

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Camila Aparecida Dias

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS CAMPOS MAGNÉTICOS E TENSÕES  
INDUZIDAS EM UM EDIFÍCIO NO CASO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA  
DIRETA**

Belo Horizonte

2018

Camila Aparecida Dias

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS CAMPOS MAGNÉTICOS E TENSÕES  
INDUZIDAS EM UM EDIFÍCIO NO CASO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA  
DIRETA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Mary de Souza Batalha

Área de concentração: Sistemas de Engenharia Elétrica e de Computação

Belo Horizonte

2018

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

D541a	<p>Dias, Camila Aparecida</p> <p>Avaliação dos efeitos dos campos magnéticos e tensões induzidas em um edifício no caso de descarga atmosférica direta / Camila Aparecida Dias. Belo Horizonte, 2018.</p> <p>88 f.: il.</p> <p>Orientadora: Rose Mary de Souza Batalha</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica</p> <p>1. Raio. 2. Compatibilidade eletromagnética. 3. Edifícios - Proteção. 4. Aparelhos e materiais eletrônicos - Proteção. 5. Aparelhos e materiais elétricos - Proteção. 6. Blindagem (Eletricidade). 7. Cálculos numéricos - Programas de computador. I. Batalha, Rose Mary de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p>CDU: 621.316.17</p>
-------	--

Camila Aparecida Dias

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS CAMPOS MAGNÉTICOS E TENSÕES  
INDUZIDAS EM UM EDIFÍCIO NO CASO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA  
DIRETA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Engenharia Elétrica e de Computação

---

Prof<sup>ca</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rose Mary de Souza Batalha - PUC Minas (Orientadora)

---

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino - UFMG (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Ronaldo Kascher Moreira - PUC Minas (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvêa Júnior (Suplente) - PUC Minas (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 29 de maio de 2018.

*A Deus por não me deixar desistir nos momentos difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, fica expressa aqui a minha gratidão, especialmente:

A Deus por guiar o meu caminho.

A Profa. Dra. Rose Batalha, minha orientadora, pela oportunidade, incentivo e confiança.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Kascher, meu “co-orientador não oficial” por toda disponibilidade, paciência e pelas contribuições agregadas a esta pesquisa.

A Bel e a Eliza pelo carinho, conversas e por toda paciência e alto astral. Aos demais professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC Minas pelos ensinamentos, pela convivência sempre agradável e pela amizade.

Ao PPGEE da PUC Minas e a CAPES pelo apoio acadêmico, científico e financeiro.

Aos meus amigos, sempre presentes nos momentos importantes e nos momentos de descontração.

Aos meus pais, por entenderem minha escolha pelo mestrado e por confiarem na minha capacidade.

As minhas irmãs Ana Paula e Bruna Fernanda pelo apoio, amizade.

Ao meu marido Saulo por compartilhar meus anseios, pelas palavras de conforto e por ter feito essa caminhada muito mais alegre.

## RESUMO

Descargas atmosféricas diretas ou próximas de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) produzem impulsos eletromagnéticos responsáveis pela indução de sobretensões em equipamentos no interior das estruturas. O conhecimento de campos magnéticos e tensões induzidas dentro de um edifício na ocorrência de descarga atmosférica direta é fundamental para a concepção de sistemas de proteção contra surtos do ponto de vista da Compatibilidade Eletromagnética. Esta pesquisa apresenta um estudo dos campos magnéticos e tensões induzidas devido a descargas atmosféricas que atingem diretamente o SPDA de estruturas. Foi modelada computacionalmente uma estrutura em escala reduzida e também em escala real blindada com SPDA em três arranjos distintos. O SPDA foi excitado com um sinal impulsivo cujas características são semelhantes às correntes das descargas atmosféricas. Os modelos foram implementados nos softwares comerciais CST® Studio Suite e ANSYS® Electromagnetics suites utilizando, respectivamente, as técnicas numéricas TLM (Matriz de linha de transmissão) e FEM (Elementos finitos). Os experimentos investigam os seguintes aspectos: a distribuição da corrente da descarga atmosférica pelos condutores que compõem o SPDA; o comportamento do campo magnético e da tensão induzida ao se aplicar uma blindagem espacial e em diferentes pontos da estrutura, em relação aos captosres e condutores de descida do SPDA; o comportamento da tensão induzida em laços que estão protegidos por infraestruturas metálicas eletricamente contínuas; a influência dos condutores horizontais do SPDA no comportamento da tensão induzida; e a aplicação da teoria da similaridade para escalonar modelos. Os resultados das simulações eletromagnéticas foram confrontados com resultados experimentais em modelo escala reduzida e com os efeitos previstos nas equações da NBR-5419-2015. As avaliações realizadas nesta pesquisa permitiram quantificar os percentuais de atenuação da tensão induzida em loops no interior de estruturas atingidas por descargas atmosféricas diretas ao se implementar medidas de proteção contra surtos.

Palavras-Chave: Descarga atmosférica. Proteção contra descargas atmosféricas. NBR-5419. SPDA. Equipamentos elétricos e eletrônicos.

## ABSTRACT

Direct lightning strikes, or even nearby strikes, on a Lightning Protection System (LPS) produce electromagnetic pulses responsible for inducing overvoltages in electrical or electronic equipment inside a building structure. Knowledge of magnetic field behavior and of induced voltages within a building in the event of a direct lightning strike is paramount for designing surge protection systems, from an EMC point of view. This research presents a study of the magnetic fields and induced voltages due to lightning strikes that directly hit the LPS. A structure shielded by a LPS in three different arrangements has been computationally modeled in a reduced scale, as well as in real scale. The LPS was excited with an impulsive signal, the characteristics of which are similar to lightning currents. The models were simulated in two commercial software programs, CST® Studio Suite and ANSYS® Electromagnetic suites, using the numerical techniques TLM (Transmission Line Matrix) and FEM (Finite Element Method), respectively. The experiments investigate the following: the distribution of the lightning current through the conductors that make up the LPS; the behavior of the magnetic field and the induced voltage when applying a spatial shielding, and in different locations inside the structure in regard to the captors and down conductors (of the LPS); the behavior of the induced voltage on conducting loops shielded by electrically continuous structures; the influence of the horizontal LPS conductors on the induced voltage; the application of the theory of similarity to stagger models. The results of the electromagnetic simulations were compared to experimental results in a reduced-scale model and to the effects expected from the equations presented in NBR-5419-2015. The evaluations carried out in this research allowed for quantifying the percentage of induced voltage attenuation in loops within structures directly struck by lightning when implementing protective measures against surges.

Keywords: Lightning. Lightning Protection System. NBR-5419. LPS. Electrical and electronic equipment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Impulso com tempo inferior a 2ms (a)Tempo de calda (b)Tempo de subida. .	16
Figura 2: Componente longa com tempo superior a 2ms. ....	17
Figura 3: Correntes (a) O 1º impulso positivo (b) O 1º impulso negativo. (c) O impulso negativo subsequente. ....	19
Figura 4: Divisões da nova NBR 5419 .....	20
Figura 5: Danos e perdas relevantes em diferentes pontos de impacto .....	23
Figura 6: SPDA externo .....	24
Figura 7: Coeficiente $k_c$ no caso de um sistema de captores em malha e sistema de aterramento em anel.....	26
Figura 8: ZPR definidas por um SPDA.....	27
Figura 9: Princípios gerais para a divisão de diferentes ZPR.....	29
Figura 10: Subsistema de aterramento em forma de malha de uma planta. ....	31
Figura 11: Sistema de aterramento tridimensional consistindo em uma rede de equipotencialização, interligada com o subsistema de aterramento .....	31
Figura 12: Métodos de equipotencialização .....	32
Figura 13: Modelo simplificado.....	41
Figura 14: Sinal injetado.....	41
Figura 15: Corrente Induzida no Loop .....	43
Figura 16: Indutância mútua e indutância mútua aparente .....	44
Figura 17: Tensão induzida no <i>loop</i> pelo MoM (a) Considerando as correntes de deslocamento e atrasos de propagação (b) Sem considerar as correntes de descolamento e atrasos de propagação. ....	45
Figura 18: Tensão induzida no <i>loop</i> .....	46
Figura 19: Arranjo para ensaio do SPDA com a injeção de corrente impulsiva gerada por gerador de impulso .....	49
Figura 20: Arranjo do laço para fins de avaliação da tensão induzida.....	49
Figura 21: Protótipo experimental (a) 2º arranjo (b) 3º arranjo (c) Lado de trás (d) Medição .....	50
Figura 22: Desenho dos 3 arranjos de SPDA acoplados ao gerador de surto.....	50
Figura 23: Estágio conformador da onda do gerador de corrente impulsiva.....	51
Figura 24: Sensor tipo “laço” utilizado nas medições .....	52
Figura 25: Sensor de corrente utilizado nas medições da corrente injetada .....	52

<b>Figura 26: Mapa das posições do sensor nos pavimentos 1 e 3 – planta baixa .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 27: Modelo escala reduzida utilizando CST® .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 28: Sinal injetado no modelo CST® .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 29: Malha do modelo CST®.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 30: Modelo escala reduzida utilizando ANSYS®.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 31: Malha de elementos finitos.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 32: Sinal injetado no modelo ANSYS®.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 33: Modelo escala real utilizando CST®.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 34: Sinal injetado no modelo em escala real.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 35: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 5 do primeiro andar em relação ao 1º arranjo. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 36: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 5 do terceiro andar em relação ao 1º arranjo. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 37: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 8 do primeiro andar em relação ao 1º arranjo. ....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 38: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 8 do terceiro andar em relação ao 1º arranjo. ....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 39: Arranjo da montagem da estrutura ensaiada com identificação dos condutores componentes do SPDA (a) Lateral direita e trás (b) Lateral esquerda e frente .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 40: Correntes simuladas nos condutores que compõem o SPDA .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 41: Distribuição das correntes. ....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 42: Distribuição da corrente no ponto de injeção .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 43: Distribuição de corrente abaixo do ponto de injeção .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 44: Comparação da distribuição da corrente no ponto de injeção.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 45: Comparação da distribuição de corrente abaixo do ponto de injeção.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 46: Campo magnético no primeiro andar - pontos 5 a 5d e 6. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 47: Campo magnético no primeiro andar - pontos 8 a 8d e 7. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 48: Campo magnético no terceiro andar - pontos 5 a 5d e 6.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 49: Campo magnético no terceiro andar - pontos 8 a 8d e 7.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 50: Atenuações das tensões induzidas no 1º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida no ponto 8.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 51: Atenuações das tensões induzidas no 1º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida no ponto 5.....</b>	<b>75</b>

<b>Figura 52: Atenuações das tensões induzidas no 3º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida com o laço no ponto 8.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 53: Atenuações das tensões induzidas no 3º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida com o laço no ponto 5.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 54: Tensão induzida no <i>loop</i> aberto.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 55: Tensão induzida considerando um <i>loop</i> fechado próximo ao <i>loop</i> aberto.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 56: Tensão induzida para diferentes quantidades de condutores horizontais .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 57: Tensão induzida ao diminuir a malha do captor .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 58: Tensão induzida na estrutura em escala reduzida.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 59: Tensão induzida na estrutura em escala real .....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Parâmetros da corrente das descargas obtidos do CIGRE .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabela 2: Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção (NP) .....</b>	<b>19</b>
<b>Tabela 3: Efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 4: Valores do coeficiente <math>k_c</math>.....</b>	<b>25</b>
<b>Tabela 5: Fatores de escala para a edificação .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 6: Fatores de escala para as diversas quantidades físicas .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 7: Fatores de escala para a corrente da descarga atmosférica .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 8: Características dos três arranjos .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 9: Tensão induzida em (mV) nos pontos 5 e 8 no primeiro andar.....</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 10: Tensão induzida em (mV) nos pontos 5 e 8 do terceiro andar .....</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 11: Tensão induzida em (V) nos pontos 5 e 8 no primeiro andar – Escala real ...</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 12: Tensão induzida em (V) nos pontos 5 e 8 do terceiro andar – Escala real.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 13: Distribuição de corrente no SPDA no penúltimo e último andar .....</b>	<b>69</b>
<b>Tabela 14: Campo magnético na estrutura em escala real.....</b>	<b>72</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 Justificativa .....	12
1.2 Problema .....	13
1.3 Objetivo .....	13
1.4 Metas e escopo.....	14
1.5 Organização do trabalho .....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 Descargas atmosféricas .....	16
2.2 Proteção contra descargas atmosféricas.....	20
2.2.1 <i>Princípios gerais e definições</i> .....	21
2.2.2 <i>O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas - SPDA</i> .....	23
2.3 Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) .....	25
2.3.1 <i>As zonas de proteção contra raios</i> .....	27
2.3.2 <i>Blindagem magnética</i> .....	29
2.3.3 <i>Cabos blindados</i> .....	29
2.3.4 <i>Roteamento de linhas</i> .....	29
2.3.5 <i>Sistema coordenado de DPS</i> .....	30
2.3.6 <i>Aterramento, equalização de potenciais e isolamento</i> .....	30
2.4 Métodos matemáticos para modelagem computacional .....	33
2.4.1 <i>Matriz de linha de transmissão (TLM)</i> .....	33
2.4.2 <i>Método dos Elementos finitos (FEM)</i> .....	34
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS</b> .....	<b>35</b>
<b>4 MODELO COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL</b> .....	<b>40</b>
4.1 Validação das simulações computacionais .....	40
4.2 Fator de escala .....	46
4.3 Modelo experimental escala reduzida - Caso 1.....	48
4.4 Modelos computacionais .....	53
4.4.1 <i>Modelo em escala reduzida utilizando CST® - Caso 2</i> .....	53
4.4.2 <i>Modelo em escala reduzida utilizando ANSYS® - Caso 3</i> .....	56
4.4.3 <i>Modelo escala real utilizando CST® - Caso 4</i> .....	58
4.4.4 <i>Dificuldades nas implementações computacionais</i> .....	59
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>61</b>
5.1 Avaliação da tensão induzida ao alterar a geometria da malha do SPDA.....	61
5.2 Avaliação da distribuição da corrente nos condutores que compõem o SPDA .....	66
5.3 Avaliação do campo magnético e tensão induzida ao afastar o sensor do SPDA .....	71
5.4 Avaliação da tensão induzida ao rotear os cabos em eletrodutos .....	77
5.5 Avaliação da influência dos condutores horizontais do SPDA na tensão induzida....	78
5.6 Aplicação da teoria da similaridade para escalonar modelos de SPDA.....	79
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>81</b>
6.1 Trabalhos futuros .....	82
6.2 Publicações .....	83
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo dos primeiros sistemas de proteção contra descargas atmosféricas datam mais de 200 anos. Benjamin Franklin publicou os primeiros trabalhos sobre proteção contra descargas atmosféricas e posteriormente um grande número de pesquisas foram realizadas. Os primeiros estudos foram conduzidos para prover proteção exclusivamente às pessoas e às estruturas. Posteriormente, com a evolução da tecnologia dos componentes eletrônicos, os circuitos valvulados foram substituídos por circuitos integrados com dimensões cada vez menores, tornando os equipamentos eletroeletrônicos extremamente sensíveis a surtos irradiados e conduzidos. Com a crescente aplicação dos equipamentos eletroeletrônicos nas indústrias e residências surgiu a necessidade de se desenvolver técnicas para proteção desses equipamentos contra sobretensões originadas pelas descargas atmosféricas diretas e indiretas (PAULINO et al. 2016). No Brasil, em 22 de junho de 2015, entrou em vigor a nova Norma Brasileira de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (NBR 5419, 2015), que passou a incorporar uma parte específica sobre a proteção de equipamentos eletroeletrônicos instalados dentro de edificações.

### 1.1 Justificativa

A sociedade atual está cada vez mais dependente dos serviços fornecidos pelos sistemas elétricos e eletrônicos. Esses sistemas são vitais para o processamento e armazenamento de dados, sistemas de segurança, controle de processos industriais, estabelecimento de serviços de telecomunicações e para o controle da infraestrutura do fornecimento de energia (GOHARA et al, 2014). Falhas nesses sistemas causadas pelos efeitos dos campos magnéticos das descargas atmosféricas podem gerar consequências graves e perdas inestimáveis. Esta questão foi reconhecida pelos institutos internacionais, que, por sua vez, estabeleceram alguns padrões, como a IEC 62305-4 (2010), que aborda os procedimentos de segurança e proteção, a fim de reduzir o risco de danos causados por Pulsos Eletromagnéticos das Descargas Atmosféricas, conhecidos como LEMP (*Lightning Electromagnetic Impulse*). Da mesma forma o Setor de Normatização das Telecomunicações estabeleceu a ITU-T K.20 (2017) e ITU-T K.21 (2017) que apresentam recomendações para realizar testes de resistibilidade dos equipamentos eletrônicos e de telecomunicações contra sobretensões e sobrecorrentes.

## 1.2 Problema

Campos magnéticos são gerados no interior da estrutura de um edifício quando uma descarga atmosférica atinge, diretamente ou indiretamente, o seu SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (ARANEO et al, 2015). As descargas atmosféricas diretas geram maiores campos magnéticos devido à distribuição da corrente da descarga através dos condutores que compõem o SPDA. Por outro lado, a incidência de descargas indiretas ocorre com mais frequência, dada uma maior probabilidade de atingir uma área em torno da estrutura. Os sistemas elétricos e eletrônicos internos geralmente são conectados através de condutores responsáveis pela alimentação, aterramento e transmissão de dados. A distribuição desses condutores geralmente leva à formação de laços de indução (BARBOSA; PAULINO, 2016). Esses laços, quando submetidos a campos magnéticos variantes no tempo, induzem sobretensões nos terminais dos equipamentos (ASADA et al, 2016) . Não existe uma solução única que garanta a proteção dos equipamentos eletroeletrônicos no interior da estrutura. Na realidade, somente com a aplicação de uma série de medidas, coordenadas entre si, é possível diminuir o risco de falhas (PAULINO et al, 2016). Zonas de proteção contra descargas atmosféricas (ZPR) são recomendadas para mitigar os efeitos transitórios transferidos para os condutores da instalação e também proteger a estrutura dos efeitos dos campos magnéticos causados pela corrente da descarga atmosférica no SPDA (HEGDE; SHIVANAND, 2015; TATEMATSU; RACHIDI; RUBINSTEIN, 2015) .

## 1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a avaliação dos efeitos dos campos magnéticos internos e, por conseguinte, das tensões induzidas nas instalações internas de uma edificação. Estas tensões são devidas aos campos magnéticos indutores gerados pela passagem da corrente da descarga atmosférica pelos condutores que compõem o SPDA da edificação. Para realizar o estudo foi criado nos softwares CST® Studio Suite e ANSYS® Electromagnetics Suite o modelo computacional de uma construção de quatro andares em um fator de escala reduzida 1:40 e também em escala real. O edifício foi equipado com um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em vários arranjos geométricos distintos. O SPDA foi excitado por correntes impulsivas, cujas características são semelhantes à forma de onda da descarga atmosférica. Os resultados simulados foram confrontados com os resultados experimentais

apresentados por Dias e outros (2017) e também com os efeitos previstos na NBR 5419 (2015). As simulações foram conduzidas para avaliar os seguintes aspectos:

- a) Tensão induzida em laços formados no interior da estrutura em três arranjos físicos de SPDA externo.
- b) Distribuição da corrente da descarga atmosférica pelos condutores que compõem o SPDA.
- c) Campo magnético e tensão induzida ao afastar os laços de indução dos condutores de descida e captos que compõem o SPDA.
- d) Tensão induzida em laços dentro de infraestruturas metálicas eletricamente contínuas.
- e) Influência dos condutores horizontais do SPDA no comportamento da tensão induzida.
- f) Aplicação da teoria da similaridade para escalonar modelos de SPDA que utilizam blindagens espaciais.

#### **1.4 Metas e escopo**

São metas e fazem parte do escopo desta pesquisa:

- a) Estudar a nova norma brasileira de SPDA, publicada em 2015, com enfoque nos novos recursos contidos na Parte 4 que aborda os sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura e suas consequências nas soluções para os novos projetos, avaliando os benefícios das novas premissas contidas na norma.
- b) Desenvolver o modelo em escala reduzida e em escala real no simulador comercial *CST® Studio Suite* (CST, 2017) pacote *Microwave Studio*, versão 2017, licença educacional. O CST utiliza a técnica numérica TLM (Matriz de Linha de Transmissão) para obter os resultados eletromagnéticos.
- c) Desenvolver o modelo em escala reduzida no simulador comercial *ANSYS® Electromagnetics suites* (ANSYS, 2018), pacote *Ansys Electronics desktop*, versão 2017, licença educacional. O HFSS utiliza a técnica numérica FEM (Elementos Finitos) para obter os resultados eletromagnéticos.
- d) Validar os resultados computacionais a partir do modelo simplificado apresentado por Panicali e Barbosa (2011).
- e) Confrontar as simulações com o protótipo experimental em escala reduzida apresentado por Dias e outros (2017) e com os efeitos previstos na norma NBR-5419 (2015).

- f) Avaliar a blindagem dos campos magnéticos e redução do LEMP nos terminais dos equipamentos eletroeletrônicos internos à estrutura ao se aplicar medidas de proteção contra surtos.
- g) Elaborar artigos científicos, a serem submetidos em congressos e periódicos da área.

### 1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Além da introdução (Capítulo 1), tem-se os demais capítulos organizados da seguinte forma:

- a) **Capítulo 2:** contém o referencial teórico que engloba os principais conceitos da norma brasileira NBR 5419:2015, seus princípios gerais e definições, a corrente da descarga atmosférica, o SPDA externo e interno, as zonas de proteção, as medidas de proteção contra surtos e as técnicas numéricas utilizadas nas simulações computacionais.
- b) **Capítulo 3:** expõe os trabalhos relacionados mais relevantes ao tema da pesquisa abordado neste trabalho.
- c) **Capítulo 4:** apresenta o desenvolvimento do modelo computacional e experimental em escala reduzida e em escala real, fator de escala, descrição das medições realizadas e dificuldades encontradas.
- d) **Capítulo 5:** abrange a validação dos resultados computacionais a partir do modelo simplificado apresentado por Panicali e Barbosa (2011); posteriormente apresenta os resultados e discussões da avaliação do campo magnético e tensão induzida no interior das estruturas atingidas por uma descarga direta. Os resultados são comparados aos resultados experimentais apresentados por Dias e outros (2017) e aos efeitos previstos na NBR 5419 (2015).
- e) **Capítulo 6:** contém as conclusões acerca dos resultados e das contribuições da pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

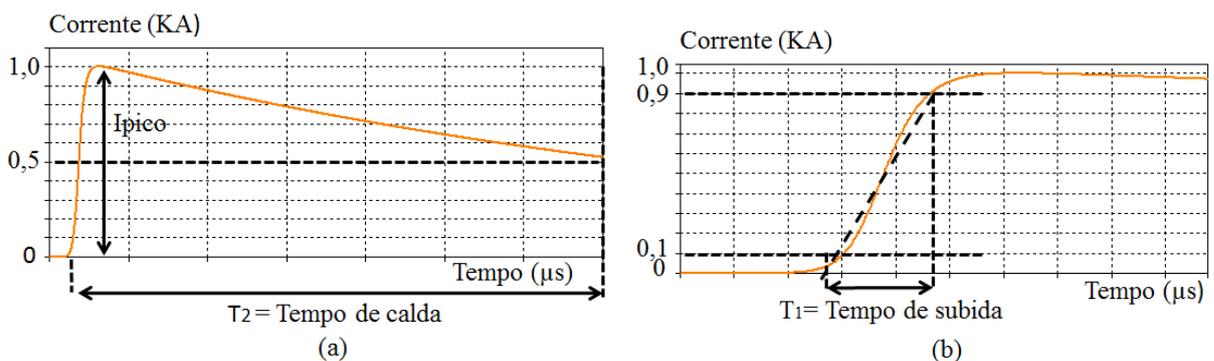
Este capítulo expõe os principais conceitos necessários para embasar o desenvolvimento deste trabalho. Serão apresentadas as características da corrente da descarga atmosférica; as principais inovações da norma brasileira de proteção contra descargas atmosféricas NBR 5419 (2015) comparada a sua versão anterior NBR 5419 (2005); as premissas de projeto para o SPDA externo e interno; as zonas de proteção contra surtos; e as medidas de proteção contra surtos.

### 2.1 Descargas atmosféricas

A descarga atmosférica é o fenômeno natural mais comum e frequente no planeta, não existindo a possibilidade de evitar a sua ocorrência. No mundo cerca de 9 milhões de descargas atmosféricas ocorrem por dia entre nuvens e entre nuvem-terra (DWYER; UMAN, 2014). A corrente da descarga atmosférica é a responsável pelos danos que podem ocorrer nas estruturas, pessoas e equipamentos elétricos e eletrônicos (FUANGFUNG; SINTHUSONTHISHAT; YUTTHAGOWITH, 2015), sendo o seu conhecimento fundamental para a concepção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

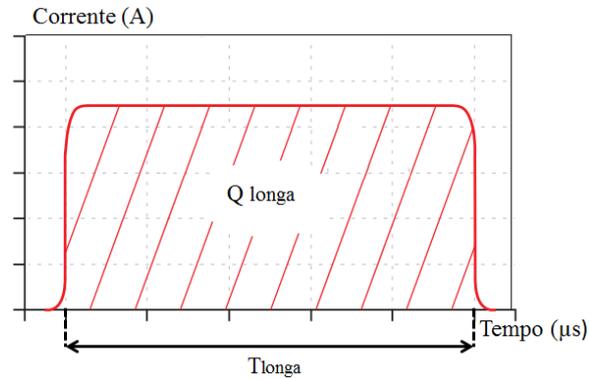
De acordo com a NBR 5419-1 (2015) a corrente da descarga atmosférica consiste em um ou mais componentes diferentes. A Figura 1, por exemplo, apresenta um impulso com duração inferior a 2 ms, onde se destacam três parâmetros importantes: o valor da amplitude máxima da corrente ( $I_{pico}$ ); o tempo de frente ou tempo de subida ( $T_1$ ); e o tempo de meio valor ou tempo de calda ( $T_2$ ). A parte do impulso com duração superior a 2 ms, conhecida como componente longa, está representada na Figura 2 e possui o tempo de duração ( $T_{longa}$ ) e a carga da componente longa da descarga atmosférica ( $Q_{longa}$ ).

Figura 1: Impulso com tempo inferior a 2ms (a)Tempo de calda (b)Tempo de subida.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 2: Componente longa com tempo superior a 2ms.



Fonte: Elaborado pela autora

Os parâmetros completos para a corrente da descarga considerados pela NBR 5419 (2015) são baseados nos resultados do *International Council on Large Electrical Systems - CIGRÉ* que sugere um conjunto de formas de onda que estão indicadas na Tabela 1. A taxa média de inclinação ( $di/dt$ ) da frente de onda da corrente da descarga está relacionada com o acoplamento indutivo responsável pelas sobretensões e centelhamentos perigosos. Os valores de pico ( $I$ ), carga do impulso ( $Q$ ) e energia específica ( $W/R$ ) estão relacionados com os efeitos térmicos e mecânicos. A NBR 5419 (2015) sugere quatro formas de ondas indicadas na Tabela 2: o primeiro impulso positivo Figura 3(a); o primeiro impulso negativo Figura 3(b) e o impulso negativo subsequente Figura 3(c).

