

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - CAMPUS FORMIGA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucas Henrique de Faria

**ESTUDO COMPARATIVO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE PDA APLICADOS A  
UMA EDIFICAÇÃO DO TIPO MUSEU**

Formiga

2023

LUCAS HENRIQUE DE FARIA

**ESTUDO COMPARATIVO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE PDA APLICADOS A  
UMA EDIFICAÇÃO DO TIPO MUSEU**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica  
do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus  
Formiga para obtenção do grau de bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: André Roger Rodrigues

Formiga

2023

Faria, Lucas Henrique de

F224e          Estudo comparativo dos diferentes métodos de PDA aplicados a uma edificação do tipo museu / Lucas Henrique de Faria -- Formiga : IFMG, 2023.

201p. : il.

Orientador: Prof. Dr. André Roger Rodrigues

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Sistema de proteção contra descargas atmosféricas. 2. Medidas de proteção contra surtos. 3. Métodos de proteção contra descargas atmosféricas. I. Rodrigues, André Roger. II. Título.

CDD 621.3

LUCAS HENRIQUE DE FARIA

**Estudo comparativo dos diferentes métodos de PDA aplicados a uma  
edificação do tipo museu**


Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica do Instituto Federal de Minas  
Gerais como requisito para obtenção do  
Título de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.

Avaliado em: 22 de Junho de 2023.

Nota: 82,5

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Roger Rodrigues (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Me. José Antônio Moreira de Rezende

  
\_\_\_\_\_  
Prof.(a) Me. Mariana Guimarães dos Santos

Dedico esta monografia aos meus amados pais, Venceslau e Silma, cujo amor incondicional, apoio inesgotável e compreensão sempre presente foram a maior inspiração para a minha busca pelo conhecimento e crescimento pessoal e acadêmico.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Venceslau e Silma, por serem minha base sólida e inabalável em todos os momentos da minha vida. Sem o amor incondicional, o incentivo constante e o apoio inesgotável de vocês, eu não teria chegado até aqui. Meus irmãos, Danilo e Tulio, também são fontes de inspiração e admiração para mim, e sou grato por ter essas duas figuras tão importantes na minha vida.

Agradeço também aos meus sobrinhos, Luis, João Lucas, Pedro, Bernardo e Isabeli, que trazem alegria e luz para os meus dias. Aos meus tios e tias, que sempre me acolheram com carinho e me ensinaram tantas coisas valiosas, e aos meus avós, que me inspiram com sua sabedoria e experiência de vida.

Não posso deixar de mencionar meus amigos e colegas de faculdade, que compartilharam comigo essa jornada incrível e desafiadora. Obrigado por me ensinarem tanto, por me apoiarem nos momentos difíceis e por comemorarem comigo nas vitórias.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos professores do curso de Engenharia Elétrica, em especial ao meu orientador André Roger Rodrigues. Seu apoio inestimável, orientação e crença na minha ideia de trabalho foram fundamentais para o seu desenvolvimento. Sua expertise e dedicação em me ajudar a aprimorar minhas habilidades e conhecimentos foram essenciais para o sucesso do projeto. Também gostaria de agradecer aos demais professores da banca, cujas contribuições e insights foram extremamente valiosos. Seu rigor acadêmico e feedback construtivo ajudaram a moldar minha formação. Sou grato por ter tido a oportunidade de aprender com profissionais tão competentes e inspiradores.

"O tempo não é uma linha reta que vai do passado ao futuro, mas sim um círculo que nos envolve e nos contém, tudo o que já aconteceu está acontecendo agora, e tudo o que acontecerá já está acontecendo."

Haruki Murakami.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar três métodos de proteção contra descargas atmosféricas aplicados em um museu, com base em orientações técnicas e científicas. O estudo também visa analisar os materiais utilizados em todos os subsistemas (captação, descidas e aterramento) com o intuito de proporcionar uma investigação abrangente do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) obtido por cada método.

Para atingir os objetivos supracitados foram examinados dados da edificação, estrutura, vizinhança, topografia, densidade de descargas atmosféricas da região e quantidade de pessoas, entre outros fatores relevantes. Com base nessa análise, foram determinadas tanto a classe de proteção e as configurações de SPDA, assim como as Medidas de Proteção contra Surtos (MPS). Foram utilizados os métodos de proteção contra descargas atmosféricas denominados Franklin, Gaiola de Faraday, Eletrogeométrico e Híbrido. Cada método foi implementado de acordo com as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como a NBR 5419 e a NBR 5410. Além disso, foram utilizadas as normas da concessionária de energia local.

Os três métodos de proteção contra descargas atmosféricas aplicados em um museu foram comparados empregando-se um sistema de classificação com uma escala numérica desenvolvido para avaliar cada método considerando diversos requisitos técnicos. Os resultados obtidos demonstraram a efetividade dos métodos utilizados, enfatizando a importância da escolha de materiais adequados e da correta aplicação dos subsistemas de captação, descida e aterramento. Essas informações são fundamentais para garantir a proteção adequada contra descargas atmosféricas, em conformidade com as normas estabelecidas pelas instituições competentes.

**Palavras-chave:** Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Medidas de Proteção contra Surtos. Métodos de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

## ABSTRACT

This work aims to present three protection methods against atmospheric discharges applied in a museum, based on technical and scientific guidelines. The study also intends to analyze the materials used in all subsystems (capture, downconductors, intermediate rings, and grounding) in order to provide a comprehensive investigation of the Lightning Protection System (LPS) specified by each method.

To achieve the aforementioned objectives, data from the building, structure, surroundings, topography, atmospheric discharge density in the region and population were examined, in addition to other relevant factors. Based on this analysis, it were determined both the protection class and configuration of the LPS besides the Surge Protection Measures (SPM).

Protection methods against atmospheric discharges named Franklin, Faraday Cage, Electrogeometric, and Hybrid were used. Each method was implemented according to the standards established by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT), such as NBR 5419 and NBR 5410. Furthermore, specific regulations from the local power utility were considered.

The three protection methods against lightning applied in a museum were compared using a classification system with a numerical scale which were developed to evaluate each method considering several technical criteria. The obtained results demonstrated the effectiveness of the methods used, emphasizing the matter of choosing appropriate materials and its suitable implementation in the capture, downconductors, and grounding subsystems. These information are essential to ensure adequate protection against atmospheric discharges, in compliance with the standards established by competent institutions.

**Keywords:** Lightning Protection System. Surge Protection Measures. Protection Methods against Atmospheric Discharges.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nuvem carregada eletricamente.....	25
Figura 2 - Danos causados por descargas atmosféricas.....	30
Figura 3 - Tipos de perdas para cada risco e danos correspondentes resultantes.....	31
Figura 4 - Área de exposição equivalente (AD) de uma estrutura isolada.....	47
Figura 5 - Ângulo de proteção correspondente à Classe de SPDA .....	64
Figura 6 - Representação do Método Franklin para proteção contra descargas atmosféricas..	72
Figura 7 - Representação do Método Faraday para proteção contra descargas atmosféricas ..	73
Figura 8 - Representação do Método da Esfera Rolante para proteção contra descargas atmosféricas .....	74
Figura 9 - Fluxograma de etapas para projetar um SPDA.....	75
Figura 10 - Vista superior do museu com as dimensões de comprimento e largura .....	92
Figura 11 - Vista lateral do museu com as dimensões de comprimento e largura .....	92
Figura 12 - Emenda da barra chata de alumínio em alvenaria .....	96
Figura 13 - Derivação da barra chata de alumínio percorrendo da platibanda para a telha .....	96
Figura 14 - Instalação de mini captor e barra chata de alumínio em alvenaria .....	97
Figura 15 - Instalação de mini captor e barra chata de alumínio em telha metálica .....	97
Figura 16 - Detalhe de descida em barra chata de alumínio em 7/8" x 1/8" .....	100
Figura 17 - Conexão da descida em barra chata de alumínio com o aterramento.....	101
Figura 18 - Detalhe de instalação de caixa de inspeção tipo solo .....	102
Figura 19- Especificação de mastros com 1 conjunto de estais .....	107
Figura 20 - Medida do raio da esfera.....	108
Figura 21 - Segundo procedimento para testagem da proteção por Esfera Rolante utilizando mastros pela lateral .....	110
Figura 22 - Terceiro procedimento para testagem da proteção por Esfera Rolante utilizando mastros pela frente.....	111
Figura 23 - Quarto procedimento para testagem da proteção por Esfera Rolante utilizando mastros pela vista posterior da edificação. ....	111
Figura 24 – Verificação de proximidade entre o método Esfera Rolante .....	112
Figura 25 - Para-raios tipo Franklin em mastro de três metros simples com duas descidas ..	114
Figura 26 - Instalação de suporte-guia reforçado em alvenaria.....	114
Figura 27 - Tensionamento dos cabos da captação com suporte-guia e tensionador em alvenaria.....	115
Figura 28 - Esticamento do cabo de cobre na captação utilizando suporte-guia e tensionador na telha metálica .....	116
Figura 29 - Detalhe da fixação do cabo de descida .....	118
Figura 30 - Detalhe de junção entre descida e aterramento.....	122
Figura 31 - Primeiro procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior .....	125
Figura 32 - Segundo procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior .....	125
Figura 33 - Terceiro procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior .....	126
Figura 34 - Quarto procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior .....	127

Figura 35 – Detalhe técnico da fixação do cabo de cobre em alvenaria na captação.....	130
Figura 36 - Derivação do cabo de cobre com fixadores universais na telha metálica.....	132
Figura 37 - Para-raios tipo Franklin em mastro com três metros simples com duas descidas	132
Figura 38 - Diagrama de montagem de DPS Classe I em um circuito trifásico.....	139
Figura 39 - Diagrama de montagem de DPS Classe II em um circuito trifásico .....	140
Figura 40 - Exemplo de ligações possíveis na caixa de equalização .....	144
Figura 41 – Demonstrativo da distância de segurança em subsistema de descida.....	148
Figura 42 - Placa de advertência para as descidas .....	149
Figura 43 - Placa de advertência para a captação .....	150
Figura 44 - Exemplo de aplicação de sinalizações visíveis de alerta contra choque elétrico.	150
Figura 45 - Sinalização de advertência diante eventos com chuva e raios.....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Danos e perdas relevantes para uma estrutura para diferentes pontos de impacto..	29
Tabela 2 - Medidas de proteção para a reduzir o risco de acordo com o tipo de dano.....	32
Tabela 3 - Fatores que influenciam os componentes de risco .....	37
Tabela 4 - Valores típicos de risco tolerável $RT$ .....	39
Tabela 5 - Parâmetros relevantes para avaliação dos componentes de risco.....	42
Tabela 6 - Componentes de risco para diferentes tipos de danos e fontes de danos .....	43
Tabela 7 - Fator de localização da estrutura $CD$ .....	48
Tabela 8 - Fator de instalação da linha $CI$ .....	50
Tabela 9 - Fator tipo de linha $CT$ .....	50
Tabela 10 - Fator ambiental da linha $CE$ .....	50
Tabela 11 - Tipo de perda L1: Descrição e equações para cálculo das perdas típicas. ....	53
Tabela 12 - Tipo de perda L1: Valores médios típicos de $LT$ , $LF$ e $LO$ .....	55
Tabela 13 - Fator de redução $rt$ em função do tipo da superfície do solo ou piso.....	55
Tabela 14 - Fator de redução $rp$ em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio .....	56
Tabela 15 - Fator de redução $rf$ em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura ....	57
Tabela 16 – Fator $hz$ aumentando a quantidade relativa de perda na presença de um perigo especial .....	57
Tabela 17 - Tipo de perda L3: valores de perda para cada zona .....	58
Tabela 18 - Tipo de perda L3: valor médio típico de $LF$ .....	58
Tabela 19 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e Classes de SPDA .....	59
Tabela 20 - Valores máximos dos raios da esfera rolante, tamanho da malha e ângulo de proteção correspondentes a Classe do SPDA .....	64
Tabela 21 - Distâncias entre os condutores de descida em função da Classe do SPDA .....	66
Tabela 22 - Materiais para SPDA.....	70
Tabela 23 - Perdas consideradas para a unidade de estudo deste trabalho: um museu .....	76
Tabela 24 - Riscos considerados para a unidade de estudo: um museu .....	78
Tabela 25 – Componentes individuais dos riscos considerados para a unidade de estudo .....	78
Tabela 26 - Relação dos bens armazenados na estrutura.....	79
Tabela 27 - Parâmetros característicos da zona de proteção .....	80
Tabela 28 - Parâmetros característicos da zona de proteção .....	84
Tabela 29 - Número de eventos perigosos para cada ponto de impacto por trabalho .....	85
Tabela 30 - Probabilidades de perdas calculadas .....	87
Tabela 31 - Componentes de risco da estrutura de um museu em seu estado atual .....	87
Tabela 32 - Componentes de risco recalculadas.....	89
Tabela 33 - Componentes básicos do subsistema de captação para o método Faraday (híbrido) .....	94
Tabela 34 - Componentes básicos do subsistema de descida para o método Faraday (híbrido) .....	99
Tabela 35 - Configuração da caixa de inspeção tipo solo .....	104
Tabela 36 - Características do método Faraday aplicado na unidade fabril e no museu.....	104
Tabela 37 - Componentes básicos do subsistema de captação para o método Eletrogeométrico .....	116

Tabela 38 - Componentes básicos do subsistema de descida para o método Esfera Rolante (híbrido).....	118
Tabela 39 - Configuração da caixa de inspeção tipo suspensa.....	122
Tabela 40- Componentes básicos do subsistema de captação para o método de Franklin (híbrido).....	129
Tabela 41 - Componentes básicos do subsistema de descida para o método Franklin (híbrido) .....	135
Tabela 42 – Componente básico do subsistema de equipotencialização.....	143
Tabela 43 - NP e seu fator correspondente para distância de segurança.....	146
Tabela 44 - Material existente entre o condutor externo e a parte interna .....	146
Tabela 45 - Divisão da corrente de descarga entre os cabos do SPDA externo .....	146
Tabela 46 - Comparação dos Métodos de Proteção contra Descargas Atmosféricas.....	154

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

*ASTM – American Society for Testing and Materials*

AT – Alta Tensão

BEP – Barramento de Equipotencialização Principal

BEL – Barramento de Equipotencialização Local

BT – Baixa Tensão

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina

CEMIG – Companhia Elétrica de Minas Gerais

DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surtos

ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

kA – quiloampère

km – quilômetro

kV – quilovolt

*LEMP – Lightning Electromagnetic Pulse*

MPS – Medidas de Proteção Contra Surtos

NBR – Norma Brasileira Regulamentar

NP – Nível de Proteção

PDA – Proteção contra Descargas Atmosféricas

SPDA – Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 Problema .....</b>	<b>23</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>23</b>
<b>2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Normas relacionadas a PDA .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Fontes dos danos, riscos e perdas .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3 Gerenciamento de Risco.....</b>	<b>33</b>
<b>2.4 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas na estrutura .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto da estrutura .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas a uma linha conectada à estrutura .....</b>	<b>34</b>
<b>2.7 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura .....</b>	<b>35</b>
<b>2.8 Composição dos componentes de risco .....</b>	<b>35</b>
<b>2.9 Risco tolerável <math>RT</math> .....</b>	<b>39</b>
<b>2.10 Análise dos componentes de risco .....</b>	<b>39</b>
<b>2.11 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na estrutura (S1) .....</b>	<b>40</b>
<b>2.12 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto da estrutura (S2) .....</b>	<b>41</b>
<b>2.13 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura (S3) .....</b>	<b>41</b>
<b>2.14 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura (S4).....</b>	<b>42</b>
<b>2.15 Dividindo a estrutura em zonas <math>ZS</math> .....</b>	<b>44</b>
<b>2.16 Análise do número anual <math>N</math> de eventos perigosos.....</b>	<b>45</b>
<b>2.17 Análise do número médio anual de eventos perigosos <math>ND</math> devido a descargas atmosféricas na estrutura .....</b>	<b>46</b>
<b>2.18 Localização relativa da estrutura.....</b>	<b>48</b>
<b>2.19 Número de eventos perigosos <math>ND</math> para a estrutura.....</b>	<b>48</b>
<b>2.20 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos <math>NM</math> devido a descargas atmosféricas perto da estrutura .....</b>	<b>48</b>

2.21 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos <i>NL</i> devido a descargas atmosféricas na linha.....	49
2.22 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos <i>NI</i> devido a descargas atmosféricas perto da linha.....	50
2.23 Avaliação da probabilidade <i>PX</i> de danos.....	51
2.24 Análise de quantidade de perda <i>LX</i> .....	51
2.25 Quantidade relativa média da perda por evento perigoso.....	52
2.26 Perda de vida humana ( <i>L1</i> ) .....	52
2.27 Perda inaceitável de patrimônio cultural ( <i>L3</i> ).....	57
2.28 O SPDA Externo e Interno .....	59
2.29 Classe do SPDA.....	59
2.30 Projeto do SPDA .....	61
2.30.1 Sistema externo de PDA .....	62
2.30.2 Subsistema de captação .....	63
2.30.3 Posicionamento do subsistema de captação .....	63
2.30.4 Subsistema de descida .....	65
2.30.5 Posicionamento do subsistema de descida .....	65
2.30.6 Subsistema de aterramento.....	67
2.30.7 Material para SPDA: características dos principais metais utilizados.....	67
2.30.8 Obrigação do SPDA.....	71
2.30.9 Métodos de Proteção .....	71
2.30.10 Fluxograma para um SPDA .....	75
2.31 Contextualização do Problema Empregando um Estudo de Caso como Referência Metodológica .....	76
3. DESENVOLVIMENTO DE NOVAS ANÁLISES E ESTUDOS.....	76
3.1 Novo Gerenciamento de Risco.....	76
3.2 Área de Exposição Equivalente e Número Anual de Eventos Perigosos para o caso de um museu .....	82
3.3 Avaliação das Quantidades de Perdas – Estudo de caso de um museu .....	86
3.4 Avaliação geral do risco e seleção das medidas de proteção - Estudo de caso de um museu .....	87
3.5 Projeto do SPDA – Estudo de caso de um museu.....	89
3.6 Método de Projeto – Estudo de caso de um museu .....	90
3.7 Método Faraday (híbrido) .....	91
3.7.1 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação .....	91
3.7.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida.....	98

3.7.3 Configuração da inspeção em caixa tipo solo (enterrada).....	102
3.7.4 Comparação entre resultados do método Faraday aplicado por Kafer para unidade fabril e método Faraday para estudo de caso do museu .....	104
3.8 Método Eletrogeométrico ou Esfera Rolante (híbrido) .....	106
3.8.1 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação .....	106
3.8.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida.....	117
3.8.3 Configuração da inspeção em caixa suspensa .....	119
3.9 Método de Franklin (híbrido).....	123
3.9.1 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação .....	123
3.9.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida.....	133
3.9.3 Configuração da inspeção em caixa tipo solo (enterrada).....	135
3.10 Sistema de Proteção Interna.....	136
3.11 Sistema de Equipotencialização .....	140
3.12 Distâncias de Segurança.....	144
3.13 Avisos de Alerta Contra Choque.....	148
3.14 Projeto do Aterramento Elétrico.....	152
4. ANÁLISES DE RESULTADOS .....	153
5. CONCLUSÃO.....	156
REFERÊNCIAS .....	158
APÊNDICE A – Análise do Projeto Base Desenvolvido por Kafer .....	160
A.1 Características Gerais da Instalação .....	161
A.2 Probabilidade <i>PA</i> de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico.....	171
A.3 Probabilidade <i>PB</i> de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos.....	172
A.4 Probabilidade <i>PC</i> de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falha a sistemas internos .....	173
A.5 Probabilidade <i>PM</i> de uma descarga atmosférica perto de uma estrutura causar falha em sistemas internos .....	174
A.5.1 Para a Linha de Energia .....	174
A.5.2 Para a Linha de Sinal .....	176
A.6 Probabilidade <i>PU</i> de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico .....	177
A.7 Probabilidade <i>PV</i> de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos .....	178
A.8 Probabilidade <i>PW</i> de uma descarga atmosférica em uma linha causar falha de sistemas internos .....	179

<b>A.9 Probabilidade <i>PZ</i> de uma descarga atmosférica perto de uma linha que entra na estrutura causar falha dos sistemas internos .....</b>	<b>179</b>
<b>A.10 Projeto do SPDA Proposto por Kafer (2018) .....</b>	<b>184</b>
<b>APÊNDICE B – Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Faraday (vista superior).....</b>	<b>186</b>
<b>APÊNDICE C - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Faraday (vista traseira).....</b>	<b>186</b>
<b>APÊNDICE D - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Faraday (vista lateral).....</b>	<b>187</b>
<b>APÊNDICE E - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Faraday (vista frontal) .....</b>	<b>188</b>
<b>APÊNDICE F - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Eletrogeométrico (vista superior) .....</b>	<b>189</b>
<b>APÊNDICE G - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista frontal) .....</b>	<b>190</b>
<b>APÊNDICE H - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista traseira).....</b>	<b>191</b>
<b>APÊNDICE I - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista lateral).....</b>	<b>192</b>
<b>APÊNDICE J - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Franklin (vista superior).....</b>	<b>193</b>
<b>APÊNDICE K - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista lateral) .....</b>	<b>194</b>
<b>APÊNDICE L - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista frontal) .....</b>	<b>195</b>
<b>APÊNDICE M - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista traseira) .....</b>	<b>196</b>
<b>APÊNDICE N - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de equipotencialização (vista lateral).....</b>	<b>197</b>
<b>APÊNDICE O - Condições Gerais nos Arranjos de Aterramento .....</b>	<b>198</b>
<b>APÊNDICE P - Instalação dos Eletrodos de Aterramento .....</b>	<b>200</b>
<b>APÊNDICE Q – Mapa Isoceráunico da Região Sul do Brasil .....</b>	<b>205</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Justificativa**

Neste estudo, será conduzida uma análise aprofundada de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), originalmente concebido para uma fábrica, porém, com a iminente conversão dessa estrutura em um museu, examinando minuciosamente as medidas de proteção existentes e realizando adaptações de acordo com as especificidades do novo contexto de utilização, visando garantir a segurança adequada contra raios na edificação museológica, em conformidade com as normas vigentes.

A aplicação da norma ABNT NBR 5419 tem sido um desafio para muitos profissionais devido à sua complexidade e falta de exemplos práticos de sua implementação. A interpretação das diretrizes e a seleção dos materiais adequados são questões que frequentemente surgem durante o processo de implementação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA).

A norma apresenta requisitos técnicos detalhados para o projeto, instalação e manutenção de um SPDA, porém, a falta de exemplos concretos e orientações claras dificulta a sua interpretação e aplicação prática. A ausência de casos reais de aplicação e a escassez de critérios para seleção do método de PDA mais adequado para diferentes tipos de edificações também representam desafios significativos.

Além disso, a escolha dos materiais apropriados para o SPDA é um aspecto crítico que demanda conhecimento especializado. A norma não fornece orientações específicas sobre os materiais mais adequados para cada componente do sistema, o que pode gerar dúvidas e incertezas na hora de realizar a seleção.

O estudo examina minuciosamente as medidas de proteção existentes e propõe adaptações adequadas ao novo contexto, garantindo a conformidade com as normas vigentes. Nesse contexto, busca-se aprimorar a implementação da norma ABNT NBR 5419, visando preencher lacunas existentes e melhorar a efetividade das medidas de proteção contra descargas atmosféricas, fornecendo exemplos práticos, diretrizes claras e recomendações atualizadas para a seleção de materiais e a análise de riscos. Espera-se, assim, melhorar a eficácia da proteção contra raios nessa edificação específica e contribuir para o avanço da área de proteção contra descargas atmosféricas.

## 1.2 Problema

O problema motivador para a pesquisa consiste na elaboração de projeto de SPDA para uma edificação do tipo museu com atendimento das exigências normativas. Com o objetivo de ampliar a análise de Proteção contra Descargas Atmosféricas realizado para uma unidade fabril elaborado por Kafer (2018) este estudo utilizará aquele projeto como base para uma unidade consumidora do tipo museu como objeto de pesquisa. No entanto, a estrutura física, dimensões, fatores externos e valores financeiros da unidade fabril serão utilizados como referência para o desenvolvimento do trabalho. Em vez disso, o objeto de estudo será um Museu, onde o foco não será avaliar o risco de perda financeira, mas sim o risco de perda de patrimônio cultural.

Essa mudança no objeto de estudo requer uma abordagem técnica diferente da adotada na unidade fabril. No caso de um Museu, o objetivo principal é garantir a proteção do patrimônio cultural, que pode incluir obras de arte, documentos históricos, exposições e outras coleções. O SPDA deve ser projetado e dimensionado com base nos riscos específicos que esses patrimônios enfrentam, como a possibilidade de danos por descargas atmosféricas, e com base nas normas técnicas aplicáveis.

Além disso, o projeto do SPDA deve levar em consideração os requisitos estéticos e arquitetônicos do museu, a fim de minimizar o impacto visual do sistema de proteção na aparência geral do edifício. Isso pode incluir o uso de materiais de revestimento que combinem com a aparência da estrutura existente ou a instalação de componentes de proteção em locais discretos, como dentro de dutos de ventilação ou coberturas.

Em suma, a mudança do objeto de estudo para um museu requer uma abordagem técnica específica para garantir que o SPDA ofereça a proteção necessária ao patrimônio cultural, sem comprometer a estética e a integridade do edifício.

## 1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver novas medidas de proteção contra raios para uma estrutura específica de uma edificação do tipo museu, que vão além das medidas sugeridas em um estudo anterior conduzido por Kafer (2018), e que servirá como base para avaliação das medidas existentes e como ponto de partida para a proposição de novas medidas para o SPDA do museu. O estudo também tem como objetivos específicos avaliar as vantagens e desvantagens de cada método proposto, destacando suas recomendações específicas e

observando cada análise em detalhes. Os objetivos específicos do estudo podem ser descritos como:

a) reavaliar as medidas de proteção implementadas no projeto de SPDA elaborado por Kafer (2018) e determinar se elas atendem às necessidades da de proteção da edificação do tipo museu, objeto de análise neste estudo;

b) dimensionar novos SPDAs para a edificação do museu.

## **2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA**

Segundo Kindermann (2002), as correntes de ar armazenam grande quantidade de umidade. Esta, por sua vez, ao deparar com temperaturas mais baixas em regiões elevadas, tende a se condensar, formando diversas partículas flutuantes de água na atmosfera. Estas partículas vão se unindo e formando grupos cada vez maiores.

Ainda de acordo com (GRIFFITHS, 2017), a indução de cargas elétricas em agrupamentos de partículas de água na atmosfera é baseada na teoria eletrostática. Quando uma partícula de água é formada por condensação na atmosfera, ela adquire uma carga elétrica devido à separação de cargas que ocorre durante o processo de condensação. Essa separação ocorre devido às diferentes taxas de difusão de íons negativos e positivos na gota de água, o que leva a uma polarização elétrica.

À medida que as partículas se unem e formam agrupamentos maiores, essas cargas elétricas são somadas e resultam em um acúmulo de cargas elétricas na superfície desses agrupamentos. O planeta Terra é considerado um referencial negativo, uma vez que sua superfície tem uma carga elétrica globalmente negativa em relação ao ar, que é um condutor elétrico fraco.

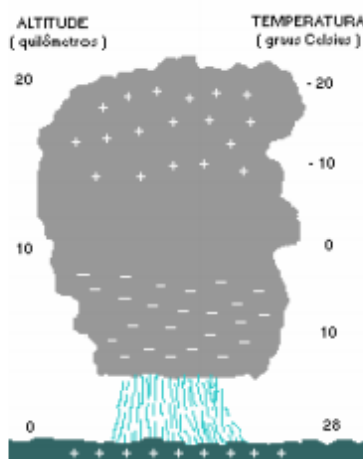
Assim, o acúmulo de cargas elétricas nas partes inferiores e superiores dos agrupamentos de partículas de água na atmosfera é uma consequência da polarização elétrica de cada partícula e da soma dessas cargas em agrupamentos maiores, e da interação entre essas cargas e a carga elétrica global da Terra. Esse processo pode gerar, por exemplo, tempestades elétricas, descargas atmosféricas e raios, que são fenômenos naturais decorrentes da eletricidade estática na atmosfera (EARLE R., 2001).

A partir do momento em que estes grupos atingem um certo tamanho, começam a se despedaçar em fragmentos menores, disseminando íons positivos na parte inferior e íons negativos na parte superior.

As correntes de ar ascendentes contêm diversas partículas de água que colidem com os íons positivos. As correntes de ar ascendentes contêm diversas partículas de água que colidem com os íons positivos, o que leva ao compartilhamento de elétrons entre o grupo de partículas neutras e o íon positivo, tornando-o neutro. Como resultado, o grupo de partículas neutras adquire uma carga positiva e é impulsionado para cima devido à alta energia cinética com que se movimentam, estes conseguem atingir a parte superior da nuvem. Em contrapartida, os íons negativos, como possuem baixa energia cinética, ficam aglomerados na parte inferior da nuvem (KINDERMANN, 2002, p. 51).

Após a ocorrência dos fenômenos supracitados, a parte inferior da nuvem fica carregada negativamente. Este fato faz com que seja induzida uma concentração de cargas positivas no solo imediatamente abaixo da região da nuvem eletricamente polarizada. A Figura 1 apresenta este fenômeno.

