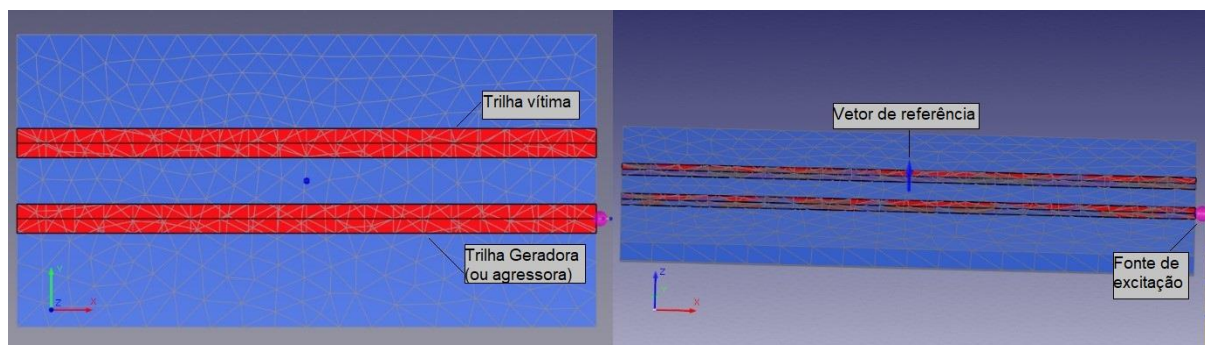


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.9 Configuração 2d (plano de referência desconectado)

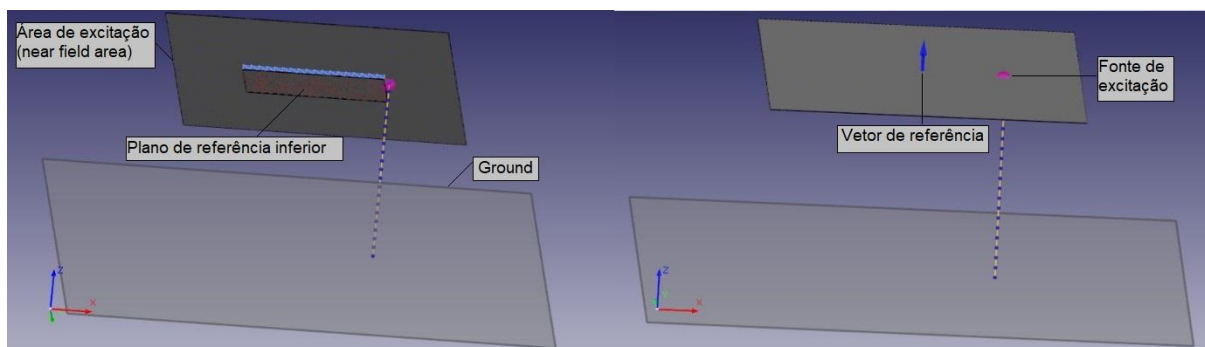
Semelhante à configuração 1d, a 2d adiciona um plano de referência metálico sob as trilhas, sem conexão à referência da fonte de excitação, conforme ilustrado nas Figuras 36 e 37. A estrutura das trilhas e do substrato permanece igual à versão sem plano.

**Figura 36 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2d desconectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 37 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2d desconectada**

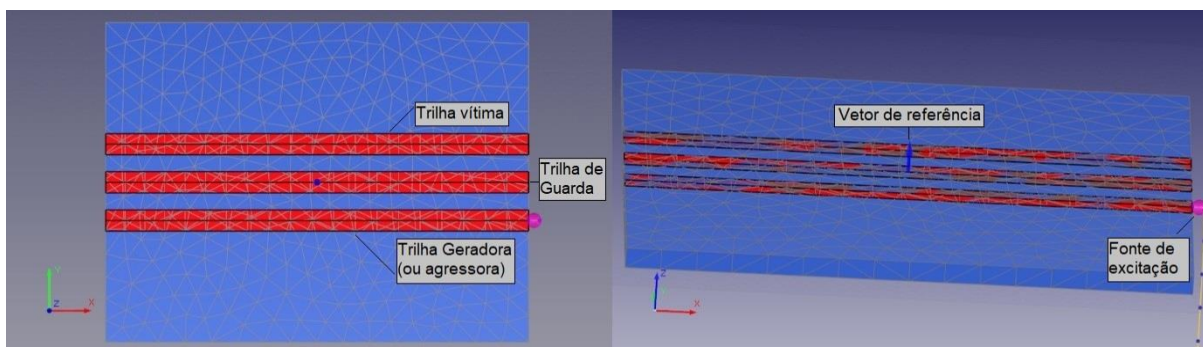


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.10 Configuração 2e (plano de referência desconectado, trilha de guarda *off*)

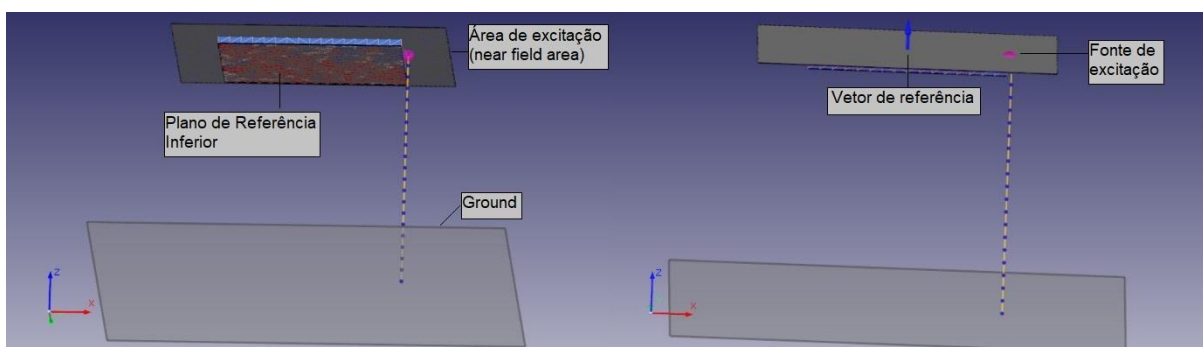
Essa configuração replica a estrutura da 1e (*off*), com a adição do plano de referência metálico posicionado abaixo das trilhas e sem conexão elétrica. As trilhas mantêm o mesmo espaçamento e a trilha de guarda permanece desconectada como ilustrado nas Figuras 38 e 39.

**Figura 38 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (*off*) desconectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 39 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (*off*) desconectada**

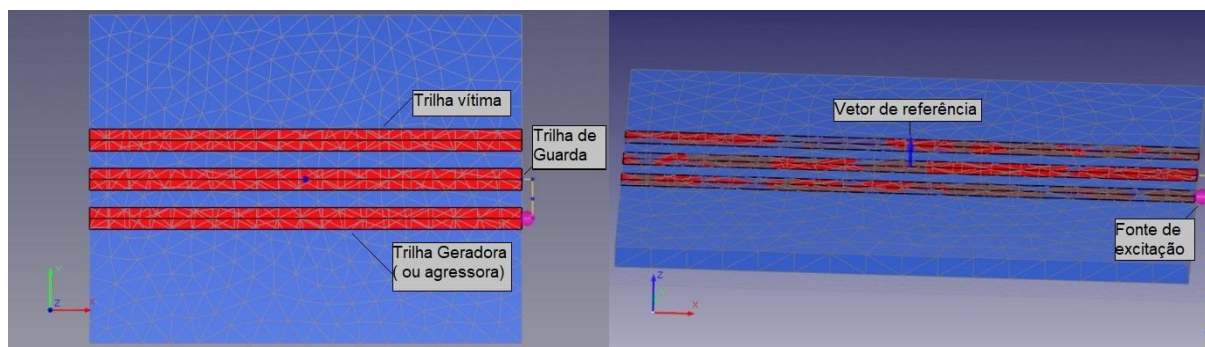


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.11 Configuração 2e (plano de referência desconectado, trilha de guarda *on*)

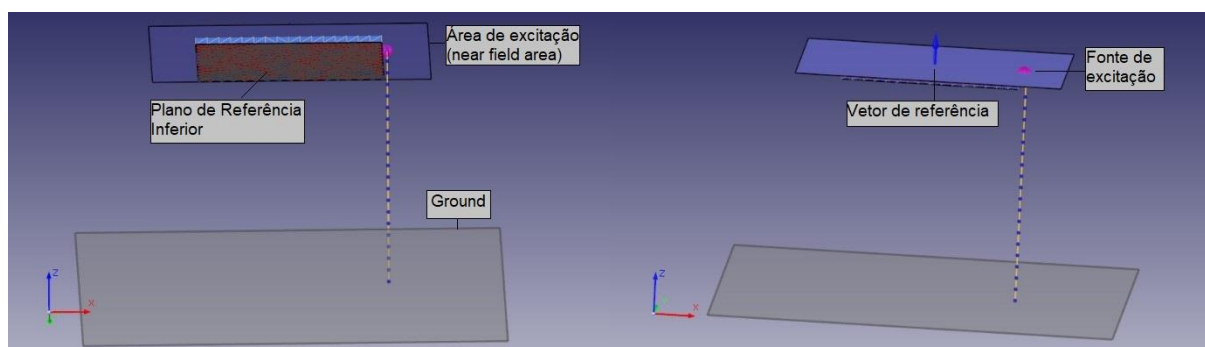
Por fim, a configuração 2e (*on*) mantém a estrutura da 1e (*on*), modificando apenas a adição do plano de referência metálico desconectado sob as trilhas, como mostrado nas Figuras 40 e 41. Nesse caso a trilha de guarda está conectada ao *ground*.

**Figura 40 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (on) desconectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 41 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (on) desconectada**

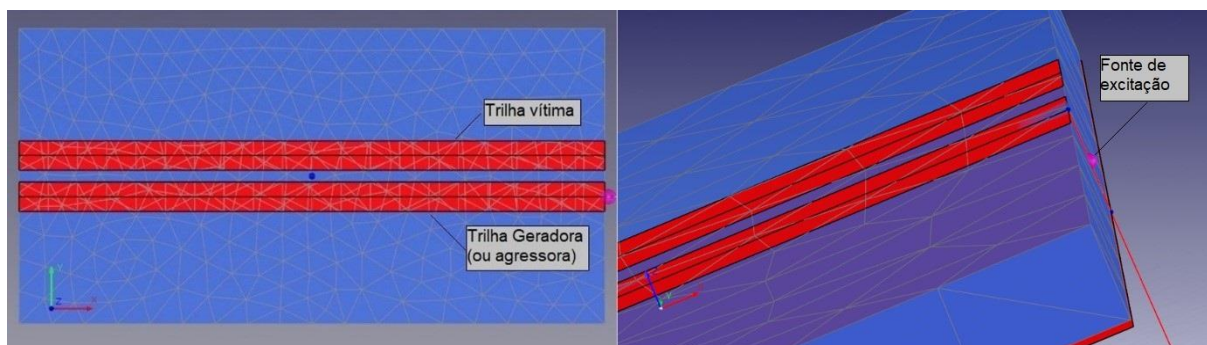


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.12 Configuração 2a (plano de referência conectado)

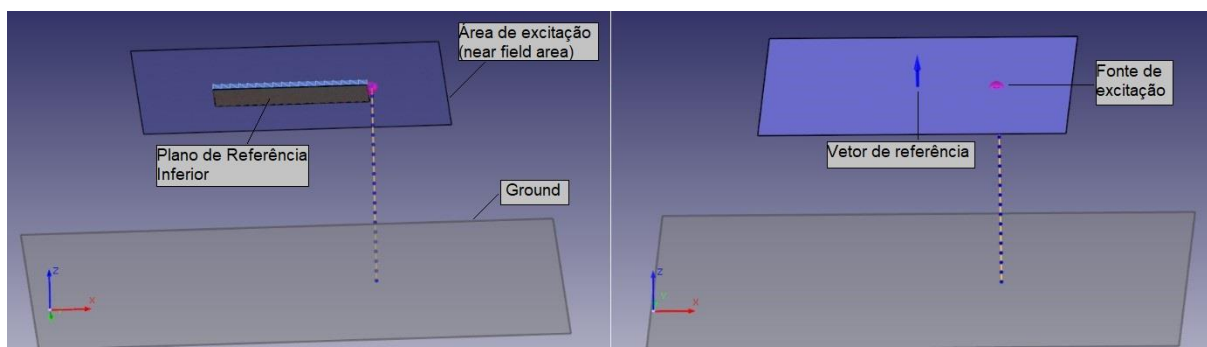
Nessa configuração, a placa 2a mantém a mesma estrutura da 1a, com a adição do plano de referência metálico conectado representado nas Figuras 42 e 43. Essa modificação permite observar o comportamento do campo elétrico em uma condição mais realista de operação, com o retorno da corrente garantido pelo plano inferior.

**Figura 42 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2a conectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 43 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2a conectada**

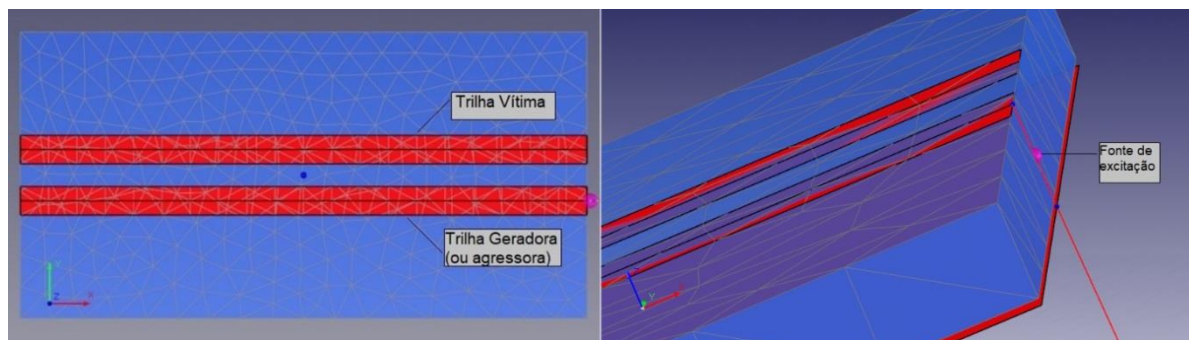


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.13 Configuração 2b (plano de referência conectado)

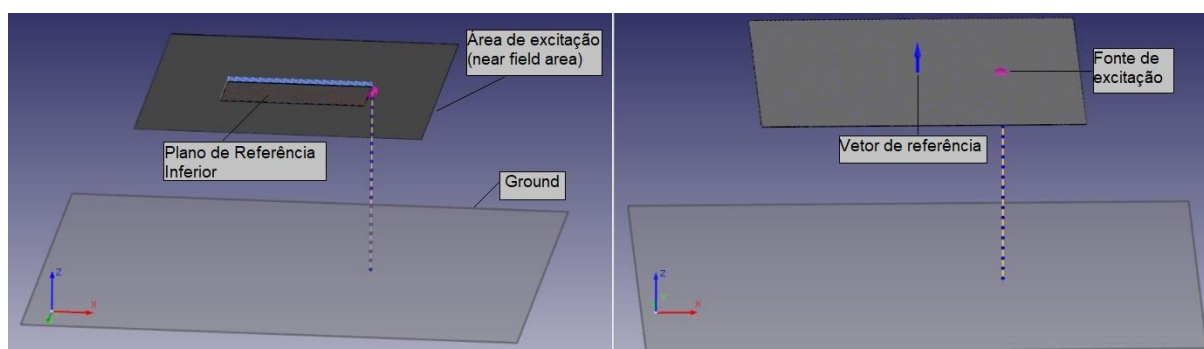
A configuração 2b replica a geometria da 1b, com a inclusão do plano de referência agora eletricamente conectado, como apresentado nas Figuras 44 e 45. Essa alteração tem como objetivo verificar a influência da conexão direta do plano na distribuição e confinamento do campo elétrico.

**Figura 44 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2b conectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 45 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2b conectada**

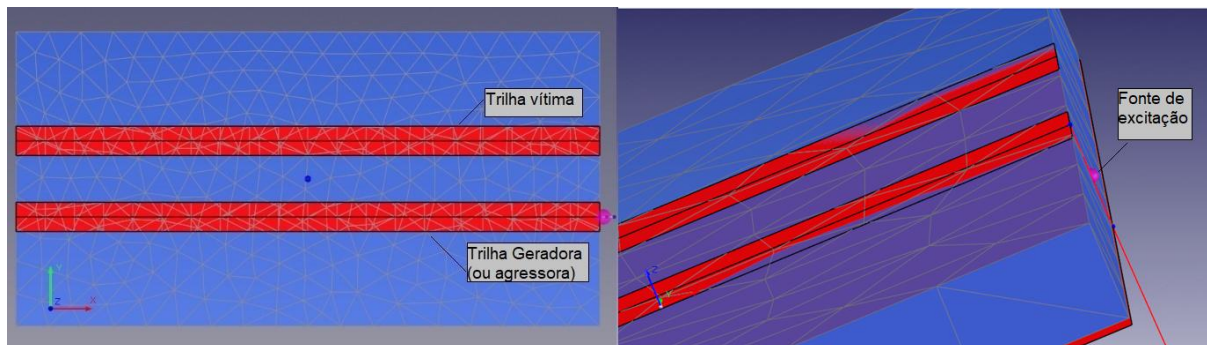


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.14 Configuração 2d (plano de referência conectado)

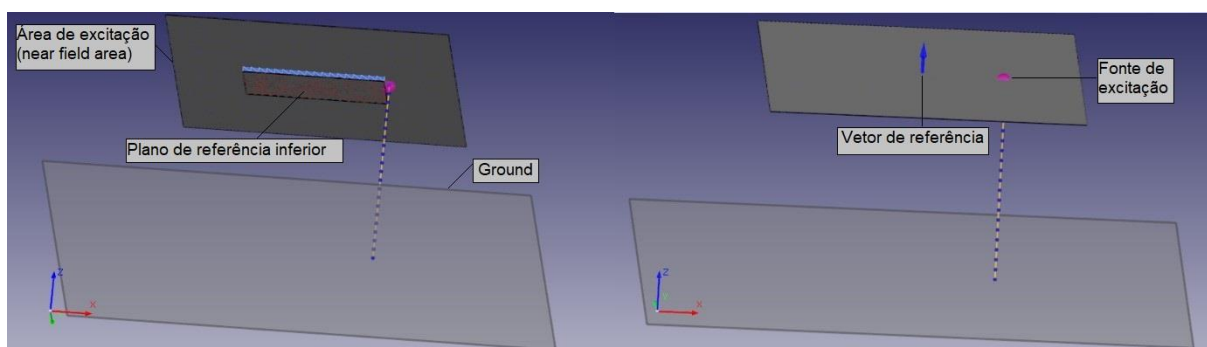
Nessa situação, mantém-se a estrutura da placa 1d, porém com a inclusão do plano inferior conectado, conforme ilustrado nas Figuras 46 e 47. O objetivo é evidenciar a atuação do plano de terra na mitigação do acoplamento capacitivo em trilhas mais afastadas.

**Figura 46 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2d conectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 47 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2d conectada**

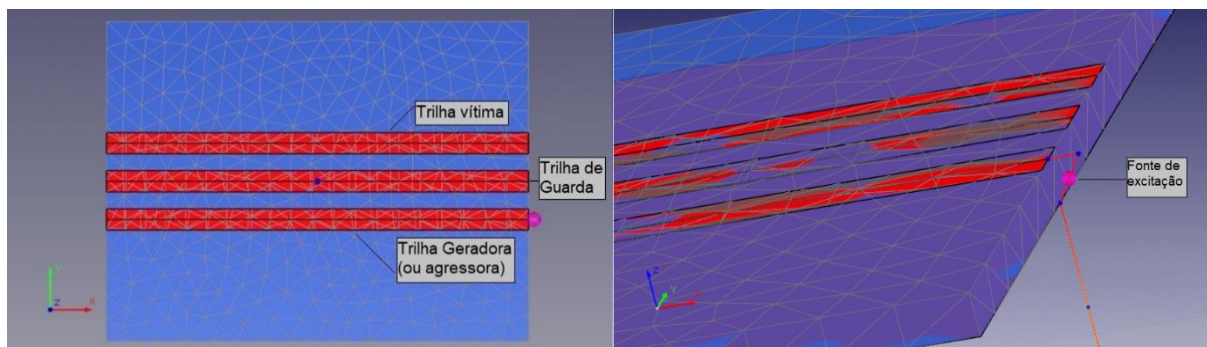


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.15 Configuração 2e (plano de referência conectado, trilha de guarda *off*)

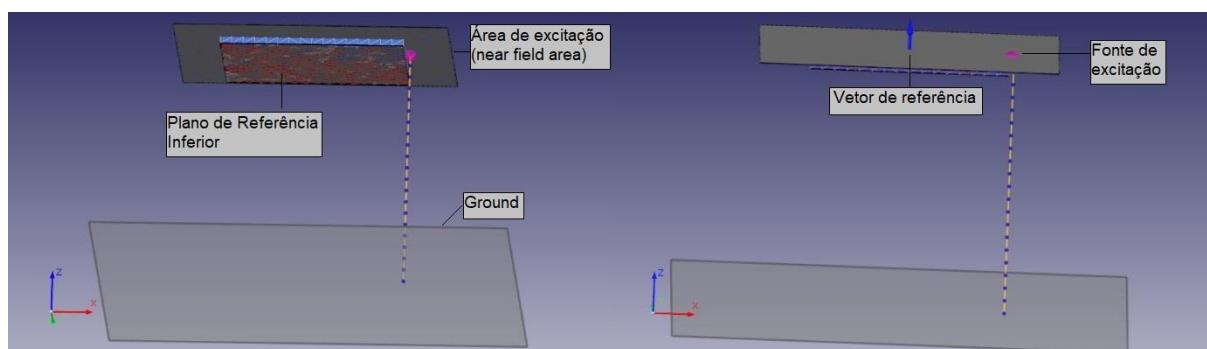
A configuração 2e (*off*) parte do mesmo arranjo da 1e (*off*), com trilha de guarda desconectada, e insere o plano metálico inferior com conexão elétrica, possibilitando avaliar o impacto da presença do plano mesmo sem o uso funcional da trilha intermediária, como mostrado nas Figuras 48 e 49.