A NBR 5419 (2015) classifica os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em quatro níveis de proteção (NP) e para cada nível são recomendados valores máximos das correntes de descarga conforme Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros da corrente das descargas obtidos do CIGRE

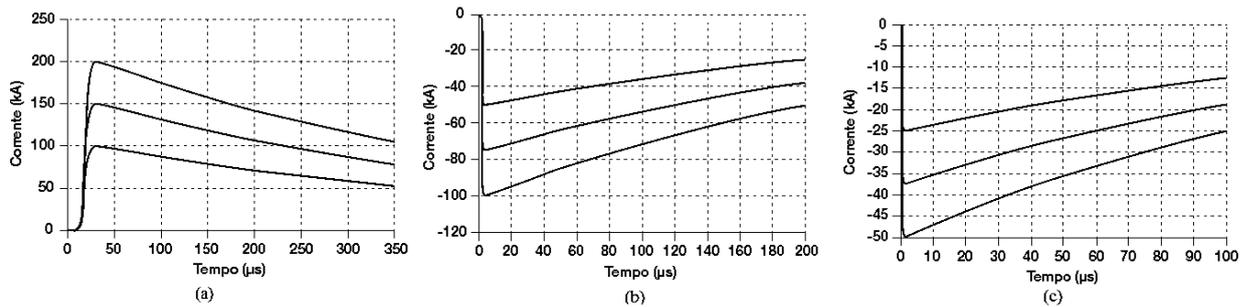
Parâmetro	Valor fixado para NP I	Valores			Tipo de componente da descarga
		95%	50%	5%	
I (kA)	50	4	20	90	Primeira curta negativa
		4,9	11,8	28,6	Subsequente negativa curta
		200	4,6	35	250
Qflash (C)	300	1,3	35	250	Descarga negativa
		20	7,5	40	Descarga positiva
Q curta (C)	100	1,1	4,5	20	Primeira curta negativa
		0,22	0,95	4	Subsequente negativa curta
		2	16	150	Primeira curta positiva (singela)
W/R (kJ/ $\Omega$ )	10000	6	55	550	Primeira curta negativa
		0,55	6	52	Subsequente curta negativa
		25	650	15000	Primeira curta positiva
di/dtmáx (kA/ $\mu$ s)	20	9,1	24,3	65	Primeira curta negativa
		9,9	39,8	161,5	Subsequente curta negativa
		0,2	2,4	32	Primeira curta positiva
di/dt30/90 % (kA/ $\mu$ s)	200	4,1	20,1	98,5	Subsequente curta negativa
Qlonga (C)	200				Longa
Tlonga (s)	0,5				Longa
Duração da frente de onda ( $\mu$ s)		1,8	5,5	18	Primeira curta negativa
		0,22	1,1	4,5	Subsequente curta negativa
		3,5	22	200	Primeira curta negativa
Duração da componente ( $\mu$ s)		30	75	200	Primeira curta negativa
		6,5	32	140	Subsequente curta negativa
		25	230	2000	Primeira curta positiva (singela)
Intervalo de tempo (ms)		7	33	150	Múltiplos negativos
Duração total da descarga (ms)		0,15	13	1100	Descarga negativa (completa)
		31	180	900	Descarga negativa (sem o impulso singelo)
		14	85	500	Descarga positiva

Fonte: Adaptado de NBR 5419 (2015)

Os valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes ao NP I são reduzidos a 75% para o nível II e a 50% para o nível III e IV. As reduções são lineares para os valores de pico da corrente (I), carga do impulso (Q) e taxa média de inclinação (di/dt) e quadrática para energia específica (W/R), os parâmetros de tempo não mudam. Portanto, o nível I garante uma proteção mais efetiva e o nível IV uma proteção menos efetiva. Os valores máximos das correntes são utilizados em projetos na definição da seção

transversal dos condutores, espessura de telhas e chapas metálicas, capacidade de condução de corrente dos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), valores dos campos magnéticos e distâncias de separação entre os condutores.

**Figura 3: Correntes (a) O 1º impulso positivo (b) O 1º impulso negativo. (c) O impulso negativo subsequente.**



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2: Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção (NP)

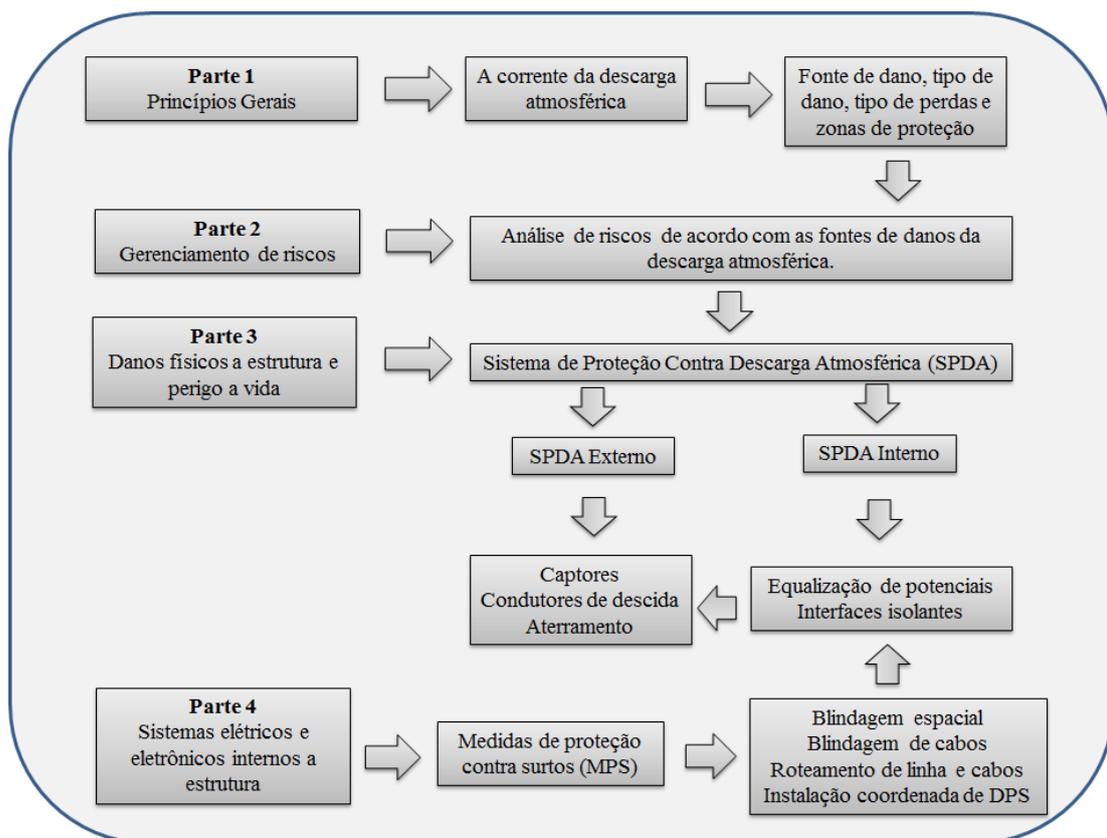
Primeiro impulso positivo			NP			
Parâmetro da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico	I	kA	200	150	100	
Carga do impulso	Qcurta	C	100	75	50	
Energia específica	W/R	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Parâmetros de tempo	T1/T2	µs/µs	10/350			
Primeiro impulso negativo			NP			
Parâmetro da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Valor de pico	I	kA	100	75	50	
Taxa média de variação	di/dt	kA/µs	100	75	50	
Parâmetro de tempo	T1/T2	µs/µs	1/200			
Impulso subsequente			NP			
Parâmetro da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Valor de pico	I	kA	50	37,5	25	
Taxa média de variação	di/dt	kA/µs	200	150	0,25/100	
Parâmetro de tempo	T1/T2	µs/µs	0,25/100			

Fonte: Adaptada de NBR 5419 (2015)

## 2.2 Proteção contra descargas atmosféricas

A norma brasileira ABNT NBR 5419 (2015) sob o título geral “Proteção contra descargas atmosféricas”, elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade pela Comissão de Estudo de Proteção contra Descargas Atmosféricas, apresenta um conjunto de critérios a serem adotados para a proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. A norma brasileira foi baseada na norma internacional IEC 62305 (2010) e a sua observância é obrigatória na competência do Ministério do Trabalho e Emprego, amparada pela Lei nº 6.514 de 1977 (PLANALTO, 2017) e Portaria nº 3214 de 1978 (CAMARA, 2017). A escolha das medidas de segurança mais adequadas deve ser feita pelo responsável técnico e pelo proprietário da edificação. A norma brasileira foi reformulada em 2015 e apresenta 4 capítulos conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: Divisões da nova NBR 5419



Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos da NBR 5419

A nova edição da norma brasileira é mais completa comparada a sua versão anterior publicada em 2005 (ABNT NBR 5419, 2005) e as duas maiores inovações foram a parte 2, que

trata do gerenciamento de riscos (ABNT NBR 5419-2, 2015), e a parte 4 (ABNT NBR 5419-4, 2015) que aborda a proteção dos equipamentos elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Apesar da norma de Instalações elétricas de baixa tensão (NBR 5410, 2004) contemplar algumas medidas sugeridas para a proteção das instalações de baixa tensão utilizando Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), a nova abordagem da NBR 5419 publicada em 2015 reacendeu a importância de tratar este assunto e marcou o início do desenvolvimento desta pesquisa. Nos itens 2.2.1 e 2.2.2 serão apresentadas as Partes 1 e 3 que tratam, respectivamente, dos conceitos gerais e do projeto do SPDA externo e interno (ABNT NBR 5419-1; ABNT NBR5419-3, 2015). A parte 4, enfoque desta pesquisa, será abordada no item 2.3 e faz referência às Medidas de Proteção Contra Surtos (ABNT NBR5419-4, 2015).

### **2.2.1 Princípios gerais e definições**

Para minimizar os riscos decorrentes da descarga atmosférica na edificação é necessário estabelecer a adoção de medidas de proteção que garantam a proteção das pessoas, da própria estrutura, de seus conteúdos e instalações (sistema de energia elétrica e telecomunicações, distribuição de água e gás, plantas industriais, entre outros sistemas existentes). Os efeitos das descargas atmosféricas sobre uma estrutura e sua vizinhança dependem das características dessas estruturas, conforme exemplifica a Tabela 3.

Tabela 3: Efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas

(Continua)

<b>Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade e/ou conteúdo</b>	<b>Efeitos das descargas atmosféricas</b>
Casa residencial	Falha de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos instalados (aparelhos de TV, computadores, modems, telefones, refrigeradores, etc.). Perfuração da isolamento das instalações elétricas, incêndio e danos materiais. Danos normalmente limitados a objetos expostos ao ponto de impacto ou no caminho da corrente da descarga atmosférica.
Teatro ou cinema Hotel Escola Shopping centers Áreas de esportes	Danos em instalações elétricas que tendem a causar pânico (por exemplo, iluminação elétrica). Falhas em sistemas de alarme de incêndio, resultando em atrasos nas ações de combate a incêndio. Falhas em sistemas de alarme de incêndio, resultando em atrasos nas ações de combate a incêndio.

<b>Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade e/ou conteúdo</b>	<b>Efeitos das descargas atmosféricas</b>
Bancos Empresa de seguros Estabelecimento comercial etc.	Conforme acima, adicionando-se problemas resultantes da perda de comunicação, falha de computadores e perda de dados.
<b>Indústria</b>	Efeitos adicionais dependendo do conteúdo das fábricas, que vão desde os menos graves até danos inaceitáveis e perda de produção.
Estação de telecomunicações Estação de geração e transmissão de energia elétrica	Interrupções inaceitáveis de serviços ao público.
Indústria química Refinaria Usina nuclear Indústria e laboratório de bioquímica	Incêndio e mau funcionamento da planta com consequências prejudiciais ao meio ambiente local e global.

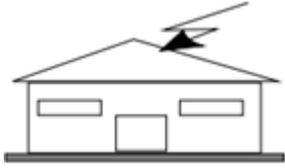
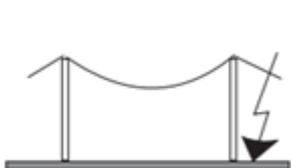
Fonte: Adaptado de NBR 5419 (2015)

Segundo a NBR 5419 existem quatro fontes de danos nas estruturas: descarga atmosférica direta - fonte de dano S1; descarga atmosférica próxima à estrutura - fonte de dano S2; descarga atmosférica direta nas linhas elétricas e de telecomunicações e tubulações metálicas que adentram a estrutura - fonte de dano S3; descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e de telecomunicações e tubulações metálicas que adentram a estrutura - fonte de dano S4.

As fontes de danos das descargas atmosféricas podem causar três tipos de danos: danos às pessoas por choque elétrico, devido às tensões de toque e de passo - Dano D1; danos físicos como fogo e/ou explosão, destruição mecânica, liberação de produtos químicos, centelhamento - Dano D2; falha ou mau funcionamento de sistemas internos devido a LEMP -Dano D3.

Os danos podem provocar quatro tipos de perdas: perda de vida humana - L1; perda de serviço ao público - L2; perda de patrimônio cultural - L3; perda de valor econômico - L4. A Figura 5 relaciona a fonte do dano com o tipo de dano e tipo de perda.

Figura 5: Danos e perdas relevantes em diferentes pontos de impacto

Fonte de Dano	Ponto de impacto		Tipo de dano	Tipo de perda
S1	Estrutura		D1 D2 D3	L1 , L4 <sup>a</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>b</sup> ,L2,L4
S2	Nas proximidades de uma estrutura		D3	L1 <sup>b</sup> ,L2,L4
S3	Linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas à estrutura		D1 D2 D3	L1 , L4 <sup>a</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>b</sup> ,L2,L4
S4	Proximidades de uma linha ou tubulação metálica		D3	L1 <sup>b</sup> ,L2, L4

<sup>a</sup> Somente para propriedades onde pode haver perdas de animais.

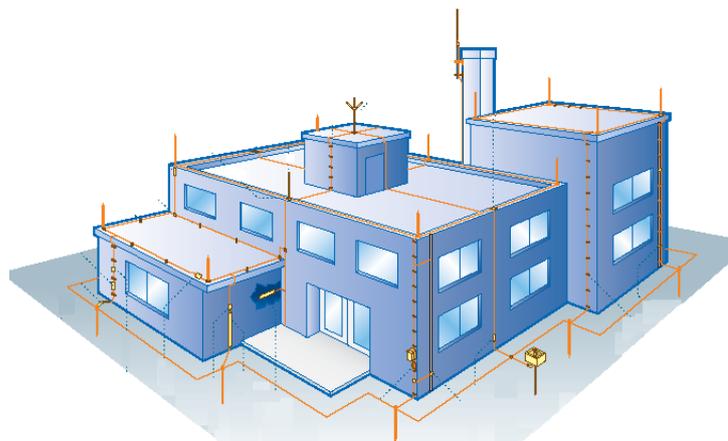
<sup>b</sup> Somente para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas nas quais falhas em sistemas internos colocam a vida humana diretamente em perigo.

Fonte: Adaptado de NBR5419 (2015)

### 2.2.2 O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas - SPDA

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) externo é formado por um conjunto de condutores responsáveis por interceptar as descargas atmosféricas diretas na estrutura, conduzir a corrente do ponto de impacto à terra e dispersar esta corrente de forma segura sem causar danos térmicos, mecânicos ou centelhamentos. A Figura 6 ilustra um SPDA com seus captores, condutores de descida e sistema de aterramento.

Figura 6: SPDA externo



Fonte: CDPENA, 2015

O SPDA externo pode incorporar partes da estrutura a ser protegida, tais como componentes naturais feitos de materiais condutores os quais permanecem definitivamente na estrutura e não serão modificados, como por exemplo, armaduras de aço interconectadas estruturando o concreto armado e vigamentos metálicos da estrutura. Tubulações metálicas e tanques contendo misturas explosivas ou prontamente combustíveis podem se constituir em captadores naturais, desde que eles sejam de material com espessura que suporte a corrente que circulará por eles e que a elevação de temperatura da superfície interna no ponto de impacto não acarrete em alto grau de risco. Um SPDA externo isolado deve ser considerado quando os efeitos térmicos e de explosão no ponto de impacto, ou nos condutores percorridos pela corrente da descarga atmosférica, puderem causar danos à estrutura ou ao seu conteúdo. O uso de um SPDA isolado também pode ser conveniente onde for previsto que futuras mudanças na estrutura, seu conteúdo ou o seu uso irão requerer modificações no SPDA.

A adoção de SPDA interno é necessária para evitar a ocorrência de centelhamentos perigosos dentro do volume de proteção da estrutura a ser protegida, devido à corrente da descarga atmosférica que flui pelo SPDA externo ou em outras partes condutivas da estrutura. Segundo Paulino e outros (2016), o centelhamento é a formação de um arco voltaico entre dois condutores, por exemplo, condutores de descida do SPDA e a tubulação metálica de gás. A temperatura do arco elétrico é muito elevada, levando ao risco de incêndio e explosões. O centelhamento perigoso pode ser evitado por meio de ligações equipotenciais de todas as partes metálicas ou através da isolamento elétrica entre as partes. As tensões desenvolvidas pela corrente da descarga podem ser da ordem de milhares de volts, podendo provocar centelhamentos de

grandes comprimentos, logo o isolamento elétrico será efetivo se a distância entre os condutores for conveniente.

A corrente da descarga atmosférica que atinge o SPDA externo se divide entre os condutores que o compõem. Essa divisão de correntes é importante na avaliação dos campos magnéticos que se desenvolvem no interior da edificação. A norma quantifica a distribuição de corrente através do coeficiente de divisão  $k_c$ . O valor de  $k_c$  depende do número total de condutores de descida  $n$  e das suas posições, dos condutores em anel de interligação, do tipo do subsistema de captação e do tipo do subsistema de aterramento como indicado na Tabela 4. A Figura 7 apresenta os valores dos coeficientes de divisão  $k_c$  para um SPDA com captor em malha, quatro ou mais condutores de descida e anéis condutores na horizontal. A corrente em cada condutor do SPDA pode ser encontrada multiplicando-se a corrente injetada ( $I_0$ ) pelo coeficiente  $k_c$  correspondente.

Tabela 4: Valores do coeficiente  $k_c$

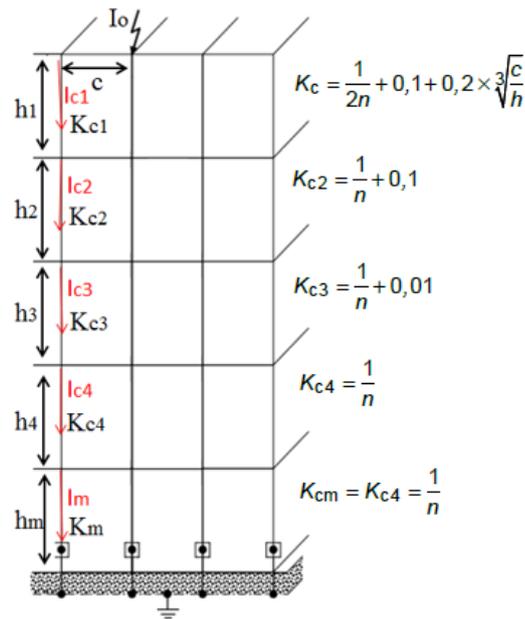
<b>Tipo de captos</b>	<b>Número de condutores de descida - n</b>	<b><math>k_c</math> Arranjo de aterramento em anel</b>
Haste simples	1	1
Fio	2	0,5...1
Malha	4 e mais	0,25...0,5
Malha	4 e mais, com anéis horizontais	1/n...0,5

Fonte: Adaptado de NBR 5419 (2015)

### 2.3 Medidas de Proteção contra Surtos (MPS)

Sistemas eletrônicos de elevada complexidade são utilizados em plantas industriais provendo controle de processos, serviços de telecomunicações, entre outros. Portanto, falhas nos sistemas eletroeletrônicos causados por pulsos eletromagnéticos causados pelas descargas atmosféricas (LEMP) são indesejáveis por razões de custo e segurança. Danos permanentes nos sistemas eletroeletrônicos podem ser causados por LEMP por meio dos campos eletromagnéticos irradiados diretamente nos próprios equipamentos ou dos surtos induzidos ou conduzidos pelos cabos conectados ao sistema.

Figura 7: Coeficiente  $k_c$  no caso de um sistema de captore em malha e sistema de aterramento em anel



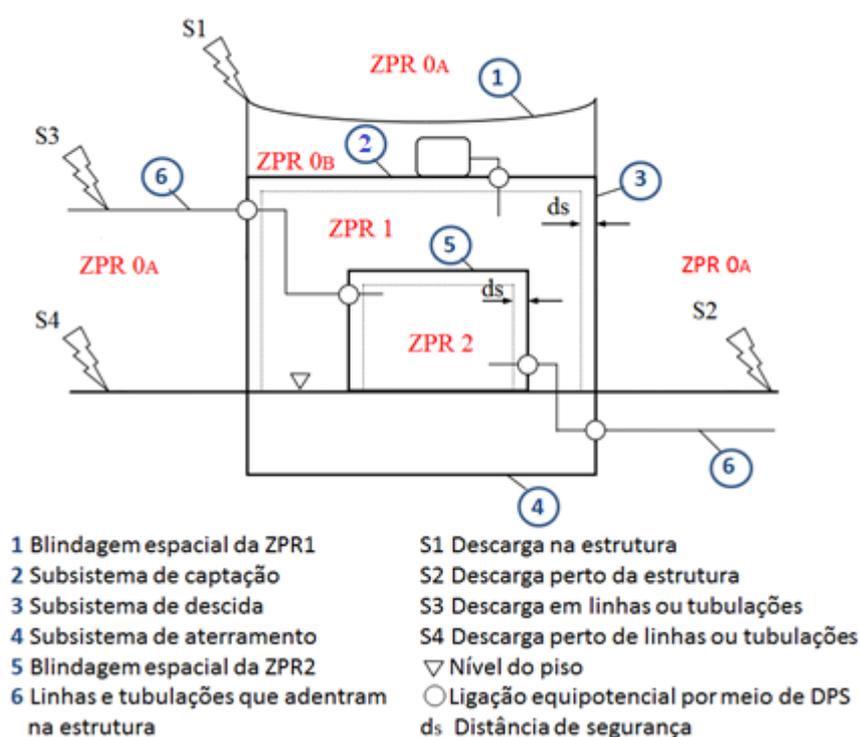
Fonte: Adaptada da NBR 5419-3 (2015)

Os surtos nas estruturas podem ser originados por descargas atmosféricas que atingem a própria estrutura ou o solo próximo a ela, ou por descargas atmosféricas que atingem diretamente ou indiretamente as linhas metálicas que entram na estrutura. Campos eletromagnéticos indutores podem ser gerados pela corrente elétrica que flui no canal da descarga atmosférica direta e pelas correntes parciais da descarga atmosférica que se distribuem pelos condutores do SPDA externo. Para evitar os danos nos sistemas internos causados por LEMP é necessária a adoção Medidas de Proteção contra Surtos (MPS). O planejamento e a coordenação dessas medidas requer um gerenciamento de risco para determinar as medidas de proteção necessárias para reduzir os riscos para um nível tolerável (NBR 5419-2, 2015). Na maioria dos casos, para alcançar um sistema de proteção eficiente e com o custo menor, o ideal é que o projeto seja desenvolvido durante a concepção inicial da edificação e antes do início da sua construção, o que possibilita utilizar os componentes naturais da estrutura e escolher as melhores rotas para a passagem dos cabos e para a localização dos equipamentos. As medidas de proteção contra surtos - MPS são baseadas no conceito de Zonas de Proteção contra Raios (ZPR), como por exemplo, blindagem espacial em forma de grade, linhas blindadas, coordenação de DPS, roteamento de linhas, entre outras.

### 2.3.1 As zonas de proteção contra raios

O volume da estrutura contendo os sistemas internos a serem protegidos deve ser dividido em Zonas de Proteção contra Raios (ZPR). Cada ZPR é caracterizada pelo nível da severidade dos surtos, conforme Figura 8. Dependendo do número, tipo e suportabilidade dos equipamentos protegidos, ZPR adicionais devem ser definidas.

Figura 8: ZPR definidas por um SPDA



Fonte: ABNT 5419-4, 2015

As ZPR são classificadas como:

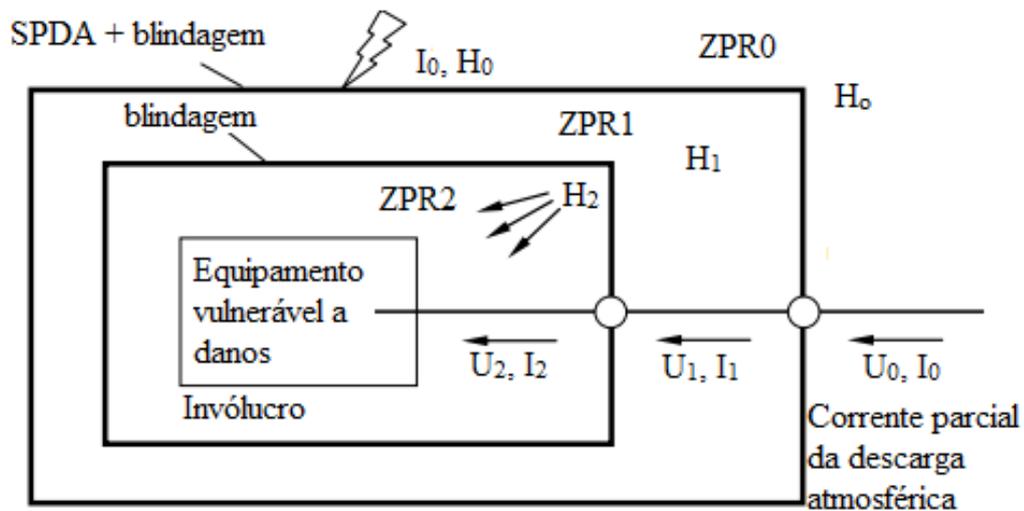
- ZPR 0: Zona externa a estrutura onde a ameaça é devido ao campo eletromagnético total da descarga atmosférica e onde os sistemas internos podem ser sujeitos as correntes de surto totais ou parciais. A ZPR0 com adoção ou não de captadores pode ser dividida em:
  - ZPR 0A: zona onde a ameaça é devido à queda direta da descarga atmosférica e ao campo eletromagnético total. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente total ou parcial da descarga. Geralmente são zonas que não possuem captadores ou áreas não protegidas pelos captadores existentes.

- ZPR 0<sub>B</sub>: zona protegida contra queda direta da descarga atmosférica, mas onde a ameaça é o campo eletromagnético total da descarga. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente parcial da descarga. Zonas que possuem captosres que interceptam as descargas diretas.
- ZPR 1: zona interna onde a corrente de surto da descarga atmosférica é limitada e os campos eletromagnéticos podem ou não ser atenuados. A corrente pode ser atenuada devido a sua divisão através dos condutores que compõem o SPDA, adoção de interfaces isolantes e pelos DPS na fronteira da zona. O campo magnético pode ser reduzido com blindagens espaciais em forma de grade.
- ZPR 2, ..., n: zonas internas adicionais onde a corrente de surto da descarga atmosférica pode ser ainda mais limitada e os campos eletromagnéticos ainda mais atenuados em relação a zona de índice inferior. A corrente pode ser atenuada, por exemplo, pela divisão da corrente da descarga pelos condutores do SPDA, aplicação de interfaces isolantes e uso de DPS coordenados. O campo magnético pode ser reduzido com sucessivas blindagens espaciais em forma de grade.

As ZPR são implantadas com a instalação das medidas de proteção contra surtos que podem ser combinadas ou usadas separadamente, como por exemplo, SPDA externo e interno, condutor de blindagem, blindagem espacial e sistema coordenado de DPS. Os equipamentos no interior da estrutura devem ser compatíveis com a severidade do LEMP na zona de proteção.

