



**FUNDAÇÃO  
UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE  
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,  
ARQUITETURA E URBANISMO E  
GEOGRAFIA**

---

**ENGENHARIA ELÉTRICA**

## **Bancada experimental para topologias de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**

**João Lucas Silva da Cruz**

**Campo Grande MS**

**31 de Julho de 2020**



FUNDAÇÃO  
UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE  
MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS,  
ARQUITETURA E URBANISMO E  
GEOGRAFIA

ENGENHARIA ELÉTRICA

## **Bancada experimental para topologias de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**

**João Lucas Silva da Cruz**

**Orientador:** Dr. Ruben Barros Godoy

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Mato Grosso do Sul na Faculdade de  
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e  
Geografia, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro  
Eletricista.

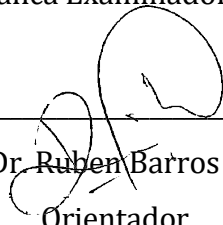
**Campo Grande MS**

31 de Julho de 2020

## **Bancada experimental para topologias de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:



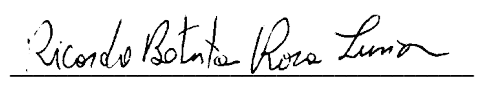
---

Prof. Dr. Ruben Barros Godoy  
Orientador



---

Prof. Dr. Tiago Henrique de Abreu Mateus  
Banca Examinadora



---

Prof. Me. Ricardo Batista Rosa Júnior  
Banca Examinadora

**Campo Grande MS**

31 de Julho de 2020

## DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

**João Lucas Silva da Cruz**, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 1.968.051 e CPF nº 052.478.581-31, declaro que o documento apresentado, com o título “Bancada experimental para topologias de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 31 de Julho de 2020.



**João Lucas Silva da Cruz**

*À minha mãe Geracina dedico, com total reverência e respeito. Que privilégio é ser seu filho, mãe. Sozinha, me deu suporte. Não há dinheiro neste mundo que pague o que fez por mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus. A Ele, glória. Tenho convicção de que estou no centro da sua vontade, pois não teria chegado até aqui sem Ele.

Minha gratidão à minha apoiadora família, principalmente à minha mãe. Ela que me motiva a batalhar todos os dias e enfrentar fracassos diários na busca pelo sucesso. Aos meus amigos(as) e companheiros(as) de profissão. Todos os pensamentos surgem no relacionamento. Este trabalho tem meu nome, mas é fruto de muitas conversas e compartilhamento de conhecimento. Há uma quantidade de pessoas cujas ideias, perspectivas, companheirismo e encorajamento foram importantes. Sem vocês, este trabalho não existiria.

Este trabalho é mais uma pequena tocha para manter aceso o conhecimento de mundo. Por isso, sou grato à academia.

Agradeço aos meus professores, em especial ao orientador Ruben. Foi uma honra tê-lo como professor na caminhada acadêmica. Vocês, professores, mesmo desvalorizados pela sociedade, fazem de tudo para que o aluno se torne autor de sua própria história. Os professores são heróis anônimos, com uma mão escrevem num quadro, com outra mudam a humanidade quando iluminam com seu conhecimento a mente de um aluno. Parafraseando Augusto Cury, eu não me curvaria diante de uma celebridade ou autoridade política, mas curvo-me diante dos educadores.

## RESUMO

O trabalho teve como objetivo a elaboração de uma bancada multidisciplinar didática que facilite a compreensão dos conceitos relativos aos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) com base em ensaios, bem como análise do comportamento do sistema diante de uma descarga elétrica. Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um circuito gerador de arco voltaico, tendo como principal componente uma bobina de ignição veicular. A bancada experimental construída neste trabalho utiliza-se de dois protótipos, Faraday e Franklin, que, em escala reduzida, representam um SPDA em tamanho real. Neste documento foi apresentada uma revisão integrativa dos principais conceitos relativos ao tema, de acordo com a NBR 5419. Dentre as vantagens do trabalho desenvolvido, tornar-se-á estreita a relação entre teoria e prática experimental acadêmica. Através da descarga elétrica e análise dos resultados, o poder das pontas foi validado por ensaio visual, as tensões de passo e toque foram contempladas nas análises, bem como o comportamento da tensão e corrente no momento de uma descarga elétrica. Portanto, pode-se concluir que o projeto da bancada experimental didática confeccionada comprova que, frente a um surto de tensão proveniente de descargas elétricas, uma instalação de SPDA pode dispor de tensão de toque e passo próximas aos seus subsistemas de captação e aterramento capaz de oferecer risco à vida de seres humanos.

**Palavras-Chave:** Bancada experimental. Ensaio. SPDA. Tensão de passo. Tensão de toque.

## ABSTRACT

The objective of this work was the elaboration of a didactic multidisciplinary bench that facilitates the understanding of the concepts related to Lightning Protection Systems (LPS) based on tests, as well as analysis of the system's behavior in the face of an electrical discharge. For this, it was necessary to develop an arc generator circuit, with the main component being a vehicle ignition coil. The experimental bench built in this work uses two prototypes, Faraday and Franklin, which, on a miniature, represent a full-size LPS. In this document, an integrative review of the main concepts related to the theme was presented, according to NBR 5419. Among the advantages of the work developed, the relationship between theory and academic experimental practice will become close. Through the electrical discharge and analysis of the results, the power of the tips was validated by visual test, the step and touch voltages were considered in the analyzes, as well as the behavior of the voltage and current at the time of an electrical discharge. Therefore, it can be concluded that the design of the didactic experimental bench made proves that, in the face of a voltage surge from electrical discharges, na LPS installation can have touch and step voltage close to its capture and grounding subsystems capable of risk to the lives of humans.

**Keywords:** Experimental bench. LPS. Test. Step voltage. Touch voltage.

## SIGLAS

|               |                                                                                    |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ATP</b>    | Alternative Transient Program                                                      |
| <b>ABNT</b>   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                           |
| <b>Batlab</b> | Laboratório de Eletrônica de Potência, Sistemas Digitais e Inteligência Artificial |
| <b>ELAT</b>   | Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais     |
| <b>FDTD</b>   | Método do domínio do tempo da diferença finita                                     |
| <b>INPE</b>   | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                                          |
| <b>MDF</b>    | Medium Density Fiberboard                                                          |
| <b>NBR</b>    | Norma Brasileira                                                                   |
| <b>PVC</b>    | Policloreto de Vinila                                                              |
| <b>SPDA</b>   | Sistema de Proteção contra Descarga Atmosférica                                    |
| <b>UFMS</b>   | Universidade Federal de Mato Grosso do Sul                                         |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 – TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....                                                           | 16 |
| FIGURA 2 – FORMA DE ONDA GENERALIZADA DE UMA DESCARGA .....                                                | 17 |
| FIGURA 3 – O PODER DAS PONTAS. ....                                                                        | 22 |
| FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO VXi DE UM PARA-RAIOS A RESISTOR NÃO-LINEAR. ....                                  | 23 |
| FIGURA 5 – CAMPO ELÉTRICO PRÓXIMO AO PONTO DE DESCARGA.....                                                | 24 |
| FIGURA 6 – PERFIL DE TENSÃO DE DESCARGA COM MAIS DE UM CONDUTOR. ....                                      | 25 |
| FIGURA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS FDTD (A) E CONVENCIONAL (B). ....                                   | 26 |
| FIGURA 8 – TENSÃO DE PASSO POR UM RAIO.....                                                                | 27 |
| FIGURA 9 – CONDUÇÃO DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA PARA O<br>SUBSISTEMA DE DESCIDA E ATERRAMENTO..... | 30 |
| FIGURA 10 – HASTE DE FRANKLIN NA PROTEÇÃO DA EDIFICAÇÃO.....                                               | 31 |
| FIGURA 11 – VOLUME E ÂNGULO DE PROTEÇÃO – HASTE FRANKLIN.....                                              | 32 |
| FIGURA 12 – ESFERA ROLANDO SOBRE UMA EDIFICAÇÃO. ....                                                      | 33 |
| FIGURA 13 – CAPTOR DE HASTE DE PONTA: BARRA DE COBRE CIRCULAR E CANTONEIRA<br>DE AÇO GALVANIZADA .....     | 41 |
| FIGURA 14 – CAPTOR TIPO FRANKLIN .....                                                                     | 41 |
| FIGURA 15 – COMPRIMENTO MÍNIMO DO ELETRODO DE ATERRAMENTO DE ACORDO<br>COM A CLASSE DO SPDA. ....          | 45 |
| FIGURA 16 – DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO BRASIL .....                                            | 48 |
| FIGURA 17 – DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO CENTRO-OESTE.....                                       | 48 |
| FIGURA 18 – VOLUME DE PROTEÇÃO PROVIDO POR UM MASTRO .....                                                 | 51 |
| FIGURA 19 – VOLUME DE PROTEÇÃO DE UM MASTRO DESLOCADO DO CENTRO DA<br>EDIFICAÇÃO.....                      | 51 |
| FIGURA 20 – VOLUME DE PROTEÇÃO PROVIDO POR CONDUTOR SUSPENSO.....                                          | 52 |
| FIGURA 22 – TENSÃO DE TOQUE. ....                                                                          | 56 |
| FIGURA 23 – TENSÃO DE PASSO .....                                                                          | 58 |
| FIGURA 24 – BOBINA DE IGNIÇÃO CILÍNDRICA KW12V EM RECORTE.....                                             | 61 |
| FIGURA 25 – CIRCUITO ELÉTRICO DE FORMAÇÃO DO ARCO VOLTAICO. ....                                           | 62 |
| FIGURA 26 – FORMA DE ONDA DO CIRCUITO GERADOR DE DESCARGAS. ....                                           | 63 |
| FIGURA 27 – CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO PRONTO.....                                                           | 64 |

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>FIGURA 28 – DIMENSÕES DO MÉTODO FARADAY.....</b>                                            | <b>65</b> |
| <b>FIGURA 29 – DIMENSÕES REDUZIDAS DO SPDA TIPO FARADAY – ESCALA 1:200.....</b>                | <b>66</b> |
| <b>FIGURA 30 – CORTE E SOLDAGEM DAS HASTES. ....</b>                                           | <b>67</b> |
| <b>FIGURA 31 – GAIOLA DE FARADAY FINAL EM MINIATURA. ....</b>                                  | <b>68</b> |
| <b>FIGURA 32 – DIMENSÕES DO MÉTODO FRANKLIN. ....</b>                                          | <b>69</b> |
| <b>FIGURA 33 – ÂNGULO DE PROTEÇÃO FRANKLIN.....</b>                                            | <b>70</b> |
| <b>FIGURA 34 – VISTAS COM DIMENSÕES REDUZIDAS DO SPDA TIPO FRANKLIN – ESCALA 1:100.....</b>    | <b>71</b> |
| <b>FIGURA 35 – ÂNGULO DE PROTEÇÃO FRANKLIN - ESCALA 1:100. ....</b>                            | <b>72</b> |
| <b>FIGURA 36 – ETAPA DE SOLDAGEM DA ESTRUTURA.....</b>                                         | <b>73</b> |
| <b>FIGURA 37 – SISTEMA TIPO FRANKLIN FINAL EM MINIATURA. ....</b>                              | <b>73</b> |
| <b>FIGURA 38 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO APARATO EXPERIMENTAL.....</b>                             | <b>74</b> |
| <b>FIGURA 39 – DESCARGA SOB A MALHA DE CAPTAÇÃO – GAIOLA DE FARADAY.....</b>                   | <b>76</b> |
| <b>FIGURA 40 – DESCARGA SOB A REGIÃO PONTIAGUDA – MÉTODO FRANKLIN. ....</b>                    | <b>76</b> |
| <b>FIGURA 41 – ELETRODOS DE ATERRAMENTO.....</b>                                               | <b>78</b> |
| <b>FIGURA 42 – TENSÃO DE PASSO – GAIOLA DE FARADAY .....</b>                                   | <b>78</b> |
| <b>FIGURA 43 – TENSÃO DE PASSO – MÉTODO FRANKLIN .....</b>                                     | <b>79</b> |
| <b>FIGURA 44 – BANCADA DE ENSAIO DA TENSÃO DE TOQUE – GAIOLA DE FARADAY.....</b>               | <b>80</b> |
| <b>FIGURA 45 – TENSÃO DE TOQUE – GAIOLA DE FARADAY.....</b>                                    | <b>81</b> |
| <b>FIGURA 46 – TENSÃO DE TOQUE – MÉTODO FRANKLIN.....</b>                                      | <b>81</b> |
| <b>FIGURA 47 – CORRENTE NA MESMA EXTREMIDADE DO PONTO DE DESCARGA – MÉTODO FARADAY.....</b>    | <b>83</b> |
| <b>FIGURA 48 – CORRENTE NA EXTREMIDADE OPOSTA AO PONTO DE DESCARGA – MÉTODO FARADAY.....</b>   | <b>83</b> |
| <b>FIGURA 49 – MEDIÇÃO DA CORRENTE E DESCARGA NA DESCIDA PRINCIPAL – MÉTODO FRANKLIN .....</b> | <b>84</b> |
| <b>FIGURA 50 – CORRENTE NA DESCIDA – MÉTODO FRANKLIN .....</b>                                 | <b>85</b> |
| <b>FIGURA 51 – CORRENTE NO TOPO – MÉTODO FRANKLIN .....</b>                                    | <b>85</b> |
| <b>FIGURA 52 – TENSÃO DE TOQUE E CORRENTE DE DESCARGA – MÉTODO FRANKLIN.....</b>               | <b>86</b> |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....                                                               | 17 |
| TABELA 2 – FORMA INTEGRAL DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL.....                                                                               | 19 |
| TABELA 3 – RELAÇÃO ENTRE NÍVEIS DE PROTEÇÃO PARA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E CLASSE DE SPDA.....                                        | 38 |
| TABELA 4 – ESPESSURAS MÍNIMAS DAS CHAPAS METÁLICAS OU TUBULAÇÕES METÁLICAS EM SUBSISTEMAS DE CAPTAÇÃO.....                           | 42 |
| TABELA 5 – VALORES TÍPICOS DE DISTÂNCIA ENTRE OS CONDUTORES DE DESCIDA E OS ANÉIS DE CINTAMENTO DE ACORDO COM A CLASSE DE SPDA ..... | 43 |
| TABELA 6 – TAMANHO MÁXIMO DA MALHA CORRESPONDENTE A CLASSE DO SPDA.....                                                              | 49 |
| TABELA 7 – SECÇÃO MÍNIMA DOS CONDUTORES COMPONENTES DA GAIOLA DE FARADAY. ....                                                       | 50 |
| TABELA 8 – RAIOS DA ESFERA ROLANTE FICTÍCIA CONFORME A CLASSE DO SPDA ADOTADA .....                                                  | 54 |
| TABELA 9 – DADOS DE PROJETO DA EDIFICAÇÃO 1 – ESCALA REAL. ....                                                                      | 66 |
| TABELA 10 – DADOS DE PROJETO DA EDIFICAÇÃO 1 – ESCALA 1:200. ....                                                                    | 67 |
| TABELA 11 – DADOS DE PROJETO DA EDIFICAÇÃO 2 – ESCALA REAL. ....                                                                     | 71 |
| TABELA 12 – DADOS DE PROJETO DA EDIFICAÇÃO 2 – ESCALA 1:100. ....                                                                    | 72 |

# SUMÁRIO

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUMO .....</b>                                                        | <b>7</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                       | <b>8</b>  |
| <b>SIGLAS .....</b>                                                        | <b>9</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                                               | <b>10</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                                              | <b>12</b> |
| <b>SUMÁRIO .....</b>                                                       | <b>13</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                  | <b>15</b> |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....                                                 | 15        |
| 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                            | 15        |
| 1.2.1 Descarga Atmosférica .....                                           | 15        |
| 1.2.2 Conceito físico relativo à proteção .....                            | 19        |
| 1.2.2.1 Blindagem Eletrostática .....                                      | 19        |
| 1.2.2.2 Princípio das pontas .....                                         | 20        |
| 1.2.3 Tipos de para-raios.....                                             | 22        |
| 1.2.4 Análise de desempenho.....                                           | 22        |
| 1.2.5 Medidas de proteção contra tensões de toque e passo .....            | 27        |
| 1.2.6 Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas.....              | 28        |
| 1.2.6.1 Métodos de Proteção .....                                          | 28        |
| 1.2.6.1.1 Método Faraday .....                                             | 29        |
| 1.2.6.1.2 Método Franklin .....                                            | 30        |
| 1.2.6.1.3 Método da Esfera Rolante .....                                   | 32        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA .....                                                    | 33        |
| 1.4 OBJETIVOS .....                                                        | 34        |
| 1.4.1 Objetivo Geral .....                                                 | 34        |
| 1.4.2 Objetivos Específicos.....                                           | 35        |
| <b>2. METODOLOGIA DE PROJETO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b> | <b>36</b> |
| 2.1 CLASSES DO SPDA.....                                                   | 38        |
| 2.2 SPDA EXTERNO .....                                                     | 39        |
| 2.2.1 Subsistemas de captação .....                                        | 40        |
| 2.2.1.1 Captadores naturais .....                                          | 41        |
| 2.2.1.2 Captadores não naturais .....                                      | 42        |
| 2.2.2 Subsistema de descida .....                                          | 42        |
| 2.2.2.1 Subsistemas de descida naturais .....                              | 43        |
| 2.2.2.2 Subsistemas de descida não naturais .....                          | 44        |
| 2.2.3 Subsistema de aterramento.....                                       | 44        |
| 2.2.3.1 Subsistemas de aterramento naturais .....                          | 46        |
| 2.2.3.2 Subsistemas de aterramento não naturais .....                      | 47        |
| 2.3 DIMENSIONAMENTO.....                                                   | 47        |
| 2.3.1 Método Faraday .....                                                 | 49        |
| 2.3.2 Método Franklin .....                                                | 50        |
| 2.3.3 Método da Esfera Rolante .....                                       | 53        |
| 2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....                                       | 54        |
| 2.5 PROTEÇÃO CONTRA CONTATOS INDIRETOS .....                               | 56        |
| 2.5.1 Tensão de toque .....                                                | 56        |
| 2.5.2 Tensão de passo .....                                                | 57        |
| <b>3. DESENVOLVIMENTO .....</b>                                            | <b>60</b> |
| 3.1 GERAÇÃO DAS DESCARGAS .....                                            | 61        |
| 3.2 PROJETO DO SPDA.....                                                   | 64        |
| 3.2.1 Método de Faraday.....                                               | 65        |
| 3.2.1.1 Escala real .....                                                  | 65        |
| 3.2.1.2 Escala reduzida.....                                               | 66        |
| 3.2.2 Método de Franklin .....                                             | 68        |

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2.1 <i>Escala real</i> .....                      | 68        |
| 3.2.2.2 <i>Escala reduzida</i> .....                  | 71        |
| <b>4.    RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>             | <b>74</b> |
| 4.1 PROPRIEDADE DAS PONTAS: ENSAIO 1 .....            | 75        |
| 4.2 TENSÃO DE PASSO: ENSAIO 2 .....                   | 77        |
| 4.3 TENSÃO DE TOQUE: ENSAIO 3 .....                   | 79        |
| 4.4 CORRENTE NOS CONDUTORES DE DESCIDA: ENSAIO 4..... | 82        |
| <b>5.    CONCLUSÃO.....</b>                           | <b>88</b> |
| <b>6.    REFERÊNCIAS.....</b>                         | <b>90</b> |
| <b>ANEXO A – NBR 5419-3: 2015 .....</b>               | <b>93</b> |
| <b>ANEXO B – NBR 5419-3:2015.....</b>                 | <b>94</b> |
| <b>APÊNDICE A.....</b>                                | <b>95</b> |
| <b>APÊNDICE B.....</b>                                | <b>96</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

---

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A descarga atmosférica é um fenômeno natural responsável por graves problemas, como os que envolvem distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos, danos em equipamentos e até óbitos. São muitos os desafios que o tema demanda.

Tendo como principal justificativa o comportamento climatológico do país, o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) informa o que o Brasil é líder mundial em registros de descargas com uma média de 77,8 milhões de raios por ano, sendo que entre 2000 e 2014 foram contabilizados mais de 1700 óbitos resultados de descargas diretas ou indiretas [2].

Na intenção de proteger o patrimônio e propor segurança às pessoas que estão dentro da edificação, o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) encaminha a corrente elétrica proveniente de um raio, desde o ponto que ela atinge a edificação até o aterramento. De modo geral, o SPDA não assegura que uma edificação esteja livre de uma descarga, mas reduz seus riscos. Posto isso, para estarem em conformidade com a normativa, a depender da análise de risco, estruturas devem dispor de proteção contra as descargas atmosféricas. Os métodos mais usuais são de Faraday, Franklin e Esfera Rolante (Eletrogeométrico) [22].

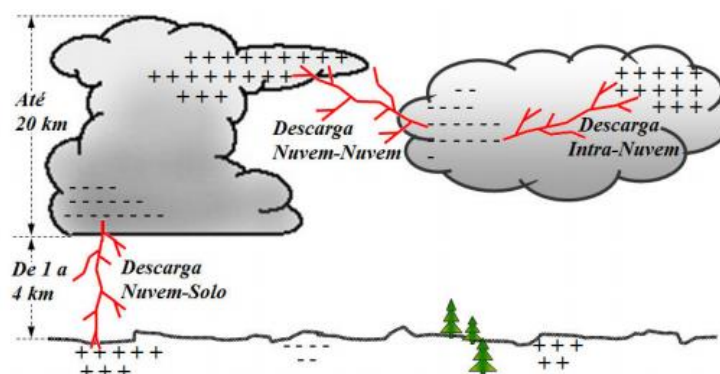
### 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### *1.2.1 Descarga Atmosférica*

O rompimento da isolamento do ar entre duas superfícies carregadas eletricamente com sinais opostos, através do intenso movimento de elétrons de um ponto a outro, ocasionando uma corrente elétrica altíssima, com duração média de meio segundo e trajetória típica de 5 a 10 km é definido como o fenômeno da descarga atmosférica [2].

O relâmpago é uma enorme faísca causada pela descarga elétrica que pode ocorrer, como apresentado na Figura 1, dentro da própria nuvem (intra-nuvem), entre as nuvens (nuvem-nuvem) e entre as nuvens e a terra (nuvem-solo) [3].

Figura 1 – Tipos de descargas atmosféricas



Fonte: [4].

Conforme [5], embora as descargas intra-nuvem são as mais frequentes (cerca de 70% das descargas globais), as descargas nuvem-solo são as que afetam diretamente edificações urbanas, áreas rurais e o sistema elétrico.

As descargas nuvem-solo são divididas em descargas diretas (cujo impacto se dá exatamente em alguma parte da rede ou instalação elétrica) e descargas indiretas (com impacto nas proximidades da rede, principalmente no solo). Com relação à polaridade, as descargas nuvem-solo podem ser positivas ou negativas (sendo estas últimas a grande maioria, em torno de 90%) [4]; pode-se classificá-las em descendentes (da nuvem ao solo) ou ascendentes (do solo à nuvem).

Quando uma descarga atinge diretamente tanto uma edificação urbana quanto rural, ela produz corrente de alta densidade que se propaga pelo solo em um raio de aproximadamente 5km em torno do ponto de descarga [3]. Deste modo, além dos problemas em equipamentos eletrônicos, existe também o risco de morte de seres vivos e o comprometimento das estruturas físicas e elétricas das edificações vizinhas.

A Tabela 1 relaciona os picos de corrente de descargas atmosféricas (kA) e a sua probabilidade de ocorrência.