**Figura 48 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (*off*) conectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 49 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (*off*) conectada**

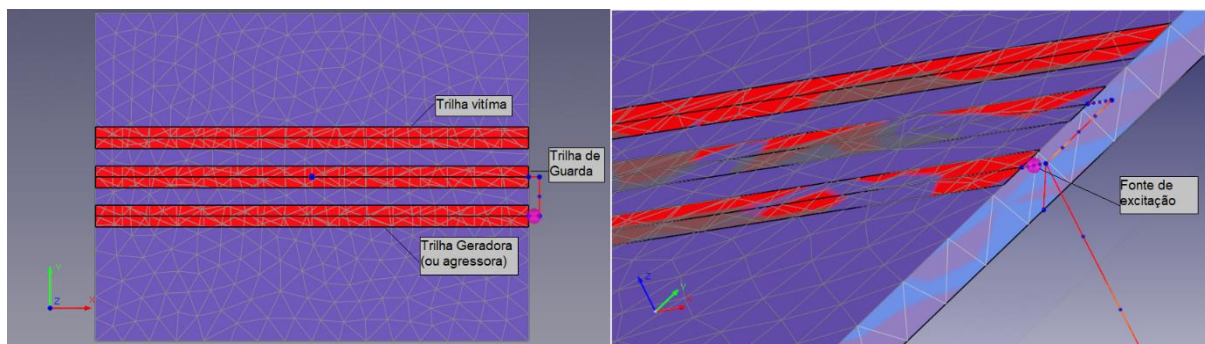


Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.1.16 Configuração 2e (plano de referência conectado, trilha de guarda *on*)

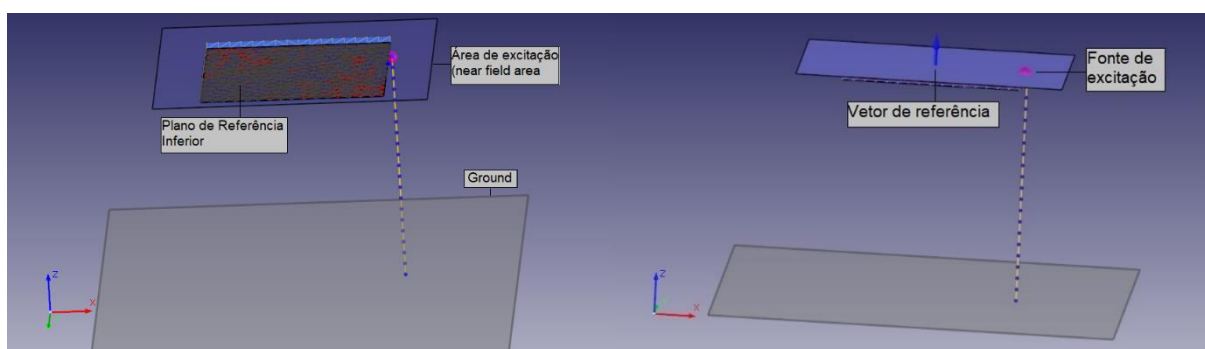
Finalizando, a configuração 2e (*on*) representa o cenário mais completo da análise: trilhas laterais, trilha de guarda conectada ao terra e plano de referência conectado. Essa combinação visa refletir uma condição otimizada de integridade de sinal, sendo apresentada nas Figuras 50 e 51.

**Figura 50 – Visualização da distribuição das trilhas e da fonte da modelagem da placa 2e (on) conectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 51 – Visualização da estrutura completa da modelagem da placa 2e (on) conectada**



Fonte: Elaboração própria (2025).

## 4.2 Análise Comparativa dos Resultados

Com as modelagens finalizadas no ambiente EMCoS *Studio*, foi possível realizar uma análise comparativa detalhada entre as diferentes configurações geométricas simuladas. O objetivo principal dessa etapa foi avaliar, de forma visual e qualitativa, os efeitos das variações estruturais sobre o acoplamento capacitivo entre trilhas condutoras, tendo como base os mapas de distribuição do campo elétrico obtidos via SimDATA.

As simulações foram conduzidas com frequência fixa de 500 MHz e renderizadas utilizando-se os mesmos parâmetros gráficos, como escala de cores, valores mínimo e máximo da intensidade de campo e estilo de visualização, garantindo a uniformidade necessária para uma comparação justa entre os diferentes casos.

A análise foi organizada em grupos de comparações, de modo a isolar os

impactos de variáveis específicas, conforme detalhado a seguir:

- **Comparação entre diferentes distâncias entre trilhas:**

Configurações 1a, 1b e 1d (sem plano de referência), com distâncias progressivamente maiores entre trilhas adjacentes.

- **Comparação entre diferentes comprimentos de trilha:**

Configurações 1b e 1c (sem plano de referência), com mesmo espaçamento entre trilhas, mas variação no comprimento total.

- **Comparação entre presença ou ausência de trilha de guarda:**

Configurações 1e (*off*) e 1e (*on*) sem plano de referência, com e sem conexão da trilha de guarda.

- **Comparação entre presença ou ausência de plano de referência:**

Comparação entre as configurações 1a × 2a, 1b × 2b e 1d × 2d, analisando os efeitos da inclusão do plano de referência tanto desconectado quanto conectado.

- **Comparações internas entre configurações com plano de referência desconectado:**

Configurações 2a × 2b × 2d, avaliando o efeito da distância entre trilhas quando o plano metálico inferior está presente, mas sem conexão.

- **Comparações internas entre configurações com plano de referência conectado:**

Configurações 2a × 2b × 2d, avaliando o efeito da distância entre trilhas quando o plano metálico inferior está presente, mas com conexão.

- **Comparações entre configurações sem trilha de guarda conectada:**

Configurações 1e (*off*), 2e (*off* – plano desconectado) e 2e (*off* – plano conectado), avaliando o comportamento com a trilha de guarda presente, mas não conectada.

- **Comparações entre configurações com trilha de guarda conectada:**

Configurações 1e (*on*), 2e (*on* – plano desconectado) e 2e (*on* – plano conectado), analisando a eficácia da guarda quando conectada ao plano de terra.

- **Comparação da trilha de guarda com plano de referência desconectado:**

Configurações 2e (*off*) e 2e (*on*), ambas com plano metálico presente, mas sem conexão. Essa comparação busca isolar o efeito da conexão elétrica da trilha de guarda em um ambiente com plano flutuante, destacando sua contribuição para a contenção do campo elétrico mesmo em condições não ideais.

- **Comparação da trilha de guarda com plano de referência conectado:**

Configurações 2e (*off*) e 2e (*on*), ambas com plano de referência aterrado. O objetivo é evidenciar os benefícios da trilha de guarda quando associada a um plano de terra contínuo, avaliando sua capacidade de reduzir significativamente o acoplamento capacitivo em um cenário ideal de referência eletromagnética.

As subseções a seguir detalham os resultados visuais dessas comparações, com base nos mapas de campo gerados no SimDATA.

#### 4.2.1 Comparação entre Diferentes Distâncias entre Trilhas

Neste primeiro grupo de análise, buscou-se avaliar o impacto do espaçamento entre trilhas condutoras sobre o acoplamento capacitivo, com foco na distribuição do campo elétrico gerado entre os condutores. Foram consideradas três configurações distintas, 1a, 1b e 1d, modeladas sem a presença de plano de referência metálico, o que permite destacar mais nitidamente os efeitos diretos da variação geométrica sobre o comportamento eletromagnético.

As três configurações mantêm constantes todos os demais parâmetros construtivos, variando apenas a distância entre as trilhas adjacentes:

- A configuração 1a apresenta a menor distância entre trilhas, com 0,8 mm de espaçamento;
- a configuração 1b possui distância intermediária, com 1,6 mm;
- a configuração 1d utiliza a maior distância entre trilhas, 3,2 mm entre as trilhas.

A análise foi realizada a partir dos mapas de campo elétrico obtidos no ambiente SimDATA, utilizando frequência de excitação de 500 MHz, mantendo-se a padronização dos parâmetros de visualização. As escalas de intensidade de campo (mínimo e máximo), o modo de renderização e os estilos gráficos foram mantidos idênticos entre os três casos, assegurando uniformidade e coerência visual para fins comparativos.

Evidencia-se que, na configuração com menor espaçamento (1a), o campo elétrico apresenta maior concentração entre as trilhas, com vetores mais intensos e regiões de coloração mais quente próximas ao eixo longitudinal entre os condutores. À medida que o espaçamento aumenta (1b e 1d), há uma clara redução na densidade de linhas de campo entre os condutores e uma maior dispersão lateral do campo, indicando menor acoplamento capacitivo.

Essa diminuição do acoplamento é especialmente perceptível na trilha vítima, onde a magnitude do campo elétrico reduz-se significativamente conforme a distância entre as trilhas aumenta. Isso está de acordo com o comportamento teórico da capacitância mútua entre condutores paralelos, cujo valor decresce com o aumento da separação física. Em termos gerais, quanto mais próximas estão as trilhas, maior a interação entre seus campos elétricos, favorecendo o fenômeno de *crosstalk*, especialmente em circuitos de alta frequência.

As Figuras 52 a 56 ilustram essas observações com diferentes perspectivas de visualização. Sendo que as Figuras 52 e 53 apresentam a distribuição escalar do campo elétrico para as configurações 1a, 1b e 1d, respectivamente em dBV/m e em V/m.

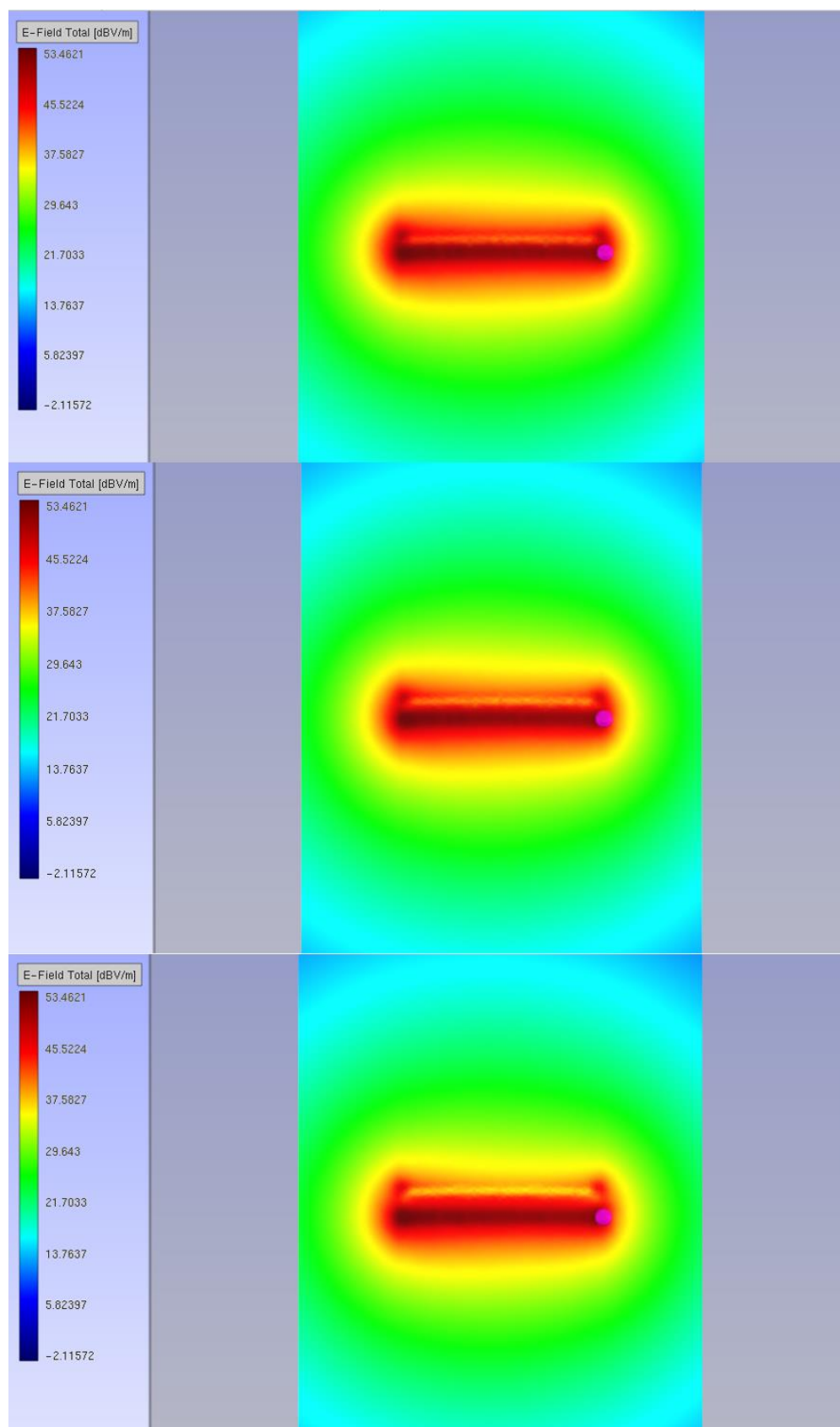
Na Figura 54, a visualização em modo transparência permite observar como o campo se distribui em relação ao substrato, destacando que a maior proximidade (1a) mantém a interação de campo fortemente confinada entre as trilhas,

enquanto os maiores afastamentos favorecem a dispersão lateral.

A Figura 55, em modo *wireframe*, reforça esse efeito ao evidenciar os contornos da malha e a diferença na extensão lateral das linhas de campo: quanto mais afastadas as trilhas, menor a sobreposição dos campos elétricos entre condutores.

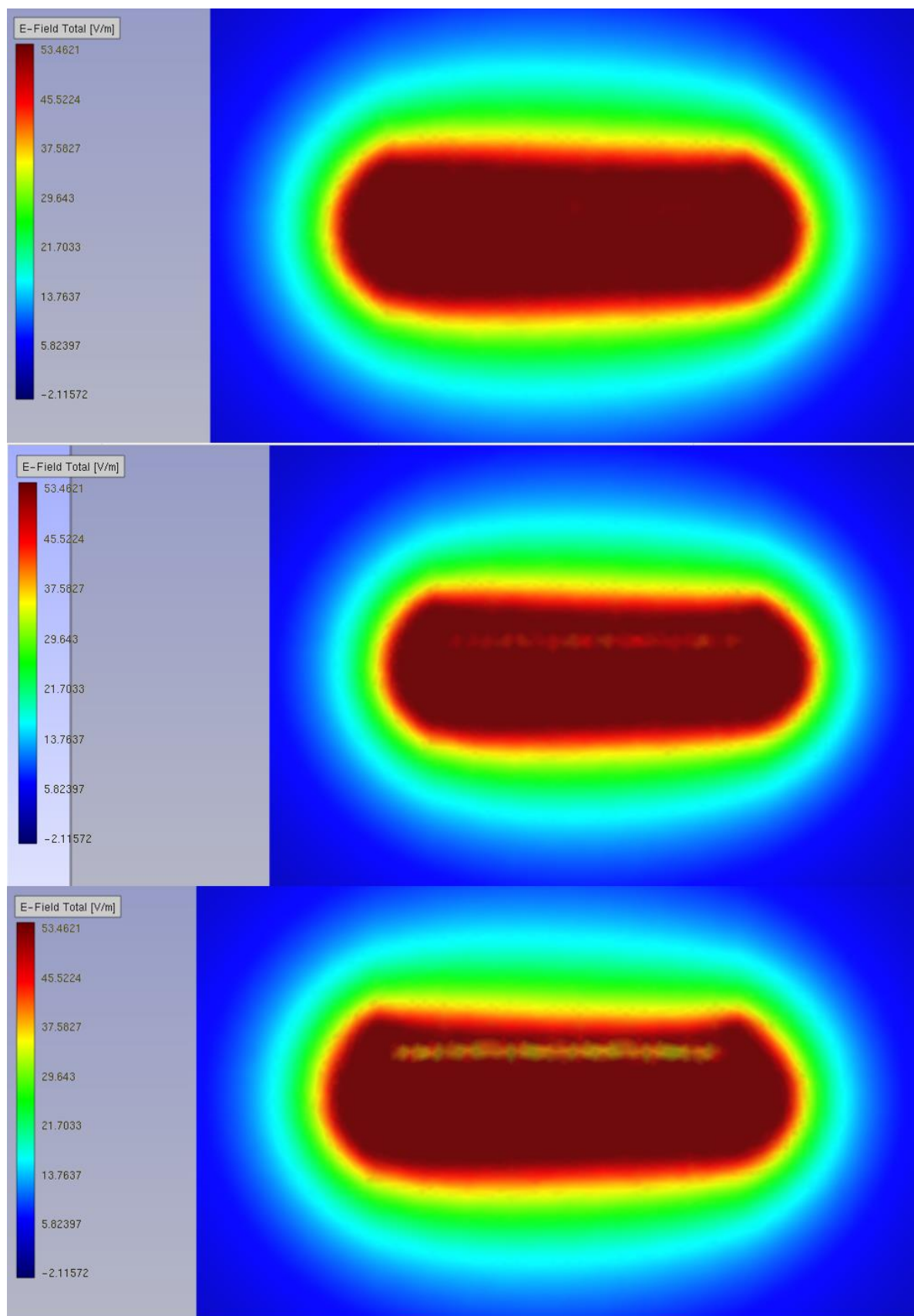
Por fim, a Figura 56 apresenta a visualização lateral com vetores de campo elétrico. Essa perspectiva é a que melhor evidencia o fenômeno de acoplamento, mostrando a intensidade e a direção predominante das linhas de campo. Nota-se que, no caso 1a, os vetores se concentram diretamente entre a trilha agressora e a vítima, enquanto em 1b e 1d a densidade de vetores na região intermediária diminui progressivamente, confirmando que o aumento do espaçamento reduz a suscetibilidade ao *crosstalk*.

**Figura 52 – Distribuição escalar do campo elétrico em dBV/m (configurações 1a, 1b e 1d)**



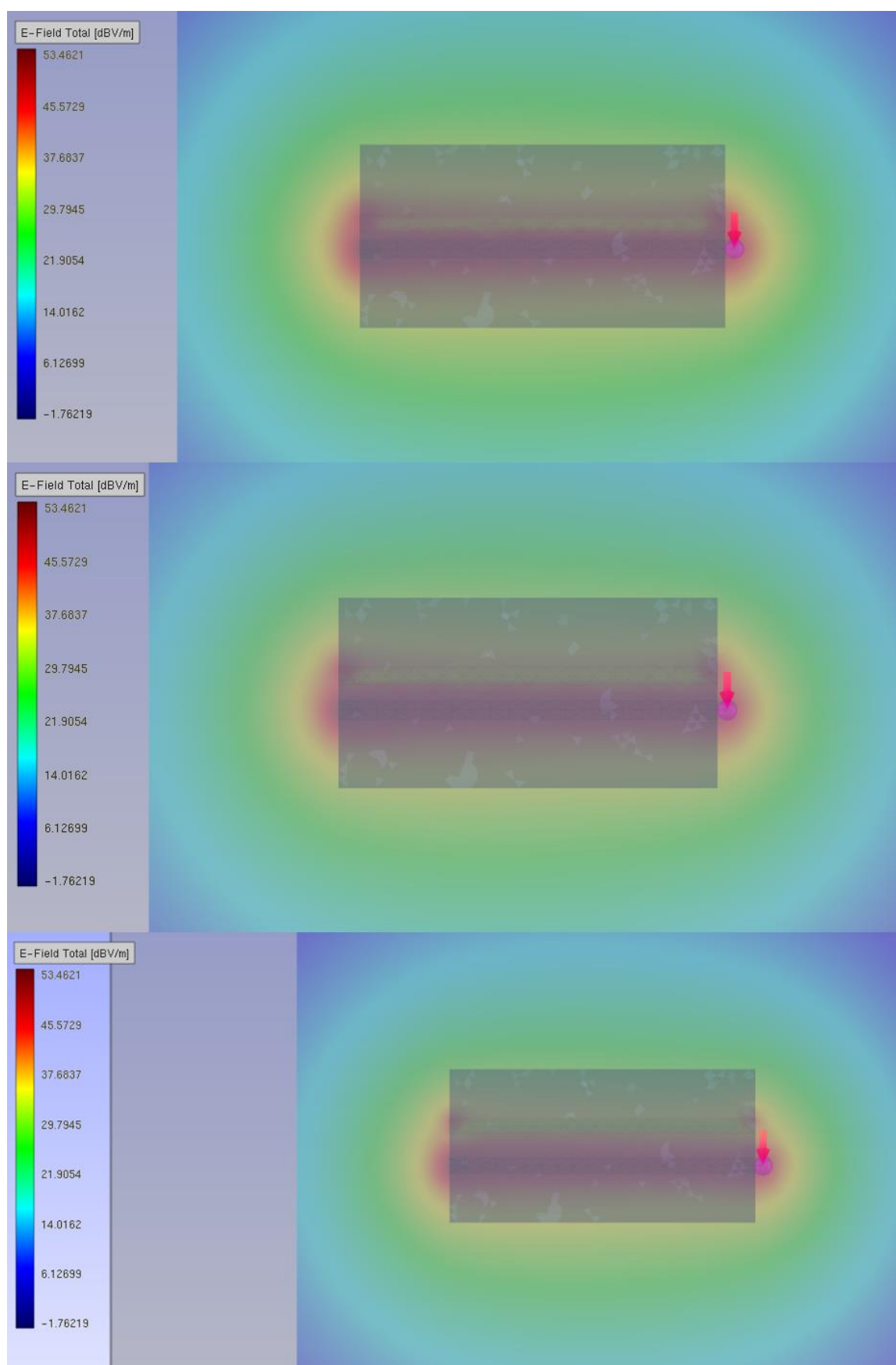
Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 53 – Distribuição escalar do campo elétrico em V/m (configurações 1a, 1b e 1d)**



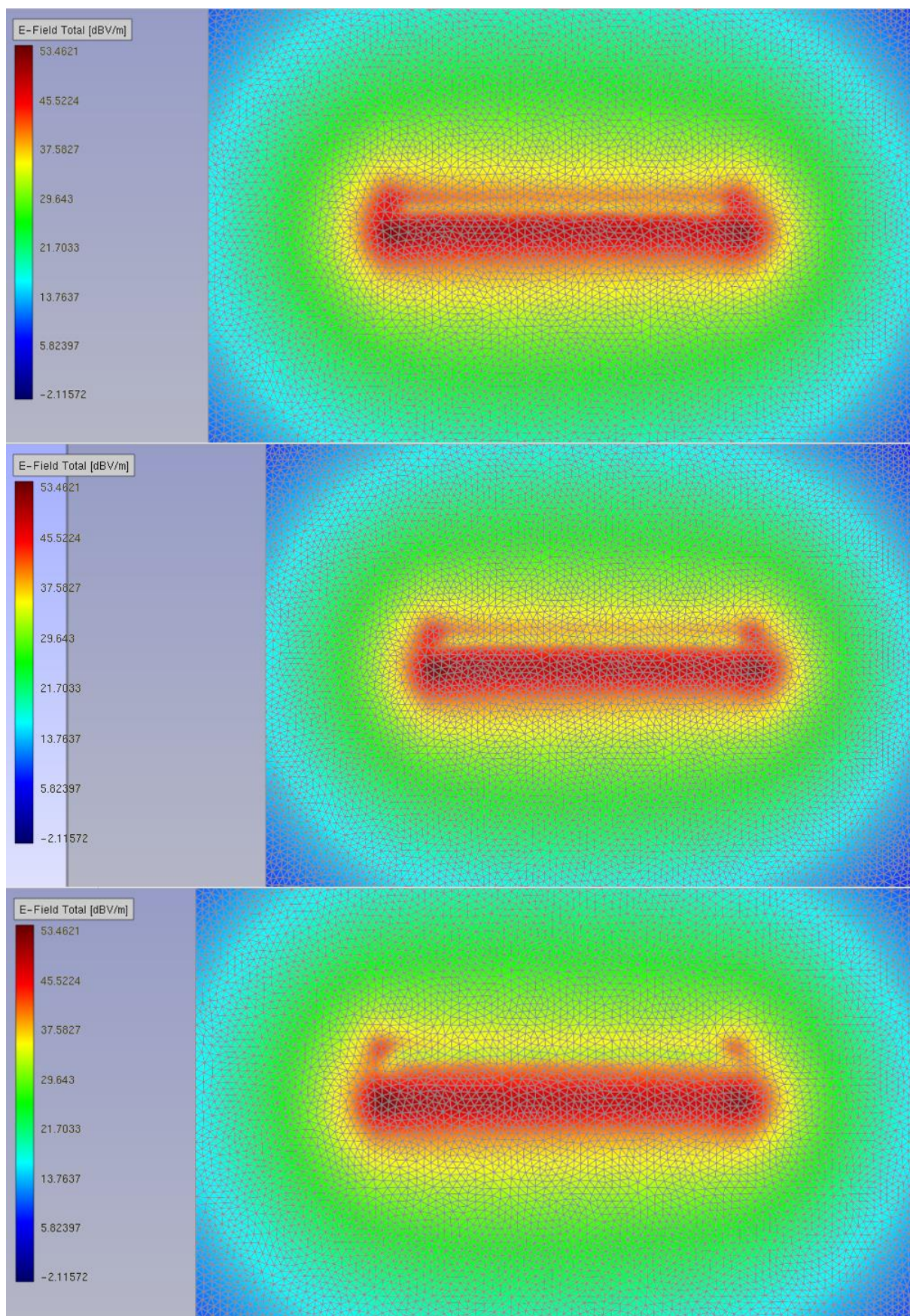
Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 54 – Visualização superior com transparência (configurações 1a, 1b e 1d)**