Figura 1 - Nuvem carregada eletricamente



Fonte: Extraída de Coutinho Alto, (2003)

De acordo com a Figura 1, é possível observar que existe uma diferença de potencial elétrico entre a nuvem carregada negativamente e o solo. Para valores baixos de diferença de potencial, o ar é considerado um bom isolante elétrico, ou seja, não permite a passagem de corrente elétrica através dele. No entanto, é importante destacar que, segundo (DEKKER, 1994), a rigidez dielétrica do ar, que é de aproximadamente 30 kV/cm, pode ser superada em condições extremas, como em tempestades elétricas. A rigidez dielétrica do ar é um fator importante na formação e propagação de correntes elétricas na atmosfera, o que torna o estudo de descargas atmosféricas e raios essencial para a compreensão da dinâmica do clima.

Devido à alta diferença de potencial elétrico, a camada de ar entre a nuvem e o solo pode se tornar condutora, permitindo a passagem de uma corrente elétrica que se manifesta na

forma de raios. Quando submetidos a um campo elétrico intenso, os elétrons presentes no ar podem se tornar livres, gerando muitos íons positivos e negativos, o que transforma o ar em um condutor elétrico. A compreensão desses processos é essencial para o estudo e a prevenção de fenômenos climáticos extremos. A parte inferior da nuvem, com alta densidade de carga negativa, repele as cargas elétricas negativas do solo e principalmente de objetos mais altos e que estão mais próximos da terra. Desta forma, há um excesso ou acúmulo de cargas positivas nos objetos altos abaixo da região inferior da nuvem carregada negativamente.

Seguindo o Poder das Pontas, em um objeto condutor eletrizado, as cargas tendem a aglomerar-se em suas pontas. Em consequência disso, o campo elétrico próximo a áreas pontiagudas de um material condutor tem maior intensidade. Este fenômeno faz com que exista uma elevação na força de repulsão elétrica entre as cargas. Isso faz com que as cargas elétricas sejam expelidas para fora da ponta e transitem com facilidade pelo ambiente, como o ar, por exemplo. O resultado disso é a descarga elétrica, que se forma a partir do momento que há aglomeração de cargas nas pontas de um objeto condutor eletrizado, devido ao efeito do Poder das Pontas, e a elevação na força de repulsão elétrica entre as cargas, que faz com que elas sejam expelidas para fora da ponta e transitem pelo ambiente, como o ar, por exemplo. (VISACRO FILHO, 2005, p. 185).

Os raios podem percorrer distâncias da ordem de 5 km e são considerados ascendentes quando se originam no solo e propagam em direção a nuvem ou descendentes, quando têm início na nuvem e descem rumo ao solo.

De acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, a descarga elétrica média pode ocorrer com correntes elétricas de até 20 kA, aproximadamente mil vezes a intensidade da corrente elétrica necessária para energizar um chuveiro elétrico (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2021).

De acordo com a NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), a descarga atmosférica que atinge uma estrutura pode causar danos à própria estrutura, bem como aos seus usuários e bens internos, incluindo a falha dos sistemas instalados. Além disso, os efeitos danosos podem se propagar para as estruturas circunvizinhas e ainda afetar o entorno imediato. A magnitude dos danos e suas consequências para as estruturas adjacentes variam de acordo com as características construtivas e elétricas das edificações, bem como das condições ambientais e das características da descarga atmosférica.

O fenômeno *LEMP* (*Lightning Electromagnetic Impulse*) é um tipo de pulso eletromagnético de alta intensidade gerado por uma descarga atmosférica, que pode se propagar por fios elétricos, cabos de dados, linhas de transmissão, entre outros meios. Ele é uma das

principais causas de danos em equipamentos eletrônicos, tais como computadores, aparelhos de TV, telefones, sistemas de controle e automação, entre outros (GUIMARÃES *et al.*, 2019).

Conforme a regulamentação da NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), um projeto de SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas) deve levar em consideração o *LEMP*, pois ele pode causar danos significativos aos equipamentos conectados à rede elétrica, mesmo que a descarga atmosférica não atinja diretamente a estrutura protegida pelo SPDA. Por isso, é necessário que o sistema de proteção seja dimensionado para suportar correntes de LEMP e que os equipamentos conectados à rede elétrica sejam protegidos por dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS).

As descargas atmosféricas podem causar efeitos variados em diversos tipos de estruturas. Em ambientes residenciais domésticos, por exemplo, podem causar perfuração da isolamento das instalações elétricas, incêndio, danos materiais, falha de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos instalados (tais como aparelhos de TV, computadores e telefones). Em indústrias, os efeitos dependem do conteúdo da unidade fabril e incluem desde paralisação total da produção até danos inaceitáveis.

Considerando o efeito das descargas atmosféricas em museus, sítios arqueológicos e igrejas, por exemplo, o principal impacto é a perda de patrimônio cultural insubstituível, como destacado por Visacro Filho (2005).

## **2.1 Normas relacionadas a PDA**

A norma ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004) tem como principal objetivo estabelecer as condições mínimas necessárias para garantir a segurança nas instalações elétricas de baixa tensão. Ela busca assegurar a proteção contra riscos elétricos, prevenir acidentes e garantir o correto funcionamento dos sistemas elétricos em diferentes tipos de edificações. Além disso, a norma visa promover a uniformização de práticas e procedimentos no âmbito das instalações elétricas, proporcionando um referencial técnico atualizado e confiável para profissionais da área. Nesta norma há recomendações e orientações técnicas para implementação de sistemas de aterramento e de equipotencialização que são de fundamental relevância um SPDA.

A norma NBR 5419 (ABNT, 2015) é uma norma complementar à NBR 5410 (ABNT, 2004) e aborda especificamente a proteção contra descargas atmosféricas. Ela é dividida em quatro partes principais. A primeira parte da norma NBR 5419 (ABNT, 2015a) trata dos princípios gerais da proteção contra descargas atmosféricas, fornecendo orientações sobre os efeitos dos raios, os critérios de proteção, a análise de risco e a seleção dos métodos e

sistemas de proteção adequados. A segunda parte aborda o projeto de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), incluindo a escolha dos materiais, o dimensionamento dos componentes e a instalação correta do sistema. A terceira parte trata da inspeção, manutenção e ensaios de um SPDA, abordando os procedimentos necessários para garantir o funcionamento eficaz do sistema ao longo do tempo. É destacada a importância da verificação periódica e da realização de testes. Por fim, a quarta parte apresenta exemplos de aplicação da norma em diferentes tipos de estruturas e edificações, tais como residências, edifícios comerciais e industriais, auxiliando assim na compreensão e na aplicação prática das diretrizes estabelecidas.

A norma regulamentadora NR-10 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2019) que trata de instalações e serviços em eletricidade, possui seções específicas que abordam os requisitos para proteção contra descargas atmosféricas. Essas seções estão relacionadas ao projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) nas instalações elétricas. A norma estabelece diretrizes para a proteção adequada contra raios, considerando aspectos como a análise de risco, a seleção dos métodos e materiais adequados, e a inspeção e manutenção periódica dos sistemas de proteção.

## **2.2 Fontes dos danos, riscos e perdas**

Considerando que a corrente elétrica proveniente da descarga atmosférica é a fonte de danos supracitados, para a avaliação de risco é fundamental entender as situações que devem ser observadas em razão do ponto de impacto (local de recebimento da descarga) relativo à estrutura considerada. Em concordância com a NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), há quatro situações, sendo elas:

- a) descargas atmosféricas na estrutura: S1;
- b) descargas atmosféricas próximas à estrutura: S2;
- c) descargas atmosféricas sobre as linhas elétricas e tubulações metálicas que penetram na construção: S3;
- d) descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que penetram na construção: S4.

Em consequência ao recebimento da descarga atmosférica, esta pode causar três tipos principais de danos, tais como:

- a) danos às pessoas devido a choque elétrico: D1;

b) danos físicos (fogo e explosão, por exemplo) devido aos efeitos das correntes das descargas atmosféricas, inclusive centelhamento: D2;

c) falhas de sistemas internos devido a *LEMP* (*lightning electromagnetic impulse*): D3.

Em conformidade com a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), danos relevantes à estrutura a ser protegida, seja isoladamente ou em conjunto com outros danos, podem resultar em diferentes tipos de perdas, que variam de acordo com as características da própria estrutura. O tipo de perda que pode ocorrer depende das características da própria estrutura. Seguindo as diretrizes da norma, são considerados os seguintes tipos de perdas, os quais podem aparecer como consequência de danos relevantes à estrutura:

- a) perda de vida humana (incluindo-se danos permanentes): L1;
- b) perda de serviço ao público: L2;
- c) perda de patrimônio cultural: L3;
- d) perda de valor econômico: L4.

Um compilado sobre as fontes de danos, tipos de danos e perdas é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Danos e perdas relevantes para uma estrutura para diferentes pontos de impacto

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

---

metálica

---

Fonte: Extraído de NBR 5419-1, 2015.

No que diz respeito aos danos causados por descargas atmosféricas em edifícios, existem inúmeros casos documentados que ilustram seus efeitos. A fim de fornecer uma visão mais tangível de danos e perdas, a Figura 2 extraída de uma prestadora de serviços em SPDA, a EMF Engenharia e Serviços (EMF ENGENHARIA E SERVIÇOS TÉCNICOS, 2023) contém uma seleção de fotos que exemplificam os efeitos que as descargas atmosféricas podem provocar. Essas imagens retratam situações reais em que edifícios foram afetados, evidenciando a importância da implementação adequada de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) e da adoção de medidas preventivas para minimizar os riscos associados a esses eventos. É fundamental estar ciente desses danos potenciais e tomar as devidas precauções para garantir a segurança das estruturas e das pessoas nelas envolvidas.

Figura 2 - Danos causados por descargas atmosféricas

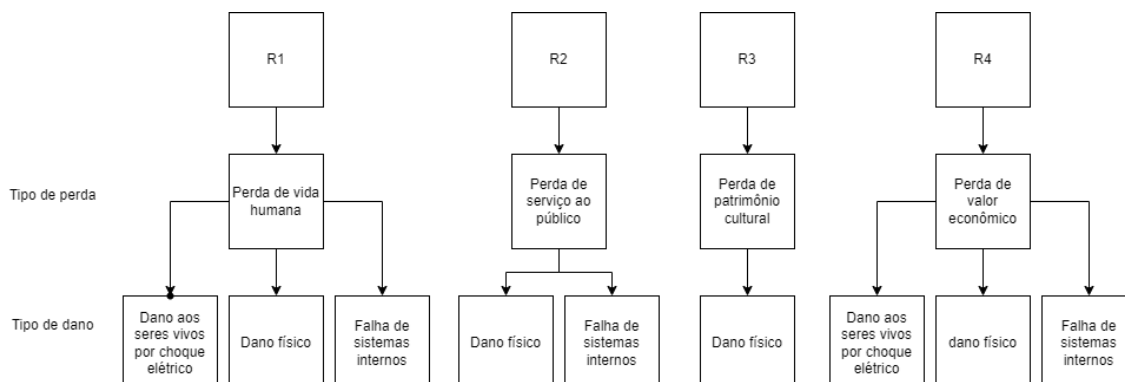


Fonte: Extraído de EMF ENGENHARIA, 2023.

Considerando as informações da Tabela 1, é importante destacar que, para este trabalho, o foco está nas descargas diretas e nas descargas nas linhas externas que adentram a instalação, pois são esses os casos que podem causar danos socioculturais relevantes. É fundamental que o projeto de SPDA leve em conta esses tipos de descargas, a fim de minimizar os possíveis danos aos ocupantes da edificação e aos bens culturais ou materiais que possam ser afetados.

A relação entre os tipos de perdas com os respectivos tipos de danos para cada risco correspondente está apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Tipos de perdas para cada risco e danos correspondentes resultantes



Fonte: Extraído de NBR 5419-1, 2015.

Seguindo as diretrizes da NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), é fundamental avaliar a necessidade de proteção contra raios em uma estrutura para minimizar possíveis perdas de valor social, incluindo L1, L2 e L3.

Neste trabalho, optou-se por não abordar a perda L4, relacionada à análise econômica. O foco principal desta pesquisa está em desenvolver e analisar os métodos de proteção contra raios (Faraday, Franklin e Eletrogeométrico) com base em suas características técnicas e práticas de aplicação.

Embora a análise econômica seja um aspecto importante na tomada de decisões relacionadas à proteção contra raios, sua abordagem requer uma análise mais aprofundada e envolve fatores específicos, como custos de instalação, manutenção, riscos associados e benefícios esperados. Dado o escopo deste trabalho e suas limitações de recursos, a análise econômica foi excluída para concentrar-se nas características técnicas e práticas dos métodos de proteção.

Ressalta-se que a exclusão da perda L4 não diminui a relevância deste estudo, uma vez que a compreensão das características dos métodos de proteção contra raios e sua aplicação prática são fundamentais para garantir a segurança das estruturas e das pessoas envolvidas.

Para determinar se uma Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA) é necessária, deve ser realizada uma avaliação de risco utilizando os procedimentos definidos na norma. Nessa avaliação, é crucial considerar os seguintes riscos, relacionados aos tipos de perdas mencionados anteriormente.

- a)  $R_1$ : risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;
- b)  $R_2$ : risco de perdas de serviços ao público;

- c)  $R_3$ : risco de perdas do patrimônio cultural;
- d)  $R_4$ : risco de perdas de valores econômicos.

A PDA é necessária se o risco  $R$  ( $R_1$  a  $R_4$ ) for maior que o risco tolerado  $R_T$ , caso em que devem ser adotadas medidas de proteção de modo a reduzir o risco  $R$  ao nível tolerável  $R_T$  de forma a atender a condição representada pela Equação (1):

$$R \leq R_T \quad (1)$$

Caso exista mais de um tipo de perda, a condição da Equação (1) deve ser respeitada para cada tipo de perda.

Para reduzir o risco relacionado ao tipo de dano, podem ser adotadas medidas de proteção capazes de evitar os riscos de choque elétrico, danos físicos e falhas de sistemas elétricos. A Tabela 2 apresenta uma correspondência entre os danos e suas possíveis medidas de proteção.

Tabela 2 - Medidas de proteção para a reduzir o risco de acordo com o tipo de dano

<b>Danos a pessoas devido a choque elétrico</b>	<b>Danos físicos</b>	<b>Falhas dos sistemas elétricos e eletrônicos</b>
Isolação adequada das partes condutoras expostas	Subsistema de captação	Medidas de aterramento e equipotencialização
Equipotencialização por meio de um sistema de aterramento em malha	Subsistema de descida	Blindagem eletromagnética
Restrições físicas e avisos	Subsistema de aterramento	Roteamento da fiação
Ligação equipotencial para descargas atmosféricas (LE)	Equipotencialização para descargas atmosféricas (EB)	Interfaces isolantes
	Isolação elétrica assegurada pela definição das distâncias de segurança	Sistema de DPS coordenado

Fonte: Modificado de ABNT NBR 5419-1, 2015.

Na Tabela 2, são apresentados alguns termos relacionados à proteção contra surtos elétricos em sistemas de energia. Segundo a NBR 5419-4 (ABNT, 2015), o roteamento da fiação refere-se ao planejamento da instalação dos cabos de energia para evitar que eles fiquem expostos a condições ambientais desfavoráveis, como chuva ou raios, que podem danificar a fiação. Alguns exemplos de roteamento da fiação incluem o uso de caminhos específicos para os cabos, separação de cabos de diferentes funções e uso de conduítes para proteção dos cabos. As interfaces isolantes são dispositivos que isolam eletricamente os equipamentos conectados à rede elétrica, protegendo-os contra sobretensões e surtos elétricos. Por fim, o sistema DPS coordenado é um sistema de proteção contra surtos elétricos que utiliza dispositivos de proteção de surtos (DPS) distribuídos estrategicamente na rede elétrica, com o objetivo de garantir uma proteção eficiente em todas as áreas críticas do sistema. Todos esses termos são essenciais para garantir a proteção adequada dos equipamentos elétricos contra surtos e sobretensões.

De acordo com a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), as medidas de proteção associadas pela Tabela 2 compõem o SPDA completo. No entanto, é importante que a escolha das medidas mais adequadas de proteção seja realizada por um profissional habilitado, considerando aspectos técnicos e acessíveis das diferentes opções de proteção. Esses aspectos incluem, por exemplo, a disponibilidade de materiais e equipamentos no mercado, a facilidade de instalação e manutenção, e a compatibilidade com outras instalações elétricas existentes. A proteção deve ser adequada de acordo com o tipo e valor de cada tipo de dano, e baseada nos resultados da avaliação de riscos realizada pelo profissional habilitado.

Toda a metodologia para a avaliação do risco e para escolha das medidas de proteção mais adequadas está relatada na NBR 5419-2 (ABNT, 2015b). Dessa forma, as medidas de proteção são efetivas desde que elas satisfaçam os requisitos das normas correspondentes e sejam capazes de suportar os impactos esperados nos respectivos locais de suas instalações. Por outro lado, devem ser projetadas para um conjunto definido de parâmetros das correntes dos raios, frente às quais é requerida a proteção, de acordo o NP.

### **2.3 Gerenciamento de Risco**

Para avaliar os riscos (R), os relevantes componentes de risco, que são riscos parciais que dependem da fonte e do tipo de dano, devem ser definidos e calculados. Cada risco (R) é determinado a partir da soma dos seus componentes de risco. Ao calcular um risco, os componentes de risco podem ser reunidos conforme as fontes de danos e os tipos de danos. De acordo com a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), existem quatro níveis de proteção (NP)

contra descargas atmosféricas (I a IV). Cada NP é definido por um conjunto de parâmetros que estabelecem limites máximos e mínimos para as correntes das descargas atmosféricas.

#### **2.4 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas na estrutura**

Há componentes de risco associadas a cada fonte de dano. Para descargas atmosféricas que atingem diretamente a estrutura, tem-se os riscos parciais  $R_A$ ,  $R_B$  e  $R_C$ :

- a)  $R_A$  : relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora desta, nas zonas até 3 m ao redor dos condutores de descidas. Perda de tipo L1 pode aumentar;
- b)  $R_B$ : relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem aumentar;
- c)  $R_C$ : relativo a falhas de sistemas internos causados por *LEMP*. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos. É devido à descarga direta na estrutura e é caracterizado pelo fluxo de corrente que flui pela estrutura e pelos objetos condutores conectados a ela.

#### **2.5 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto da estrutura**

Para descargas atmosféricas que não atingem diretamente a estrutura, mas áreas vizinhas, tem-se o risco parcial  $R_M$ :

- a)  $R_M$  : relativo a falhas de sistemas internos causados por *LEMP* devido a descargas atmosféricas próximas à estrutura. Nesse caso, o pulso eletromagnético pode induzir correntes elétricas em circuitos eletrônicos e equipamentos sensíveis, causando avarias ou mau funcionamento. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos.

#### **2.6 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas a uma linha conectada à estrutura**

Para descargas atmosféricas que atingem diretamente a linha conectada à estrutura, tem-se os riscos parciais  $R_U$ ,  $R_V$  e  $R_W$ :

a)  $R_U$  : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura. Perda do tipo L1 pode ocorrer;

b)  $R_V$  : relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura) devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ou ao longo das linhas. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem ocorrer;

c)  $R_W$  : relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que penetram na construção e são transmitidas a esta. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos. No caso de  $R_W$ , a descarga atmosférica ocorre na linha conectada, ou seja, na própria linha que fornece energia elétrica à edificação ou que faz a comunicação com o exterior.

## **2.7 Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura**

Para descargas atmosféricas que não atingem diretamente a linha conectada à estrutura, mas áreas próximas, tem-se o risco parcial  $R_Z$ .

a)  $R_Z$  : relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que penetram na construção e são transmitidas a esta. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos. Por sua vez,  $R_Z$  se refere às descargas atmosféricas que ocorrem próximas à linha conectada, mas não diretamente nela. Essas descargas atmosféricas próximas podem gerar sobretensões que afetam os equipamentos e sistemas conectados à linha. Embora tenham a mesma descrição,  $R_Z$  e  $R_W$  diferem no local da descarga atmosférica.

## **2.8 Composição dos componentes de risco**

Em situações em que as estruturas possuem risco de explosão ou são instalações críticas, como hospitais, nos quais falhas nos sistemas internos podem imediatamente ameaçar vidas humanas, poderá ocorrer perdas do tipo L1. No entanto, para o caso específico deste trabalho, que envolve a análise de uma edificação do tipo museu, não há risco de explosão, pois não existem substâncias inflamáveis ou explosivas presentes no local. Além disso, um museu não é considerado uma instalação crítica, em que falhas de sistemas internos possam colocar em perigo imediato a vida humana, já que sua finalidade é exhibir obras de arte e objetos históricos.

Em estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos podem imediatamente colocar em perigo a vida humana, o tipo de perda L1 pode ocorrer. Entretanto, devido à ausência de risco de explosão e de perigo imediato à vida humana no museu analisado, as componentes  $R_M$ ,  $R_W$  e  $R_Z$ , embora estejam incluídas nas equações utilizadas neste trabalho, não contribuem para a análise. Isso ocorre porque essas componentes estão relacionadas a falhas nos sistemas internos das estruturas, que podem levar à ocorrência de perdas do tipo L1 em situações críticas. Como mencionado anteriormente, esse tipo de situação não se aplica ao museu em questão. Portanto, a análise se concentra nas componentes restantes, que são relevantes para a proteção contra descargas atmosféricas em estruturas semelhantes à do museu.

A ocorrência de perda do tipo L4 é comum em propriedades agrícolas, nas quais também pode haver perda de animais. No entanto, no caso deste trabalho, que envolve a análise de um museu, não há propriedade agrícola envolvida, uma vez que o local não é utilizado para a criação de animais. Além disso, não há possibilidade de perda de animais, uma vez que o museu não abriga nenhum tipo de animal vivo. Dessa forma, as componentes  $R_A$  e  $R_U$ , embora incluídas nas equações deste trabalho, não contribuem para a análise, pois não há necessidade de levar em consideração o impacto sobre animais ou propriedades agrícolas.

Embora as componentes  $R_M$ ,  $R_W$  e  $R_Z$  sejam desconsideradas na análise para o museu, são apresentadas as equações completas, incluindo essas componentes. A razão para isso é que apresentar a equação em sua forma integral fornece um panorama completo do modelo de análise adotado. Embora no caso específico do museu essas componentes não tenham relevância direta devido à natureza do local, é importante apresentá-las para uma compreensão abrangente do modelo e para facilitar futuras adaptações ou aplicações do método em diferentes cenários. Assim, mesmo que essas componentes não tenham impacto no resultado da análise para o museu em questão, sua inclusão permite uma maior flexibilidade e entendimento geral do modelo utilizado.

Segundo a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), as componentes de risco a serem consideradas para cada tipo de perda na estrutura são listadas pelas Equações (2), (3), (4) e (5) a seguir:

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1} \quad (2)$$

em que  $R_1$  é o risco de perda de vida humana.

$$R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2} \quad (3)$$

em que R2 é o risco de perda de serviço ao público.

$$R_3 = R_{B3} + R_{V3} \quad (4)$$

em que R3 é o risco de perda de patrimônio cultural.

$$R_4 = R_{A4} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4} \quad (5)$$

em que R4 é o risco de perda de valor econômico.

A Tabela 3 consolida as características da estrutura e de possíveis medidas de proteção que influenciam os componentes de risco para uma estrutura.

Tabela 3 - Fatores que influenciam os componentes de risco

<b>Características da estrutura ou dos sistemas internos (medidas de proteção)</b>	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_M$	$R_U$	$R_V$	$R_W$	$R_Z$
Área de exposição Equivalente	X	X	X	X	X	X	X	X
Resistividade da superfície do solo	X							
Resistividade do piso	X				X			
Restrições físicas, isolamento, avisos visíveis,	X				X			

equipotencializaç ão do solo									
SPDA	X	X	X	X <sup>a</sup>	X <sup>b</sup>	X <sup>b</sup>			
Ligação ao DPS	X	X			X	X			
Interfaces isolantes			X <sup>c</sup>	X <sup>c</sup>	X	X	X	X	
Sistema coordenado de DPS			X	X			X	X	
Blindagem espacial			X	X					
Blindagem de linhas Externas					X	X	X	X	
Blindagem de linhas Internas			X	X					
Precauções de roteamento			X	X					
Sistema de Equipotencializaç ão			X						
Precauções contra Incêndios		X					X		
Sensores de fogo		X					X		
Perigos especiais		X					X		
Tensão suportável de Impulso			X	X	X	X	X	X	

<sup>a</sup> Somente para SPDA tipo malha externa.

<sup>b</sup> Devido a ligações equipotenciais.

<sup>c</sup> Somente se eles pertencem ao equipamento.

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

A escolha da maioria das medidas de proteção adequadas deve ser combinada pelo projetista ou responsável técnico conforme a atuação de cada componente de risco no risco total  $R$  e de acordo com aspectos técnicos e econômicos das diferentes MPS (Medidas de Proteção contra Surtos). Ademais, é fundamental identificar os parâmetros críticos, com o objetivo de determinar as medidas mais eficientes para reduzir o risco total. Esses parâmetros podem variar de acordo com o tipo de sistema ou equipamento, mas alguns exemplos comuns incluem a magnitude e a frequência dos surtos elétricos, as características dos dispositivos de proteção utilizados e a sensibilidade dos componentes eletrônicos envolvidos. Para cada tipo de perda, há um número de MPS que, isoladamente ou em combinação, faz com que a condição  $R \leq R_T$  seja preservada.

## 2.9 Risco tolerável $R_T$

A Tabela 4 apresenta valores representativos de risco tolerável  $R_T$ , onde as descargas atmosféricas envolvem perdas de vida humana, perda de serviço ao público e perda de patrimônio cultural.

Tabela 4 - Valores típicos de risco tolerável  $R_T$

<b>Perda</b>	<b>Tipo de perda</b>	<b>Valor</b>
L1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	$10^{-5}$
L2	Perda de serviço ao público	$10^{-3}$
L3	Perda de patrimônio cultural	$10^{-4}$
L4	Perda de valor econômico	$10^{-3}$

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

## 2.10 Análise dos componentes de risco

Cada componente de risco  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_M$ ,  $R_U$ ,  $R_V$ ,  $R_W$  e  $R_Z$  pode ser expressa de uma forma geral, pela Equação (6):

$$R_X = N_X \times P_X \times L_X \quad (6)$$

em que  $N_X$  é o número de eventos perigosos por ano;  $P_X$  é a probabilidade de dano à estrutura e  $L_X$  é a perda consequente. Com observância da ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) o número  $N_X$  de eventos perigosos é dependente da densidade de descargas atmosféricas para a terra  $N_G$  e pelas características físicas da estrutura a ser protegida, por sua vizinhança, linhas conectadas e o solo. A probabilidade de dano  $P_X$  é afetada pelas características da estrutura a ser protegida, das linhas conectadas e das medidas de proteção existentes. A perda consequente  $L_X$  é afetada pelo uso para o qual a estrutura foi projetada, a frequência das pessoas, o tipo de serviço fornecido ao público, o valor dos bens afetados pelos danos e as medidas providenciadas para limitar a quantidade de perdas.

### **2.11 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na estrutura (S1)**

Para a avaliação dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na estrutura, as Equações (7), (8) e (9) são aplicáveis:

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A \quad (7)$$

em que  $R_A$  é a componente associada a ferimentos a seres vivos por choques elétricos (D1). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B \quad (8)$$

em que  $R_B$  é a componente associada a danos físicos (D2). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C \quad (9)$$

em que  $R_C$  é a componente associada à falha de sistemas internos (D3). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

### 2.12 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto da estrutura (S2)

Para a avaliação dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura, a Equação (10) é aplicável:

$$R_M = N_M \times P_M \times L_M \quad (10)$$

em que  $R_M$  é a componente associada à falha dos sistemas internos (D3). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

### 2.13 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura (S3)

Para a avaliação dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura, as Equações (11), (12) e (13) e são aplicáveis.

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U \quad (11)$$

em que  $R_U$  é a componente associada a ferimentos a seres vivos por choque elétrico (D1). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V \quad (12)$$

em que  $R_V$  é a componente associada a danos físicos (D2). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W \quad (13)$$

em que  $R_W$  a componente associada à falha de sistema internos (D3). As variáveis destas equações estão descritas na Tabela 5.

Ainda segundo a NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), em muitos casos,  $N_{DJ}$  pode ser desprezado. Isto porque, em geral, as descargas atmosféricas tendem a buscar o caminho de

menor resistência elétrica para atingir o solo, o que significa que o raio provavelmente atingirá o ponto mais alto da edificação ou estrutura mais próxima. Além disso, a maioria dos SPDAs é projetado para proteger uma área específica, com base em sua altura, dimensões e localização geográfica. Portanto, se um SPDA estiver corretamente instalado e dimensionado, ele será capaz de atrair a descarga atmosférica para si e dissipar a energia da descarga de forma segura para o solo, protegendo a área designada.

#### 2.14 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura (S4)

Para a avaliação dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura, a Equação (14) é aplicável:

$$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z \quad (14)$$

em que  $R_Z$  é a componente associada à falha dos sistemas internos (D3). As variáveis desta equação estão descritas na Tabela 5.

A Tabela 5 apresenta todos os parâmetros para avaliar as componentes de risco, em função do número médio anual de eventos perigosos devido aos raios, probabilidades e perdas.