Tabela 1 – Probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas

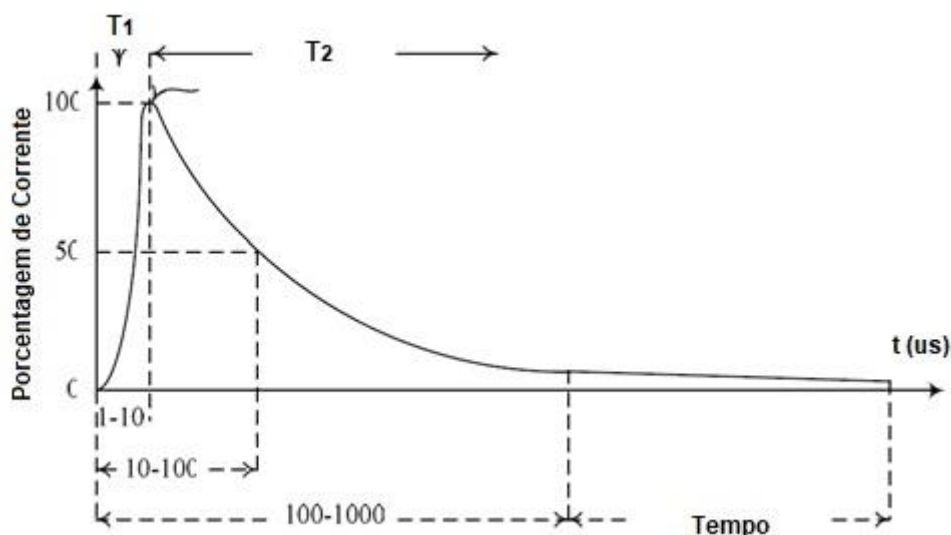
| Corrente máxima<br>(kA) | Probabilidade da ocorrência<br>(%) |
|-------------------------|------------------------------------|
| 5                       | 95                                 |
| 20                      | 80                                 |
| 30                      | 60                                 |
| 60                      | 20                                 |
| 80                      | 10                                 |

Fonte: [6].

O anexo A de [6], especificamente a figura A.1, define o parâmetro de corrente mostrando seu comportamento frente às descargas atmosféricas no tempo. Além disso, a figura 13.4 do livro [22] mostra o formato característico de uma onda de descarga atmosférica, ambos semelhantes a figura 2.

Mesmo com a dificuldade e falta de disponibilidade de obtenção de dados experimentais relativos ao comportamento e evolução de um raio, observa-se na Figura 2 o aspecto de onda *corrente x tempo* de uma descarga é representado por um pico e decaimento em baixa taxa. Genericamente, o valor de crista é da ordem de 400kA entre 1 e 10 $\mu$ s e o tempo em que a corrente de curso reduz para 50% do valor de crista varia de 10 a 100 $\mu$ s.

Figura 2 – Forma de onda generalizada de uma descarga



Fonte: [3].

O conhecimento da forma da onda e de seus valores típicos de tensão ou corrente no tempo (Figura 2), além dos percentuais de sua ocorrência (Tabela 1), possibilita a realização de estudos destinados ao dimensionamento dos para-raios de proteção contra sobretensões

nas linhas e redes elétricas e dos para-raios destinados à proteção de construções prediais e instalações em geral.

O Anexo B de [8] trata da Equação da descarga atmosférica em função do tempo para efeito de análise. Em termos gerais, a forma de onda da corrente pode ser definida, na Equação 1.1, como:

$$i = \frac{I}{k} \times \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} \times \exp(-t/T_2) \quad (1.1)$$

Onde:

$I$ : valor de pico da corrente;

$k$ : fator de correção para o valor de pico da corrente;

$t$ : tempo;

$T_1$ : constante de tempo de frente da onda; e

$T_2$ : constante de tempo de cauda da onda.

Os valores precisos da densidade de descargas atmosféricas para todo o país são gerados a partir de satélites e de redes de detecção. O ELAT do INPE é responsável por registrar tais dados. O Índice Ceráunico indica o número de dias de trovoadas numa determinada região por ano. As cartas isoceráunica foram estabelecidas para delinear as curvas que ligam as localidades que têm o mesmo índice. A NBR 5419:2015 registra as densidades de descargas atmosféricas em todo o país como parte de uma atualização dos valores do índice ceráunico coletados nas últimas décadas.

Na busca por melhor desempenho de empreendimentos frente a sobretensões por descargas, percebe-se que o assunto vem sendo estudado há décadas [3 e 17]. Segundo o coordenador do ELAT Dr. Osmar Pinto Júnior, iniciativas como estas reduzem prejuízos causados pelos raios em nosso país que dispõe do maior índice de incidência de raios do mundo. Existem estudos e cálculos voltados ao impacto de uma descarga nas edificações como um todo. Mesmo assim, o entendimento completo dos diversos estágios da descarga ainda não foi alcançado [1] e, sem a compreensão física do fenômeno, não é possível desenvolver métodos de prevenção contra seus efeitos.

## 1.2.2 Conceito físico relativo à proteção

### 1.2.2.1 Blindagem Eletrostática

As descargas atmosféricas em campo aberto provocam fenômenos elétricos e magnéticos. O conhecimento amplo das equações de Maxwell, diante do conjunto de leis que regem o eletromagnetismo, torna-se ferramenta importante para o estudo desses fenômenos. Originalmente, Maxwell conseguiu, com o auxílio do cálculo vetorial, unificá-las em equações representadas na forma integral na Tabela 2.

Tabela 2 – Forma integral das equações de Maxwell.

|                                  |                                                                                      |                                                                              |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Lei de Gauss para o magnetismo   | $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$                                                   | Relaciona o fluxo magnético às cargas magnéticas envolvidas                  |
| Lei de Gauss para a eletricidade | $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{env}}{\epsilon_o}$                          | Relaciona o fluxo elétrico às cargas elétricas envolvidas                    |
| Lei de Faraday                   | $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$                                 | Relaciona o campo elétrico induzido à variação do fluxo magnético            |
| Lei de Ampère-Maxwell            | $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_o \epsilon_o \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_o i_{env}$ | Relaciona o campo magnético induzido à variação do fluxo elétrico à corrente |

Fonte: [10].

Onde:

E: Intensidade de campo elétrico;

B: Intensidade de campo magnético;

$\epsilon_o$ : Permissividade no vácuo, em F/m;

$q_{env}$ : Quantidade de carga elétrica, dada em C;

$\phi_B$ : Fluxo magnético;

$\phi_E$ : Fluxo elétrico; e

$\mu_o$ : permeabilidade magnética no vácuo, em N/A<sup>2</sup>.

Supondo uma casca esférica condutora de raio  $r$ , o campo elétrico externo é sempre perpendicular a superfície e se dá pela Equação 1.2 [10].

$$E = \frac{1}{k} \frac{q}{r^2} \quad (1.2)$$

No interior de uma casca esférica, o campo elétrico deixa de se comportar de acordo com a equação acima e se dá como nulo ( $\vec{E} = 0$ ) [10]. Isso porque os vetores dos campos elétricos resultantes da circulação de corrente por meio da superfície ou malha metálica se anulam. Amparado pela blindagem eletrostática, Michael Faraday em seu experimento da gaiola percebeu que o campo elétrico é significativamente pequeno no interior de uma estrutura metálica e nulo no seu centro [10].

### ***1.2.2.2 Princípio das pontas***

Sabe-se que o campo elétrico é sempre perpendicular a superfície condutora esférica. Entretanto, como a maioria dos condutores não é esférica, o campo elétrico se estabelece intenso nas regiões pontiagudas [11]. Essa afirmativa torna-se justificativa base para o uso dos para-raios como forma de proteção. Logo, visando suprimir os impactos de descargas atmosféricas, as formulações que incluem o campo eletromagnético, bem como o potencial em um material condutor, são essenciais na análise do comportamento de um sistema diante de um surto.

Numericamente, foram definidos  $E_1$  e  $E_2$  em duas regiões distintas, sendo  $E_1$  o campo elétrico na região cujo raio  $R$  é maior que a região de  $E_2$  de raio  $r$ .  $Q_1$  e  $Q_2$  são as cargas das regiões 1 e 2, respectivamente.  $k$  é a constante elétrica do meio.

$$E_1 = \frac{Q_1}{k} \frac{1}{R^2} \quad (1.3)$$

$$E_2 = \frac{Q_2}{k} \frac{1}{r^2} \quad (1.4)$$

Essas Equações 1.3 e 1.4, por si só, não são suficientes para provar que o campo elétrico é maior na superfície em que o raio é menor por serem inversamente proporcionais ao seu quadrado. Isso porque é importante a consideração das cargas que estão distribuídas sobre o corpo.

O potencial elétrico é representado como [10]:

$$V_1 = \frac{Q_1}{k} \frac{1}{R} \quad (1.5)$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{k} \frac{1}{r} \quad (1.6)$$

Supondo que fazem parte da mesma superfície condutora, o potencial se equivale e a condição  $V_1 = V_2$  leva-nos a seguinte relação:

$$\frac{Q_1}{R} = \frac{Q_2}{r} \quad (1.7)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{Q_1}{R}\right) \frac{r}{R\left(\frac{Q_2}{r}\right)} \quad (1.8)$$

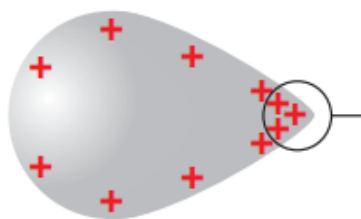
Substituindo 1.7 em 1.8, tem-se a Equação 1.9. A equação mostra que, em uma região que o raio  $r$  é menor que  $R$ , o campo elétrico  $E_2$  será mais intenso que  $E_1$ .

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r}{R} \quad (1.9)$$

Outrossim, sabe-se que as tensões são proporcionais a relação entre a concentração de carga em cada superfície e o raio [24]. Como estão interconectadas e sob o mesmo potencial, ao igualar tais tensões, percebe-se que as densidades superficiais de carga  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são inversamente proporcionais a área da superfície de cada região. Como o raio na região 2 é menor, a densidade de carga na região pontiaguda tende a ser maior.

A Figura 3 torna visível didaticamente a concentração de carga na superfície de um corpo condutor não esférico. Ademais, quanto menor o raio, maior a densidade de carga. Em suma, uma região pontiaguda registra alta concentração de carga e campo elétrico. A este fenômeno é dado o nome de poder das pontas, sendo o princípio fundamental na utilização de para raios.

Figura 3 – O poder das pontas.



Fonte: [11].

### 1.2.3 Tipos de para-raios

O para-raio mais utilizado em edificações é o do tipo Franklin que nada mais é que uma haste condutora pontiaguda fixada no topo da estrutura [12]. Esse dispositivo é interligado aos condutores de descida que proporcionam equipotencialização com o sistema de aterramento. Assim, no caso de descarga, há dispersão da corrente para o solo. Existem também captos constituídos de material radioativo. Estes, aos poucos, foram retirados do mercado de acordo com a resolução 04/89 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Em sistemas elétricos, especificamente em linhas de distribuição e subestações, os modelos usuais são constituídos de Carbureto de Silício (SiC) ou Óxido de Zinco (ZnO) [13]. A composição química suporta a diferença de potencial das linhas de distribuição, porém, em caso de sobretensão, há condução da corrente excessiva ao solo por meio do rompimento da camada química do dispositivo. No caso de linhas de transmissão, normalmente são utilizados cabos condutores para-raios no topo, constituídos de aço galvanizado, promovendo blindagem do sistema contra surtos.

### 1.2.4 Análise de desempenho

O mercado dispõe de ações investigativas, com uso de softwares como *Matlab* e *Alternative Transient program* (ATP), sobre a seleção do melhor para-raios para a aplicação, com custo mínimo. Basicamente essa seleção parte da premissa e definição da tensão nominal, avaliação da corrente de descarga e localização [13].

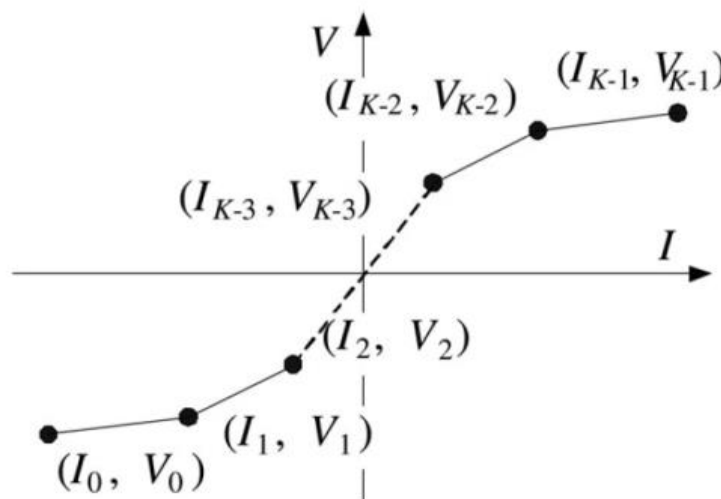
O método dos momentos, o modelo eletromagnético híbrido, o método de elementos finitos, o método de modelagem de linhas de transmissão, e o método do domínio do tempo da diferença finita (FDTD), são aplicados ao cálculo das tensões induzidas por raios. A aplicação desses métodos, nos quais as equações de Maxwell são resolvidas

numericamente, é bastante direta, uma vez que o caminho de incidência e retorno e a linha de distribuição podem ser modelados simultaneamente no espaço de análise [14]. Além disso, esses métodos numéricos de cálculo de campo eletromagnético têm as vantagens de modelar diretamente canais de raios não retos, estruturas 3D, sistemas de aterramento e fios não horizontais. As equações de Maxwell relativas à interferência eletromagnética em regiões próximas ao ponto de descarga são modeladas usando o método FDTD.

Os para-raios de linhas de distribuição e subestações dispõem de resistores não lineares [13]. Porém, nas modelagens as relações tensão-corrente dos para-raios, no momento do surto, são representadas por curvas lineares [15]. Isso porque, diante das iterações do método FDTD e fazendo uso da fórmula 1.10 abaixo, como a resistência de aterramento e dos condutores é fixa e se sobressai diante desse parâmetro do dispositivo, a relação entre tensão e corrente no para raios tende a ser linear (Figura 4).

$$R_k = \frac{V_{k+1} - V_k}{I_{k+1} - I_k} \quad (1.10)$$

Figura 4 – Representação VxI de um para-raios a resistor não-linear.

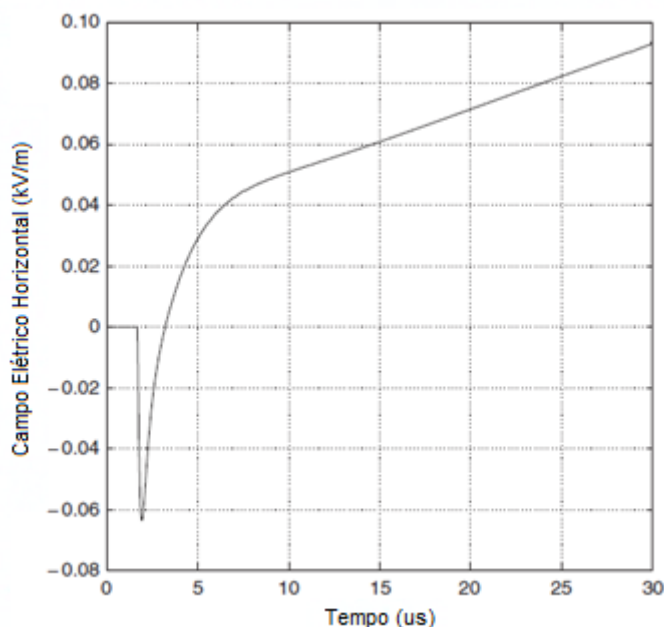


Fonte: [15].

Tomando um exemplo do comportamento do campo elétrico frente a uma sobretensão resultante de descarga atmosférica, o artigo [14] supõe uma região de aterramento com condutividade 0,001S/m e permissividade relativa igual a 10. A Figura 5

apresenta o comportamento do campo elétrico no tempo considerando um sensor instalado a 10m de altura e 500m de distância do ponto de descarga.

Figura 5 – Campo Elétrico próximo ao ponto de descarga.

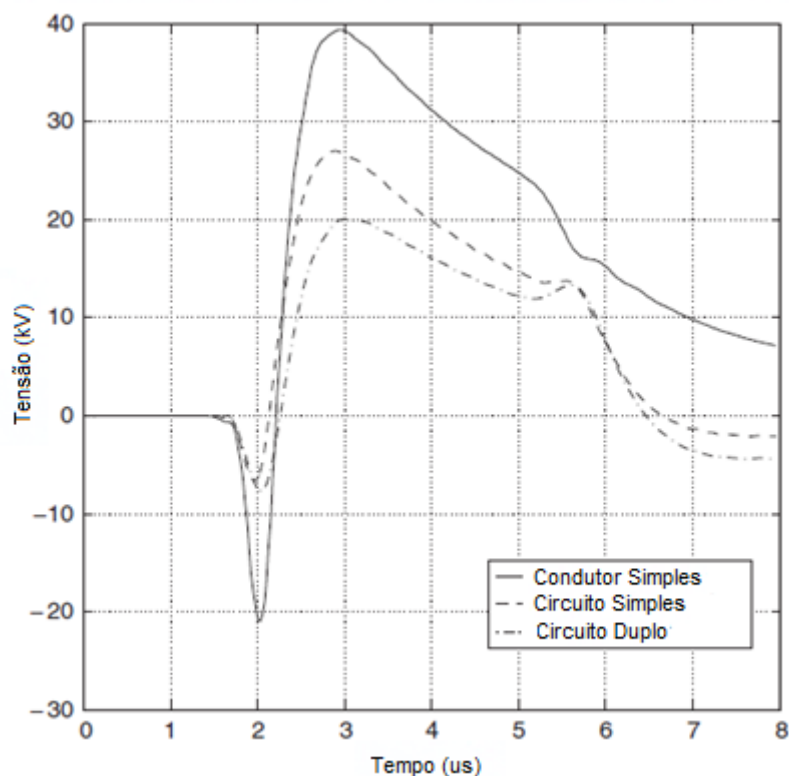


Fonte: [14].

Quando um raio ocorre próximo a uma linha de distribuição, o campo eletromagnético gerado pode induzir sobretensões. Para suprimi-las, são instalados para-raios e/ou fio de blindagem em uma linha de distribuição e a eficácia dessas medidas é geralmente estudada por simulações e ensaios. Para obter resultados precisos da simulação, tradicionalmente, as tensões induzidas por raios são calculadas com base na teoria de circuitos de parâmetros distribuídos (método convencional) [14] e no método FDTD [15].

Sob condições de condutividade de aterramento nula, tem-se na Figura 6 o perfil da tensão induzida no tempo em uma linha de transmissão considerando apenas um condutor, arranjo com multicondutores dispostos verticalmente resultando em um circuito trifásico, bem como arranjo com circuito trifásico duplo [14].

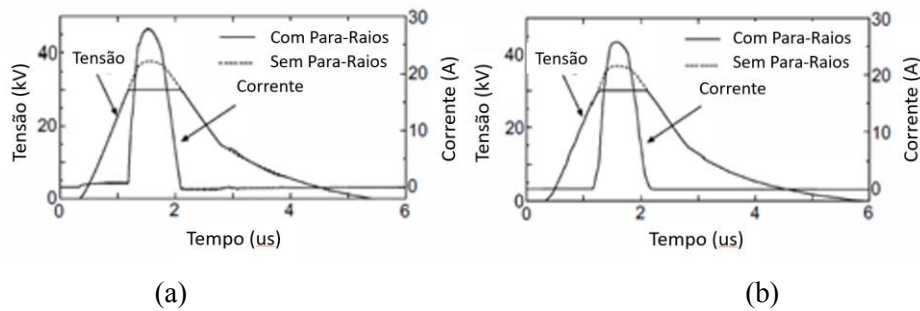
Figura 6 – Perfil de tensão de descarga com mais de um condutor.



Fonte: [14].

As equações de Maxwell são utilizadas para o cálculo do raio induzido e tensões na linha de distribuição. A análise da figura acima permite perceber que o aumento de condutores reduz a tensão induzida à quase metade do seu valor de crista. O cálculo das tensões induzidas por raios em uma linha de distribuição, bem como a comparação dos resultados do método FDTD com os obtidos por um método convencional, que é um método baseado na teoria de circuitos para fins de validação, foi feito em [16] e apresenta-se na Figura 7. As simulações partiram da análise da tensão e corrente no tempo, com e sem para-raio instalado no meio de uma linha de transmissão.

Figura 7 – Comparação entre os métodos FDTD (a) e convencional (b).



Fonte: [16].

Considerando velocidade de propagação de  $120m/\mu s$  [16], a figura mostra que, mesmo concordando entre si, os métodos FDTD e convencional apresentam diferença entre os picos dos resultados abaixo de 10%. Isso significa que para aplicações que exigem atuação crítica do para-raios, é importante usar o FDTD.

Mais importante que analisar o desempenho de uma linha de distribuição frente à sobretensão, é mensurar a taxa de interrupção ( $OR$ ) útil na adoção de critérios para a inserção de métodos de proteção [17]. No caso de uma linha não blindada sob golpes diretos de descarga, a taxa de interrupção ( $OR$ ) presente na Equação 10 depende do número de descargas por 100 milhas/ano ( $N$ ), bem como as probabilidades de descarga no ponto rompendo o isolamento ( $P_1$ ) e de probabilidade de contribuição para a instabilidade do sistema ( $P_2$ ).

$$OR = N \times P_1 \times P_2 \quad (1.11)$$

Onde:

$N$ : Número de descargas por 100 milhas / ano;

$P_1$ : Probabilidades de descarga no ponto rompendo o isolamento; e

$P_2$ : Probabilidade de um raio causar perda de funcionamento da linha.

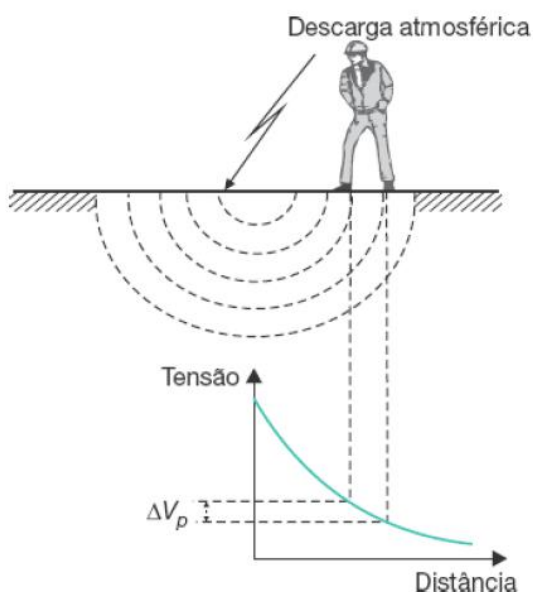
É muito difícil diminuir  $P_1$ . Mas,  $P_2$  pode ser atenuado com o uso de estruturas isolantes e não blindadas, como a madeira [17]. No entanto, por questões ambientais, o material vem sendo substituído aos poucos por estruturas metálicas e de concreto, culminando no aumento de  $P_2$ . Conclui-se que a composição das estruturas é fator importante para a condução de uma descarga atmosférica.

### 1.2.5 Medidas de proteção contra tensões de toque e passo

Descargas atmosféricas na estrutura podem causar danos às pessoas por choque elétrico devido a tensões de passo e de toque resultantes de acoplamentos resistivos e indutivos [8]. Na maioria dos casos, a principal causa de morte decorrente de descargas atmosféricas dá pela tensão de passo, enquanto a segunda é o efeito dos campos eletromagnéticos – ambas resultantes de descargas indiretas. Sendo assim, o choque elétrico pelas tensões de toque e de passo são consequências das descargas atmosféricas.