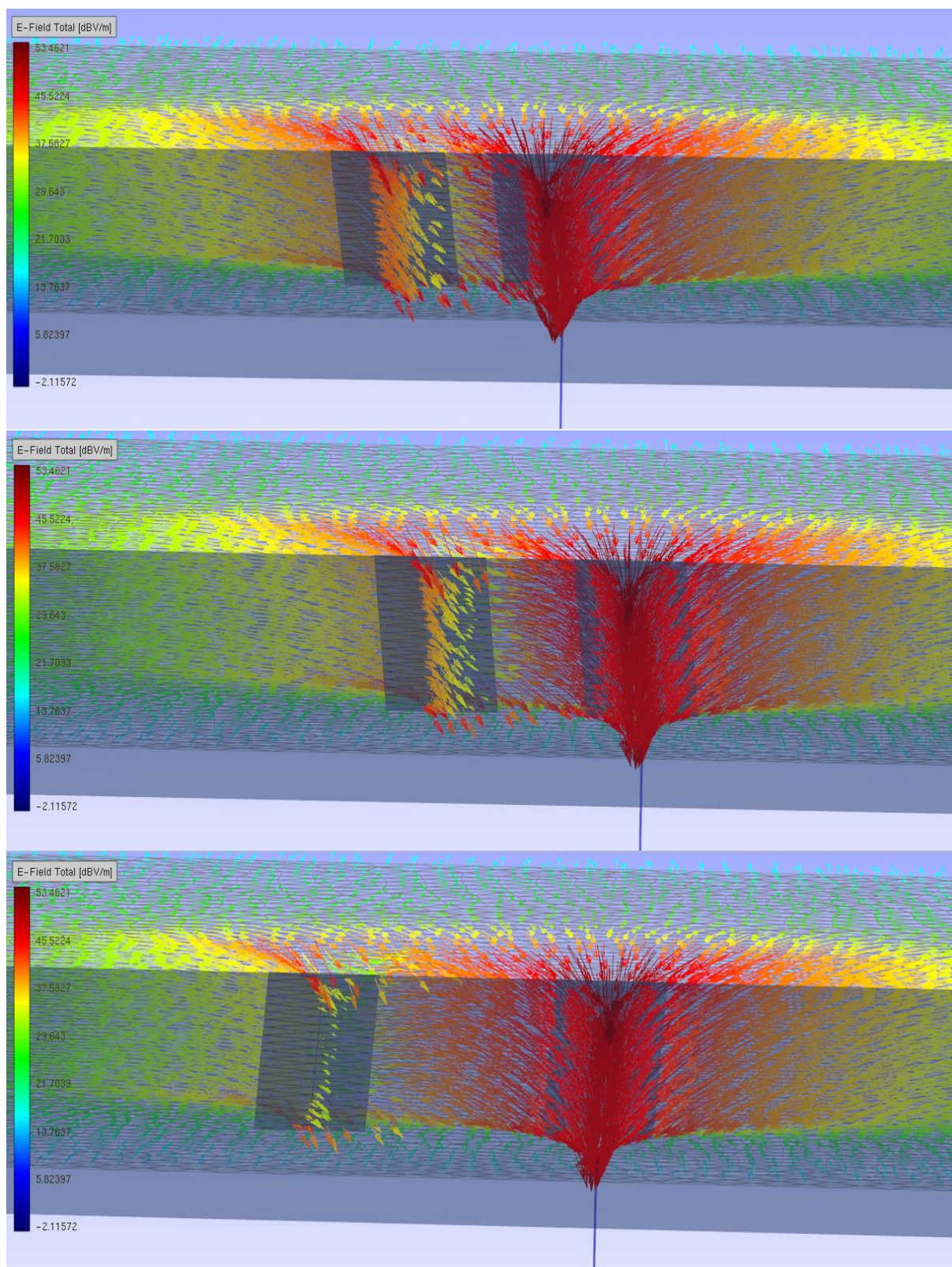
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 55 – Visualização superior com *wireframe* (configurações 1a, 1b e 1d)



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 56 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1a, 1b e 1d)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.2 Comparação entre Diferentes Comprimentos de Trilha

Nesta subseção, busca-se investigar o impacto da variação do comprimento das trilhas condutoras sobre o acoplamento capacitivo, mantendo fixos os demais parâmetros geométricos. Foram comparadas duas configurações simuladas sem plano de referência: a configuração 1b, com trilhas de 40 mm, e a configuração 1c, com trilhas de 120 mm. Ambas mantêm a mesma distância entre condutores adjacentes (1,6 mm), de modo que a principal variável em análise seja o comprimento longitudinal das trilhas.

Conforme previsto pela teoria eletromagnética, o acoplamento capacitivo tende a aumentar proporcionalmente à área de sobreposição entre os condutores, o que está diretamente relacionado ao comprimento das trilhas. Assim, espera-se que trilhas mais longas apresentem um acoplamento maior, dado que a interação entre os campos gerados pela trilha agressora e a trilha vítima se estende por uma área maior ao longo do eixo de propagação.

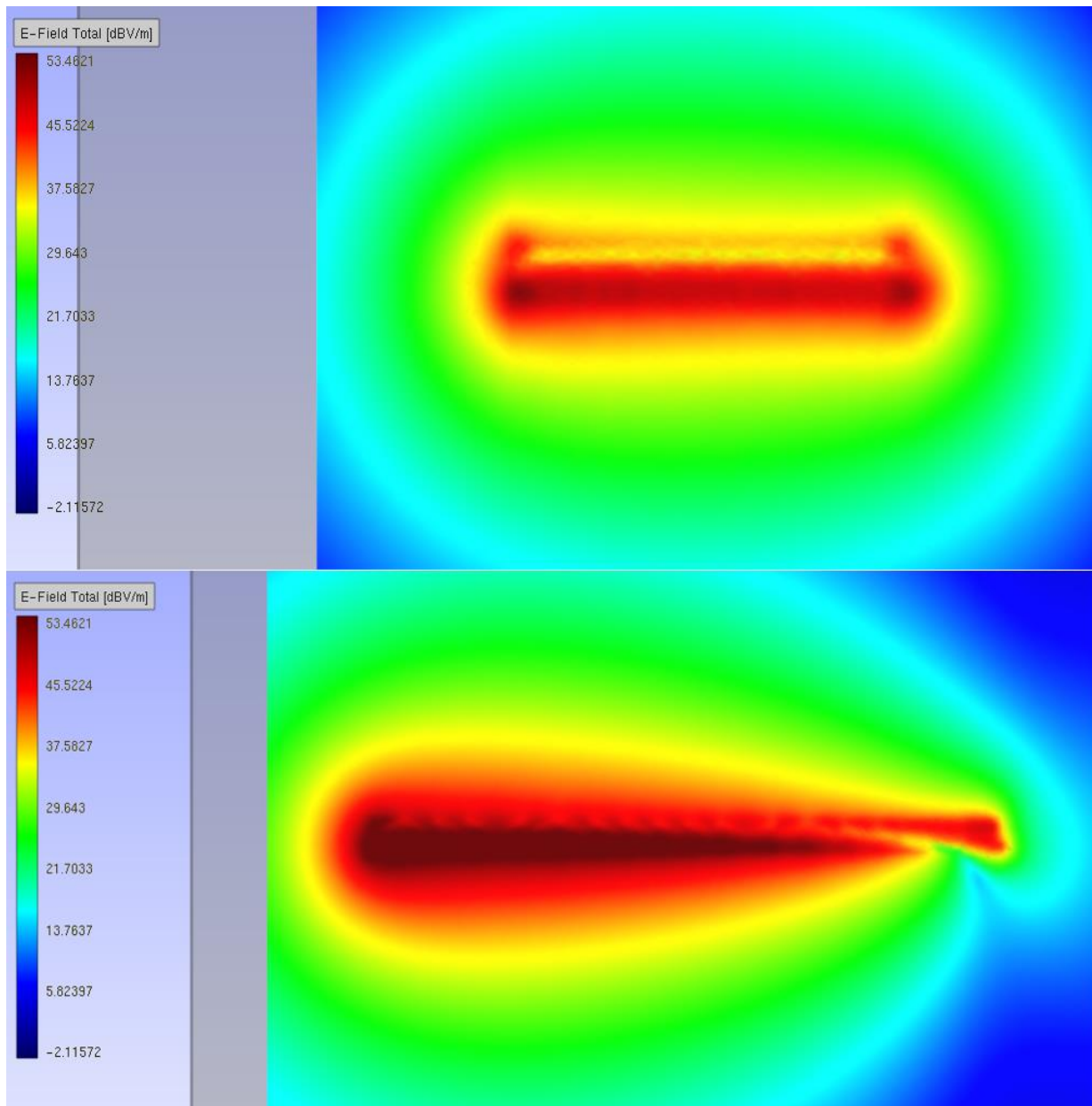
Essa constatação é confirmada pelos resultados obtidos no SimDATA, como evidenciado pelas imagens comparativas a seguir. As visualizações foram geradas a partir dos mapas de campo elétrico (E-Field Total) em 500 MHz, com os mesmos parâmetros de escala e representação gráfica adotados para todas as simulações, assegurando a comparabilidade dos resultados.

A Figura 57, 58 e 59 apresentam as distribuições de campo elétrico simuladas para as configurações 1b (em cima) e 1c (em baixo), nas visualizações escalar (*Color*), com malha (*Wireframe*) e com transparência (*Transparency*), respectivamente. Na configuração 1b, observa-se uma distribuição de campo bem confinada ao redor das trilhas condutoras, com simetria lateral e intensidade moderada. O padrão resultante é compatível com um regime dominado por efeitos capacitivos locais, no qual a interação eletromagnética se concentra diretamente entre a trilha agressora e a trilha vítima ao longo de um percurso reduzido.

No entanto, a configuração 1c revela uma ampliação significativa da região de influência do campo elétrico, com uma assimetria direcional acentuada que se estende além dos limites físicos da trilha. Esse comportamento indica que o acoplamento capacitivo se torna mais distribuído ao longo do comprimento da

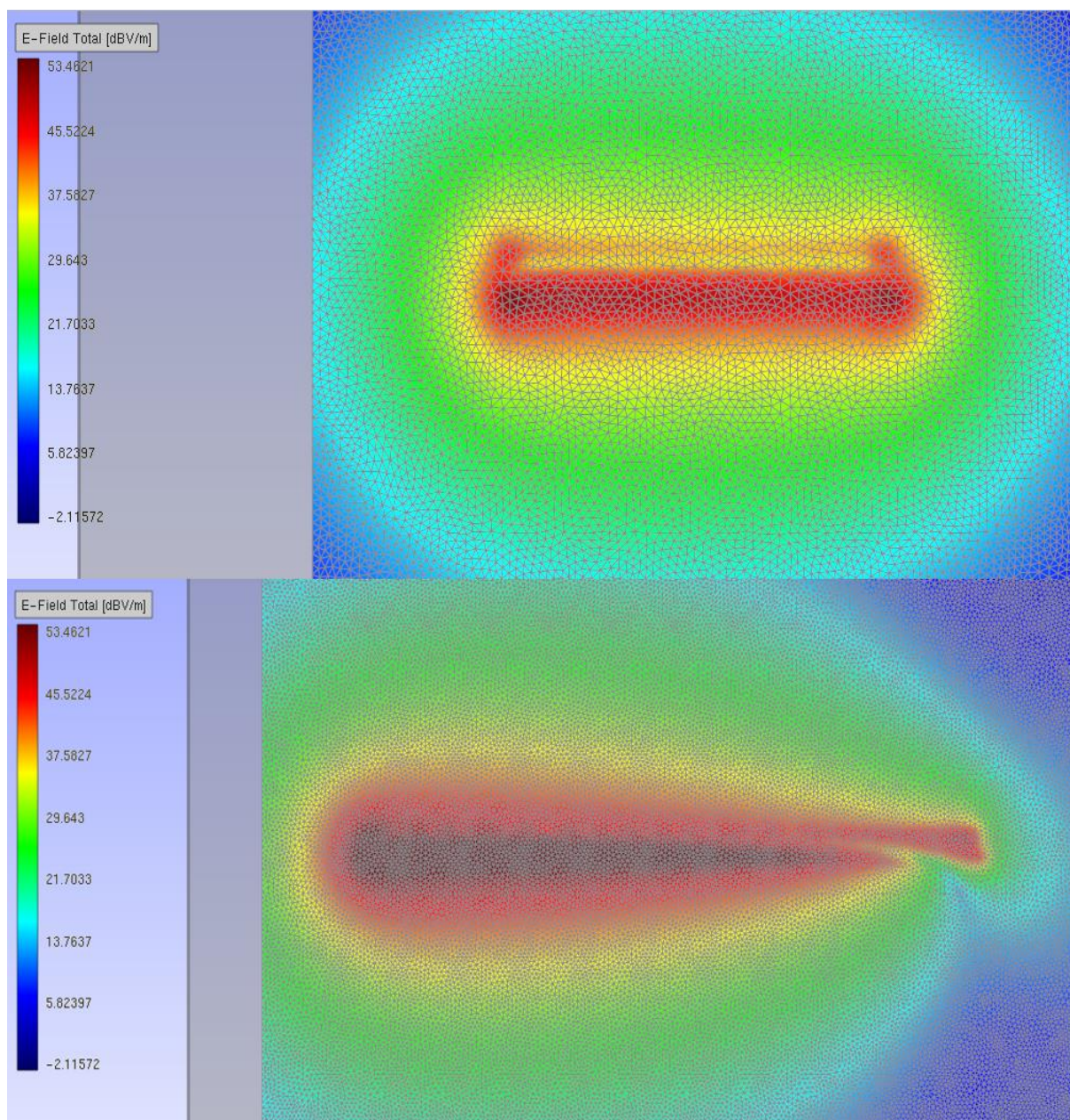
estrutura, favorecendo a propagação de frentes de onda e o surgimento de efeitos típicos de linhas de transmissão.

**Figura 57 – Distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1b e 1c)**



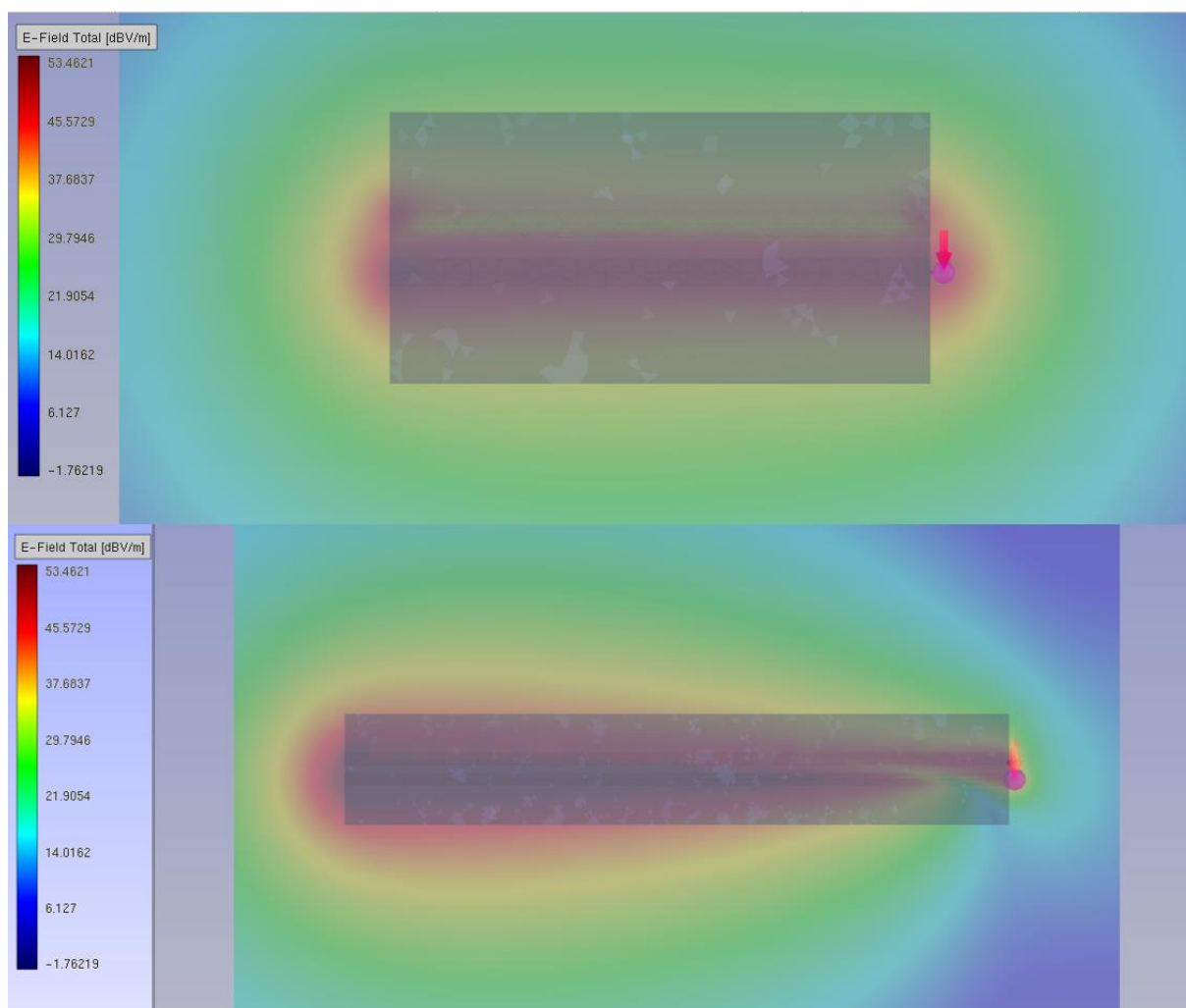
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 58 – Visualização superior com *wireframe* (configurações 1b e 1c)



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 59 – Visualização superior com transparência (configurações 1b e 1c)**



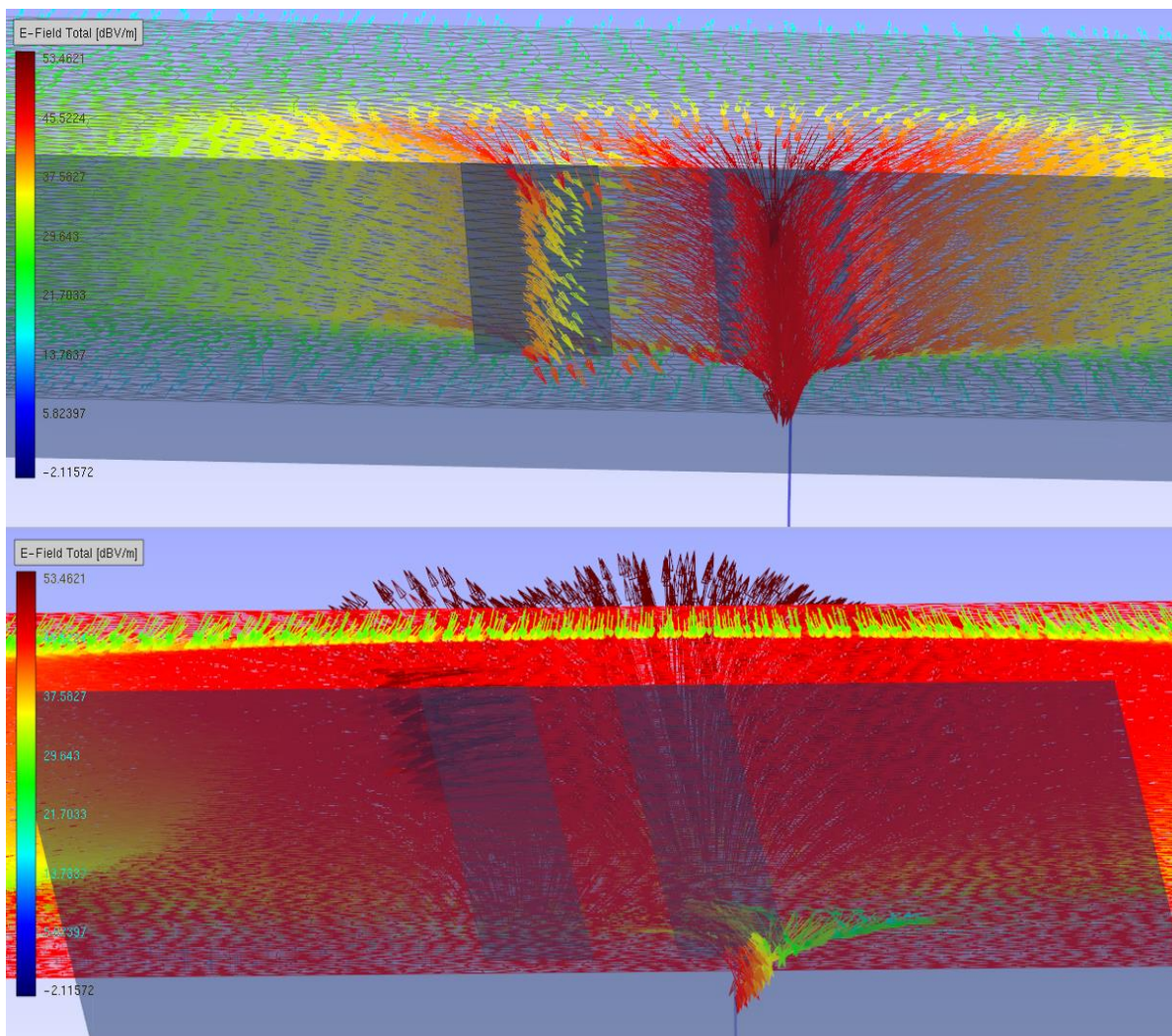
Fonte: Elaboração própria (2025).

Visualmente, nota-se que o campo na configuração 1c não apenas abrange uma área maior, como também apresenta indícios de propagação contínua, sugerindo o início de um comportamento de guia de onda. Esse fenômeno ocorre porque, a partir de determinadas frequências (como os 500 MHz utilizados nesta simulação) o comprimento de onda da excitação elétrica torna-se comparável à dimensão física da trilha, intensificando efeitos como reflexões internas, descontinuidades de impedância e modos de propagação assimétricos.