Tabela 5 - Parâmetros relevantes para avaliação dos componentes de risco

<b>Símbolo</b>	<b>Denominação</b>
<b>Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas</b>	
$N_D$	À estrutura
$N_M$	Perto da estrutura
$N_L$	Em uma linha conectada à estrutura
$N_I$	Perto de uma linha conectada à estrutura
$N_{DJ}$	A uma estrutura adjacente
<b>Probabilidade de uma descarga atmosférica da estrutura causar</b>	

$P_A$	Ferimentos a seres vivos por choque elétrico
$P_B$	Danos físicos
$P_C$	Falha de sistemas internos
<b>Probabilidade de uma descarga atmosférica perto da estrutura causar</b>	
$P_M$	Falha de sistemas internos
<b>Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar</b>	
$P_U$	Ferimentos a seres vivos por choque elétrico
$P_V$	Danos físicos
$P_W$	Falha de sistemas internos
<b>Probabilidade de uma descarga atmosférica perto de uma linha causar</b>	
$P_Z$	Falha de sistemas internos
<b>Perda devido a</b>	
$L_A = L_U$	Ferimentos a seres vivos por choque elétrico
$L_B = L_V$	Danos físicos
$L_C = L_M = L_W = L_Z$	Falha de sistemas internos

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

A Tabela 6 apresenta uma síntese a respeito das componentes de risco para estruturas de acordo com os tipos diferentes de danos e diferentes fontes de danos.

Tabela 6 - Componentes de risco para diferentes tipos de danos e fontes de danos

	<b>Fonte de danos</b>			
	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
<b>Danos</b>	<b>Descarga atmosférica na estrutura</b>	<b>Descarga atmosférica perto da estrutura</b>	<b>Descarga atmosférica na linha conectada</b>	<b>Descarga atmosférica perto da linha conectada</b>

D1	$R_A$		$R_U$	
Ferimentos a seres vivos por choque elétrico	$= N_D \times P_A$ $\times L_A$		$= (N_L + N_{DJ})$ $\times P_U \times L_U$	
D2	$R_B$		$R_V$	
Danos físicos	$= N_D \times P_B$ $\times L_B$		$= (N_L + N_{DJ})$ $\times P_V \times L_V$	
D3	$R_C$	$R_M$	$R_W$	$R_Z$
Falha de sistemas eletroeletrônicos	$= N_D \times P_C$ $\times L_C$	$= N_D \times P_M$ $\times L_M$	$= (N_L + N_{DJ})$ $\times P_W \times L_W$	$= N_I \times P_Z$ $\times L_Z$

Fonte: Modificado de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Ainda, de acordo com a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), caso a estrutura for dividida em zonas  $Z_S$ , cada componente de risco deve ser avaliada para cada zona, de forma independente. O risco total  $R$  da estrutura é a soma das componentes de risco relevantes para as zonas  $Z_S$  que compõem a estrutura.

### 2.15 Dividindo a estrutura em zonas $Z_S$

A norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) fornece diretrizes importantes para a análise e avaliação de riscos de um SPDA em uma estrutura. Uma das principais recomendações é a divisão da estrutura em zonas  $Z_S$ , a fim de facilitar a análise de cada componente de risco e permitir uma melhor implementação das medidas de proteção adequadas.

Essa divisão em zonas  $Z_S$  é altamente recomendada, mas não obrigatória. A estrutura pode ser considerada como contendo uma zona única, caso não haja condições práticas de implementar uma divisão em zonas. Porém, é importante ressaltar que a divisão em zonas é extremamente útil na identificação dos componentes de risco, permitindo uma avaliação mais precisa dos riscos envolvidos.

Além disso, as zonas  $Z_S$  podem ser definidas de acordo com as características análogas de cada uma. Por exemplo, pode-se dividir a estrutura com base no tipo de solo ou piso, ou em compartimentos à prova de fogo. Essa divisão deve levar em consideração a

facilidade de implementação das medidas de proteção adequadas em cada zona, visando garantir uma proteção eficiente contra possíveis descargas atmosféricas.

Embora a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) afirme que a estrutura pode ser dividida em zonas  $Z_S$ , cada uma com características análogas, também é possível considerar a estrutura como contendo apenas uma zona. Isso pode acontecer em casos em que a estrutura é relativamente pequena ou simples, com poucos elementos que possam afetar a proteção contra descargas atmosféricas.

Além disso, em algumas situações, a separação em zonas pode não ser prática ou necessária para garantir a segurança contra raios. Nesses casos, a análise da estrutura pode ser realizada considerando-a como uma zona única, desde que sejam tomadas as medidas de proteção adequadas e as características da estrutura sejam avaliadas de forma precisa e criteriosa.

## **2.16 Análise do número anual $N$ de eventos perigosos**

A norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) contém orientações e procedimentos para determinação do número médio anual  $N$  de eventos perigosos devido aos raios que atingem a estrutura a ser protegida. Esse número refere-se aos riscos associados aos raios que podem afetar a estrutura e sua proteção, incluindo danos materiais, riscos à segurança dos ocupantes da estrutura e outros impactos socioculturais. Essa determinação depende das condições climáticas da região, uma vez que as características do ambiente físico em que a estrutura está localizada, tais como precipitação, umidade, temperatura e ventos, podem influenciar a frequência e a intensidade das descargas atmosféricas na região.

O Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem desempenhado um papel significativo no estudo das descargas atmosféricas no Brasil. Suas contribuições incluem o monitoramento e mapeamento da atividade elétrica atmosférica em várias regiões do país, fornecendo informações valiosas sobre a frequência e a distribuição das descargas. Além disso, o ELAT desenvolveu modelos de previsão de raios, considerando fatores sazonais, topografia local e condições meteorológicas, auxiliando na prevenção de acidentes relacionados a raios. O grupo também realiza um importante trabalho de divulgação e conscientização pública, compartilhando informações sobre os riscos das descargas atmosféricas e promovendo medidas de proteção e segurança durante tempestades.

A densidade de descargas atmosféricas para a terra  $N_G$  é o número de descargas atmosféricas por  $km^2$  por ano. O valor desta grandeza pode ser obtido por meio das redes de localização de descargas atmosféricas para a terra instaladas em diversas regiões no mundo. No Brasil, o INPE por meio do Grupo de Eletricidade Atmosférica (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2021), disponibilizou os dados de  $N_G$  de duas formas:

- a) mapas isoceráunicos impressos do Brasil e as cinco regiões brasileiras, que está disponível no Anexo F da norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b);
- b) link na internet acessado pelo endereço: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>, no campo de pesquisa Concentração de raios nas cidades do Brasil.

Um mapa isoceráunico é uma representação gráfica que mostra as áreas com a mesma densidade de descargas atmosféricas em uma determinada região. Essa densidade é medida em termos de descargas por quilômetro quadrado por ano. O mapa é elaborado com base em dados coletados por redes de detecção de raios e fornece informações valiosas sobre a frequência e a distribuição das descargas atmosféricas em uma área geográfica específica (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2021).

A importância do mapa isoceráunico reside no fato de que ele auxilia na análise e no planejamento de medidas de proteção contra descargas atmosféricas. Com base nas informações contidas no mapa, é possível identificar as áreas com maior incidência de raios e, assim, direcionar esforços para implementar sistemas de proteção adequados. Além disso, o mapa também é útil na avaliação de riscos e na tomada de decisões relacionadas à segurança, como a instalação de para-raios e o projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Para este projeto, o valor de  $N_G$  pode ser estimado utilizando o mapa isoceráunico da região sul do Brasil, com destaque para a cidade de Concórdia, localizada no estado de Santa Catarina, onde o projeto base foi desenvolvido. Para visualizar a figura que representa essa região, juntamente com a localização específica de Concórdia, é possível consultar o Apêndice P. Nesse apêndice, é apresentada a região abrangida pela cidade de Concórdia.

### **2.17 Análise do número médio anual de eventos perigosos $N_D$ devido a descargas atmosféricas na estrutura**

Para estruturas isoladas em solos planos, a área de exposição equivalente ( $A_D$ ) é a área definida pela intersecção entre a superfície do solo com uma linha reta de inclinação 1 para 3 a qual passa pelas partes mais altas da estrutura (tocando-a nestes pontos) e rotacionando ao

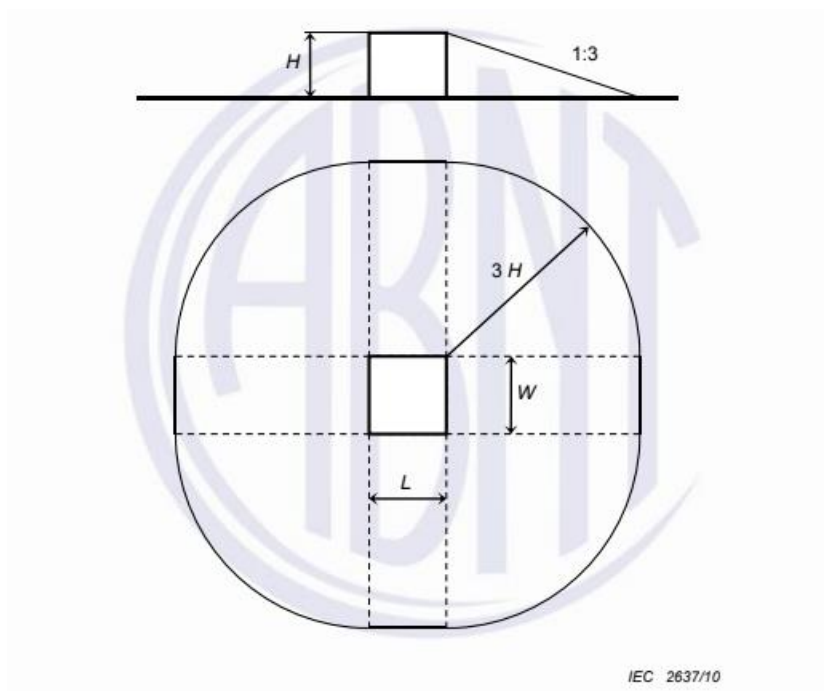
redor dela. A determinação do valor de  $A_D$  pode ser obtida graficamente ou matematicamente, segundo a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b).

Para uma estrutura retangular isolada, deve ser utilizada a Equação (15) que modela esta forma geométrica (ABNT, 2015).

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 \quad (15)$$

em que  $L$ ,  $W$  e  $H$  são as dimensões de comprimento, largura e altura, respectivamente, expressos em metros. A Figura 4 apresenta o modelo matemático para a construção da Equação (15).

Figura 4 - Área de exposição equivalente ( $A_D$ ) de uma estrutura isolada



Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Neste trabalho, o procedimento de cálculo utilizado para o desenvolvimento da Equação (15), com base na Figura 4, não está dentro do escopo do projeto e, portanto, não será apresentado. No entanto, a equação de Área de Exposição Equivalente ( $A_D$ ) é extremamente importante para projetos de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) porque ela é usada para calcular a área que deve ser protegida por um captor de raios. A Área de Exposição Equivalente ( $A_D$ ) é uma medida da superfície projetada de uma estrutura, levando

em consideração sua forma, tamanho e altura em relação ao solo. A partir da Área de Exposição Equivalente ( $A_D$ ), é possível determinar a quantidade e o posicionamento dos captadores de raios, bem como o espaçamento entre eles. Um projeto inadequado pode levar à falta de proteção de determinadas áreas, aumentando o risco de danos estruturais e à segurança das pessoas que ocupam a estrutura. Portanto, a equação de Área de Exposição Equivalente ( $A_D$ ) é fundamental para garantir a eficiência e a segurança do SPDA.

## 2.18 Localização relativa da estrutura

A localização relativa da estrutura, compensada pelas estruturas ao redor ou uma localização exposta, deve ser levada em consideração pelo fator de localização  $C_D$  (ABNT, 2015), conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Fator de localização da estrutura  $C_D$

Localização relativa	$C_D$
Estrutura cercada por objetos mais altos	0,25
Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos	0,5
Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte	2

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

## 2.19 Número de eventos perigosos $N_D$ para a estrutura

O valor de  $N_D$  pode ser calculado como resultado da multiplicação apresentada pela Equação (16):

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} \quad (16)$$

em que  $N_G$  é a densidade de descargas atmosféricas para a terra ( $\frac{1}{km^2} \times ano$ ),  $A_D$  é a área de exposição equivalente da estrutura, expressa em metro quadrado ( $m^2$ ) e  $C_D$  é o fator de localização da estrutura.

## 2.20 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos $N_M$ devido a descargas atmosféricas perto da estrutura

O valor de  $N_M$  pode ser calculado como resultado da multiplicação apresentada pela Equação (17):

$$N_M = N_G \times A_M \times 10^{-6} \quad (17)$$

em que  $N_G$  é a densidade de descargas atmosféricas para a terra ( $\frac{1}{km^2} \times ano$ ),  $A_M$  é a área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem perto da estrutura, expressa em metro quadrado ( $m^2$ ). O valor de  $A_M$  refere-se à área de exposição equivalente que se estende a uma linha localizada a uma distância de 500 m do perímetro da estrutura (ABNT, 2015). A Equação (18) expressa como o valor de  $A_M$  pode ser calculado:

$$A_M = 2 \times 500 \times (L + W) + \pi \times 500^2 \quad (18)$$

em que  $L$  e  $W$  são valores das dimensões de comprimento e de largura da estrutura a ser trabalhada.

### **2.21 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos $N_L$ devido a descargas atmosféricas na linha**

Uma linha pode consistir em diversas seções. Para cada seção da linha, o valor de  $N_L$  pode ser avaliado pela Equação (19):

$$N_L = N_G \times A_L \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} \quad (19)$$

em que  $N_L$  é o número de sobretensões de amplitude não inferior a 1kV ( $\frac{1}{ano}$ ) na seção da linha,  $N_G$  é a densidade de descargas atmosféricas para a terra ( $\frac{1}{km^2} \times ano$ ),  $A_L$  é a área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha, expressa em metro quadrado ( $m^2$ ),  $C_I$  é o fator de instalação da linha conforme a Tabela 8,  $C_T$  é o fator do tipo de linha, definido de acordo com a Tabela 9, e  $C_E$  é o fator ambiental, consoante a Tabela 10. O valor de área de exposição equivalente da linha  $A_L$  pode ser calculado pela Equação (20):

$$A_L = 40 \times L_L \quad (20)$$

em que  $L_L$  é o comprimento da seção da linha, expresso em metros (m). Ademais, onde o comprimento da seção da linha for desconhecido, pode ser assumido  $L_L = 1000$  m.

Tabela 8 - Fator de instalação da linha  $C_I$

<b>Roteamento</b>	$C_I$
Aéreo	1
Enterrado	0,5
Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento	0,01

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Tabela 9 - Fator tipo de linha  $C_T$

<b>Instalação</b>	$C_T$
Linha de energia ou sinal	1
Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)	0,2

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Tabela 10 - Fator ambiental da linha  $C_E$

<b>Ambiente</b>	$C_E$
Rural	1
Suburbano	0,5
Urbano	0,1
Urbano com edifícios mais altos que 20 m	0,01

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

## 2.22 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos $N_I$ devido a descargas atmosféricas perto da linha

Uma linha pode consistir em diversas seções. Para cada seção da linha, o valor de  $N_I$  pode ser avaliado pela Equação (21):

$$N_I = N_G \times A_L \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} \quad (21)$$

em que  $N_I$  é o número de sobretensões de amplitude não inferior a 1kV ( $\frac{1}{ano}$ ) na seção da linha,  $N_G$  é a densidade de descargas atmosféricas para a terra ( $\frac{1}{km^2} \times ano$ ),  $A_I$  é a área de exposição equivalente de descargas atmosféricas para a terra perto da linha, expressa em metro quadrado ( $m^2$ ),  $C_I$  é o fator de instalação da linha conforme Tabela 8,  $C_T$  é o fator do tipo de linha, de acordo com a Tabela 9, e  $C_E$  é o fator ambiental, consoante a Tabela 10. O valor de área de exposição equivalente perto da linha  $A_I$  pode ser calculado pela Equação (22):

$$A_I = 4000 \times L_L \quad (22)$$

em que  $L_L$  é o comprimento da seção da linha, expresso em metros (m). Ademais, onde o comprimento da seção da linha for desconhecido, pode ser assumido  $L_L = 1000$  m.

### 2.23 Avaliação da probabilidade $P_X$ de danos

Conforme descrito em norma, a probabilidade de dano  $P_X$  é afetada pelas características da estrutura a ser protegida, das linhas conectadas e das medidas de proteção existentes. Além disso, as probabilidades fornecidas pelo Anexo B da ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) são válidas se as medidas de proteção estiverem de acordo com:

- a) medidas de proteção para reduzir ferimentos a seres vivos e reduzir danos físicos;
- b) medidas de proteção para reduzir falhas de sistemas internos.

Seguindo os preceitos da norma, os valores de probabilidades  $P_X$  menores que 1 podem ser escolhidos somente se a medida ou característica é válida para a estrutura completa ou zona da estrutura (ZS) a ser protegida e para todos os equipamentos apropriados (ABNT, 2015).

### 2.24 Análise de quantidade de perda $L_X$

A norma brasileira (ABNT, 2015) sugere que os valores de quantidade de perda  $L_X$  sejam avaliados e fixados pelo projetista ou responsável técnico regularmente habilitado de SPDA (ou até mesmo o proprietário da estrutura). Os valores médios representativos da perda

$L_X$  de uma estrutura apresentados pela norma são valores unicamente propostos pela IEC e adotados nesta norma nacional.

### 2.25 Quantidade relativa média da perda por evento perigoso

De acordo com a norma brasileira (ABNT, 2015), a perda  $L_X$  corresponde à proporção média relativa de um tipo particular de dano causado por um evento perigoso de descarga atmosférica, considerando sua magnitude e efeitos. O valor de  $L_X$  varia dependendo do tipo de dano em questão:

- a) perda de vidas humanas, incluindo lesões permanentes, representada pelo número de pessoas em risco (vítimas): L1;
- b) perda de serviços públicos, sendo o número de usuários afetados: L2;
- c) perda de patrimônio cultural, sendo o valor econômico em risco da estrutura e seu conteúdo: L3;
- d) perda de valores econômicos, sendo o valor econômico em risco de animais, a estrutura (incluindo suas atividades), conteúdo e sistemas internos: L4.

De acordo com a norma brasileira (ABNT, 2015), é recomendado que a perda  $L_X$  seja calculada para cada zona da estrutura, quando dividida em zonas específicas.

Conforme supracitado, existem diversos tipos de perdas que podem ser associadas a um evento de descarga atmosférica, como por exemplo, danos à infraestrutura elétrica e de telecomunicações, perda de equipamentos eletrônicos e de dados, além de impactos ambientais. Cada uma dessas perdas pode afetar diferentes aspectos da sociedade e do meio ambiente. Entretanto, é importante ressaltar que, embora relevante, a análise completa de todos os tipos de perda não está dentro do escopo deste trabalho, uma vez que a fundamentação e análise abordadas posteriormente, serão direcionadas somente aos riscos de perda de vida humana e perda de patrimônio cultural.

### 2.26 Perda de vida humana (L1)

O valor de perda  $L_X$  para cada zona pode ser determinado de acordo com a Tabela 11 (ABNT, 2015) considerando que:

- a) a perda de vida humana é influenciada pelas características da zona. Estas são levadas em conta pelos fatores de aumento ( $h_z$ ) e diminuição ( $r_t, r_p, r_f$ );
- b) o valor máximo da perda em uma zona pode ser reduzido pela relação entre o número de pessoas na zona ( $n_z$ ) versus o número total de pessoas ( $n_t$ ) na estrutura inteira;

c) o tempo em horas por ano, durante o qual as pessoas estão presentes na zona ( $t_z$ ). Caso este seja menor que um total de 8760 h por ano, a perda será reduzida.

Os fatores de aumento ( $h_z$ ) e de diminuição ( $r_t$ ,  $r_p$ ,  $r_f$ ) são parâmetros utilizados na análise de risco de uma descarga atmosférica em uma determinada estrutura (ABNT, 2015).

O fator de aumento ( $h_z$ ) leva em conta as características da zona em que a estrutura está localizada. Essas características incluem a topografia, a altitude, a presença de corpos d'água e a vegetação ao redor. Esses fatores afetam a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas na área e, portanto, afetam o risco de perda de vida humana.

Já os fatores de diminuição ( $r_t$ ,  $r_p$ ,  $r_f$ ) levam em conta as medidas de proteção implementadas na estrutura para minimizar o risco de perda de vida humana. O fator de diminuição  $r_t$  é referente à proteção de estruturas que possuem sistema de aterramento. O fator  $r_p$  é referente à proteção de estruturas que possuem sistemas de proteção contra sobretensões transitórias (SPDA). Já o fator  $r_f$  é referente à proteção de estruturas que possuem um bom sistema de aterramento e um SPDA eficiente.

Esses fatores são utilizados em conjunto para determinar o nível de risco de uma descarga atmosférica em uma determinada estrutura e, assim, tomar medidas preventivas para minimizar o risco de perda de vida humana (ABNT, 2015).

Tabela 11 - Tipo de perda L1: Descrição e equações para cálculo das perdas típicas.

<b>Tipo de dano</b>	<b>Perda típica</b>	<b>Eq.</b>
D1	É o dano físico direto causado pela descarga atmosférica na	(23)
D1	edificação ou estrutura. Pode incluir rachaduras, trincas, fissuras, deslocamentos, entre outros.	(24)
D2	É o dano indireto causado pela descarga atmosférica, como consequência da corrente de raio que percorre os sistemas elétricos e eletrônicos da edificação ou estrutura, podendo causar danos aos equipamentos, dispositivos, componentes eletrônicos, entre outros.	(25)
D3	É o dano às pessoas causado pela descarga atmosférica, por meio do contato indireto com partes metálicas energizadas pelos efeitos da descarga atmosférica ou com correntes de fuga geradas	(26)

nos sistemas elétricos e eletrônicos. Pode causar desde danos leves até a morte.

---

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Para o dano D1, a componente de perda  $L_A$  é calculada pela Equação (27):

$$L_A = \frac{(r_t \times L_T \times n_z)}{n_t} \times \left( \frac{t_z}{8760} \right) \quad (27)$$

onde  $L_T$  é a média relativa típica de vítimas feridas por choque elétrico (D1) decorrente de um evento perigoso (conforme Tabela 12),  $r_t$  é um fator de diminuição da perda de vida humana dependendo do tipo de solo ou piso (dado pela Tabela 13),  $n_z$  é o número de pessoas na zona,  $n_t$  é o número total de pessoas na estrutura, e  $t_z$  é o tempo em que as pessoas estão presentes na zona, expresso em horas por ano, conforme a norma NBR 5419-2 (ABNT, 2015b).

Ainda para o dano D1, o cálculo da perda  $L_U$  é determinado pela Equação (28) :

$$L_U = \frac{(r_t \times L_T \times n_z)}{n_t} \times \left( \frac{t_z}{8760} \right) \quad (28)$$

Para o dano D2, as componentes de perdas  $L_B$  e  $L_V$  são iguais e dadas pela Equação (29):

$$L_B = L_V = \frac{(r_p \times r_f \times h_z \times L_T \times n_z)}{n_t} \times \left( \frac{t_z}{8760} \right) \quad (29)$$

$r_p$  é um fator de diminuição da perda devido a danos físicos dependendo das medidas adotadas para diminuir as consequências do incêndio (conforme Tabela 14),  $r_f$  é um fator de diminuição da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou explosão da estrutura (segundo a Tabela 15),  $h_z$  é um fator de aumento da perda devido a danos físicos quando há um perigo especial presente (conforme Tabela 16) e  $L_T$  é a média relativa típica de vítimas feridas por choque elétrico (D1) decorrente de um evento perigoso (conforme Tabela 12).

As componentes de perdas para o dano D3 são dadas pela Equação (30):

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = \frac{(L_O \times n_z)}{n_t} \times \left( \frac{t_z}{8760} \right) \quad (30)$$

onde  $L_0$  é a média relativa típica de vítimas por falha de sistemas internos (D3) devido a um evento perigoso (segundo Tabela 12).

Tabela 12 - Tipo de perda L1: Valores médios típicos de  $L_T$ ,  $L_F$  e  $L_0$

<b>Tipos de danos</b>	<b>Valor de perda típico</b>		<b>Tipo da estrutura</b>
D1 Ferimentos	LT	$10^{-2}$	Todos os tipos
		$10^{-1}$	Risco de explosão Hospital, hotel, escola, edifício cívico
D2 danos físicos	LF	$5 \times 10^{-2}$	Entretenimento público, igreja, Museu
		$5 \times 10^{-2}$	Industrial, comercial
		$10^{-2}$	Outros
		$10^{-1}$	Risco de explosão Unidade de terapia intensiva e bloco cirúrgico de hospital
D3 falhas de sistemas internos	LO	$10^{-2}$	Outras partes de hospital
		$10^{-3}$	

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Tabela 13 - Fator de redução  $r_t$  em função do tipo da superfície do solo ou piso

<b>Tipo de superfície <sup>b</sup></b>	<b>Resistência de contato k</b>	
	$\Omega^a$	$r_t$
Agricultura, concreto	$\leq 1$	$10^{-2}$
Mármore, cerâmica	1 – 10	$10^{-3}$
Cascalho, tapete, carpete	10 – 100	$10^{-4}$

Asfalto, linóleo, madeira	$\geq 100$	$10^{-5}$
a. Valores medidos entre um eletrodo de 400 cm <sup>2</sup> comprimido com uma força uniforme de 500 N e um ponto considerado no infinito.		
b. Uma camada de material isolante, por exemplo, asfalto, de 5 cm de espessura (ou uma camada de cascalho de 15 cm de espessura) geralmente reduz o perigo a um nível tolerável.		

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Tabela 14 - Fator de redução  $r_p$  em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio

Providências	$r_p$
Nenhuma providência	1
Uma das seguintes providências: extintores, instalações fixas operadas manualmente, instalações de alarme manuais, hidrantes, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape	0,5
Uma das seguintes providências: instalações fixas operadas automaticamente, instalações de alarme automático a	0,2
a. Somente se protegidas contra sobretensões e outros danos e se os bombeiros puderem chegar em menos de 10 min.	

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Segundo a NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), caso mais de uma providência tiver sido tomada, recomenda-se que o valor de  $r_p$  seja tomado como menor dos valores relevantes.

Um museu é um local destinado a exibir obras de arte e objetos históricos, portanto, em geral, não há substâncias inflamáveis ou explosivas presentes no local. Como resultado, o risco de explosão em um museu é considerado extremamente baixo ou inexistente.

Além disso, museus geralmente não realizam atividades que envolvam processos químicos ou industriais que possam gerar explosões ou incêndios. Isso inclui processos de fabricação, armazenamento de produtos químicos inflamáveis, soldagem ou outras atividades que possam gerar faíscas ou calor excessivo.

Por esses motivos, é improvável que ocorra uma explosão em um museu, a menos que ocorra uma situação incomum e específica, como uma falha elétrica ou um problema estrutural. No entanto, tais situações são altamente improváveis e, em geral, as medidas de segurança

padrão, como extintores de incêndio e sistemas de alarme de fumaça, são suficientes para evitar incidentes graves e, diante disso, o valor de  $r_f$  é assumido como nulo, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Fator de redução  $r_f$  em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura

Risco	Quantidade de risco	$r_f$
Incêndio	Alto	$10^{-1}$
	Normal	$10^{-2}$
	Baixo	$10^{-3}$
Explosão ou incêndio	Nenhum	0

Fonte: Modificado de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Tabela 16 – Fator  $h_z$  aumentando a quantidade relativa de perda na presença de um perigo especial

Tipo de perigo especial	$h_z$
Sem perigo especial	1
Baixo nível de pânico (por exemplo, uma estrutura limitada a dois andares e número de pessoas não superior a 100)	2
Nível médio de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes entre 100 e 1.000 pessoas)	5
Dificuldade de evacuação (por exemplo, estrutura com pessoas imobilizadas, hospitais)	5
Alto nível de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes maior que 1.000 pessoas)	10

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

### 2.27 Perda inaceitável de patrimônio cultural (L3)

O valor de perda  $L_X$ , de acordo com a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), para cada zona pode ser determinado de acordo com a Tabela 17 considerando que:

- a perda de patrimônio cultural é afetada pelas características da zona. Estas levam em consideração os fatores de redução ( $r_f$ ,  $r_p$ );

- b) o valor máximo da perda devido a danos na zona deve ser reduzido pela relação entre o valor da zona ( $c_z$ ) versus o valor total ( $c_t$ ) da estrutura completa (edificação e conteúdo).

Tabela 17 - Tipo de perda L3: valores de perda para cada zona

<b>Tipo de dano</b>	<b>Perda típica</b>
D2	É o dano indireto causado pela descarga atmosférica, como consequência da corrente de raio que percorre os sistemas elétricos e eletrônicos da edificação ou estrutura, podendo causar danos aos equipamentos, dispositivos, componentes eletrônicos, entre outros.

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Para o dano D2, as componentes de perdas  $L_B$  e  $L_V$  são iguais e dadas pela Equação ((31):

$$L_B = L_V = r_p \times r_f \times L_F \times \frac{c_z}{c_t} \quad (31)$$

em que o valor de  $L_F$  é relativo médio típico de todos os valores atingidos pelos danos físicos (D2) devido a um evento perigoso (conforme Tabela 18),  $r_p$  é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para reduzir as consequências de incêndio (conforme Tabela 14),  $r_f$  é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio (conforme Tabela 15),  $c_z$  é o valor do patrimônio cultural na zona e  $c_t$  representa o valor total da edificação e conteúdo da estrutura (soma de todas as zonas).

Tabela 18 - Tipo de perda L3: valor médio típico de  $L_F$

<b>Tipo de dano</b>	<b>Valor típico de perda</b>	<b>Tipo de estrutura ou zona</b>
---------------------	------------------------------	--------------------------------------

D2	$L_F = 10^{-1}$	Museus, galerias
----	-----------------	------------------

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

## 2.28 O SPDA Externo e Interno

Conforme ABNT (2015), o SPDA é um sistema designado a proteger uma estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas. É formado de um sistema externo e um sistema interno de proteção. O primeiro consiste em subsistemas de captação, de descida, aterramento e equipotencialização. O segundo é referido ao conjunto de dispositivos que reduzem os efeitos elétricos e magnéticos da corrente de descarga atmosférica dentro do volume de aplicação da proteção.