Tensões de passo ocorrem principalmente em edificações em zonas rurais [8]. Cabe salientar que a corrente elétrica quando injetada no solo, por eletrodos ou diretamente por descarga atmosférica, se dispersa em forma de arcos com o centro no local de penetração, podendo provocar uma tensão de passo  $\Delta V_p$ , conforme ilustra a Figura 8, para o caso de uma descarga atmosférica.

Figura 8 – Tensão de passo por um raio



Fonte: [22].

Sendo assim, para que sejam minimizados seus efeitos, uma vez que o sistema de captação, por meio de para-raios, atrai descargas e o de aterramento dissipa-as, é primordial que ambos estejam casados. Logo, o dimensionamento e estudo do sistema de aterramento são essenciais. Sua instalação não é caracterizada como complexa, porém é comum encontrar erros relacionados à execução [26].

A redução do risco de vida devido a tensões de passo e toque pode ocorrer em regiões com a resistividade superficial do solo, tanto interna quanto externa a edificação, baixas. Além disso, os riscos tanto de tensão de toque quanto de passo, são reduzidos a níveis toleráveis com a diminuição do acesso de pessoas e do seu tempo de exposição aos condutores de descida, bem como uso de caminhos naturais de descida.

A NBR 5419-3 trata do estabelecimento de medidas de proteção sobre o tema. Para a manutenção do SPDA, dentre a documentação técnica de um projeto, é importante o registro de ensaios realizados no eletrodo de aterramento e outras medidas tomadas em relação a prevenção contra as tensões de toque e passo. No caso de nenhuma das medidas de diminuição de riscos for preenchida, faz-se necessário impor restrições físicas (barreiras) ou sinalização de alerta visando minimizar a probabilidade de acesso a área perigosa e os condutores de descida serem tocados.

### ***1.2.6 Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas***

Um SPDA tem por objetivo direcionar e dissipar ao solo as descargas atmosféricas evitando possíveis danos ao sistema elétrico, edificações e pessoas [18]. Em termos físicos, neutraliza, pelo poder de atração das pontas, o crescimento do gradiente de potencial elétrico entre o solo e as nuvens, por meio do permanente escoamento de cargas elétricas entre a nuvem e o solo, ou vice versa.

Posto isso, faz-se necessário, para uma dissipação adequada da alta corrente, um sistema de aterramento robusto, que respeite os padrões de segurança descritos pelas normas técnicas. Ademais, somente baixos valores de resistência não são suficientes para se assegurar a confiabilidade do sistema de aterramento.

#### ***1.2.6.1 Métodos de Proteção***

Fundamentalmente, existem três métodos de disposição dos materiais essenciais do SPDA. Os métodos aceitáveis a serem utilizados para determinar a posição de um subsistema de captação definem-se em: Método das malhas (Faraday), do ângulo de proteção (popularmente conhecido como Franklin) e da esfera rolante (Eletrogeométrico). A principal diferença entre os tipos reside na atuação dos mesmos e a aplicabilidade de cada sistema depende das características gerais do volume a ser protegido [8].

#### ***1.2.6.1.1 Método Faraday***

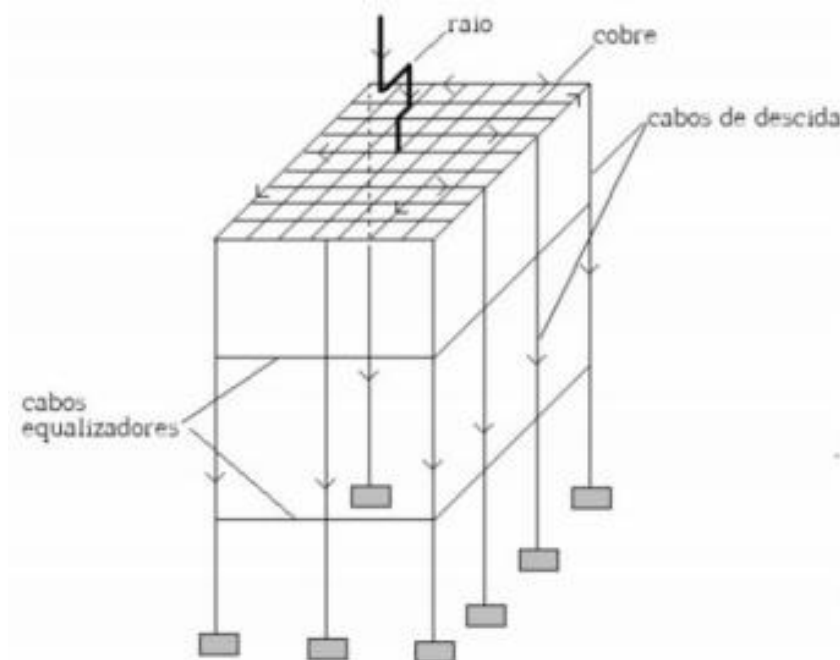
O método da Gaiola de Faraday recebe esse nome em homenagem ao seu idealizador Michael Faraday. Para ele, é possível blindar um volume dos efeitos eletromagnéticos quando esse volume é envolvido por uma gaiola metálica [19].

A topologia visa envolver a parte superior da construção com uma malha de condutores elétricos sem isolamento, com distância entre eles fixada de acordo com o nível de proteção desejado. Assim, a metodologia é formada por várias quadriculas de material condutor configurando anéis em torno da edificação que, pelo seu arranjo e material, blindam a estrutura protegendo-a da penetração do raio no seu interior.

O princípio básico para a proteção do tipo gaiola de Faraday é a Lei de Lenz, que parte da premissa que qualquer sistema condutor em anel tende a reagir às variações de campos magnéticos pela circulação da corrente induzida no anel, que, por sua vez, cria um campo magnético contrário à variação do campo magnético indutor [19].

Longe de ser um modelo ideal, a descarga atmosférica ao atingir uma estrutura produz uma dissipação não uniforme, causando induções internas devido à variação do campo magnético existente no interior da gaiola. Essencialmente, o funcionamento da proteção do tipo Gaiola de Faraday é bem-sucedido porque as correntes induzidas nas quadriculas criam campos magnéticos de oposição, levando o raio para as bordas da malha e o obrigando a fluir para o cabo de descida [19], como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Condução da corrente de descarga atmosférica para o subsistema de descida e aterramento.



Fonte: [19].

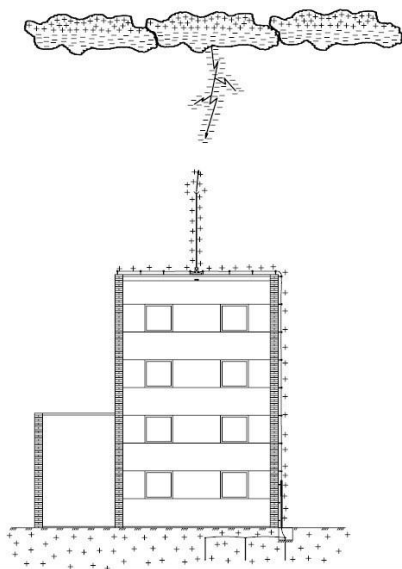
A qualidade da blindagem que envolve a edificação é diretamente proporcional ao número de malhas que a Gaiola de Faraday possui, podendo-se assim constatar que um volume só é inteiramente protegido por esse método quando envolto por uma caixa metálica totalmente condutiva, porém, como isso é inviável na prática, as distâncias estipuladas dos espaçamentos das malhas, em questão de projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas, variam de acordo com o nível de proteção na qual é qualificada a estrutura [20].

#### **1.2.6.1.2 Método Franklin**

Inventado por Benjamin Franklin em meados do século XVIII, a topologia é baseada no princípio das pontas. Um ou mais mastros com captor Franklin – em forma de tridente sob um poste metálico – é instalado no topo da edificação, de maneira que, quando o mesmo se encontra abaixo de uma nuvem carregada, produz alta concentração de cargas elétricas e torna o campo magnético intenso [12]. Assim, o gradiente de tensão rompe o dielétrico do ar em suas proximidades (Figura 10). Normalmente, a haste metálica é pontiaguda, instalada em altura dimensionada acima do topo de uma estrutura conectada a um condutor que interliga a haste ao solo. Todo esse conjunto capta a descarga elétrica e a transporta para dispersão em terra através dos subsistemas de descida e aterramento.

Pode-se observar, na Figura 10, a edificação momentos antes de ser atingida por uma descarga atmosférica. Note a concentração de cargas elétricas na base da edificação migrando para o captor localizado no topo.

Figura 10 – Haste de Franklin na proteção da edificação.

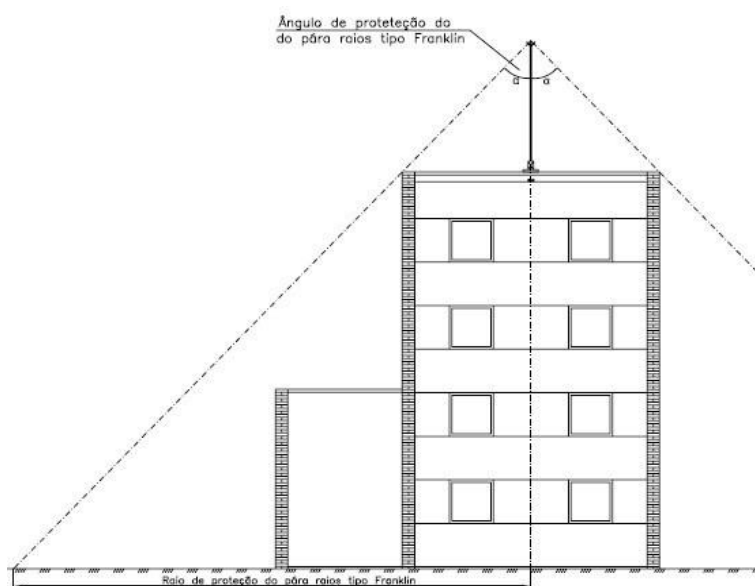


Fonte: [18].

Existem dois modelos das áreas de proteção para um captor, sendo eles: Ângulo de Proteção e Raio de atração. A diferença entre essas duas áreas de proteção se dá em função do rigor em sua determinação [21].

O conceito do método do ângulo de proteção determina que qualquer descarga atmosférica destinada a atingir uma estrutura dentro do cone de proteção, seja desviada para o SPDA e drenada até a terra pelos seus subsistemas. Ao se utilizar o cone regular como zona espacial de proteção do sistema [12], é essencial o dimensionamento a altura mínima da haste de Franklin de modo que a estrutura a ser protegida fique inteiramente dentro do volume de proteção, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Volume e ângulo de proteção – Haste Franklin.



Fonte: [21].

#### 1.2.6.1.3 Método da Esfera Rolante

O método da esfera Rolante é o mais recente dos acima mencionados e estabelece, por meio do posicionamento de elementos verticais, o volume de proteção do subsistema de captação em um SPDA para qualquer direção. Este método segue a mesma filosofia do sistema tipo Franklin. Dos dois modelos de incidência, agora ele utiliza um raio de atração de descarga e considera a hipótese de descarga lateral, presente no sistema tipo Faraday.

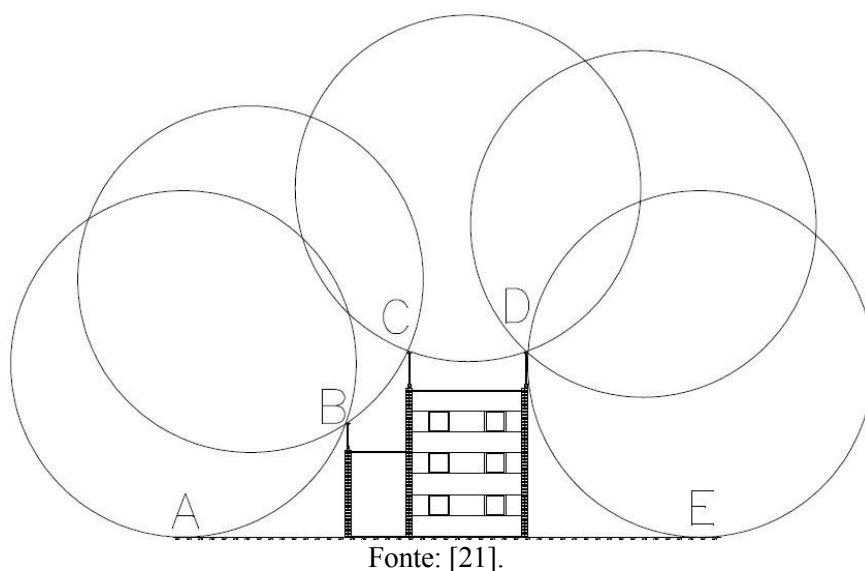
A aplicação do método da esfera rolante consiste em rolar-se uma esfera imaginária, com raio definido em função do nível de proteção, por todas as partes externas da edificação. O conceito por trás do raio da esfera especificado na NBR é um pouco mais abstrato porque trata da distância estimada em que a conexão da descarga descendente e ascendente ocorreria com grande probabilidade [21].

Assim, os locais em que a esfera tangencia a estrutura são preferenciais (tem maior probabilidade) para o impacto direto das descargas atmosféricas. Portanto, pode-se dizer que “os locais onde a esfera toca mostram onde provavelmente os raios irão impactar” e, portanto, devem ser protegidos.

Existe uma maneira mais ilustrativa de avaliação da proteção de uma edificação segundo o método das esferas rolantes. Cada um dos pontos tocados pela esfera representa

um ponto exposto a incidência de uma descarga atmosférica. Dessa forma, os captadores são posicionados de uma maneira em que a esfera gire sob a edificação sem tocar, ou tocando o mínimo possível na superfície e lateral. A Figura 12 ilustra uma esfera rolando sobre uma edificação.

Figura 12 – Esfera rolando sobre uma edificação.



A esfera toca somente os pontos 'A', 'B', 'C', 'D' e 'E', formando uma região fechada que representa a área de proteção dos captores 'B', 'C' e 'D' sendo que 'C' e 'D' poderiam ainda ser menores do que apresentado no esquema acima.

Para comparação feita sob o ponto de vista comercial, o método a ser escolhido dependerá das dimensões e da topologia da cobertura e elementos a serem protegidos que estão instalados acima dessa cobertura. Especificamente, o método eletrogeométrico é indicado para edificações de altura elevada. Há também a possibilidade de utilização de sistemas híbridos, com a utilização de anéis de cintamento.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Quando se trata de SPDA, existem estudos avançados e cálculos buscando mensurar o impacto de uma descarga atmosférica nas instalações. Contudo, o alto custo dos equipamentos utilizados nessas pesquisas os tornam inacessíveis na utilização em universidades – especificamente nas salas de aulas.

Baseado no fato de que as descargas atmosféricas são causadores de danos materiais e até mesmo mortes todos os anos no mundo inteiro, o trabalho busca empregar soluções de baixo custo baseadas nas técnicas relacionadas à descarga atmosférica. Como simulações e ensaios estão sempre presentes na vida acadêmica validando o conhecimento teórico, a bancada multidisciplinar apresenta-se versátil, eficiente e útil na propagação de conhecimento.

O projeto tem três grandes apelos:

- a) Revisão Bibliográfica: Sobre os três principais métodos, conceito físico e fundamentação do experimento.
- b) Simular as descargas e ter domínio sobre os principais parâmetros elétricos envolvidos.
- c) Visualização acadêmica, em termos de proporção, da disposição de componentes estruturais de SPDA.

Resumidamente, o alto custo computacional motiva pesquisas relacionadas à simplificação do assunto, principalmente em salas de aula resultando na formação de profissionais hábeis.

## **1.4 OBJETIVOS**

### ***1.4.1 Objetivo Geral***

A partir de uma revisão integrativa dos principais conceitos de SPDA e conceitos básicos de aterramento, construir uma bancada experimental multidisciplinar didática capaz de facilitar a compreensão do funcionamento de SPDA com base nas simulações de descarga e análise do comportamento do sistema diante de um surto elétrico.

### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Desenvolver um sistema gerador de arco elétrico;
- Construir dois protótipos de SPDA tipo Faraday e Franklin, com o intuito de criar um modelo completo em escala reduzida do sistema;
- Facilitar a compreensão do funcionamento das topologias com base em simulações de descarga e análise de comportamento frente a um surto elétrico.
- Mostrar e validar a propriedade das pontas, proporcionada principalmente pelo captor Franklin;
- Proporcionar entendimento do conceito de tensão de passo e tensão de toque; e
- Verificar o comportamento de elevadas correntes e tensões em um condutor.

## **2. METODOLOGIA DE PROJETO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

---

Os efeitos de um raio podem ser devastadores. As descargas atmosféricas que atingem estruturas de modo geral são perigosas às pessoas, às próprias estruturas, seus conteúdos e instalações. Quando as descargas elétricas entram em contato direto com quaisquer tipos de construção, são registrados grandes danos materiais que poderiam ser evitados caso essas edificações estivessem protegidas adequadamente por Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

Um SPDA tem por objetivo captar, direcionar e dissipar à terra as descargas atmosféricas evitando possíveis danos ao sistema elétrico, edificações e pessoas. Em termos físicos, neutraliza, pelo poder da blindagem eletrostática e o princípio das pontas, o crescimento do gradiente de potencial elétrico entre o solo e as nuvens, através do permanente escoamento de cargas elétricas entre a nuvem e o solo, ou vice versa. A finalidade do seu projeto está em interceptar as descargas atmosféricas que atingem diretamente a parte superior da estrutura ou suas laterais, permitindo que a corrente elétrica decorrente flua para a terra sem ocasionar transitórios perigosos à vida e ao patrimônio, centelhamento e efeitos térmicos e mecânicos danosos à estrutura [6].

Não há dispositivos ou métodos capazes de modificar os fenômenos climáticos naturais a ponto de se eliminar a ocorrência de descargas atmosféricas. Entretanto, é importante, quando o assunto é SPDA, a consideração das prescrições e medidas de proteção contidas na NBR 5419:2015 em todas as suas etapas, do projeto à emissão da documentação final.

A ABNT NBR 5419:2015 define critérios referentes à proteção de estruturas e é dividida nas partes ABNT NBR 5419-1 [6], ABNT NBR 5419-2 [7], ABNT NBR 5419-3 [8] e ABNT NBR 5419-4 [9].

O documento é aplicável a projeto, instalação, inspeção e manutenção de um SPDA para estruturas sem limitação de altura. Além disso, estabelece medidas de proteção contra lesões a seres vivos causadas pelas tensões de passo e toque provenientes das descargas atmosféricas.

**“A norma aplica-se às estruturas comuns, utilizadas para fins comerciais, industriais, agrícolas, administrativos ou residenciais, chaminés de grande porte, estruturas contendo líquidos ou gases inflamáveis, antenas externas e aterramento de guindastes/gruas. Porém, não se aplica a sistemas ferroviários, sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica externos às estruturas, sistemas de telecomunicação externos às estruturas, veículos, aeronaves, navios e plataformas marítimas.” [6]**

Os estabelecimentos sem a proteção de um SPDA conforme NBR 5419 estão desprotegidos e propensos a danos causados pelo fogo, explosões ou picos de energia elétrica e representa risco a segurança para os ocupantes. A parte 1 da norma estabelece princípios gerais, trata a ameaça da descarga atmosférica, bem como requisitos para a determinação de proteção contra descargas atmosféricas.

A necessidade de proteção, os benefícios econômicos da instalação de medidas e suas escolhas devem ser determinados em termos do gerenciamento de risco. A apresentação dos riscos, estabelecimento dos requisitos para seu gerenciamento e a análise dos perigos ligados às descargas atmosféricas são descritos na parte 2.

Por razões práticas, os critérios para projeto, instalação e manutenção das medidas de proteção são considerados em dois grupos separados. O primeiro grupo, válido para a proposta do projeto e presente na parte 3 da norma, se refere às medidas de proteção para reduzir danos físicos e riscos à vida dentro de uma estrutura causados pelas tensões de toque e passo nas vizinhanças de um SPDA. O outro grupo descrito na parte 4 se refere às medidas

de proteção para reduzir falhas de sistemas elétricos e eletrônicos internos, bem como propor segurança aos ocupantes.

O presente capítulo estudará somente a proteção contra descargas atmosféricas que incidam sobre as construções. O trabalho considera definições e informações apresentadas nas duas primeiras partes da norma, porém dispensa a análise de risco, fontes e tipos de danos e perdas, como também o cálculo da área de exposição [27].

Medidas de proteção são medidas a serem adotadas na estrutura com o objetivo de reduzir riscos. Todas as medidas de proteção contra descargas atmosféricas da NBR 5419, projetadas e instaladas por profissionais habilitados e capacitados, são eficazes e compõem a proteção completa contra descargas atmosféricas.

Considera-se que a principal e mais eficaz medida de proteção contra danos físicos é o SPDA. A compreensão das suas diferentes classes (seção 2.1) é fator necessário para seu projeto, que é composto basicamente de sistemas de proteção internos e externos. O SPDA interno (*internal lightning protection system*) consiste de ligações equipotenciais e/ou isolamento elétrica do SPDA externo. Este capítulo foca no SPDA externo e sua decomposição se dará na seção 2.2.

## 2.1 CLASSES DO SPDA

As características de um SPDA são determinadas pelas características da estrutura a ser protegida e pelo nível de proteção considerado para descargas atmosféricas. O nível de proteção (I a IV) é escolhido pela avaliação de risco, sendo importante e correspondente ao número da classe, sendo assim apresentados na Tabela 3 [7].

Tabela 3 – Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe de SPDA

| Nível de proteção | Classe de SPDA |
|-------------------|----------------|
| I                 | I              |
| II                | II             |
| III               | III            |
| IV                | IV             |

Fonte: [8].

A especificação da classe de SPDA é importante para a definição dos parâmetros da descarga atmosférica na edificação, definição do raio da esfera rolante, tamanho da malha e ângulo de proteção, distâncias típicas entre condutores de descida e dos condutores em anel, distância de segurança contra centelhamento perigoso e comprimento mínimo dos eletrodos de terra.

## 2.2 SPDA EXTERNO

O SPDA externo (*external lightning protection system*) é destinado a interceptar descargas diretas à estrutura, conduzi-las e dispersá-las para o solo de forma segura. Na maioria dos casos, o SPDA externo pode incorporar partes da estrutura a ser protegida [8].

É importante que essa atividade não cause danos térmicos ou mecânicos, nem centelhamentos perigosos, no ponto de impacto, ou nos condutores percorridos pela corrente de descarga, que possam iniciar fogo ou explosões. Caso contrário, deve ser considerado SPDA externo isolado. O uso de um SPDA isolado pode ser conveniente quando são previstas mudanças na estrutura de modo a requerer modificações no sistema.

As partes condutoras externas constituem-se de elementos metálicos que penetram ou saem da estrutura a ser protegida que podem se tornar um caminho para parte da corrente da descarga atmosférica, como tubulações, linhas metálicas, dutos metálicos etc.

Os SPDA podem ser projetados e construídos utilizando materiais condutores naturais, isto é, partes integrantes da estrutura que não podem ser alteradas, como armaduras de pilares e fundação, constituídas de aço, interconectadas estruturando o concreto armado, vigas metálicas da estrutura, etc.

Há também os materiais condutores não naturais, isto é, aqueles que não integram a estrutura, como cabos de cobre, alumínio, aço, aço cobreado etc., e que foram ali instalados com a finalidade única de proteger a estrutura contra descargas atmosféricas.

Os SPDA externos, de forma geral, são constituídos, classicamente, de três partes bem definidas, porém intimamente interligadas: Subsistema de captação, subsistema de descida e subsistema de aterramento [22]. A rede captora intercepta descargas atmosféricas

diretas à estrutura, as descidas conduzem a corrente para o subsistema de aterramento que dissipa essa corrente proveniente das descargas para a terra seguramente. Além disso, os projetos de um sistema externo podem ser definidos, de forma geral, por dois diferentes tipos de construção, sendo protegidas por sistemas naturais e estruturas protegidas por elementos não naturais.