Além da visualização padrão em escala de cores, outra representação foi utilizada para complementar a análise da influência do comprimento das trilhas. A Figura 60 mostra a representação vetorial por meio da função *Arrow*, no qual as setas indicam a direção e a intensidade local do campo elétrico. Essa visualização destaca a orientação preferencial da propagação do campo. Na configuração 1c observa-se

um padrão de vetores mais alongado e direcional, com maior extensão ao longo da trilha e inclinação além de seus limites físicos. Isso evidencia o início de comportamento de linha de transmissão, com o campo se propagando longitudinalmente, típico de trilhas longas em frequências elevadas, enquanto na 1b os vetores permanecem mais confinados e centrados entre os condutores.

**Figura 60 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1b e 1c)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.3 Comparação entre Presença ou Ausência de Trilha de Guarda

Nesta subseção, é analisada a influência da presença de uma trilha de guarda entre duas trilhas condutoras paralelas. Diferentemente das configurações anteriores, que envolviam apenas duas trilhas (agressora e vítima), as configurações 1e (*off*) e 1e (*on*) introduzem uma terceira trilha central, posicionada entre as outras

duas, com a função de atuar como uma trilha de guarda. Essa trilha intermediária tem como objetivo reduzir a interferência eletromagnética entre as trilhas externas, funcionando como uma barreira eletromagnética adicional.

A comparação entre as duas variações permite avaliar o efeito da conexão elétrica da trilha de guarda ao plano de referência. Na configuração 1e (*off*), a trilha de guarda está presente fisicamente, mas permanece flutuante, ou seja, não está conectada ao plano de terra, enquanto na configuração 1e (*on*), essa trilha está conectada ao plano de referência, permitindo a atuação efetiva nos mecanismos de acoplamento eletromagnético.

A presença de uma trilha de guarda conectada ao plano de referência pode atuar significativamente na atenuação do acoplamento capacitivo entre trilhas adjacentes ao introduzir um sinal de modo diferencial. Quando essa trilha intermediária está aterrada (placa 1e *on*), ela interage com os campos elétrico e magnético gerados pela trilha agressora, promovendo o cancelamento parcial desses campos antes que atinjam a trilha vítima.

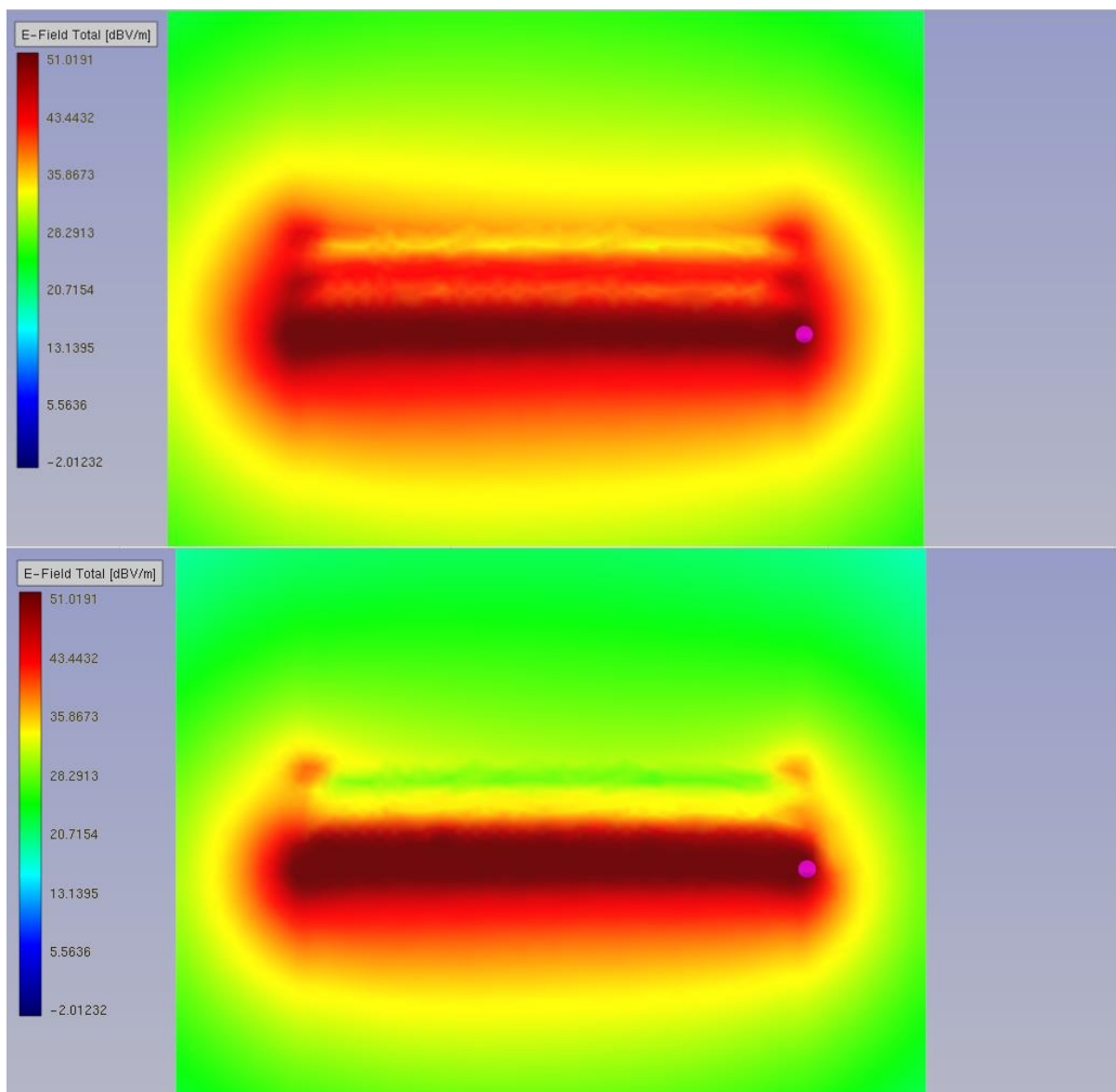
Na prática, isso se traduz em dois mecanismos principais:

- **Redução do acoplamento capacitivo:** a trilha de guarda conectada cria um caminho de baixa impedância para o retorno de corrente, interrompendo parte do campo elétrico entre a trilha agressora e a trilha vítima. O campo gerado pela agressora induz cargas na trilha de guarda, e parte da energia é dissipada por esse condutor intermediário.
- **Redução do acoplamento indutivo:** ao conduzir correntes induzidas opostas às da trilha agressora, a trilha de guarda gera um campo magnético contrário, que contribui para reduzir o campo total que alcançaria a trilha vítima, minimizando assim os efeitos de interferência mútua.

A Figura 61 apresenta os resultados da simulação para as configurações 1e (*off*) e 1e (*on*), ambas obtidas em 500 MHz com os mesmos parâmetros gráficos das demais simulações. Em cima, observa-se a configuração com a trilha de guarda desconectada, enquanto em baixo está a versão com a guarda conectada. A comparação direta entre as distribuições de campo evidencia que, quando a guarda está conectada, há uma perceptível redução da magnitude do campo elétrico na

região próxima à trilha vítima, assim como uma redistribuição do campo em torno da trilha intermediária.

**Figura 61 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1e *off* e 1e *on*)**

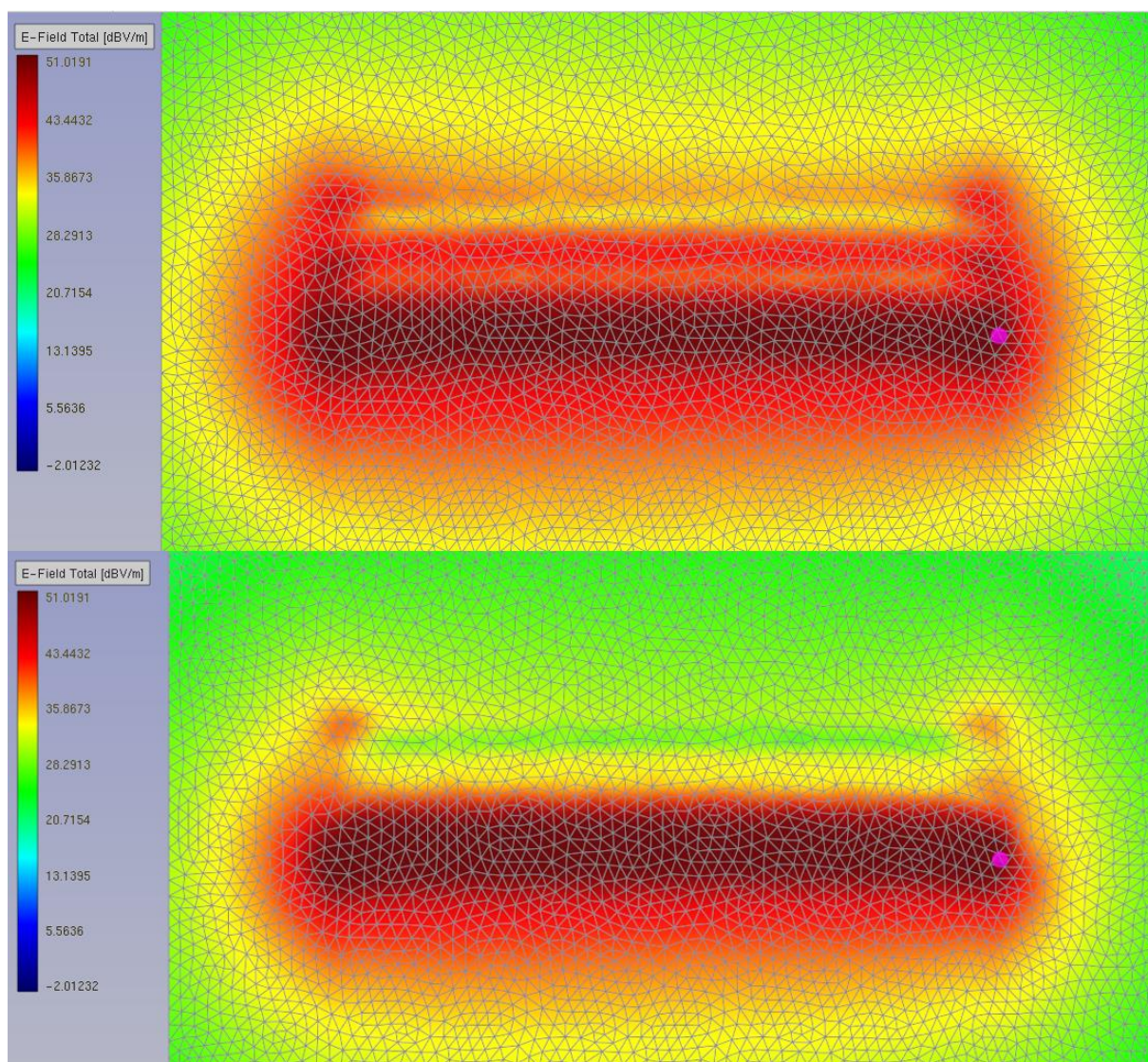


Fonte: Elaboração própria (2025).

Para uma compreensão mais aprofundada da atuação da trilha de guarda, as Figuras 62 e 63 apresentam a mesma simulação sob diferentes perspectivas de visualização. A Figura 62, com o modo *Wireframe*, evidencia o contorno da malha e a simetria do campo em torno da guarda. Já a Figura 63, com o modo *Transparency*, permite observar a distribuição do campo abaixo da superfície, ilustrando como a conexão da trilha de guarda reorganiza os vetores de campo na direção da trilha

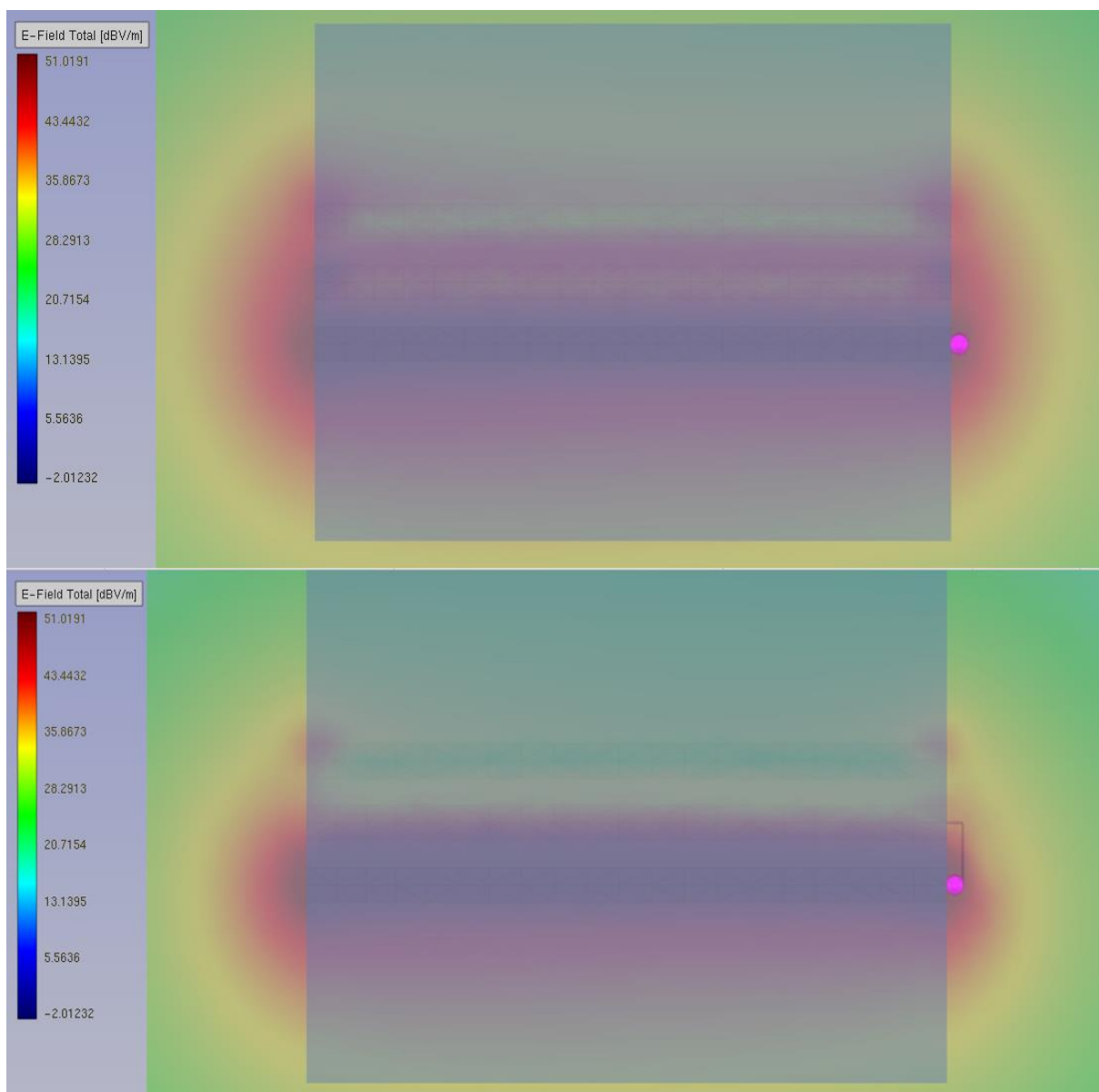
agressora.

**Figura 62 – Visualização superior com *wireframe* (configurações 1e off e 1e on)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

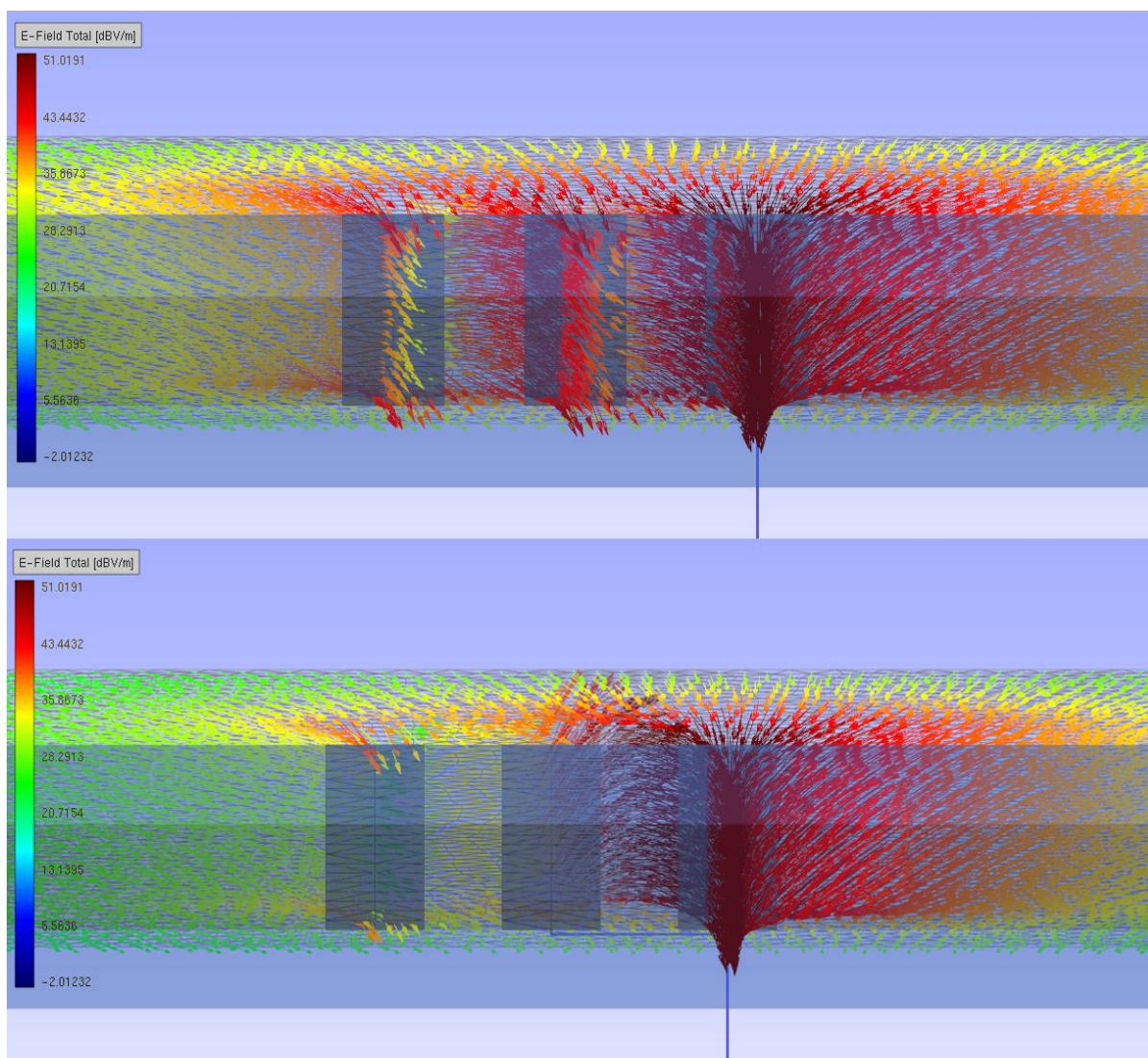
**Figura 63 – Visualização superior com transparência (configurações 1e off e 1e on)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

Por fim, a Figura 64 apresenta a visualização vetorial (modo *Arrow*), destacando as diferenças na direção e na intensidade do campo elétrico entre as duas configurações. Percebe-se que, na configuração com guarda conectada, os vetores são mais curtos e direcionados à trilha intermediária, indicando absorção e redirecionamento das linhas de campo. Já na versão desconectada, as setas mantêm intensidade elevada e apontam diretamente da trilha agressora para a trilha vítima.

**Figura 64 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1e off e 1e on)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.4 Comparação entre Presença ou Ausência de Plano de Referência

Nesta subseção, busca-se analisar o impacto da presença de plano de referência (conectado ou desconectado) sobre o acoplamento capacitivo entre trilhas condutoras. A comparação é realizada entre pares de configurações com mesmas dimensões geométricas, variando apenas a existência e o tipo de conexão do plano inferior. São analisadas as seguintes combinações:

- 1a x 2a (desconectado e conectado);
- 1b x 2b (desconectado e conectado);
- 1d x 2d (desconectado e conectado)

Sendo assim, todas as configurações do grupo 1 (1a, 1b, 1d) foram simuladas sem plano de referência, enquanto os pares correspondentes no grupo 2 (2a, 2b, 2d) incluem uma malha metálica posicionada abaixo das trilhas, sendo simulada em duas condições distintas: conectada ao plano aterrado e desconectada.

Essa abordagem comparativa permite isolar os efeitos da presença do plano de referência sobre a distribuição do campo elétrico e, por consequência, sobre o acoplamento capacitivo entre trilhas condutoras. A introdução de uma superfície metálica abaixo das trilhas modifica significativamente a trajetória das linhas de campo, criando um plano equipotencial que influencia diretamente a intensidade e a direção dos campos elétricos gerados.

No caso das configurações com plano desconectado, embora o condutor metálico esteja presente fisicamente abaixo da estrutura, ele não está eletricamente vinculado ao potencial de referência (terra). Essa condição resulta em uma interação mútua entre as trilhas e a superfície metálica flutuante, o que pode aumentar a capacitância parasita e, em determinadas situações, intensificar o acoplamento capacitivo, uma vez que o plano atua como um terceiro elemento capaz de armazenar energia elétrica em relação às trilhas. Além disso, a presença do plano amplia a área de acoplamento entre as trilhas e o meio circundante, gerando padrões de campo mais complexos e, muitas vezes, mais extensos do que na ausência de qualquer plano.

Por outro lado, nas configurações com o plano conectado, esse comportamento é significativamente alterado. A conexão direta ao potencial de referência cria um caminho preferencial para o retorno das linhas de campo, concentrando o fluxo elétrico entre as trilhas e a referência. Isso reduz a densidade de campo na região entre trilhas adjacentes e, conseqüentemente, mitiga o acoplamento capacitivo entre elas. Em termos práticos, o plano de referência inferior atua como um elemento de blindagem eletrostática, promovendo a estabilidade do sistema e favorecendo a integridade do sinal, sobretudo em circuitos de alta frequência.