## 2.29 Classe do SPDA

As atribuições básicas de um SPDA são determinadas pelas características da estrutura a ser protegida e pelo NP considerado para os raios (ABNT, 2015). A Tabela 19 apresenta as quatro classes de SPDA (I a IV) e que correspondem ao NP para descargas atmosféricas, ambos definidos pela norma brasileira (ABNT, 2015).

Tabela 19 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e Classes de SPDA

NP	Classes de SPDA
I	I
II	II
III	III
IV	IV

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-3, 2015.

Informações como parâmetros da descarga atmosférica, o raio do método da esfera rolante, o 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 são dependentes da classe de SPDA, que está disposta na Tabela 19.

O raio do método da esfera rolante é um parâmetro utilizado para determinar a eficiência do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Ele representa a

distância que uma esfera rolante deve percorrer ao redor da estrutura protegida para garantir que todos os pontos estejam sob a proteção do SPDA. O tamanho da malha, por sua vez, se refere à quantidade e disposição dos condutores de descida e do anel captor no SPDA. Esses elementos formam uma malha que envolve a estrutura e tem a finalidade de garantir que a corrente elétrica gerada pela descarga atmosférica seja conduzida com segurança até o solo.

O ângulo de proteção é uma medida que representa a inclinação da linha de proteção formada pelos condutores de descida e do anel captor do SPDA. Esse ângulo deve ser escolhido de maneira a garantir que toda a estrutura esteja dentro da área de proteção formada pelos condutores. As distâncias típicas entre condutores de descida e dos condutores em anel, por sua vez, são estabelecidas de acordo com as características da estrutura e do ambiente em que ela está inserida. Essas distâncias devem ser suficientes para garantir que a corrente elétrica gerada pela descarga atmosférica seja conduzida com segurança até o solo, sem causar danos à estrutura ou aos equipamentos elétricos que estão conectados a ela.

A distância de segurança contra centelhamento perigoso é outra medida importante para garantir a eficácia do SPDA. Ela representa a distância mínima que deve existir entre os condutores de descida do SPDA e outras estruturas ou equipamentos elétricos que possam ser danificados por uma centelha elétrica. Já o comprimento mínimo dos eletrodos de terra se refere ao comprimento mínimo que os eletrodos de aterramento do SPDA devem ter para garantir uma boa dissipação da corrente elétrica gerada pela descarga atmosférica.

A classe de SPDA é uma classificação que indica o nível de proteção que o SPDA deve fornecer para uma determinada estrutura. Existem quatro classes de SPDA, sendo que a classe I oferece o maior nível de proteção e a classe IV oferece o menor. A escolha da classe de SPDA a ser utilizada em uma determinada estrutura deve ser feita com base em uma avaliação de risco, que leva em consideração as características da estrutura e do ambiente em que ela está inserida. A avaliação de risco também é importante para garantir que o SPDA seja dimensionado corretamente e que as medidas de proteção adotadas sejam adequadas para proteger a estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas.

A avaliação de risco é fundamental para a seleção da classe de SPDA necessária em uma estrutura. Essa avaliação deve considerar as características da estrutura, como sua altura, área, localização geográfica, uso e conteúdo, bem como a frequência e intensidade das tempestades elétricas na região. Além disso, também é importante avaliar os possíveis danos que uma descarga atmosférica pode causar na estrutura, como risco de incêndio, perda de equipamentos e interrupção de atividades. Todos esses fatores influenciam na determinação dos parâmetros do SPDA, como o raio do método da esfera rolante, tamanho da malha, ângulo de

proteção, distâncias entre condutores e comprimento dos eletrodos de terra, que estão diretamente relacionados à classe de SPDA selecionada. Como é informado em norma, a classe do SPDA requerido deve ser selecionada com base em uma avaliação de risco, seguindo as recomendações da norma brasileira (ABNT, 2015).

Antes de iniciar a avaliação de risco para definir a classe de SPDA, é importante que se compreenda o projeto de SPDA como um todo, considerando aspectos gerais. Isso inclui conhecer a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) e suas diretrizes para projeto, instalação, inspeção e manutenção de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, bem como conhecer as características da edificação em questão. É necessário também realizar um levantamento das fontes de risco que podem afetar a edificação, como a presença de linhas de transmissão de energia, antenas e árvores próximas. Além disso, é preciso levar em conta o nível de criticidade das atividades realizadas na edificação, pois isso influencia diretamente na avaliação do risco. Somente após a análise desses aspectos é que se pode realizar a avaliação de risco e definir a classe de SPDA adequada.

### **2.30 Projeto do SPDA**

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é essencial para garantir a segurança de uma estrutura e das pessoas que a ocupam. As descargas atmosféricas podem causar danos materiais irreparáveis, como a destruição de equipamentos elétricos e eletrônicos, e podem provocar incêndios que colocam em risco a integridade física das pessoas e a própria estrutura do local. Além disso, as descargas atmosféricas podem causar ferimentos graves e até mesmo fatais, em casos extremos. Por isso, é importante contar com um sistema de proteção adequado.

Uma das partes mais importantes do SPDA é a malha de aterramento, que é responsável por dissipar na terra a corrente elétrica gerada pela descarga atmosférica, protegendo assim a estrutura. Essa malha de aterramento é geralmente composta por condutores metálicos enterrados no solo, que devem estar interligados de forma adequada.

Uma forma de otimizar a eficiência da malha de aterramento é utilizar as partes metálicas da própria estrutura como componentes naturais do SPDA, como a armadura de aço presente em estruturas de concreto armado. Isso é possível desde que o projeto da estrutura seja elaborado levando em consideração as normas e recomendações técnicas para a instalação do SPDA.

Assim, a armadura de aço é projetada para ser interligada à malha de aterramento, formando uma rede contínua de condutores metálicos que atua como um eficiente SPDA.

Entretanto, em alguns casos, é impossível ou economicamente inviável utilizar as partes metálicas da própria estrutura como componentes naturais do SPDA. Isso pode ocorrer, por exemplo, em estruturas antigas que não foram projetadas para receber um SPDA ou quando há a impossibilidade de acesso às partes internas da estrutura.

Nesses casos, é necessário desenvolver o SPDA de forma externa, ou seja, utilizando condutores metálicos externos à estrutura que são ligados à malha de aterramento. Esses condutores podem ser instalados na superfície da estrutura ou em seu entorno, dependendo das condições locais e das características da estrutura.

É importante ressaltar que, em ambos os casos, é fundamental seguir as normas técnicas aplicáveis e contar com a orientação de profissionais especializados para garantir a eficiência e a segurança do SPDA.

### ***2.30.1 Sistema externo de PDA***

O SPDA externo é aquele instalado fora da estrutura a ser protegida e tem como objetivo principal evitar que o raio atinja diretamente a estrutura, protegendo-a de possíveis danos.

Para isso, o sistema é composto por elementos tais como condutores metálicos, hastes de aterramento e malhas de aterramento, que conduzem a corrente elétrica do raio do ponto de impacto até a terra. Esses elementos são instalados de forma estratégica em torno da estrutura a ser protegida, seguindo as recomendações técnicas estabelecidas pelas normas aplicáveis.

Uma das principais vantagens do SPDA externo é que ele permite que a corrente elétrica decorrente do raio flua para a terra sem causar transitórios perigosos à vida e ao patrimônio, como centelhamento, efeitos térmicos e mecânicos danosos à estrutura.

Além disso, o SPDA externo é responsável por proteger a estrutura da edificação contra as descargas atmosféricas que ocorrem diretamente nela, ou seja, as descargas diretas. As descargas diretas ocorrem quando a descarga atmosférica atinge diretamente a edificação, gerando uma sobretensão que pode causar danos a equipamentos eletrônicos ou colocar em risco a vida das pessoas. O SPDA externo é projetado para atrair as descargas elétricas e conduzi-las de forma segura até o solo, por meio de condutores de descida e eletrodos de aterramento

É importante ressaltar que o SPDA externo não protege somente a estrutura da edificação, mas também as pessoas e animais que estão próximos dela. Além disso, ele também protege outros elementos que estejam na área de proteção do sistema, como torres, antenas, sistemas de telecomunicações, entre outros.

Apesar de o SPDA externo ser projetado para proteger a estrutura contra descargas diretas, ele também é capaz de minimizar os efeitos das descargas indiretas e das descargas laterais. As descargas indiretas ocorrem quando a descarga atmosférica atinge um objeto ou estrutura próxima à estrutura a ser protegida, sendo conduzida até ela por meio de condutores, tubulações ou outros elementos que estejam em contato com o solo (ABNT, 2015).

### ***2.30.2 Subsistema de captação***

É formado por unidades condutoras, normalmente expostas e localizadas na área mais elevada da estrutura e são responsáveis pelo contato direto com os raios. A captação pode ser composta por qualquer combinação dos seguintes itens:

- a) hastes (incluindo mastros);
- b) condutores suspensos;
- c) condutores em malha.

Todos os tipos de subsistemas de captação devem ser posicionados de acordo com ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015). Para tanto, todos os tipos de unidades captoras devem cumprir na íntegra as exigências da norma. O seu correto posicionamento é que determina o volume de proteção.

No tocante ao posicionamento do subsistema de captação, atualmente existem três métodos de proteção a serem utilizados em instalações que necessitam de SPDA, sendo eles Método Franklin, Método Faraday e Esfera Rolante.

### ***2.30.3 Posicionamento do subsistema de captação***

Segundo a norma brasileira (ABNT, 2015), os componentes do subsistema captor instalados na estrutura devem ser posicionados nos cantos salientes, pontas expostas e nas beiradas (especialmente no nível superior de qualquer fachada) de acordo com um ou mais dos seguintes métodos:

- a) método do ângulo de proteção;
- b) método da esfera rolante;
- c) método das malhas.

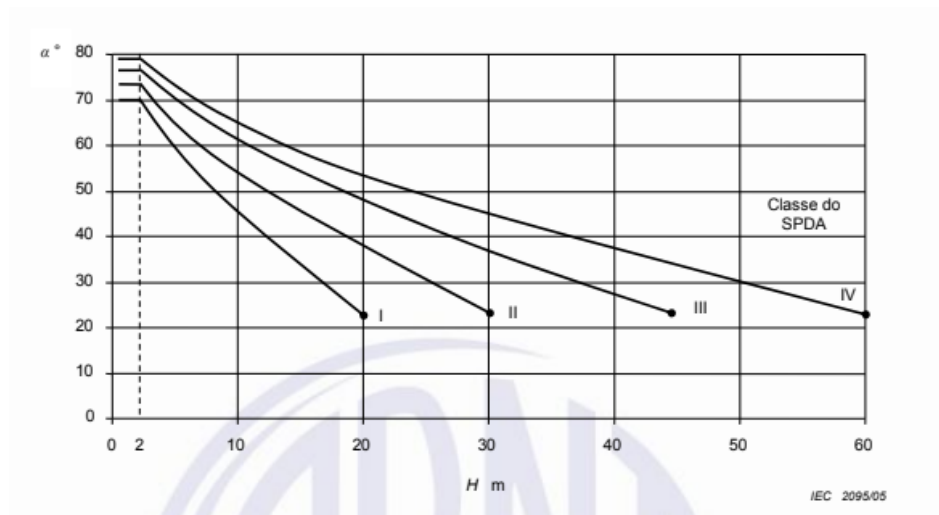
Os métodos da esfera rolante e das malhas são adequados em todos os casos. Entretanto, o método do ângulo de proteção é adequado para edificações de formato simples, ficando, porém, sujeito aos limites de altura dos captores indicados na Tabela 20 e Figura 5, que apresenta os valores para o ângulo de proteção, o raio da esfera rolante e o tamanho da malha para cada classe de SPDA.

Tabela 20 - Valores máximos dos raios da esfera rolante, tamanho da malha e ângulo de proteção correspondentes a Classe do SPDA

<b>Método de proteção</b>			
<b>Classe do SPDA</b>	<b>Raio da esfera rolante (m)</b>	<b>Máximo afastamento dos condutores da malha (m)</b>	<b>Ângulo de proteção <math>\alpha^\circ</math></b>
I	20	5 × 5	Ver Figura 4
II	30	10 × 10	
III	45	15 × 15	
IV	60	20 × 20	

Fonte: de ABNT NBR 5419-3, 2015.

Figura 5 - Ângulo de proteção correspondente à Classe de SPDA



Fonte: Extraído de NBR 5419-3, 2015.

O ângulo de proteção é um importante parâmetro na definição do nível de proteção que um SPDA pode oferecer. Ele se refere à área de proteção ao redor do captor que está protegida contra descargas atmosféricas. A Figura 5 apresenta um gráfico que mostra o ângulo de proteção para diferentes classes de SPDA, sendo que quanto maior a classe do SPDA, maior é o ângulo de proteção correspondente.

De acordo com a norma, se a cobertura é feita por material não combustível, os captadores de um SPDA não isolado podem ser instalados e posicionados na superfície da cobertura da estrutura a ser protegida (ABNT, 2015).

#### **2.30.4 Subsistema de descida**

É composto por elementos condutores expostos ou não que permitem a continuidade elétrica entre os subsistemas de captação e de aterramento. Estes elementos devem ser organizados com o intuito de dispor caminhos equidistantes para a corrente elétrica. Ainda, segundo a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), quanto maior for o número de condutores de descida, instalados a um espaçamento uniforme em volta do perímetro interconectado pelos anéis condutores da estrutura, maior será a redução da probabilidade de raios e centelhamentos perigosos, facilitando a proteção das instalações internas.

#### **2.30.5 Posicionamento do subsistema de descida**

Conforme apresentado norma brasileira (ABNT, 2015), para cada SPDA não isolado, a quantidade de condutores de descida não pode ser inferior a dois, mesmo se o valor

do cálculo do perímetro dividido pelo espaçamento para o nível correspondente resultar em valor inferior. No posicionamento, é orientado sempre utilizar o espaçamento mais uniforme possível entre os condutores de descida ao redor do perímetro. Os valores das distâncias entre os condutores de descida são dados na Tabela 21.

Tabela 21 - Distâncias entre os condutores de descida em função da Classe do SPDA

<b>Classe do SPDA</b>	<b>Distâncias (m)</b>
I	10
II	10
III	15
IV	20

NOTA É aceitável que o espaçamento dos condutores de descidas tenha no máximo 20 % além dos valores acima.

Fonte: Extraído de NBR 5419-3, 2015.

Os condutores de descida são uma parte fundamental do SPDA. Eles são responsáveis por conduzir a corrente elétrica gerada pela descarga atmosférica da captação até o sistema de aterramento.

Para garantir a eficiência e a segurança do SPDA, os condutores de descida devem ser instalados de forma que constituam uma extensão direta dos condutores da captação. Isso significa que os condutores de descida devem estar conectados, de maneira que a corrente elétrica seja transmitida de forma eficiente e segura, com os condutores de captação e devem ter o mesmo diâmetro ou uma seção transversal maior, para evitar sobrecarga de corrente elétrica (TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS, 2022).

Além disso, os condutores de descida devem ser instalados de forma executável, ou seja, de maneira que possam ser facilmente montados e inspecionados. Isso inclui evitar obstáculos no caminho dos condutores, como janelas, portas e outras estruturas, que possam interferir no trajeto da corrente elétrica e prejudicar a eficiência do sistema.

No caso de paredes de estruturas feitas de materiais não combustíveis, como concreto armado, os condutores do subsistema de descida podem ser posicionados na superfície ou dentro da parede. Essa possibilidade de instalação é permitida pela norma técnica ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), desde que sejam tomadas medidas adicionais de proteção contra incêndio e que a fixação dos condutores seja realizada de forma segura e eficiente.

### **2.30.6 Subsistema de aterramento**

Segundo Mamede (2017), o sistema de aterramento é um componente fundamental do SPDA. Ele é responsável por garantir a dissipação segura das correntes elétricas geradas pela descarga atmosférica no solo, protegendo assim as pessoas e as edificações próximas.

O sistema de aterramento é constituído por elementos condutores que são enterrados ou embutidos nas fundações das edificações. Esses elementos condutores são responsáveis por garantir a continuidade elétrica entre a estrutura e o solo, permitindo que as correntes elétricas geradas pela descarga atmosférica sejam dissipadas no solo.

Existem diferentes tipos de sistema de aterramento, mas de forma geral, ele é constituído por unidades condutoras enterradas na horizontal ou vertical. As unidades condutoras enterradas na horizontal são conhecidas como condutores horizontais ou anéis de aterramento. Esses condutores são geralmente instalados em torno da estrutura, em uma profundidade que pode variar de acordo com as características do solo e a potência da descarga atmosférica. Eles são interligados por meio de conectores ou soldas, formando assim um circuito condutor que envolve a edificação (MAMEDE FILHO, 2017).

Já as unidades condutoras enterradas na vertical são conhecidas como hastes de aterramento ou eletrodos de aterramento. Elas são constituídas por barras ou tubos de metal maciços que são cravados no solo, em profundidades que variam de acordo com as características do solo. Essas hastes de aterramento são interligadas aos condutores horizontais por meio de cabos de cobre ou alumínio, formando assim um sistema integrado de aterramento.

### **2.30.7 Material para SPDA: características dos principais metais utilizados**

A utilização de materiais adequados é fundamental para garantir a eficácia e a segurança dos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). É preciso escolher materiais que possuam as características elétricas e mecânicas adequadas para a aplicação, levando em consideração as condições ambientais e as características do local em que o SPDA será instalado.

A norma ABNT NBR 5419 (ABNT, 2015), que trata do dimensionamento e instalação de SPDA, estabelece as especificações técnicas que devem ser seguidas para garantir a proteção das edificações contra os efeitos das descargas atmosféricas. Além disso, a norma também define quais materiais podem ser utilizados na construção dos componentes do SPDA, como captosres, condutores e hastes de aterramento.

A escolha adequada dos materiais é importante para garantir a durabilidade e a eficiência do sistema, além de minimizar os riscos de danos às edificações e às pessoas. Por isso, é essencial entender as características dos materiais e as suas aplicações em SPDA, para que seja possível escolher os materiais mais adequados para cada caso específico. As tabelas apresentadas fornecem uma visão geral das características elétricas e mecânicas de alguns dos materiais mais comuns utilizados em SPDA, o que pode auxiliar na tomada de decisão quanto à escolha dos materiais adequados.

O alumínio é um material frequentemente utilizado em SPDA por apresentar algumas propriedades físicas e químicas que o tornam mais indicado para esse tipo de aplicação. Algumas dessas propriedades são:

- a) alta condutividade elétrica: O alumínio é um excelente condutor de eletricidade, o que significa que é capaz de transportar cargas elétricas com eficiência. Essa propriedade é importante para o SPDA, já que um dos objetivos do sistema é canalizar a corrente elétrica da descarga atmosférica com segurança até o solo.
- b) baixo peso específico: O alumínio tem baixa densidade e, portanto, é relativamente leve em comparação a outros metais, o que facilita a sua instalação em locais elevados, como telhados.
- c) resistência à corrosão: O alumínio é altamente resistente à corrosão, o que o torna adequado para uso em ambientes externos. Quando exposto ao ar, o alumínio forma uma fina camada de óxido de alumínio que protege o metal subjacente da corrosão.
- d) facilidade de manutenção: O alumínio é um material fácil de limpar e manter, o que é importante para garantir que o SPDA esteja em boas condições de funcionamento.
- e) durabilidade: O alumínio é um material durável e resistente, capaz de suportar condições climáticas adversas e cargas mecânicas, como ventos fortes e tempestades.

Já o latão cromado possui excelente acabamento estético e é bastante utilizado em aplicações que exigem alta durabilidade e resistência ao desgaste, como no caso de componentes de sistemas de aterramento e de PDA. Alguns pontos importantes do uso de latão cromado no captor Franklin incluem:

- a) Resistência à corrosão: O latão cromado tem uma resistência maior à corrosão do que o alumínio, o que o torna uma escolha adequada para aplicações externas, como em captor Franklin. O alumínio pode corroer facilmente, principalmente em ambientes úmidos e salinos.

b) Boa condutividade elétrica: Tanto o latão cromado quanto o alumínio apresentam boa condutividade elétrica. No entanto, entre esses dois materiais, o alumínio é considerado melhor em relação a esse quesito. Isso ocorre porque a estrutura atômica do alumínio é mais favorável à condução elétrica do que a do latão cromado.

c) Durabilidade: O latão cromado é conhecido por sua alta durabilidade e resistência a danos físicos, o que garante que o captor Franklin continue funcionando adequadamente por um longo período. O alumínio pode ser facilmente danificado por arranhões e amassados, enquanto o latão cromado é mais resistente a esses danos.

d) Facilidade de manutenção: O latão cromado é fácil de limpar e manter, o que é uma vantagem para a manutenção regular do SPDA, mas requer um pouco mais de cuidado para evitar arranhões na superfície cromada.

e) Estética: O acabamento cromado do latão oferece um acabamento estético atraente que pode ser desejável para aplicações onde a aparência é importante. O alumínio é mais comumente aproveitado em aplicações industriais e tem uma aparência mais simples.

O cobre arredondado maciço (nu) é geralmente escolhido para o sistema de captação em SPDA devido às suas excelentes propriedades condutivas e resistência à corrosão. Algumas dessas propriedades são:

a) boa condutividade elétrica: O cobre é um material altamente condutor de eletricidade, o que significa que o cabo de cobre nu é capaz de transmitir correntes elétricas de alta magnitude com eficiência.

b) boa resistência à corrosão: O cobre tem uma excelente resistência à corrosão, o que significa que o cabo de cobre nu pode suportar condições ambientais adversas sem se deteriorar facilmente.

c) durabilidade: O cabo de cobre nu é resistente e durável, o que significa que pode suportar a exposição a condições ambientais extremas, como altas temperaturas e ventos fortes, sem quebrar ou falhar.

d) baixa impedância: O cabo de cobre nu tem baixa impedância elétrica, o que significa que ele oferece menos resistência à passagem de corrente elétrica, reduzindo a possibilidade de danos em caso de descargas atmosféricas.

e) disponibilidade: O cobre é um material amplamente disponível no mercado, o que significa que o cabo de cobre nu pode ser facilmente adquirido em lojas de materiais elétricos.

f) custo-benefício: O cabo de cobre nu é um material de baixo custo em relação a outros tipos de cabos condutores, o que o torna uma escolha econômica para sistemas de captação em SPDA.

A Tabela 22 a seguir apresenta uma comparação entre os três materiais comumente utilizados em Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA): latão cromado, alumínio e cobre. Ela mostra valores para cada grandeza e especificações elétricas e mecânicas dos materiais, além de características qualitativas relevantes para o uso em SPDA. Essas informações são importantes para a escolha do material mais adequado para a construção do sistema, garantindo sua eficácia e durabilidade.

Tabela 22 - Materiais para SPDA

<b>Material</b>	<b>Condutividade elétrica (S/m)</b>	<b>Resistividade elétrica (<math>\mu\Omega.m</math>)</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Resistência à corrosão</b>	<b>Facilidade de manutenção</b>
Latão cromado	$1,28 \times 10^7$	79	340-550	Boa resistência	Requer cuidado na limpeza
Alumínio	$3,82 \times 10^7$	28	90-130	Alta resistência	Fácil de limpar
Cobre	$5,96 \times 10^7$	16,8	220-250	Excelente resistência	Requer polimento frequente

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

Observa-se pela Tabela 22, que o cobre apresenta a maior condutividade elétrica, o que o torna uma opção muito utilizada em sistemas de SPDA. O alumínio também apresenta boa condutividade elétrica, mas é menos resistente mecanicamente do que o cobre e o latão cromado. Já o latão cromado tem uma resistência mecânica maior, mas uma condutividade elétrica inferior às outras duas opções.

### **2.30.8 Obrigação do SPDA**

De acordo com a NR-10 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2019), norma regulamentadora do ministério do trabalho, os estabelecimentos com carga instalada superior a 75 kW devem constituir e manter o Prontuário de Instalações Elétricas, contendo a documentação das inspeções e medições do SPDA e aterramentos elétricos.

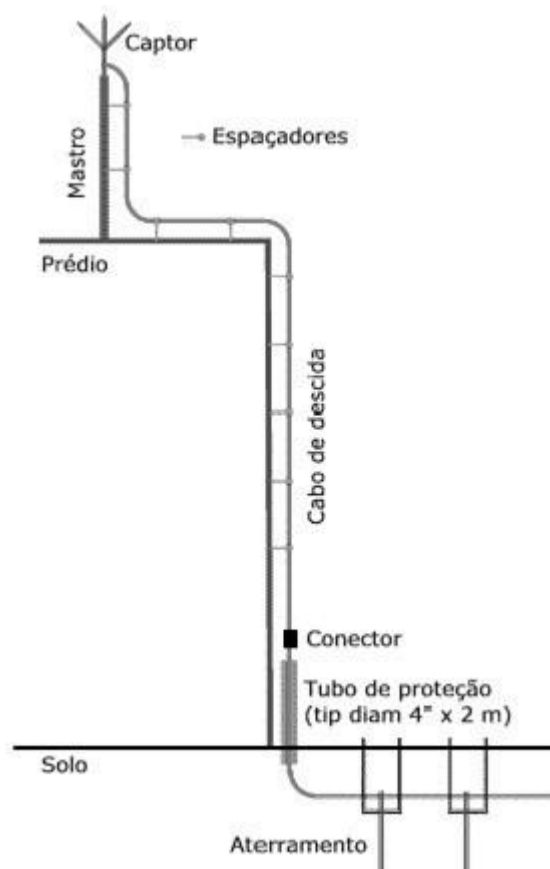
Além do mencionado anteriormente, de acordo com o Código de Defesa do Consumidor (SENADO FEDERAL, 2017), mais precisamente na Seção IV do Artigo 39 e em seu Inciso 8, é afirmado que todo o fornecedor de produtos ou serviços deverá atender às exigências das normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro).

### **2.30.9 Métodos de Proteção**

Para se avaliar quando uma PDA é necessária ou não, deve ser realizada uma avaliação de risco seguindo os procedimentos técnicos compreendidos na ABNT NBR 5419:2 (ABNT, 2015). Entretanto, para se conduzir a uma análise de risco eficiente, é imprescindível entender todos os conceitos e metodologias apresentados pelas quatro partes da norma.

O Método Franklin é fundamentado no princípio de que um raio descendente pode ser interceptado por um raio ascendente iniciado a partir de um dos captores do sistema de proteção. Estes equipamentos são constituídos por corpos metálicos longos e elevados posicionados nas localidades mais altas da estrutura, de forma a proteger todos os pontos da construção. O sistema de captação, demonstrado pela Figura 6, é ligado aos condutores de descida que, em caso de incidência de descarga elétrica, conduzem a corrente até os eletrodos de aterramento do sistema.

Figura 6 - Representação do Método Franklin para proteção contra descargas atmosféricas



Fonte: Extraído de Toshioka, F. (2022).

O método de Franklin é uma técnica de proteção contra raios que usa um pára-raios especial para atrair raios e conduzi-los com segurança ao solo. O sistema opera com base no princípio de que um raio descendente pode ser interceptado por um ascendente iniciado em um dos coletores do sistema. Esses coletores são longos corpos metálicos que são posicionados estrategicamente nos pontos mais altos de uma estrutura para proteger todos os pontos da edificação. O sistema de captação é conectado aos eletrodos de aterramento, que dispersam a energia elétrica para o solo com segurança (VISACRO FILHO, 2005, p.55-69).

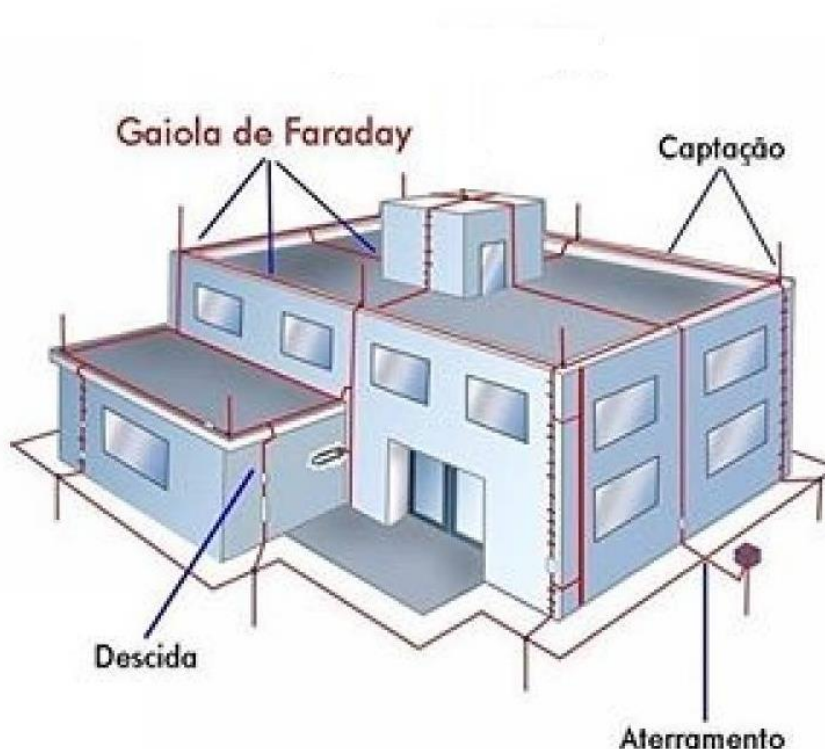
Uma das principais vantagens do método de Franklin é a capacidade de fornecer proteção confiável para grandes áreas, como aeroportos, fábricas e complexos industriais. Também é considerado mais durável e requer menos manutenção do que outros sistemas devido ao uso de materiais resistentes à corrosão. No entanto, pode exigir muitos captores para cobrir grandes áreas e pode ser difícil de ser instalado em estruturas de formato irregular.