### ***2.2.1 Subsistemas de captação***

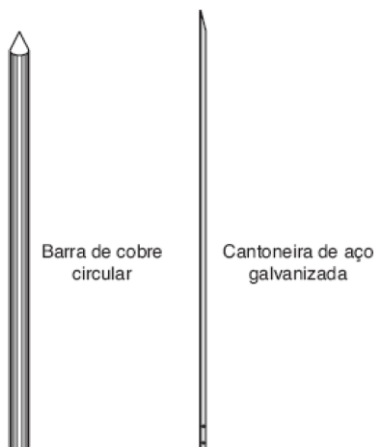
Uma vez que se tem a probabilidade de ocorrência de correntes de descarga (Tabela 1), é possível reduzir a probabilidade de penetração da corrente de descarga na estrutura, a depender do nível de proteção. Essa taxa é consideravelmente limitada pela presença de subsistemas de captação apropriadamente instalados.

O subsistema de captação (*air-termination system*) é a parte de um SPDA externo que podem ser compostos de combinações de hastes (incluindo mastros), condutores em malha ou cabos em catenária suspensos [8].

O correto posicionamento dos elementos captadores e do subsistema de captação é que determina o volume de proteção. Esses dispositivos são expostos, projetados e posicionados na banda mais elevada da edificação, pontas expostas e extremidades, sendo responsáveis pelo contato direto e interceptação das descargas atmosféricas.

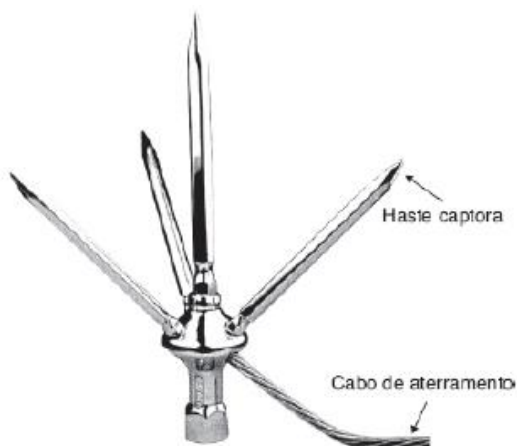
O subsistema de captação instalado no nível superior de qualquer fachada depende do método considerado para a proteção. Mesmo assim, é importante que os captadores (Figuras 13 e 14) sejam interconectados ao nível da cobertura para assegurar a divisão de corrente em pelo menos dois caminhos.

Figura 13 – Captor de haste de ponta: Barra de cobre circular e cantoneira de aço galvanizada



Fonte: [22].

Figura 14 – Captor tipo Franklin



Fonte: [22].

O projeto de uma rede captora de descargas diretas não deverá, porém, atender apenas a solução geométrica apresentada, uma vez que os aspectos de estética (impacto visual) e de custo (executabilidade do projeto) são também variáveis importantes a serem consideradas [23]. Os captores podem ser classificados segundo sua natureza construtiva, podendo ser definidos como captores naturais e não naturais.

#### **2.2.1.1 Captores naturais**

Esses captores são constituídos de elementos condutores expostos, normalmente partes integrantes da edificação que se quer proteger. Podem ser considerados captores naturais coberturas metálicas, mastros ou quaisquer elementos condutores integrados à

edificação, bem como estruturas metálicas que, cobrem a estrutura protegida e fornecem continuidade com espessura e continuidade aceitáveis de acordo com a Tabela 4, sem revestimento com material isolante.

Tabela 4 – Espessuras mínimas das chapas metálicas ou tubulações metálicas em subsistemas de captação.

| Classe do SPDA | Material                               | Espessura da chapa com perfuração $t$ (mm) | Espessura da chapa lisa sem perfuração $t'$ (mm) |
|----------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| I a IV         | Aço (Inoxidável, galvanizado a quente) | 4                                          | 0,5                                              |
|                | Cobre                                  | 5                                          | 0,5                                              |
|                | Alumínio                               | 7                                          | 0,65                                             |

Fonte: [8].

### 2.2.1.2 Captores não naturais

São compostos de elementos condutores expostos, normalmente instalados sobre a cobertura e a lateral das edificações, cuja finalidade é estabelecer o contato direto com as descargas atmosféricas, protegendo os prédios de acordo com a classe do SPDA. São exemplos de captores não naturais os condutores de cobre nus expostos em forma de malha, captores em forma de haste e o captor tipo Franklin.

Pesquisas indicam que a probabilidade do impacto de descargas atmosféricas de baixa amplitude na fachada de estruturas menores de 60 m de altura são suficientemente baixas podendo ser desconsideradas. No caso de estruturas maiores que 60m, faz-se necessária a utilização de captores para descargas laterais, bem como anéis de cintamento conectados com o subsistema de descida.

### 2.2.2 Subsistema de descida

O subsistema de descida (*down-conductor system*) é o trecho de um SPDA externo, constituído de elementos condutores, expostos ou não, que tem como objetivo conduzir as correntes elétricas dos raios que atingem os captores, do subsistema de captação ao subsistema de aterramento [8].

Os condutores de descida devem ser instalados, preferencialmente, em cada borda da estrutura, além dos demais condutores impostos pela distância de segurança calculada e apresentada na Tabela 5. Com o propósito de reduzir a probabilidade de danos devido à corrente da descarga atmosférica fluindo pelo SPDA, os condutores de descida devem ser arrançados a fim de proverem: diversos caminhos paralelos para a corrente elétrica com o menor comprimento possível e com equipotencialização com as partes condutoras. Sendo assim, uma vez definida a captação, as descidas devem ser dispostas de pelo menos um condutor.

Para melhor distribuição das correntes das descargas atmosféricas, devem ser consideradas interligações horizontais, chamadas de anéis de cintamento, com os condutores de descida, provendo continuidade elétrica. Totalmente relacionada com a distância de segurança dada em 6.3 de [8], as distâncias entre os condutores de descida e anéis de cintamento são dados na Tabela 5, sendo aceitável alteração de  $\pm 20\%$  das dimensões.

Tabela 5 – Valores típicos de distância entre os condutores de descida e os anéis de cintamento de acordo com a classe de SPDA

| Classe do SPDA | Distâncias (m) |
|----------------|----------------|
| I              | 10             |
| II             | 10             |
| III            | 15             |
| IV             | 20             |

Fonte: [8].

O número de descidas deve ser função do tipo de rede captora utilizada, da geometria da instalação a ser protegida (área de cobertura e altura), bem como dos seus aspectos arquitetônicos [23]. Os condutores de descida também são classificados segundo sua natureza construtiva – sendo naturais e não naturais.

#### ***2.2.2.1 Subsistemas de descida naturais***

São elementos condutores, normalmente partes integrantes da edificação, que, por sua natureza condutiva, permitem escoar para o subsistema de aterramento as correntes elétricas resultantes das descargas atmosféricas. Podem ser consideradas como condutores naturais de descida, instalações metálicas, armaduras de estruturas de concreto armado eletricamente contínuas, vigamento de aço, perfis e subconstruções metálicas das fachadas

de modo que haja equipotencialização elétrica, bem como dimensões conforme os requisitos para condutores de descida mostrados no ANEXO A.

#### ***2.2.2.2 Subsistemas de descida não naturais***

Condutores de cobre nus instalados ou embutidos nas laterais das edificações, barras de construção no interior dos pilares da edificação destinadas para uso exclusivo do SPDA são exemplos de subsistemas de descida não naturais. Os efeitos neles são divididos em térmicos e mecânicos. Os efeitos térmicos estão relacionados ao aquecimento resistivo e os efeitos mecânicos são devidos às interações magnéticas.

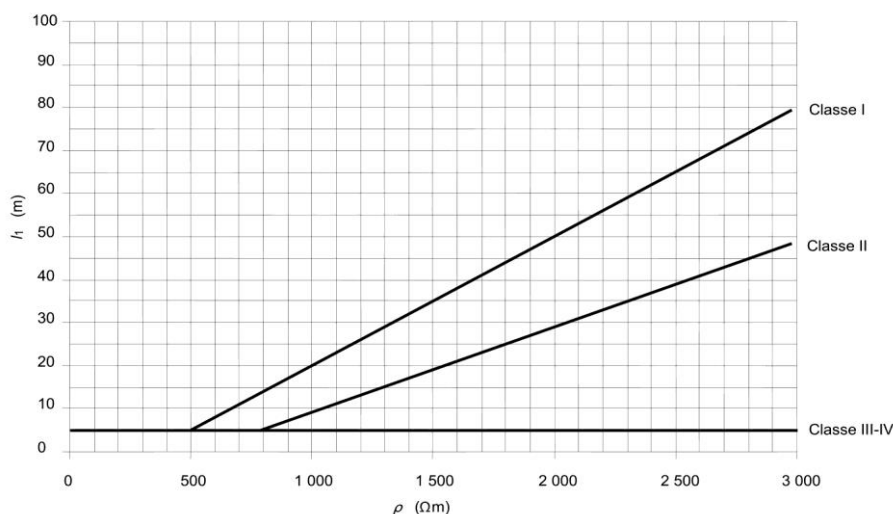
#### ***2.2.3 Subsistema de aterramento***

A parte de um SPDA externo que tem como objetivo conduzir e dispersar a descarga atmosférica ao solo é denominada subsistema de aterramento (*earth-termination system*) [8]. Em termos gerais, ele é constituído de elementos condutores enterrados ou embutidos nas fundações das edificações e responsável pela dispersão das correntes elétricas ao solo.

Quando se trata da dispersão da corrente da descarga atmosférica, o método mais importante de minimizar qualquer sobretensão potencialmente perigosa é estudar e aprimorar a geometria e as dimensões do subsistema de aterramento com respeito aos padrões de segurança. Deve-se obter a menor resistência de aterramento possível, compatível com o arranjo do eletrodo, a topologia e a resistividade do solo no local. Porém, vale ressaltar que apenas baixos valores de resistência não são suficientes para se assegurar a confiabilidade do sistema de aterramento após anos de instalação.

Na Figura 15 estão representados os comprimentos dos eletrodos de aterramento de acordo com a resistividade do solo e a classe da proteção. Dela, percebe-se que as classes III e IV independem da resistividade do solo e que, para resistividades maiores que  $3000\Omega m$ , é necessário prolongar as curvas através de equação linear.

Figura 15 – Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento de acordo com a classe do SPDA.



Fonte: [8].

Na norma de 2005 era recomendado valor máximo de resistência de aterramento equivalente a 10  $\Omega$  [23]. Com a revisão de 2015, o valor sugerido foi suprimido. Entretanto, é importante o dimensionamento adequado do sistema de aterramento, baseado na estratificação do solo e verificação das características do terreno.

Uma vez iniciada uma construção em um determinado local, o acesso restrito ao solo e à armadura de aço das estruturas dificulta o aproveitamento desses elementos como componentes naturais do SPDA, notadamente o subsistema de aterramento. Por esta razão, a resistividade e tipo do solo devem sempre ser considerados nos estágios iniciais do empreendimento, sendo estas informações fundamentais para o projeto do sistema de aterramento e que podem exigir adequações no projeto da estrutura da fundação.

Sob o ponto de vista da proteção contra descargas atmosféricas, é preferível uma única infraestrutura de aterramento integrada e adequada para todos os propósitos. O eletrodo deve ser comum, com mesmo material condutor dos outros subsistemas, de modo a evitar corrosão, e atender à proteção contra descargas atmosféricas, sistemas de energia elétrica e sinal (telecomunicações, TV a cabo, dados etc.).

A profundidade de enterramento e o tipo de eletrodos de aterramento devem ser constituídos de forma a minimizar os efeitos da corrosão e dos efeitos causados pelo ressecamento do solo e assim estabilizar a qualidade e a efetividade do conjunto. O eletrodo

de aterramento em anel deve ser enterrado na profundidade de no mínimo 0,5 m e ficar posicionado à distância aproximada de 1 m ao redor das paredes externas. No caso da impossibilidade técnica da construção do anel externo à edificação, este pode ser instalado internamente. Para isto, devem ser tomadas medidas visando minimizar os riscos causados por tensões superficiais.

Eletrodos de aterramento devem ser instalados de tal maneira a permitir sua inspeção durante a construção. Por isso, é importante ter caixas de inspeção e conexões de ensaio nas junções entre cabos de descida e eletrodos de aterramento.

Da mesma forma que os últimos dois subsistemas, os de aterramento podem ser naturais ou não naturais.

#### ***2.2.3.1 Subsistemas de aterramento naturais***

São constituídos de elementos metálicos embutidos nas fundações das edificações e parte integrante destas. São exemplos de subsistemas de aterramento naturais a armação das fundações de concreto armado das edificações enterradas e outros meios equivalentes. Componentes naturais feitos de materiais condutores, os quais devem permanecer dentro ou na estrutura definitivamente e não podem ser modificados, por exemplo, armaduras de aço interconectadas estruturando o concreto armado, vigamentos metálicos da estrutura etc., podem ser utilizados como componente natural do SPDA.

Quanto aos eletrodos de aterramento naturais, as armaduras de aço interconectadas nas fundações de concreto, ou outras estruturas metálicas subterrâneas disponíveis, podem ser utilizadas como eletrodos de aterramento, desde que sua continuidade elétrica seja garantida.

Os componentes metálicos não definidos aqui devem ficar dentro do volume de proteção ou incorporados complementarmente ao SPDA.

### **2.2.3.2 *Subsistemas de aterramento não naturais***

Esses subsistemas são constituídos de elementos condutores enterrados horizontal ou verticalmente que dispersam as correntes elétricas no solo. Esses elementos podem ser de cobre nus diretamente enterrados em torno da edificação e hastes de terra com cobertura eletrolítica de cobre enterradas verticalmente, interligadas aos condutores horizontais e verticais. Os materiais empregados nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, bem como as configurações e dimensões mínimas estão no ANEXO B.

Esses materiais normalmente podem ser instalados ao ar livre, embutidos na terra, no concreto simples ou reboco ou concreto armado sendo o alumínio o material mais delicado por conta das suas limitações físicas.

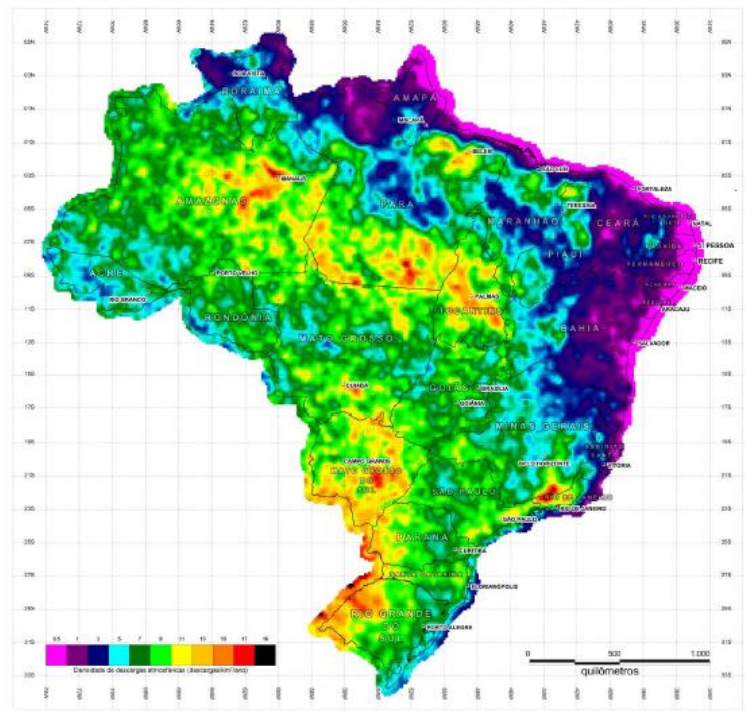
## **2.3 DIMENSIONAMENTO**

É de suma importância o sistema de proteção contra descargas atmosféricas estar adequadamente instalado e dimensionado para que as tensões ao longo do sistema não sejam elevadas a ponto de comprometer a segurança da edificação e seus componentes interiores [20]. Para [12], o dimensionamento leva em consideração o nível de proteção e a altura da edificação.

Como parte inicial do dimensionamento, um dos primeiros passos a serem dados para a definição do método a ser utilizado é a escolha do nível de proteção de uma instalação – determinado na análise de risco em [7].

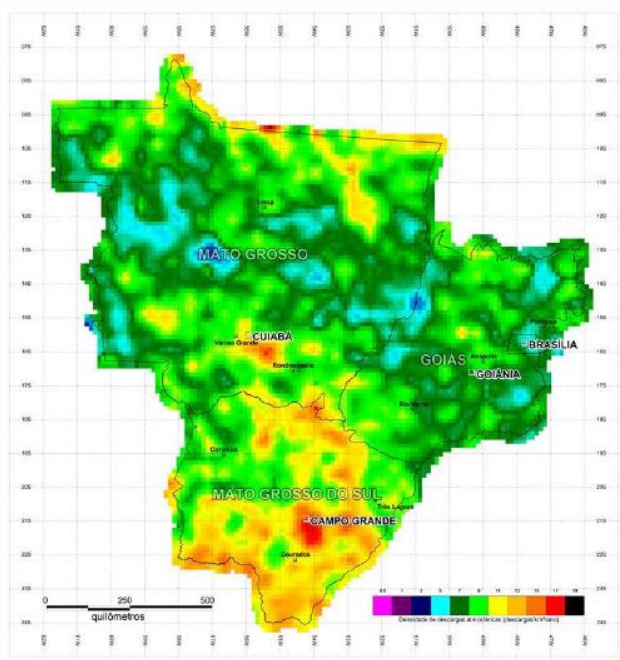
Outro fator importante no projeto é a análise do nível de incidência de raios no local da construção, bem como a densidade de descargas atmosféricas, presente nas Figuras 16 e 17, que são baseadas no índice cerâmico e importantes para o projetista estabelecer critérios de seguranças mais precisos.

Figura 16 – Densidade de descargas atmosféricas no Brasil



Fonte: [7].

Figura 17 – Densidade de descargas atmosféricas no centro-oeste.



Fonte: [7].

Os métodos de proteção descritos na NBR 5419 são o método das malhas (Faraday), método do ângulo de proteção (Franklin) e método da esfera rolante (Eletrogeométrico).

### 2.3.1 Método Faraday

Em seus experimentos, Faraday descobriu que ao envolver um volume por uma gaiola metálica, este ficava blindado do efeito de campos eletromagnéticos. Além disso, qualquer corrente circulante nas malhas da gaiola protege o seu interior de acordo com o princípio da blindagem eletrostática [23].

Uma malha de condutores pode ser considerada como um bom método de captação para proteger superfícies planas. Para tanto, condutores captadores devem ser instalados nas extremidades das estruturas, bem como nas cumeeiras dos telhados a depender do declive.

Para garantir a eficiência deste método de proteção, é importante o respeito do limite de tamanho máximo das quadrículas da gaiola tanto na parte superior como na lateral da edificação. Também se deve garantir que nenhuma parte da edificação ultrapasse os limites internos da superfície formada pela Gaiola de Faraday. Segundo a NBR 5419, as dimensões dos módulos que compõem a malha de captação não podem ser maiores que os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Tamanho máximo da malha correspondente a classe do SPDA.

| Classe do SPDA | Máximo afastamento dos condutores da malha (m) |
|----------------|------------------------------------------------|
| I              | 5x5                                            |
| II             | 10x10                                          |
| III            | 15x15                                          |
| IV             | 20x20                                          |

Fonte: [8].

A seção mínima dos condutores de captação, descida e hastes captoras que compõem a Gaiola de Faraday será adotada sob o critério do ANEXO A. Visando resumir o uso de condutores na configuração encordado, a Tabela 7 torna simples a definição

de acordo com o material de composição dos cabos nus – sujeitos à incidência direta de uma descarga atmosférica.

Tabela 7 – Secção mínima dos condutores componentes da Gaiola de Faraday.

| Material        | Secção             |
|-----------------|--------------------|
| Cobre           | 35 mm <sup>2</sup> |
| Alumínio        | 70 mm <sup>2</sup> |
| Aço galvanizado | 50 mm <sup>2</sup> |

Fonte: [8].

É válido mencionar que algumas vezes são utilizadas hastes verticais na captação. Essas hastes obedecem ao princípio das pontas e aumentam a probabilidade do ponto de descarga se dar pelas hastes e não pelos condutores da malha de captação. Entretanto, não modificam o desempenho do sistema.

No caso em que a cobertura de uma edificação é metálica e atende os requisitos de componente natural do SPDA da NBR 5419, ocorre a blindagem completa da Gaiola de Faraday e dispensa a instalação de uma malha no topo da edificação [8].

### 2.3.2 Método Franklin

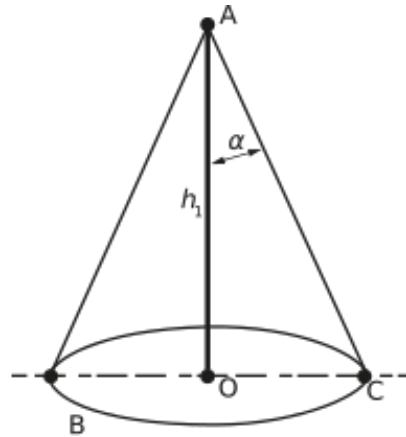
O dimensionamento por este método leva em consideração o nível de proteção e a altura da edificação para se obter o ângulo de proteção dos captosres em relação à posição da área de exposição analisada [12 e 23]. A zona de proteção para este método é em formato de cone, com ângulo entre sua altura e geratriz variante a depender da altura da edificação e o nível de proteção estabelecido pelo tipo e ocupação da estrutura [20].

A posição do subsistema de captação é considerada adequada se a estrutura a ser protegida estiver situada totalmente dentro do volume de proteção provido pelo subsistema de captação. Para a determinação do volume, devem ser consideradas apenas as dimensões físicas dos elementos metálicos do subsistema de captação.

O volume de proteção provido por um mastro é definido pela forma de um cone circular cujo vértice está posicionado no eixo do mastro, o ângulo de proteção  $\alpha$ , dependendo da classe do SPDA, e a altura do mastro.

Exemplos de volumes de proteção são dados nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Volume de proteção provido por um mastro



Fonte: [8].

Onde:

A: topo do captor;

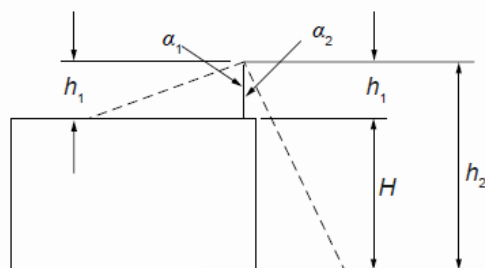
B: plano de referência;

OC: raio da base do cone de proteção; e

$h_1$ : altura de um mastro acima do plano de referência.

No caso de a edificação não ser totalmente protegida com o uso de um captor Franklin, faz-se necessária a distribuição de mais captores no topo da estrutura. A Figura 19 mostra o volume de proteção provido por um mastro para duas alturas diferentes. Assim, o volume de proteção dispõe de duas alturas distintas, sendo  $h_1$  a altura do mastro,  $H$  a altura da edificação e  $h_2$  a altura do solo até o topo do captor.

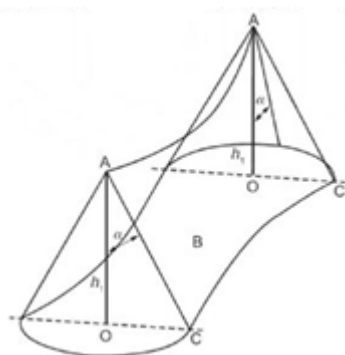
Figura 19 – Volume de proteção de um mastro deslocado do centro da edificação.