Esses efeitos são particularmente evidentes quando se comparam diretamente as distribuições de campo nas figuras simuladas das configurações 1a × 2a, 1b × 2b e 1d × 2d. Observa-se, de forma geral, que a adição do plano de referência

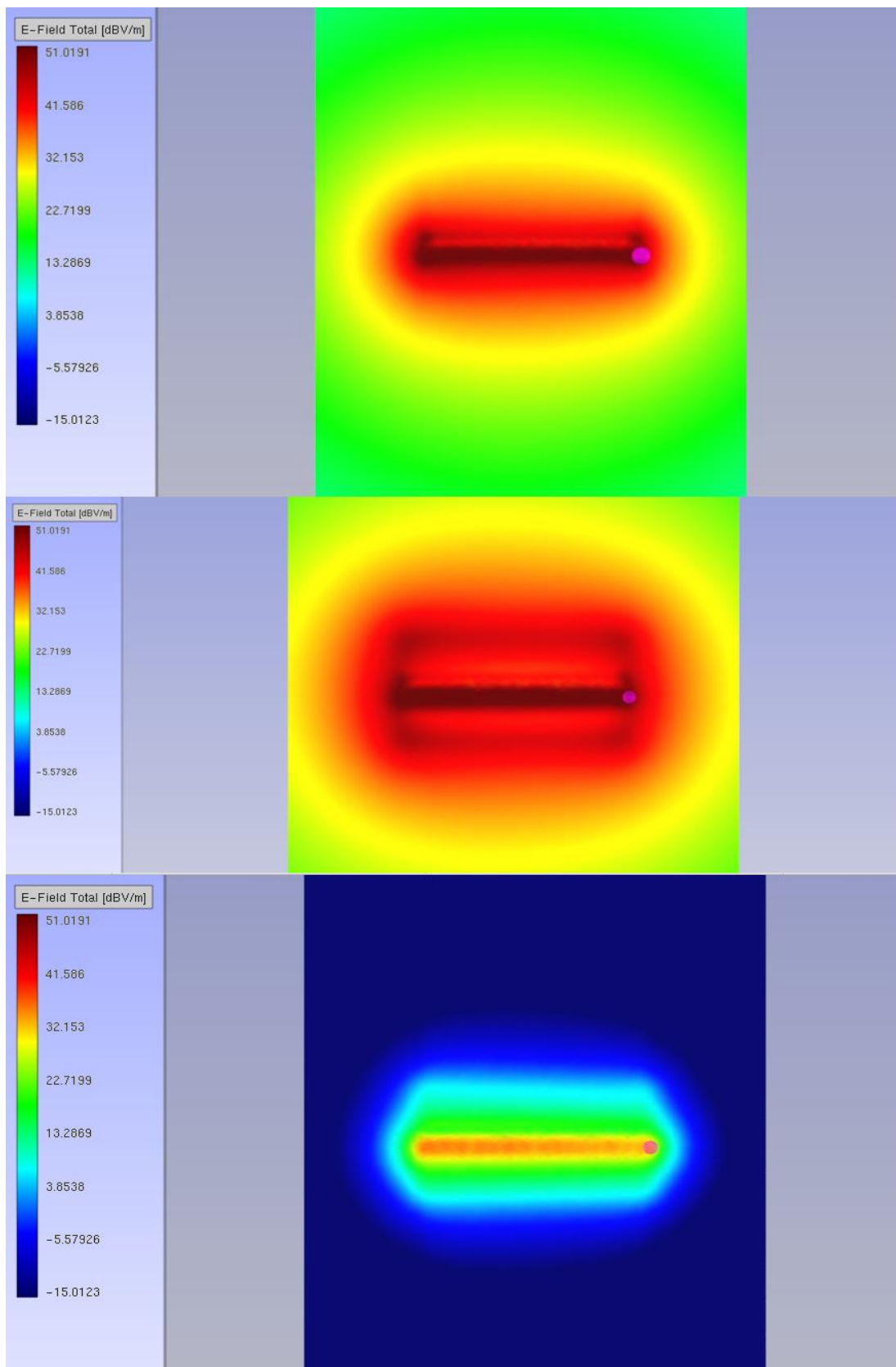
desconectado pode intensificar o acoplamento, ao passo que o plano conectado tende a reduzir significativamente a interferência mútua entre trilhas, tornando-se uma estratégia eficaz de mitigação do *crosstalk* em projetos de placas de circuito impresso.

A seguir, apresentam-se as imagens obtidas para cada par de configurações, com a respectiva análise qualitativa dos padrões de campo elétrico gerados:

A Figura 65 apresenta as distribuições de campo elétrico simuladas para a configuração 1a (sem plano de referência), 2a com plano de referência desconectado e 2a com plano conectado. Percebe-se que, na ausência do plano (1a), o campo elétrico gerado pela trilha agressora se propaga livremente no espaço dielétrico, concentrando-se entre os condutores adjacentes e se estendendo verticalmente. Ao se introduzir um plano metálico não aterrado (2a desconectado), há um aumento da densidade de linhas de campo em direção ao plano, que atua como uma superfície coletora flutuante, intensificando o acoplamento capacitivo global do sistema.

Com a conexão do plano à terra, placa 2a conectada, o padrão de campo sofre uma mudança significativa. O plano de referência passa a atrair a maior parte das linhas de campo, diminuindo o campo entre as trilhas e, portanto, a intensidade de acoplamento entre a trilha geradora e a trilha vítima. Visualmente, percebe-se uma maior “descida” das linhas de campo em direção ao plano inferior, conseqüentemente, há uma diminuição da região de acoplamento entre as trilhas, comprovando o efeito atenuante do plano aterrado.

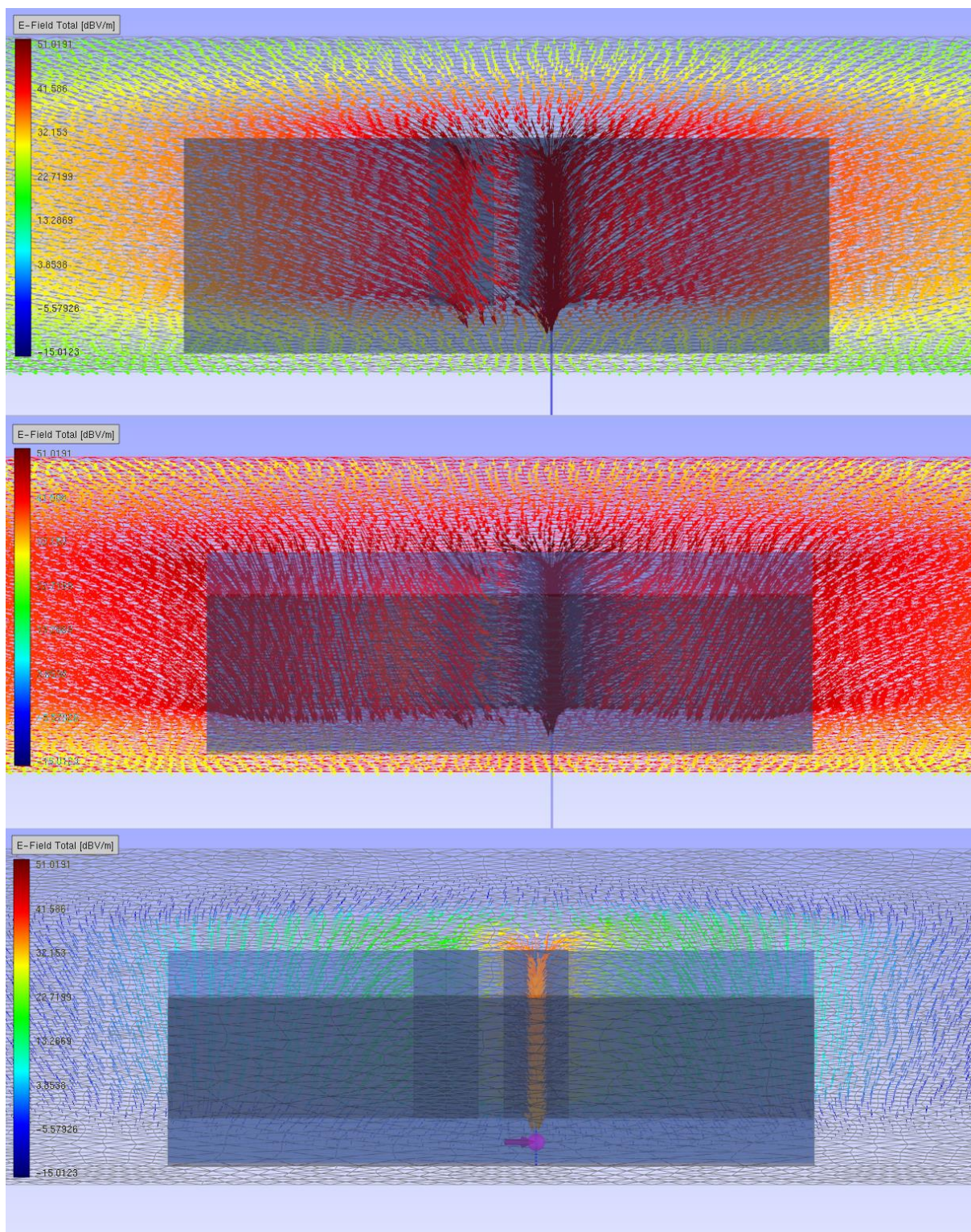
**Figura 65 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1a, 2a desconectada e 2a conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

Complementarmente, a Figura 66 apresenta as representações vetoriais correspondentes, obtidas por meio da função *Arrow* no SimDATA.

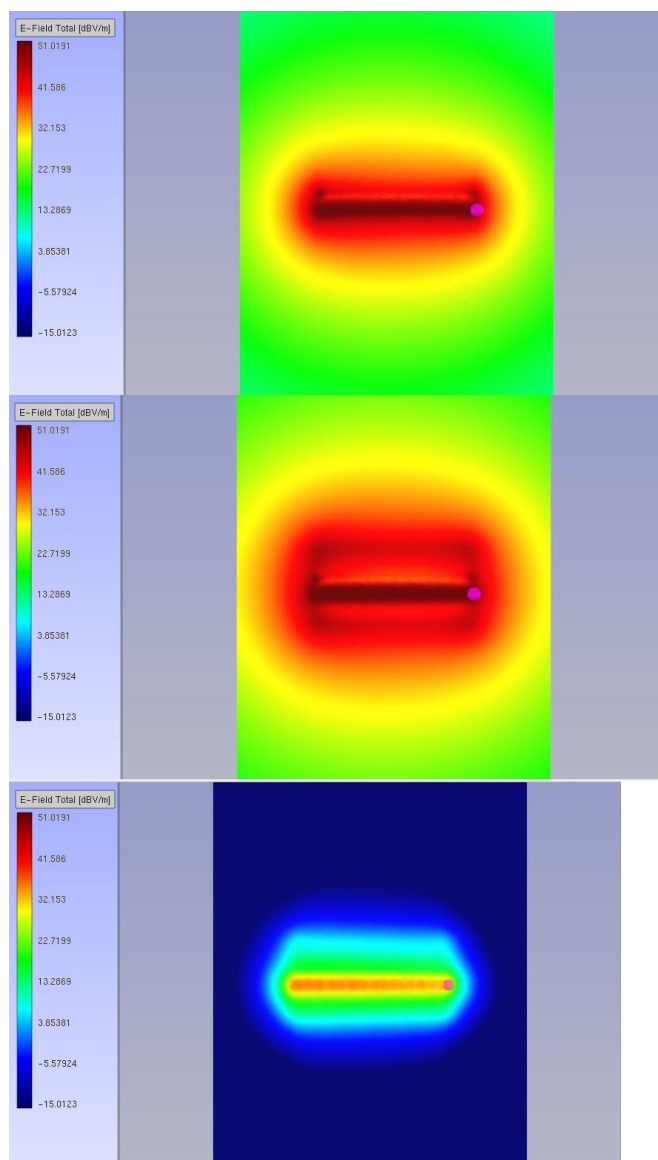
**Figura 66 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1a, 2a desconectada e 2a conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 67 ilustra o mesmo padrão de análise, aplicada para as configurações 1b, 2b desconectado e 2b conectado. De forma similar ao observado no caso anterior, a configuração 1b evidencia uma propagação livre das linhas de campo entre os condutores, sem a influência de um plano inferior. A introdução do plano não aterrado, em 2b desconectada, altera a morfologia do campo, ampliando sua dispersão vertical e estabelecendo interações com a superfície metálica flutuante. Enquanto na placa 2b conectada, há uma nítida redistribuição das linhas de campo em direção ao plano aterrado, o que reduz visivelmente o acoplamento direto entre trilhas paralelas, promovendo maior contenção dos efeitos capacitivos.

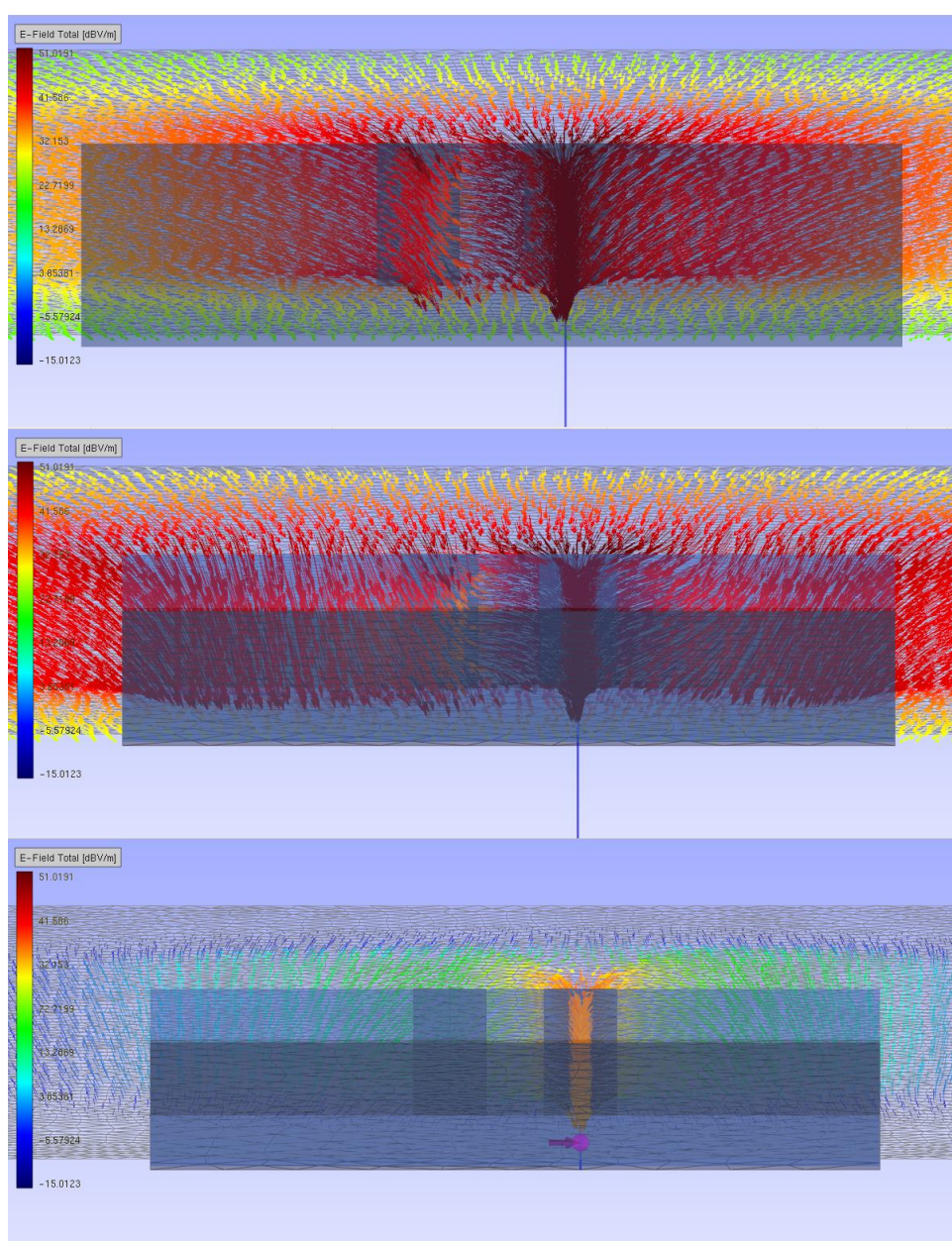
**Figura 67 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1b, 2b desconectada e 2b conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

Adicionalmente, a Figura 68 complementa esta análise com as representações vetoriais das mesmas configurações. A convergência dos vetores para o plano de referência aterrado torna-se ainda mais evidente, destacando sua eficácia na contenção dos campos gerados pela trilha agressora. Isso reforça a observação de que planos conectados não apenas absorvem parte do campo, como também reorganizam sua orientação espacial, promovendo maior imunidade ao acoplamento indesejado.

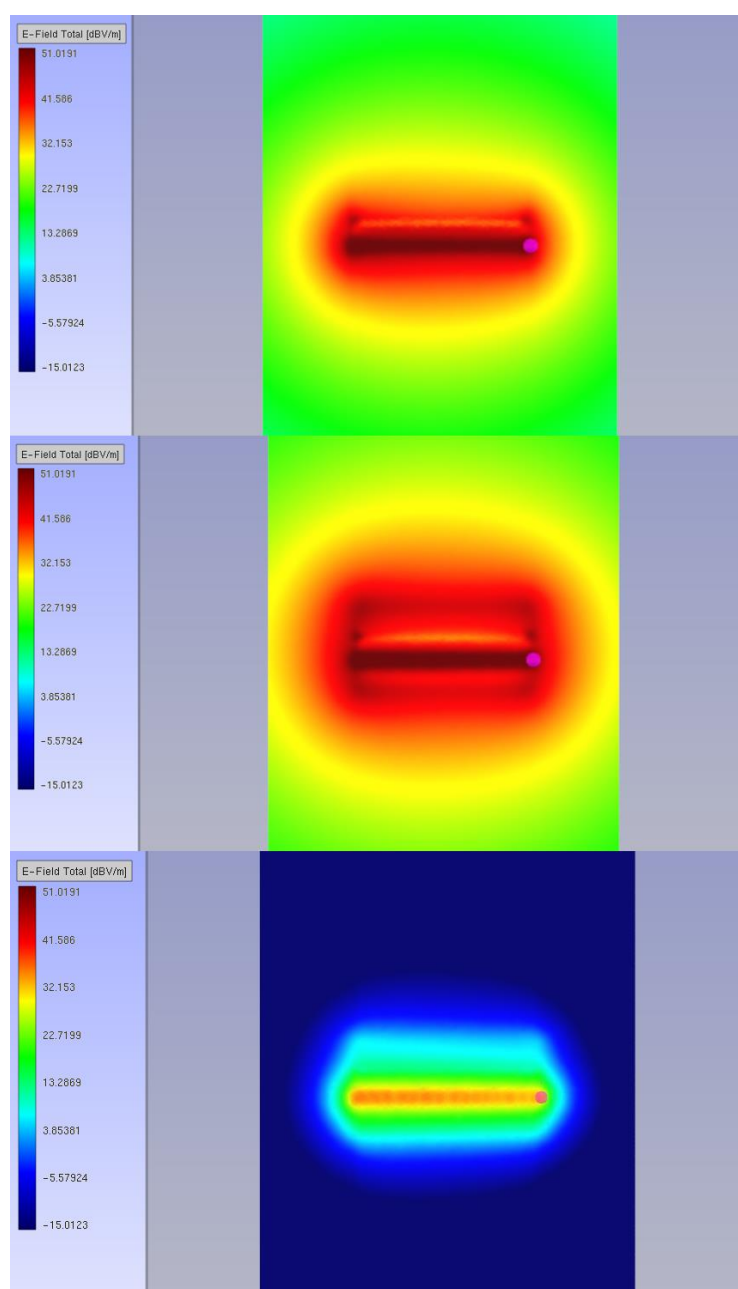
**Figura 68 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1b, 2b desconectada e 2b conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

Dando continuidade à análise, a Figura 69 ilustra a distribuição escalar do campo elétrico para as configurações 1d (sem plano), 2d desconectada e 2d conectada. As observações seguem a mesma tendência: a ausência do plano permite maior propagação livre entre as trilhas, enquanto a presença do plano desconectado amplia a região de acoplamento. Enquanto o plano conectado atua como um dissipador eletrostático, atraindo as linhas de campo e reduzindo a intensidade de acoplamento entre as trilhas superiores.

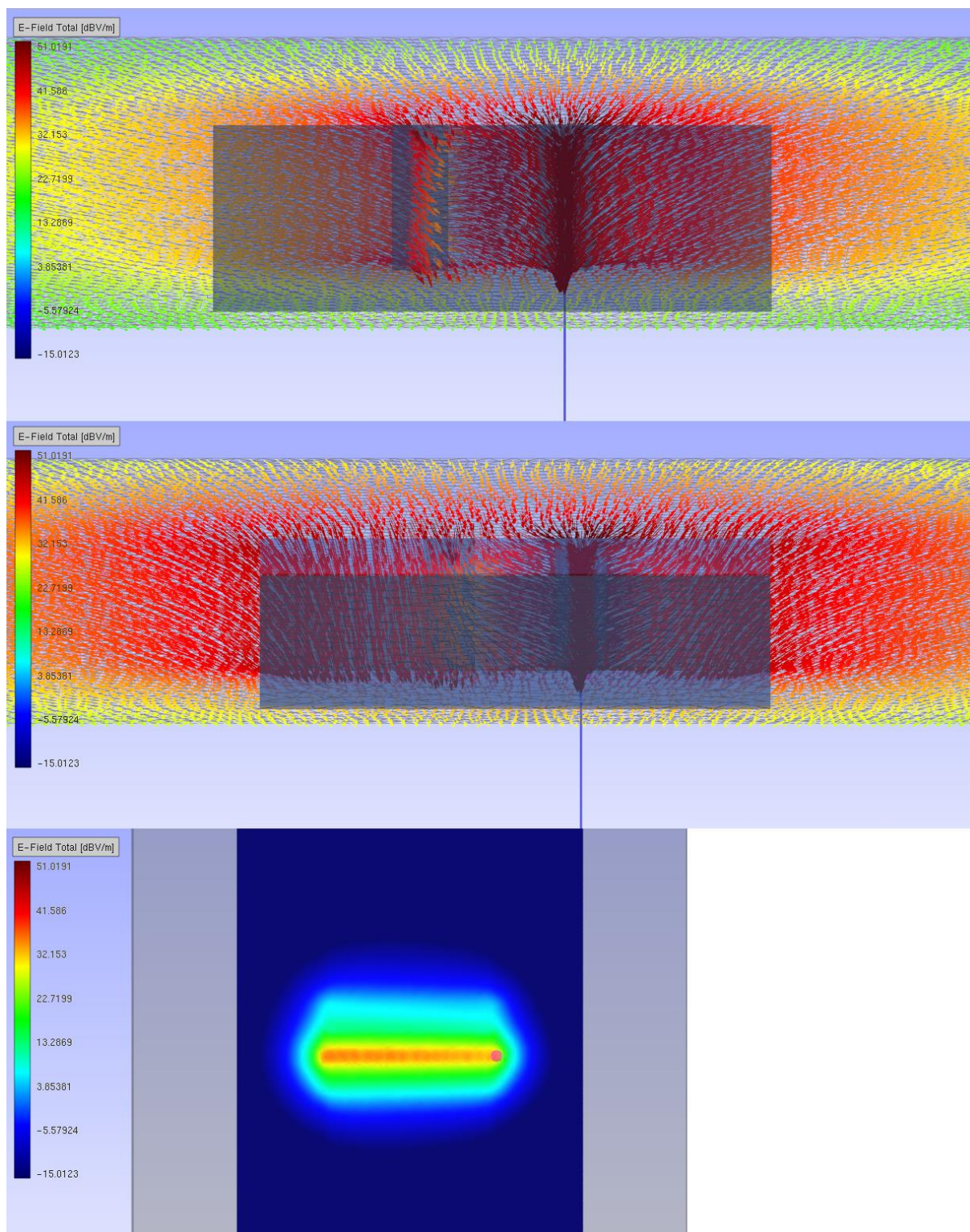
**Figura 69 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 1d, 2d desconectada e 2d conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

Por fim, a Figura 70 apresenta a visualização vetorial correspondente, reforçando os efeitos previamente descritos.

**Figura 70 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 1d, 2d desconectada e 2d conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.5 Comparação Internas entre Configurações com Plano de Referência Desconectado

Nesta subseção, é realizada a análise comparativa entre as configurações 2a, 2b e 2d, todas com plano de referência posicionado abaixo das trilhas condutoras, porém sem conexão elétrica. O objetivo é avaliar, dentro de um mesmo regime de referência flutuante, como a variação do espaçamento entre trilhas afeta o padrão de acoplamento capacitivo no sistema.