A Figura 9 ilustra o uso de MPS combinadas através de blindagem espacial e um sistema coordenado de DPS. Essas medidas diminuem a ameaça de correntes e surtos conduzidos ( $U_2 \ll U_0$  e  $I_2 \ll I_0$ ) e campos magnéticos irradiados ( $H_2 \ll H_0$ ). Sucessivas blindagens espaciais em forma de grade e DPS coordenados podem reduzir o campo eletromagnético e os surtos a um nível tolerável. Quando for criada somente a ZPR 1, deve-se considerar ao menos um DPS no ponto em que a linha entra na zona de proteção.

Figura 9: Princípios gerais para a divisão de diferentes ZPR



Fonte: Adaptada da NBR 5419-4, 2015

### 2.3.2 Blindagem magnética

As blindagens espaciais atenuam os campos magnéticos decorrentes das descargas atmosféricas diretas ou próximas à estrutura e reduzem a intensidade dos surtos induzidos internamente. A blindagem espacial define zonas protegidas, que podem cobrir toda a estrutura, um cômodo ou apenas o gabinete do equipamento. Estas blindagens geralmente são em forma de grades metálicas e podem compreender os componentes naturais da própria estrutura.

### 2.3.3 Cabos blindados

Blindagem de linhas internas, utilizando cabos blindados ou dutos blindados, minimiza surtos induzidos internamente. A blindagem dos cabos inclui dutos metálicos fechados, cabos blindados e dutos de concreto armado. A blindagem pode se restringir ao cabeamento e equipamentos do sistema a ser protegido.

### 2.3.4 Roteamento de linhas

Roteamento de linhas internas pode minimizar os laços de indução e reduzir a criação de surtos de tensão dentro da estrutura. A área de indução do laço pode ser reduzida ao rotear os cabos junto aos componentes naturais da estrutura que foram aterrados e/ou por rotear as linhas elétricas de energia e sinal.

### ***2.3.5 Sistema coordenado de DPS***

Um sistema coordenado de DPS minimiza os efeitos de surtos originados internamente ou externamente. A proteção contra surtos nos sistemas internos necessita de uma abordagem sistemática consistindo na coordenação de DPS para as linhas de energia e sinal. Utilizando o conceito de zonas de proteção contra raios, com mais do que uma zona interna (ZPR 1, ZPR 2 e zonas adicionais), os DPS devem ser localizados no ponto em que a linha entra em cada ZPR. O uso de DPS adicionais podem ser necessários se a distância entre a localização do DPS e o equipamento a ser protegido for considerada longa.

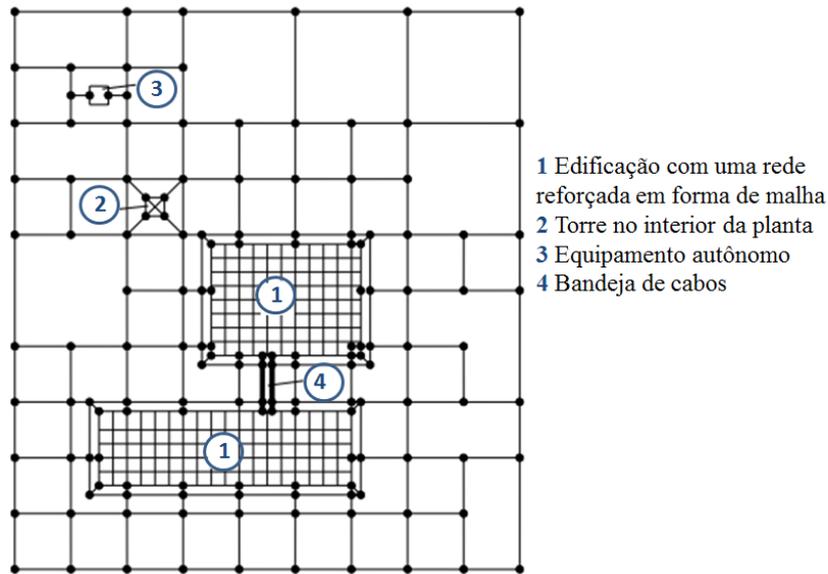
### ***2.3.6 Aterramento, equalização de potenciais e isolamento***

Este item trata do sistema de aterramento responsável por dispersar as correntes da descarga atmosférica no solo; da malha de equipotencialização que diminui as diferenças de potencial e ameniza o campo magnético e as interfaces isolantes que minimizam os efeitos de surtos em linhas que adentram à estrutura.

#### **2.3.6.1 Sistema de aterramento**

O aterramento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve ser interligado ao sistema de aterramento geral, constituindo uma malha de aterramento única. A malha de aterramento deve ser composta por um eletrodo em forma de anel ao redor da estrutura, aterrado a 0,5 metros de profundidade e afastado de 1 metro da edificação. Tanto o eletrodo em forma de anel quanto o eletrodo natural usado nas armaduras do concreto das fundações devem ser interligados. A parte 3 da NBR 5419 (NBR5419-3, 2015) sugere que o valor da resistência seja o menor possível, mas não recomenda nenhum valor como referência. Eventuais módulos internos podem ser considerados para minimizar tensões superficiais indesejáveis. A Figura 10 mostra o exemplo de uma malha com largura típica de 5 metros nas edificações.

Figura 10: Subsistema de aterramento em forma de malha de uma planta.

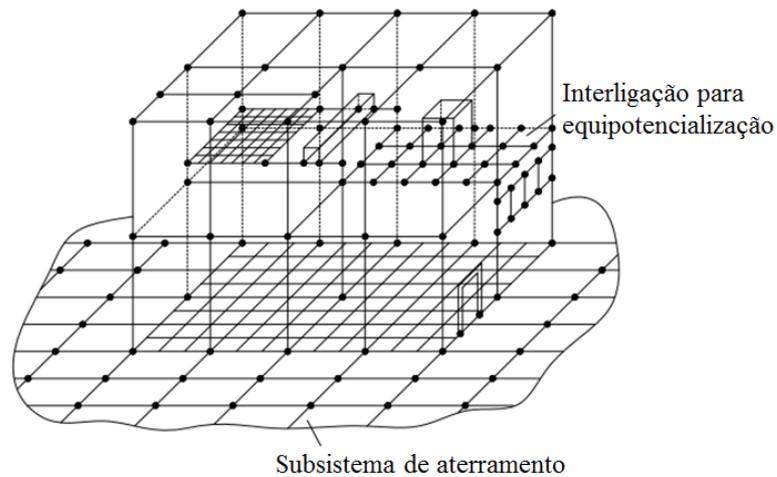


Fonte: Adaptado da NBR 5419-4, 2015

### 2.3.6.2 Ligação equipotencial

O aterramento e a equipotencialização são sistemas combinados, onde todos os condutores metálicos são interligados. Na Figura 11 é apresentada uma rede de equipotencialização interligada ao subsistema de aterramento.

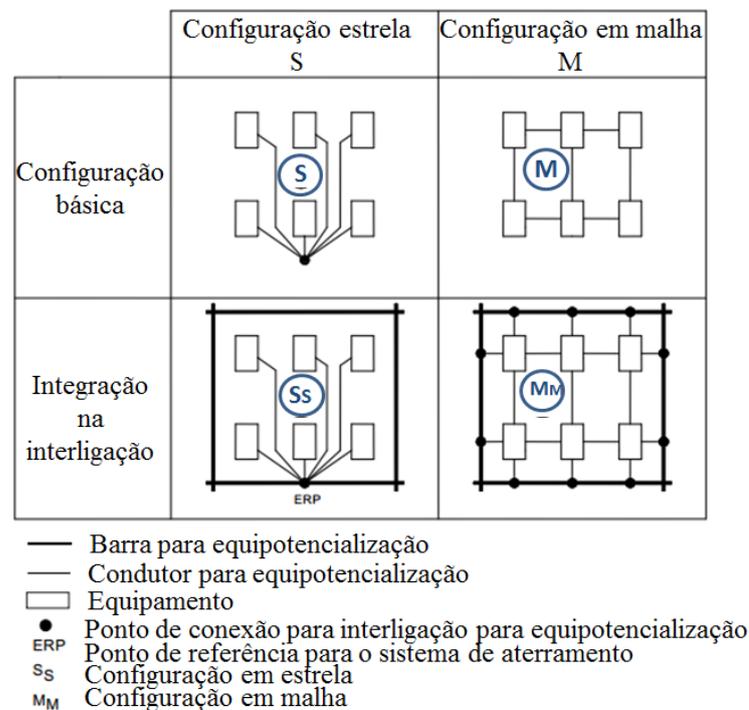
Figura 11: Sistema de aterramento tridimensional consistindo em uma rede de equipotencialização, interligada com o subsistema de aterramento



Fonte: NBR 5419-4, 2015

Uma ligação equipotencial de baixa impedância é necessária para minimizar diferenças de potencial entre todos os equipamentos e ainda reduzir os efeitos do campo magnético. Isto pode ser realizado por uma malha que interliga elementos condutores da estrutura, partes dos sistemas internos e pela ligação de partes metálicas condutoras no limite de cada ZPR, diretamente ou usando DPS adequados. Partes condutoras, como por exemplo, gabinetes, caixas, armários e o condutor de proteção (PE) devem ser conectados ao sistema de equipotencialização. A Figura 12 mostra a combinação de métodos de integração de partes condutivas de sistemas internos na interligação para equipotencialização.

Figura 12: Métodos de equipotencialização



Fonte: NBR 5419-4, 2015

Se a configuração “S” é usada, todos os componentes metálicos (por exemplo, gabinetes, caixas, armários) dos sistemas internos devem ser isolados do sistema de aterramento. A configuração “S” deve ser integrada ao sistema de aterramento apenas por uma única barra de equipotencialização atuando como ponto de referência do aterramento (ERP), resultando no tipo “SS”. Quando a configuração “S” é utilizada, todas as linhas entre os equipamentos individuais devem correr paralelamente entre si e próximas aos condutores de equipotencialização, conforme uma configuração em estrela para evitar laços de indução. A configuração “S” pode ser utilizada onde sistemas internos estão localizados em zonas relativamente pequenas e todas as linhas entram nesta zona no mesmo ponto.

Se a configuração “M” é utilizada, os componentes metálicos (por exemplo, gabinetes, caixas, armários) dos sistemas internos não serão isolados do sistema de aterramento, mas devem ser integrados em múltiplos pontos de equipotencialização, resultando em no tipo “MM”. A configuração “M” é preferida para sistemas internos estendidos sobre zonas relativamente amplas ou sobre uma estrutura inteira.

Barras de equipotencialização devem ser instaladas para redução de tensão entre:

- Todos os condutores de serviços que adentram uma ZPR (diretamente ou por meio de DPS adequados);
- O condutor de proteção PE;
- Componentes metálicos dos sistemas internos (por exemplo, gabinetes, invólucros, racks);
- A blindagem magnética da ZPR na periferia e dentro da estrutura.

#### 2.3.6.3 Interfaces isolantes

Interfaces isolantes podem ser usadas para reduzir os efeitos dos LEMP através das linhas que adentram à estrutura. A proteção das interfaces contra sobretensões, quando necessária, pode ser alcançada usando-se DPS. O aterramento e a equipotencialização devem sempre ser assegurados, particularmente a equipotencialização de todos os condutores de serviço diretamente ou por meio do uso de DPS, no ponto de entrada da estrutura.

## 2.4 Métodos matemáticos para modelagem computacional

Este item expõe brevemente as técnicas numéricas Matriz de linha de transmissão (TLM) e Elementos Finitos (FEM) utilizadas, respectivamente, nos softwares CST® Studio Suite e ANSYS® Electromagnetics suites.

### 2.4.1 Matriz de linha de transmissão (TLM)

Conforme Sadiku (2000) a modelagem de linha de transmissão (TLM), também conhecida como método da matriz de linha de transmissão, é uma técnica numérica para resolver problemas de campo usando parâmetros de circuito elétrico equivalentes. Baseia-se na equivalência entre as equações de Maxwell e as equações para tensões e correntes em uma

malha de linhas contínuas de transmissão de dois condutores. A principal característica desse método é a simplicidade de formulação e programação para uma ampla gama de aplicações. Como outras técnicas numéricas, o método TLM é um processo de discretização. Ao contrário de outros métodos, como diferenças finitas e métodos de elementos finitos, que são abordagens de discretização matemática, o TLM é uma abordagem de discretização física. No TLM, a discretização de um campo envolve a substituição de um sistema contínuo por uma rede ou matriz de elementos agrupados. O método TLM envolve a divisão da região de solução em uma malha retangular de linhas de transmissão. As junções são formadas onde as linhas se cruzam formando descontinuidades de impedância. Uma comparação entre as equações da linha de transmissão e as equações de Maxwell permite que as equivalências sejam identificadas entre tensões e correntes nas linhas e campos eletromagnéticos na região de solução. Assim, o método TLM envolve duas etapas básicas:

- Substituir o problema de campo pela rede equivalente e derivar a analogia entre as componentes do campo e os elementos da rede;
- Resolver a rede equivalente por métodos iterativos.

#### ***2.4.2 Método dos Elementos finitos (FEM)***

De acordo com Sadiku (2000), o método dos elementos finitos (FEM) teve sua origem no campo da análise estrutural. Posteriormente, o método tem sido empregado em diversas áreas, como problemas de guia de onda, máquinas elétricas, dispositivos semicondutores, antenas, entre outros. O método de elementos finitos (FEM) é uma técnica numérica poderosa e versátil para lidar com problemas que envolvem geometrias complexas e meios não homogêneos. A generalidade sistemática do método possibilita a construção de programas computacionais que resolvem uma ampla gama de problemas. Consequentemente, os programas desenvolvidos para uma determinada área podem ser aplicados para resolver problemas em um campo diferente com pouca ou nenhuma modificação. A análise de elementos finitos de qualquer problema envolve basicamente quatro etapas:

- Discretizar a região solução em um número finito de sub-regiões ou elementos denominados elementos finitos;
- Derivar as equações que governam os elementos;
- Montar a contribuição de todos os elementos na região solução; e
- Resolver o sistema de equações obtidas.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta uma síntese dos trabalhos científicos relacionados à análise das tensões e campos magnéticos induzidos internamente nas estruturas devido as correntes das descargas atmosféricas que fluem pelo SPDA.

Uma análise numérica dos campos magnéticos e redução das tensões induzidas em laços internos à estrutura devido a uma descarga atmosférica direta é apresentada por Metwally, Heidler e Zischank (2006). Os cálculos eletromagnéticos foram realizados por um código de computador chamado “CONCEPT” desenvolvido na Universidade Técnica de Hamburg nos últimos 20 anos e escrito em Fortran 77. O programa resolve as equações de Maxwell usando o método dos momentos (MoM) combinado com o método matriz de linha de transmissão (TLM). Três SPDAs foram simulados, sendo eles: modelo em escala reduzida com condutores de retorno (RSRC); modelo em escala reduzida com o canal de descarga (RSLC); e modelo em tamanho real com o canal de descarga (FS). O modelo RSRC foi construído fisicamente e os resultados experimentais foram confrontados com os simulados. O fator de escala do modelo reduzido foi baseado na teoria da similaridade (FRENTZEL,1997) e testado apenas para uma geometria de SPDA externo com condutores de descida espaçados 9 metros entre si (na parte da frente e de trás) e 12 metros entre si na lateral. O modelo não possui malhas que constituem uma blindagem espacial (distâncias inferiores a 5 metros). Os resultados de tensão induzida e campo magnético nos modelos FS e RSLC apresentaram boa concordância, enquanto o RSRC apresentou valores dobrados em relação aos demais modelos. Metwally, Heidler e Zischank (2006) relatam que o efeito causado por reflexões sucessivas nos condutores de retorno devido ao íngreme tempo de subida da corrente injetada gera um "efeito de duplicação", o que justifica o valor da tensão induzida duas vezes maior.

Um método eficaz para implementar blindagens eletromagnéticas em edificações é usar componentes estruturais metálicos existentes, como o reforço do concreto armado da estrutura. Geralmente é a medida mais econômica para garantir a necessária proteção dos sistemas elétricos e eletrônicos contra o impulso eletromagnético do raio. Zischank e outros (2004) realizam experimentos em um edifício em escala 1:6 com dupla camada de reforço do concreto armado e os resultados foram extrapolados utilizando a teoria das relações de similaridade; posteriormente Kern e outros (2007) comparam os resultados dos experimentos com cálculos estimados baseados nas fórmulas fornecidas na IEC 62305-4 (2010). A base dos cálculos da IEC 62305-4 consiste em apenas uma camada de reforço para blindagem espacial, por isso os cálculos foram ajustados por um fator de redução que leva em conta a dupla camada de reforço.

A comparação inclui valores de pico do campo magnético, sua derivada e tensões induzidas em rotas típicas de cabos. A comparação foi feita em alguns pontos de teste no interior da estrutura e mostrou que os valores de pico medido do campo magnético e de suas derivadas são menores do que o calculado.

Metwally e Heidler (2008) apresentam uma análise numérica da redução dos campos magnéticos e tensões induzidas por raios em uma blindagem espacial de dupla camada comparado à blindagem de camada única. Os cálculos são realizados com o código computador CONCEPT citado anteriormente. A blindagem espacial é atingida por raio direto em três pontos do telhado (canto, centro e lateral). As correntes que fluem através de alguns condutores da blindagem, o campo magnético, a derivada do campo magnético e a tensão que aparece em condutores de instalações típicas são computados. A descarga atmosférica no centro da estrutura resultou em maiores tensões induzidas para os três componentes do raio (impulso positivo, primeiro negativo e negativo subsequente). A redução de campos magnéticos e tensões induzidas por raios dentro da blindagem de camada dupla é comparada em duas configurações. Na primeira configuração, as blindagens interior e exterior são interligadas apenas nos quatro cantos do telhado, enquanto na segunda configuração, as duas camadas são adicionalmente interligadas em um passo de 0,5 m, onde observou-se nesse caso algumas melhorias comparada à anterior. Em comparação à blindagem de camada única, a utilização de uma segunda camada interior proporciona uma melhoria significativa de redução de tensões e campos magnéticos induzidos por raios diretos.

A contribuição da corrente da descarga atmosférica para os campos magnéticos induzidos em cada parte das estruturas metálicas que compõem o SPDA é apresentada por Miyazaki e Ishii (2008). São discutidos mecanismos para que o SPDA contribua com uma maior redução dos campos magnéticos induzidos no interior da mesma. As correntes nos condutores de descida e os campos magnéticos no interior do edifício são calculados no domínio da frequência com a ajuda de um código numérico (NEC-4) baseado no método dos momentos (MoM). Os resultados demonstraram que os condutores horizontais da malha de um edifício, recomendado na norma IEC 62305-4, dificilmente contribuem para a redução dos campos magnéticos induzidos no seu interior. Miyazaki e Ishii propõem cobrir a parte superior do edifício por uma malha para reduzir a derivada do campo magnético induzido. Nessa condição, tem-se uma distribuição de corrente uniforme nas colunas verticais que reforça o cancelamento do campo magnético induzido. Os autores reportam que o cancelamento foi mais eficaz com um maior número de condutores verticais, pois o espaçamento entre os condutores é menor.

As sobretensões induzidas nas terminações das instalações de baixa tensão onde os equipamentos elétricos estão normalmente localizados são estudadas por Metwally e Heidler (2007). Três laços verticais paralelos monofásicos, constituídos de três fios horizontais (fase-L, neutro-N e proteção-PE) são simulados. Os dispositivos eletrônicos estão interligados uns aos outros por várias linhas de serviços, incluindo cabos de TI. Essas interconexões geralmente envolvem o acúmulo de conexões extras de cabos PE. Duas configurações para interligações do cabo PE são consideradas. As tensões entre a fase e o neutro ( $V_{L-N}$ ), neutro e proteção ( $V_{N-PE}$ ) e fase e proteção ( $V_{L-PE}$ ) são calculadas sob diferentes condições de carga (resistiva, indutiva e capacitiva). Metwally e Heidler mostraram que as conexões extras do cabo PE à terra aumentam significativamente as tensões  $V_{N-PE}$ ; esse efeito é atribuído à indução dos laços construídos por essas conexões. A redução da largura da malha do SPDA melhorou o desempenho de blindagem, sendo uma medida para amortecer as tensões induzidas por descargas atmosféricas, com pouca dependência da localização que a descarga atmosférica intercepta o SPDA e sem qualquer efeito apreciável do material que foi utilizado para a construção do SPDA. Se o circuito de entrada do equipamento representar uma carga capacitiva, o efeito de ressonância pode melhorar ainda as sobretensões.

Os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) são largamente utilizados nos sistemas de energia de baixa tensão com o intuito de amortecer os possíveis transitórios de sobretensões que podem ocorrer nos terminais dos equipamentos elétricos e eletrônicos. Ishii, Miyabe e Tatematsu (2012) avaliam as tensões induzidas e as correntes de raios que fluem em fiações elétricas com e sem DPS. Foi simulada uma estrutura de 5 pavimentos, com 20 m de altura e 10 m x 10 m em planta, atingida diretamente por uma descarga atmosférica no canto da estrutura. Foram comparadas as tensões induzidas nos 5 andares utilizando NEC-4 e FDTD. Os resultados numéricos concordaram bem, porém os resultados pelo método FDTD foram mais estáveis e foram validados para os cálculos. Miyabe e Tatematsu (2012) concluíram que as tensões induzidas nos andares superiores e inferiores são maiores que em andares intermediários. Portanto, pode-se utilizar DPS classe I para os andares superiores e inferiores e classe II para os pisos intermediários. Caso o comprimento do circuito entre o DPS e o equipamento seja eletricamente longo, pode haver uma sobretensão que exceda o nível de tensão de proteção efetiva do DPS, devido ao efeito de reflexão.

Em caso de queda direta de descargas atmosféricas, centelhamentos perigosos podem ser evitados por ligações equipotenciais. Neste caso, uma parte da corrente da descarga flui nas linhas elétricas dentro dos edifícios. Heidler e Camara (2017) avaliam a máxima parcela da corrente da descarga atmosférica que flui nas instalações elétricas dentro de edifícios. O DPS

deve suportar essa parcela de corrente caracterizada por sua amplitude, carga, energia específica e a taxa de subida máxima. Os resultados dos autores mostraram que a taxa de subida máxima da corrente não depende do material do SPDA externo, porque a distribuição de corrente durante o tempo de subida é determinada pelos acoplamentos indutivo e capacitivo e não pelo comportamento resistivo da estrutura. Para os outros parâmetros (amplitude, carga e energia específica), há uma tendência geral para valores mais altos com o aumento da resistividade do material para o SPDA externo.

Dias e outros (2016) investigam a máxima tensão de impulso que pode ocorrer nos terminais dos equipamentos em uma edificação de três andares. Foi modelado um circuito TN-S monofásico alimentando cargas em circuito aberto (alta impedância) em diferentes rotas da edificação. As simulações foram feitas nos softwares comerciais ANSYS HFSS® e PSpice®. Para tempo de subida da descarga atmosférica igual a  $0,01\mu\text{s}$ , a tensão nos terminais do equipamento chegou a três vezes a tensão de proteção efetiva do DPS. O tempo de subida mais rápido assumido pela IEC-62305-4 (2010) para um surto típico de descarga atmosférica é de  $0,25\mu\text{s}$  (descargas subsequentes). Visto que o surto diferencial simulado, para tempos de subida superiores a  $0,25\mu\text{s}$ , não ultrapassa a 2 vezes a tensão de proteção efetiva do DPS em nenhuma das duas simulações realizadas, Dias e outros consideraram que a abordagem da norma IEC-62305-4, para fins de dimensionamento do DPS, contra transitórios advindos de descargas atmosféricas, está adequada.

Barbosa e Paulino (2016) determinam uma expressão para cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas em pequenos *loops* considerando o efeito da velocidade da descarga atmosférica no canal de retorno. Já Paulino, Assunção e Barbosa (2015) analisam as tensões induzidas pela descarga atmosférica em grandes laços, considerando a propagação das tensões dispersas ao longo do *loop*. O efeito dos atrasos de propagação e correntes de deslocamento para o cálculo de correntes e tensões induzidas em *loop* é apresentado por Panicali e Barbosa (2011). Em todos os casos, as análises foram realizadas considerando o *loop* próximo de apenas um condutor de descida para a injeção do sinal que representa a descarga atmosférica. As expressões analíticas quase-estática e também algumas simplificações, como por exemplo, considerar a corrente da descarga atmosférica diferente de um sinal impulsivo e se basear apenas nos campos magnéticos, podem levar a erros nos cálculos das tensões induzidas (PAULINO, 2016). Para proteção de edificações, são utilizados vários condutores de descida para conduzir a corrente da descarga atmosférica à terra, geralmente são consideradas malhas de blindagem.

Não foram encontrados na literatura trabalhos que modelem a tensão induzida devido a campos induzidos por diversos condutores em malha. A complexidade do problema se deve às diversas indutâncias próprias e mútuas entre os condutores que compõem a malha e também às indutâncias mútuas entre esses condutores e o *loop*. As blindagens dos campos magnéticos em forma de impulsos também são difíceis de se modelar; os trabalhos consideram ondas senoidais para os campos eletromagnéticos. Em vista disso, a utilização de programas que implementem técnicas numéricas com equações de campo completas são ferramentas apropriadas para análise da tensão induzida em *loops* no interior de estruturas atingidas por descarga atmosférica.

## 4 MODELO COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL

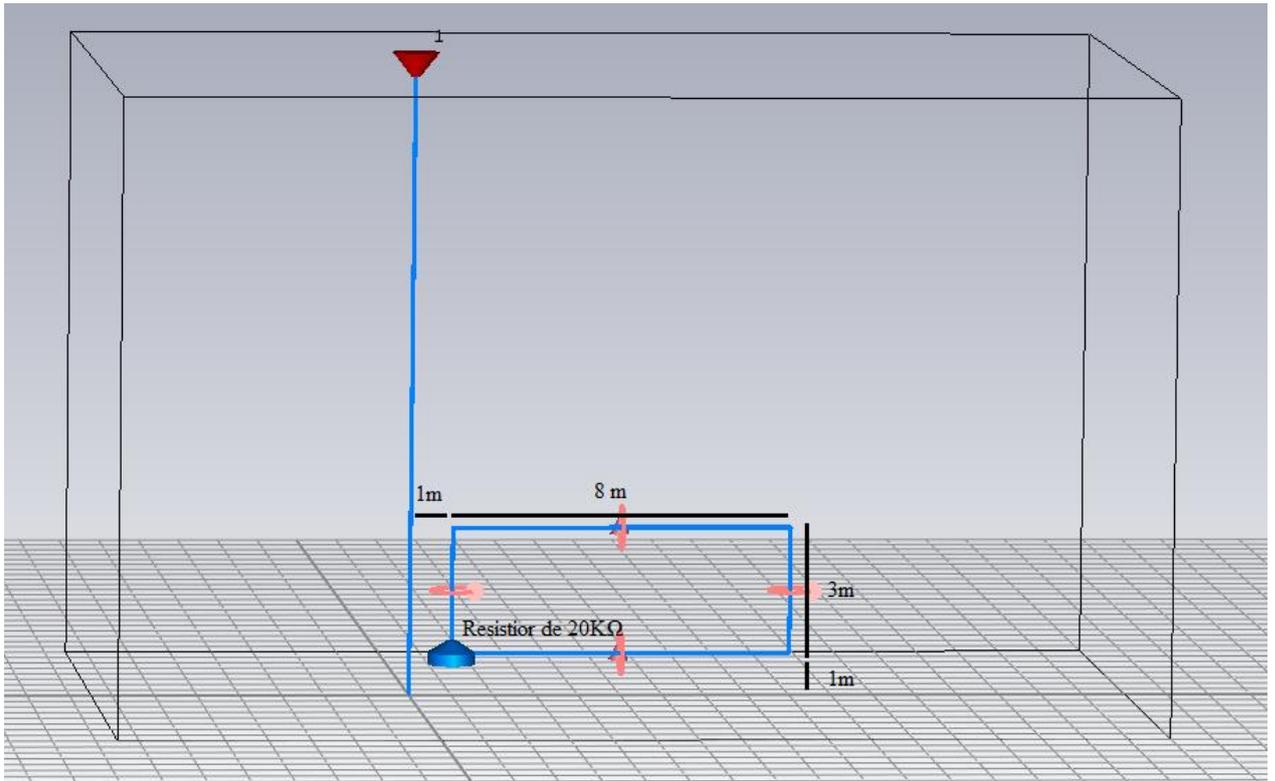
Para se efetuar o estudo e a análise da distribuição dos campos magnéticos e tensões induzidas em estruturas diretamente atingidas por descargas atmosféricas é necessário definir o modelo de estrutura a ser implementado nas simulações computacionais. Portanto, foram considerados como referência o modelo experimental da estrutura em escala reduzida utilizado por Dias e outros (2017). As estruturas foram simuladas nos softwares comerciais CST® Studio Suite e ANSYS® Electromagnetics suítes e todas as grandezas físicas relevantes foram escalonadas de acordo com as leis da teoria da similaridade (FRENTZEL, 1997).