Fonte: [8].

No caso da utilização de dois mastros não for suficiente para a proteção, há ainda a alternativa do uso de um condutor suspenso entre os captores. Assim, há uma área de proteção virtualmente maior sob o plano de referência e esse método evita o uso de mais um captor. Na Figura 20 o ponto A representa o topo do captor, na área B está o plano de referência e OC é o raio da base do cone de proteção.

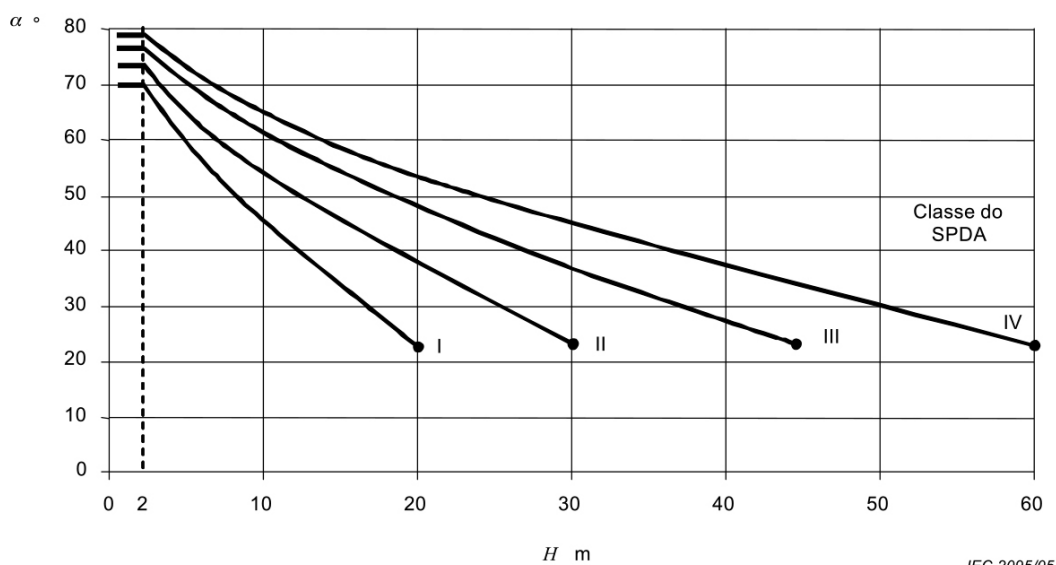
Figura 20 – Volume de proteção provido por condutor suspenso.



Fonte: [8].

O ângulo de proteção para o método SPDA Franklin é definido de acordo com as especificações de [8], especificamente vistos na Tabela 2 e Figura 1 de [8] e varia conforme o nível de proteção e altura da edificação. Podendo ser verificada conforme quadro da norma técnica citada. A Figura 21 reproduz os ângulos de proteção do método de Franklin, sendo  $H$ , em metros, a altura do captor acima do plano de referência da área a ser protegida. Assim, percebe-se que o ângulo não é alterado para valores de  $H$  abaixo de 2m.

Figura 21 – Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA



IEC 2095/05

Fonte: [8].

De acordo com o nível de proteção e altura do captor é determinado um ângulo de proteção. A geratriz rotaciona sob o eixo do captor da edificação e origina um cone. Qualquer descarga que poderia atingir esse cone é interceptada pelo SPDA. Estes captadores podem ser hastes, cabos ou elementos naturais. Dessa maneira, a circulação da corrente de descarga se daria pelos condutores previstos no SPDA, protegendo o volume abaixo do cone.

### 2.3.3 Método da Esfera Rolante

O método da esfera rolante é tratado no anexo C da NBR 5419:2005 e permanece sem alterações na norma atualizada.

O dimensionamento é realizado adotando o modelo eletrogeométrico, também conhecido como modelo da esfera fictícia. O modelo consiste em fazer rolar uma esfera fictícia sobre a estrutura, em todos os sentidos, determinando assim os locais com maior probabilidade de serem atingidos por uma descarga atmosférica. O adequado posicionamento do subsistema de captação na aplicação deste método ocorre se nenhum ponto da estrutura a ser protegida entrar em contato com a esfera. Sendo assim, a esfera somente poderá tocar o próprio subsistema de captação.

O raio da esfera fictícia é definido em função do nível de proteção adotado depois de efetuada a análise de risco e considerada a recomendação do SPDA, de acordo com as

indicações da NBR 5419. De forma simplificada, a norma define raios da esfera fictícia padronizados em função da corrente elétrica pré-definida para as classes de proteção, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Raio da esfera rolante fictícia conforme a classe do SPDA adotada

| Nível de Proteção | Raio |
|-------------------|------|
| I                 | 20m  |
| II                | 30m  |
| III               | 45m  |
| IV                | 60m  |

Fonte: [8].

Esta proteção deve ser obtida por meio da instalação de condutores de tal modo que eles apoiem a esfera rolante sem permitir que ela toque na estrutura a ser protegida.

O método da esfera rolante é aplicado somente para o posicionamento do subsistema de captação na parte superior da estrutura. Estatísticas mostram que a probabilidade de as descargas atmosféricas ocorrerem na lateral das estruturas aumenta consideravelmente em função da altura do ponto de impacto, nas estruturas de altura elevada, quando medidas a partir do solo.

## 2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Os três métodos apresentados na última seção são validados pela NBR 5419 e são constituídos de subsistemas de captação, subsistemas de descida e de aterramento, sendo o subsistema de aterramento comum para todos os casos.

O método das malhas é apropriado para telhados horizontais e inclinados sem curvatura. Além disso, é adequado para proteger superfícies laterais planas contra descargas atmosféricas laterais. Ele é aplicável a edificações de grande área de cobertura (prédios industriais), onde a adoção de outras técnicas de dimensionamento da rede captora implica a utilização de grande número de mastros captadores, que demandam ampla rede de condutores de interligação que, por si só, já é uma aproximação da Gaiola de Faraday [23].

Fazendo uso da Figura 21, o método de Franklin é indicado para edificações com formato simples e alturas baixas, estando sujeito aos limites de altura dos captores. Quando se olha para a figura relativa ao ângulo de proteção correspondente à classe SPDA, para valores de  $H(m)$  acima dos valores finais da curva de cada classe, são aplicados apenas os métodos da esfera rolante e das malhas – alternativa para todos os casos.

Para edificações altas podem estar sujeitas a descargas laterais. Por isso, são indicados outros métodos descritos. Edifícios que excedem 20 a 30 metros de altura, devem, portanto, ser providos de elementos captores nas fachadas [23]. Recomenda-se a utilização de um sistema híbrido utilizando não só o método Franklin, mas também o de Faraday, tornando eficiente a proteção da estrutura e suprimindo o baixo ângulo de proteção.

O método Franklin é um modelo particular do método da esfera rolante. Em termos geométricos, é de mais fácil aplicação do que o modelo Eletrogeométrico, porém pode resultar em um sistema superdimensionado [23].

O modelo Eletrogeométrico é compatível com a constatação prática de que estruturas altas são suscetíveis de serem atingidas por descargas laterais. Isso porque, caso a estrutura tiver altura superior ao raio da esfera, somente um captor no topo não garantirá proteção adequada, pois o segmento tangente ao solo tocará lateralmente a estrutura [20].

Quanto maior for a sintonia e a coordenação entre os projetos e execuções das estruturas a serem protegidas e do SPDA, melhores serão as soluções adotadas possibilitando otimizar custo dentro da melhor solução técnica possível. Preferencialmente, o próprio projeto da estrutura deve viabilizar tanto a utilização das partes metálicas, como componentes naturais do SPDA.

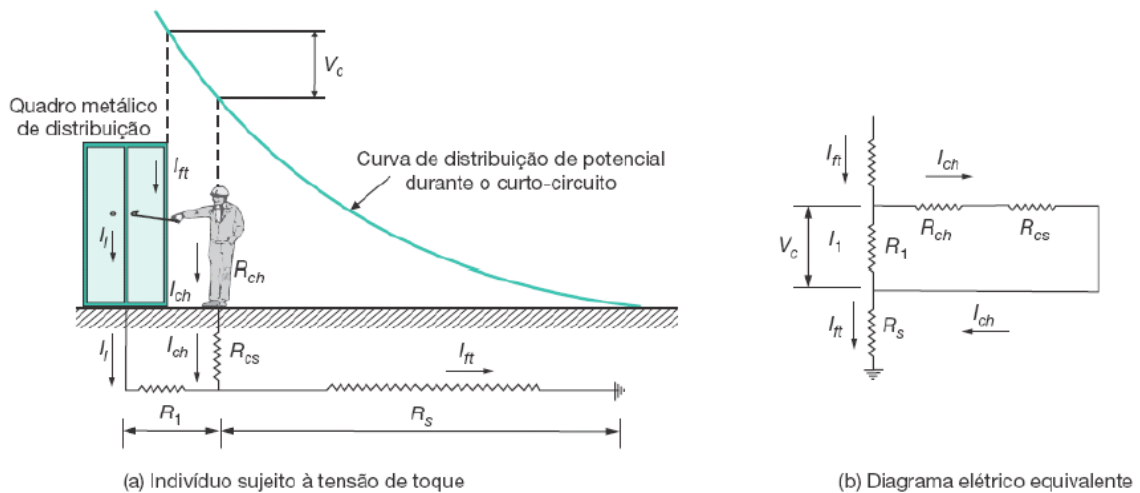
## 2.5 PROTEÇÃO CONTRA CONTATOS INDIRETOS

Um sistema de aterramento é importante, pois promove proteção do indivíduo contra contatos com partes metálicas da instalação energizadas acidentalmente. O acidente mais comum a que estão submetidas as pessoas, principalmente aquelas que trabalham em processos industriais ou desempenham tarefas de manutenção e operação de sistemas industriais, é o toque acidental em partes metálicas energizadas. Assim, entende-se por contato indireto aquele que um indivíduo mantém com determinada massa do sistema elétrico que, por falha, perdeu sua isolamento e permitiu que esse indivíduo ficasse submetido a determinado potencial elétrico [22].

### 2.5.1 Tensão de toque

Ocorre quando o corpo humano está em contato com partes metálicas (massa) acidentalmente energizadas. A Figura 22(a) mostra as condições de um indivíduo submetido a uma tensão de toque, enquanto o esquema elétrico correspondente está na Figura 22(b).

Figura 22 – Tensão de toque.



Fonte: [22].

$$V_c = I_{ft} \times \left( \frac{R_1 \times (R_{ch} + R_{cs})}{R_1 + R_{ch} + R_{cs}} \right) \quad (2.1)$$

$$V_c = I_1 \times R_1 = I_{ch} \times (R_{ch} + R_{cs}) \quad (2.2)$$

Onde:

$I_r$ : Corrente de curto-circuito fase-terra;

$I_{ch}$ : Corrente de choque;

$R_{ch}$ : resistência do corpo humano;

$R_s$ : resistência do solo;

$R_{cs}$ : Resistência de contato com o solo; e

$V_c$ : tensão de contato.

O valor máximo de tensão de toque que uma pessoa pode suportar pode ser expresso pela Equação 2.1.

$$E_{tm} = \frac{116 + 0,174 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (2.3)$$

Onde:

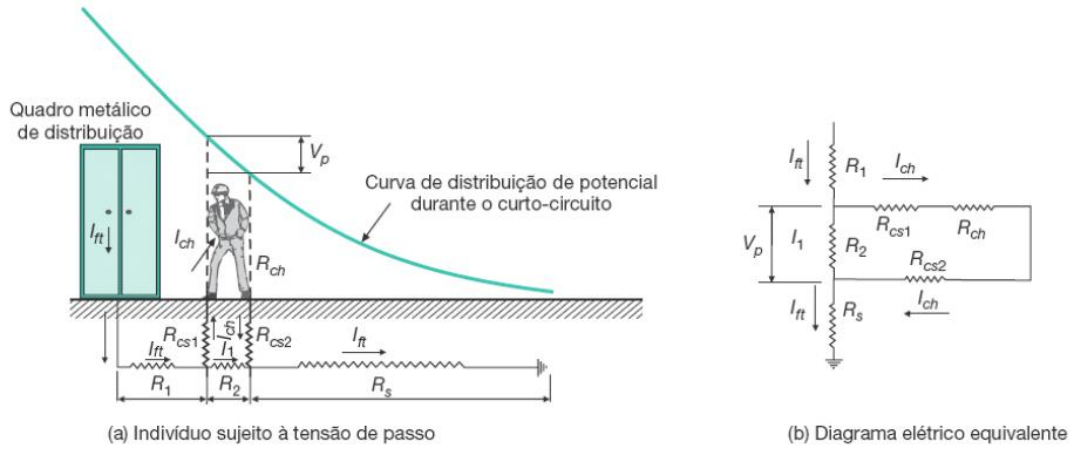
$\rho_s$ : Resistividade superficial do solo; e

$T_f$ : tempo máximo de permanência de corrente.

### **2.5.2 Tensão de passo**

Quando um indivíduo se encontra no interior de uma malha de terra e por meio desta está fluindo, naquele instante, determinada corrente de defeito, o mesmo fica submetido à diferença de potencial entre os dois pés, conforme se pode observar na Figura 23(a), e a Figura 23(b) mostra o circuito elétrico correspondente.

Figura 23 – Tensão de passo



Fonte: [22].

$$V_p = I_{ft} \times \left( \frac{R_2 \times (R_{cs1} + R_{ch} + R_{cs2})}{R_2 + R_{cs1} + R_{ch} + R_{cs2}} \right) \quad (2.4)$$

$$V_p = I_1 \times R_2 = I_{ch} \times (R_{cs1} + R_{ch} + R_{cs2}) \quad (2.5)$$

Onde:

$R_{cs1}$ : Resistência de contato do pé direito;

$R_{cs2}$ : Resistência de contato do pé esquerdo;

$I_r$ : Corrente de curto-circuito fase-terra;

$I_{ch}$ : Corrente de choque;

$R_{ch}$ : resistência do corpo humano;

$R_s$ : resistência do solo;

$V_p$ : tensão de passo.

A tensão limite de passo,  $\Delta V_p$ , durante o funcionamento do sistema de aterramento, pode aparecer entre os pés de uma pessoa dando um passo de abertura igual a 1 m. Para reduzir as tensões perigosas de passo, por exemplo, o solo é tratado com uma camada de brita cuja espessura pode variar entre 10 e 20 cm, melhorando o nível de isolamento.

O valor máximo da tensão de passo que uma pessoa pode suportar pode ser expresso pela Equação 2.2.

$$E_{pa} = \frac{116 + 0,7 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (2.6)$$

O limite de corrente alternada suportada pelo corpo humano é de 25 mA. Acima desse valor, a gravidade dessas lesões depende do tempo de exposição do corpo humano à corrente elétrica. A corrente máxima admitida pelo corpo humano, denominada corrente de choque, pode ser determinada pela Equação 2.3.

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{T_f}} \quad (2.7)$$

### 3 . D E S E N V O L V I M E N T O

---

A primeira etapa do trabalho consiste na realização da revisão bibliográfica que contempla aspectos discutidos nos livros, normativas técnicas e sites especializados no assunto. Paralelamente, faz-se a identificação de lacunas ou pontos questionáveis na interpretação dos processos físicos relativos ao fenômeno.

Após a revisão bibliográfica, apresenta-se a definição do problema proposto. Para a condução do trabalho, foi realizada a montagem de um sistema que simula uma descarga atmosférica, composto principalmente de uma bobina de ignição veicular capaz de elevar a tensão e romper o dielétrico do ar.

Além disso, propõe-se o projeto de duas edificações distintas, em escala real, cada uma com um dos principais métodos de SPDA (Faraday ou Franklin), dimensões de malha de captação, condutores de descida, anéis de cintamento e altura dos captores. Com todos os métodos dimensionados em escala real, torna-se inviável a reprodução experimental de cada estrutura. Portanto, desses projetos foram recriadas miniaturas, a partir das características de enquadramento de cada método.

Longe de ser um modelo real, a montagem dos modelos de SPDA simplificado se pautou na utilização de materiais de baixo custo. Na etapa de construção das maquetes, o material utilizado foi *Vergalhão – Barra de Ferro/Aço 6,3mm – 1/4"*. O principal cuidado foi respeitar as dimensões das quadriculas. Isso porque, caso haja falha na geometria, as correntes circulantes não anularão o campo elétrico interno, bem como o poder das pontas pode não ser comprovado. Por esse motivo, a etapa de soldagem é fundamental.

Uma vez que a proposta do projeto é totalmente voltada para o ensino acadêmico, seu foco foi elaborar uma bancada simples que apresente total suporte ao ensino da disciplina de Instalações Elétricas, especificamente sob o assunto de SPDA. A etapa de simulação faz com que os casos avaliados gerem interpretações para os processos envolvidos nos domínios selecionados de investigação. Além disso, o conhecimento propagado contribuirá para o

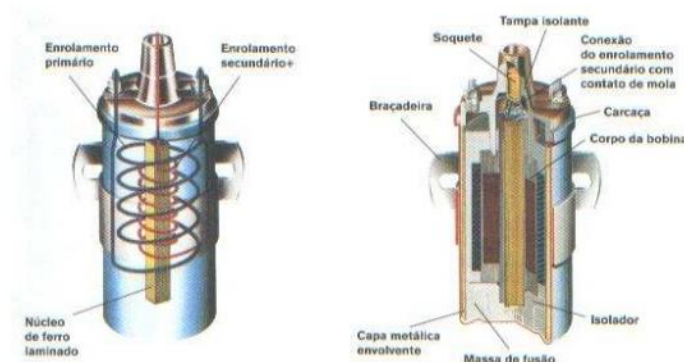
aprimoramento do entendimento a respeito das consequências do fenômeno de descarga atmosférica.

### 3.1 GERAÇÃO DAS DESCARGAS

Para a compreensão do fenômeno descarga atmosférica, foi feito um estudo da melhor maneira de gerar uma descarga no sistema. Desse modo, os casos avaliados partiram para simulações que podem gerar interpretações para os processos envolvidos e elaborar o correspondente conhecimento.

Após longa procura por um equipamento que permitisse a construção do circuito de descarga, chegou-se a conclusão de que a bobina de ignição veicular de 1 saída Bosch, modelo KW12V (Figura 24) seria o instrumento mais apropriado para a elevação da tensão.

Figura 24 – Bobina de Ignição cilíndrica KW12V em recorte.



Fonte: [25].

Antes de entender a função dos outros componentes, é importante saber como é gerada a alta tensão, necessária para a produção da faísca. Uma vez que a tensão de 12V fornecida pela bateria veicular não é suficiente para produzir a faísca na vela de ignição, sua tensão deve ser aumentada até o valor necessário para romper o dielétrico do ar. Esse aumento de tensão se dá pela bobina de ignição.

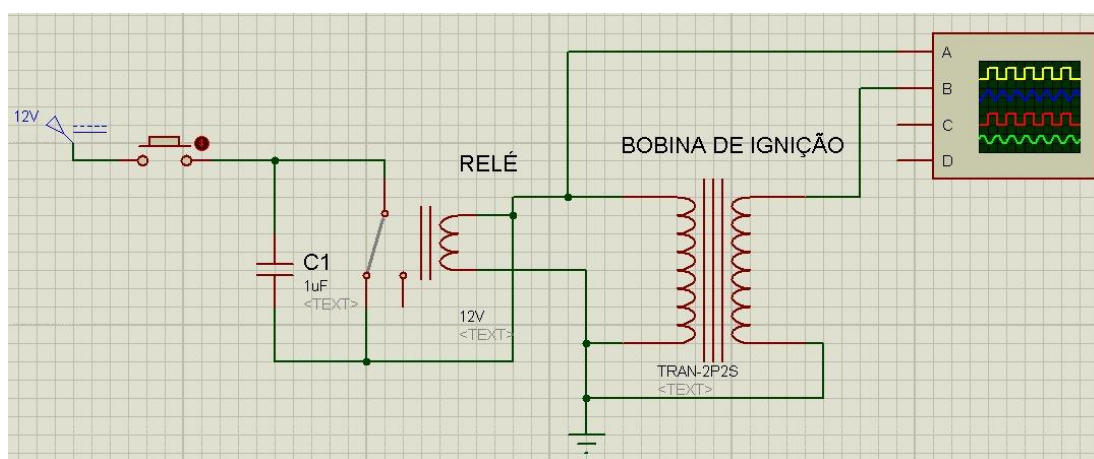
O fabricante garante que uma bobina genérica suporta uma corrente máxima de 10A. Construída em carcaça metálica, possui em seu interior um núcleo de ferro laminado, bem como enrolamento primário e secundário. O enrolamento primário possui aproximadamente 350 espiras espessas, e está conectado nos terminais positivo e negativo. O

enrolamento secundário, com aproximadamente 20.000 espiras com seção menor, tem uma extremidade conectada na saída de alta tensão e a outra extremidade internamente conectada ao enrolamento primário.

Segundo [25], o tempo de formação do campo magnético, equivalente ao tempo de formação de faísca, é de  $5ms$  e representa-se baixo em comparação às outras bobinas. Entretanto, quando uma descarga ocorre, há dificuldade em mensurar seus parâmetros elétricos.

O circuito implementado para a descarga é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Circuito Elétrico de formação do arco voltaico.



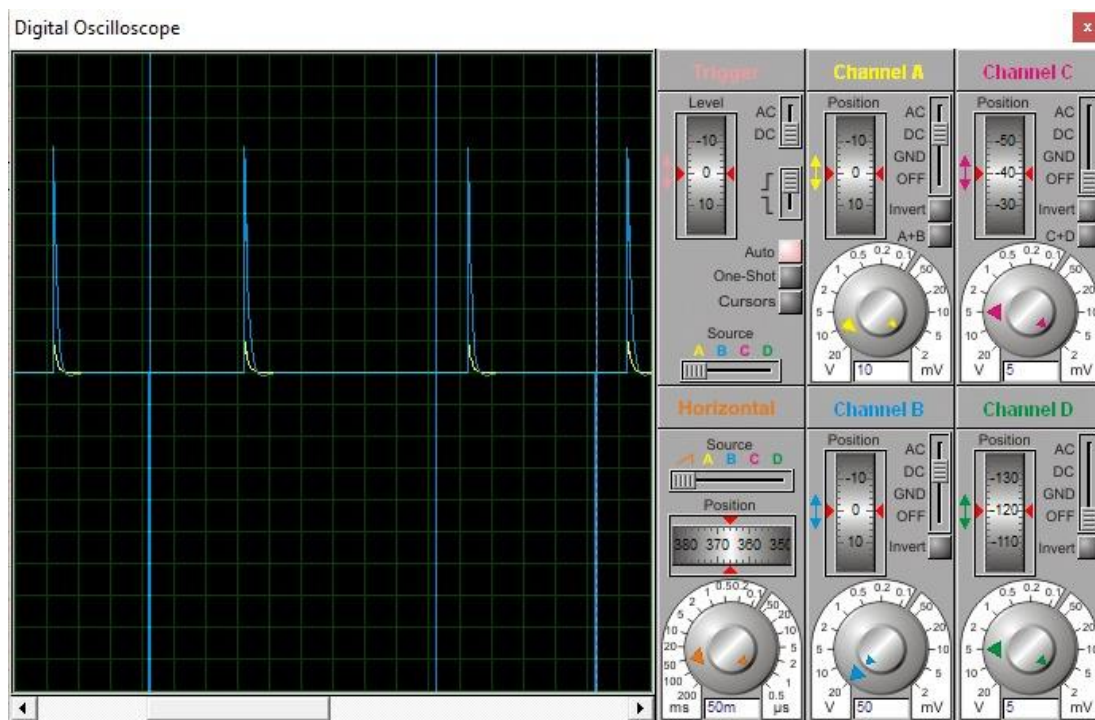
Fonte: Autor.