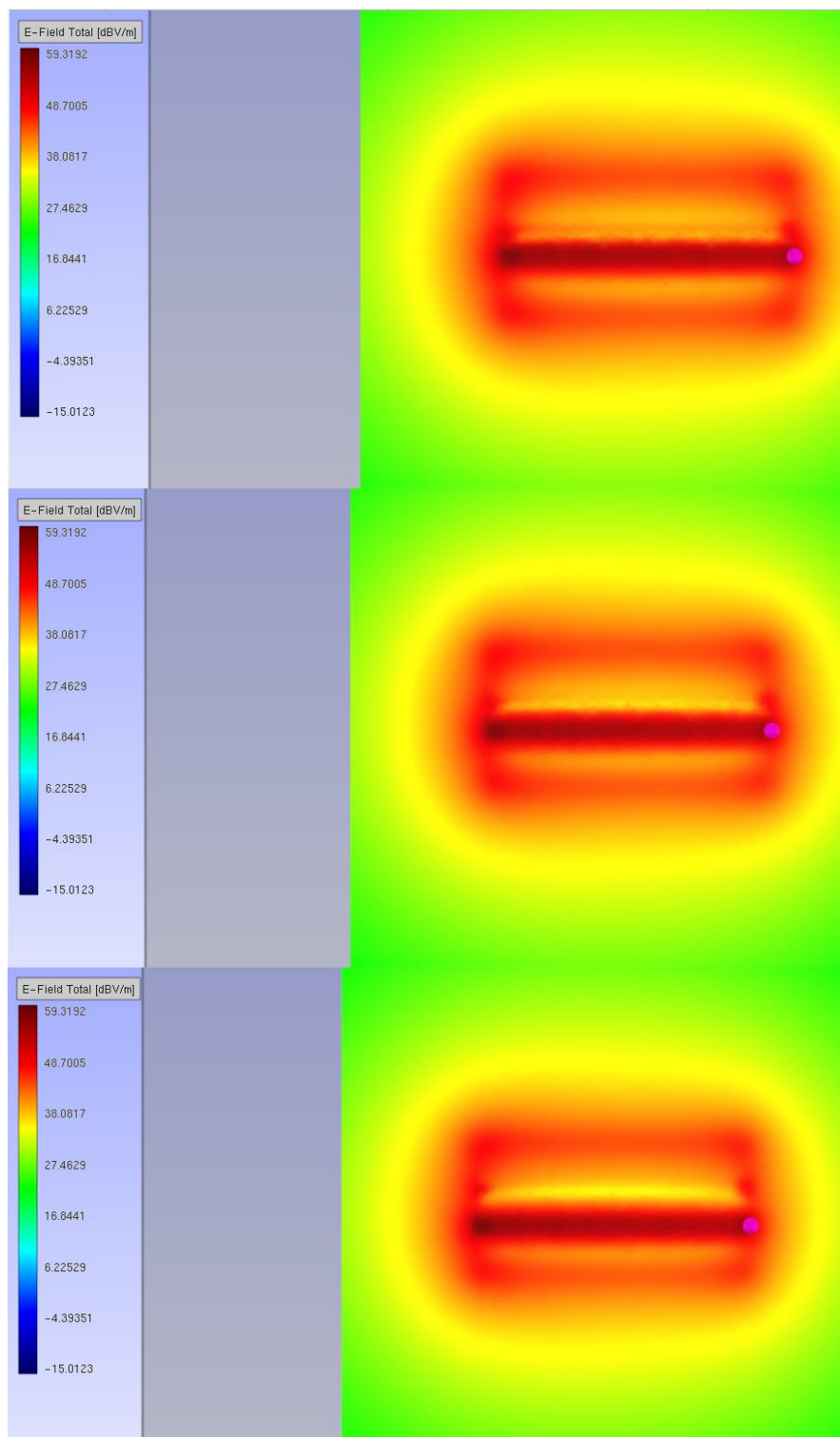
As três configurações compartilham os mesmos materiais e parâmetros de simulação, com comprimento constante de trilha e presença do plano inferior. A variável analisada é exclusivamente a distância entre as trilhas adjacentes:

- Configuração 2a: menor distância entre trilhas, com 0,8 mm de espaçamento;
- Configuração 2b: distância intermediária, com 1,6 mm;
- Configuração 2d: maior distância entre trilhas, 3,2 mm entre as trilhas.

Como analisado anteriormente, com a presença de um plano metálico flutuante, as linhas de campo elétrico passam a interagir com a superfície inferior, mesmo sem conexão direta com o terra. Esse plano atua como uma superfície de acúmulo de cargas induzidas, o que altera significativamente o padrão de acoplamento entre os condutores superiores, intensificando a redistribuição do campo e gerando componentes verticais mais evidentes. Dessa forma, o acoplamento não se limita ao plano horizontal entre as trilhas, mas passa a ter uma forte componente vertical, modificando o comportamento eletromagnético da estrutura.

As imagens obtidas no SimDATA, ilustradas nas Figuras 71 e 72, revelam de forma clara o impacto da distância entre trilhas sob essa condição. Na configuração 2a, o campo elétrico se concentra fortemente entre os condutores e com grande interação com o plano inferior. Na configuração 2b, observa-se um padrão intermediário, enquanto na 2d a dispersão lateral das linhas de campo é mais evidente e a intensidade do acoplamento lateral é visivelmente reduzida.

**Figura 71 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2a, 2b e 2d com plano desconectado)**

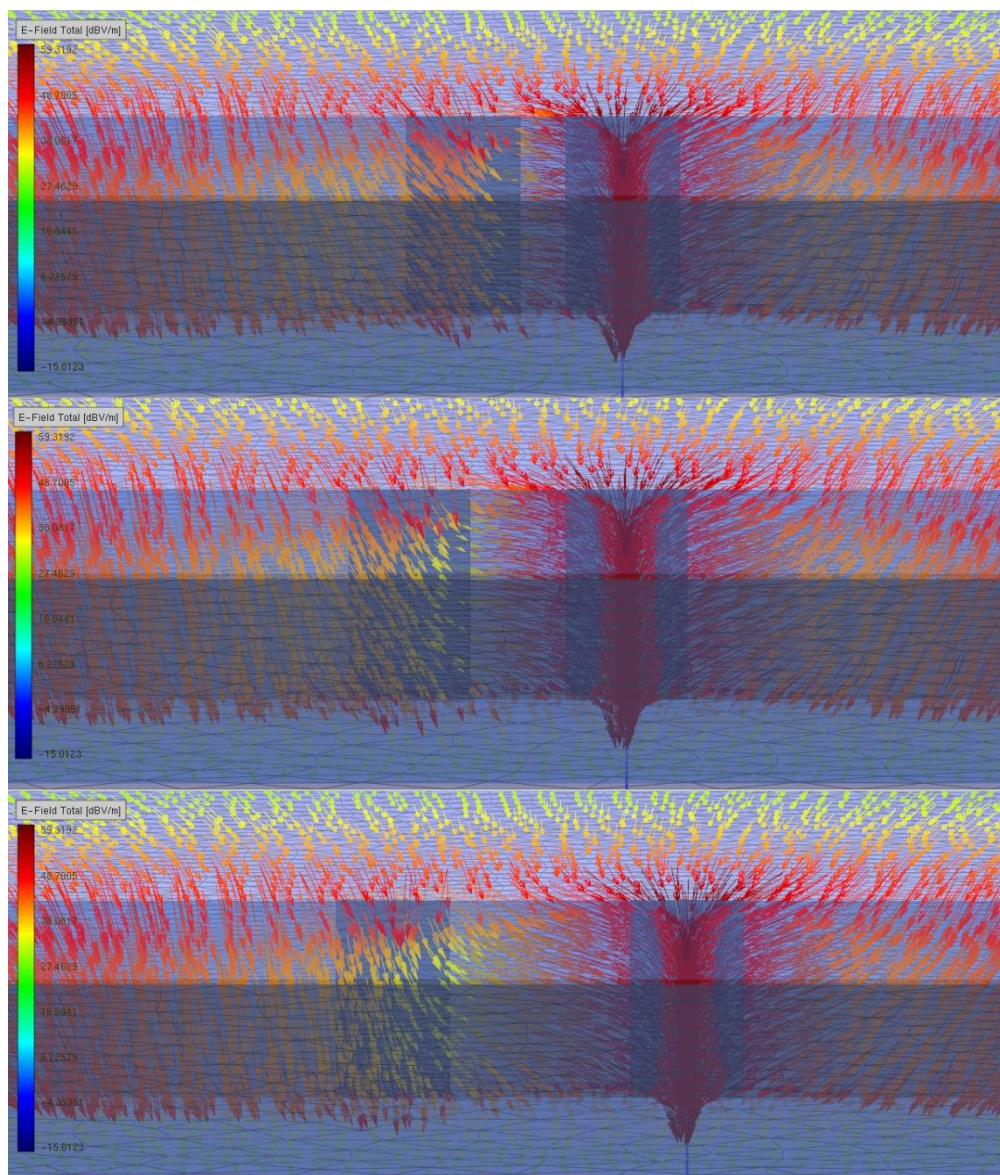


Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 72 complementa a análise com a visualização vetorial do campo elétrico, evidenciando a direção predominante das linhas de força. Evidencia-se que,

à medida que a distância entre as trilhas aumenta, há uma diminuição da densidade dos vetores de acoplamento entre as trilhas, com maior direcionamento do campo em direção ao plano inferior. Esse comportamento reforça a influência da referência metálica, mesmo sem aterramento, no aumento da interação vertical e na redistribuição da energia eletromagnética ao longo da estrutura.

**Figura 72 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2a, 2b e 2d com plano desconectado)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.6 Comparação Internas entre Trilhas com Plano de Referência Conectado

Na sequência da análise das configurações com plano de referência flutuante, esta subseção concentra-se nas simulações em que o plano metálico inferior se encontra conectado ao potencial de terra, estabelecendo uma condição ideal de referência eletromagnética. São comparadas as configurações 2a, 2b e 2d, que diferem apenas na distância entre trilhas condutoras, mantendo todas as demais variáveis constantes.

Conforme discutido anteriormente, a presença do plano de referência aterrado altera de forma significativa o comportamento do campo elétrico. As linhas de campo geradas pela trilha agressora tendem a se direcionar preferencialmente para o plano, o que reduz de maneira expressiva o acoplamento direto com a trilha vítima. Essa condição estabelece uma blindagem eletrostática mais eficiente, aspecto amplamente valorizado em projetos que demandam elevada integridade de sinal.

Embora a presença do plano de referência aterrado proporcione um efeito de contenção significativa do acoplamento eletromagnético, o espaçamento entre trilhas ainda exerce influência direta sobre o padrão de distribuição do campo. A análise das diferentes configurações evidencia que:

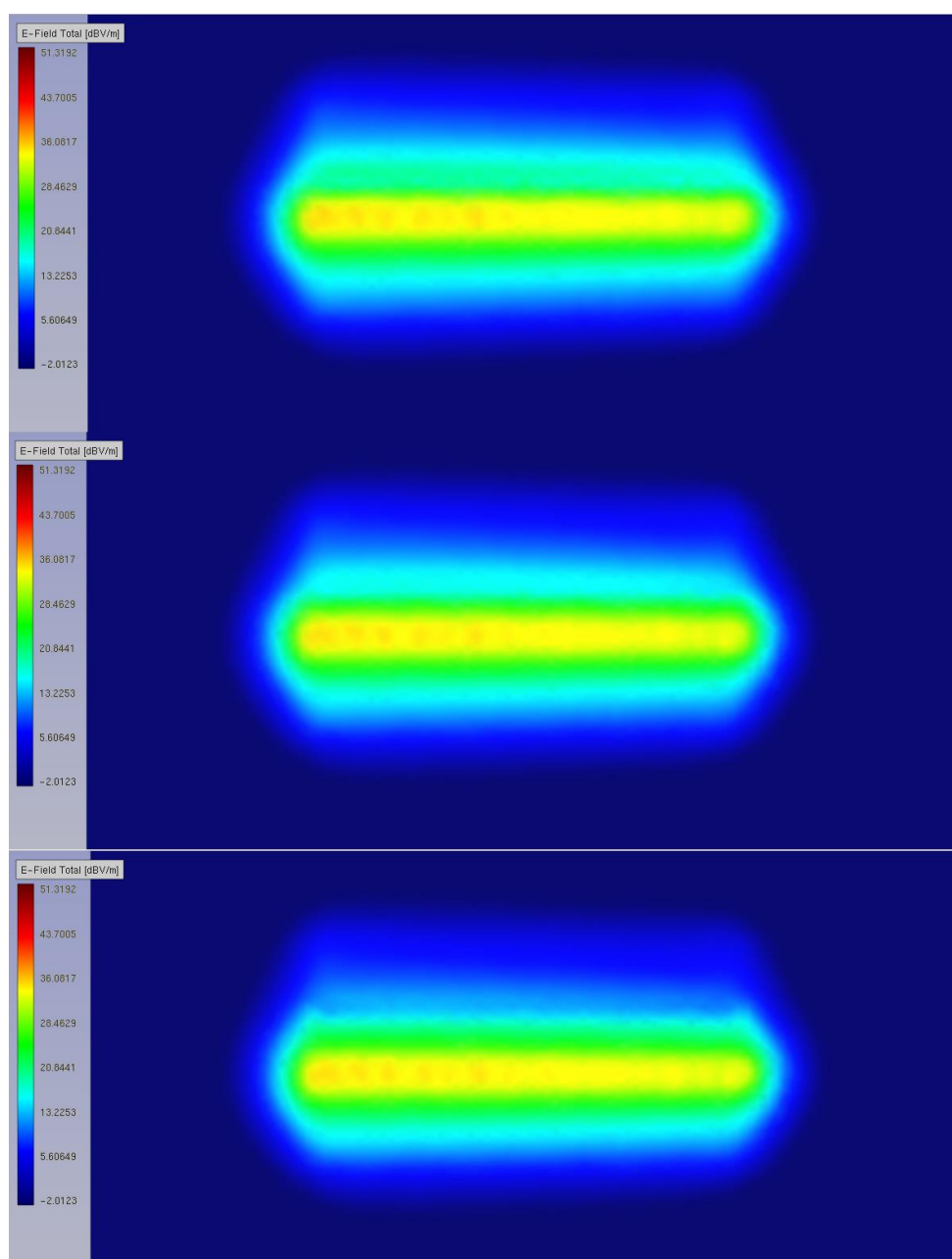
- **Configuração 2a (0,8 mm):** na menor distância entre condutores, ainda se observa a presença de linhas de campo entre as interconexões, embora com intensidade consideravelmente inferior em relação aos casos sem aterramento;
- **Configuração 2b (1,6 mm):** no espaçamento intermediário, o acoplamento lateral apresenta redução ainda mais pronunciada, sendo grande parte do campo absorvida diretamente pelo plano de referência;
- **Configuração 2d (3,2 mm):** no maior distanciamento analisado, o acoplamento residual entre trilhas é bastante atenuado, uma vez que a quase totalidade das linhas de campo se fecha entre a trilha agressora e o plano aterrado, exercendo influência mínima sobre a trilha vítima.

De forma geral, essa comparação demonstra que, apesar do papel central desempenhado pelo plano aterrado na mitigação do acoplamento, o espaçamento geométrico entre interconexões permanece como parâmetro relevante. Assim, a

associação entre distanciamento adequado das trilhas e a utilização de um plano de referência conectado configura-se como a estratégia muito eficaz para a redução de efeitos indesejados, como o *crosstalk*, em placas de circuito impresso.

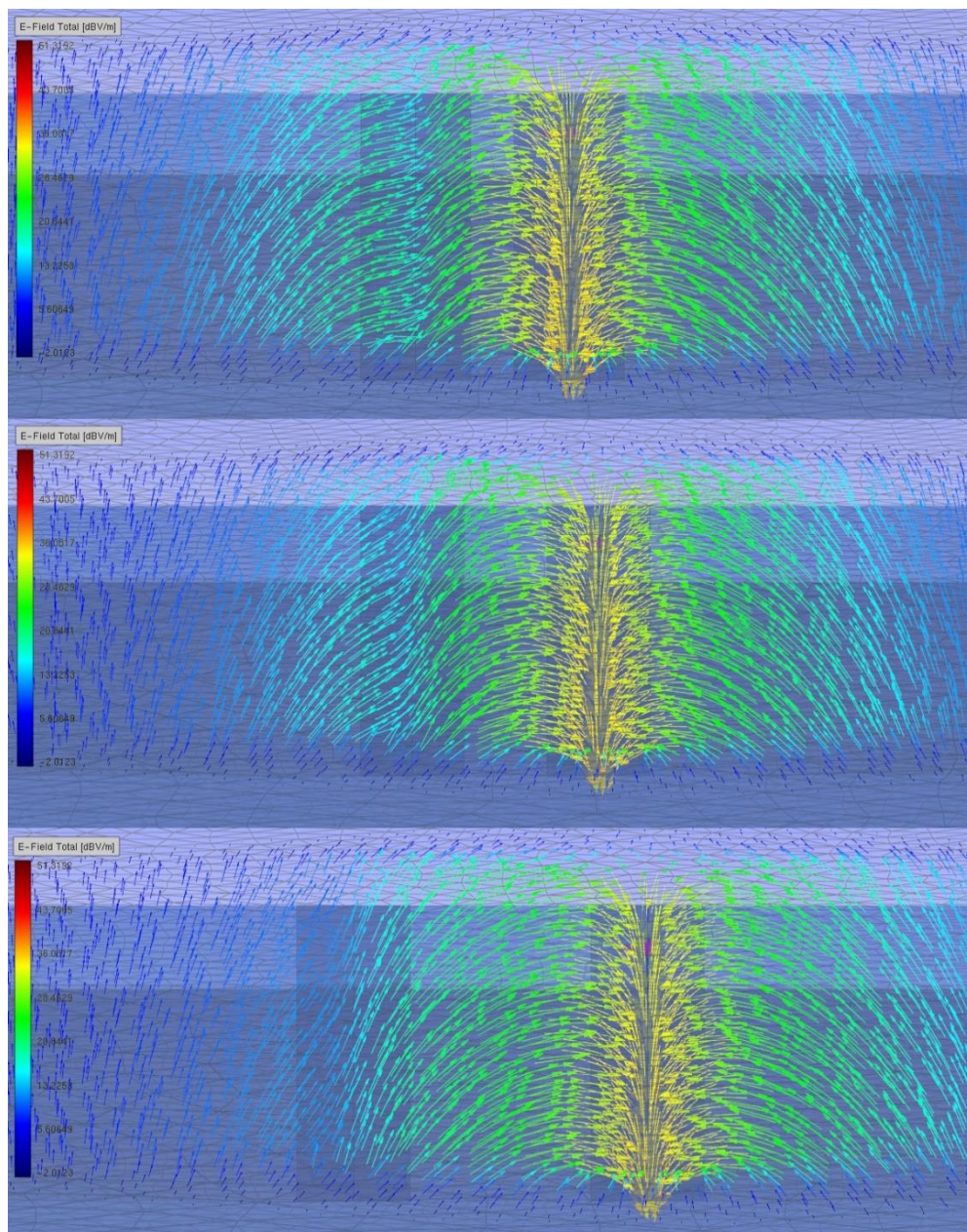
As Figuras 73 e 74 a seguir ilustram, respectivamente, as distribuições escalares do campo elétrico e as representações vetoriais para as configurações 2a, 2b e 2d, todas com plano de referência conectado.

**Figura 73 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2a, 2b e 2d com plano conectado)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 74 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2a, 2b e 2d com plano conectado)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.7 Comparações entre Configurações sem Trilha de Guarda Conectada

Nesta subseção, são comparadas as configurações 1e, 2e com plano de referência desconectado e 2e com plano conectado, todas com presença de trilha de guarda, porém sem conexão elétrica entre essa trilha e o plano de referência inferior. O objetivo consiste em analisar como a simples inclusão física da trilha de guarda, quando não conectada eletricamente, influencia o comportamento do campo elétrico

em diferentes cenários de referência inferior.

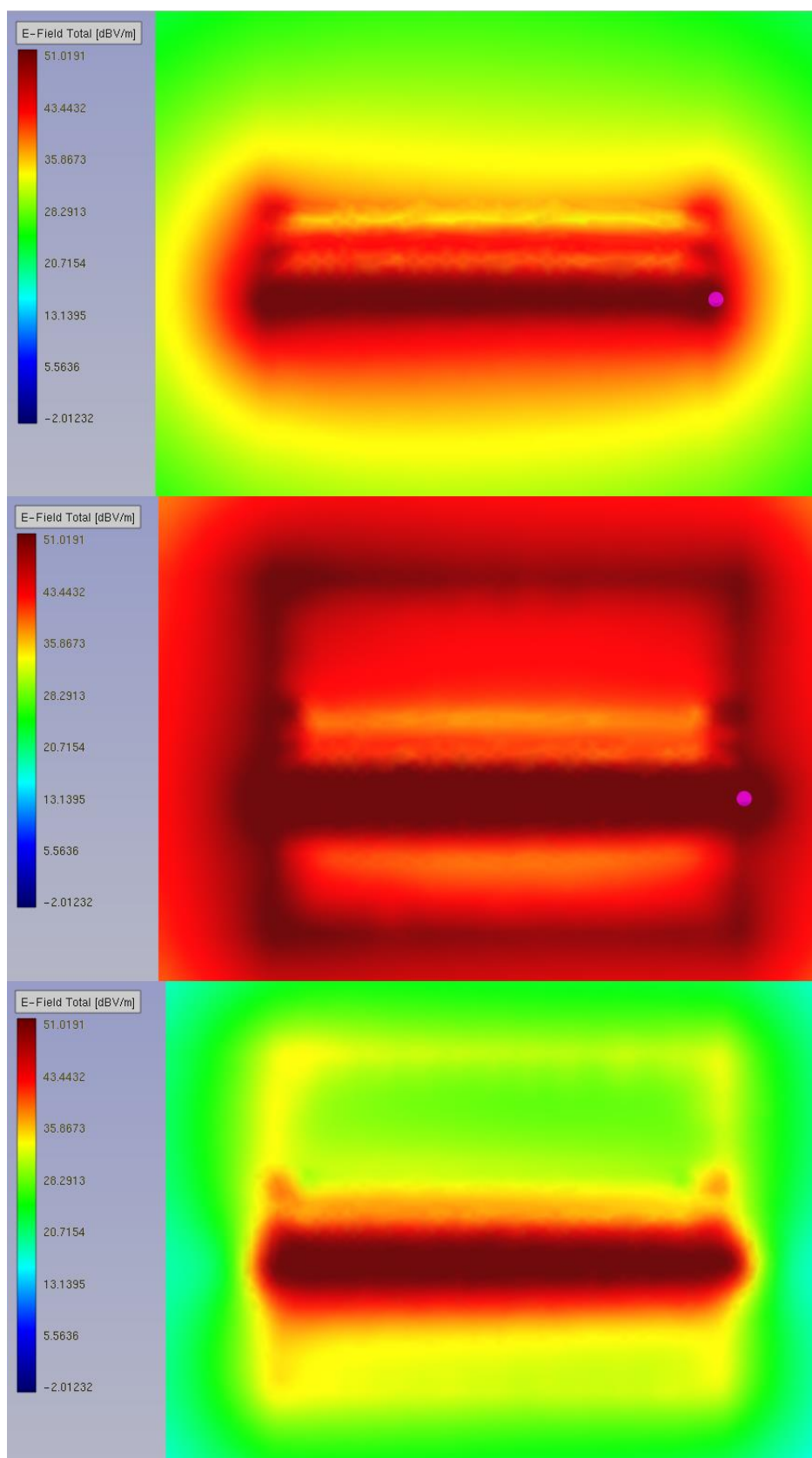
Na configuração 1e, não há plano de referência presente, o que permite observar exclusivamente o efeito da trilha de guarda isolada sobre o acoplamento capacitivo. Já nas configurações 2e, o plano metálico está posicionado abaixo das trilhas, sendo avaliado em duas condições distintas: desconectado (flutuante) e conectado. Essa variação possibilita compreender como a presença do plano, mesmo sem conexão com a trilha de guarda, modifica a distribuição de campo ao redor das trilhas condutoras.