O método de Franklin é mais indicado para situações em que a edificação ou estrutura é mais alta que as estruturas ao seu redor, localizada em área com alta incidência de descargas atmosféricas ou com maior risco de incêndio ou explosão. Além disso, é

recomendado para estruturas que possuem equipamentos ou peças valiosas, como data centers, museus e hospitais, que podem ser danificados ou destruídos por um raio.

O Método de Faraday baseia-se em um dos experimentos do Físico, que descobriu que ao envolver um volume por uma gaiola metálica, este ficava protegido dos efeitos de campos eletromagnéticos. De acordo com Mamede Filho (2017), este método consiste em envolver a parte superior da construção com uma malha captora de condutores elétricos nus, conforme Figura 7, cuja distância entre eles é função do NP desejado.

Figura 7 - Representação do Método Faraday para proteção contra descargas atmosféricas



Fonte: Extraído de Termotécnica Para-raios, 2022.

Aterrando a gaiola de Faraday observa-se que qualquer raio ascendente induzido por um líder descendente se dá por uma das partes metálicas da gaiola. A corrente da descarga circula somente pela gaiola, protegendo o patrimônio e as pessoas que estão no interior da mesma (VISACRO FILHO, 2005, p.96).

Uma das vantagens é que ele pode fornecer um alto nível de proteção contra raios, especialmente em estruturas completamente fechadas pela gaiola de Faraday.

A durabilidade do sistema também merece destaque, pois é composto por materiais metálicos que resistem às intempéries e resistem à corrosão. No entanto, a manutenção ainda é

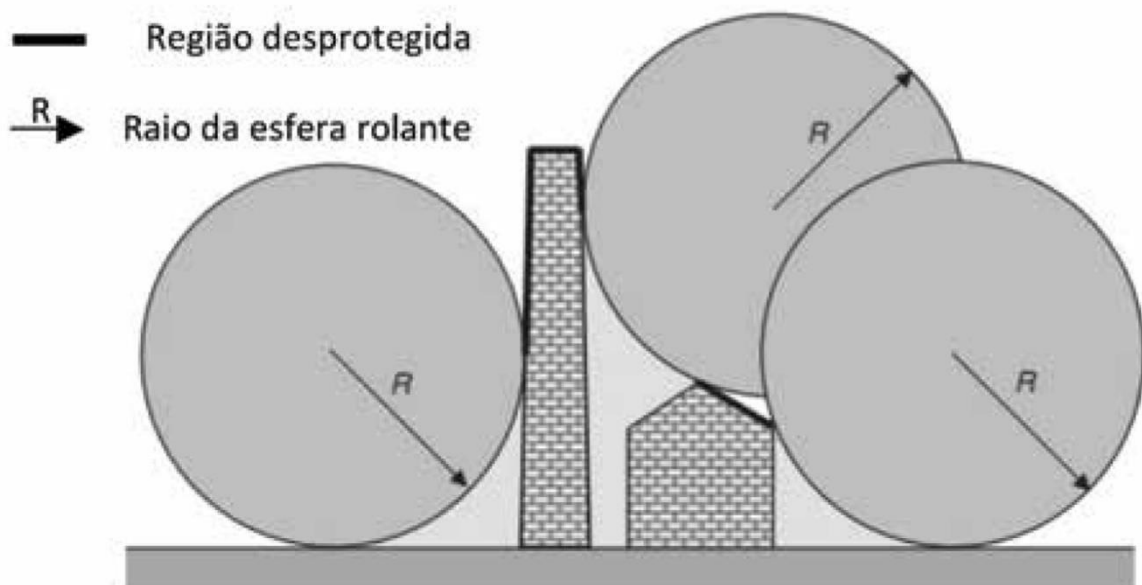
necessária para garantir que o sistema esteja funcionando corretamente e requer um planejamento cuidadoso para garantir a continuidade elétrica adequada em toda a estrutura da gaiola e pode exigir investimentos significativos em materiais condutivos.

O método Faraday é mais recomendado para estruturas com grande superfície, como armazéns ou hangares. Também é apropriado para equipamentos eletrônicos sensíveis ou instalações que requerem fonte de alimentação ininterrupta, como data centers.

O Método da Esfera Rolante é considerado a mais completa ferramenta para proteção de estruturas, sendo baseado em métodos científicos de observação e medição dos parâmetros dos raios, e em resultados de ensaios em laboratórios de alta tensão. Neste modelo, considera-se que o líder descendente da descarga de retorno propaga na direção vertical em direção à terra com desenvolvimento em degraus de crescimento de seu comprimento em intervalos de tempo.

Esse crescimento do líder se dá dentro de um volume de uma esfera cujo raio depende da carga da nuvem ou da corrente elétrica do líder e será desviado da trajetória original por algum objeto aterrado. A descarga se dará no ponto onde a esfera tocar este objeto ou na terra, sendo escolhido aquele que for primeiro alcançado pela esfera. O raio da esfera é considerado o raio de atração, conforme mostra a Figura 8 (VISACRO FILHO, 2005, p.98).

Figura 8 - Representação do Método da Esfera Rolante para proteção contra descargas atmosféricas

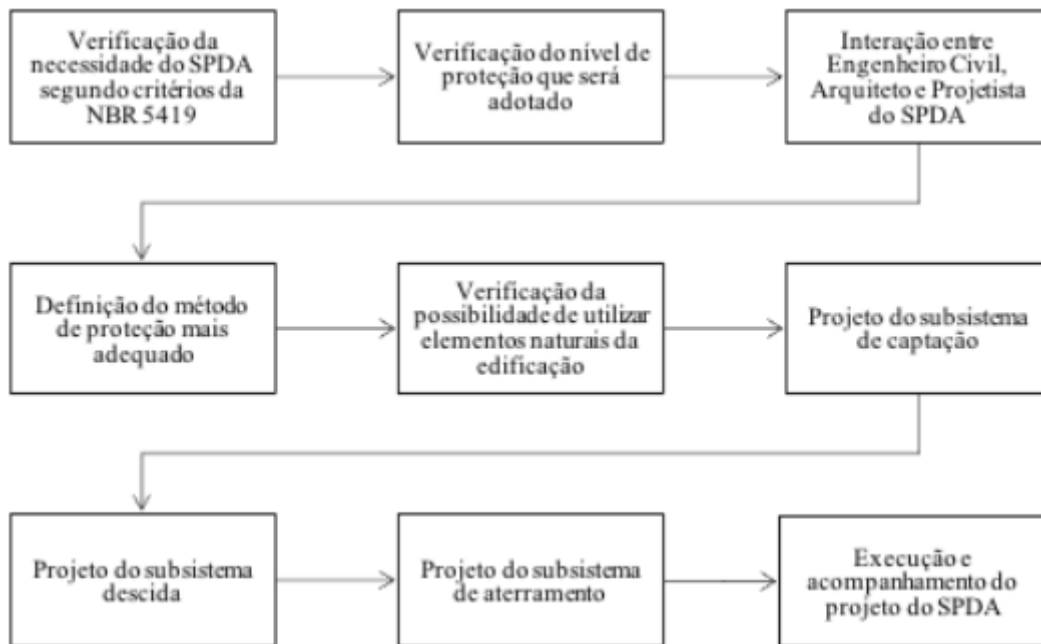


Esse método pode ser eficaz em áreas com restrições de planejamento urbano ou em estruturas de grande porte. No entanto, requer cálculos e dimensionamentos mais complexos e pode exigir um investimento inicial maior devido à utilização de materiais eletrogeométricos específicos.

### 2.30.10 Fluxograma para um SPDA

A elaboração de um projeto de PDA (PDA) é um processo que envolve uma série de etapas importantes para garantir a eficiência e a segurança do sistema. A Figura 9 apresenta um passo-a-passo básico para elaborar um projeto de PDA, que vai desde a verificação da necessidade do SPDA até a sua execução.

Figura 9 - Fluxograma de etapas para projetar um SPDA



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

### 2.31 Contextualização do Problema Empregando um Estudo de Caso como Referência Metodológica

O Apêndice A deste trabalho de conclusão de curso apresenta o projeto utilizado como base para a elaboração do presente estudo. Naquele projeto, foi implementado um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) externo, utilizando o método de Faraday, em uma unidade fabril. O objetivo desse apêndice é fornecer uma visão detalhada do projeto base e servir como referência para as análises e comparações realizadas ao longo deste trabalho. São abordados aspectos como a estrutura do SPDA, os componentes utilizados e as estratégias de proteção adotadas.

## 3. DESENVOLVIMENTO DE NOVAS ANÁLISES E ESTUDOS

Nesta seção são realizadas análises para o projeto de novas medidas de proteção contra raios para uma estrutura específica de uma edificação do tipo museu, que vão além das medidas sugeridas em um estudo anterior conduzido por Kafer (2018), e que servirá como base para avaliação das medidas existentes e como ponto de partida para a proposição de novas medidas para o SPDA do museu.

Inicialmente é realizada a análise e gerenciamento de riscos aprimorados para identificar possíveis lacunas nas medidas de proteção já implementadas e propor novas medidas. Posteriormente serão utilizados três modelos de Proteção de Descargas Atmosféricas (PDAs) para a estrutura em análise, examinando cada contribuição, realizando uma revisão de sistemas, avaliando aplicações e adequando diferentes métodos em cada caso.

### 3.1 Novo Gerenciamento de Risco

Para iniciar a nova análise e gerenciamento de risco referentes ao SPDA, é fundamental identificar os tipos de perdas associadas à quantidade de zonas nas quais a estrutura foi dividida. Neste estudo, as perdas a serem consideradas não serão as mesmas identificadas por Kafer (2018) em seu trabalho e estão apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Perdas consideradas para a unidade de estudo deste trabalho: um museu

<b>Perdas Aplicáveis</b>	<b>Descrição</b>
L1	Perda de vida humana
L3	Perda de patrimônio cultural

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

De acordo com a norma técnica ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), para avaliar cada componente de risco, a estrutura pode ser dividida em zonas  $Z_S$ , cada uma com particularidades similares. Contudo, a estrutura pode ser, ou pode ser considerada como contendo uma zona única. No caso do museu em estudo, foi concluído que somente uma zona será avaliada.

A justificativa técnica para a utilização de apenas uma zona na análise de PDA é baseada nas particularidades do museu em estudo. De acordo com a norma técnica brasileira (ABNT, 2015), a estrutura pode ser dividida em zonas  $Z_S$  para avaliação do risco relacionado a cada componente. No entanto, se a estrutura apresentar características homogêneas em termos de exposição ao risco de descargas atmosféricas, pode-se considerar que ela constitui apenas uma única zona.

No caso do museu, as características estruturais e as condições ambientais do local permitem inferir que ele pode ser considerado uma única zona em termos de risco de descargas atmosféricas. Dessa forma, a análise será simplificada, mas ainda assim será realizada com base em fundamentos técnicos e normativos da ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), garantindo a adequada proteção contra os riscos associados às descargas atmosféricas.

Ao se adotar uma zona única, a principal vantagem é a simplificação da análise, o que pode resultar em economia de tempo. Além disso, é mais fácil definir e implementar medidas de proteção para uma única zona. Por outro lado, a desvantagem é que a análise pode não considerar de forma precisa a distribuição de riscos em diferentes áreas do ambiente.

No caso específico do museu, a decisão de considerar uma única zona de risco foi baseada em uma série de características estruturais e condições ambientais. Por exemplo, o museu é uma estrutura com uma forma regular, sem grandes aberturas ou saliências. Além disso, está localizado em uma área com poucas árvores ou outras estruturas altas que possam aumentar o risco de descargas atmosféricas. Por fim, a análise considerou que não há áreas do museu que apresentem risco significativamente maior que outras em termos de danos causados por descargas atmosféricas.

Portanto, o risco total  $R$  da estrutura será a soma dos componentes de risco significativos para a única zona  $Z_S$  que constitui a estrutura.

Em dependência às perdas avaliadas e dispostas pela Tabela 23, existem riscos associados e estes estão dispostos na Tabela 24.

Tabela 24 - Riscos considerados para a unidade de estudo: um museu

<b>Riscos Aplicáveis</b>	<b>Descrição</b>
$R_1$	Risco de perda de vida humana
$R_3$	Risco de perda de patrimônio cultural

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

As componentes de risco estão apresentadas nas Tabela 25.

Tabela 25 – Componentes individuais dos riscos considerados para a unidade de estudo

<b>Componentes</b>	<b>Risco</b>	$R_T$
$R_A, R_B, R_U, R_V$	R1	$10^{-2}$
$R_B, R_V$	R3	$10^{-4}$

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A metodologia adotada para elaboração deste estudo tem como objetivo avaliar o risco de perda do patrimônio cultural de um museu. Para isso, será utilizada uma abordagem que leva em conta os valores previamente determinados por Kafer (2018), os quais foram coletados no estudo de caso sobre uma unidade fabril, considerado como referência básica para este trabalho e descrito no item 3. Nesse estudo, a unidade fabril foi avaliada em R\$ 800.000,00, sendo que o seu inventário de bens totalizava cerca de 1,7 milhão de reais. Esses valores serão aplicados como referência para a avaliação do risco de perda do patrimônio cultural do museu. Esta consideração foi adotada com intuito de permitir uma análise comparativa entre diferentes SPDAs para duas unidades distintas.

Dessa forma, a metodologia busca estimar o valor do patrimônio cultural do museu e avaliar o risco de perda desse patrimônio em caso de ocorrência de um evento adverso, como a queda de raios. Com base nessas informações, medidas de proteção adequadas podem ser adotadas para minimizar os riscos e proteger o patrimônio cultural do Museu.

A Tabela 26 apresenta os valores monetários do patrimônio cultural do Museu, que serão utilizados para a avaliação do risco de perda deste bem histórico e cultural. O procedimento consiste em realizar cálculos de risco de acordo com a NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), que estabelece critérios para o dimensionamento de SPDA.

Tabela 26 - Relação dos bens armazenados na estrutura

<b>Patrimônio</b>	<b>Valor Total</b>	
Esculturas, pinturas, telas e objetos históricos	R\$	1.678.800,00
Imóvel (edificação)	R\$	800.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$</b>	<b>2.470.800,00</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

De acordo com a norma, o próximo passo após a análise de risco é comparar os valores obtidos com os valores toleráveis apresentados na Tabela 25. Somente os valores de  $R_T$  que resultam em valores significativos para as perdas L1 e L3 são considerados relevantes para este trabalho. Caso o valor do risco total seja maior que o valor tolerável, é necessário aplicar medidas de proteção para reduzir as componentes de risco relevantes. Essas medidas devem ser escolhidas de acordo com as características da estrutura e do ambiente em que está inserida, visando minimizar o risco de danos à estrutura e aos indivíduos que a utilizam, conforme ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b).

Considerando a complexidade do processo de análise e gerenciamento de riscos envolvido neste trabalho, é necessário contar com um sistema que possa automatizar e simplificar as etapas, configurações e preferências das medidas de proteção. Com o objetivo de viabilizar este processo, optou-se por utilizar uma planilha em Excel especializada desenvolvida e disponibilizada pela referência (KAFER, 2018), como fonte de dados e parâmetros para os cálculos necessários. Essa planilha, contém informações detalhadas sobre a estrutura, linha de energia, linha de sinal e zona de proteção.

Foram realizados os devidos ajustes e adaptações para aplicá-la ao contexto desta pesquisa e, assim, poder fazer uso dos seus dados para gerar resultados relevantes para o trabalho. Vale ressaltar que essa prática é comum em diversas áreas de pesquisa e contribui para a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

Ao utilizar a planilha de outra referência, foi assegurado que os parâmetros utilizados neste trabalho estejam em conformidade com os padrões estabelecidos pela normatização aplicável, o que é fundamental para garantir a qualidade e a validade dos resultados obtidos. Além disso, essa prática permite uma maior agilidade e eficiência no processo de desenvolvimento do trabalho, já que a planilha contém informações detalhadas e confiáveis sobre os parâmetros necessários para os cálculos realizados.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, os parâmetros de entrada utilizados para os novos casos tratados neste trabalho serão os mesmos apresentados na Tabela A 1, Tabela A 2, Tabela A 8, Tabela A 9, Tabela A 10 e Tabela A 11.

Todos os valores dos parâmetros utilizados nesta análise foram calculados com precisão e rigor utilizando uma planilha eletrônica, agregando uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, uma vez que a automatização dos cálculos reduz consideravelmente a ocorrência de erros humanos e agiliza o processo de análise. Além disso, a utilização da planilha eletrônica permite a rápida atualização de valores e a realização de simulações para diferentes cenários, o que torna essa ferramenta extremamente útil em trabalhos de análise de riscos e PDA.

O tempo de permanência na estrutura (Pessoa/dia) foi definido com base na Constituição da República, em seu artigo 7º, inciso XIII, que inclui, entre os direitos dos trabalhadores, a duração do trabalho normalmente não superior a oito horas diárias (SENADO FEDERAL, 2017).

O texto se refere a um estudo sobre a aplicação de um SPDA em uma determinada estrutura. O pressuposto adotado é de que a estrutura não possui qualquer tipo de sistema de proteção ou dispositivo de blindagem, ou seja, está completamente desprotegida contra descargas atmosféricas.

Os numerais 1 presentes na Tabela 27 se referem ao cenário mais crítico, no qual não há qualquer tipo de PDA, ou seja, a estrutura está completamente exposta aos riscos associados às descargas atmosféricas.

Tabela 27 - Parâmetros característicos da zona de proteção

<b>Parâmetros de Entrada</b>	<b>Comentário</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Superfície do piso	Concreto	$r_t$	$10^{-2}$
Proteção contra choque na estrutura	Não há	$P_{TA}$	1
Proteção contra choque na linha	Não há	$P_{TU}$	1
Risco de incêndio	Normal	$r_f$	$10^{-2}$
Fiação interna de energia	Não blindada	$K_{S3}$	1
DPS coordenados na entrada de energia	Não há	$P_{SPD}$	1

Fiação interna de sinal	Não blindada	$K_{S3}$	1
DPS coordenados na entrada de sinal	Não há	$P_{SPD}$	1
Blindagem interna	Não blindada	$K_{S2}$	1
	Perigo especial	$h_Z$	-
	D1: tensão de toque e passo	$L_T$	$10^{-2}$
	D2: devido a danos físicos	$L_F$	$5 \times 10^{-2}$
L1: perda de vida humana	D3: falha de sistema internos	$L_O$	-
	D2: devido a danos físicos	$L_F$	$10^{-1}$
	D3: falha de sistemas internos	$L_O$	-
L3: perda de patrimônio cultural	D2: devido a danos físicos	$L_F$	$10^{-1}$
	D3: falha de sistemas internos	$L_O$	-
Número de pessoas	Na zona de proteção	$n_Z$	25
Número de pessoas	Em toda a estrutura	$n_t$	25
Tempo na estrutura	Pessoa/dia	$t_z$	8

Fonte: Modificado de Kafer (2018).

A ausência de valores atribuídos (identificados por "-") em algumas células das tabelas da norma ABNT NBR 5419 (ABNT, 2015) indica que não existem valores específicos ou atribuídos para o parâmetro de entrada avaliado. Isso ocorre devido à natureza variável e complexa das condições em que as medidas de proteção contra descargas atmosféricas são aplicadas.

É importante ressaltar que, embora a média de pessoas que visitam um museu seja altamente variável, no trabalho realizado por Kafer (2018), foi adotada uma quantidade específica de visitantes igual a 25. Essa escolha pode ter sido baseada em critérios específicos do estudo ou em informações disponíveis na época. Neste trabalho, seguindo a referência de Kafer (2018), a mesma quantidade de 25 pessoas foi replicada para fins de análise e comparação de resultados. No entanto, é fundamental considerar que essa quantidade não reflete necessariamente a média de visitantes em todos os museus e que outros estudos podem adotar valores diferentes com base em suas abordagens e contextos específicos.

Conforme apresentado na Tabela A 11, Kafer (2018) assumiu que a média de permanência de uma única pessoa na unidade fabril é de 5,95 horas por dia, durante os 365 dias do ano. No entanto, para fins de análise no contexto do Museu, este trabalho propôs que uma única pessoa permaneça no local por 8 horas diárias. Essa alteração se justifica pelo fato de que o Museu é um espaço destinado à visitação pública, com funcionamento durante o horário comercial, o que pressupõe uma maior quantidade de visitantes ao longo do dia, em comparação

com uma unidade fabril. Além disso, a permanência prolongada dos visitantes no Museu pode aumentar a exposição a possíveis riscos decorrentes de descargas atmosféricas, justificando a necessidade de uma análise mais conservadora.

### **3.2 Área de Exposição Equivalente e Número Anual de Eventos Perigosos para o caso de um museu**

Para uma estrutura retangular isolada, conforme norma (ABNT, 2015) com comprimento  $L$ , largura  $W$  e altura  $H$  em um solo plano, a área de exposição equivalente é dada pela Equação (32):

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 \quad (32)$$

em que  $L$ ,  $W$  e  $H$  são expressos em metros. Dessa forma, obteve-se o valor calculado de área  $A_D = 5.008,72 \text{ m}^2$ . É importante notar que, a equação empregada por Kafer (2018) difere do modelo matemático estabelecido pela norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) e que foi utilizado na análise deste trabalho. No estudo realizado por Kafer (2018), com base na Equação (A 1), foi utilizado o produto entre a largura ( $L$ ) e o comprimento ( $W$ ) para calcular a área em questão, ao invés da soma desses parâmetros. Isso levou a resultados diferentes dos obtidos quando a soma de  $L$  e  $W$  é utilizada para o cálculo da área. Por essa razão, houve uma discrepância de 382,07% entre os valores de área calculados, o que pode resultar em divergências nos resultados entre os estudos.

Enquanto o trabalho de Kafer (2018) utilizou uma equação que considerou o produto entre a largura e o comprimento da edificação, o presente estudo utilizou uma equação baseada na norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), que considera a soma da largura e do comprimento. É importante destacar que a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) é um documento técnico reconhecido internacionalmente e é amplamente utilizado em projetos de proteção contra descargas atmosféricas. Portanto, o presente estudo seguiu as recomendações da norma para o cálculo da área e é considerado correto. Por outro lado, a equação utilizada por Kafer (2018) pode não ser a mais adequada para o cálculo da área de edificações em geral, o que pode ter levado a um erro significativo nos resultados. Além disso, é importante ressaltar que a discrepância nos resultados foi detectada e reportada neste estudo, demonstrando transparência e compromisso com a precisão dos resultados.

Conforme apresentado anteriormente, o valor de eventos perigosos é calculado pela multiplicação entre a área equivalente específica  $A_X$ , densidade de descargas atmosféricas  $N_G$ ,

constantes associadas as propriedades da estrutura e o fator  $10^{-6}$ . É importante destacar que as componentes de risco são calculadas com o número de eventos perigosos com referência ao ponto de recebimento da descarga atmosférica (ponto de impacto).

O parâmetro  $C_D$  igual a 2 foi extraído da Tabela 7, que consiste em uma estrutura isolada no topo de uma colina ou monte.

A área de exposição equivalente, para estruturas isoladas em solos planos,  $A_D$ , foi calculada através da Equação (15), utilizando os dados de altura (H), largura (L) e comprimento (W) da edificação, disponíveis na Tabela A 1.

A área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha,  $A_L$ , é calculada utilizando a Equação (20), em que  $L_L$  é o comprimento da seção da linha, expresso em metros (m). Ademais, onde o comprimento da seção da linha for desconhecido, segundo a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), pode ser assumido o valor do comprimento ( $L_L$ ) igual a 1000 m.

A área de exposição equivalente de descargas atmosféricas para a terra perto da linha ( $A_I$ ) é calculada utilizando a Equação (22), em que  $L_L$  é o comprimento da seção da linha, expresso em metros (m).

A área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem regiões perto da estrutura, é calculada utilizando a Equação (20), em que L e W são valores das dimensões de largura e comprimento da estrutura, sendo 13,95 m e 31,2 m, respectivamente, conforme Tabela A 1.

O parâmetro  $C_T$  igual a 1 foi extraído da Tabela 9 que indica o tipo de instalação, neste caso de linha de energia ou sinal.

O parâmetro  $C_I$  igual a 1 foi extraído da Tabela 8, que sinaliza o tipo de roteamento, neste caso linha aérea. O parâmetro  $C_E$  igual a 0,5 foi extraído da

Tabela 10, que informa o tipo de ambiente, neste caso suburbano, pois, nesse contexto, é considerado que há menor densidade populacional e menos edificações do que em áreas urbanas centrais.

Além disso, o tráfego de veículos e a presença de equipamentos que possam interferir no sistema de proteção são, em geral, menores. Por esse motivo, espera-se que as condições para a instalação de um SPDA sejam mais favoráveis, e é possível usar esse valor como referência na definição do NP adequado para um museu em uma área suburbana.

No estudo realizado por Kafer (2018), o valor estimado de  $N_G$  utilizado foi de 10,3, considerado adequado para a região, uma vez que a escala presente no Apêndice P abrange

valores entre 9 e 11. Com base nisso, para este estudo, será adotado o mesmo valor de  $N_G$ . Ao utilizar o mesmo valor de  $N_G$  neste estudo, será estabelecida uma comparação direta e consistente com o trabalho de referência, possibilitando uma análise comparativa mais precisa e uma melhor compreensão das diferenças e semelhanças nos resultados obtidos.

Dessa forma,  $N_X$  vai assumir diferentes valores em função da área equivalente correspondente. Os parâmetros da Tabela 28 foram calculados utilizando a planilha de Excel desenvolvida para este trabalho, que permitiu a realização dos cálculos de forma automática e a gestão de cada análise realizada.

É relevante mencionar que a NBR 5419, norma brasileira que aborda a proteção contra descargas atmosféricas, possui a mesma estrutura e organização da norma internacional IEC 62305/2010. Essa similaridade entre as normas é importante, pois permite a harmonização e a padronização das diretrizes e requisitos para a proteção contra descargas atmosféricas em diferentes contextos. A adoção da mesma estrutura facilita a compreensão e a aplicação das diretrizes estabelecidas, tanto no âmbito nacional quanto internacional, promovendo uma maior segurança e efetividade na proteção contra descargas atmosféricas.

Tabela 28 - Parâmetros característicos da zona de proteção

Nº eventos perigosos	Ponto de impacto	$N_G$	$A_D$	$A_M$	$A_L$	$A_I$	$C_D$	$C_T$	$C_I$	$C_E$
		$N_D$	Na estrutura	10,3	5.008,72	-	-	-	2	-
$N_M$	Próx. à estrutura	10,3	-	830.548,16	-	-	-	-	-	-

$N_L$	Na linha energia	10,3	-	-	40.000,00	-	-	1	1	0,5
$N_I$	Próx. à linha energia	10,3	-	-	-	4.000.000,00	-	1	1	0,5
$N_L$	Na linha sinal	10,3	-	-	40.000,00	-	-	1	1	0,5
$N_I$	Próx. à linha sinal	10,3	-	-	-	4.000.000,00	-	1	1	0,5

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Foram calculados os valores de  $N_L$  e  $N_I$  (descargas atmosféricas na linha e perto da linha, respectivamente) para as linhas de energia e de sinal, separadamente, um procedimento que não foi evidenciado no trabalho de Kafer (2018). Para isso, de acordo com a Equação (19), possuindo os valores de  $N_G = 10,3$ ,  $A_L = 40.000$ ,  $C_I = 1$ ,  $C_E = 0,5$  e  $C_T = 1$ , apresentados anteriormente, foi calculado o valor de  $N_L$ . E tendo acesso aos valores de  $N_G = 10,3$ ,  $A_L = 4.000.000$ ,  $C_I = 1$ ,  $C_E = 0,5$  e  $C_T = 1$ , foi calculado o valor de  $N_I$ , conforme a Equação (21).

A falta de cálculo dos valores de  $N_L$  e  $N_I$  pode levar a uma análise incompleta da proteção contra descargas atmosféricas na linha e perto da linha, respectivamente. Isso pode impactar na efetividade do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, uma vez que o comportamento da descarga pode ser diferente na linha e perto da linha.

Conforme supracitado foi realizado o cálculo dos valores de  $N_L$  e  $N_I$  para as linhas de energia e sinal, separadamente, para uma análise mais precisa. Esses valores foram comparados com os resultados apresentados no trabalho de Kafer (2018), onde os cálculos dos valores de  $N_L$  e  $N_I$  não foram evidenciados.

Os valores totais finais e os valores calculados por Kafer (2018) estão expressos na Tabela 29.

Tabela 29 - Número de eventos perigosos para cada ponto de impacto por trabalho

Nº eventos perigosos	Lucas	Kafer
	Total	
$N_D$	0,103	0,497402

$N_M$	8,55	8,554408
$N_L$ (energia)	0,206	0,206
$N_I$ (energia)	20,6	10,3
$N_L$ (sinal)	0,206	
$N_I$ (sinal)	20,6	

---

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Por análise dos resultados contidos na Tabela 29, pode-se perceber que, primeiramente, o valor de  $N_D$  diminuiu 79,29%. Isto porque o cálculo de  $N_D$  utiliza a área de exposição equivalente da edificação, em que houve uma redução do valor utilizado no trabalho de Kafer (2018) para o valor considerado neste trabalho. Além disso, o valor de  $N_I$  para a linha de sinal aumentou 100%. Tal fato deu-se em razão do valor de  $A_I$  ter sido de 2.000.000,00 no trabalho de Kafer (2018) e nesta nova análise foi de 4.000.000,00. Não ocorreram mudanças nos valores de  $N_L$  para a linha de sinal, tampouco de  $N_M$ .