Neste capítulo são apresentados o ajuste do fator de escala, a validação dos resultados computacionais, a montagem do set de prova experimental, a descrição das medições realizadas, a implementação dos modelos computacionais e as dificuldades encontradas no desenvolvimento dos modelos.

### 4.1 Validação das simulações computacionais

A implementação dos modelos nos softwares comerciais requer o conhecimento da ferramenta, das técnicas numéricas utilizadas e de como estabelecer os parâmetros corretos para cada aplicação, como por exemplo, condições de fronteira, tamanho da malha, sinal de excitação, tipo de *solver*, capacidade computacional requerida, dentre outros. Para validar os resultados simulados, utilizou-se o modelo proposto por Panicali e Barbosa (2011), conforme ilustra a Figura 13, e cálculos com equações quase estáticas. A linha vertical é um condutor de descida de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e este condutor transporta parte da corrente da descarga. O sinal injetado está representado na Figura 14 onde se tem uma corrente impulsiva com amplitude de 50 kA, tempo de subida  $T_1=0,25\mu\text{s}$  e tempo de descida  $T_2=100\mu\text{s}$ . O *loop* possui 8 m de comprimento, 3 m de largura e 0,001 m de raio e está afastado 1 metro do condutor de descida. No plano terra foi estabelecida a condição de fronteira elétrica, no limite superior condição de fronteira aberta e nas laterais condição de fronteira aberta com espaço adicional. O *loop* é de material PEC (condutor elétrico perfeito) e está 1 m acima do plano condutor perfeito. O canal de descarga possui 15 metros, de material PEC com 0,001 m de raio e está acoplado a uma porta discreta.

Figura 13: Modelo simplificado



Fonte: Elaborado pela autora no CST®

Desprezando-se a resistência dos condutores do *loop* e assumindo-se que as dimensões do *loop* são muito menores do que o comprimento da frente da onda da descarga atmosférica, a corrente induzida no *loop* será dada por (1):

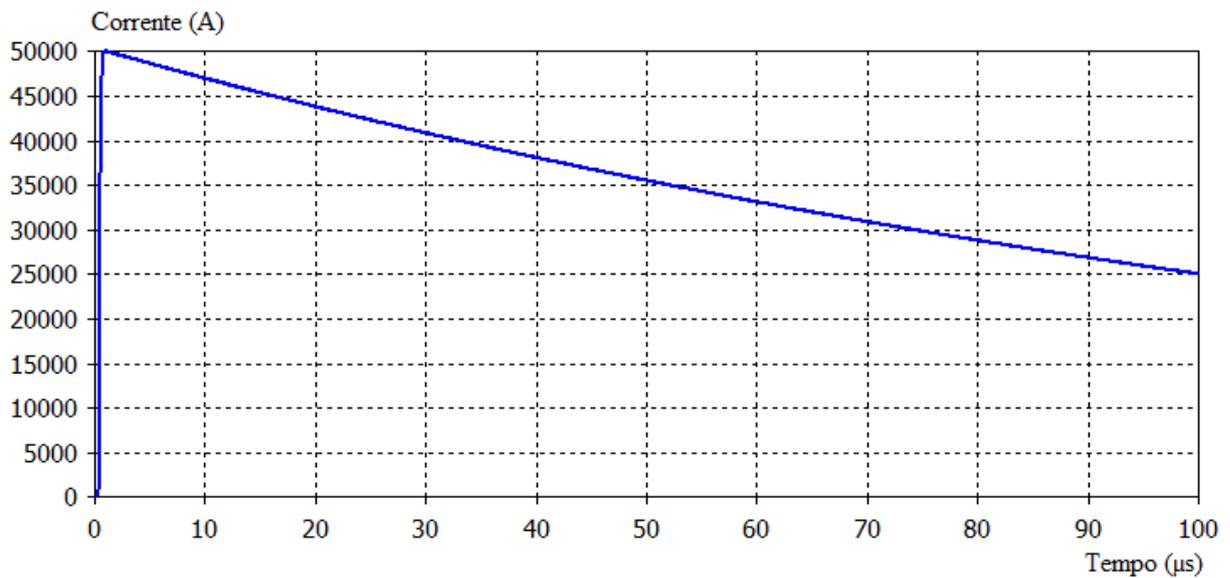
$$I_{Loop} = I \frac{L_m}{L_s} \quad (1)$$

Onde  $I$  é a corrente injetada;  $L_m$  é a indutância mútua entre o condutor de descida e o *loop*; e  $L_s$  é a indutância própria do *loop*. A equação (1) é baseada na hipótese de que a indução magnética é a única causa das correntes de *loop*, não sendo considerados os atrasos de propagação ou as correntes de deslocamento (PANICALI; BARBOSA, 2011). Nessas condições, a indutância mútua em ( $\mu\text{H}$ ) pelo cálculo da integral do fluxo magnético no *loop* é dada em (2).

$$L_m = 0,2 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{d+l}{d}\right) \quad (2)$$

Onde  $h$  e  $l$  são a altura e o comprimento do *loop*, respectivamente, e  $d$  é a distância entre o *loop* e o condutor de descida

Figura 14: Sinal injetado



Fonte: Elaborado pela autora no CST®

A indutância própria do *loop* em ( $\mu\text{H}$ ) de acordo com a NBR5419-4 (2015) é dada em (3).

$$L_s = 0,8 \cdot \sqrt{l^2 + h^2} - 0,8 \cdot (l+h) + 0,4 \cdot l \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{\beta}\right) + 0,4 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{\beta}\right) \quad (3)$$

Onde  $\beta$  é calculado conforme (4), sendo  $r$  o raio do condutor.

$$\beta = r \left(1 + \sqrt{(l/h)^2}\right) \quad (4)$$

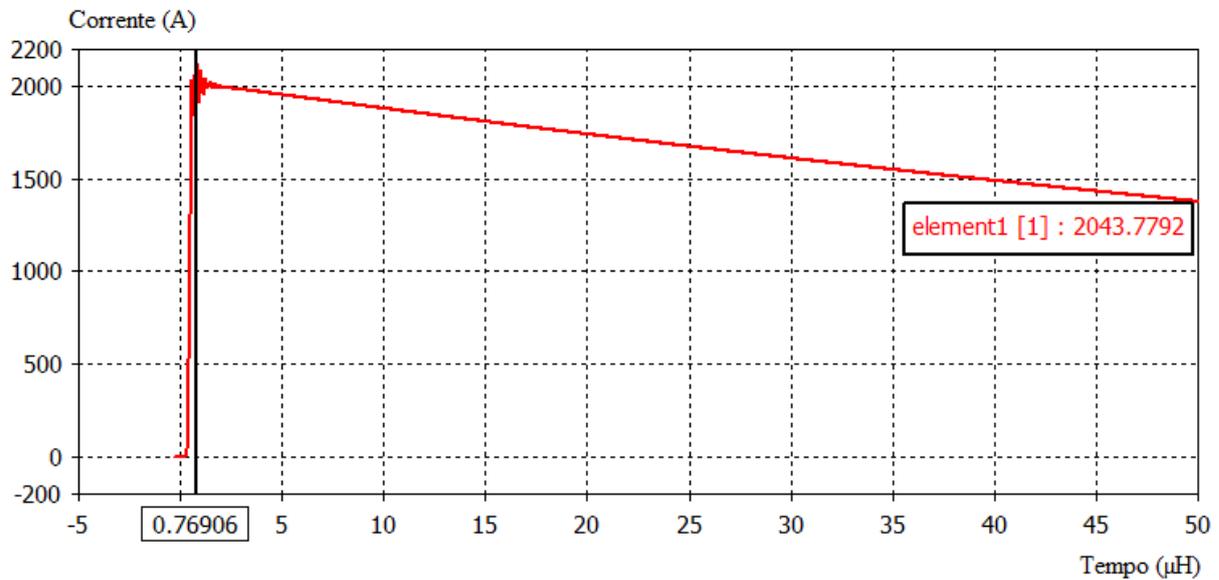
Nas condições do modelo que possui  $h = 3$  m,  $l = 8$  m,  $r = 1$  mm e  $d = 1$  m, a indutância mútua é  $L_m = 1,32$   $\mu\text{H}$ , a indutância própria é  $L_s = 31,6$   $\mu\text{H}$  e a corrente no *loop*  $I_{loop} = 2,09$  kA. A corrente no *loop* tem a mesma forma de onda da corrente da descarga, mas com 4,18% de sua amplitude.

Para avaliar os limites de validade da abordagem analítica, a corrente no circuito foi calculada por Panicali e Barbosa (2011) utilizando um código de computador baseado no Método dos Momentos (MoM). Os resultados dos autores mostraram que quando o *loop* está flutuando em relação ao plano terra a corrente é quase uniforme ao longo dos condutores que compõem o *loop*. E que quando o *loop* está conectado ao plano terra, a distribuição de corrente nos condutores do *loop* não é mais uniforme, com correntes mais altas fluindo em alguns segmentos do *loop*. No entanto, a corrente média no *loop* é muito próxima do valor obtido a partir da abordagem analítica. A não uniformidade na distribuição de corrente para o *loop* em relação ao terra pode ser explicada pelo fluxo de corrente de deslocamento entre o *loop*, o plano terra e o condutor de descida. Essas correntes aumentam a corrente induzida indutivamente em alguns segmentos do *loop* e subtraem em outros, de modo que a corrente média no *loop* não

muda. No entanto, algumas seções do *loop* podem ter correntes significativamente mais altas do que as previstas pela abordagem analítica simplificada.

O resultado no CST® está apresentado na Figura 15. A corrente induzida no *loop* quando um resistor de  $20\mu\Omega$  é adicionado em uma de suas extremidades é 4,08% do valor da corrente de descarga injetada, o que está em boa concordância com o valor calculado pela abordagem analítica de 4,18%.

Figura 15: Corrente Induzida no Loop



Fonte: Elaborado pela autora no CST®

Em muitas situações práticas, o *loop* está em circuito aberto em um ponto, como por exemplo, terminais de um equipamento ou isolamento. Tensões induzidas podem surgir nesses terminais devido ao campo eletromagnético que atravessa a área do *loop*. Para cálculo de tensão induzida, um resistor de  $20k\Omega$  foi adicionado e o raio do condutor foi ampliado para  $r = 0,2$  m a fim de representar, por exemplo, uma plataforma de cabos que une os compartimentos dos equipamentos. Para o modelo analítico, a tensão induzida  $V_i$  no *loop* da Figura 13 é dado por (5).

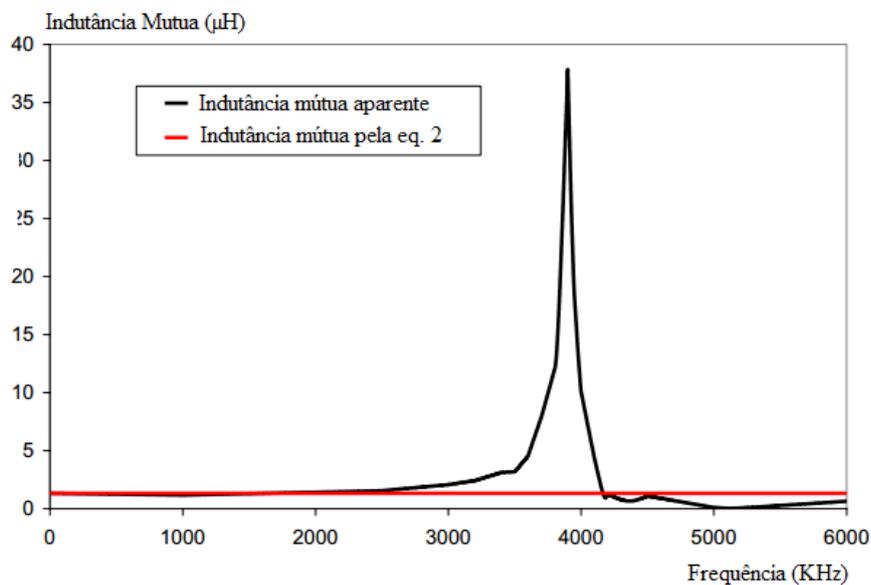
$$V_i = L_m \cdot \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

Panicali e Barbosa (2011) apresentam uma analogia da equação (5) com cálculos usando o MoM, onde uma indutância mútua aparente ( $L_{ap}$ ) é definida como a relação entre a tensão calculada em todo o resistor ( $V_{MoM}$ ) e a frequência angular ( $\omega$ ) da corrente de excitação, conforme (6).

$$V_{MoM}(w) = I(w) \cdot L_{ap} \cdot w \quad (6)$$

No regime quase estacionário a indutância aparente  $L_{ap}$  é igual à indutância mútua  $L_m$ , pois são negligenciados as correntes de deslocamento e os atrasos de propagação. Este é o caso quando a corrente de excitação tem uma frequência relativamente baixa, isto é, quando o *loop* é eletricamente curto. Para frequências mais elevadas, a indutância aparente mútua afasta-se do seu valor quase estacionário, como mostra a Figura 16.

Figura 16: Indutância mútua e indutância mútua aparente



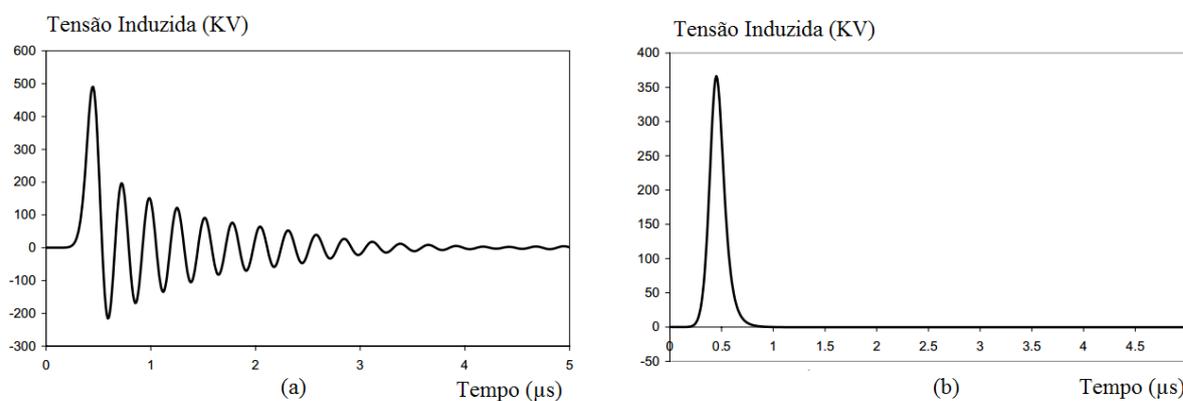
Fonte: Panicale e Barbosa (2011)

Acima de 2 MHz, a indutância mútua aparente aumenta bruscamente e atinge um valor máximo de  $38\mu\text{H}$  em aproximadamente 3,75 MHz. Esse valor máximo é cerca de 29 vezes maior do que o valor de baixa frequência dado pela equação (2). Esse comportamento pode ser explicado se for considerada a existência de um resistor de alto valor adicionado na abertura do *loop*; aparentemente uma antena monopolo é formada acima do plano terra (PANICALE; BARBOSA, 2011). Esta antena tem 20 m de comprimento, o que proporciona uma frequência de ressonância de 3,75 MHz. A indutância mútua aparente entre um circuito aberto e um condutor da descarga atmosférica varia com a frequência e pode alcançar alguns picos bem acima do valor considerado no regime quase estacionário.

Para o cálculo da tensão induzida, a descarga negativa subsequente será considerada devido ao sinal ter grande conteúdo de alta frequência. A corrente subsequente tem  $T_1=0,25\mu\text{s}$ ,  $T_2=100\mu\text{s}$  e será mantido o valor de pico de 50kA, que fornece uma  $di/dt$  média igual a 200

kA/ $\mu$ s. Panicale e Barbosa (2011) apresentam a tensão induzida para o modelo da Figura 13, utilizando o MoM. O resultado é mostrado na Figura 17(a), onde se vê que a tensão atinge um valor máximo igual a 490 kV e desaparece em um padrão oscilatório. A frequência das oscilações é de cerca de 3,75 MHz, o que corresponde à frequência natural da antena monopolo. Para fins de comparação, o mesmo cálculo foi realizado negligenciando-se as correntes de deslocamento e os atrasos de propagação, isto é, usando o valor constante para a indutância mútua, conforme por (2). O resultado é mostrado na Figura 17(b), onde pode ser visto um impulso menor sem oscilações. O seu valor de pico é de 368 kV e corresponde ao instante em que a corrente de indução tem seu  $di/dt$  máximo. A razão entre o valor de pico da Figura 17 (a) e (b) é 1,33, o que significa que as correntes de deslocamento e os atrasos de propagação levaram a um aumento de um terço no valor de pico da tensão induzida. Esse valor está relacionado às condições consideradas no caso em estudo (corrente da descarga, dimensões do *loop* e distância entre o condutor do raio e o *loop*).

Figura 17: Tensão induzida no *loop* pelo MoM (a) Considerando as correntes de deslocamento e atrasos de propagação (b) Sem considerar as correntes de deslocamento e atrasos de propagação.

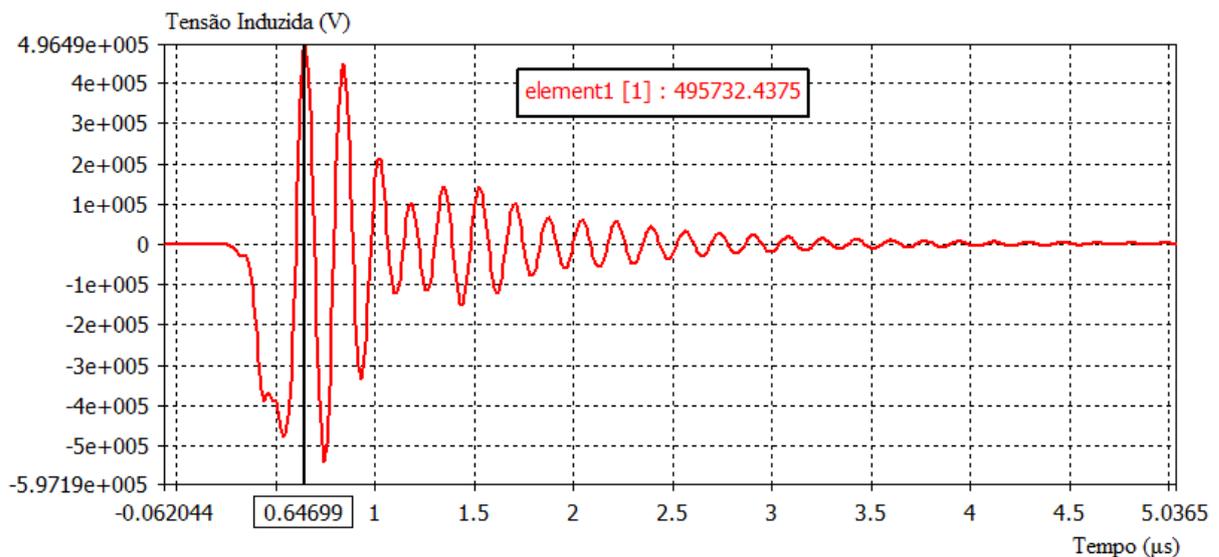


Fonte: Panicale e Barbosa (2011)

É interessante notar que o valor de pico na Figura 17(b), 368 kV, é maior do que o valor de pico obtido em (2), 264 kV, se a média  $di/dt = 200$  kA /  $\mu$ s for considerada. Isso se deve ao fato de que o  $di/dt$  máximo do pulso subsequente é 279 kA /  $\mu$ s, que é maior do que seu valor médio. Portanto, se 264 kV da média  $di/dt$  for considerado como tensão induzida por referência, uma abordagem quase estacionária usando  $di/dt$  máximo fornece um valor 39% acima da referência e a consideração das correntes de deslocamento e atrasos de propagação fornece um valor 86% acima da referência para o caso em estudo.

A Figura 18 apresenta o resultado da tensão induzida obtida pelo software CST®, utilizando TLM e *solver* no domínio do tempo. Considerando os efeitos de correntes de descolamento e atraso de propagação, o resultado oscilatório com amplitude de 495 kV está em bom acordo, com aumento de 86% acima do calculado em (2). Conclui-se, que o valor da tensão induzida baseado apenas nas equações quase estáticas pode levar a erros devido às simplificações das fórmulas. Portanto, a utilização de programas de cálculos de campo que trabalham com equações de campo completas representa uma ferramenta adequada para a análise do comportamento de tensão induzidas por descargas atmosféricas. Pela similaridade do resultado entre as Figuras 17(a) e 18, considera-se que o modelo foi implementado corretamente e está validado para gerar novas análises.

Figura 18: Tensão induzida no *loop*



Fonte: Elaborado pela autora no CST®

## 4.2 Fator de escala

Para implementar o modelo de uma estrutura em escala reduzida todas as quantidades físicas relevantes devem ser escalonadas. A teoria das relações de similaridade permite estabelecer fatores de escala a partir de equações diferenciais que descrevem um processo físico sem a necessidade de resolver essas equações. Uma descrição detalhada da derivação das leis de escala é apresentada por Frenzel (1997) e exemplos de sua aplicação em estruturas atingidas pelas descargas diretas é realizada no artigo de Metwally, Heidler e Zischank (2006).

Inicialmente, é necessário definir o fator de escala geométrico, que foi determinado como  $k_g=1:40$ , devido ao tamanho do laboratório disponível para desenvolver o protótipo experimental reduzido e também para definição das correntes de descarga com parâmetros normativos. As dimensões do modelo em escala foram limitados a 0,50 m x 0,50 m x 0,60 m. Com o fator de escala  $k_g=1:40$  tem-se a representação de um prédio industrial com base de 20 m x 20 m e altura 24 m, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Fatores de escala para a edificação

Fator de escala	C x L x A (m)
1:1 (Real)	20 x 20 x 24
1:40 (Reduzida)	0,5 x 0,5 x 0,6

Fonte: Elaborado pela autora

Considerando a condição de que a permeabilidade magnética e a constante dielétrica do modelo reduzido e da estrutura real sejam as mesmas, a relação do fator de escala para o tempo ( $k_t$ ), a corrente ( $k_I$ ), o campo magnético ( $k_H$ ), a derivada do campo magnético ( $k_{dH/dt}$ ) e tensão ( $k_V$ ), entre uma quantidade física do modelo e a mesma quantidade em uma estrutura real é dada na Tabela 6.

Tabela 6: Fatores de escala para as diversas quantidades físicas

Quantidade física	Fator de escala
Tempo	$k_t = k_g = 1:40$
Corrente	$k_I = k_g = 1:40$
Campo magnético	$k_H = k_I/k_t = 1$
Derivada do campo magnético	$k_{dH/dt} = k_I/k_g k_t = k_I/k_g^2 = 40:1$
Tensão	$k_V = k_g = 1:40$

Fonte: Adaptada de Frentzel (1997)

Para a corrente da descarga atmosférica, foi escolhido o primeiro impulso positivo com amplitude de  $I = 200$  kA, tempo de subida  $T_1 = 10\mu s$  e tempo de meia onda  $T_2 = 350\mu s$ . Para o modelo reduzido foi aplicado o fator de escala e os valores são dados na Tabela 7. O sinal de corrente alcançado no modelo experimental reduzido possui tempo de subida  $T_1 = 0,25\mu s$  e corrente de pico de 8A. Como o tempo de subida é o mesmo do modelo simulado e o valor de pico da corrente é diretamente proporcional aos valores de tensões induzidas, os resultados podem ser facilmente extrapolados.

Tabela 7: Fatores de escala para a corrente da descarga atmosférica

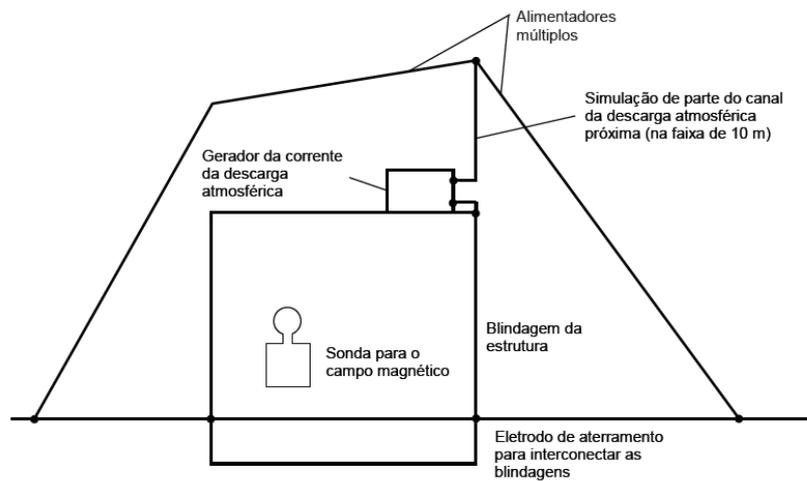
<b>Fator de escala</b>	<b>I (kA)</b>	<b>t<sub>1</sub> (μs)</b>	<b>t<sub>2</sub> (μs)</b>
1:1	200	10	350
1:40	5	0,25	8,75
Experimental	0,008	0,25	-

Fonte: Elaborado pela autora

### 4.3 Modelo experimental escala reduzida - Caso 1

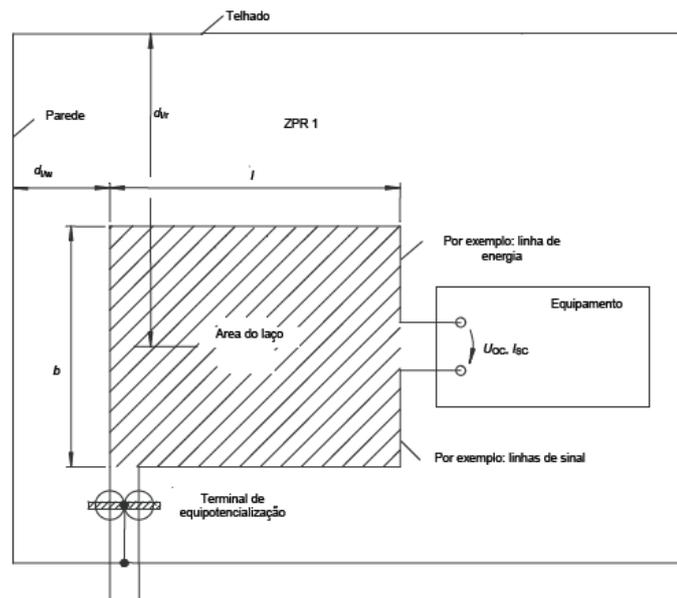
O modelo escalado apresentado por Dias e outros (2017) seguiu as orientações da NBR 5419-4 (2015) para avaliação experimental do campo magnético desenvolvido no volume interno de uma estrutura devido a uma descarga atmosférica direta (S1). Neste processo um gerador de corrente impulsiva com baixa amplitude e com forma de onda típica de descarga foi conectado ao SPDA, conforme arranjo apresentado na Figura 19. Segundo a referida norma, as tensões impulsivas que atingem os equipamentos internos são avaliadas considerando as características do campo magnético indutor interno produzido pela corrente da descarga que passa pelos condutores do SPDA, o tempo de frente da onda da corrente da descarga atmosférica e as dimensões equivalentes do laço retangular formado pelas redes elétricas e eletrônicas que se interligam ao equipamento, conforme arranjo da Figura 20.