Em linhas gerais, o circuito primário dividido em dois estados (relé acionado e não acionado). Na primeira etapa, ao ligar a fonte de tensão 12V, o relé desativado passa a ter sua bobina energizada, pois seu contato normalmente fechado (NF) se encontra em série. Quando energizada, o contato NF abre. Neste momento, por conta do caráter indutivo do circuito, o sentido da corrente tende a manter-se. Logo, o capacitor, com objetivo principal de proteger os contatos do relé, absorve essa energia. Passado este tempo, a tensão na bobina do relé reduz. Por fim, o sistema volta ao seu estado inicial em que seu contato NF está fechado e o relé desenergizado.

É importante esclarecer que, quando o contato do relé fecha, o capacitor descarrega toda sua energia repentinamente. Esse surto auxilia na formação de pulsos de tensão e corrente na saída do transformador, capazes de formar arcos elétricos nos terminais.

Como parte fundamental do projeto, o circuito foi simulado no *Proteus* e a Figura 26 apresenta a forma de onda de tensão no primário (Canal A) e secundário (Canal B) da bobina de ignição. O comportamento apresentado é útil para validar a formação de pulsos do circuito, não sendo possível a identificação dos valores de tensão no tempo.

Figura 26 – Forma de onda do circuito gerador de descargas.

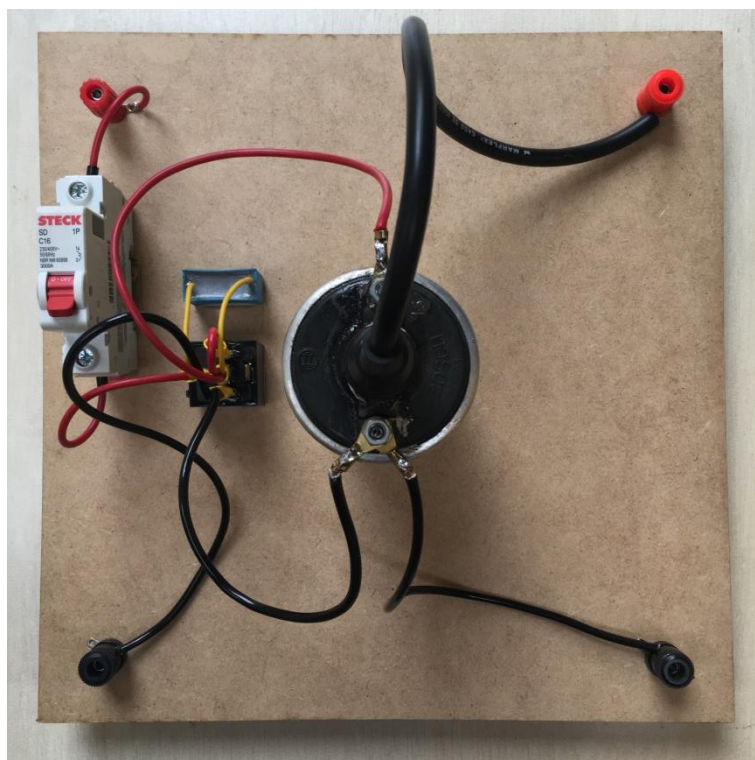


Fonte: Autor.

Baseado nas etapas de projeto e simulação, foi realizada a implementação do circuito no laboratório *Batlab* (Laboratório de Eletrônica de Potência, Sistemas Digitais e Inteligência Artificial), situado nas dependências da UFMS (Universidade Federal de Mato Grosso do Sul), conforme Figura 27.

O circuito com sistema de geração de descargas consistiu em utilizar chapa de madeira, do tipo *Medium Density Fiberboard* (MDF) 3mm, como suporte de fixação dos componentes. As conexões foram dispostas na parte superior da placa estrategicamente, pois permitem visualização, testes, bem como dão liberdade para inserção de dispositivos auxiliares como, por exemplo, o disjuntor termomagnético monopolar 16A. Além disso, como estratégia de simulação, o borne positivo será conectado às ferragens da estrutura, enquanto o negativo estará sob o ponto de descarga.

Figura 27 – Configuração do Circuito Pronto.



Fonte: Autor.

O APÊNDICE C apresenta a lista de materiais utilizados para a confecção da placa com o circuito gerador de descargas.

### 3.2 PROJETO DO SPDA

No projeto inicial de uma estrutura, é importante ter em mente o tipo e localização do SPDA de uma nova estrutura, possibilitando, desta forma, o uso otimizado das partes eletricamente condutoras desta. O melhor resultado e com custo otimizado sempre será alcançado com a frequente interação entre os projetistas, arquitetos, instaladores do SPDA e construtores. Fazendo uso dessa premissa logo na fase do projeto, a construção de uma edificação é realizada de forma a preservar a estética e melhorar a eficácia do SPDA com custo e esforços minimizados.

Embora a proposta do trabalho seja exclusivamente para fim didático, sobre um projeto de SPDA, é importante a análise detalhada da edificação e compreensão do nível de proteção que ela se encaixa [7]. Por consequência, partindo do pressuposto de que a análise

de risco foge do escopo do projeto e que será feita uma investigação física do experimento, adotou-se nível de proteção II para todos os empreendimentos detalhados nesta seção.

### ***3.2.1 Método de Faraday***

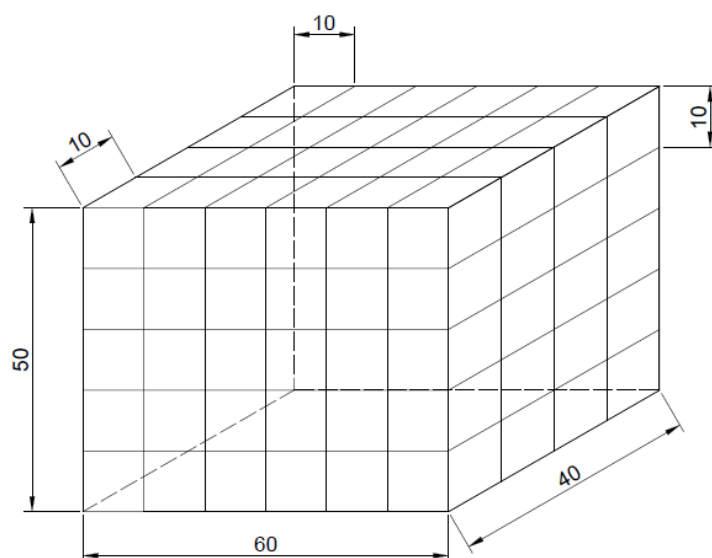
#### ***3.2.1.1 Escala real***

Uma vez que o método de Faraday é a melhor opção para edificações com altura elevada, foi proposto um prédio com dimensões com largura de 60 metros, 40 metros de comprimento e 50 metros de altura.

Se valendo da Tabela 6 da seção 2.3.1, a malha de captação para um edifício enquadrado no nível de proteção II é de 10m x 10m. Além disso, a Tabela 5 presente na seção 2.2.2 registra que os condutores de descida, bem como os anéis de cintamento devem estar espaçados de 10m. Por fim, considerando condutores arredondados maciços de cobre, o ANEXO A apresenta que sua seção deve ser de  $35mm^2$ .

O Autocad foi ferramenta essencial na definição do perfil da malha de captação, bem como das malhas laterais compostas por condutores de descida e anéis de cintamento. Isso porque, permitiu-se ter visão geral das dimensões do projeto, apresentadas na Figura 28, em metros.

Figura 28 – Dimensões do método Faraday.



Fonte: Autor.

Com o dimensionamento adequado, foi gerada a Tabela 9 com apontamentos relativos ao projeto SPDA tipo Faraday em questão:

Tabela 9 – Dados de projeto da Edificação 1 – Escala real.

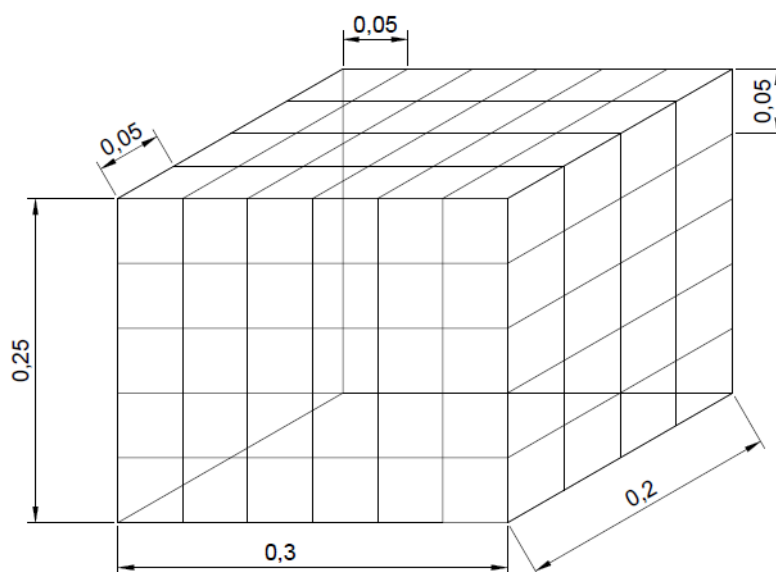
| <b>Edificação 1</b>                      |                   |
|------------------------------------------|-------------------|
| Tipo                                     | Comercial         |
| Dimensões                                | 60m x 40m x 50m   |
| Nível de proteção                        | II                |
| Malha de captação                        | 10m x 10m         |
| Distância entre condutores de descida    | 10m               |
| Espaçamento entre os anéis de cintamento | 10m               |
| Seção dos condutores                     | 35mm <sup>2</sup> |

Fonte: Autor.

### 3.2.1.2 Escala reduzida

A redução do projeto em escala é a ferramenta essencial para que o sistema como um todo tenha a visualização facilitada. Sua importância é fundamental na simulação das descargas sob a instalação. Pensando nisso, com o objetivo de obter quadrículas de 0,05m x 0,05m, reduziu-se o projeto duzentas vezes. Assim, a Tabela 10 apresenta as dimensões e características principais do sistema reduzido. A Figura 29 representa as vistas da gaiola, em metros, na escala 1:200.

Figura 29 – Dimensões reduzidas do SPDA tipo Faraday – Escala 1:200.



Fonte: Autor.

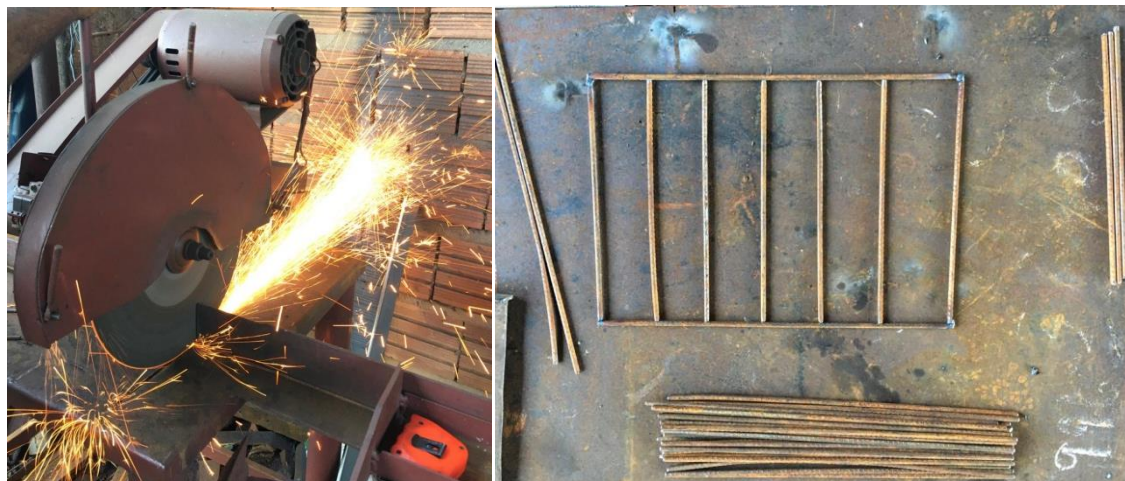
Tabela 10 – Dados de projeto da Edificação 1 – Escala 1:200.

| <b>Edificação 1 – Escala 1:200</b>       |                     |
|------------------------------------------|---------------------|
| Tipo                                     | Comercial           |
| Dimensões                                | 0,3m x 0,2m x 0,25m |
| Nível de proteção                        | II                  |
| Malha de captação                        | 0,05m x 0,05m       |
| Distância entre condutores de descida    | 0,05m               |
| Espaçamento entre os anéis de cintamento | 0,05m               |
| Diâmetro do condutor                     | 0,0063m             |

Fonte: Autor.

Paralelamente ao procedimento de construção da edificação 1, as etapas de corte e soldagem das hastes correspondentes a malha de captação, condutores de descida e anéis de cintamento da segunda edificação foram feitas seguindo as dimensões da Figura 25 e Tabela 10. As etapas de construção da gaiola podem ser vistas na Figura 30 e, por fim a Figura 31 trás Gaiola de Faraday concluída.

Figura 30 – Corte e soldagem das hastes.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Gaiola de Faraday Final em miniatura.



Fonte: Autor.

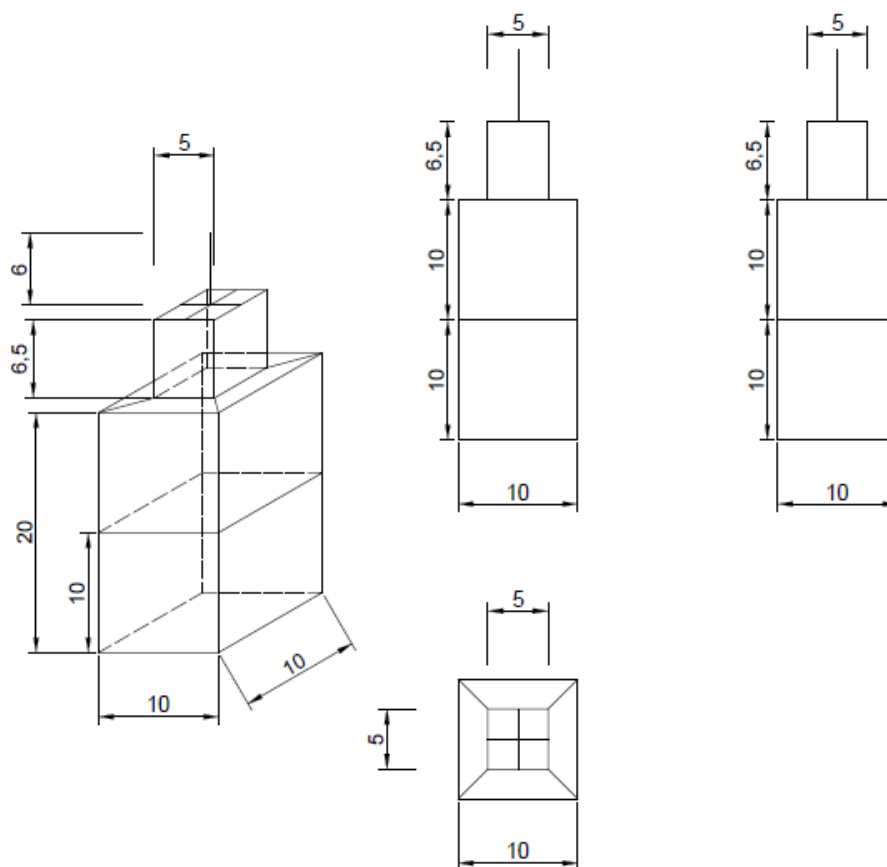
### ***3.2.2 Método de Franklin***

#### ***3.2.2.1 Escala real***

Com o intuito adotar-se o método de Franklin como o mais indicado para a edificação em estudo, foi proposto um edifício de largura de 10 metros, comprimento de 10 metros e altura total de 27 metros. O topo da edificação dispõe de dimensões menores conforme Figura 32, em metros. Isso diminui o raio de proteção necessário e, por consequência, a altura do captor.

Assim, foi feito o dimensionamento de um SPDA baseado no método Franklin.

Figura 32 – Dimensões do método Franklin.



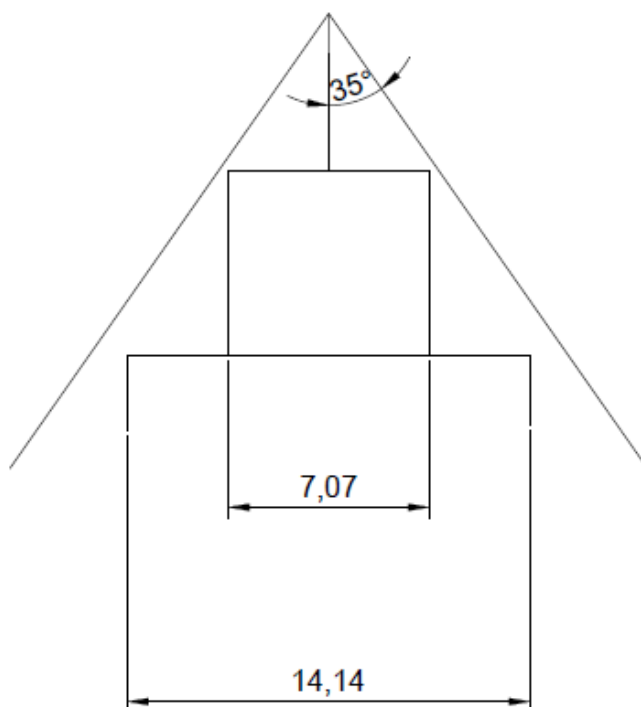
Fonte: Autor.

Fazendo uso do plano de referência em que a estrutura tem 20 metros de altura, o captor posicionado no centro precisa de um raio de segurança de no máximo 7,07 metros. Além disso, conforme a Figura 21 da subseção 2.3.2, o ângulo de proteção fixado para o captor referente ao nível de proteção é  $35^\circ$ .

Baseado na fórmula de que o Raio de segurança = Altura do captor  $\times \tan 35^\circ$  e ao traçar uma vista diagonal considerando o pior caso do cone de proteção, foi registrada a Figura 33, com as dimensões em metros, que dá segurança ao projeto quanto ao cone de proteção.

A fórmula registra que a altura para cobrir os 7,07 metros é de aproximadamente 10,1 metros. Por segurança, foi adotada altura de 12,5 metros. Sendo assim, descontando a altura de 6,5 metros do anexo acima da instalação, o captor precisa de 6 metros em tamanho real para proteger o topo da edificação.

Figura 33 – Ângulo de proteção Franklin



Fonte: Autor.

Quanto maior for o número de condutores de descida, instalados a um espaçamento regular em volta do perímetro interconectado pelos anéis condutores, maior será a redução da probabilidade de descargas atmosféricas e centelhamentos perigosos facilitando a proteção das instalações internas [8].

O subsistema de descida conduz a corrente da descarga atmosférica de forma segura. Essas descidas podem ser naturais, com perfis estruturais do prédio ou com condutores. A Tabela 5 da subseção 2.2.2, que trata dos valores típicos de distância entre os condutores de descida e entre os anéis condutores, mostra que o espaçamento correspondente dos condutores é de 10 metros.

Além disso, a seção dos condutores, considerando condutores arredondados maciços de cobre, conforme ANEXO A, deve ser de  $35\text{mm}^2$ .

A Tabela 11 abaixo resume apontamentos essenciais da edificação 2 para cumprimento da norma para projeto do SPDA tipo Franklin:

Tabela 11 – Dados de projeto da Edificação 2 – Escala real.

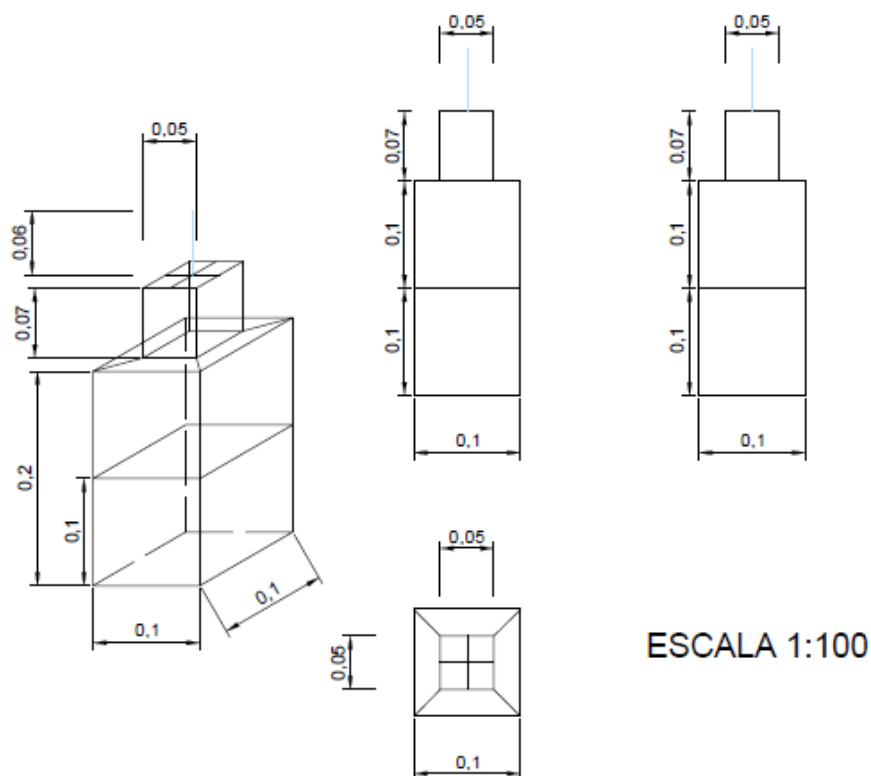
| <b>Edificação 2</b>                      |                   |
|------------------------------------------|-------------------|
| Tipo                                     | Comercial         |
| Dimensões                                | 10m x 10m x 27m   |
| Nível de proteção                        | II                |
| Altura da Haste com captor Franklin      | 6m                |
| Distância entre condutores de descida    | 10m               |
| Espaçamento entre os anéis de cintamento | 10m               |
| Seção dos condutores                     | 35mm <sup>2</sup> |

Fonte: Autor.

### 3.2.2.2 Escala reduzida

Como a proposta da redução de um SPDA tipo Franklin consiste no ensino da propriedade das pontas, a edificação da Figura 32 foi reduzida dessa vez em escala 1:100. Para simular o captor tipo Franklin foram projetados pregos dispostos no topo da edificação. Sua característica pontiaguda satisfaz a proposta do experimento. Sendo assim, a figura 34 representa todas as vistas do projeto em miniatura a ser executado, com dimensões em metros.

Figura 34 – Vistas com dimensões reduzidas do SPDA tipo Franklin – Escala 1:100.

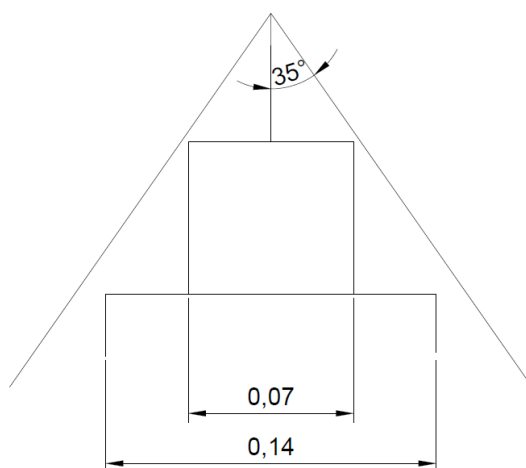


Fonte: Autor.