De acordo com as informações apresentadas na Tabela 29, pode-se perceber que houve uma diminuição significativa no valor de  $N_D$  em 79,29%. O cálculo de  $N_D$  depende da área de exposição equivalente da edificação, a qual foi reduzida em relação ao trabalho anterior de Kafer (2018).

Além disso, houve um aumento de 100% no valor de  $N_I$  para a linha de sinal, que ocorreu porque o valor de  $A_I$  foi alterado de 2.000.000,00 para 4.000.000,00 nesta nova análise. No entanto, os valores de  $N_L$  para a linha de sinal e  $N_M$  permaneceram inalterados.

Essas informações sugerem que a análise atualizada pode ter impactos significativos nos valores de  $N_D$  e  $N_I$  para a linha de sinal. É importante considerar essas mudanças ao interpretar os resultados da análise e fazer comparações com trabalhos anteriores correlacionados.

### 3.3 Avaliação das Quantidades de Perdas – Estudo de caso de um museu

Conforme a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), a componente de perda é um elemento que trata de uma quantidade relativa média de um tipo de dano para um dado evento perigoso provocado por um raio, sendo considerado sua proporção e implicações. Os dados de entrada variam em função do tipo de perda avaliada, tal como  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  e  $L4$  e dano gerado correlacionado.

Para obter os valores de perda, foi contemplada a recomendação da norma brasileira (ABNT, 2015) que utiliza os valores atribuídos a cada coeficiente e estão dispostos na Tabela 30.

Tabela 30 - Probabilidades de perdas calculadas

<b>Proba</b>								
<b>b.</b>	$L_A$	$L_B$	$L_C$	$L_M$	$L_U$	$L_V$	$L_W$	$L_Z$
<b>perda</b>								
L1	3,33 $\times 10^{-5}$	6,67 $\times 10^{-5}$	-	-	3,33 $\times$ $10^{-5}$	6,67 $\times 10^{-5}$	-	-
L3	-	4,25 $\times 10^{-4}$	-	-	-	4,25 $\times 10^{-4}$	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

### 3.4 Avaliação geral do risco e seleção das medidas de proteção - Estudo de caso de um museu

A Tabela 31 apresenta os resultados obtidos após a etapa de cálculos do projeto. Essa tabela é uma ferramenta útil para ajudar na identificação e interpretação dos dados relevantes para o projeto em questão.

Tabela 31 - Componentes de risco da estrutura de um museu em seu estado atual

<b>Riscos</b>										
<b>Relevantes</b>	<b>Descrição</b>	<b>Risco total</b>	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_M$	$R_U$	$R_V$	$R_W$	$R_Z$
R1	Vida humana	5,15 $\times 10^{-5}$	3,44 $\times 10^{-6}$	6,88 $\times 10^{-6}$	-	-	1,37 $\times 10^{-5}$	2,75 $\times 10^{-5}$	-	-
R3	Patrimônio cultural	2,19 $\times 10^{-4}$	-	4,39 $\times 10^{-5}$	-	-	-	1,75 $\times 10^{-4}$	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Observando as componentes de risco  $R_1$  apresentadas pela Tabela 31, é notável que o valor do risco total ( $R_1$ ) está acima do risco de perda de vida humana ( $L_1$ ) tolerável ( $R_T$ ), que é  $1 \times 10^{-5}$ , de acordo com a Tabela 4. Neste mesmo sentido, tratando-se do risco ( $R_3$ ), as componentes ( $R_B$ ) e ( $R_V$ ) possuem maior peso e estão associadas, majoritariamente, a danos

físicos e incêndio. Além disso, o valor do risco total ( $R_3$ ) excede o risco tolerável de perda de patrimônio cultural ( $R_T$ ) que é  $1 \times 10^{-4}$ , também de acordo com a Tabela 4. Neste contexto, afirma-se a necessidade de se adotar medidas de proteção que possam diminuir os valores de cada componente de risco. Adicionalmente, ressalta-se que o dimensionamento da PDA deve direcionar-se a uma solução que visa funcionalidade e economicidade, mas não deixando de cumprir o NP exigido, conforme ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b)

Para diminuir a intensidade dos riscos  $R_1$  e  $R_4$  a valores inferiores a  $1 \times 10^{-5}$  e  $1 \times 10^{-4}$ , respectivamente, deve-se proceder à seleção de medidas de proteção que atenuem seus valores, sendo elas:

- a) instalação de um SPDA completo Classe II, projetado com três métodos de proteção diferentes e independentes, para compensar  $R_A$  e  $R_B$  através da redução da probabilidade  $P_B$ .
- b) instalação de um DPS nível I na entrada de energia, dimensionado para 25 kA, conforme requisitado pela Norma Técnica N-321.0001 (CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A, 2019) a qualquer edificação com SPDA externo, para compensar  $R_V$ .
- c) instalação de um DPS nível II no quadro secundário, dimensionado para 20 kA, conforme requisitado pela Norma Técnica N-321.0001 (CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A, 2019) a qualquer edificação com SPDA externo, para compensar  $R_V$ .
- d) instalação de avisos de alerta contra choques na estrutura, para neutralizar  $R_U$ .
- e) instalação de avisos visíveis de alerta contra choques na linha conectada, para neutralizar  $R_U$ .

A utilização de normas técnicas é uma prática comum em diversos campos da engenharia, incluindo a área de SPDA. Embora cada empresa de distribuição de energia elétrica possa ter suas próprias normas e procedimentos, muitas vezes há uma convergência entre as normas técnicas adotadas por diferentes empresas do setor.

No caso deste trabalho, optou-se pela utilização da norma técnica da Celesc - Centrais Elétricas de Santa Catarina (2019), uma vez que a mesma apresenta diretrizes claras e precisas para a análise de riscos relacionados a descargas atmosféricas. Além disso, essa norma é amplamente reconhecida e utilizada em diversos estados do país e foi utilizada também por Kafer (2018), uma vez que a unidade fabril se situa sob a área de concessão da Celesc.

Mesmo que a empresa concessionária de energia elétrica na área em que foi realizado o trabalho não seja a Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais, a adoção da norma técnica da Celesc (2019) não invalida a análise realizada. Na verdade, a norma técnica da Celesc (2019) foi utilizada como referência para a realização da análise de riscos.

Dessa forma, a utilização da norma técnica da Celesc (2019) foi uma escolha consciente e fundamentada, que contribuiu para a realização de uma análise de riscos precisa e confiável, mesmo em uma área de concessão de outra empresa de energia elétrica.

Imediatamente após inserir medidas de proteção, fez-se necessário verificar novamente o cálculo das componentes de risco da Tabela 31, mas dessa vez computando as novas informações e o novo resultado obtido. A Tabela 32 apresenta os novos valores das componentes considerando as novas medidas estipuladas neste trabalho.

Tabela 32 - Componentes de risco recalculadas

<b>Riscos Relevantes</b>	<b>Descrições</b>	<b>Risco total</b>	$R_{iA}$	$R_{iB}$	$R_{iC}$	$R_{iM}$	$R_{iU}$	$R_{iV}$	$R_{iW}$	$R_{iZ}$
R1	Vida humana	6,50 $\times 10^{-7}$	1,72 $\times 10^{-8}$	3,44 $\times 10^{-7}$	-	-	1,37 $\times 10^{-8}$	2,75 $\times 10^{-7}$	-	-
R3	Patrimônio cultural	3,94 $\times 10^{-6}$	-	2,19 $\times 10^{-6}$	-	-	-	1,75 $\times 10^{-6}$	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

As medidas de proteção implementadas diminuiram tanto o risco de perda de vida humana  $R_1$ , quanto o risco de perda de patrimônio cultural  $R_3$ , para valores abaixo dos riscos toleráveis.

### 3.5 Projeto do SPDA – Estudo de caso de um museu

Com base nos cálculos de avaliação de risco previamente efetuados, foi verificado que é necessário instalar um SPDA de Classe II na estrutura do museu. O objetivo do SPDA externo é reduzir a probabilidade de danos a seres vivos e danos físicos estruturais ou patrimoniais causados por uma descarga atmosférica, enquanto o SPDA interno tem como função prevenir a falha dos sistemas elétricos e eletrônicos do edifício.

A instalação do SPDA é importante porque o museu é uma edificação de pequeno porte, mas com considerável concentração de pessoas, o que aumenta o risco de danos em caso de uma descarga atmosférica. Além disso, o edifício pode abrigar uma coleção valiosa de obras de arte e patrimônio cultural, que precisam ser protegidos de possíveis danos.

As seções subsequentes deste estudo apresentarão a elaboração das medidas de proteção a serem adotadas para minimização dos riscos inerentes. Essas medidas podem incluir a seleção e instalação adequada de dispositivos de proteção contra surtos, aterramento adequado da instalação elétrica, além de outras medidas específicas para proteger a estrutura do edifício e seus sistemas contra os efeitos prejudiciais de uma descarga atmosférica.

### **3.6 Método de Projeto – Estudo de caso de um museu**

Com o intuito de avaliar a precisão dos resultados obtidos e identificar possíveis discrepâncias, foram desenvolvidos três métodos distintos para o projeto da estrutura de PDA. São eles: o método de Faraday (híbrido), o método Eletrogeométrico ou Esfera Rolante (híbrido) e o método Franklin. Cada método apresenta suas próprias condições e utiliza materiais específicos.

O método de Faraday faz uso do para-raios desenvolvido pelo engenheiro eletricitista belga Jean-François Melsens em 1930 e baseia-se na teoria de que o campo elétrico no interior da gaiola formada por uma malha metálica fica anulado na presença de um campo elétrico externo. Este método é indicado para edificações de baixa altura, como empresas com galpões (MAMEDE FILHO, 2017).

O sistema de para-raios Franklin, criado por Benjamin Franklin em 1753, é composto por uma haste metálica com captadores que é conectada a dois condutores ligados à terra pelo sistema de descida. Esse sistema é indicado para edificações com altura máxima de 45 metros ou 15 andares (MAMEDE FILHO, 2017).

Já o método Eletrogeométrico ou Esfera Rolante, também conhecido como método da esfera fictícia, consiste em fazer rolar uma esfera imaginária pela construção. Os pontos em que a esfera toca a edificação indicam os locais com maior probabilidade de descargas elétricas, sendo necessário protegê-los com para-raios, geralmente do tipo Franklin. Este método é recomendado para edificações muito altas e arquitetonicamente complexas (MAMEDE FILHO, 2017).

É fundamental que a fixação dos materiais utilizados seja feita adequadamente, garantindo que os subsistemas de captação e descida resistam às tensões mecânicas induzidas

pelos raios. A revisão bibliográfica realizada mostrou que a referência consultada utilizou apenas um dos métodos citados, evidenciando que o presente trabalho é mais abrangente e possui maior embasamento teórico-prático.

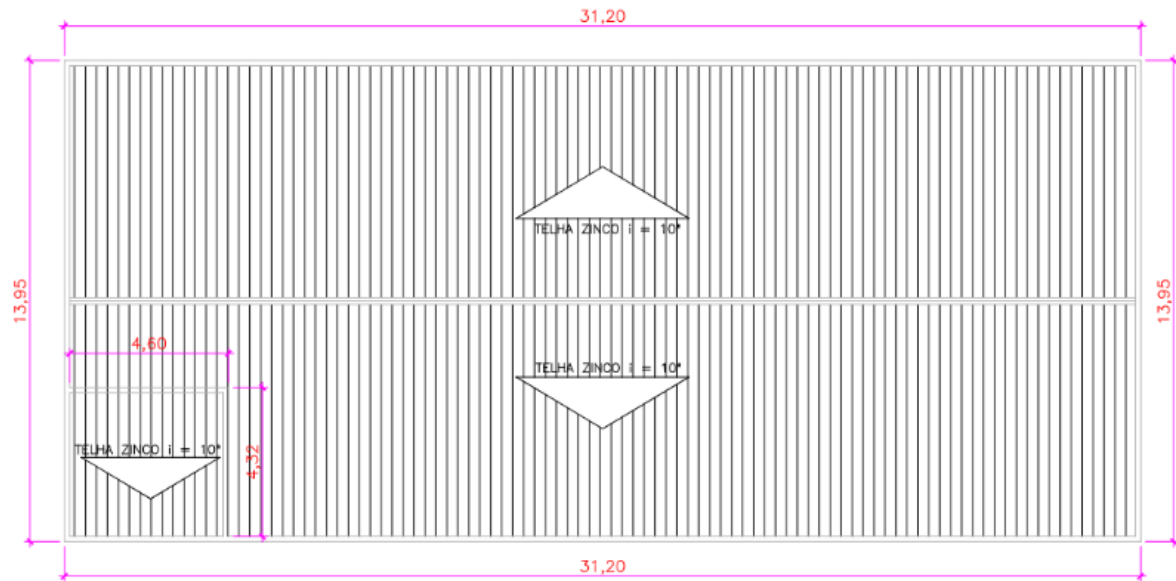
### **3.7 Método Faraday (híbrido)**

#### ***3.7.1 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação***

A planta do museu utilizada neste estudo foi obtida a partir da mesma planta da unidade fabril analisada por Kafer (2018), com as mesmas dimensões e geometria. Ressalta-se que a finalidade de uso e o tipo de perda são diferentes. Na unidade fabril, foram considerados além da perda de vida humana, a perda de valor econômico, enquanto neste trabalho, é analisada a perda de valor cultural e de vida humana. Portanto, é importante destacar que a planta é real e foi utilizada como referência para a análise dos riscos elétricos presentes no museu. É importante acrescentar que o Museu em questão possui dois andares e há uma saliência na parte superior na planta.

A Figura 10 é uma representação gráfica das dimensões da parte superior do Museu, apresentando de forma clara e objetiva as medidas de comprimento e largura. Essas informações são fundamentais para a análise do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), sobretudo para o subsistema de captação, que deve ser projetado de acordo com as dimensões do edifício. A área em alvenaria é a parte mais externa, representada na cor branca, enquanto a região composta por telhas metálicas é a parte interna, dividida em duas.

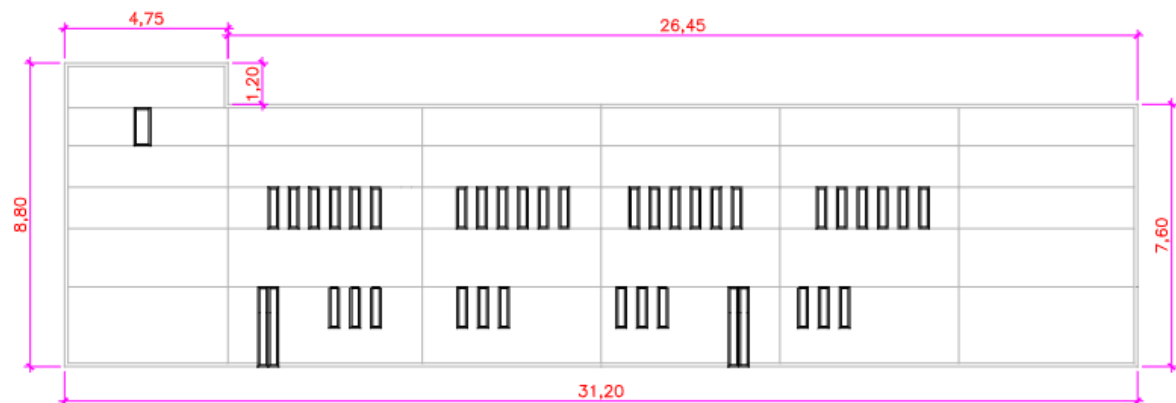
Figura 10 - Vista superior do museu com as dimensões de comprimento e largura



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

Com as medidas de altura e comprimento apresentadas de forma precisa, a Figura 11 proporciona informações importantes para a análise de questões relacionadas ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas, incluindo para os subsistemas de captação e descida.

Figura 11 - Vista lateral do museu com as dimensões de comprimento e largura



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

Por meio do método de Faraday (híbrido), projetou-se a distribuição espacial dos condutores do subsistema de captação. A vista superior da estrutura é apresentada no

## APÊNDICE B – Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Faraday (vista superior) deste documento.

De acordo com a Tabela 5 – Materiais para SPDA e condições de utilização da ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), a aplicação de materiais condutores em alumínio é permitida ao ar livre.

Pela Tabela 6 – Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes da ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), o alumínio, na configuração em fita maciça, deve possuir área de seção mínima de  $70 \text{ mm}^2$  e espessura 3 mm. A barra chata de alumínio disponível comercialmente que atende aos requisitos mínimos da norma está disponível no site da Termotécnica Para-raios (2023) com a descrição 7/8" x 1/8" x 3 m ( $70 \text{ mm}^2$ ), com 9 furos de  $\varnothing 7$  mm, em que 1/8" equivalem a 3,175 mm. Dessa forma, a barra utilizada para este projeto possui 3 m de comprimento. É importante destacar que, de acordo com o item 4.1 Classe do SPDA conforme norma brasileira (ABNT, 2015), Seção 4, os materiais, configuração e dimensões mínimas para captadores, descidas e eletrodos de aterramento são fatores independentes da Classe do SPDA.

O perímetro total da área superior a ser percorrido pelos condutores, em alvenaria e em telha metálica soma-se em 160 m. Entretanto, não é recomendado utilizar o mesmo tipo de parafuso para fixar a barra chata de alumínio em alvenaria e em telha metálica, pois os materiais possuem características diferentes e exigem tipos de fixação diferentes.

Há 7 regiões na vista superior nas quais o ponto de encontro entre duas barras chatas horizontais se configura em  $90^\circ$  (os cantos) e diante disso, a quantidade estimada de Curva  $90^\circ$  com 7/8" x 1/8" x 300 mm é de 7 unidades. Em contrapartida, há 12 regiões em que o ponto de encontro entre duas barras chatas verticais se configura em  $90^\circ$  e diante disso, a quantidade estimada de Curva  $90^\circ$  vertical com 7/8" x 1/8" x 300 mm é de 12 unidades.

A curva de  $90^\circ$  no ponto de encontro entre duas barras chatas de alumínio é importante porque ajuda a reduzir o estresse concentrado nessa área, o que pode levar a uma redução da resistência estrutural e à falha prematura da peça. Sem ela, haveria uma transição abrupta entre as duas barras planas, resultando em uma concentração de tensão que poderia causar uma fissura ou rachadura na peça. Isso pode levar a falhas catastróficas, especialmente em aplicações de carga pesada ou de alta tensão. Portanto, este componente ajuda a distribuir a tensão de forma mais uniforme e suave, o que melhora a resistência e a durabilidade da junção entre as duas barras de alumínio. Dentro do contexto em questão, o termo "tensão" diz respeito à força aplicada em um material, que pode ocasionar deformações ou rupturas. Ela é uma medida da intensidade da força por unidade de área e é comumente expressa em unidades de

pressão, tais como Pascal (Pa) ou libras por polegada quadrada (psi). Portanto, quando se menciona a concentração de tensão, está se referindo a uma área específica da peça onde a força aplicada é maior, podendo resultar em um aumento localizado da tensão e, conseqüentemente, um maior risco de falha estrutural.

Para fixação das barras chatas de alumínio em alvenaria, com perímetro aproximado de 100 m ( $1,20 + 31,20 + 13,95 + 13,95 + 4,32 + 4,60 = 99,22$  m), é recomendado, segundo as informações contidas na seção de Elementos de Conexão, Proteção e Fixação dos Condutores do Catálogo de Produtos SPDA - MPS da Termotécnica Para-Raios (2022), o uso de parafusos de aço inoxidável com cabeça chata para fixação de barras chatas de alumínio em alvenaria. Essa escolha de material está em conformidade com a norma brasileira (ABNT, 2015), que exige parafusos resistentes à corrosão e que ofereçam uma fixação segura. Cada barra possui 9 furos com diâmetro ( $\emptyset$ ) igual a 7 mm, e serão utilizadas um total de 34 unidades ( $100/3=33,33$  un) com um total de 306 furos ( $9 \times 34$  un= 306 furos).

Logo, serão necessários 306 parafusos cabeça chata em alumínio e 306 buchas de nylon n°6 de  $\emptyset 7$  mm.

Já para a fixação das barras chatas de alumínio em telha metálica, com perímetro de 60 m ( $31,20 + 13,95 + 13,95 = 59,10 \approx 60$  m), é recomendado por norma (ABNT, 2015), o uso de parafusos autoperfurantes, que possuem uma ponta cônica e roscas especiais que permitem que eles perfurem e se fixem em superfícies duras, como concreto e metais, sem a necessidade de pré-furação. Eles são úteis para fixar materiais em que a superfície é muito dura para ser perfurada facilmente com uma broca convencional, conforme o Catálogo de Produtos SPDA - MPS da Termotécnica Para-Raios (2022). Cada barra possui 9 furos de  $\emptyset 7$  mm, e serão utilizadas 20 unidades ( $60$  m /3) com um total de 180 furos. Logo, serão necessários 180 parafusos cabeça chata em alumínio e 180 buchas de nylon n°6 de  $\emptyset 7$  mm.

O Selante em poliuretano é um material bastante utilizado em diferentes tipos de instalações, incluindo o SPDA. Ele é usado para selar e vedar conexões e furos em estruturas metálicas, garantindo uma proteção mais eficaz contra a entrada de umidade e outros agentes corrosivos. Como a quantidade de selante necessária pode variar dependendo do diâmetro e da profundidade dos furos, do tamanho dos parafusos e da quantidade de roscas que ficam expostas após a instalação, para este projeto, sua quantidade de unidades não será avaliada.

A Tabela 33 traz o dimensionamento dos componentes utilizados no sistema captor e suas respectivas quantidades mínimas necessárias.

Tabela 33 - Componentes básicos do subsistema de captação para o método Faraday (híbrido)

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 3 m	54
Curva 90° em barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 300 mm	7
Curva 90° vertical em barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 300 mm	12
Mini capttores em barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 300 mm	15
Parafuso cabeça chata em alumínio (alvenaria)	Ø7 mm	306
Parafuso autoperfurante (telha metálica)	Ø7 mm	180
Bucha de nylon nº6 (telha metálica)	Ø7 mm	180
Bucha de nylon nº6 (alvenaria)	Ø7 mm	306
Selante em Poliuretano	Bisnaga	N/A

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Por definir-se como um SPDA Classe II, conforme a Tabela 20 correspondentes a Classe do SPDA da ABNT NBR 5419-3 (2015), o espaçamento máximo entre os condutores da malha não deve ultrapassar 10 metros. À vista disso, projetou-se o sistema de captação com uma malha de sete anéis retangulares de 7,8 metros de comprimento por 6,975 metros de largura cada.

Para a configuração dos *meshes* (malhas ou rede de condutores), foram utilizadas barras chatas de alumínio. A parte elevada no canto superior esquerdo da planta também está interligada ao sistema.

Mini capttores são uma opção comumente utilizada em estruturas de menor porte, como residências, comércios, edifícios, unidades fabris de pequeno porte e museus. Para instalações de maior porte, como em indústrias, prédios públicos e estruturas de grande porte, podem ser necessários outros tipos de capttores, como as hastes Franklin e os capttores de malha. Além dos condutores da malha de captação, foram instalados mini capttores também em barra chata de alumínio, em todos os cantos salientes e ao centro da estrutura, em cada canto dos *meshes*, totalizando em 15 unidades. Além disso, visando a equipotencialização do sistema,

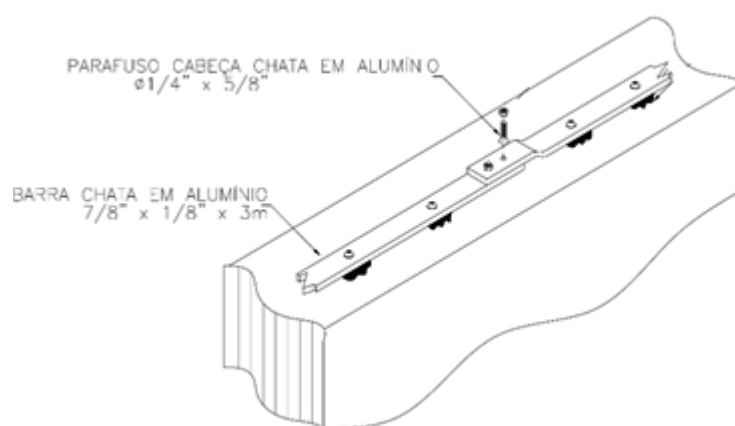
todas as partes em barra chata de alumínio, assim como todos os mini captadores, foram interligados na interface do telhado de zinco.

A instalação de mini captadores nos cantos salientes da estrutura é uma técnica comumente empregada em SPDA. Isso ocorre porque os cantos salientes de uma estrutura são pontos críticos que apresentam maior probabilidade de receber uma descarga atmosférica, devido à concentração de carga elétrica (COORAY, 2010).

De acordo com Pellegrino (2014), os cantos salientes também são pontos onde a densidade de linhas de campo elétrico é maior, o que pode resultar em tensões elevadas e correntes de fuga. A instalação de mini captadores nos cantos salientes ajuda a reduzir essas tensões e correntes, aumentando a eficiência do sistema de proteção.

A Figura 12 apresenta o detalhe de instalação da barra chata de alumínio na alvenaria.

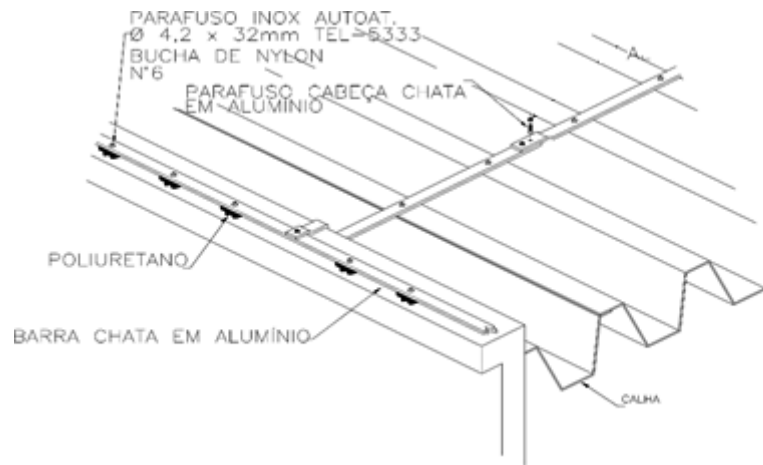
Figura 12 - Emenda da barra chata de alumínio em alvenaria



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

A Figura 13 apresenta o detalhe de instalação da barra chata de alumínio na alvenaria em derivação à telha de zinco.

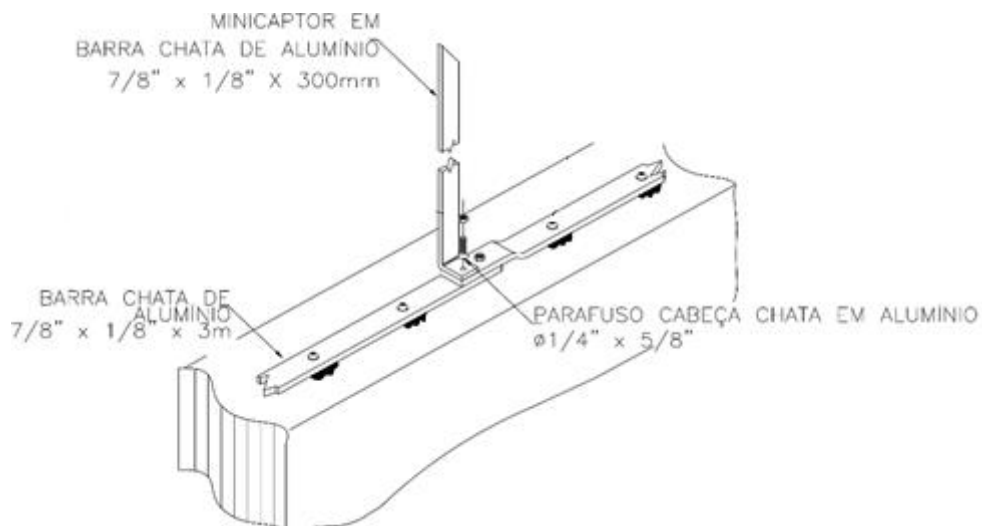
Figura 13 - Derivação da barra chata de alumínio percorrendo da platibanda para a telha



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

A Figura 14 apresenta o detalhe de instalação do mini captor em barra chata de alumínio na alvenaria.

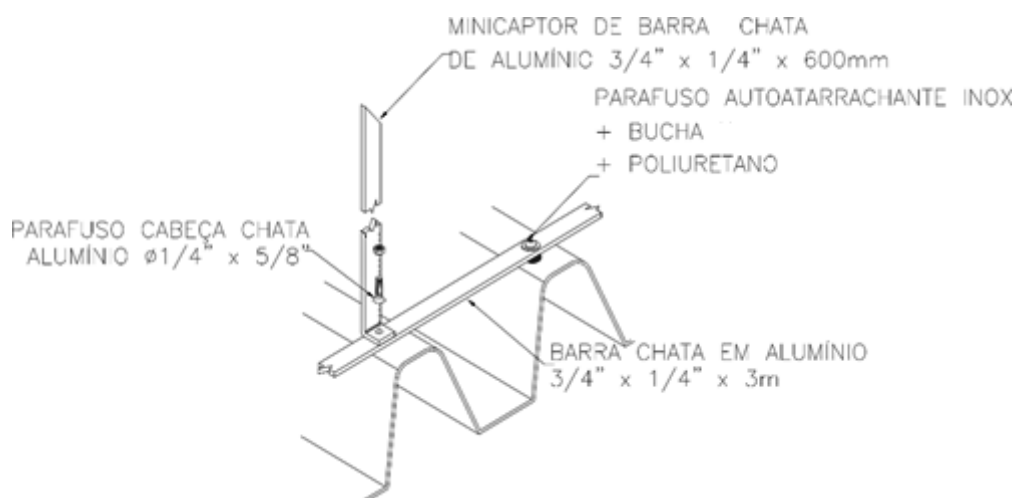
Figura 14 - Instalação de mini captor e barra chata de alumínio em alvenaria



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

A Figura 15 apresenta o detalhe de instalação do mini captor em barra chata de alumínio na telha de zinco.