Figura 19: Arranjo para ensaio do SPDA com a injeção de corrente impulsiva gerada por gerador de impulso



Fonte: NBR 5419-4 (2015)

Figura 20: Arranjo do laço para fins de avaliação da tensão induzida



Fonte: NBR 5419-4 (2015)

O protótipo da estrutura foi construído em madeira e utilizou-se fios de cobsres nu com seção de  $2,5 \text{ mm}^2$  para representar os condutores do SPDA. Para o plano terra foi utilizada uma placa de circuito impresso com dimensões de  $1,1 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$ . A Figura 21 apresenta fotos do modelo construído. Foram utilizados três tipos de arranjos de SPDA para a estrutura, conforme Figura 22, alterando a quantidade de condutores de descida e de anéis condutores horizontais.

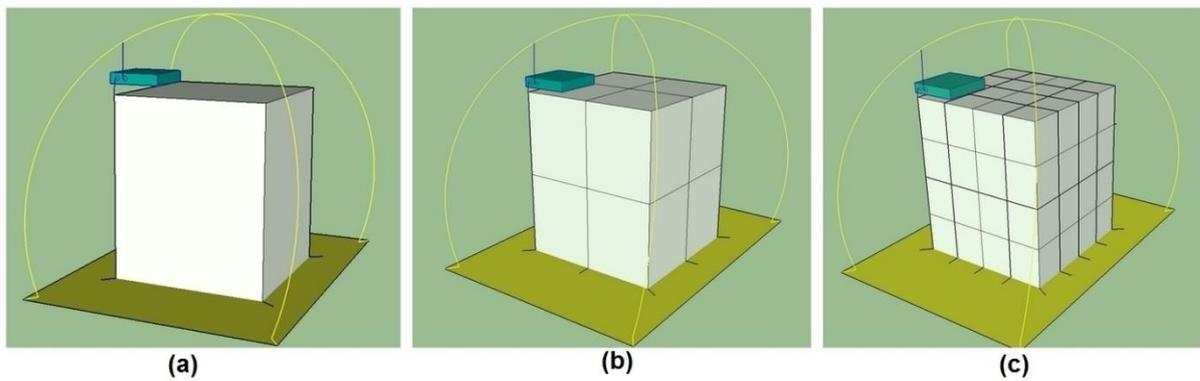
Figura 21: Protótipo experimental (a) 2º arranjo (b) 3º arranjo (c) Lado de trás (d) Medição



Fonte: Dias e outros (2017)

Figura 22: Desenho dos 3 arranjos de SPDA acoplados ao gerador de surto

(a) 1º arranjo (b) 2º arranjo (c) 3º arranjo



Fonte: Dias e outros (2017)

A Tabela 8 apresenta as características dos três arranjos, com as quantidades de condutores de descida e de anéis de cintamento na horizontal em cada arranjo e também o tamanho da malha em cada caso.

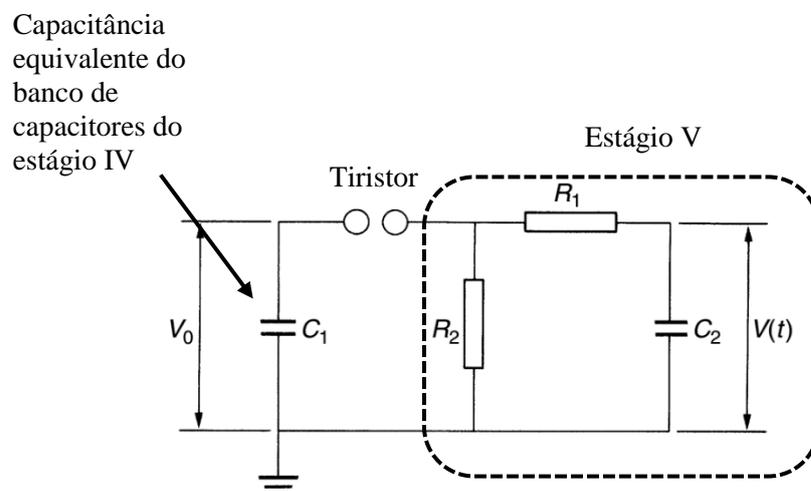
Tabela 8: Características dos três arranjos

Arranjo	Nº de condutores de descida	Nº de anéis de cintamento	Malha do prédio real	Malha em escala 1:40
1º	4	1	24m x 20m	60cm x 50cm
2º	8	2	12m x 10m	30cm x 25cm
3º	16	4	6m x 5m	15cm x 12,5cm

Fonte: Elaborado pela autora

O gerador de surto acoplado ao SPDA utilizado nos ensaios foi montado por alunos do CPDEE - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da UFMG e sua representação esquemática é apresentada na Figura 23. Os capacitores são carregados através de diodos retificadores e, como possuem configuração série, obtém-se uma tensão elevada que excita o circuito conformador da onda após disparo do tiristor. Ajustando-se os valores de  $R_1$  e  $C_2$ , ajusta-se a taxa de crescimento da frente de onda. Os componentes  $C_1$  e  $R_2$  ajustam o tempo de decaimento da cauda da onda. O gerador é alimentado através de uma bateria de 12V e forneceu uma corrente impulsiva com tempo de frente de onda de 250 ns e valor de pico de 8,14 A.

Figura 23: Estágio conformador da onda do gerador de corrente impulsiva



Fonte: Dias e outros (2017)

As medições foram realizadas através de um sensor tipo *loop* com dimensões 9,5 cm x 6,5 cm construído para os ensaios conforme Figura 24. Para que houvesse melhor casamento de impedância entre o cabo coaxial do *loop* (RG58 com  $ZC = 50\Omega$ ) e o osciloscópio, a entrada deste instrumento foi ajustada para  $50\Omega$ .

Figura 24: Sensor tipo “laço” utilizado nas medições



Fonte: Dias e outros (2017)

As tensões desenvolvidas no sensor foram medidas com o osciloscópio modelo 54615B com banda de medição de 500MHz. A medição da corrente impulsiva injetada na estrutura foi realizada com o sensor de corrente da Figura 25, da marca Pearson e modelo 6595 (0,5 Volts/A), conectado ao canal 2 do osciloscópio. O disparo da varredura do osciloscópio também foi realizado através desse canal, obtendo-se o sincronismo entre a corrente e a tensão desenvolvida no *loop*.

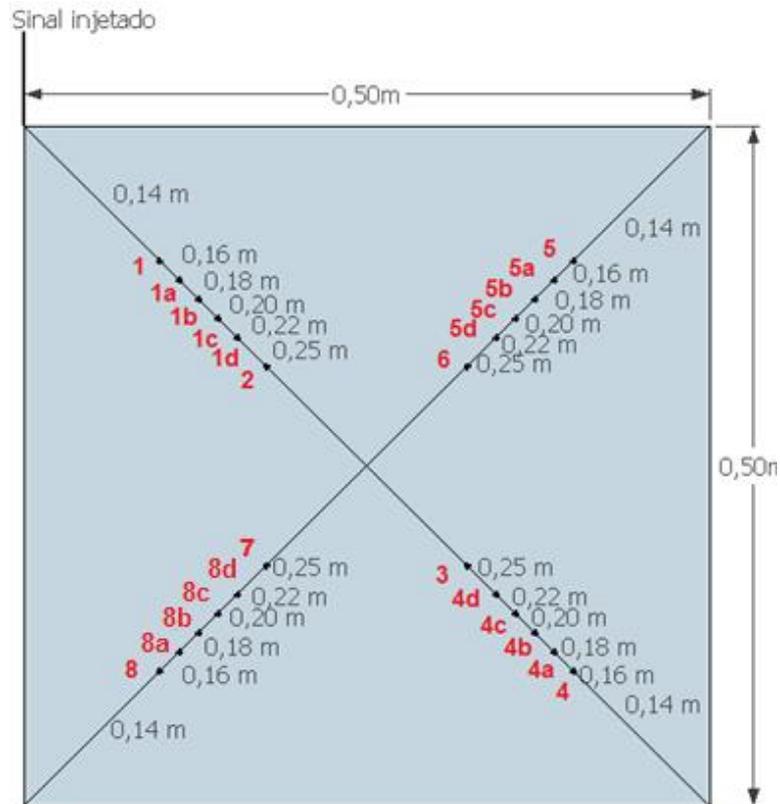
Figura 25: Sensor de corrente utilizado nas medições da corrente injetada



Fonte: Dias e outros (2017)

O sensor de medição foi posicionado conforme mapa apresentado na Figura 26 nos pavimentos 1 e 3 da estrutura escalonada.

Figura 26: Mapa das posições do sensor nos pavimentos 1 e 3 – planta baixa



Fonte: Dias e outros (2017)

#### 4.4 Modelos computacionais

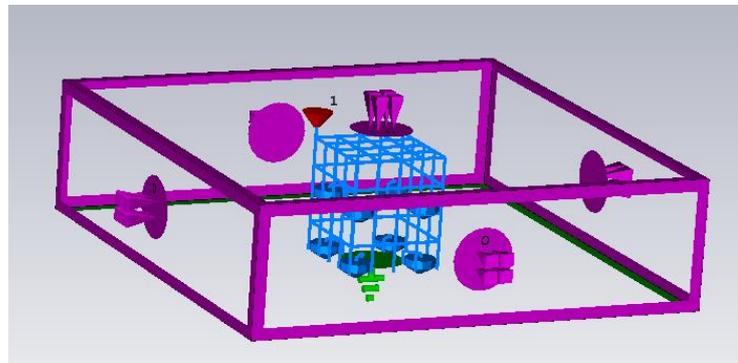
Para as simulações computacionais foram utilizados modelos de estrutura em escala reduzida e em escala real. Os modelos em escala reduzida foram implementados nos softwares comerciais CST® Studio Suite e ANSYS® Electromagnetics Suites, utilizando os métodos numéricos TLM (Matriz de linha de transmissão) e FEM (Elementos finitos), respectivamente. Posteriormente, foi implementado também o modelo em escala real no CST® Studio.

##### 4.4.1 Modelo em escala reduzida utilizando CST® - Caso 2

Para iniciar a implementação do modelo no software é necessário primeiramente delimitar o domínio computacional e especificar as condições de contorno adequadas ao problema em estudo. A Figura 27 ilustra o espaço de trabalho determinado para o caso em

estudo. Na parte superior do prédio foi imposta a condição de fronteira aberta, que representa o local onde o limite da geometria se estende virtualmente até o infinito - ondas podem passar este limite com reflexões mínimas. Nas laterais, foi determinada condição de fronteira aberta com espaço adicional; esta condição se assemelha à condição de fronteira aberta, mas com espaço extra adicionado entre a estrutura e a fronteira do domínio, fixada em 1 m. No solo foi imposta a condição de fronteira elétrica, correspondendo a um condutor elétrico perfeito, onde os componentes tangenciais dos campos elétricos e os componentes normais dos campos magnéticos são zero; isso significa que os campos elétricos são normais e os campos magnéticos paralelos na fronteira do domínio.

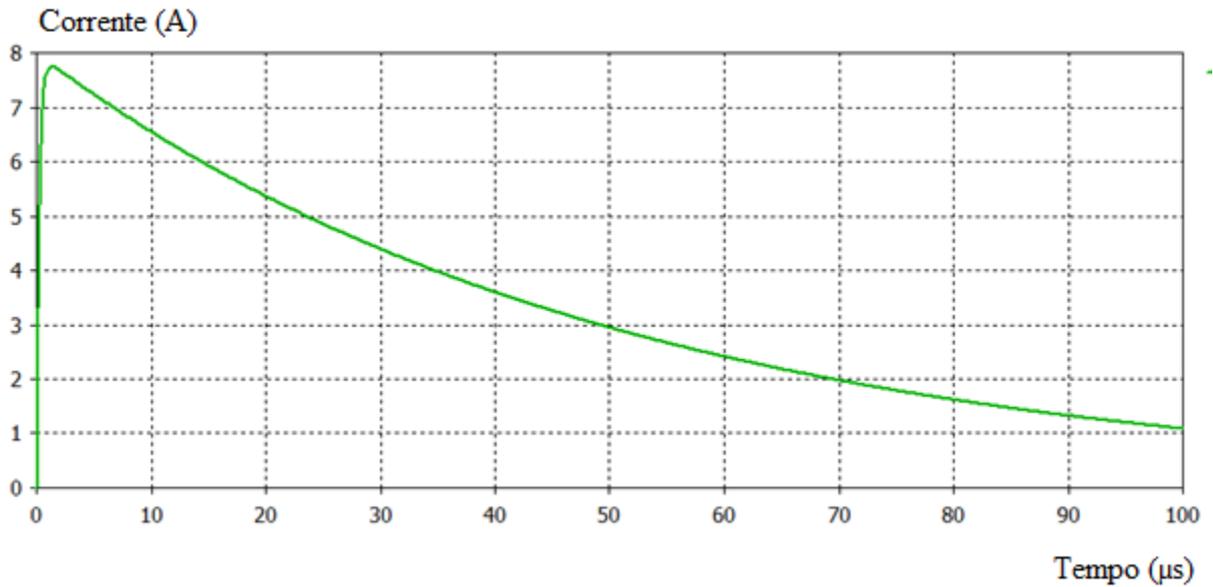
Figura 27: Modelo escala reduzida utilizando CST®



Fonte: Elaborado pela autora

O SPDA foi estruturado através da soma booleana de cilindros de cobre 3D com raio de 4 mm, permeabilidade magnética relativa igual a 1 e condutividade elétrica com valor de  $5,8 \times 10^7$  [S/m]. O canal de descarga foi posicionado no canto lateral do prédio, feito em PEC (condutor elétrico perfeito) com comprimento de 0,1 m e raio de 4 mm. Uma porta discreta é acoplada ao canal de descarga; o sinal de corrente injetado conforme Figura 28 é uma dupla exponencial com amplitude de 8 A, tempo de subida de  $T_1=0,25 \mu\text{s}$  e tempo de descida  $T_2=100 \mu\text{s}$ .

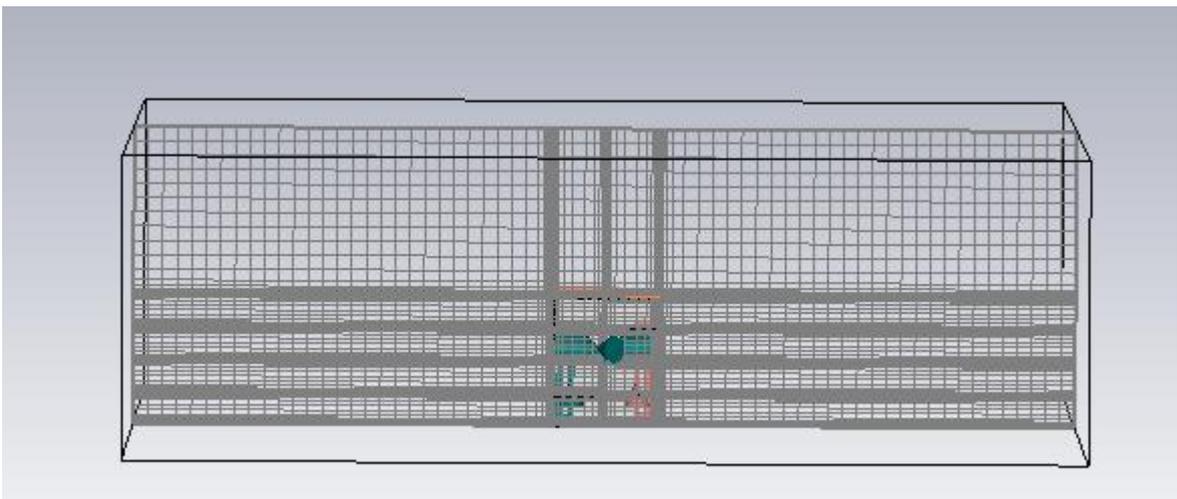
Figura 28: Sinal injetado no modelo CST®



Fonte: Elaborado pela autora

Após configurado o modelo geometricamente, a fonte de excitação e as condições de contorno adequadas, o domínio de cálculo deve ser subdividido em pequenas células, nas quais as Equações de Maxwell devem ser resolvidas. O software CST® usa malha hexaédrica; trata-se de uma malha adaptativa, seu tamanho é refinado nos locais de maior interesse, conforme ilustra a Figura 29.

Figura 29: Malha do modelo CST®



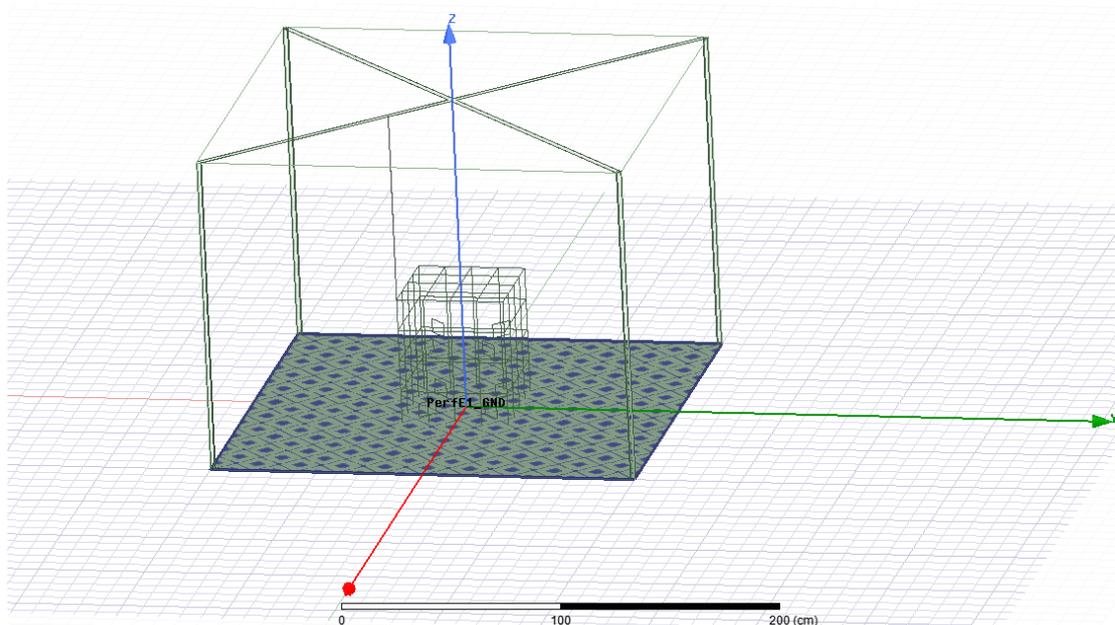
Fonte: Elaborado pela autora

As dimensões do modelo reduzido estão apresentadas na Tabela 5 e os três arranjos de SPDA foram implementados conforme Tabela 8. Para medir as tensões induzidas e comparar com os resultados experimentais foram adicionados no interior da estrutura vários laços de fio de cobre de formato retangular nos tamanhos 0,065 m x 0,095 m acoplados a resistores de 1k $\Omega$ . Para medir as tensões induzidas e comparar com os resultados em escala real, foi utilizado um laço de fio de cobre de tamanho quadrado 0,2 m x 0,2 m acoplado também a um resistor de 1k $\Omega$ .

#### ***4.4.2 Modelo em escala reduzida utilizando ANSYS® - Caso 3***

Para criar o mesmo modelo de estrutura no ANSYS® Electromagnetics Suites algumas mudanças foram necessárias em relação ao software CST®, devido às diferenças das técnicas numéricas e também das particularidades desses softwares. Para estabelecer as condições de fronteira foi criada uma caixa de vácuo (2 m x 1,5 m x 2 m) com as paredes definidas como radiação. Um limite de radiação é usado para simular um problema aberto que permite que as ondas se irradiem infinitamente para o espaço, simulando assim, para volume interno, a situação de absorção integral da onda incidente. Foi criado um plano terra com condição elétrica perfeita, ou seja, o campo elétrico é normal e o campo magnético é tangente ao plano de simetria. O SPDA foi composto por fios de cobre de 4 mm, permeabilidade magnética relativa igual a 1 e condutividade elétrica com valor de  $5,8 \times 10^7$  [S/m]. De forma semelhante ao modelo experimental, é necessário adicionar condutores para o retorno da corrente, portanto foram adicionados dois fios simétricos conectados ao canal de descarga e ao plano terra. Os fios são de material PEC de formato retangular com 2 cm de largura, permeabilidade magnética relativa igual a 1 e condutividade elétrica com valor de  $1 \times 10^{30}$  [S/m]. O canal de descarga é composto por 0,1 m de fio de cobre e 0,8 m de fio de PEC. O modelo descrito acima pode ser visto na Figura 30.

Figura 30: Modelo escala reduzida utilizando ANSYS®

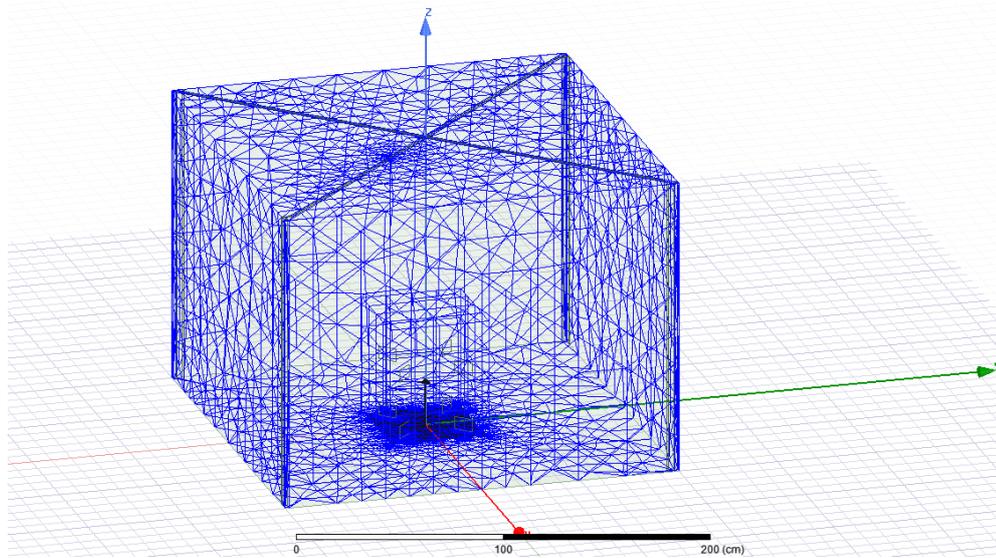


Fonte: Elaborado pela autora

Para gerar a malha, o modelo geométrico é dividido em elementos tetraédricos (sólido composto por quatro faces triangulares). A coleção de tetraedros forma a malha de elementos finitos, conforme Figura 31. Os tetraedros podem ter seus tamanhos ajustados, o que lhes permite representar qualquer geometria 3D arbitrária; logo qualquer forma 3D pode ser decomposta em uma série de tetraedros. As malhas geradas são adaptativas e não estruturadas, conforme pode ser visto na Figura 31.

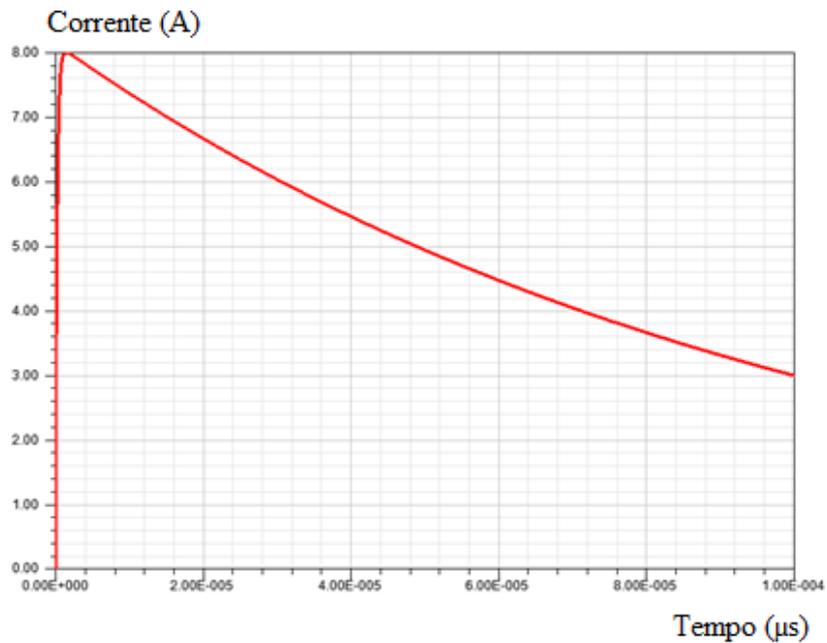
O sinal de excitação foi exportado do Excel® e gerado com as equações apresentadas por Santos e Araujo (2013). O sinal está representado na Figura 32, dupla exponencial com amplitude de 8 A, tempo de subida de  $T_1=0,25 \mu\text{s}$  e tempo de descida  $T_2= 100\mu\text{s}$ . De forma semelhante ao modelo anterior, para se medir as tensões induzidas foram adicionados no interior da estrutura laços de fio de cobre acoplados a resistores de  $1\text{k}\Omega$ .

Figura 31: Malha de elementos finitos



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 32: Sinal injetado no modelo ANSYS®



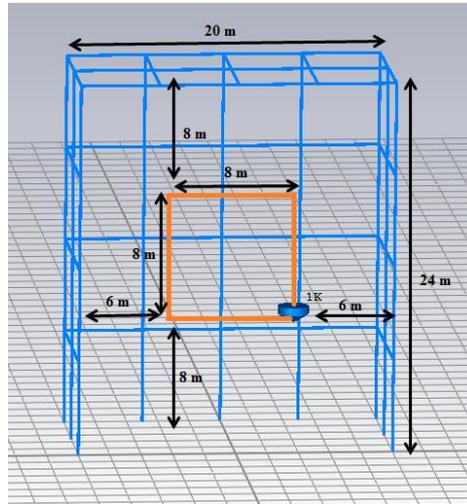
Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.4.3 Modelo escala real utilizando CST® - Caso 4

As dimensões do modelo em escala real são dadas na Tabela 5. O fator de escala geométrico  $k_g=1:40$  foi aplicado para as posições do mapa da Figura 26. Para medir os campos magnéticos foram adicionadas sondas de campo nas posições de medição para os três arranjos

de SPDA. Para medir a tensão induzida um *loop* com dimensões 8 m x 8 m foi aplicado no terceiro arranjo do SPDA, conforme Figura 33.