Se valendo do plano em que a estrutura tem 0,20 metros de altura, o captor posicionado no centro precisa de um raio de segurança de, no máximo, 0,0707 metros. Além disso, o ângulo de proteção fixado para o captor referente ao nível de proteção é  $35^\circ$ .

Assim, a altura do captor deveria ser de aproximadamente 0,101 m. Contudo, em sua construção foi adotado 0,125 m de altura. Sendo assim, o captor deve ter 0,06 m para proteger o topo da edificação em baixa escala. O ângulo de proteção relativo ao para-raios, em proporção, é dado pela Figura 35.

Figura 35 – Ângulo de proteção Franklin - Escala 1:100.



Fonte: Autor.

Ao traçar uma vista diagonal da instalação considerando o pior caso do cone de proteção, constatou-se que a estrutura está protegida pelo captor. Por fim, montou-se a Tabela 12 abaixo que serve de resumo para a construção do sistema em baixa escala.

Tabela 12 – Dados de projeto da Edificação 2 – Escala 1:100.

| <b>Edificação 2 – Escala 1:100</b>       |                     |
|------------------------------------------|---------------------|
| Tipo                                     | Comercial           |
| Dimensões                                | 0,1m x 0,1m x 0,27m |
| Nível de proteção                        | II                  |
| Altura da Haste com captor Franklin      | 0,06m               |
| Distância entre condutores de descida    | 0,1m                |
| Espaçamento entre os anéis de cintamento | 0,1m                |
| Diâmetro do condutor                     | 0,0063m             |

Fonte: Autor.

A execução do projeto consistiu em etapas de corte das hastes e soldagem. A Figura 36 reproduz a estrutura sem a fixação dos pregos utilizados como captosres Franklin, bem como dos captosres auxiliares nos vértices superiores.

Figura 36 – Etapa de soldagem da estrutura.



Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 37 registra o sistema final com captosres Franklin em escala reduzida e dimensões de projeto obedecidas.

Figura 37 – Sistema tipo Franklin final em miniatura.



Fonte: Autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa de projeto foi importante para a confecção do sistema físico nas dimensões apropriadas. Pode ser observado na Figura 38 todo o aparato experimental constituinte dos testes que foram feitos, conforme as especificações definidas.

Figura 38 – Configuração Final do Aparato experimental.



Fonte: Autor.

Assim como o gerenciamento de risco dos SPDA, as descargas ascendentes, que ocorrem geralmente em estruturas muito altas [4], fogem do escopo de análise. Neste capítulo serão analisados e discutidos os resultados provenientes dos ensaios capazes de validar didaticamente a bancada. Haja vista que o aparato desenvolvido tem objetivo didático, o capítulo de resultados será focado naquilo que pode ser apresentado na academia para que os discentes entendam o princípio de funcionamento de um para-raios frente a uma descarga elétrica, bem como as consequências da descarga elétrica. As seções serão divididas em ensaios capazes de simular descargas elétricas nos protótipos e analisar o comportamento de tensão e corrente no SPDA frente ao surto.

#### 4.1 PROPRIEDADE DAS PONTAS: ENSAIO 1

O objetivo do experimento é observar princípio dos para-raios, fazendo um estudo visual do poder das pontas.

##### **Lista de Materiais**

- 1 Circuito de Gerador de Descargas;
- 1 SPDA Faraday, em miniatura;
- 1 SPDA Franklin, em miniatura; e
- 1 Fonte de tensão Minipa MPL-3303M.

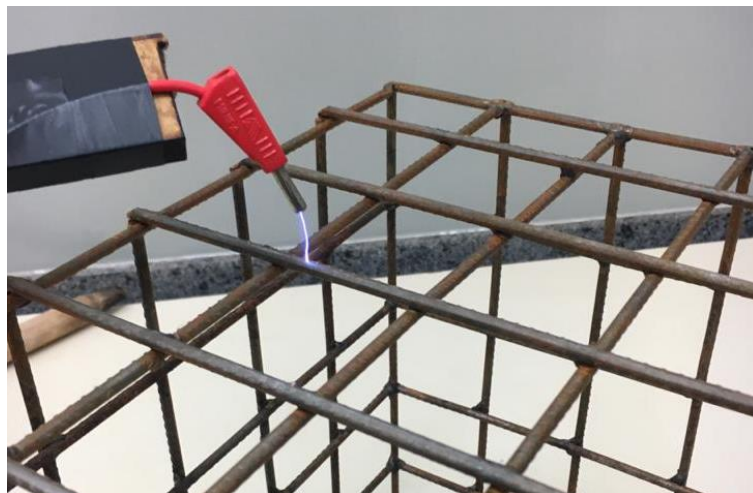
Não satisfeito em somente dizer que uma região pontiaguda acumula cargas, [24] escreveu que o ‘poder das pontas’ significa a preferencial acumulação de carga nas regiões de maior curvatura da superfície do condutor eletrizado. Para o autor, do ponto de vista teórico, a justificação do poder das pontas é difícil porque exige correlacionar em geral a função potencial nas vizinhanças do condutor com as propriedades geométricas da superfície.

Do ponto de vista prático, neste experimento fez-se um estudo panorâmico sobre os aspectos associados ao poder de pontas, utilizando, para tanto, o circuito gerador de descarga, bem como os Sistemas de SPDA em miniatura de Faraday e Franklin (apresentados nas subseções 3.2.1.2 e 3.2.2.2, respectivamente). O gerador de descarga é um circuito composto principalmente por uma bobina veicular, relé de acionamento e capacitor de descarga. Além disso, foi necessário um condutor associado a um braço de madeira para auxiliar na condução da descarga.

É de aproximadamente 1 kV/mm o valor do gradiente de tensão para o qual a rigidez dielétrica do ar é rompida [22]. Foram proporcionadas descargas da ordem de quilovolts (kV) para comprovação dos princípios físicos que regem a proteção. Na busca pelo máximo aproveitamento, o arco elétrico gerado rompe o dielétrico do ar em uma distância aproximada de 2cm.

Pode-se observar na Figura 39 a ocorrência da descarga sob a malha de captação de Faraday.

Figura 39 – Descarga sob a malha de captação – Gaiola de Faraday.



Fonte: Autor.

Longe de ser um sistema ideal, percebe-se na Figura 40 o poder das pontas sendo obedecido e validado pelo captor Franklin, por meio da simulação de uma descarga elétrica na proximidade da região pontiaguda. A ideia de utilizar pregos menores nas extremidades superiores, simulando captos auxiliares, é justificada quando se diz que regiões de maior curvatura, no caso os vértices, concentram cargas elétricas e são pontos importantes a serem protegidos [24].

Figura 40 – Descarga sob a região pontiaguda – Método Franklin.



Fonte: Autor.

## 4.2 TENSÃO DE PASSO: ENSAIO 2

Este experimento visa mostrar que a tensão de passo existe e é consequência de uma descarga elétrica ou fugas de corrente pelo sistema de aterramento.

### Lista de Materiais

- 1 Circuito Gerador de Descargas;
- 1 SPDA Faraday, em miniatura;
- 1 SPDA Franklin, em miniatura;
- 2 Eletrodos de aterramento 40cm;
- 2 Cabos de aterramento – 5m – 6mm<sup>2</sup>;
- 1 Osciloscópio Digital Agilent DSO7034A 350MHz;
- 1 Ponta de prova diferencial ativa Agilent N2772A - 1,2kV DC; e
- 1 Fonte de tensão Minipa MPL-3303M.

A obrigatoriedade de um sistema de aterramento, por sua capacidade de dispersão das correntes elétricas ao solo é nítida e, na maioria das vezes só uma haste não é suficiente para promover segurança à instalação. Por conta do risco elevado de uma descarga, esse sistema precisa ser confiável e com menor resistência possível, para que, no caso de tensões de passo, a corrente drenada da descarga não opte por passar pelo ser humano.

Neste experimento, duas hastes de aterramento, espaçadas entre si de 1m, são fixadas ao solo, conforme a Figura 41.

Figura 41 – Eletrodos de aterramento



Fonte: Autor.

Posteriormente, foi testada a tensão de passo entre duas hastes. As Figuras 42 e 43 mostram o perfil da tensão de passo no osciloscópio usando o SPDA de Faraday e Franklin, respectivamente.

Figura 42 – Tensão de Passo – Gaiola de Faraday



Fonte: Autor.

Figura 43 – Tensão de Passo – Método Franklin



Fonte: Autor.

É nítido que, como o regime é transitório, há dificuldade ao mensurar valores exatos de tensão. Porém, percebe-se por meio da análise que, o comportamento da tensão de passo para os dois métodos são semelhantes. Uma justificativa para essa afirmativa é que o sistema de aterramento foi o mesmo para os dois métodos (dois eletrodos espaçados de 1m).

Além disso, os valores de tensão apresentados no gráfico são mais do que suficientes mostrar que a tensão de passo existe e pode provocar acidentes indiretos, decorrentes de descargas elétricas. Por esse motivo, é importante que haja distanciamento das partes vivas do experimento.

### 4.3 TENSÃO DE TOQUE: ENSAIO 3

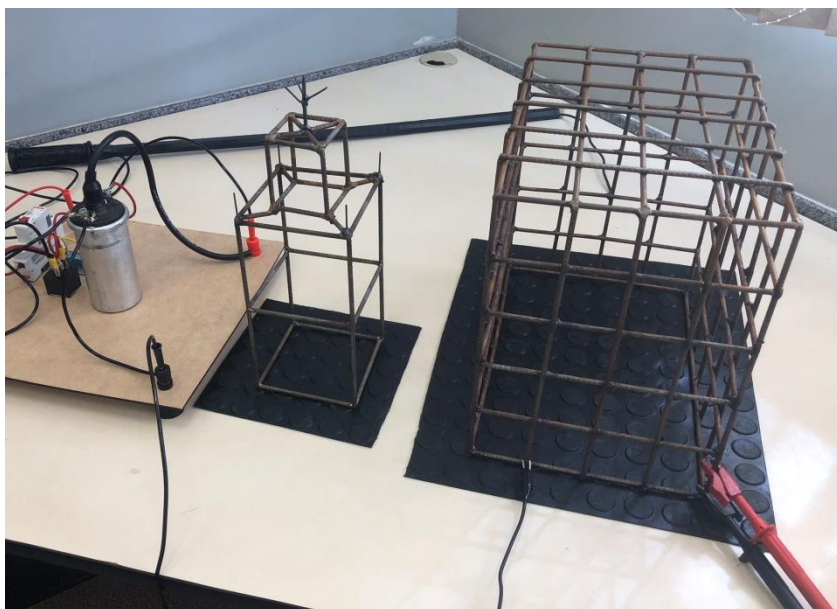
Este ensaio tem como objetivo apresentar a existência da tensão de toque, bem como mostrar que ela é consequência de uma descarga elétrica.

### Lista de Materiais

- 1 Circuito Gerador de Descargas;
- 1 SPDA Faraday, em miniatura;
- 1 SPDA Franklin, em miniatura;
- 1 Osciloscópio Digital Agilent DSO7034A 350MHz;
- 1 Ponta de prova diferencial ativa Agilent N2772A - 1,2kV DC; e
- 1 Fonte de tensão Minipa MPL-3303M.

O procedimento de teste baseou-se na suposição de uma pessoa encostada em um condutor de descida corre riscos e está suscetível a descarga elétrica. A Figura 44 apresenta o aparato experimental para o teste de tensão de toque relativo ao Sistema de Faraday. Além disso, foi necessário o ensaio no Sistema de Franklin e ambos os resultados foram registrados.

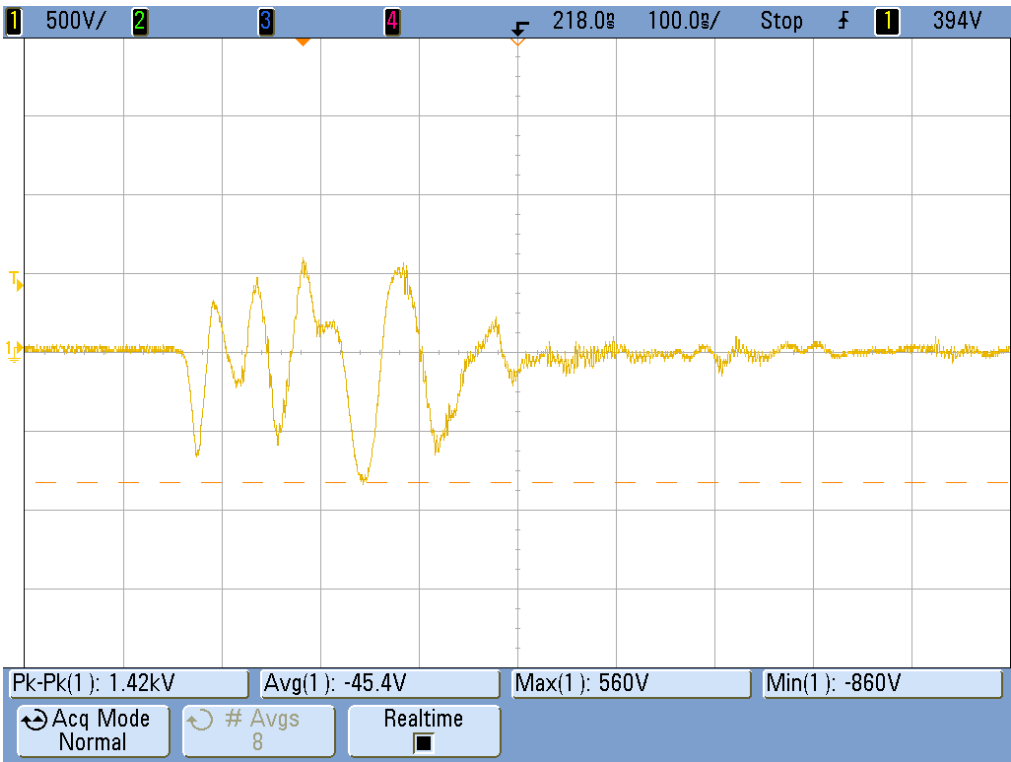
Figura 44 – Bancada de ensaio da Tensão de Toque – Gaiola de Faraday



Fonte: Autor.

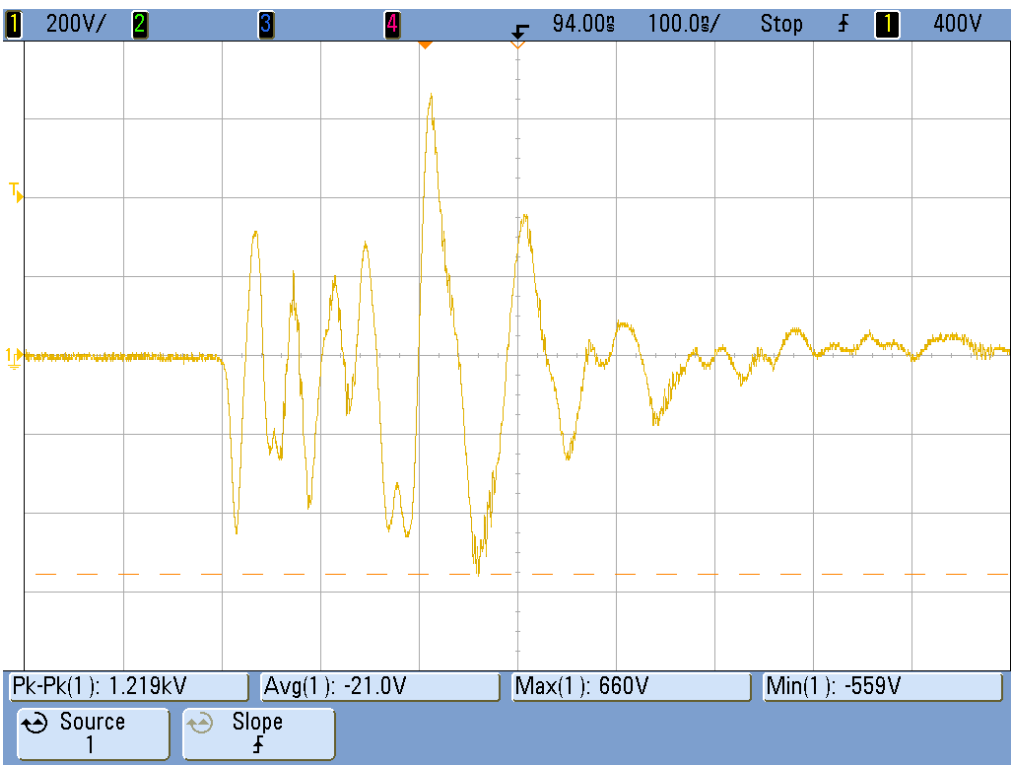
O perfil da tensão de toque no osciloscópio, tanto fazendo uso do método de Faraday, quanto de Franklin pode ser visto nas Figuras 44 e 45.

Figura 45 – Tensão de Toque – Gaiola de Faraday



Fonte: Autor.

Figura 46 – Tensão de Toque – Método Franklin



Fonte: Autor.

O comportamento da tensão de toque registrada no osciloscópio é suficiente para validar, no ambiente acadêmico, sua existência e exigência de seu devido cuidado. Basta perceber que os pulsos de tensão da ordem de centenas de volts são consideráveis para colocar a vida de qualquer ser vivo encostado na estrutura em risco.

#### **4.4 CORRENTE NOS CONDUTORES DE DESCIDA: ENSAIO 4**

O objetivo do ensaio é mostrar o poder de divisão de corrente das quadriculas, por meio dos condutores de descida e anéis de cintamento.

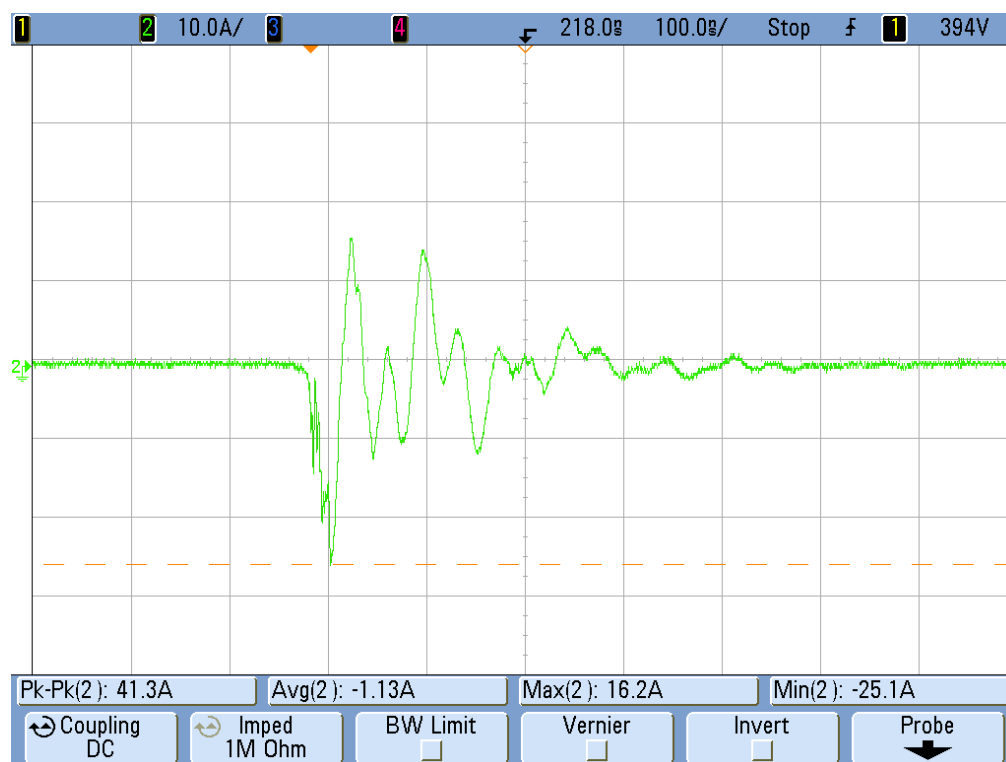
##### **Lista de Materiais**

- 1 Circuito Gerador de Descargas;
- 1 SPDA Faraday, em miniatura;
- 1 SPDA Franklin, em miniatura;
- 1 Osciloscópio Digital Agilent DSO7034A 350MHz;
- 1 Ponta de prova diferencial ativa Agilent N2772A - 1,2kV DC;
- 1 Ponta de prova de corrente Keysight N2783B – 30A;
- 1 Fonte de alimentação N2779A; e
- 1 Fonte de tensão Minipa MPL-3303M.

A descarga, ao atingir a estrutura, produz uma dissipação não uniforme, causando induções internas devido a variação do campo eletromagnético dentro da gaiola. A gaiola de Faraday faz com que as correntes induzidas nos condutores se anulem, criando campos magnéticos de oposição, levando as correntes para as bordas da malha e obrigando a descer pelo cabo de descida [19].

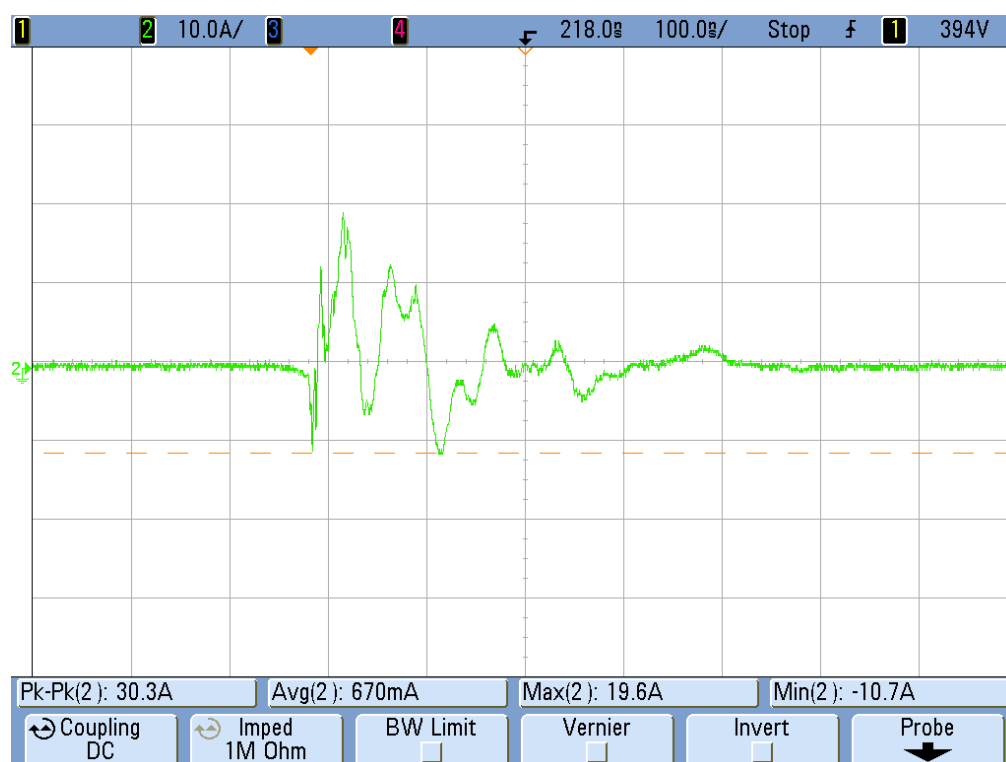
Foram feitas duas medições distintas em cada topologia de SPDA. Em um primeiro caso, fez-se uso da gaiola de Faraday. Foi inserida a ponta de prova de corrente em dois pontos distintos: O primeiro na mesma extremidade do ponto de descarga e o segundo na extremidade oposta. As Figuras 47 e 48 apresentam o comportamento da corrente.

Figura 47 – Corrente na mesma extremidade do ponto de descarga – Método Faraday



Fonte: Autor.

Figura 48 – Corrente na extremidade oposta ao ponto de descarga – Método Faraday



Fonte: Autor.