Os mapas de campo elétrico obtidos via SimDATA mostram que, na ausência do plano (1e), o campo elétrico gerado pela trilha agressora tende a se propagar lateralmente em direção à trilha vítima, com certa influência da trilha de guarda, mesmo sem estar referenciada. Quando o plano é adicionado, ainda que flutuante (2e desconectado), observa-se uma redistribuição do campo elétrico, com maior densidade de linhas interagindo com a superfície inferior, intensificando a componente vertical do acoplamento.

Em suma, na configuração 2e com plano conectado, percebe-se uma mudança mais expressiva: o plano aterrado passa a capturar uma parcela significativa das linhas de campo, atenuando a intensidade do campo entre trilhas laterais. No entanto, como a trilha de guarda permanece não conectada, sua capacidade de neutralizar o acoplamento continua limitada, reforçando a importância da conexão elétrica da guarda para sua plena eficácia.

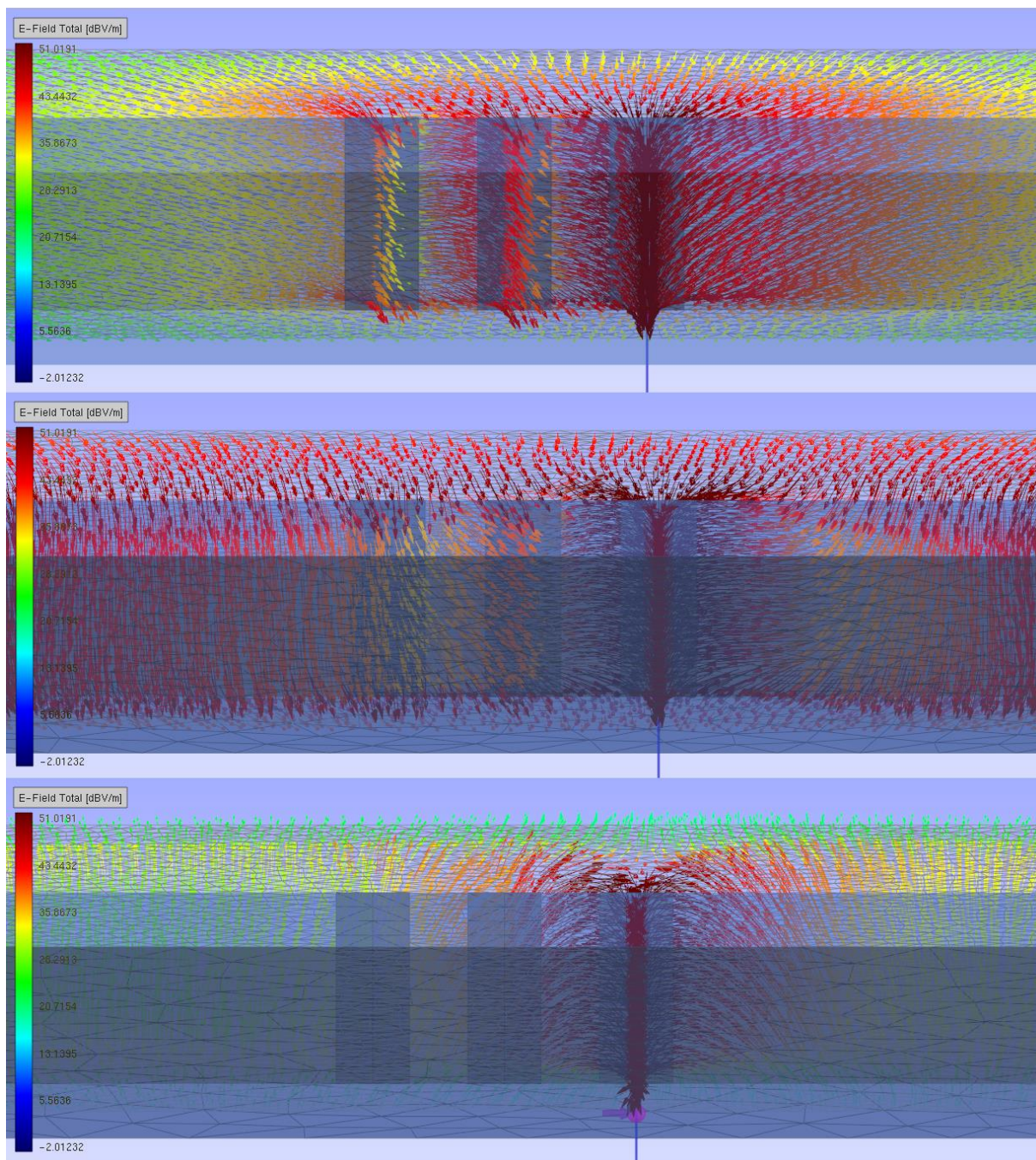
As Figuras 75 e 76 a seguir ilustram a comparação entre essas três condições. As visualizações incluem representações escalares (*Color*) e vetoriais (*Arrow*) do campo elétrico, mantendo os parâmetros de escala fixos e malha constante, o que assegura a coerência visual entre os casos e permite uma análise qualitativa precisa dos efeitos do plano de referência em conjunto com a trilha de guarda não conectada.

**Figura 75 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações *off* 1e, 2e desconectada e 2e conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 76 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações *off* 1e, 2e desconectada e 2e conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.8 Comparações entre Configurações com Trilha de Guarda Conectada

Nesta subseção, são analisadas as configurações 1e (com trilha de guarda conectada e sem plano de referência), 2e com plano de referência desconectado e 2e com plano de referência conectado (ambas também com a trilha de guarda conectada

eletricamente ao plano inferior). O objetivo trata-se de investigar o impacto da conexão da trilha de guarda sobre o acoplamento capacitivo, considerando diferentes condições de referência eletromagnética.

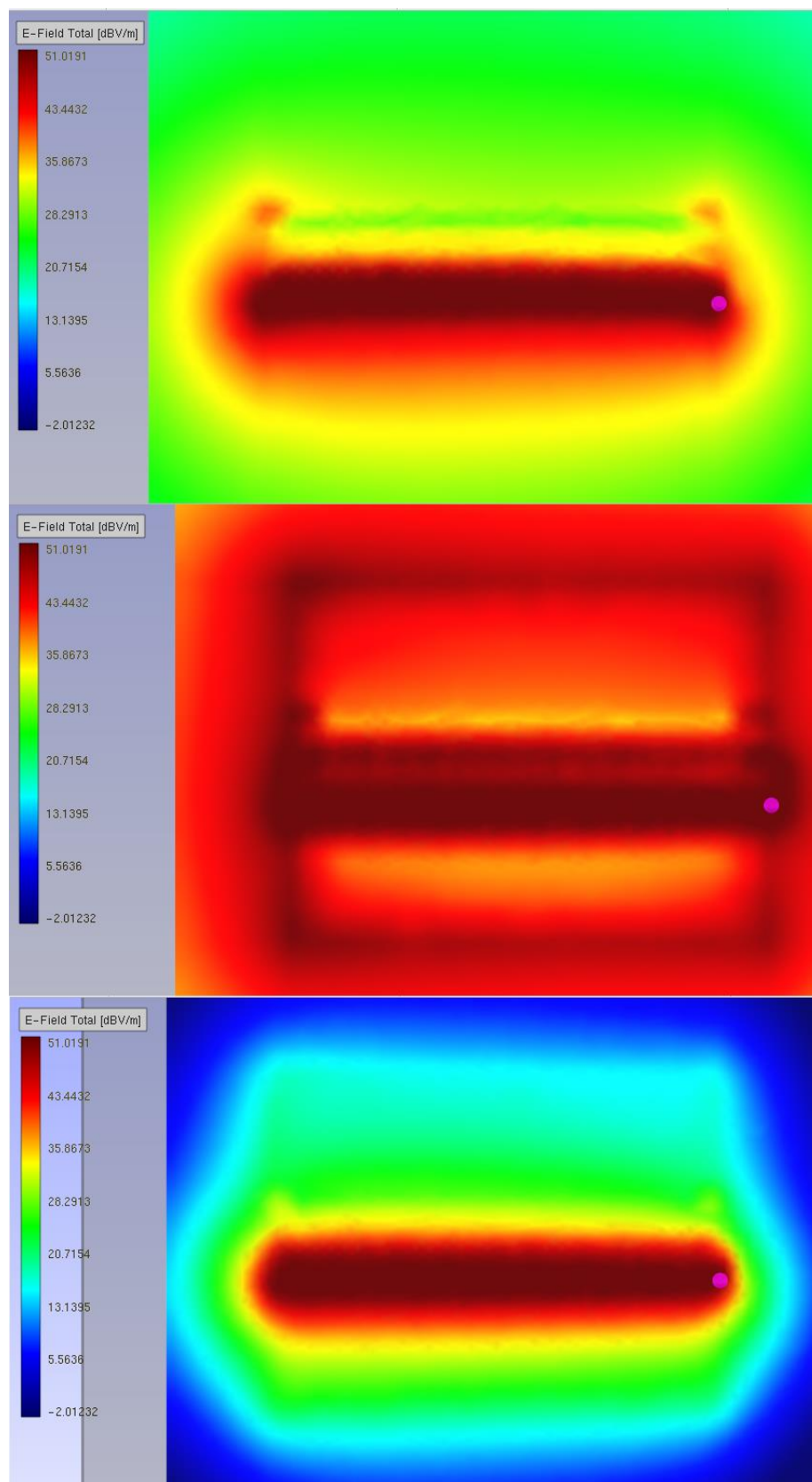
Diferentemente da subseção anterior, em que a guarda estava presente, mas sem conexão elétrica, nesta etapa avalia-se a atuação plena da trilha de guarda como elemento mitigador de interferência. Teoricamente, espera-se que, ao estabelecer uma ligação direta ao plano de terra, a guarda contribua para desviar as linhas de campo elétrico, reduzindo sua interação com a trilha vítima e, conseqüentemente, o *crosstalk*.

A conexão elétrica da trilha de guarda ao plano inferior transforma essa estrutura em um caminho preferencial de retorno de corrente, o que promove o redirecionamento das linhas de campo elétrico, reduzindo sua penetração na trilha vítima. Isso resulta em uma significativa atenuação do acoplamento capacitivo, especialmente quando a guarda está associada a um plano de terra contínuo. Além disso, a presença simultânea de guarda conectada e plano de referência aterrado cria um ambiente eletromagnético mais estável, promovendo contenção lateral e vertical do campo elétrico.

Com base nas visualizações obtidas no SimDATA, nota-se que, mesmo nas configurações sem plano de referência aterrado (como a 1e), a conexão da trilha de guarda já exerce efeito perceptível na contenção lateral do campo. No entanto, é nas configurações 2e, especialmente com o plano conectado, que se observa a atuação mais eficiente do sistema, com significativa redução da densidade de campo entre a trilha agressora e a vítima, indicando um acoplamento capacitivo atenuado.

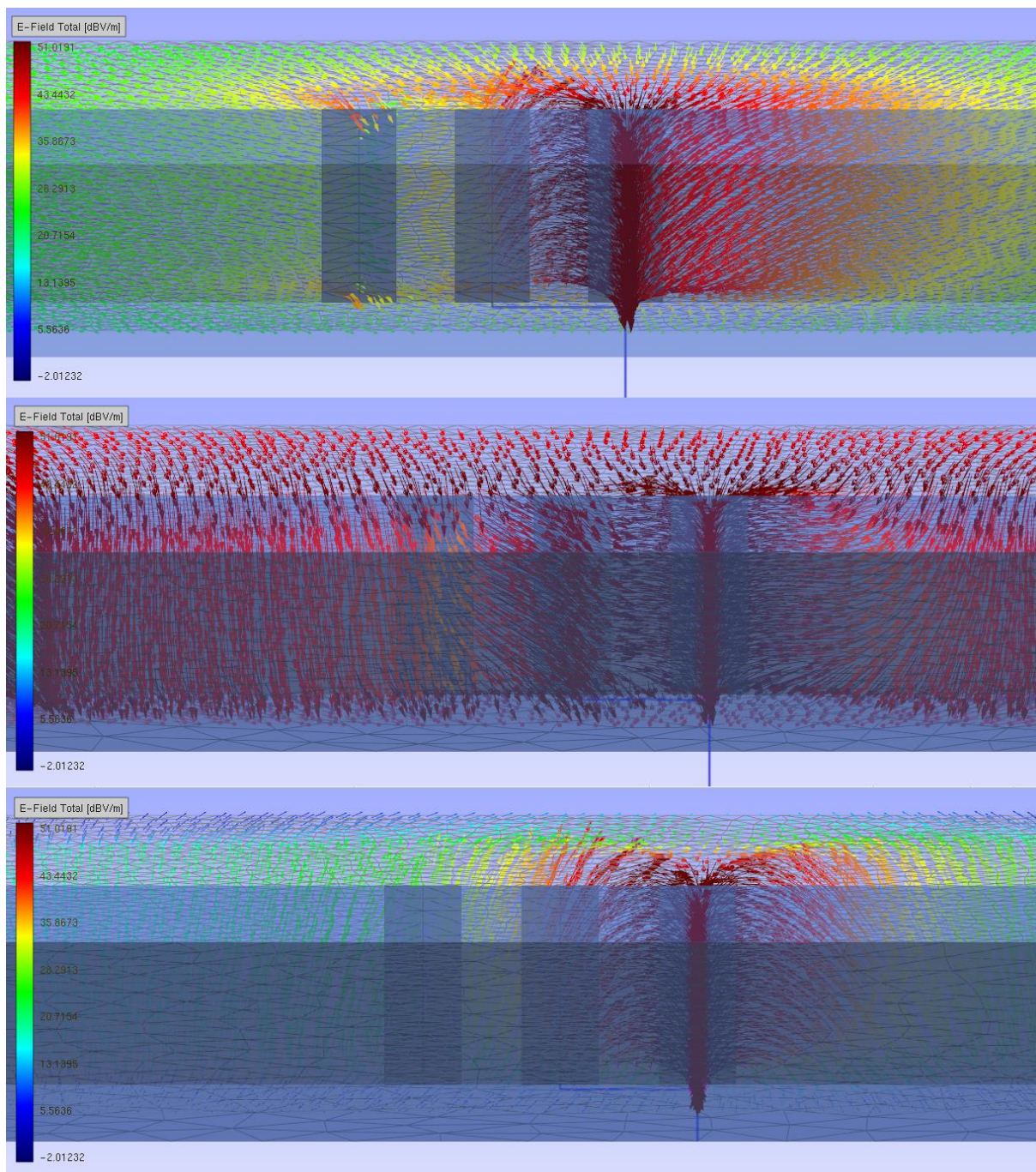
As Figuras 77 e 78 apresentam os resultados visuais obtidos para as três configurações com trilha de guarda conectada. São exibidas tanto distribuições escalares (modo *Color*) quanto representações vetoriais (modo *Arrow*) do campo elétrico, todas com parâmetros de escala e malha uniformes para garantir a consistência na análise comparativa entre os cenários.

**Figura 77 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações *on* 1e, 2e desconectada e 2e conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 78 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações *on 1e*, *2e* desconectada e *2e* conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.9 Comparação da Trilha de Guarda com Plano de Referência Desconectado

Esta subseção tem como objetivo analisar o impacto da conexão elétrica da trilha de guarda em um cenário em que o plano de referência metálico inferior está presente, porém permanece eletricamente desconectado do terra. Para essa análise,

comparam-se as configurações *2e off* e *2e on*, ambas com o mesmo plano flutuante sob as trilhas. A diferença reside no fato de que, na *2e on*, a trilha de guarda está conectada ao plano, enquanto na *2e off*, essa conexão está ausente. Essa condição permite isolar o efeito da conexão da guarda em um ambiente com referência inferior não aterrada, possibilitando a avaliação de sua eficácia parcial na contenção do campo elétrico.

O objetivo desta análise refere-se a isolar o efeito da trilha de guarda em um ambiente parcialmente desfavorável, no qual o plano inferior não exerce sua plena função como retorno de corrente. Conforme a teoria, infere-se que, mesmo em um cenário com plano flutuante, a conexão da trilha de guarda possa favorecer o redirecionamento das linhas de campo, ainda que de maneira limitada.

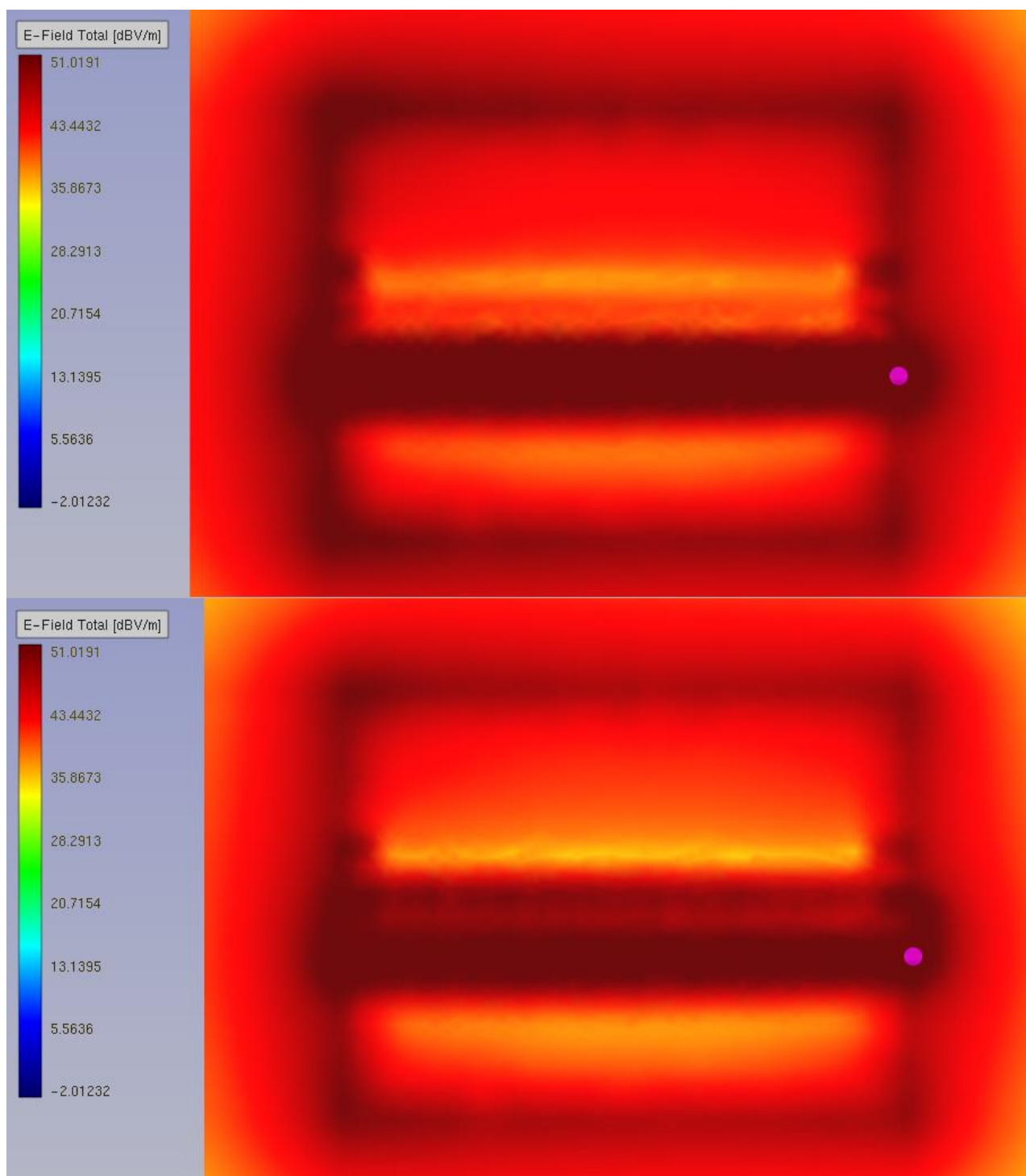
Com base nos resultados obtidos no SimDATA, observa-se que, na placa *2e off*, embora a trilha de guarda esteja fisicamente presente entre as trilhas agressora e vítima, a ausência de conexão com o plano inferior limita sua atuação como elemento de mitigação de interferência. O campo elétrico gerado tende a se distribuir livremente, com elevada densidade entre as trilhas laterais e expressiva projeção vertical em direção ao plano flutuante.

Ao comparar com a configuração *2e on*, nota-se uma alteração visível no padrão de distribuição do campo, visto que a conexão da trilha de guarda ao plano metálico flutuante promove uma modificação sutil na redistribuição das linhas de campo, redirecionando parte da energia que antes se concentrava entre os condutores laterais. Embora o plano continue não aterrado, o caminho condutor estabelecido com a guarda permite a formação de um percurso alternativo para as linhas de campo, o que contribui, ainda que de forma limitada, para a redução do acoplamento capacitivo direto entre trilha geradora e trilha vítima.

Dessa forma, constata-se que mesmo sem uma referência ao potencial de terra, a trilha de guarda conectada ao plano metálico inferior já exerce uma função atenuadora perceptível, promovendo contenção parcial do campo elétrico.