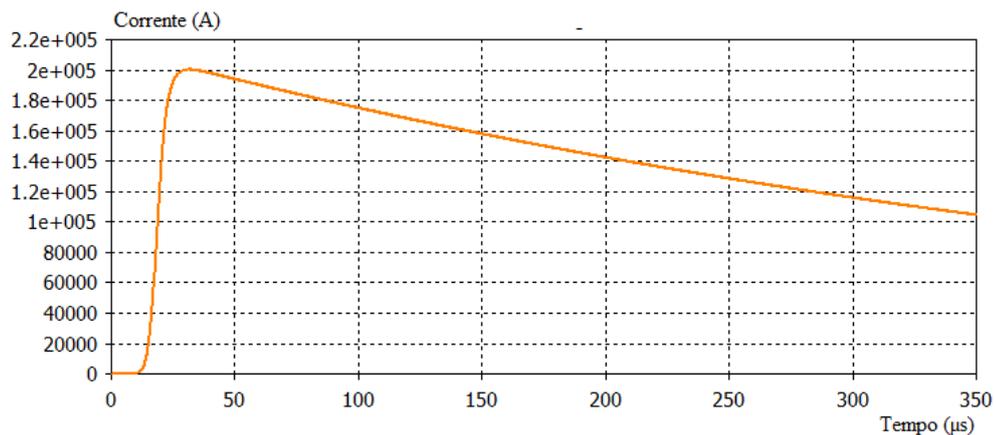
Figura 33: Modelo escala real utilizando CST®



Fonte: Elaborado pela autora

O sinal injetado no modelo em escala real conforme dados da Tabela 7 é apresentado na Figura 34. A implementação foi similar ao modelo em escala reduzida utilizando CST®.

Figura 34: Sinal injetado no modelo em escala real



Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.4.4 Dificuldades nas implementações computacionais

A principal vantagem de se implementar o modelo da estrutura no CST® é não utilizar condutores para o retorno da corrente da descarga atmosférica, pois utiliza-se a própria condição

de fronteira para esta finalidade. E a grande desvantagem é o tempo de simulação, devido à diferença de tamanho da maior e menor célula no modelo computacional. O parâmetro básico da malha é o número de células por comprimento de onda; a menor célula do modelo é uma fração deste parâmetro básico. Digamos por exemplo, que a maior célula no modelo tenha 10 cm e que a menor célula deva ser 20 vezes menor, portanto a menor célula que será gerada (sem adaptação ou refinamento local) possui  $10/20 = 0,5$  cm. Em outras palavras, qualquer região no modelo que necessite de uma maior resolução pode não ser corretamente discretizada. O modelo em estudo apresenta grandezas físicas muito distintas, o prédio está em metros e o raio dos condutores do SPDA em milímetros, o que gerou erros na discretização das conexões dos condutores e por esse motivo não foi possível executar as simulações nas primeiras implementações. A solução foi refinar a malha, o que demanda grande processamento computacional. A malha gerada resultou em milhões de células, chegando a demorar 185 horas para se concluir uma única simulação nos computadores do laboratório de qualidade de energia do PPGEE da PUC Minas.

Após análise e estudo do modelo e das possibilidades de implementação no software CST®, determinou-se que uma alternativa para reduzir o tempo de execução da simulação seria não simular o tempo total da descarga atmosférica, considerando que o ponto crítico do campo magnético e da tensão induzida ocorre no valor de pico da corrente, e este é alcançado logo após o tempo de subida da descarga atmosférica. A segunda ação foi utilizar uma simplificação dos componentes sólidos do modelo 3D, identificada no software como “wire-model”. Com essas medidas, o tempo para executar a simulação reduziu para 13%.

A dificuldade apresentada no modelo implementado no software ANSYS® é a quantidade de memória computacional requerida. Uma malha adequada que suporte cálculos eletromagnéticos FEM é essencial para obter resultados precisos. De forma análoga aos cálculos TLM, foram necessários milhões de elementos para compor a malha. Por esse motivo, as simulações não puderam ser executadas nos computadores do laboratório do PPGEE, que possuem no máximo 16GB de memória RAM. Os modelos da estrutura em escala reduzida, considerando os três arranjos da Figura 22 com os *loops* posicionados nos pontos 5 e 8 da Figura 26, foram enviados para o suporte da ANSYS® que executou as simulações utilizando supercomputadores com 128GB de memória RAM. Conforme reportado, o tempo total para concluir a simulação foi de 11 horas. A memória RAM necessária para rodar o 1º arranjo foi de 17,5GB; o 2º arranjo 26,4GB; e o 3º arranjo 57,5GB.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados de tensões induzidas e campos magnéticos desenvolvidos no interior de estruturas quando o seu SPDA é atingido por descargas atmosféricas diretas.

### 5.1 Avaliação da tensão induzida ao alterar a geometria da malha do SPDA

Foram realizadas simulações computacionais nos softwares ANSYS® e CST® para três arranjos de SPDA, considerando o modelo em escala reduzida. O objetivo é avaliar a variação dos campos magnéticos internos e conseqüentemente as tensões induzidas, ao se variar a dimensão das malhas componentes do SPDA (captore, anéis de equalização de fachada e condutores de descida).

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados de tensão induzida no laço localizado nos pontos 5 e 8, conforme mapa da Figura 26, para o primeiro e terceiro andar da edificação. Para efeito de comparação são apresentados também os resultados de medição reportados no trabalho de Dias e outros (2017).

O valor da tensão induzida é diretamente proporcional à amplitude da corrente da descarga atmosférica para o mesmo tempo de subida ( $T_1$ ) e tempo de meia cauda ( $T_2$ ). De acordo com a Tabela 7, a corrente do modelo reduzido deve ser 5kA. Portanto, o valor de tensão induzida foi corrigido em 625 vezes e posteriormente escalonado para o modelo em escala real, conforme Tabela 6,  $k_v = k_g = 1:40$ . Os resultados são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 9: Tensão induzida em (mV) nos pontos 5 e 8 no primeiro andar

Arranjo	Ponto	Experimental	ANSYS®	CST®
1 °	5	64,06	63,28	22,19
	8	65,63	62,85	22,22
2 °	5	35,00	34,43	9,90
	8	31,88	34,43	9,90
3 °	5	28,13	2,57	5,09
	8	28,00	3,47	5,06

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 10: Tensão induzida em (mV) nos pontos 5 e 8 do terceiro andar

Arranjo	Ponto	Experimental	ANSYS®	CST®
1 °	5	75,00	59,30	26,00
	8	75,76	58,62	26,42
2 °	5	50,00	24,94	15,70
	8	48,44	25,56	15,70
3 °	5	20,00	4,71	5,49
	8	25,63	5,08	5,43

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 11: Tensão induzida em (V) nos pontos 5 e 8 no primeiro andar – Escala real

Arranjo	Ponto	Experimental	FEM	TLM
1	5	1600,00	1582,00	554,75
	8	1640,75	1571,25	555,50
2	5	875,00	860,75	247,50
	8	797,00	860,75	247,50
3	5	703,25	64,25	127,25
	8	700,00	86,75	126,5

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12: Tensão induzida em (V) nos pontos 5 e 8 do terceiro andar – Escala real

Arranjo	Ponto	Experimental	FEM	TLM
1	5	1875,00	1482,50	650,00
	8	1894,00	1465,50	660,50
2	5	1250,00	623,50	392,50
	8	1211,00	639,00	392,50
3	5	500,00	117,75	137,25
	8	640,75	126,9775	135,75

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados das tensões induzidas computados no ANSYS® apresentam boa concordância com os resultados medidos, enquanto que diferenças relativamente maiores foram observadas nos resultados computados no CST®. O uso de condutores de retorno provoca reflexões múltiplas e um aumento nas derivadas do campo magnético no caso de correntes de alta velocidade. Os condutores de retorno superestimam as derivadas máximas do campo

magnético e também as tensões nos *loops*. Isto explica o fato de que no caso dos resultados experimentais e computados no ANSYS®, a tensão induzida em alguns pontos apresentou valores até três vezes maior em comparação aos modelos sem condutores de retorno. Pode-se observar que os valores de tensão induzida nos pontos 5 e 8 são praticamente iguais em todos os casos, o que comprova uma boa simetria nos modelos implementados.

A expressão A.23 da norma NBR 5419 (2015), transcrita em (7), calcula a tensão induzida no laço por uma descarga direta no SPDA na estrutura. A equação será utilizada para se ter uma estimativa dos valores a serem obtidos nas simulações.

$$u_{ocMax} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln \left( 1 + \frac{L}{d_{lw}} \right) \cdot k_H \cdot \left( \frac{w}{d_{lr}} \right) \cdot \frac{i_{oMax}}{T_1} \quad (7)$$

Onde:

$u_{ocMax}$  (V) é tensão induzida no loop;

$\mu_0$  (H/m) é igual a  $4 \pi \cdot 10^{-7}$ ;

$b$  (m) é a largura do laço;

$L$  (m) é o comprimento do laço;

$d_{lw}$  (m) é a distância do laço da parede da blindagem, para  $d_{lw} \geq d_s/1$ ;

$k_H (1/\sqrt{m})$  é o fator de configuração  $k_H=0,01$ ;

$w$  (m) é a largura da malha na blindagem em forma de grade;

$d_{lr}$  (m) é a distância média do laço do telhado da blindagem;

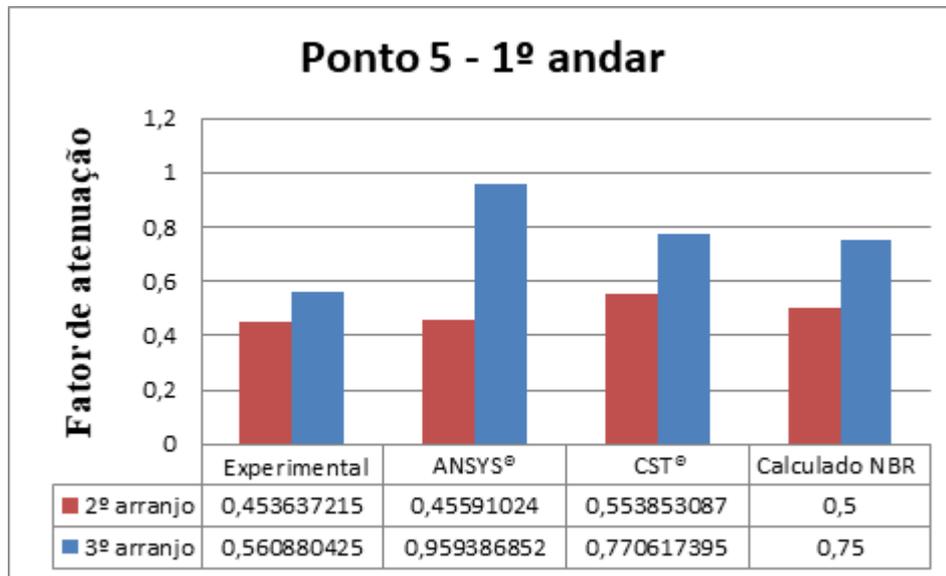
$i_{oMax}$  (A) é o valor máximo da corrente da descarga atmosférica com impacto em ZPR 0A;

$T_1$  (s) é o tempo de frente do impacto da descarga atmosférica em ZPR 0A;

As Figuras de 35 a 38 representam o percentual de atenuação das tensões induzidas nos arranjos 2 e 3 com malhas de SPDA respectivamente com dimensões de 30 cm x 25 cm e 15 cm x 12,5 cm, em relação aos valores induzidos no arranjo 1, que possui dimensões de 60 cm x 50 cm. O percentual de atenuação é obtido pelo quociente entre a diferença da tensão induzida no arranjo em análise e a tensão induzida no arranjo de referência pela tensão induzida no arranjo de referência, conforme (8).

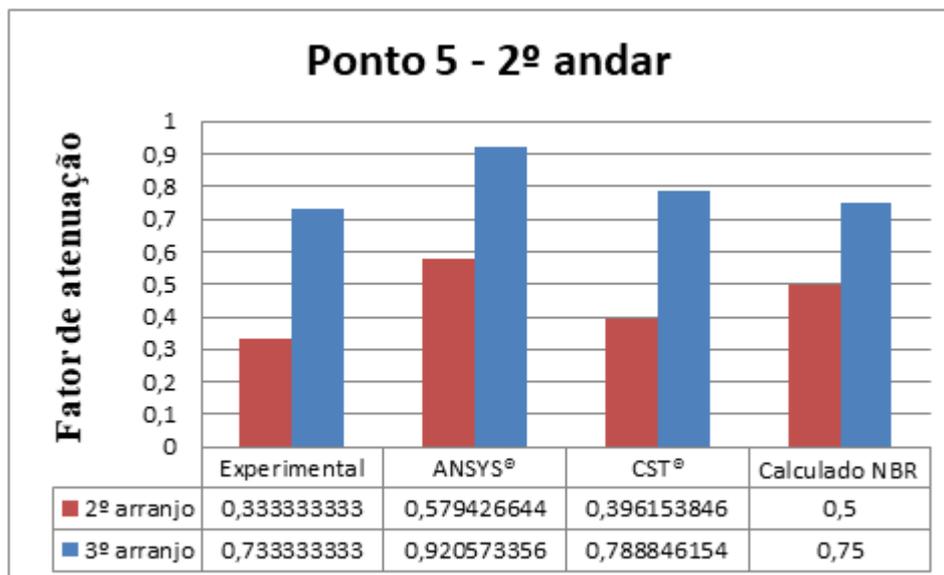
$$\text{Percentual de atenuação} = \frac{V_{2^\circ \text{ ou } 3^\circ \text{ arranjo}} - V_{1^\circ \text{ arranjo}}}{V_{1^\circ \text{ arranjo}}} \quad (8)$$

Figura 35: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 5 do primeiro andar em relação ao 1º arranjo.



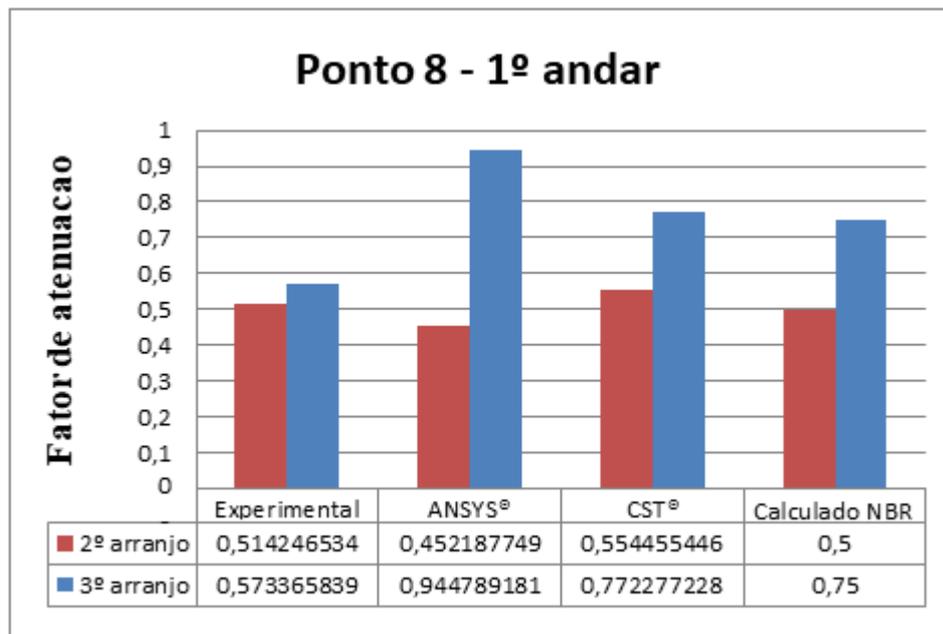
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 36: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 5 do terceiro andar em relação ao 1º arranjo.



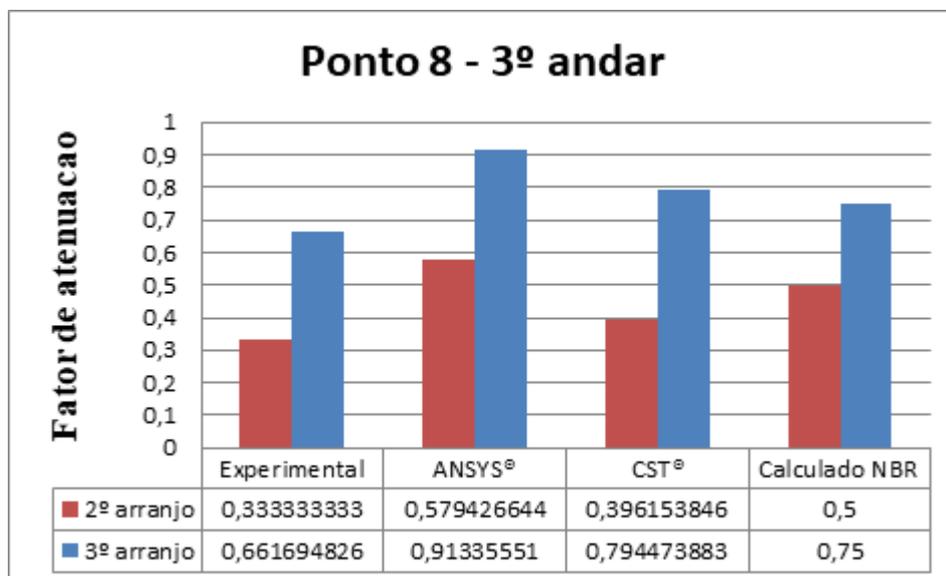
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 37: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 8 do primeiro andar em relação ao 1º arranjo.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 38: Percentual de atenuação das tensões induzidas no ponto 8 do terceiro andar em relação ao 1º arranjo.



Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se considerar que os percentuais de atenuação entre os três modelos ficaram relativamente próximos, e que, portanto, há uma boa concordância entre os resultados simulados. Os gráficos mostram que a combinação do aumento do número de condutores de descida, anéis condutores na horizontal e condutores captadores que compõem a malha de

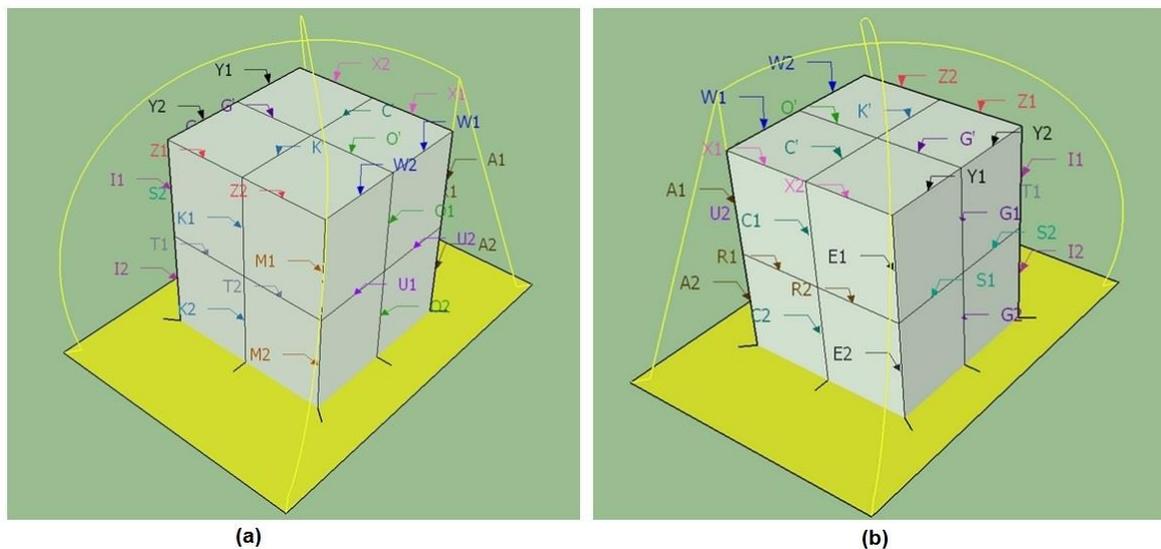
proteção do SPDA, reduzem significativamente as tensões induzidas no interior da estrutura no caso de descarga atmosférica direta. Ao dobrar-se o número de condutores a tensão induzida foi reduzida pela metade.

## 5.2 Avaliação da distribuição da corrente nos condutores que compõem o SPDA

A distribuição homogênea da corrente da descarga atmosférica pelos vários condutores que compõem o SPDA da estrutura é muito importante para a redução dos campos magnéticos induzidos desenvolvidos dentro da estrutura e, por conseguinte, para a redução das tensões impulsivas impostas aos equipamentos internos.

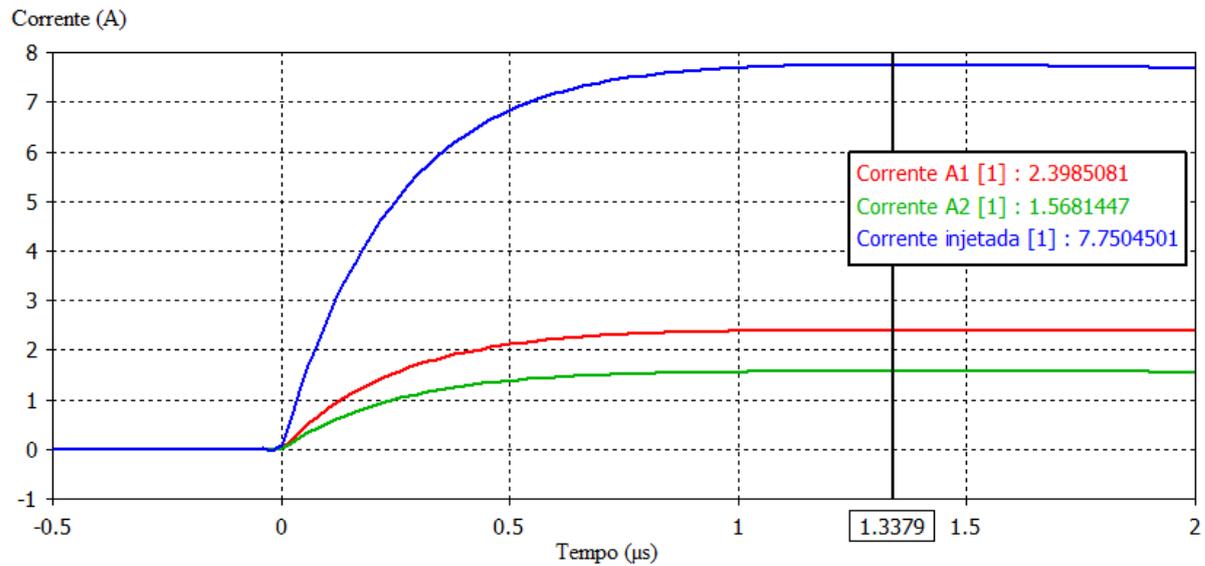
A Figura 39 identifica os condutores do 2º Arranjo (8 condutores de descida), do modelo escala reduzida simulado no software CST®. Com a utilização de monitores de corrente no modelo computacional foram extraídas as amplitudes de pico da corrente injetada na estrutura e as correntes distribuídas ao longo dos condutores verticais do SPDA localizados na prumada do ponto de injeção de corrente. As correntes nos condutores A1 e A2 apresentaram os valores expressos na Figura 40. No ponto de injeção da corrente tem-se o valor de pico da corrente injetada de 7,75 A e no condutor vertical abaixo 2,39 A (condutor A1), ou seja, 30,84% da corrente injetada. No condutor abaixo de A1, ou seja, A2, registrou-se 1,56 A, correspondendo a 20,13% da corrente injetada.

Figura 39: Arranjo da montagem da estrutura ensaiada com identificação dos condutores componentes do SPDA (a) Lateral direita e trás (b) Lateral esquerda e frente



Fonte: Dias e outros (2017)

Figura 40: Correntes simuladas nos condutores que compõem o SPDA



Fonte: Elaborado pela autora

O mesmo arranjo apresentado na Figura 39, foi construído no trabalho de Dias e outros (2017). Os valores obtidos são aqui apresentados para fins de comparação. Os autores reportam que com a utilização da ponta de corrente no modelo experimental foram medidas as amplitudes de pico da corrente injetada na estrutura pelo gerador de impulso e as correntes distribuídas ao longo dos mesmos condutores verticais do SPDA. Portanto, em escala, foi reproduzido o arranjo da Figura 39 injetando-se impulsos de corrente de 8,14 A de pico e 250 ns de tempo de frente. Na prumada do ponto de injeção da corrente tem-se o valor de pico da corrente injetada de 8,14 A e no condutor vertical abaixo 2,8A - condutor A1, o que corresponde a 34,4% da corrente injetada. No condutor A2 registrou-se 1,76A, equivalente a 21,62% da corrente injetada.

A NBR-5419-3 (2015) também prevê o cálculo do coeficiente de distribuição de corrente  $k_c$ . Segundo a norma, para o último pavimento  $k_c$  é dado pela equação (9):

$$K_{c1}(n) := \frac{1}{2 \cdot n} + 0.1 + 0.2 \cdot \sqrt[3]{\frac{c}{h}} \quad (9)$$

E para o penúltimo pavimento, pela equação (10):

$$K_{c2}(n) := \frac{1}{n} + 0.1 \quad (10)$$

Onde:

$n$  = número de condutores

$c$  = distância entre condutores de descida

$h$  = altura dos condutores de descida.

Ajustando-se os parâmetros para o 2º arranjo, tem-se :

$n = 8$

$c = 0,25$  (m)

$h = 0,3$  (m)

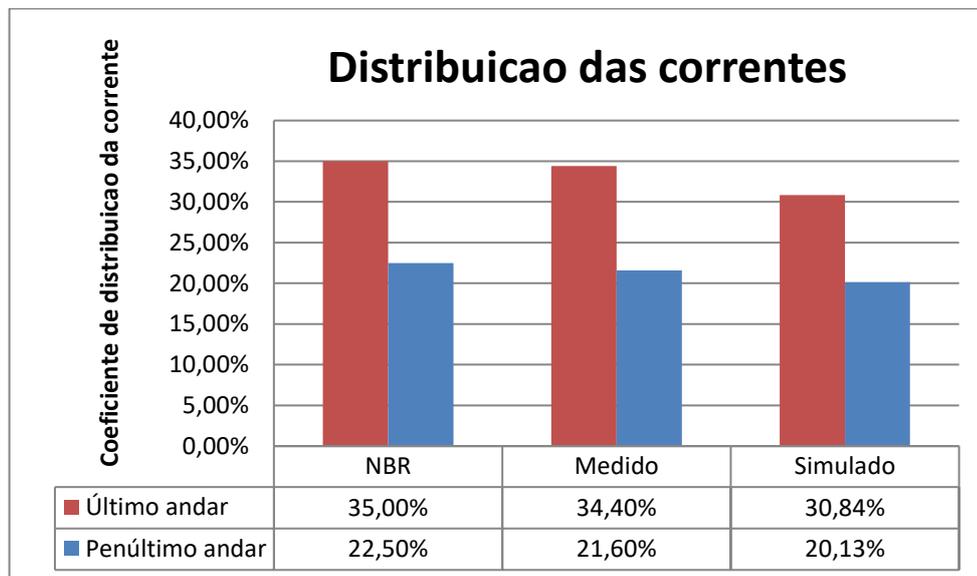
E, portanto:

$k_{c1} = 0,35$  (35%)

$k_{c2} = 0,225$  (22,5%)

Os coeficientes simulados, medidos e calculados são apresentados na Figura 41.