Os gráficos mostram que, mesmo que os valores mensurados não sejam precisos, é importante dizer que existe corrente capaz de levar um ser vivo a óbito, conforme [22]. Além disso, a amplitude de corrente da extremidade oposta apresenta-se menor que a próxima ao ponto de descarga. Esta observação serve de base para justificar o poder de divisão da corrente entre os condutores na malha de Faraday.

Após esta medição, foi feito o teste de corrente na topologia de Franklin. O ensaio constituiu-se também de duas formas. No primeiro caso foi inserida uma ponteira de corrente no condutor de descida da malha, enquanto a segunda etapa pautou-se na fixação da ponta de medição de corrente no topo do para-raios (Figura 49).

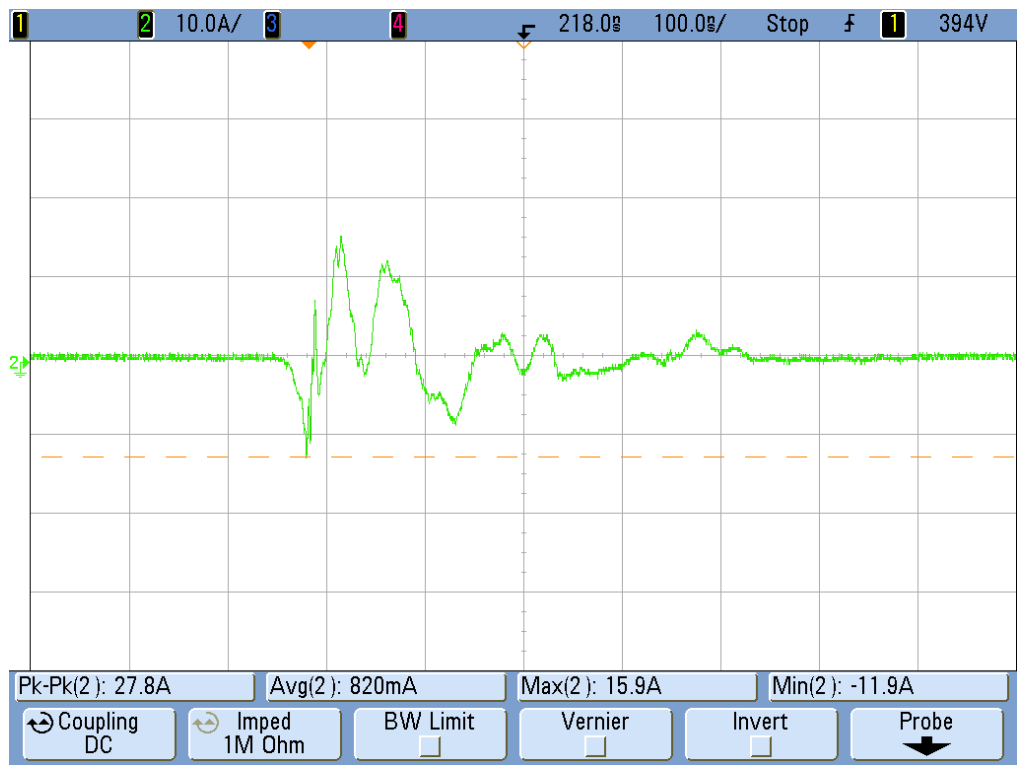
Figura 49 – Medição da corrente e descarga na descida principal – Método Franklin



Fonte: Autor.

As Figuras 50 e 51 apresentam o comportamento da corrente diante de uma descarga elétrica no topo do para-raios.

Figura 50 – Corrente na descida – Método Franklin



Fonte: Autor.

Figura 51 – Corrente no topo – Método Franklin



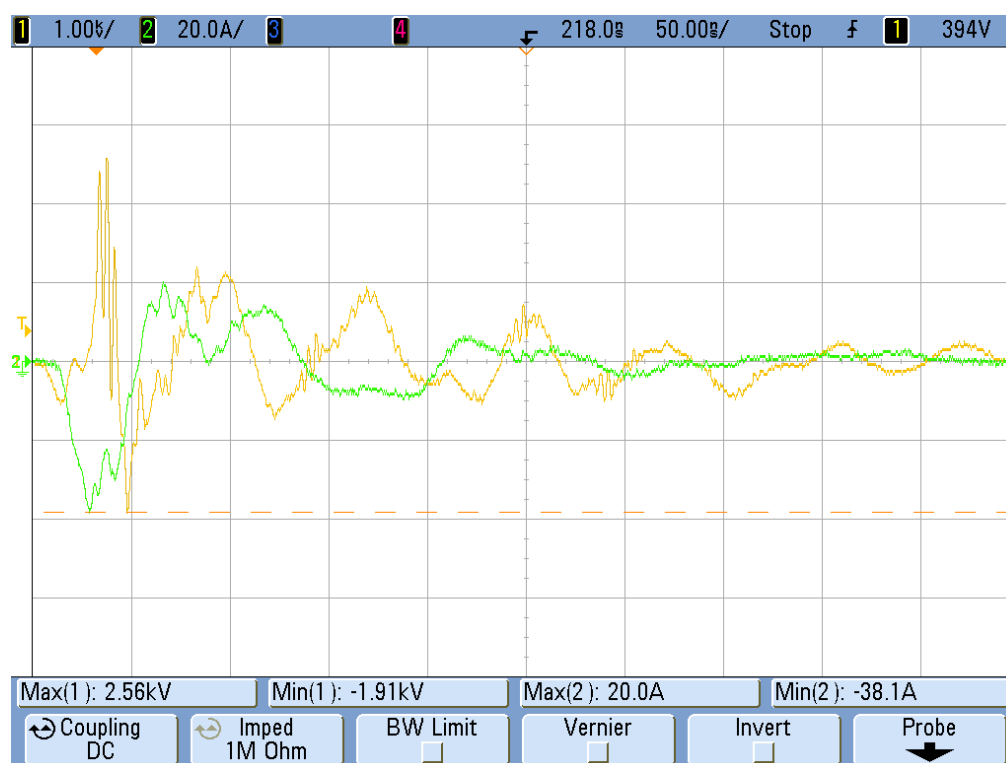
Fonte: Autor.

A amplitude dos valores de corrente mostra-nos que ela se divide na gaiola de Faraday mais que no método Franklin. Esse comportamento permite a diminuição das tensões de toque na estrutura, uma vez que as correntes circulantes são menores.

Os experimento 1 cumpre com o objetivo de apresentar a alta propriedade de captação do sistema Franklin – aplicado para edifícios de altura baixa, enquanto que o ensaio 4 mostra que a corrente de descarga se subdivide entre as quadriculas, blindando parcialmente o sistema de interferências externas e fazendo com que possíveis tensões de toque sejam reduzidas. O casamento entre as duas topologias torna o sistema geral híbrido e satisfaz o método da esfera rolante.

Como etapa final do experimento, usando o sistema relativo ao método de Franklin, foi feita a medição da corrente de descarga no topo, bem como da tensão de toque. Ao submeter o sistema a uma descarga elétrica, os parâmetros analisados comportaram-se segundo a Figura 52.

Figura 52 – Tensão de Toque e Corrente de descarga – Método Franklin



Fonte: Autor.

Em linhas gerais, fica claro que uma descarga elétrica submete o sistema a uma elevada corrente, bem como alto potencial de toque. Como o capacitor da entrada descarrega instantaneamente sob a bobina, uma potência instantânea também é transmitida ao circuito

---

secundário no momento do curto-circuito e, é simples perceber pela imagem apresentada que essa alta potência traduz-se em tensão e corrente que são inversamente proporcionais.

O circuito de descarga não é fidedigno para mostrar o comportamento de um raio, porém pode ser usado como aparato para se mostrar os ensaios, apresentando a eficiência dos componentes do SPDA. Mesmo com testes imprecisos e falta de exatidão nas informações coletadas, justificados por aspectos elétricos difíceis de serem previstos e controlados, bem como condições climáticas experimentais, o sistema torna-se eficiente para amparar o conceito físico por trás de cada método de proteção.

---

## 5. CONCLUSÃO

---

Foi proposto e analisado neste trabalho o projeto e desenvolvimento de uma bancada experimental para topologias de SPDA para realização de atividades estudantis práticas. Com um sistema simples, didático e conciso, estudantes terão seus conhecimentos básicos aplicados na bancada didática com a simulação de uma descarga elétrica e análise do comportamento do sistema frente ao surto elétrico. De uma maneira descomplicada, com os experimentos aqui mencionados, noção das prescrições da NBR 5419 e a simulação uma descarga elétrica na bancada experimental, os discentes terão os conhecimentos básicos para projetar um SPDA.

Com a metodologia desenvolvida, os ensaios demonstraram na prática, mesmo que em miniatura, os dois principais métodos de SPDA usados em edificações – Franklin e Faraday. Na bancada didática o expectador pode verificar de perto os efeitos de uma descarga atmosférica. O poder das pontas, principalmente pelo método de Franklin, foi mostrado diante de uma simulação de descarga elétrica. Além disso, os ensaios propostos na bancada como os de tensão de passo e toque, bem como os fenômenos físicos envolvidos foram validados. Os testes feitos amparam o ensino acadêmico e cumprem a proposta de mostrar que elevadas correntes e tensões são consequências de descargas elétricas, oferecedoras de perigo à vida no caso de aterramentos mal feitos, propondo ensaios com o uso da planta para aulas laboratoriais na graduação.

Em termos práticos, nada pode ser feito para se impedir a queda de um raio. Em termos gerais, ainda é necessário ampliar os estudos e estender as pesquisas para que os danos causados não sejam apenas minimizados e sim sanados totalmente. Com esse trabalho observa-se que, quando se projeta, planeja-se e constrói-se de acordo com as normas e reduz-se o sistema, seu comportamento é comprovado e pode ser utilizado para fins didáticos. Em suma, o trabalho desenvolvido criou uma metodologia de conhecimento, fonte bibliográfica segura, bem como material experimental para profissionais e acadêmicos da área da engenharia.

---

Adicionalmente, pode-se melhorar o circuito de geração de arco, na obtenção de respostas mais constantes e aproximadas do que, de fato, caracteriza uma descarga atmosférica. Outrossim, como a capacidade de isolamento de interferências eletromagnéticas é fator importante a ser considerado em um sistema de proteção, mediante a um conjunto de frequências elevadas de várias harmônicas, há alternativa de avaliar futuramente, por meio de ensaios, o desempenho da gaiola de Faraday na blindagem eletromagnética.

---

## 6. REFERÊNCIAS

---

- [1] VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. 1ª ed. [São Paulo]: Artliber Editora, 2005.
- [2] INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. I. N. D. P. E. 2018. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acesso em: 22 jun 2020.
- [3] HTWE, N. K. **Analysis and Design Selection of Lightning Arrester for Distribution Substation**. Mandalay Technological University. World Academy of Science, 2008.
- [4] COELHO, V. L. **Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas**. Florianópolis, SC, 2010.
- [5] INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Descargas atmosféricas**. 2011. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>>. Acesso em: 04 mai 2020.
- [6] ABNT. NBR 5419-1:2015, **Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios Gerais**. Rio de Janeiro, 2015.
- [7] ABNT. NBR 5419-2:2015, **Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de Risco**. Rio de Janeiro, 2015.
- [8] ABNT. NBR 5419-3:2015, **Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida**. Rio de Janeiro, 2015.
- [9] ABNT. NBR 5419-4:2015, **Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro, 2015.
- [10] HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentos de Física 3 - Eletromagnetismo**. 9ed, LTC, 2012.
- [11] CANTO, E. L. **Por que os pára-raios são pontudos?** Em dia com as Ciências Naturais. Ed. Para professores. nº 5, Editora Moderna, 2015. Disponível em: <[http://www.professorcanto.com.br/boletins\\_cn/005.pdf](http://www.professorcanto.com.br/boletins_cn/005.pdf)>. Acesso em: Abril de 2020.
- [12] SANTOS, Kathleen Cintia Brugnera Moraes. **Dimensionamento do Projeto de**

- SPDA através do método Franklin.** 2018. Disponível em: . Acesso em: 20 out. 2018.
- [13] HOSSAM-ELDIN, A. A. ABOU HEGGI, N. A. SELIM, F. **Simulation and Calculations as Tools for Design and Performance of Lightning Arresters in Substations.** Alexandria University. International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008.
- [14] KANNU, P. D. THOMAS, M. J. **Lightning induced voltages on multiconductor power distribution line.** IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib. Vol. 152, num. 6, November, 2005.
- [15] TATEMATSU, A. NODA, T. **Three- Dimensional FDTD Calculation of Lightning-Induced Voltages on a Multiphase Distribution Line With the Lightning Arresters and na Overhead Shielding Wire.** IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. Vol. 56, No. 1, February, 2014.
- [16] TATEMATSU, A. **Calculation of Lightning induced voltages on a distribution line with lightning arresters using the FDTD method.** 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP. Cagliari, Italy, 2010.
- [17] LIEW, A. C. FELLOW, M. D. **Calculation of the lightning performance of unshielded transmission lines.** IEEE. Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No6, June, 1982.
- [18] BARBOSA, T. D. **Proteção contra descargas atmosféricas de edificações utilizando a ferragem estrutural.** CEFET-MG. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <[http://www2.dee.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/18/2017/11/TCC\\_2014\\_2\\_TDBarbosa.pdf](http://www2.dee.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/18/2017/11/TCC_2014_2_TDBarbosa.pdf)>. Acesso em: Março de 2020.
- [19] KINDERMANN, G. **Descargas atmosféricas.** 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.
- [20] FILHO, S. V. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia.** São Paulo: Artliber, 2005.
- [21] STÉFANI, R. V. **Metodologia de projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas contra edifício residencial.** EESC/USP. São Paulo, 2011.
- [22] FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais.** 9. ed. LTC, 2017.
- [23] CREDER, H. **Instalações Elétricas.** 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [24] FERREIRA, G. F. Leal. **Um Cálculo Aproximado do Poder das Pontas.** Rev. Bras. Ensino Fis. [online]. 2002, vol.24, n.3, pp.367-370. ISSN 1806-9126. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172002000300015&script=sci\\_arttex](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172002000300015&script=sci_arttex)>

---

t&tIng=pt>. Acesso em: 20 jun 2020.

- [25] BOSCH. **Sistemas de Ignição: Catálogo de bobinas**, 2017. Disponível em:<  
[https://br.bosch-automotive.com/media/parts/download\\_2/ignicao/5363\\_BR\\_Catalogo\\_Bobinas\\_2016\\_v6.pdf](https://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/ignicao/5363_BR_Catalogo_Bobinas_2016_v6.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2020.
- [26] NOLETO, S. R. C.. **As estruturas metálicas das edificações como sistema de proteção contra descargas atmosféricas**. UnB. Brasília, 2006.
- [27] CARDOSO, L. H. **Ferramenta Computacional para Análise Preliminar de Risco de Proteção contra Descarga Atmosférica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2019.

## ANEXO A – NBR 5419-3: 2015

**Tabela 6 – Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descidas**

| Material                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Configuração                    | Área da seção mínima<br>mm <sup>2</sup> | Comentários <sup>d</sup>                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Cobre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Fita maciça                     | 35                                      | Espessura 1,75 mm                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço <sup>d</sup> | 35                                      | Diâmetro 6 mm                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Encordoadado                    | 35                                      | Diâmetro de cada fio da cordoalha 2,5 mm |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço <sup>b</sup> | 200                                     | Diâmetro 16 mm                           |
| Alumínio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Fita maciça                     | 70                                      | Espessura 3 mm                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço              | 70                                      | Diâmetro 9,5 mm                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Encordoadado                    | 70                                      | Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,5 mm |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço <sup>b</sup> | 200                                     | Diâmetro 16 mm                           |
| Aço cobreado<br>IACS 30 % <sup>e</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Arredondado maciço              | 50                                      | Diâmetro 8 mm                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Encordoadado                    | 50                                      | Diâmetro de cada fio da cordoalha 3 mm   |
| Alumínio<br>cobreado IACS<br>64 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Arredondado maciço              | 50                                      | Diâmetro 8 mm                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Encordoadado                    | 70                                      | Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,6 mm |
| Aço galvanizado<br>a quente <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Fita maciça                     | 50                                      | Espessura mínima 2,5 mm                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço              | 50                                      | Diâmetro 8 mm                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Encordoadado                    | 50                                      | Diâmetro de cada fio cordoalha 1,7 mm    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço <sup>b</sup> | 200                                     | Diâmetro 16 mm                           |
| Aço inoxidável <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Fita maciça                     | 50                                      | Espessura 2 mm                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço              | 50                                      | Diâmetro 8 mm                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Encordoadado                    | 70                                      | Diâmetro de cada fio cordoalha 1,7 mm    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Arredondado maciço <sup>b</sup> | 200                                     | Diâmetro 16 mm                           |
| <sup>a</sup> O recobrimento a quente (fogo) deve ser conforme ABNT NBR 6323 [1].<br><sup>b</sup> Aplicável somente a minicaptadores. Para aplicações onde esforços mecânicos, por exemplo, força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 mm e comprimento máximo de 1 m.<br><sup>c</sup> Composição mínima AISI 304 ou composto por: cromo 16 %, níquel 8 %, carbono 0,07 %.<br><sup>d</sup> Espessura, comprimento e diâmetro indicados na tabela refere-se aos valores mínimos, sendo admitida uma tolerância de 5 %, exceto para o diâmetro dos fios das cordoalhas cuja tolerância é de 2 %.<br><sup>e</sup> A cordoalha cobreada deve ter uma condutividade mínima de 30 % IACS ( <i>International Annealed Copper Standard</i> ). |                                 |                                         |                                          |
| NOTA 1 Sempre que os condutores desta tabela estiverem em contato direto com o solo é importante que as prescrições da Tabela 7 sejam atendidas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                 |                                         |                                          |
| NOTA 2 Esta tabela não se aplica aos materiais utilizados como elementos naturais de um SPDA.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                 |                                         |                                          |

## ANEXO B – NBR 5419-3:2015

**Tabela 7 – Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento**

| Material                    | Configuração                                               | Dimensões mínimas <sup>f</sup> |                      | Comentários <sup>f</sup>                  |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|
|                             |                                                            | Eletrodo cravado (Diâmetro)    | Eletrodo não cravado |                                           |
| Cobre                       | Encordoado <sup>c</sup>                                    | –                              | 50 mm <sup>2</sup>   | Diâmetro de cada fio cordoalha 3 mm       |
|                             | Arredondado maciço <sup>c</sup>                            | –                              | 50 mm <sup>2</sup>   | Diâmetro 8 mm                             |
|                             | Fita maciça <sup>c</sup>                                   | –                              | 50 mm <sup>2</sup>   | Espessura 2 mm                            |
|                             | Arredondado maciço                                         | 15 mm                          | –                    |                                           |
|                             | Tubo                                                       | 20 mm                          | –                    | Espessura da parede 2 mm                  |
| Aço galvanizado à quente    | Arredondado maciço <sup>a, b</sup>                         | 16 mm                          | Diâmetro 10 mm       | –                                         |
|                             | Tubo <sup>a, b</sup>                                       | 25 mm                          | –                    | Espessura da parede 2 mm                  |
|                             | Fita maciça <sup>a</sup>                                   | –                              | 90 mm <sup>2</sup>   | Espessura 3 mm                            |
|                             | Encordoado                                                 | –                              | 70 mm <sup>2</sup>   | –                                         |
| Aço cobreado                | Arredondado Maciço <sup>d</sup><br>Encordoado <sup>g</sup> | 12,7 mm                        | 70 mm <sup>2</sup>   | Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,45 mm |
| Aço inoxidável <sup>e</sup> | Arredondado maciço                                         | 15 mm                          | Diâmetro 10 mm       | Espessura mínima 2 mm                     |
|                             | Fita maciça                                                |                                | 100 mm <sup>2</sup>  |                                           |

<sup>a</sup> O recobrimento a quente (fogo) deve ser conforme a ABNT NBR 6323 [1].

<sup>b</sup> Aplicável somente a mini captres. Para aplicações onde esforços mecânicos, por exemplo: força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 mm e comprimento máximo de 1 m.

<sup>c</sup> Composição mínima AISI 304 ou composto por: cromo 16 %, níquel 8 %, carbono 0,07 %.

<sup>d</sup> Espessura, comprimento e diâmetro indicados na tabela refere-se aos valores mínimos sendo admitida uma tolerância de 5 %, exceto para o diâmetro dos fios das cordoalhas cuja tolerância é de 2 %.

<sup>e</sup> Sempre que os condutores desta tabela estiverem em contato direto com o solo devem atender as prescrições desta tabela .

<sup>f</sup> A cordoalha cobreada deve ter uma condutividade mínima de 30 % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

<sup>g</sup> Esta tabela não se aplica aos materiais utilizados como elementos naturais de um SPDA.

---

**APÊNDICE A**

---

**LISTA DE MATERIAIS PARA A CONFECÇÃO DO CIRCUITO DE  
DESCARGAS ELÉTRICAS**

| <b>Quantidade</b> | <b>Unidade</b> | <b>Material</b>                                 | <b>Preço (R\$)</b> |
|-------------------|----------------|-------------------------------------------------|--------------------|
| 1                 | UN             | Disjuntor Termomagnético Monopolar – 16A        | 10,00              |
| 1                 | UN             | Suporte para 1 Disjuntor Padrão DIN             | 2,00               |
| 1                 | UN             | Bobina de ignição cilíndrica Bosch KW12V        | 160,00*            |
| 1                 | UN             | Cabo de vela 8mm                                | 5,00               |
| 1                 | UN             | Capacitor de Filme Poliéster 275V 1µF           | 3,00*              |
| 1                 | UN             | Relé Automotivo<br>GOLDEN CABO SLD-5P-12VDC-40A | 10,00              |
| 1                 | UN             | Placa MDF 3mm<br>30cm x 30cm                    | 8,00               |
| 4                 | UN             | Conector macho e fêmea tipo Banana              | 20,00              |
| 2                 | UN             | Terminal Ilhós 2,5mm                            | 1,00               |
| 4                 | UN             | Terminal Fêmea tipo Engate                      | 4,00               |
| 3                 | UN             | Terminal tipo Olhal furo 8mm                    | 1,50               |
| 4                 | UN             | Porca 8mm                                       | 2,00               |
| 1                 | UN             | Adesivo Instantâneo Multiuso 793 (Tek Bond)     | 13,00              |
| 1                 | UN             | Broca 3 pontas 4mm para Madeira                 | 5,00               |
| 4                 | UN             | Pé de borracha de móveis                        | 16,00              |
| <b>TOTAL</b>      |                |                                                 | <b>260,50</b>      |

\*Nota: Materiais que seriam de descarte, porém foram reutilizados.

Logo, o valor gasto para a confecção da placa foi de **R\$97,50**.

---

**APÊNDICE B**

---

**LISTA DE MATERIAIS PARA A CONFEÇÃO DOS SPDA**

| <b>Quantidade</b> | <b>Unidade</b> | <b>Material</b>                               | <b>Preço (R\$)</b> |
|-------------------|----------------|-----------------------------------------------|--------------------|
| 2                 | BARRA          | Vergalhão CA50 Soldável<br>12m – 6,3mm 1/4 '' | 28,98              |
| 1                 | UN             | Prego 17x21 C/C                               | 2,00               |
| 7                 | UN             | Prego 12x12 C/C                               | 5,00               |
| 0,25              | M2             | Tapete piso Borracha Moeda<br>Anti Derrapante | 20,00              |
| <b>TOTAL</b>      |                |                                               | <b>55,98</b>       |

O valor da mão de obra para a soldagem foi de R\$100,00. Logo, o valor gasto para a confecção dos SPDA foi de **R\$155,98**.