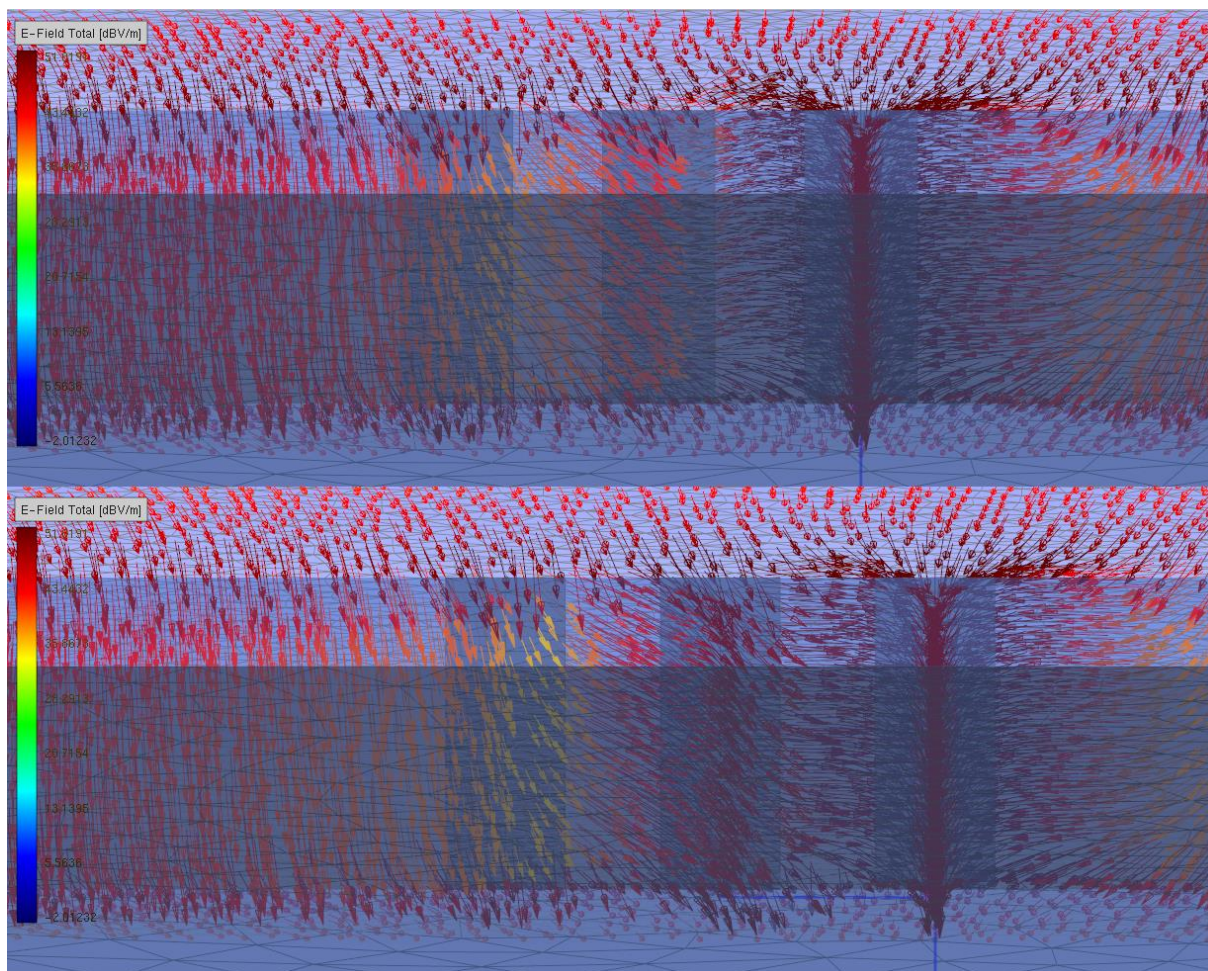
Em seguida, as Figuras 79 e 80 apresentam as distribuições escalares e vetoriais do campo elétrico simuladas para as configurações *2e off* e *2e on*, permitindo observar com maior clareza os efeitos descritos.

**Figura 79 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2e off e 2e on desconectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 80 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2e off e 2e on desconectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

#### 4.2.10 Comparação da Trilha de Guarda com Plano de Referência Conectado

Esta subseção tem como objetivo avaliar o impacto da conexão elétrica da trilha de guarda em um cenário ideal de referência eletromagnética, no qual o plano metálico inferior está presente e aterrado. Para isso, comparam-se as configurações 2e off (trilha de guarda não conectada ao plano) e 2e on (trilha de guarda conectada eletricamente ao plano aterrado). Ambas compartilham as mesmas dimensões geométricas e a presença do plano inferior, sendo a única variável em análise a existência da conexão elétrica entre a trilha de guarda e o plano de referência.

Do ponto de vista teórico, espera-se que a combinação entre uma trilha de guarda conectada e um plano de referência aterrado proporcione a máxima contenção do campo elétrico, criando um caminho eficiente para o retorno de corrente e

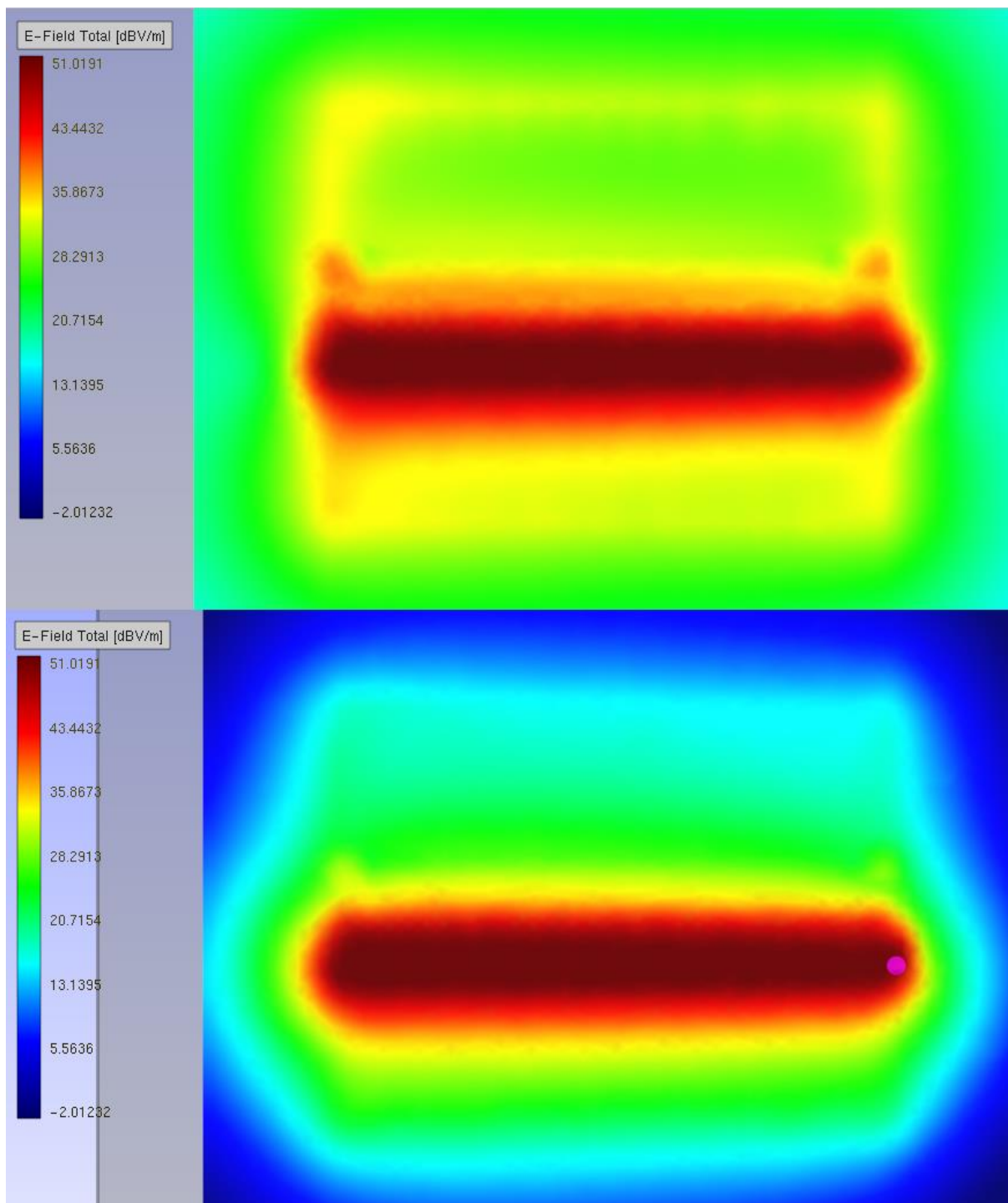
bloqueando a propagação lateral do campo entre as trilhas adjacentes. Nesse cenário, a trilha de guarda atua de forma sinérgica com o plano inferior, capturando e desviando as linhas de campo elétrico antes que estas atinjam a trilha vítima.

Os resultados obtidos no SimDATA confirmam esse comportamento. Na configuração 2e *off*, ainda que o plano esteja aterrado, a ausência de conexão elétrica com a trilha de guarda compromete sua atuação como elemento mitigador, resultando em um padrão de campo mais difuso e com maior penetração lateral. Já na configuração 2e *on*, a conexão efetiva entre guarda e plano estabelece um caminho preferencial de retorno de corrente e reorienta as linhas de campo, reduzindo significativamente sua densidade entre a trilha geradora e a trilha vítima.

Visualmente, observa-se uma contração das linhas de campo em direção ao plano de terra e à trilha de guarda, com clara diminuição da interação direta entre os condutores laterais. Esse efeito é ainda mais evidente nas representações vetoriais, que evidenciam o redirecionamento das frentes de campo ao longo de trajetórias controladas, minimizando o acoplamento capacitivo indesejado.

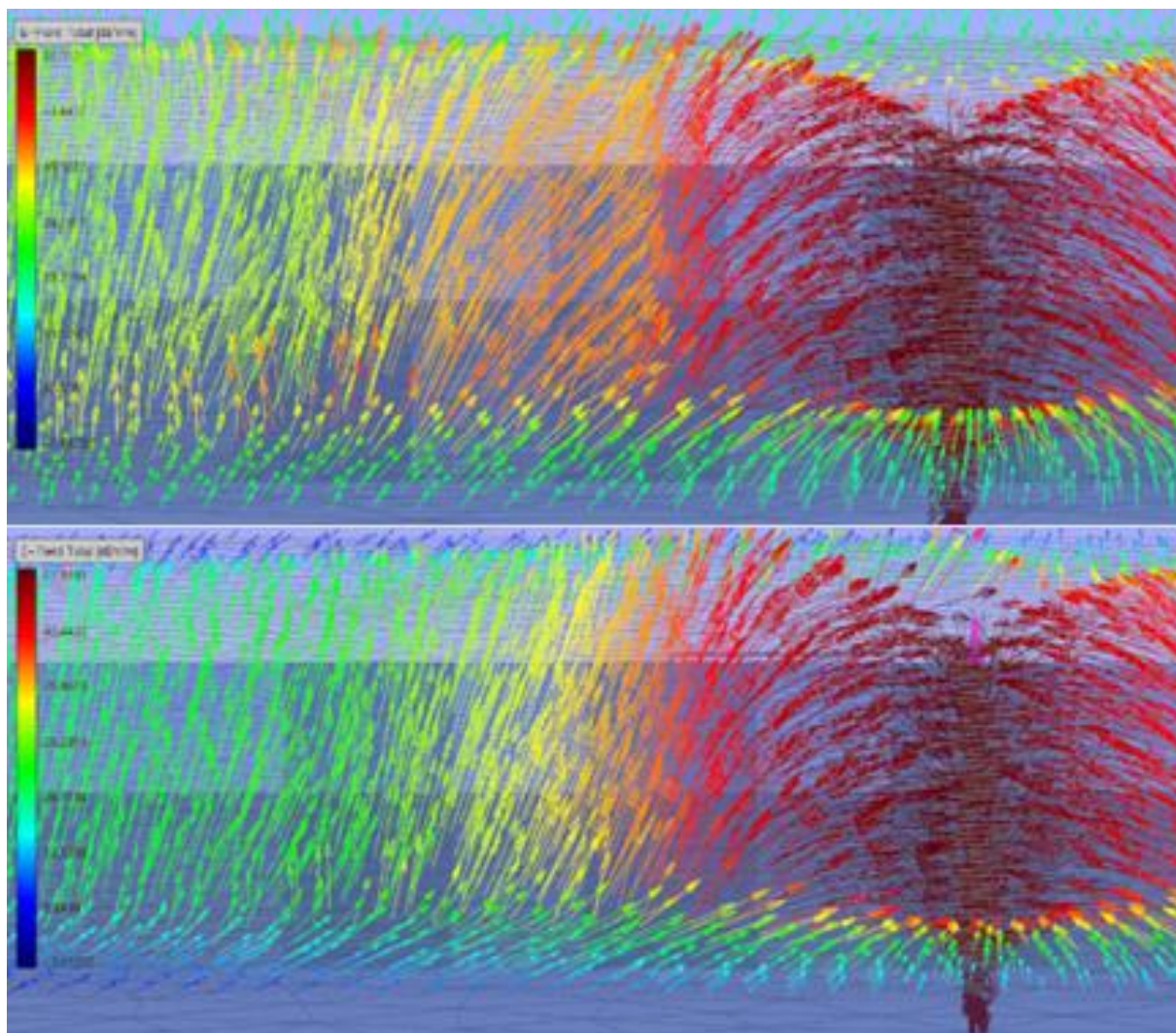
As Figuras 81 e 82, evidenciam essas afirmações, apresentando as distribuições escalares e vetoriais do campo elétrico nas duas configurações comparadas. Ressalta-se que todos os parâmetros de visualização foram rigorosamente mantidos constantes, proporcionando a coerência e a integridade da comparação qualitativa.

**Figura 81 – Visualização da distribuição escalar do campo elétrico (configurações 2e off e 2e on conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

**Figura 82 – Visualização lateral com vetores de campo (configurações 2e off e 2e on conectada)**



Fonte: Elaboração própria (2025).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, pode-se afirmar que o presente trabalho teve como propósito analisar, por meio de simulações bidimensionais no *software* EMCoS *Studio*, os efeitos do acoplamento capacitivo entre trilhas condutoras em PCBs, considerando distintas configurações geométricas e condições de referência eletromagnética. Os resultados obtidos evidenciam que, a partir da construção de modelos detalhados e da observação dos campos elétricos no campo próximo das trilhas (*near field*), foi possível caracterizar qualitativamente o fenômeno de *crosstalk* em diferentes condições de projeto.

As simulações realizadas possibilitaram a validação, de forma visual e fundamentada, de conceitos essenciais da teoria eletromagnética. Constatou-se que a redução da distância entre trilhas promoveu o aumento do acoplamento capacitivo, evidenciado pela maior concentração de linhas de campo elétrico entre os condutores. De modo análogo, verificou-se que o aumento no comprimento das trilhas intensificou o acoplamento, introduzindo, em configurações mais extensas, efeitos característicos de linhas de transmissão em altas frequências.

Ademais, as análises indicaram que a introdução de trilhas de guarda, demonstrou-se eficaz na mitigação do campo acoplado, especialmente quando conectadas ao plano de referência. Essa conexão promoveu o redirecionamento das linhas de campo elétrico, diminuindo sua penetração na trilha vítima e, conseqüentemente, reduzindo o *crosstalk*. De maneira ainda mais expressiva, a presença de um plano metálico inferior aterrado mostrou-se como um elemento chave na contenção tanto lateral quanto vertical do campo elétrico, restringindo a propagação do acoplamento entre trilhas adjacentes.

Diante disso, ressalta-se que a padronização dos parâmetros de simulação, como frequência de excitação, malha de discretização, escala de cores e representações vetoriais, foi fundamental para garantir a comparabilidade entre os diferentes casos. Essa uniformidade permitiu a análise coerente dos efeitos geométricos e elétricos sobre a distribuição espacial do campo, fortalecendo a validade qualitativa dos resultados obtidos.

Dessa forma, os resultados alcançados reforçam a importância de decisões criteriosas no projeto físico de PCIs, especialmente em sistemas que operam em altas frequências, nos quais a integridade dos sinais pode ser severamente comprometida por interferências eletromagnéticas indesejadas. Conclui-se, portanto, que o uso de ferramentas de simulação como o EMCoS *Studio* configura-se como uma abordagem valiosa para o diagnóstico, entendimento e mitigação do *crosstalk* ainda nas etapas iniciais de desenvolvimento, promovendo projetos mais robustos, eficientes e compatíveis com os requisitos de desempenho eletromagnético.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir das análises desenvolvidas neste trabalho, identificam-se diversas possibilidades de aprofundamento para futuras pesquisas que visem ampliar a compreensão dos mecanismos de acoplamento eletromagnético em placas de circuito impresso.

Inicialmente, recomenda-se a extensão da modelagem para o domínio tridimensional, a fim de representar com maior fidelidade a geometria das estruturas reais. Essa abordagem permitiria considerar efeitos relacionados à espessura do substrato, à presença de vias, planos internos, elementos de montagem superficial e demais características físicas que não são contempladas em uma análise bidimensional.

Outra proposta relevante diz respeito à análise em regime transitório, possibilitando o estudo da evolução temporal dos campos elétricos e do *crosstalk* ao longo da propagação de sinais pulsados ou modulados. Essa abordagem é particularmente importante em circuitos digitais de alta velocidade e em sistemas que operam sob condições dinâmicas de excitação.

Adicionalmente, recomenda-se a realização de estudos sistemáticos sobre a influência de parâmetros geométricos da placa, como a distância entre trilhas, o comprimento das trilhas, a largura da placa, a largura da trilha, a distância da trilha externa em relação à borda da placa e a altura da trilha em relação ao plano inferior de referência. A variação controlada dessas variáveis pode fornecer resultados valiosos para o estabelecimento de diretrizes de projeto voltadas à mitigação do acoplamento capacitivo e à melhoria da integridade de sinal.

Além disso, com base nas observações obtidas durante as simulações, recomenda-se a realização de um estudo sistemático sobre a influência da altura do *ground* em relação às placas. Observou-se que essa variável exerce impacto significativo na distribuição do campo elétrico, podendo modificar de maneira expressiva o nível de acoplamento capacitivo.

Outra possibilidade consiste na utilização de softwares distintos do EMCoS *Studio*, mas com funcionalidades similares para simulação eletromagnética, como o CST *Studio Suite* ou o Ansys HFSS. A comparação entre diferentes ferramentas pode fornecer resultados complementares, além de validar os modelos empregados e ampliar a confiabilidade dos dados obtidos.

Ademais, propõe-se a inclusão da análise de campo distante (*far field*), visando avaliar os efeitos de radiação eletromagnética em regiões afastadas da placa. Essa perspectiva é particularmente relevante em projetos com requisitos rigorosos de compatibilidade eletromagnética, onde emissões não intencionais devem ser cuidadosamente controladas para evitar interferências externas.

Por fim, recomenda-se a correlação entre os resultados obtidos via simulação no EMCoS *Studio* e medições experimentais em placas físicas reais, a fim de validar os modelos teóricos implementados. Essa etapa pode ser realizada por meio da medição direta do campo elétrico e/ou magnético em ambos os lados das placas, utilizando o medidor/rastreador de campo eletromagnético disponível no LABCEM (Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética) da instituição.

A aquisição dos dados experimentais na forma de mapas de calor, semelhante à representação gráfica utilizada no SimDATA, permitirá uma comparação qualitativa e quantitativa mais precisa com os resultados simulados, fortalecendo a confiabilidade do estudo e ampliando sua aplicabilidade prática no contexto de projetos de PCIs com requisitos críticos de integridade de sinal e compatibilidade eletromagnética.

## REFERÊNCIAS

BALANIS, Constantine A. **Advanced engineering electromagnetics**. 2. ed. New York: Wiley, 2012.

BOGATIN, Eric. **Signal and power integrity – simplified**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. Disponível em: [https://www.oldfriend.url.tw/article/SI\\_PI\\_book/Signal%20and%20Power%20Integrity%20-%20Simplified\\_2nd\\_Eric%20Bogatin\\_Prentice%20Hall%20PTR\\_2010.pdf](https://www.oldfriend.url.tw/article/SI_PI_book/Signal%20and%20Power%20Integrity%20-%20Simplified_2nd_Eric%20Bogatin_Prentice%20Hall%20PTR_2010.pdf). Acesso em: 20 mai. 2025.

BOGATIN, Eric. **Signal and power integrity**. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2018. ISBN 978-0-13-451341-6; ISBN 0-13-451341-X.

BRASIL. Ministério das Comunicações. Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução nº 708, de 26 de março de 2019. Declara a revogação das Resoluções expedidas pela Agência que foram implicitamente revogadas e das que perderam sua eficácia. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 26 mar. 2019. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2019/1257-resolucao-708>. Acesso em: 03 jun. 2025.

CANIGGIA, Spartaco; MARADEI, Francescaromana. **Signal integrity and radiated emission of high-speed digital systems**. London: John Wiley & Sons, 2008. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/5795/08/L-G-0000579508-0015230997.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2025.

EMCoS STUDIO. **EM simulation software overview**. 2025. Disponível em: <https://emcos.com/?products=emcos-studio>. Acesso em: 20 mai. 2025.

HALL, Stephen H.; HALL, Garrett W.; MCCALL, James A. **High-speed digital system design: a handbook of interconnect theory and design practices**. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2000.

HARPER, Charles A. **Electronic packaging and interconnection handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

JOHNSON, Howard W.; GRAHAM, Martin. **High-speed digital design: a handbook of black magic**. 1. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993. p. 368.

JOHNSON, Howard; GRAHAM, Martin. **High-speed digital design: a handbook of black magic**. 1. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.

KELLER, Reto B. **Design for electromagnetic compatibility - in a nutshell: theory and practice**. Switzerland: Springer, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-14186-7>. Acesso em: 12 ago. 2025.

LI, Licky. **Differential crosstalk in high-speed PCB design**. Licky's Column, 31 out. 2024. Disponível em: <https://www.pcb-hero.com/blogs/lickys-column/differential-crosstalk-in-high-speed-pcb-design>. Acesso em: 12 ago. 2025.

MONTROSE, Mark I. **EMC and the printed circuit board: design, theory, and layout made simple**. New York: Wiley – IEEE Press, 1999. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/EMC+and+the+Printed+Circuit+Board%3A+Design%2C+Theory%2C+and+Layout+Made+Simple-p-9780471723103>. Acesso em: 01 jun. 2025.

MONTROSE, Mark I. **Printed circuit board design techniques for EMC compliance: a handbook for designers**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley, 2000. Disponível em: [https://d1.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_16/ourdev\\_457787.pdf](https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_16/ourdev_457787.pdf). Acesso em: 19 mai. 2025.

MUDAVATH, R.; NAIK, B. R. Estimation of far end crosstalk and near end crosstalk noise with mutually coupled RLC interconnect models. *In*: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING (ICCSP). 2018. Chennai, India. **Proceedings** [...]. Chennai, India: IEEE, 03-05 April, 2018.

PAUL, Clayton R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2<sup>nd</sup> ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/5851/19/L-G-0000585119-0002361289.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2025.

PINHO, Antonio Carlos; *et al.* Análise de integridade de sinal, emissão eletromagnética e térmica em placa controladora de impressão. *In*: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA – CILAMCE, 21., 2000, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: CILAMCE, 2000. Disponível em: [https://www.academia.edu/6831925/AN%C3%81LISE\\_DE\\_INTEGRIDADE\\_DE\\_SINAL\\_EMISS%C3%83O\\_ELETROMAGN%C3%89TICA\\_E\\_T%C3%89RMICA\\_EM\\_PLACA\\_CONTROLADORA\\_DE\\_IMPRESS%C3%83O](https://www.academia.edu/6831925/AN%C3%81LISE_DE_INTEGRIDADE_DE_SINAL_EMISS%C3%83O_ELETROMAGN%C3%89TICA_E_T%C3%89RMICA_EM_PLACA_CONTROLADORA_DE_IMPRESS%C3%83O). Acesso em: 01 jun. 2025.

ROHDE & SCHWARZ. **Normas de EMC**. 2023. Disponível em: [https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/electronics-testing/emc-testing/emc-standards/padrees-de-emc\\_253450.html](https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/electronics-testing/emc-testing/emc-standards/padrees-de-emc_253450.html). Acesso em: 18 junho. 2025.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

SCHLICHTING, Luis Carlos Martinhago. **Material didático**. Florianópolis, SC: Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, 2025.

SENE, Luiz Fernando Assis. **Manual do EMCoS Studio**. Florianópolis, SC: Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, 2025.

SENE, Luiz Fernando Assis. **Modelagem e simulação de placa de circuito impresso utilizando o software EMCoS Studio**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.