Figura 41: Distribuição das correntes.



Fonte: Elaborado pela autora

As medições convergiram com os cálculos, bem como com os valores simulados, considerando os desvios apresentados na Tabela 13. O modelo simulado apresentou correntes menores devido ao valor de pico do sinal injetado ficar um pouco abaixo de 8 A.

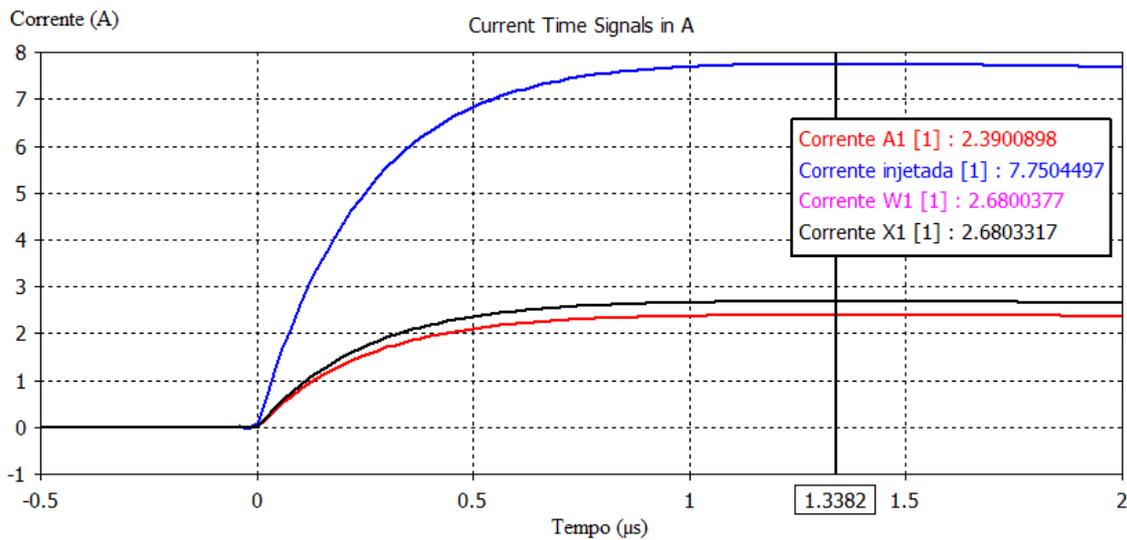
Tabela 13: Distribuição de corrente no SPDA no penúltimo e último andar

Calculado	Medido	Desvio	Calculado	Simulado	Desvio
22,50%	21,60%	0,90%	22,50%	20,13%	2,37%
35,00%	34,40%	0,60%	35,00%	30,84%	4,16%

Fonte: Elaborado pela autora

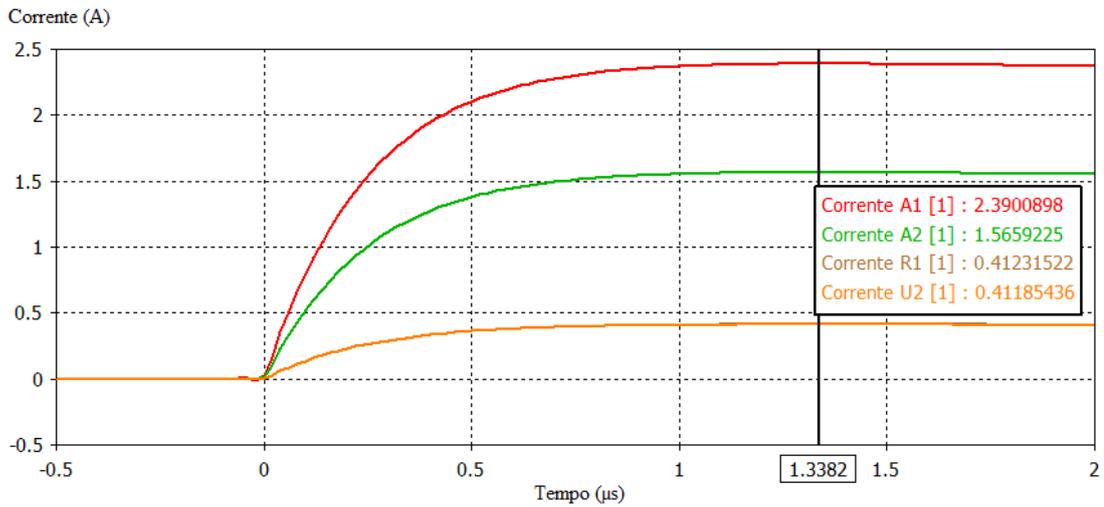
As simulações utilizando o CST® também permitiram avaliar a distribuição de corrente entre os condutores verticais e horizontais, identificados na Figura 39, localizados no ponto de injeção e abaixo do ponto de injeção de corrente. Os resultados são apresentados nas Figuras 42 e 43.

Figura 42: Distribuição da corrente no ponto de injeção



Fonte: Elaborado pela autora

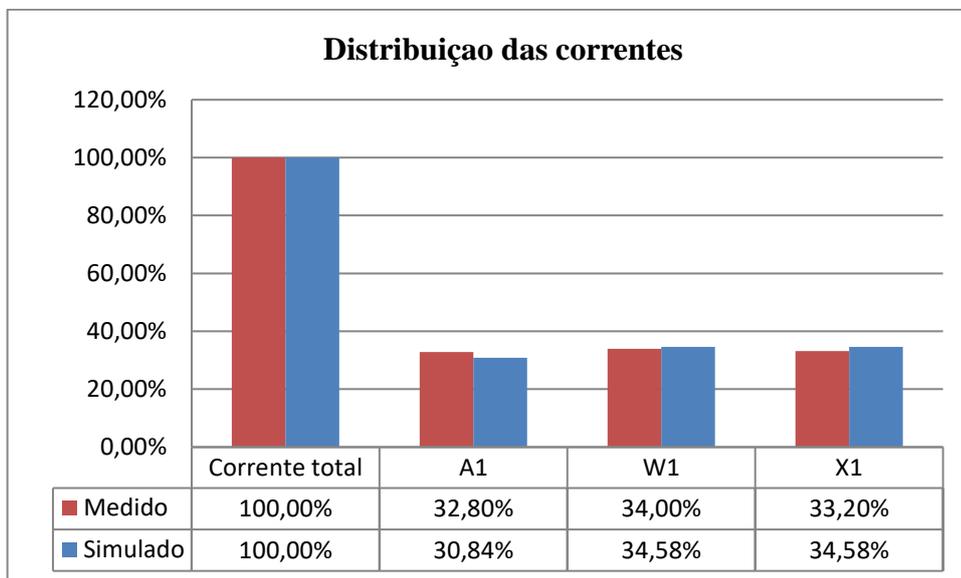
Figura 43: Distribuição de corrente abaixo do ponto de injeção



Fonte: Elaborado pela autora

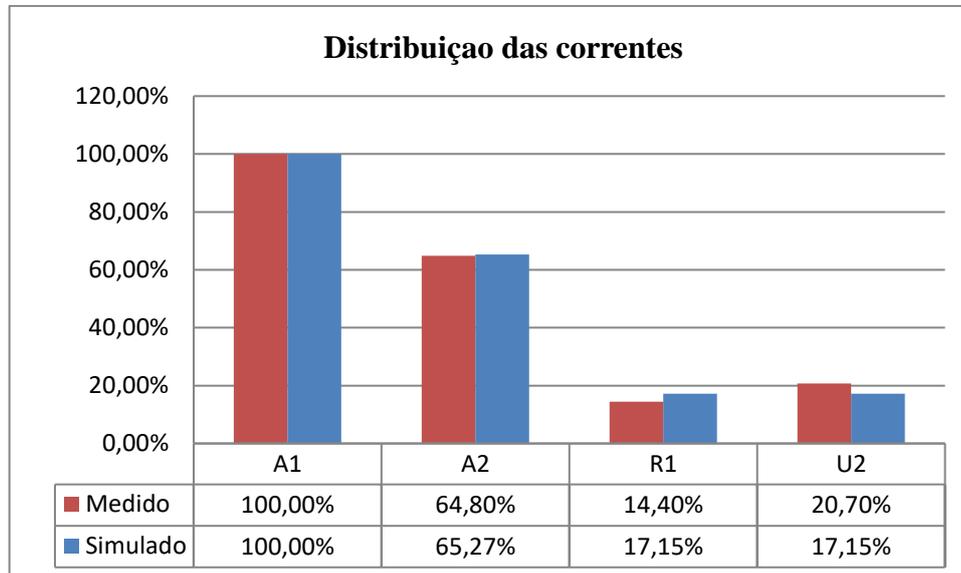
As Figuras 44 e 45 apresentam a comparação entre os resultados de medição e simulação e comprovam a simetria dos modelos, mostrando uma perfeita distribuição de corrente entre os condutores verticais e horizontais.

Figura 44: Comparação da distribuição da corrente no ponto de injeção



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 45: Comparação da distribuição de corrente abaixo do ponto de injeção



Fonte: Elaborado pela autora

### 5.3 Avaliação do campo magnético e tensão induzida ao afastar o sensor do SPDA

As correntes da descarga atmosférica que passam pelos condutores que compõem o SPDA geram campos magnéticos no interior da estrutura. Esses campos podem atingir diretamente os equipamentos eletroeletrônicos ou os cabos que os interligam. Ocorrendo uma descarga em um SPDA externo, o campo próximo aos condutores de descida e dos captos na cobertura será forte e, por este motivo, a nova NBR-5419 orienta que os circuitos elétricos e eletrônicos que interligam os equipamentos internos devam ficar distantes desses pontos, para se reduzir o campo e, por conseguinte, a tensão induzida. Neste item é feita uma análise da redução dos campos magnéticos e das tensões induzidas ao se afastar o sensor de medição do SPDA.

As simulações dos campos magnéticos foram feitas no modelo em escala real, considerando os três arranjos de SPDA. Foi injetado o sinal impulsivo representado na Figura 34, corrente com amplitude  $I = 200\text{kA}$ ,  $T_1=10\ \mu\text{s}$  e  $T_2=350\ \mu\text{s}$ . As *probes* de campo foram localizadas conforme mapa de posições da Figura 26; e os valores do campo magnético para o primeiro e terceiro andar são apresentados na Tabela 14.

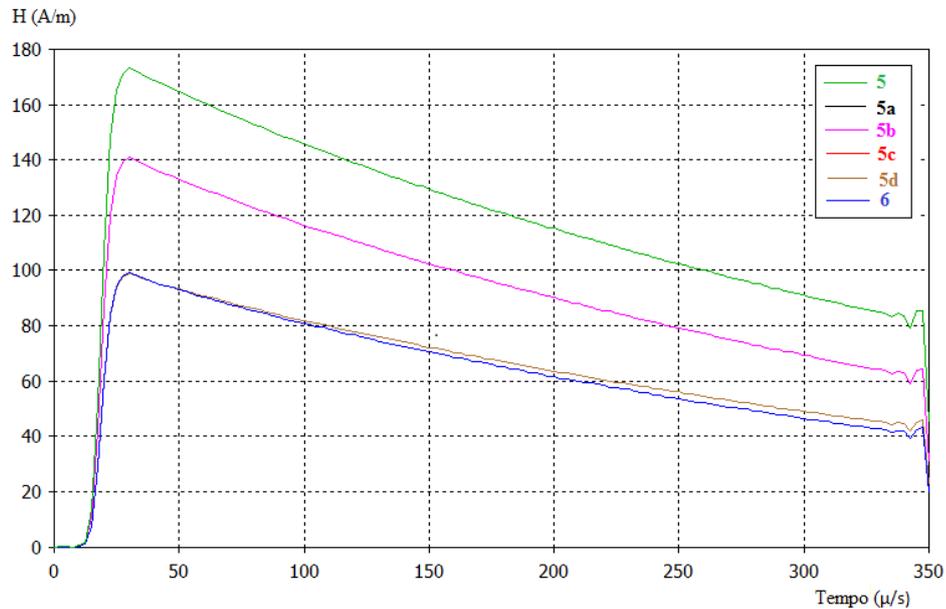
Tabela 14: Campo magnético na estrutura em escala real

H (A/m) / 1º andar / Escala real				H (A/m) / 3º andar / Escala real			
Posição	1º arranjo	2º arranjo	3º arranjo	Posição	1º arranjo	2º arranjo	3º arranjo
5	519	258	173	5	583	430	246
5a	362	268	173	5a	363	363	246
5b	266	223	140	5b	252	305	244
5c	266	223	99	5c	252	305	165
5d	294	177	99	5d	250	266	165
6	333	137	98	6	289	215	169
8	611	253	184	8	548	432	259
8a	481	287	184	8a	386	363	259
8b	289	227	158	8b	255	305	260
8c	289	227	104	8c	255	305	169
8d	302	172	104	8d	236	275	169
7	336	136	103	7	304	199	173
1	2327	33	75	1	2141	437	78
1a	958	57	75	1a	735	120	78
1b	856	59	42	1b	735	119	88
1c	856	59	79	1c	735	119	182
1d	858	59	79	1d	735	181	182
2	444	123	79	2	387	218	183
4	128	299	240	4	160	340	270
4a	127	299	240	4a	160	344	270
4b	252	170	116	4b	235	215	156
4c	252	170	116	4c	235	215	156
4d	251	170	116	4d	235	215	156
3	252	171	116	4	235	216	156

Fonte: Elaborado pela própria autora

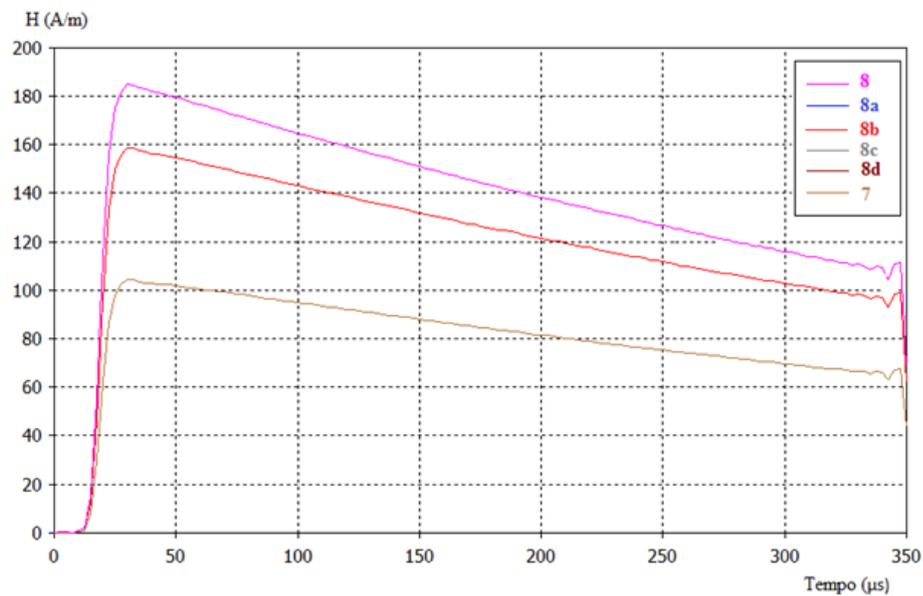
No primeiro e terceiro andar da edificação o campo magnético atenuou em média 51% e 55%, respectivamente, ao se afastar 3,6 m dos condutores de descida que compõem o SPDA da edificação. As Figuras 46 a 49 apresentam os campos magnéticos para o 3º arranjo do SPDA. Os pontos próximos apresentaram valores de campo muito semelhantes, não sendo caracterizadas duas curvas distintas nas figuras apresentadas.

Figura 46: Campo magnético no primeiro andar - pontos 5 a 5d e 6.



Fonte: Elaborado pela própria autora

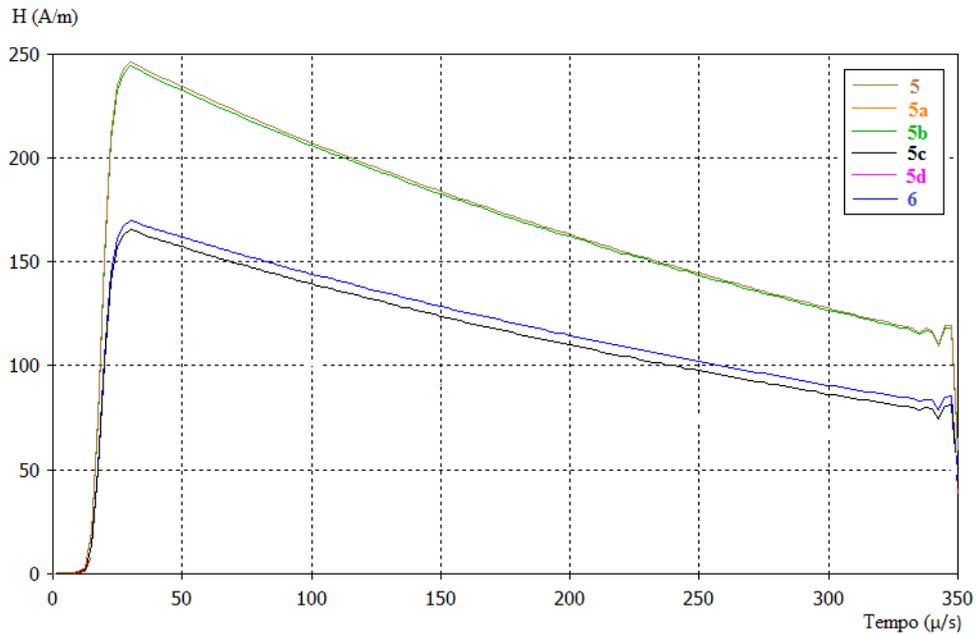
Figura 47: Campo magnético no primeiro andar - pontos 8 a 8d e 7.



Fonte: Elaborado pela própria autora

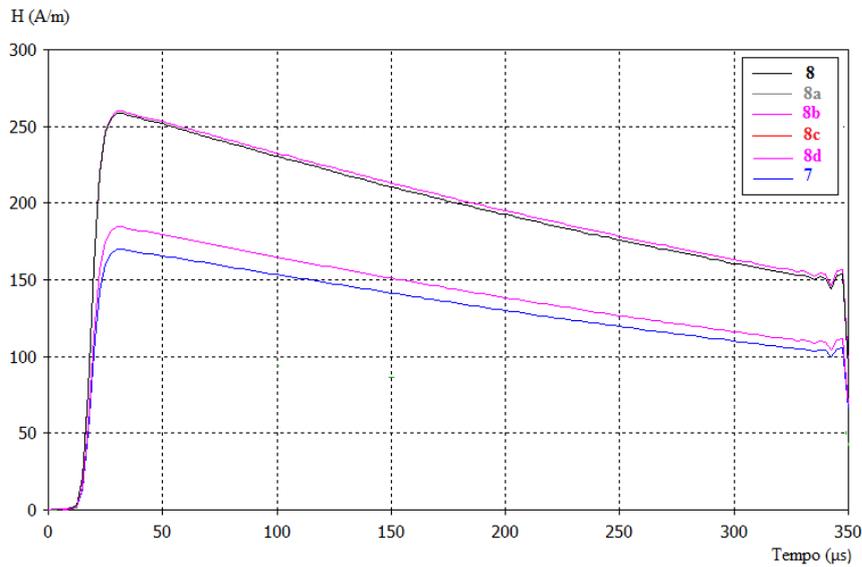
No terceiro andar da edificação observa-se que os campos magnéticos aumentaram aproximadamente 70% em relação aos campos do primeiro andar da edificação em diversos pontos. Este fato deve-se aos captores que conduzem corrente e geram campos magnéticos nos andares superiores.

Figura 48: Campo magnético no terceiro andar - pontos 5 a 5d e 6.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 49: Campo magnético no terceiro andar - pontos 8 a 8d e 7.



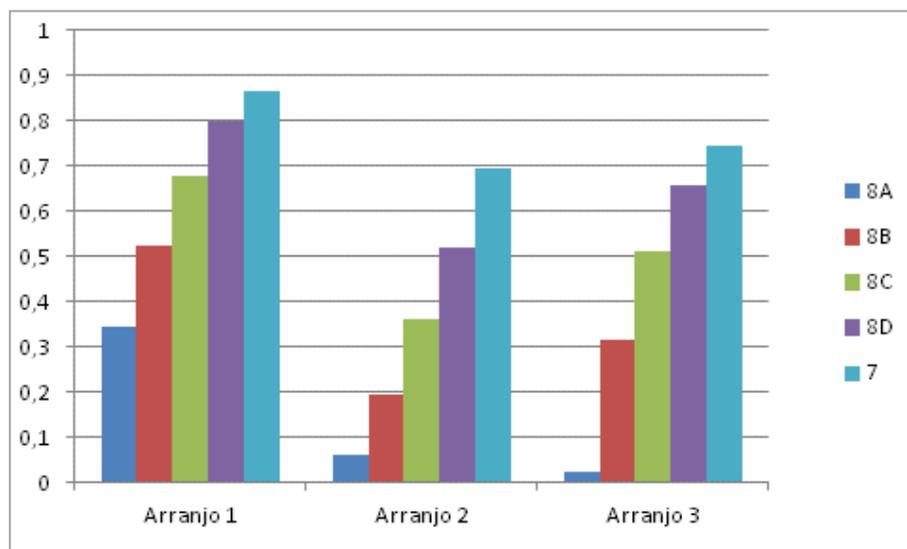
Fonte: Elaborado pela própria autora

Nos modelos computacionais os sensores em forma de *loop* foram adicionados individualmente para evitar a indutância mútua entre eles. Ou seja, para cada posição do *loop* indicado no mapa da Figura 26 é necessário executar uma simulação. Portanto, optou-se por apresentar os resultados de campo magnético, pois é possível extrair os resultados de todos os

pontos utilizando *probes* de campo magnético alocadas simultaneamente nas posições desejadas.

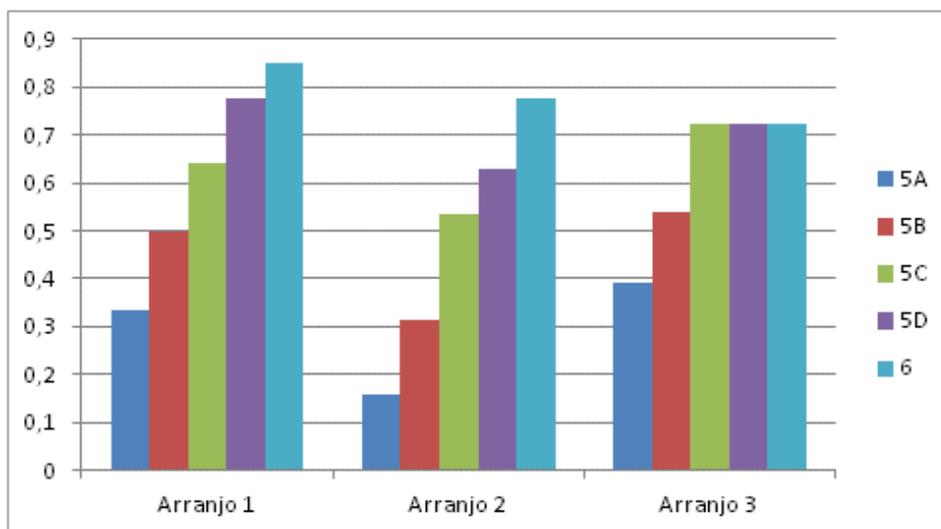
Para avaliar a tensão nos três arranjos em todos os pontos, foi utilizado o modelo experimental proposto por Dias e outros (2017). As Figuras de 50 a 53 apresentam as tensões induzidas no sensor *loop* quando ele é afastado dos condutores de descida. O fator de atenuação da tensão induzida é apresentado para os três arranjos.

Figura 50: Atenuações das tensões induzidas no 1º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida no ponto 8.



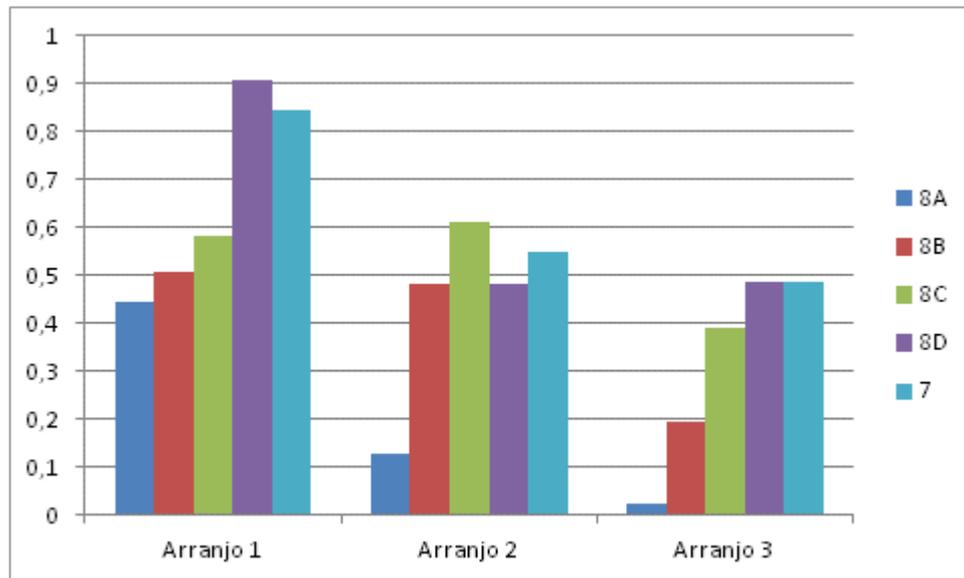
Fonte: Dias e outros (2017)

Figura 51: Atenuações das tensões induzidas no 1º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida no ponto 5.



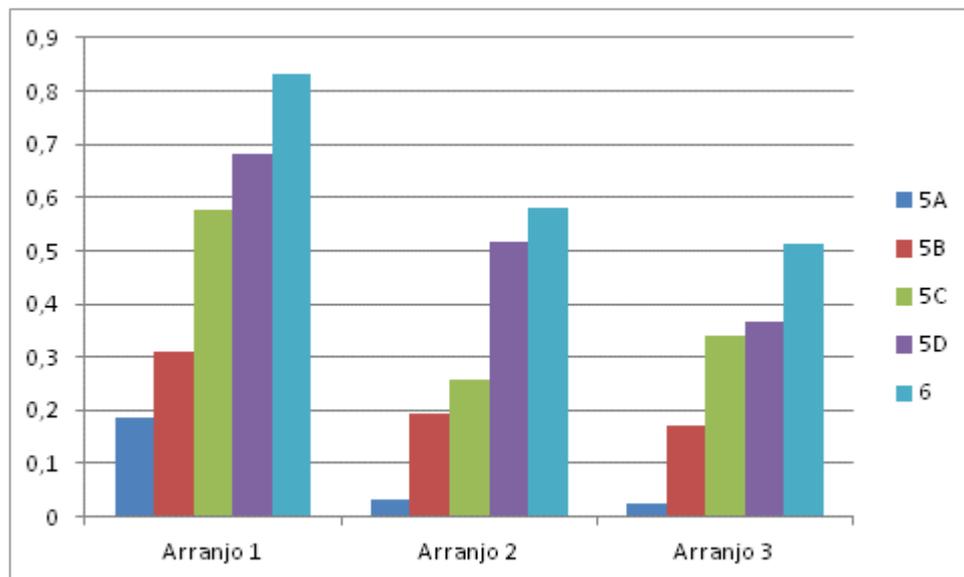
Fonte: Dias e outros (2017)

Figura 52: Atenuações das tensões induzidas no 3º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida com o laço no ponto 8.