Figura 15 - Instalação de mini captor e barra chata de alumínio em telha metálica



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

### 3.7.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida

Na Tabela 4 da norma NBR 5419-3 (ABNT, 2015) – Valores típicos de distância entre os condutores de descida e entre os anéis condutores de acordo com a Classe de SPDA - é especificado que o espaçamento entre os condutores de descida diante de um SPDA Classe II deve possuir 10 metros, sendo admitido até 20% acima ou abaixo do valor especificado.

O perímetro total da área externa superior é de 90,3 m. Dividindo este valor por 10, tem-se 9,03 m, sendo admitido até 20% acima ou abaixo, que seria  $\pm 1,806$  m. Para este projeto, inicialmente, foram projetadas dez descidas principais (valor que está dentro do intervalo considerado, visto que o máximo é 10,386 m ( $9,03 + 1,806$ ) e o valor mínimo de 7,224 m ( $9,992 - 1,806$ )).

Assim sendo, são necessárias quatro descidas nos cantos da edificação, e duas no centro de cada lateral (esquerda e direita), de modo a proporcionar uniformidade de instalação no telhado.

Ainda segundo a mesma norma, o número de condutores de descida não pode ser inferior a dois, mesmo se o valor do cálculo do perímetro dividido pelo espaçamento para o nível correspondente resultar em valor inferior. E para este projeto, no posicionamento, foi utilizado uma distribuição equilibrada entre os condutores de descida ao redor do perímetro da platibanda. A configuração do subsistema de descida, tanto a vista lateral, quanto a frontal e traseira é exibida nos Apêndices , **APÊNDICE D - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Faraday (vista lateral)** e D, respectivamente.

Conforme já demonstrado anteriormente, foram projetadas dez descidas principais, sendo quatro delas localizadas nos cantos da edificação, duas posicionadas no centro de cada lateral (esquerda e direita), uma na parte frontal e outra na parte posterior, objetivando assim obter uma distribuição simétrica e equidistante. A quantidade superior de descidas em relação ao trabalho de Kafer (2018) e em conformidade com as orientações da norma, tem por objetivo prover mais opções de caminhos para a corrente elétrica em caso de impactos de raios em qualquer parte do perímetro da edificação.

Optou-se por utilizar barras chatas de alumínio idênticas às empregadas no subsistema de captação para a implementação das descidas, com o intuito de manter a uniformidade técnica do trabalho de Kafer, que já havia adotado essa mesma escolha para garantir a eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosférica.

Para instalar as 10 descidas no museu, o perímetro total de barra chata a ser utilizado deve ser de aproximadamente 77,2 m, que é a somatório de todas as alturas percorridas pelas descidas. Dividindo o perímetro pelo comprimento de uma única barra chata de alumínio, que é 3 m, a quantidade estimada do material é de 26 unidades.

Há 10 descidas em que o ponto de encontro entre duas barras chatas horizontais se configura em 90° (os cantos) e diante disso, a quantidade estimada de Curva 90° com 7/8" x 1/8" x 300 mm é de 10 unidades.

De forma similar ao cálculo anterior, a quantidade de selante em poliuretano necessária não foi estimada para este projeto, já que pode variar significativamente dependendo de vários fatores, como o diâmetro e profundidade dos furos, tamanho dos parafusos e quantidade de roscas expostas após a instalação.

A relação de componentes e suas dimensões estão descritas na Tabela 34.

Tabela 34 - Componentes básicos do subsistema de descida para o método Faraday (híbrido)

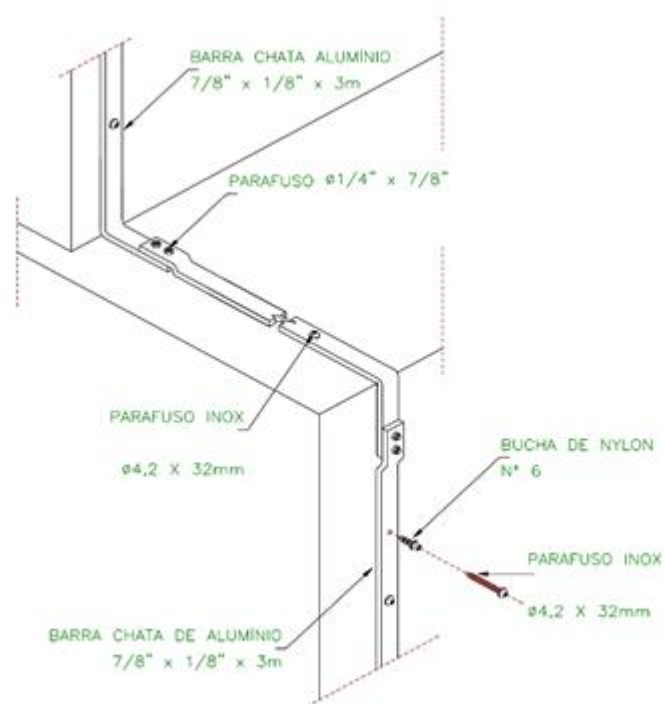
<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 3 m	26
Barra chata curva 90° vertical de alumínio	7/8" x 1/8" x 300 mm	10
Parafuso cabeça chata em alumínio	Ø1/4" x 7/8"	234
Bucha de nylon n°6	Ø7 mm	234
Selante em Poliuretano	Bisnaga	N/A

Solta exotérmica 150 GR	-	10
Abraçadeira tipo D com cunha	Ø1"	20
Eletroduto galvanizado a fogo (m)	1" x 3 m	10
Cabo de cobre nu	35 mm <sup>2</sup> x 1,5 m	10
Terminal de compressão		20

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

As barras são aparafusadas ao sistema captor e afixadas à fachada da edificação por parafusos cabeça chata de alumínio de Ø1/4" x 7/8", conforme Figura 16.

Figura 16 - Detalhe de descida em barra chata de alumínio em 7/8" x 1/8"



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

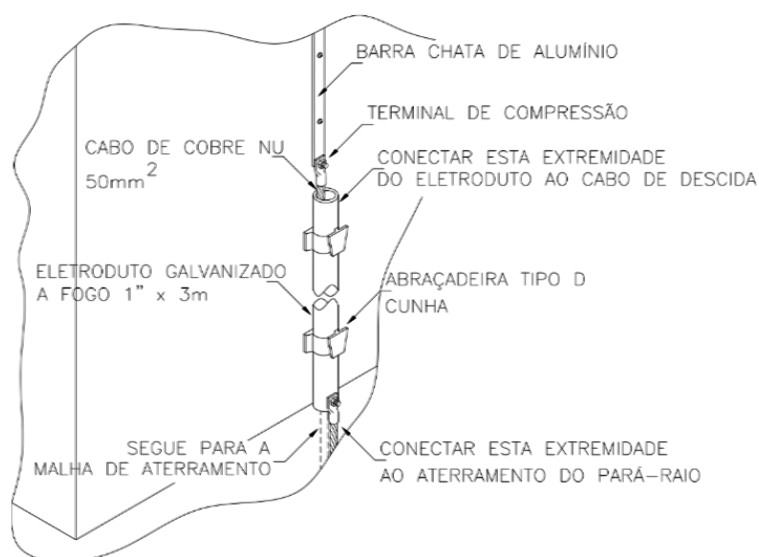
De acordo com a Tabela 5 – Materiais para SPDA e condições de utilização – contida na norma ABNT NBR 5419-3 (2015), a aplicação de materiais condutores em alumínio não é permitida na terra nem em concreto, seja reboco ou armado. No entanto, materiais compostos por cobre nu são recomendados. Por isso, é proposto que a barra chata de alumínio

seja conectada ao cabo de cobre nu por meio de um terminal de compressão antes de chegar ao solo. A altura sugerida é 1,5 m a partir do piso, de acordo com o item 5.5.3 Conexões da seção 5 da norma. Ainda segundo a norma, é recomendável que o número de conexões ao longo dos condutores seja minimizado. Quando conexões forem necessárias, é importante que sejam feitas de maneira segura e através de técnicas como soldagem elétrica ou exotérmica e conexões mecânicas de pressão (se embutidas em caixas de inspeção) ou compressão.

Como serão 10 descidas utilizando barra chata de alumínio, serão necessários 10 trechos de aproximadamente 9 metros de cabo de cobre nu. A conexão entre os dois materiais é feita através de terminais de compressão, sendo necessário um terminal por cada extremidade do cabo de cobre nu. Para a proteção eletromecânica dos condutores de cobre nu na descida, serão utilizados eletrodutos galvanizados a fogo, oferecendo resistência mecânica e proteção contra impactos e intempéries, sendo necessárias 10 unidades de 1,5 m (uma para cada cabo de cobre nu da descida). O duto deve ser afixado na alvenaria da edificação por abraçadeiras tipo D com cunha de diâmetro igual a 1" ( $\varnothing 1$ ), sendo utilizados dois pares de abraçadeiras por cada unidade de duto. A escolha de abraçadeiras tipo D de  $\varnothing 1$ " para a fixação do duto em alvenaria pode ser justificada por sua capacidade de fixação segura e resistência a intempéries, mesmo em superfícies não planas, garantindo a durabilidade e segurança da fixação ao longo do tempo, promovendo uma vida útil longa.

A Figura 17 ilustra os detalhes de instalação dos condutores de descida.

Figura 17 - Conexão da descida em barra chata de alumínio com o aterramento



Embora a norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c) recomende a isolamento adequada dos condutores de descida expostos, utilizando eletroduto como apresentado nesta seção, é importante adotar medidas adicionais de proteção contra possíveis danos a seres vivos decorrentes das tensões de toque. A instalação de barreiras físicas ou sinalização de alerta é essencial para reduzir a probabilidade de contato com os condutores de descida e minimizar o risco de acidentes. Essas medidas de proteção devem ser implementadas juntamente com a instalação do SPDA, visando à segurança das pessoas e animais que frequentam ou transitam nas proximidades da estrutura protegida.

### ***3.7.3 Configuração da inspeção em caixa tipo solo (enterrada)***

Caixas de inspeção são usadas em sistemas de SPDA para permitir o acesso aos pontos de conexão e emendas do sistema de aterramento. As caixas de inspeção enterradas são preferíveis por oferecerem maior segurança contra intempéries e outros fatores ambientais que possam afetar a integridade do sistema. Além disso, são mais esteticamente discretas e não interferem visualmente no ambiente.

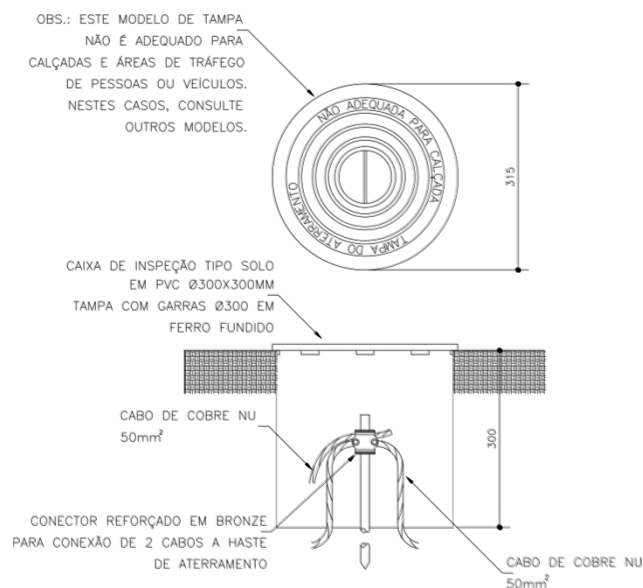
A escolha da caixa de inspeção de Ø300 x 300 mm baseou-se tanto em critérios comerciais quanto técnicos, e com base nas informações contidas na seção de elementos de aterramento e equipotencialização do catálogo de produtos SPDA - MPS da Termotécnica Para-Raios (2022). É importante salientar que este modelo de caixa é amplamente utilizado no mercado devido à sua disponibilidade e baixo custo em relação a outros tamanhos. Vale ressaltar também que a caixa de inspeção enterrada escolhida tem formato circular. (TERMOTÉCNICA PÁRA-RAIOS, 2022).

Além disso, do ponto de vista técnico, essa caixa atende aos requisitos de espaço interno suficiente para instalação de equipamentos de proteção contra surtos elétricos e de conexões de cabos de aterramento, além de possuir dimensões que facilitam a instalação em áreas limitadas e o acesso para a conexão durante as inspeções.

Conexões devem ser feitas de forma segura e por meio de solda elétrica ou exotérmica e conexões mecânicas de pressão (se embutidas em caixas de inspeção) ou compressão.

A Figura 18 dispõe da representação esquemática da caixa de inspeção tipo solo.

Figura 18 - Detalhe de instalação de caixa de inspeção tipo solo



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

Conforme estabelecido na Parte 3 da ABNT NBR 5419 (ABNT, 2015c), é obrigatório instalar caixas de inspeção sempre que houver conexões mecânicas no subsistema de aterramento. Ou seja, quando existirem no nível do solo conectores com elementos desmontáveis, como parafusos e/ou porcas, eles deverão ficar dentro de uma caixa para permitir sua inspeção. Essa informação pode ser encontrada no item 5.5.3 da norma, que é o único trecho a tratar deste assunto.

Cada um dos quatro vértices da estrutura possui uma haste de aterramento conectada ao anel correspondente. Consequentemente, as descidas provenientes de cada vértice são conectadas às respectivas hastas de aterramento, enquanto as outras seis descidas são conectadas diretamente ao anel de aterramento, totalizando dez descidas e consequentemente dez caixas de inspeção enterradas.

De acordo com a norma brasileira (ABNT, 2015b), a conexão do cabo de cobre nu com a haste de aterramento deve ser realizada de forma segura, a fim de garantir a eficácia do SPDA. Para isso, a norma recomenda que a conexão seja feita por meio de solda elétrica ou exotérmica. Esses métodos garantem uma conexão permanente e de baixa resistência elétrica, o que é essencial para a adequada dissipação da corrente de um raio. Para a completa realização do projeto, é imprescindível que sejam feitas quatro conexões através da técnica de solda exotérmica, sendo que cada uma dessas conexões deverá ser executada em uma das quatro caixas de inspeção que foram previstas no projeto.

A relação de componentes e suas especificações para o sistema de inspeção estão expressos na Tabela 35.

Tabela 35 - Configuração da caixa de inspeção tipo solo

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Solta exotérmica 150 GR	-	10
Caixa de inspeção padrão SPDA tipo solo em PVC	Ø300 x 300 mm	10

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A inspeção dentro da caixa de inspeção enterrada deve ser realizada periodicamente para verificar o estado dos componentes e garantir o funcionamento adequado do sistema de SPDA. Durante a inspeção, é necessário verificar a integridade das hastes de aterramento, conexões e cabos, bem como avaliar a condição física da caixa de inspeção.

No entanto, segundo a norma brasileira (ABNT, 2015b), para a caixa de inspeção enterrada, não é necessário o uso de conectores bimetálicos, pois a própria caixa funciona como um elemento condutor de aterramento. O uso de conectores bimetálicos é mais comum em conexões entre diferentes metais, como alumínio e cobre, por exemplo, a fim de evitar a corrosão galvânica.

#### ***3.7.4 Comparação entre resultados do método Faraday aplicado por Kafer para unidade fabril e método Faraday para estudo de caso do museu***

A Tabela 36 foi elaborada levando em consideração as características do método Faraday aplicado tanto na unidade fabril quanto no museu. Nesta tabela, são apresentadas informações detalhadas sobre os materiais utilizados, o dimensionamento e a quantidade necessária para os subsistemas de captação, descidas e inspeção. Dessa forma, é possível ter uma visão abrangente dos elementos essenciais empregados em ambos os projetos, permitindo uma comparação precisa entre os modelos aplicados nas diferentes estruturas.

Tabela 36 - Características do método Faraday aplicado na unidade fabril e no museu

	<b>Unidade Fabril</b>			<b>Museu</b>		
	<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Qtde</b>	<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Qtde</b>
Captação	Barra chata de alumínio	70 mm <sup>2</sup> x 3 m	52	Barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 3 m	54

	Captor em aço galvanizado	300 mm x 10 mm	14	Mini captorees em barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 300 mm	15
Descida	Barra chata de alumínio	70 mm <sup>2</sup> x 3 m	22	Barra chata de alumínio	7/8" x 1/8" x 3 m	26
Inspeção	Caixa de inspeção suspensa	-	7	Caixa de inspeção tipo solo	-	10

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Além das análises já mencionadas, é importante observar que a alteração na classe do SPDA (e do NP) também impactou o espaçamento máximo entre os condutores da malha, o que consequentemente influenciou a quantidade de anéis retangulares no sistema captor. Na unidade fabril, o espaçamento máximo dos anéis retangulares foi de 15 metros de comprimento por 6,9 metros de largura. Já no museu, a malha foi projetada com sete anéis retangulares, cada um medindo 7,8 metros de comprimento por 6,975 metros de largura. Essa diferença resultou em um aumento sutil na quantidade de barras chata de alumínio utilizadas no sistema captor do museu, com um acréscimo de apenas duas unidades.

Outra alteração foi observada na quantidade de mini captorees. Como o número de anéis retangulares aumentou no museu, houve uma pequena variação na quantidade de mini captorees, com um acréscimo de apenas uma unidade.

Além disso, é relevante ressaltar que, como mencionado anteriormente, foram projetadas 10 descidas para o subsistema de descida no museu, enquanto na unidade fabril foram projetadas apenas 7. Essa diferença resultou em um aumento de quatro unidades na quantidade de barras chata de alumínio utilizadas nas descidas do museu.

Quanto à inspeção, devido ao maior número de descidas no museu, foram instaladas 10 caixas de inspeção enterradas, enquanto na unidade fabril foram utilizadas apenas 7, todas suspensas.

Essas análises adicionais demonstram que, apesar das semelhanças entre os sistemas captor e de descidas, há algumas diferenças sutis em relação à quantidade de materiais utilizados nos dois projetos, principalmente devido às especificidades e necessidades de cada estrutura.

### **3.8 Método Eletrogeométrico ou Esfera Rolante (híbrido)**

#### **3.8.1 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação**

Por meio do método Eletrogeométrico ou Esfera Rolante (híbrido), projetou-se a o subsistema de captação. A vista superior da estrutura é exibida no APÊNDICE F - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Eletrogeométrico (vista superior)** deste documento.

O latão cromado é um tipo de material composto principalmente por cobre e zinco, com a adição de cromo para melhorar suas propriedades de resistência à corrosão e durabilidade. É frequentemente utilizado em aplicações que requerem resistência a ambientes agressivos, como em SPDA.

Consoante a isso, de acordo com a Tabela 5 – Materiais para SPDA e condições de utilização da ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), a aplicação de materiais condutores em cobre é permitida ao ar livre.

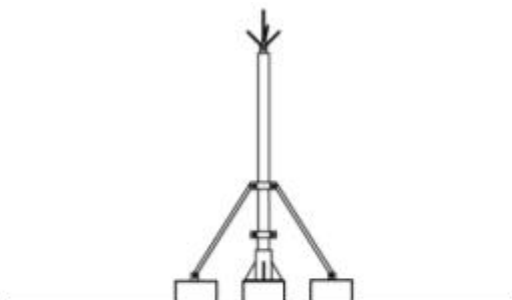
A determinação da altura do mastro para um SPDA de Classe II segue as orientações da norma brasileira regente (ABNT, 2015), que estabelece uma altura mínima de 2,5 metros acima do ponto mais alto da edificação. No entanto, em casos específicos, é possível que o projeto da estrutura exija uma altura diferente, que deve ser avaliada e definida de acordo com as necessidades da PDA.

De acordo com informações técnicas disponibilizadas pela empresa Termotécnica Para-raios (2022), um dos principais fornecedores do mercado de SPDA, constata-se que dentre os diferentes tamanhos de mastros disponíveis, o modelo com 3 metros de altura é um dos mais comercializados e amplamente utilizados pelos clientes. Isso se deve, em grande parte, à sua versatilidade de aplicação em diferentes tipos de edificações, bem como ao fato de ser um tamanho considerado padrão por muitos fornecedores e fabricantes do setor. Além disso, seu comprimento pode ser suficiente para atender às necessidades de muitos projetos de SPDA de diferentes classes, o que o torna uma escolha viável e conveniente para muitos clientes em potencial.

Com base nas informações apresentadas anteriormente e nas necessidades específicas do projeto para o museu em questão, foi definido que a opção mais adequada seria a utilização de quatro mastros com altura de 3 m cada, com uma estrutura de 3m de comprimento e diâmetro do mastro de 2” (3mx Ø2”), conforme Figura 19. Esses mastros serão instalados em pontos estratégicos definidos e fixados de forma segura e estável. Tal escolha foi

feita levando em consideração não apenas a disponibilidade de mastros no mercado, mas também as exigências e normas técnicas para a instalação de um SPDA eficiente e seguro para a edificação em questão.

Figura 19- Especificação de mastros com 1 conjunto de estais



ALTURA DO MASTRO	3 METROS	3 METROS	4 METROS	4 METROS	4 METROS
MASTRO	Tel 460	Tel 470	Tel 464	Tel 474	Tel 472
TIPO	Simplex em aço g.f.	Simplex em aço g.f.	Simplex em aço g.f.	Simplex em aço g.f.	Telescópico em aço g.f.
ESTRUTURA	3m x Ø 1.1/2"	3m x Ø 2"	4m x Ø 1.1/2"	4m x Ø 2"	3m x Ø 2" + 1m x Ø 1.1/2"
Componentes adicionais necessários (adquiridos separadamente)					
CONJUNTO DE ESTAIS RÍGIDOS	Tel 442 Ø 1.1/2" x 0,5m	Tel 452 Ø 2" x 0,5m	Tel 444 Ø 1.1/2" x 1,0m	Tel 454 Ø 2" x 1,0m	Tel 454 Ø 2" x 1,0m
BASE	Tel 065 Ø 1.1/2"	Tel 075 Ø 2"	Tel 065 Ø 1.1/2"	Tel 075 Ø 2"	Tel 075 Ø 2"
FIXADORES SUGERIDOS	10 x parafusos inox Tel 5346 10 x arruelas inox Tel 5303 10 x buchas nylon Tel 5308				
ABRACADEIRA DE ATERRAMENTO SEM CONECTOR	Tel 807	Tel 808	Tel 807	Tel 808	Tel 808
Os conectores para conexão do mastro devem ser adquiridos separadamente conforme projeto					
CAPTOR FRANKLIN (modelo sugerido)	Tel 010				

Fonte: Extraído de Termotécnica Para-raios (2022). Disponível em <https://tel.com.br/produto/mastros-simples-com-reducao-para-34/>.

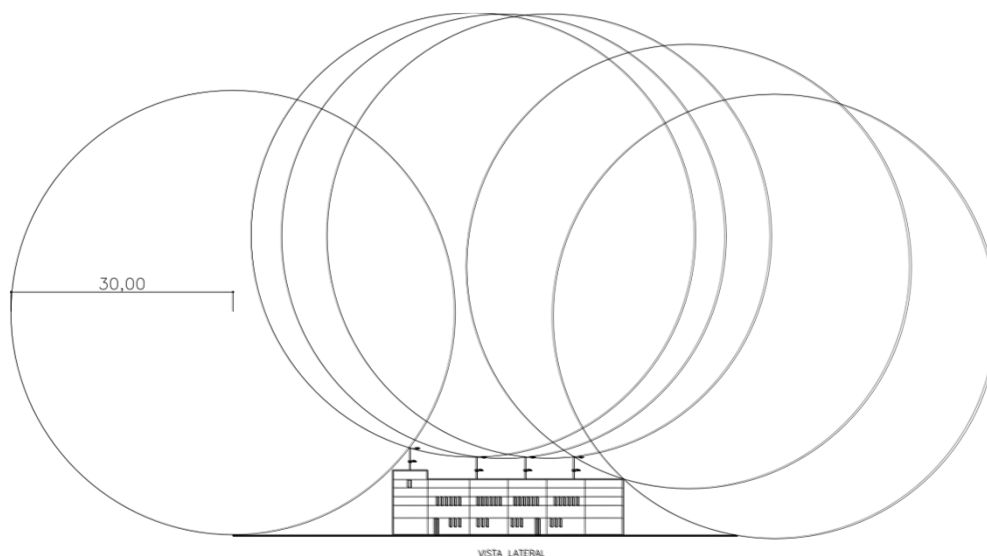
Seguindo os preceitos da ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), foi escolhido o captor Franklin de latão cromado para 2 descidas, considerando as informações disponibilizadas na seção de Elementos de Captação do Catálogo de Produtos SPDA - MPS da Termotécnica Para-Raios (2022). Além disso, a escolha de um captor com duas descidas

fornece um nível adicional de proteção para a edificação, aumentando a eficiência do sistema de SPDA. Cada mastro do SPDA requer a instalação de um captor Franklin, o que totaliza quatro captosres para este projeto.

Para fixar e sustentar o mastro no SPDA, foi utilizado um conjunto de elementos estruturais conhecidos como estais de dimensões de  $\text{Ø}2'' \times 0,5 \text{ m}$ , conforme Figura 19. Eles são projetados para suportar as cargas de vento e de peso do mastro, garantindo a sua estabilidade e segurança. Geralmente, os estais são constituídos por cabos de aço galvanizado, que são presos ao mastro e à estrutura do prédio por meio de dispositivos de fixação, como porcas e parafusos. Para cada um dos mastros são necessários dois estais, totalizando oito unidades para este projeto

Inicialmente, um mastro foi fixado na parte mais alta do museu (área inferior esquerda, na vista superior do Apêndice E), enquanto os outros três restantes foram deixados ao centro. A convergência do método para determinar a solução mais adequada para o projeto em questão é obtida pela consideração de um número inicial predeterminado de mastros e aplicação do método para averiguação da proteção proporcionada à edificação. Caso existam pontos desprovidos de proteção após rolar a esfera sobre o perímetro superior da edificação, deve-se incluir mais unidades de mastros e simular novamente o método da esfera rolante até obter a proteção necessária. Para um SPDA Classe II, o raio da esfera é de 30 metros, conforme apresentado pela Tabela 20 do item 2.2.1 deste trabalho. Com o intuito de melhor elucidar o procedimento do método e o valor do raio da esfera, a Figura 20 evidencia uma etapa na qual foram movidos os círculos ao longo do perímetro externo superior da edificação, alcançando simultaneamente dois pontos da edificação.

Figura 20 - Medida do raio da esfera



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Por meio da Figura 20, é possível perceber que a linha da circunferência toca os vértices superiores da vista lateral (esquerda e direita) da estrutura. Diante deste problema, é necessário adicionar mais mastros ou buscar outras soluções. Contudo, a opção de adicionar mais mastros de captação nos extremos do museu não é viável, tendo em vista que isso poderia prejudicar a estética da edificação, por alteração da fachada, o que não é desejável e apropriado. É de extrema importância buscar outra aplicação do método da Esfera Rolante no dimensionamento do SPDA.

De acordo com o item 5.2.1 Geral da norma ABNT NBR 5419-3 (2015), Seção 5, os subsistemas de captação podem ser compostos por qualquer combinação de hastes (incluindo mastros), condutores suspensos e condutores em malha. Dessa forma, optou-se por instalar condutores de cobre guiados por meio de suportes-guia com roldana nas extremidades da platibanda e no telhado, evitando-se assim a alteração e interferência na fachada da edificação.

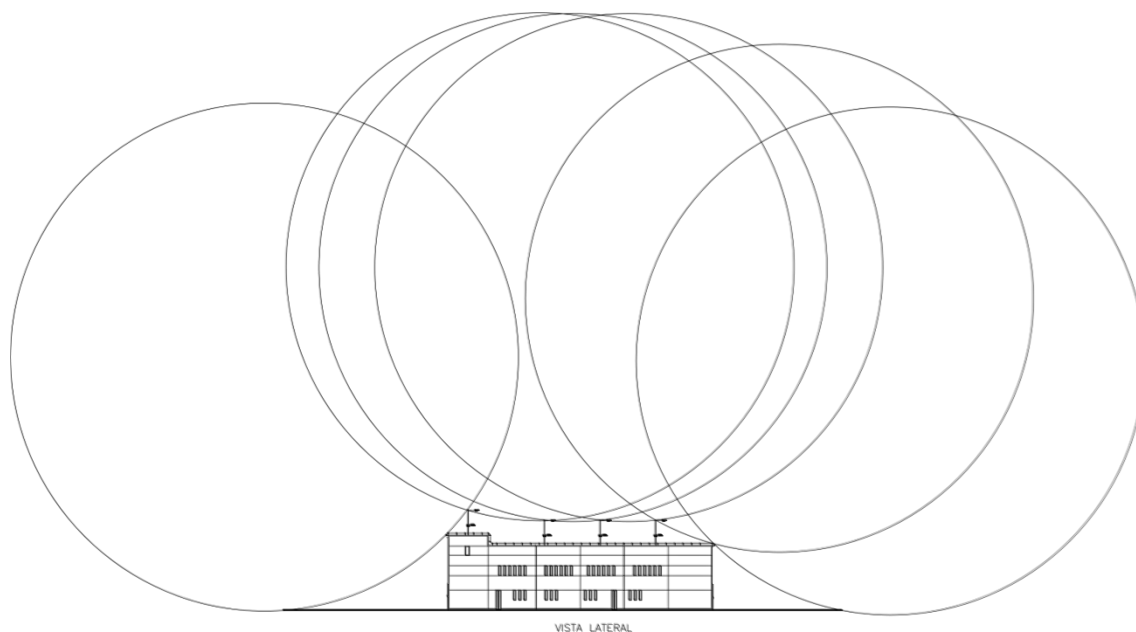
De acordo com a Tabela 6 – Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes da norma (ABNT, 2015), o cobre, na configuração arredondado maciço, deve possuir área de seção mínima de  $35 \text{ mm}^2$  e diâmetro de 6 mm.