Fonte: Dias e outros (2017)

Figura 53: Atenuações das tensões induzidas no 3º pavimento nos pontos apresentados em relação à tensão induzida com o laço no ponto 5.



Fonte: Dias e outros (2017)

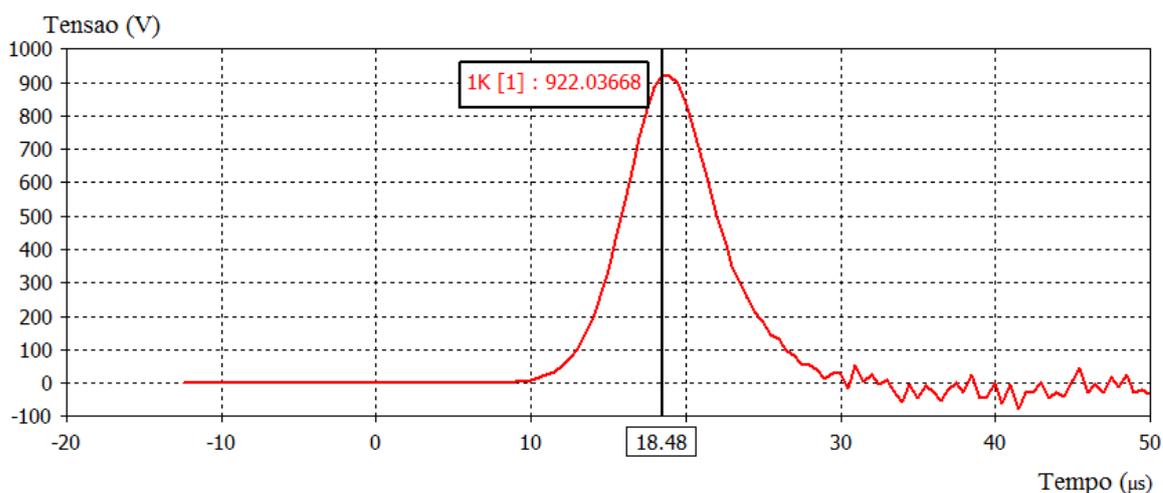
Como as tensões induzidas estão relacionadas ao campo magnético na área do *loop*, os resultados medidos também apresentaram uma boa porcentagem de atenuação ao se afastar mínimas distâncias dos condutores de descida do SPDA. A Figura 52 apresenta algumas variações nos resultados para o 2º arranjo; essas imprecisões são atribuídas à sensibilidade do

sensor *loop* para captar pequenos campos. Ficou comprovada a maior atenuação das tensões induzidas quando o laço é afastado dos condutores de descida e captosres que compõem o SPDA.

#### 5.4 Avaliação da tensão induzida ao rotear os cabos em eletrodutos

Uma maneira de se reduzir as tensões induzidas nos cabos metálicos que estão no interior da estrutura é proporcionar a eles blindagem magnética. Infraestruturas metálicas eletricamente contínuas são muito utilizadas para a passagem desses cabos em edificações. No modelo em escala real apresentado na Figura 33, tem-se um *loop* aberto com dimensões 8 m x 8 m, o *loop* está no volume seguro e a corrente injetada está representada na Figura 34. O resultado da tensão induzida pode ser visualizado na Figura 54. Um *loop* fechado com raio  $r=0,2$  m foi adicionado a 8 cm do *loop* aberto, simulando uma infraestrutura metálica próximo ao cabo.

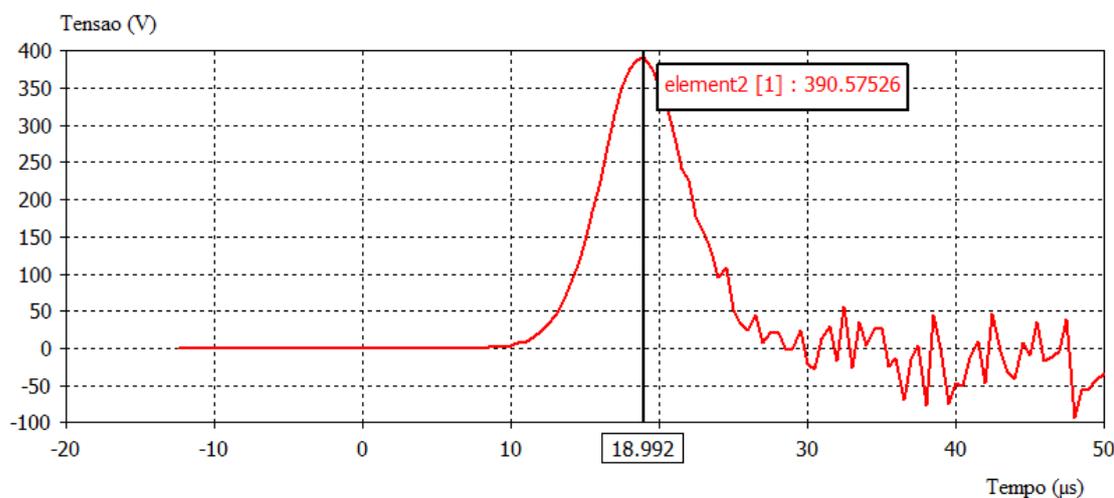
Figura 54: Tensão induzida no *loop* aberto



Fonte: Elaborado pela própria autora

Conforme resultado apresentado na Figura 55, a tensão induzida reduziu 57%. Infraestruturas metálicas eletricamente contínuas atenuam significativamente a tensão induzida no interior de estruturas atingidas por descargas atmosféricas diretas; essa medida de proteção contra surtos reduz os riscos associados a danos aos equipamentos e pode ser associada a outras MPS.

Figura 55: Tensão induzida considerando um *loop* fechado próximo ao *loop* aberto

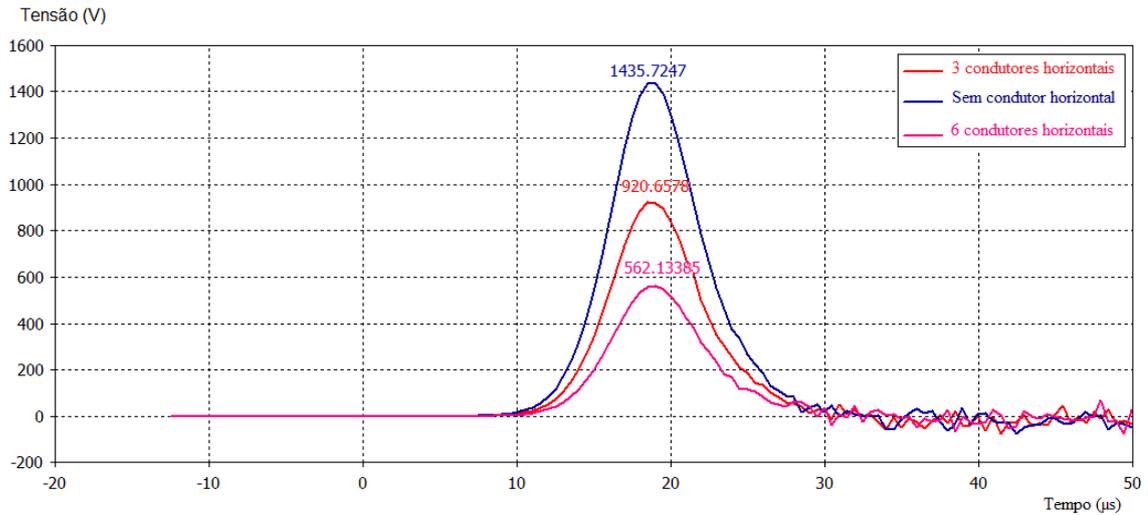


Fonte: Elaborado pela própria autora

### 5.5 Avaliação da influência dos condutores horizontais do SPDA na tensão induzida

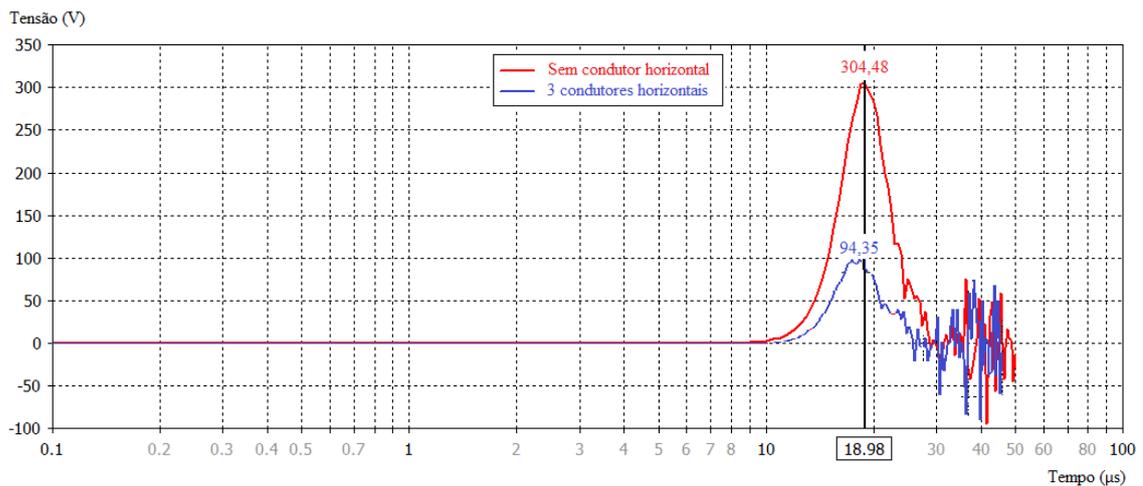
Miyazaki e Ishii (2008) relatam que os condutores horizontais da malha do SPDA nas laterais de um edifício, recomendados na NBR 5419-4 (2015), dificilmente contribuem para a redução dos campos magnéticos induzidos, desde que o topo esteja coberto com uma malha pequena. Para investigar os resultados dos autores, foi utilizado o edifício em escala real, apresentado na Figura 33. O SPDA possui condutor horizontal com função de captor, além de três condutores horizontais que interligam os condutores de descida. Foi implementado mais duas alternativas de SPDA: na primeira foi retirado os três condutores horizontais das laterais do edifício; e na segunda foi dobrado o número de condutores horizontais. Os resultados da tensão induzida no *loop* de 8 m x 8 m para a corrente com amplitude de  $I=200\text{kA}$ ,  $t_1=10\ \mu\text{s}$  e  $t_2=350\ \mu\text{s}$  são apresentadas na Figura 56. Ao se retirar os condutores horizontais, a tensão induzida aumentou 64%; e ao dobrar o número de condutores de descida, a tensão induzida reduziu 61%. Posteriormente foi reduzida a malha do captor para 2,5 m x 2,5 m e os resultados são apresentados na Figura 57. É possível observar que ao retirar os 3 condutores horizontais, a tensão induzida aumentou 30%. Conclui-se que ao reduzir a malha do captor, a influência dos condutores horizontais para reduzir a tensão induzida foi atenuada. Porém, a medida recomendada pela norma continua eficaz para distribuir as correntes pelos condutores de descida e homogeneizar os campos no interior da estrutura; além de promover a blindagem de campos externos providos por descargas indiretas.

Figura 56: Tensão induzida para diferentes quantidades de condutores horizontais



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 57: Tensão induzida ao diminuir a malha do captor



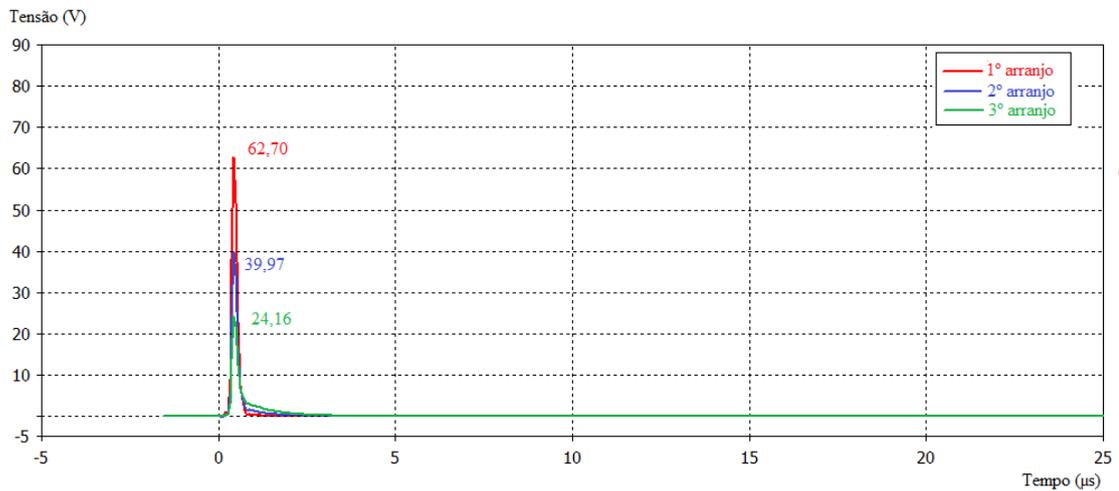
Fonte: Elaborado pela própria autora

## 5.6 Aplicação da teoria da similaridade para escalonar modelos de SPDA

Para validar a aplicação da teoria da relação de similaridade para escalonar modelos de SPDA, foi comparada a tensão induzida no edifício em escala real com a tensão induzida na estrutura em escala reduzida. Foi utilizado o modelo da Figura 33 e o respectivo modelo escalonado, conforme dimensões apresentadas na Tabela 5; e parâmetros de corrente dados na Tabela 7. O fator de escala para a tensão induzida foi determinado como  $k_v = k_g = 1:40$ . Os resultados da tensão induzida para os três arranjos de SPDA no modelo escala reduzida são

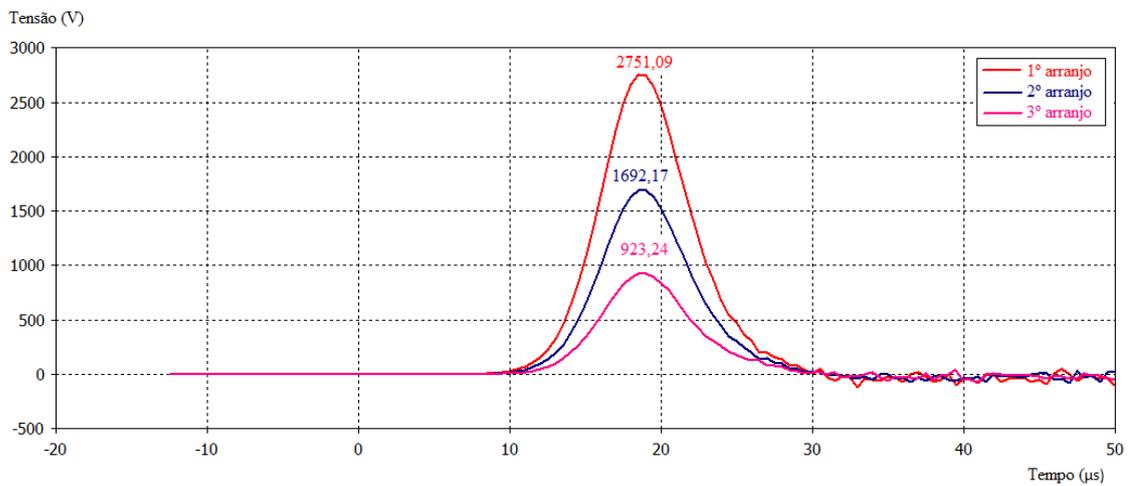
apresentados na Figura 58; e os resultados da tensão induzida para os três arranjos da estrutura em escala real na Figura 59.

Figura 58: Tensão induzida na estrutura em escala reduzida



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 59: Tensão induzida na estrutura em escala real



Fonte: Elaborado pela própria autora

Os resultados apresentaram um fator de escala para tensão induzida no primeiro e segundo arranjo de 1:43 e no terceiro arranjo de 1:38. Portanto, a teoria da relação de similaridade permite escalonar modelos para estudos e, posteriormente, aplicar fatores de escalas para reproduzir resultados próximos aos reais.

## 6 CONCLUSÃO

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, os circuitos eletroeletrônicos passaram por mudanças significativas e, como consequência, os equipamentos ficaram mais susceptíveis a surtos eletromagnéticos. Para reduzir os riscos de danos associados a surtos induzidos por descargas atmosféricas, a norma brasileira NBR 5419 (2015) agregou a Parte 4 em sua última revisão, que trata especificamente da proteção dos sistemas elétricos e eletrônicos internos às edificações. Esse importante assunto é objeto desta pesquisa, que teve como foco realizar um estudo investigativo do comportamento do campo magnético e da tensão induzida em laços no interior de uma estrutura, devido à passagem da corrente da descarga atmosférica pelos condutores que compõem o seu Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas - SPDA.

Para desenvolver este estudo foi criado nos softwares CST® *Studio Suite* e ANSYS® *Electromagnetics Suite* o modelo computacional de uma construção de quatro andares em um fator de escala reduzida 1:40 e também em escala real. O edifício foi equipado com um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em vários arranjos geométricos distintos. O SPDA foi excitado por correntes impulsivas, cujas características são semelhantes à forma de onda da descarga atmosférica. Os resultados simulados foram confrontados com os resultados experimentais apresentados por Dias e outros (2017) e também com os efeitos previstos na NBR 5419 (2015).

Através da avaliação dos resultados computacionais, concluiu-se que os valores das tensões induzidas em modelos que utilizam condutores para o retorno da corrente da descarga atmosférica superestimam os valores de tensões induzidas devido às reflexões da corrente por esses condutores e ao aumento na derivada do campo magnético. Portanto, os resultados simulados no ANSYS® e os resultados experimentais apresentados por Dias e outros (2017) apresentaram tensões induzidas até três vezes maior comparados aos resultados simulados no CST®.

O comportamento da tensão induzida foi investigado ao se investir em condutores para a malha do SPDA. Os resultados simulados e medidos foram comparados aos resultados estimados nas equações da NBR 5419 (2015), considerando as três geometrias de SPDA propostas. Concluiu-se que ao aumentar o número de condutores que compõe a malha de proteção do SPDA, as tensões induzidas no interior da estrutura foram reduzidas; ao dobrar-se o número de condutores a tensão induzida reduziu pela metade.

Outro fator importante para redução das tensões impulsivas impostas aos equipamentos internos é a distribuição homogênea da corrente da descarga atmosférica pelos vários

condutores que compõem o SPDA da estrutura. Foi utilizado o coeficiente de distribuição de corrente  $k_c$ , proposto pela norma brasileira, para verificar a distribuição de corrente nos modelos simulados e medidos. Conclui-se que os modelos propostos apresentaram uma perfeita distribuição de corrente entre os condutores verticais e horizontes do SPDA.

Foi avaliado também o campo magnético ao afastar o sensor de medição do telhado do edifício e da superfície exterior no modelo; conclui-se que nos andares superiores da edificação os campos magnéticos apresentaram valores relativamente maiores; houve um aumento de aproximadamente 70% no terceiro andar em relação ao primeiro piso. Ao afastar 3,6 m na estrutura, houve uma atenuação de 55% nos valores do campo magnético.

No modelo em escala real implementado no CST® foi adicionado um *loop* de 8 m x 8 m no 3º arranjo, e avaliou-se a influência de infraestruturas metálicas eletricamente contínuas utilizadas para a passagem dos fios nas edificações; conclui-se que a tensão induzida reduziu 57% comparada ao *loop* não blindado. Foi investigada a contribuição dos condutores horizontais na atenuação das tensões induzidas. Ao retirar os três anéis horizontais, a tensão induzida aumentou 64%; e ao dobrar os anéis horizontais, a tensão induzida reduziu 61%, comprovando que a medida sugerida pela norma é eficiente para redução de tensões induzidas devido a descargas diretas. Conclui-se também que a teoria da relação da similaridade é um método eficiente para escalonar modelos de SPDAs.

## 6.1 Trabalhos futuros

Esta pesquisa expôs as dificuldades em se trabalhar com *softwares* que implementam técnicas numéricas com equações completas de campo eletromagnético, devido ao grande processamento computacional requerido para executar as simulações. Propõe-se, como sugestão para trabalho futuro, o desenvolvimento de um algoritmo genético para gerar as equações para cálculo da tensão induzida em laços no interior de estruturas atingidas por descargas atmosféricas diretas. O trabalho de Sarajcev e outros (2018) apresenta uma aplicação do algoritmo genético na concepção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em subestações de alta tensão e pode ser utilizado como uma segunda referência.

## 6.2 Publicações

O desenvolvimento desta pesquisa permitiu contribuir com trabalhos relacionados a tensões induzidas nos terminais dos equipamentos eletroeletrônicos em edifícios atingidos por descargas atmosféricas, conforme discriminado:

DIAS, C. A. et al., **Experimental Assessment of Induced Voltage in a Scaled Building Directly Hit by Lightning**. In: International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), IEEE, Natal, Oct 2017.

MENEZES, M. A. et al., **Evaluation of Transient Overvoltages at Terminations in Lowvoltage Installations**. In 12° CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 17° SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica LAWOFs 2016 Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors, Porto Alegre, July 2016.

## REFÊRENCIAS

ABNT NBR 5419. **Proteção contra Descargas Atmosféricas**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 5419-1. **Proteção contra Descargas Atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5419-2. **Proteção contra Descargas Atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de riscos**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5419-3. **Proteção contra Descargas Atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5419-4. **Proteção contra Descargas Atmosféricas - Parte 4: Sistemas Elétricos e Eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5410. **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.

ARANEO, R. et al., **Time-domain analysis of building shielding against lightning electromagnetic fields**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 3, pp. 397–404, June 2015.

ANSYS. **Electromagnetics suítes**. Canonsburg, PA, USA. Ansys, 2017.

ASADA, T. et al., **Reduction of Transient Magnetic Field Due to Lightning by a Shielded Room in a Building**. IEEE Transaction on Electromagnetic compability, vol.58, no.1, pp. 135-142. Feb 2016.

BARBOSA, C. F; PAULINO, J. O. S. **A closed expression for the lightning induced voltage in short loops**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 58, no. 1, pp. 172–179, Feb 2016.

CAMARA. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. **Aprova as Normas Regulamentadoras -NR - do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a**

**Segurança e Medicina do Trabalho.** Disponível em: <  
[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6514.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6514.htm)>. Acesso em: 20 mar. 2017.

CDPENA. **SPDA externo.** Disponível em:< <https://cdpena5431.wordpress.com/page/2/>> .  
Acesso em: 25 set. 2015.

**CST. Computer Simulation Technology.** Darmstadt, Hesse, Germany. Cst, 2017.

DIAS, C. A. et al., **Experimental Assessment of Induced Voltage in a Scaled Building Directly Hit by Lightning.** In: International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), IEEE, Natal, Oct 2017.

DWYER, J. R.; UMAN, M.A. **The physics of lightning.** Physics Reports, [s.l], pp. 147-241, 2014.

FRENTZEL, R. **Use of Similarity Relations in the Analysis of Lightning-Induced Transient Phenomena.** ETEP, Vol.7, No.3, June 1997.

FUANGFUNG, Y.; SINTHUSONTHISHAT, S.; YUTTHAGOWITH, P. **A software tool for induced voltages and currents calculation caused by lightning electromagnetic field in PV systems.** In Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2015 12th International Conference on, pp. 1–4., June 2015.

GOHARA, E. et al., **A practical approach of lightning protection measures for power receiving facilities in telecom building.** In Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014 IEEE 36th International, p. 1–5, 2014.

HEIDLER, F. H.; CAMARA, A. S. B. **Currents on Electric Installations Inside of Buildings in Case of Lightning Equipotential Bonding at the Roof.** International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, 2017.

HEGDE, V.; SHIVANAND, V. **On the influence of steel geometry on the induced currents in steel reinforced concrete building due to a nearby lightning strike to ground.** *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 3, pp. 418–424, 2015.

**IEC-62305-4. Protection Against Lightning - Part 4: Electrical and Electronic Systems Within Structures.** IEC Standard, Geneva, 2010.

ISHII, M.; MIYABE, K.; TATEMATSU, A. **Induced voltages and currents on electrical wirings in building directly hit by lightning.** *Electric Power Systems Research*, vol. 85, pp. 2–6, 2012.

ITU-T K.20. **Resistibility of Telecommunication Equipment Installed in a Telecommunication Centre to Overvoltages and Overcurrents.** ITU-T Recommendation, Geneva, Apr. 2015.

ITU-T K.21. **Resistibility of Telecommunication Equipment Installed in Customer Premises to Overvoltages and Overcurrents.** ITU-T Recommendation, Geneva, Apr. 2015.

KERN, A. et al., **Magnetic fields and induced voltages in case of a direct strike comparison of results obtained from measurements at a scaled building to those of IEC 62305-4.** *Journal of Electrostatics*, vol. 65, no. 56, pp. 379–385, 2007.

MENEZES, M. A. et al., **Evaluation of Transient Overvoltages at Terminations in Lowvoltage Installations.** In 12<sup>o</sup> CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 17<sup>o</sup> SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica LAWOFs 2016 Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors, Porto Alegre, July 2016.

METWALLY, I.; HEIDLER F. **Reduction of lightning-induced magnetic fields and voltages inside struck double-layer grid-like shields.** *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 4, pp. 905–912, Nov 2008.

METWALLY, I.; HEIDLER, F. **Computation of transient overvoltages in low-voltage installations during direct strikes to different lightning protection systems.** *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 3, pp. 602–613, Aug 2007.

METWALLY, I.; HEIDLER, F.; ZISCHANK, W. **Magnetic fields and loop voltages inside reduced and full-scale structures produced by direct lightning strikes**. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 2, pp. 414–426, May 2006.

MIYAZAKI, S.; ISHII M. **Role of steel frames of buildings for mitigation of lightning-induced magnetic fields**. *Electromagnetic Compatibility. IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 2, pp. 333–339, May 2008.

PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. **Impulsive Currents and Voltages Induced into Loops due to Nearby Lightning**. In *International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*, Fortaleza, Oct 2011.

PAULINO J. O. S.; ASSUNCAO, P. C.; BARBOSA, C. F. **Lightning induced voltages in large loops**. In *Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015 International Symposium on*, pp. 47–53, Sept 2015.

PAULINO, J. O. S. et al., **Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações**. 1 ed. Lagoa Santa: Clamper, 2016a.

PLANALTO. Lei nº 6514, de 22 de dezembro de 1997. **Altera o Capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo a segurança e medicina do trabalho e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6514.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6514.htm)>. Acesso em: 20 mar. 2017.

SADIKU, M. N. O. **Numerical Techniques in Electromagnetics**. 2. ed. [Washington]: CRC Press, 2000.

SANTOS, K.; ARAÚJO, F. **Análise da Onda Dupla Exponencial do Impulso de Corrente de Descargas Atmosféricas**. II EITEC Ciências e Inovação: Tecnologias Sustentáveis Para Preservação do Meio Ambiente, vol.2, no.1, 2013.

SARAJCEV, P. et al., **Application of genetic algorithm in designing high-voltage open-air substation lightning protection system**. *Journal of Electrostatics*, pp. 43-51, 2018.

TATEMATSU A., RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M. **Analysis of electromagnetic fields inside a reinforced concrete building with layered reinforcing bar due to direct and indirect lightning strikes using the FDTD method.** *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 3, pp. 405–417, 2015.

ZISCHANK, W. J. et al., **Magnetic fields and induced voltages inside LPZ1 measured at a 1:6 scale model building.** In *International Conference on Lightning Protection*, Avignon, pp. 1–6, 2004.