O cabo de cobre arredondado maciço disponível comercialmente que atende aos requisitos mínimos da norma está disponível no site da Termotécnica Pára-raios (2023) com a descrição seção de  $35 \text{ mm}^2$  sendo composto por 7 fios com seção de 2,50 mm e diâmetro de 7,5 mm (7 fios x 2,50 mm x  $\varnothing 7,5$  mm), sendo vendido por metro. É importante destacar que, de

acordo com o item 4.1 Classe do SPDA da ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), Seção 4, os materiais, configuração e dimensões mínimas para captos, descidas e eletrodos de aterramento são fatores independentes da Classe do SPDA. Vale ressaltar que cabos encordados são mais comuns em aplicações de SPDA, pois apresentam maior flexibilidade e resistência à fadiga, além de serem mais fáceis de manusear e instalar. Cabos maciços, por sua vez, são mais indicados em aplicações que exigem maior resistência mecânica e à corrosão.

O perímetro total da área superior é de 142 m ( $99,22+41,85=141,07$  m) exigindo esta mesma quantidade de cabo de cobre encordado maciço. A Figura 21 evidencia a instalação e aplicação da circunferência novamente após a inclusão do cabo de cobre encordado conforme descrito anteriormente.

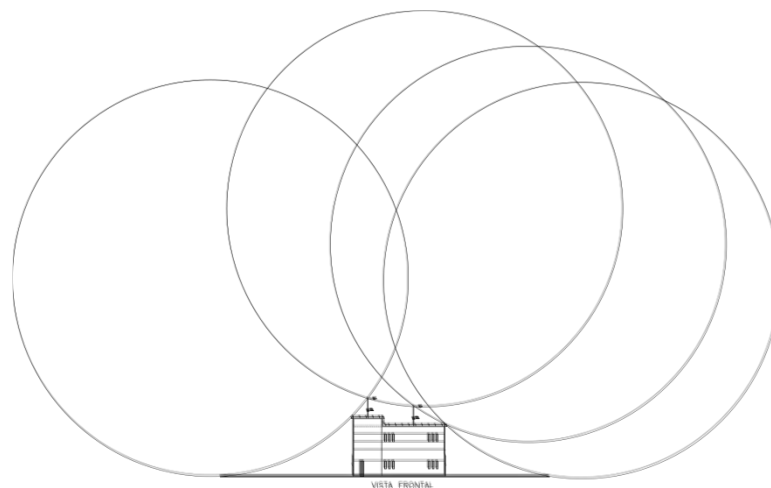
Figura 21 - Segundo procedimento para testagem da proteção por Esfera Rolante utilizando mastros pela lateral



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A Figura 22 apresenta, também, a aplicação do método da Esfera Rolante em vista frontal da estrutura.

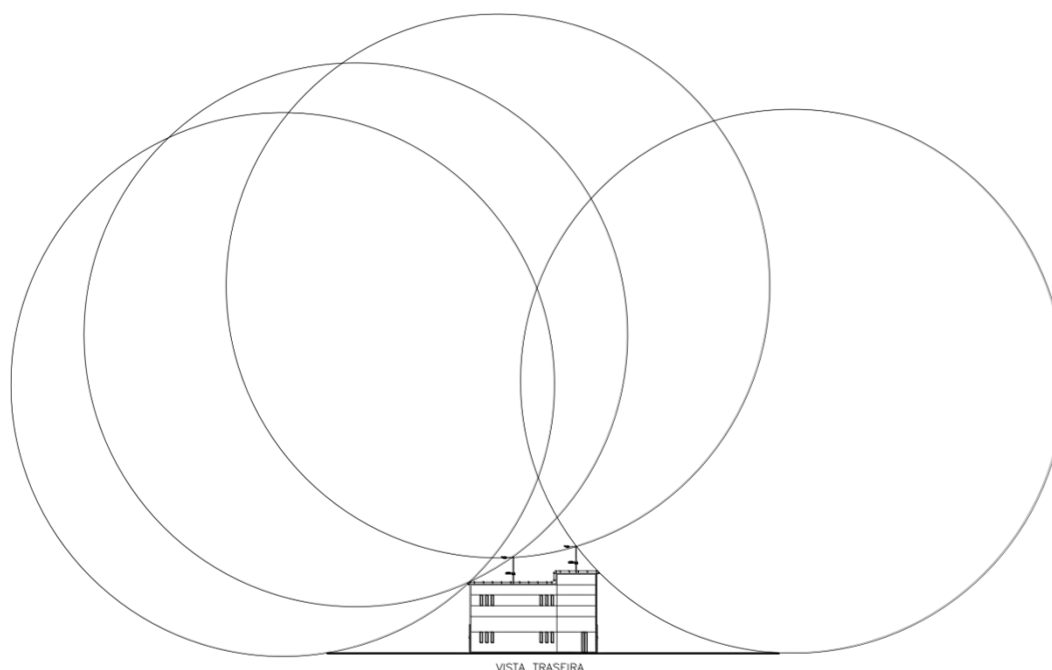
Figura 22 - Terceiro procedimento para testagem da proteção por Esfera Rolante utilizando mastros pela frente



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Posteriormente, a Figura 23 apresenta a aplicação do método da Esfera Rolante na vista traseira da estrutura.

Figura 23 - Quarto procedimento para testagem da proteção por Esfera Rolante utilizando mastros pela vista posterior da edificação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Através da Figura 21, Figura 22 e Figura 23, é possível observar que a solução teve o resultado desejado, pois nenhuma parte da circunferência alcançou as extremidades da estrutura, também conforme visto de forma aproximada através da Figura 24 – Verificação de proximidade entre o método Esfera Rolante.

Figura 24 – Verificação de proximidade entre o método Esfera Rolante



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Neste sentido, o subsistema de captação em mastros com captadores Franklin será conectado aos condutores de cobre no conduzidos por suportes-guia, utilizando abraçadeira-

guia simples de duas descidas de diâmetro igual a 2" ( $\varnothing 2$ "), que é um componente utilizado em SPDA para fixar os mastros em sua posição vertical e evitar que se movam ou caiam devido a forças externas, como ventos fortes. Essa abraçadeira é fabricada em materiais resistentes, como o aço galvanizado, e é projetada para ajustar o cabo de cobre ao mastro, proporcionando uma fixação firme e segura. A abraçadeira-guia simples é uma opção econômica e eficiente para a fixação de mastros em SPDA. Isto porque, segundo informações disponibilizadas pelo Catálogo de Produtos da Termotécnica Pára-raios (2022), ela é feita de um material resistente e durável, como o aço galvanizado, o que a torna uma opção de baixo custo em comparação a outros tipos de fixação, como a soldagem ou a fixação por parafusos. Além disso, a abraçadeira-guia simples é fácil de instalar e pode ser usada em uma ampla variedade de diâmetros de mastros, o que a torna uma opção versátil e de rápida instalação. Ela também é resistente a intempéries e à corrosão, o que a torna uma opção durável e com baixa necessidade de manutenção. Outra vantagem da abraçadeira-guia simples é que ela oferece uma fixação segura para os mastros do SPDA, ajudando a evitar a instabilidade do sistema em caso de fortes ventos ou descargas atmosféricas. É necessário um suporte guia a cada metro. Como serão necessários aproximadamente 142 metros de cabo de cobre, serão necessários 142 suportes guia.

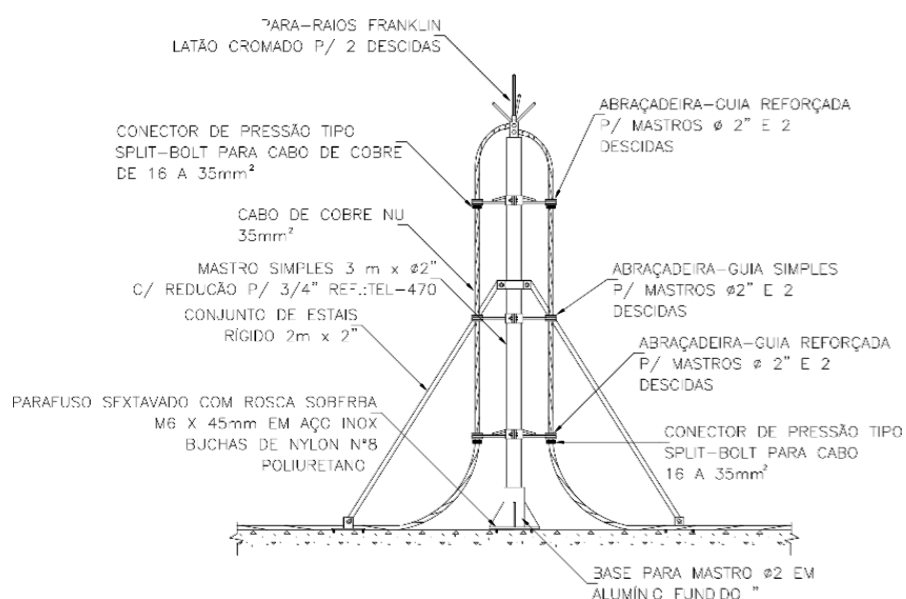
Para cada um dos quatro mastros, são necessárias três abraçadeiras-guia simples de  $\varnothing 2$ " para duas descidas, totalizando 12 unidades.

Para garantir a estabilidade e segurança do sistema de mastro, também é utilizado um suporte. Ele é responsável por fixá-lo, seja na alvenaria ou na telha metálica, proporcionando uma base sólida e resistente para o sistema de captação de descargas atmosféricas. Para este projeto, foi escolhida a base para mastro em alumínio fundido, de dimensão  $\varnothing 2$ ", conforme Figura 14. Em primeiro lugar, o alumínio fundido é um material resistente e durável, que é capaz de suportar cargas e impactos sem sofrer danos significativos. Além disso, o alumínio é um material leve, o que facilita a instalação e o manuseio da base para mastro. Outro fator importante é que o alumínio fundido possui boa resistência à corrosão e à oxidação, o que aumenta a vida útil da base para mastro e reduz a necessidade de manutenção. Para cada mastro é necessária uma base, sendo 4 unidades ao todo. Cada base requer quatro parafusos. Na alvenaria, são necessários 12 parafusos sextavados com especificações  $\varnothing M6 \times 45$  mm com 12 roscas soberba (três mastros), em que o "M6" refere-se à medida da rosca do parafuso, indicando que tem um diâmetro nominal de 6 milímetros. Já a especificação " $\times 45$  mm" indica o comprimento total do parafuso igual a 45 mm. Foram escolhidos parafusos sextavados como fixadores mecânicos pois são utilizados para ancorar objetos em paredes de alvenaria. Eles têm uma cabeça sextavada que é projetada para ser aparafusada com uma chave

sextavada correspondente. O parafuso tem uma rosca que é projetada para penetrar na alvenaria e fornecer uma fixação segura. Eles são geralmente feitos de aço carbono, aço inoxidável ou latão e podem ser galvanizados ou revestidos para aumentar a resistência à corrosão. Já na telha metálica, são necessários 4 rebites com especificações  $\text{Ø}1/4" \times 35 \text{ mm}$  (um mastro). Foi escolhido o rebite tipo pop em alumínio do tipo fixador pois é utilizado para fixar materiais como telhas metálicas, chapas, entre outros, de forma rápida e prática. Ele é composto por um corpo cilíndrico oco, uma haste mandril e uma cabeça. Ao ser instalado, a haste mandril é puxada para dentro do corpo cilíndrico, que expande e prende o material firmemente. O uso de rebites tipo pop em alumínio é comum na construção civil e em outras áreas que demandem fixação de materiais leves e resistentes (TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS, 2022).

A Figura 25 apresenta o diagrama esquemático do mastro com o captor Franklin a ser instalado na área do telhado.

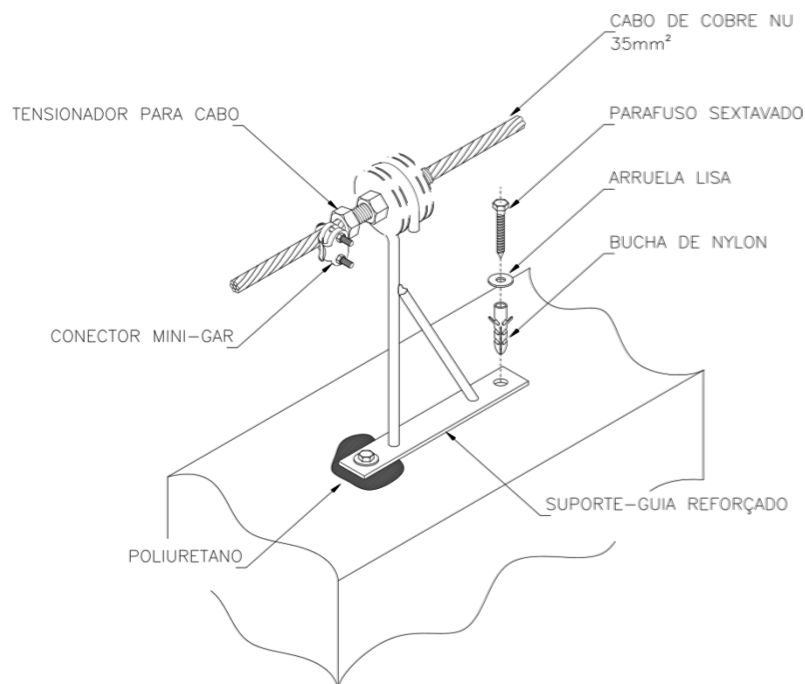
Figura 25 - Para-raios tipo Franklin em mastro de três metros simples com duas descidas



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

A Figura 26 evidencia o esquema para instalação do cabo de cobre nu conduzido pelos suportes-guia fixados na platibanda.

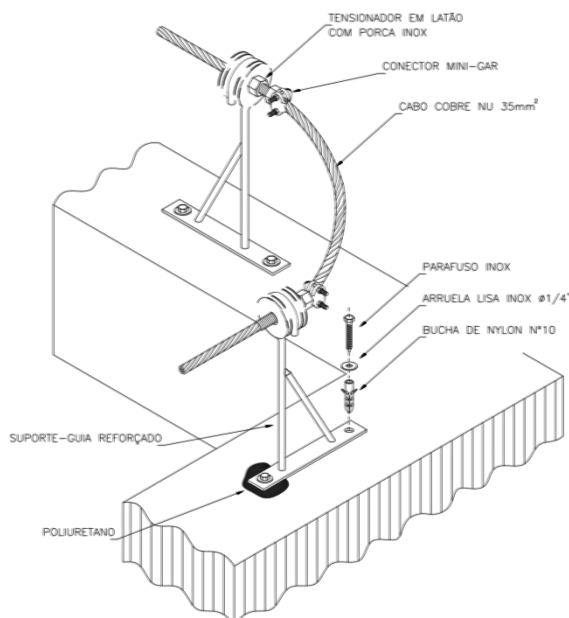
Figura 26 - Instalação de suporte-guia reforçado em alvenaria



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

A Figura 27 apresenta o diagrama do tensionamento do cabo de cobre nu nos cantos da estrutura.

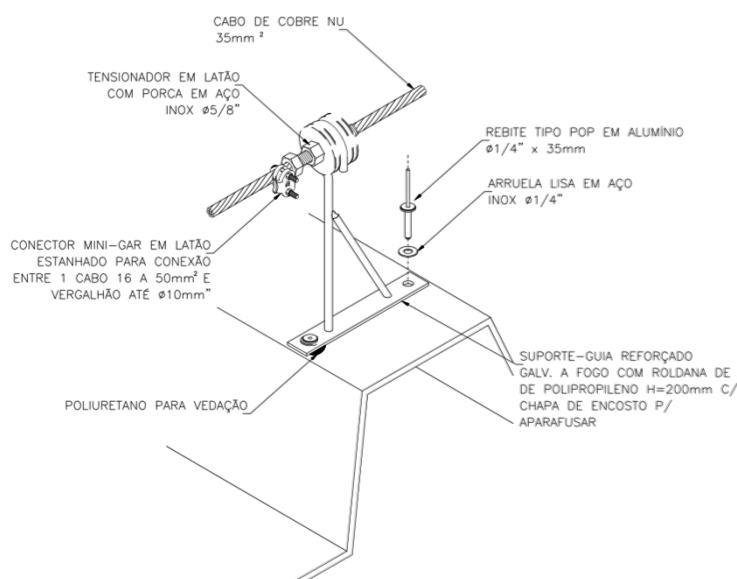
Figura 27 - Tensionamento dos cabos da captação com suporte-guia e tensionador em alvenaria



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

A Figura 28 apresenta um detalhe técnico da execução da instalação dos suportes-guia na telha de zinco.

Figura 28 - Esticamento do cabo de cobre na captação utilizando suporte-guia e tensionador na telha metálica



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

Informações sobre os diferentes materiais utilizados e as quantidades correspondentes de cada um deles estão disponíveis na Tabela 37.

Tabela 37 - Componentes básicos do subsistema de captação para o método Eletrogeométrico

Material	Dimensionamento	Quantidade
Mastro	3m x Ø2"	4
Captor Franklin latão cromado para 2 descidas		4
Estais	Ø2" x 0,5 m	8
Cabo de cobre arredondado maciço (m)	7 fios x 2,50 mm x Ø7,5 mm (35 mm <sup>2</sup> )	142
Abraçadeira simples de duas descidas	Ø2"	12
Suporte (base do mastro)	Ø2"	4
Parafuso sextavado (alvenaria)	ØM6 x 45 mm	12
Rosca soberba	ØM6 x 45 mm	12
Rebite (telha metálica)	Ø1/4 x 35 mm	4

---

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

---

### ***3.8.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida***

Conforme apresentado anteriormente, a norma estabelece que o espaçamento entre os condutores de descida diante de um SPDA Classe II deve ter 10 metros, sendo admitido até 20% acima ou abaixo do valor especificado. A configuração do subsistema de descida, tanto a vista lateral, quanto a frontal e traseira é exibida no APÊNDICE G - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista frontal)**, APÊNDICE H - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista traseira)**, e APÊNDICE I - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista lateral)**, respectivamente.

O perímetro total da área superior é de 99,22 m. Dividindo este valor por 10 metros, tem-se 9,922 m, sendo admitido até 20% acima ou abaixo, o que representa  $\pm 1,9984$  m. Para este projeto, inicialmente, foram projetadas oito descidas principais (haja vista que os limites inferior e superior são de 7,9936 m e 11,9904 m, respectivamente).

Assim, são necessárias quatro descidas nos cantos da edificação, e duas no centro de cada lateral (esquerda e direita), de modo a proporcionar uniformidade de instalação no telhado. A quantidade menor de descidas em relação ao método anterior é para justamente eliminar os condutores na vista traseira e frontal do museu.

Escolheu-se por aplicar cabos de cobre arredondado maciço iguais aos utilizadas no subsistema de captação, para as descidas, visando manter toda a metodologia já empregada.

Para instalar as oito descidas no museu, o comprimento total de cabo de cobre arredondado maciço a ser utilizado é de 61 metros ( $7,6 \text{ m} \times 8 = 60,8 \text{ m}$ ). Este comprimento total é o somatório de todas as alturas percorridas pelas descidas, considerando que o museu possui uma altura de 7,6 m.

Segundo a ABNT NBR 5419-3 (2015), é recomendado o uso de pelo menos duas presilhas de  $\text{Ø}5$  mm, dois parafusos de fenda em aço inox de  $\text{Ø} 1/4'' \times 3/4''$ , duas buchas de nylon nº6 de  $\text{Ø}7$  mm para fixar um cabo de cobre de  $35 \text{ mm}^2 - 7 \text{ Fios} \times \text{Ø} 2,50 \text{ mm}$  com comprimento de 1 m. Sendo assim, são necessárias 122 unidades de cada material para 61 m de cabo.

O uso de um fixador ômega em latão é vantajoso pois o latão é um material que apresenta boa resistência à corrosão e à oxidação, além de ter alta condutividade elétrica. Isso significa que ele é capaz de garantir uma boa conexão elétrica entre os cabos, evitando perdas de sinal e garantindo a eficiência do sistema. Além disso, o formato ômega do fixador permite uma fixação segura dos cabos, evitando que eles se soltem ou se desconectem com o tempo. Diante disso, para este projeto, foram necessários oito fixadores ômega em latão de Ø5 mm para cabos de cobre ou aço cobreado com seção de 35mm<sup>2</sup>, sendo instalado um em cada uma das oito descidas.

A relação de componentes e seus dimensionamentos são expressos pela Tabela 38.

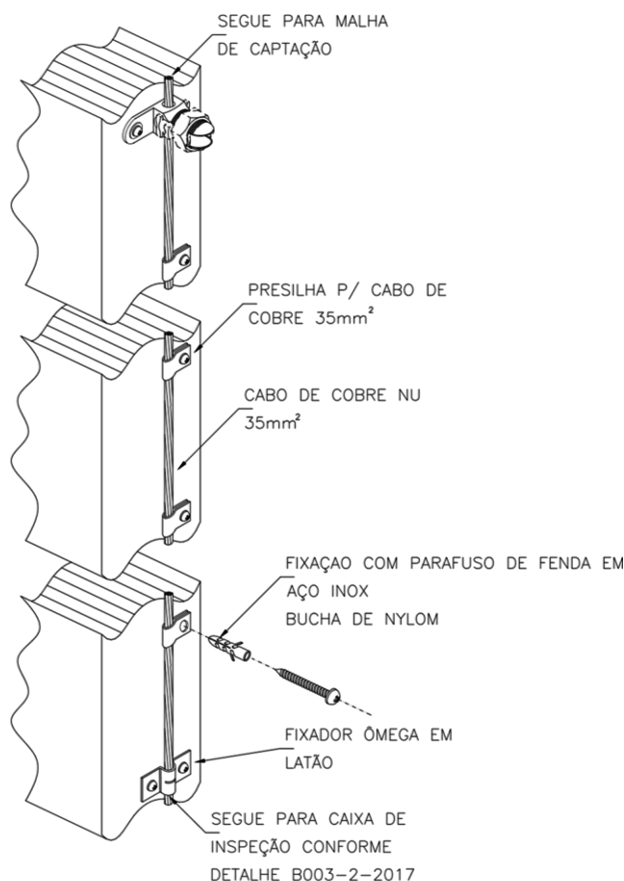
Tabela 38 - Componentes básicos do subsistema de descida para o método Esfera Rolante (híbrido)

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Cabo de cobre nu (m)	35 mm <sup>2</sup> - 7 Fios x Ø 2,50 mm	61
Presilha para cabo de cobre em latão	Ø5 mm	122
Parafuso de fenda em aço inox	Ø 1/4" x 3/4"	122
Bucha de nylon n°6	Ø7 mm	122
Fixador ômega em latão	Ø5 mm	8

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Conforme supracitado, os cabos são fixados por meio de presilhas, parafusos de fenda em aço inox e fixadores ômega em latão, conforme detalhe técnico da Figura 29.

Figura 29 - Detalhe da fixação do cabo de descida



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

Como pode ser visto através da Figura 29, o modelo de cabo de cobre nu não possui nenhum tipo de revestimento externo, cobertura ou isolamento, como fios encapados. No entanto, a descida do SPDA pode apresentar riscos para as pessoas que estão próximas, principalmente se não estiverem cientes da presença do sistema ou se não tomarem as devidas precauções. Os avisos visíveis de alerta, como placas de sinalização e faixas de segurança, ajudam a informar as pessoas sobre a presença do SPDA e a lembrá-las de tomar as medidas de segurança necessárias, conforme a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c).

### 3.8.3 Configuração da inspeção em caixa suspensa

A caixa de inspeção suspensa é um componente importante na descida do SPDA, pois permite uma inspeção mais fácil e segura do sistema, além de oferecer vantagens técnicas em relação a outros tipos de descidas.

Os condutores da descida do SPDA são responsáveis por conduzir a corrente elétrica gerada por uma descarga atmosférica para o solo, protegendo assim a estrutura contra

danos e minimizando o risco de incêndios e choques elétricos. Para garantir que os condutores estejam em boas condições elétricas e mecânicas, é necessário que haja uma continuidade elétrica adequada em todo o sistema.

A caixa de inspeção suspensa é projetada para garantir essa continuidade elétrica, pois ela funciona como um ponto de conexão entre os condutores da descida e o eletrodo de aterramento. A caixa é geralmente fabricada em material condutor, como o cobre, e é projetada para ter uma resistência elétrica muito baixa, o que ajuda a garantir que a corrente elétrica flua sem perdas significativas.

Além disso, a caixa de inspeção suspensa também é equipada com dispositivos de conexão, como bornes e grampos de fixação, que garantem uma conexão mecânica firme e segura entre os condutores e o eletrodo de aterramento. Isso é importante porque a conexão mecânica inadequada pode levar a problemas de continuidade elétrica e, conseqüentemente, a uma redução da eficácia do SPDA. (TERMOTÉCNICA PÁRA-RAIOS, 2022)

Uma outra vantagem da caixa de inspeção suspensa é que ela permite uma inspeção mais fácil e segura do sistema. A caixa é geralmente localizada em um ponto de fácil acesso, o que facilita o trabalho de manutenção e reparo do sistema. Somado a isso, a caixa de inspeção suspensa oferece proteção contra danos físicos e ambientais, como impacto de objetos e exposição à umidade. Mais ainda, a caixa de inspeção suspensa é uma opção mais econômica em termos de espaço e material. Como a caixa é suspensa acima do solo, ela ocupa menos espaço do que uma descida enterrada, o que é uma vantagem em áreas urbanas com espaço limitado.

De acordo com o item 5.5.3 Conexões da norma brasileira (ABNT, 2015), Seção 5, as conexões dos cabos de descida devem ser realizadas de forma segura, utilizando técnicas de solda elétrica ou exotérmica e conexões mecânicas de pressão, que podem ser embutidas em caixas de inspeção ou realizadas por meio de compressão. É importante ressaltar que emendas nos cabos de descida não são permitidas, exceto no caso do conector para ensaios, que é obrigatório e deve ser instalado próximo ao solo, a uma altura sugerida de 1,5 m a partir do piso, a fim de permitir fácil acesso para a realização de ensaios.

Seguindo as disposições da norma ABNT NBR 5419-3 (2015c), é preciso levar em consideração as características específicas do projeto para determinar a quantidade e a localização das caixas de inspeção no sistema de descida do SPDA. É recomendável que haja pelo menos uma caixa de inspeção a cada 20 metros de comprimento dos condutores da descida ou em pontos estratégicos da estrutura onde há mudança na direção ou inclinação dos condutores.

No caso em questão, foi instalada uma caixa de inspeção suspensa em cada um dos quatro cantos da edificação, com dimensões de 123 x 158 x 87 mm com dois bocais de Ø1" para conexão com o eletroduto de Ø1", atendendo às diretrizes da norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015). Para cada caixa de inspeção suspensa, são necessários dois eletrodutos de Ø1" x 1 m, um na parte superior e outro na parte inferior, ambos utilizados para isolação dos condutores, totalizando oito unidades. O duto deve ser afixado na alvenaria da edificação por abraçadeiras tipo D com cunha de Ø1", sendo utilizados dois pares por cada unidade de duto, totalizando em 16 unidades. A escolha de abraçadeiras tipo D de Ø1" para a fixação do duto em alvenaria pode ser justificada por sua capacidade de fixação segura e resistência a intempéries, mesmo em superfícies não planas, garantindo a durabilidade e segurança da fixação ao longo do tempo, promovendo uma vida útil longa. Essa disposição permite a facilitação da inspeção e manutenção do sistema, bem como assegura a conexão segura e eficiente dos condutores da descida do SPDA (TERMOTÉCNICA PÁRA-RAIOS, 2022).

Para este projeto, foram utilizadas caixas de inspeção suspensa fabricadas em polipropileno com anti-UV e anti-chama, pois apresentam uma série de vantagens técnicas. O polipropileno é um material resistente, durável e leve, além de ser um isolante elétrico. A presença de aditivos anti-UV e anti-chama garante que a caixa de inspeção possa ser exposta a condições adversas de clima e temperatura, sem que haja riscos de degradação do material ou propagação de fogo em caso de incêndio (TERMOTÉCNICA PÁRA-RAIOS, 2022).

A fabricação da caixa de inspeção suspensa em polipropileno com anti-UV e anti-chama garante ainda mais segurança e eficiência no SPDA. Isso porque o polipropileno, por ser um isolante elétrico, não interfere na continuidade elétrica dos condutores do SPDA, garantindo que não haja falhas ou interrupções no sistema de aterramento.

Com exceção dos casos em que são previstos centelhadores para equipotencialização de estruturas energizadas, todos os demais componentes de um SPDA devem possuir continuidade elétrica entre si. No SPDA externo, é relativamente fácil verificar visualmente essas falhas, uma vez que a maioria dos componentes estão fixados fora da edificação.

A norma brasileira (ABNT, 2015c) estabelece que os elementos que compõem o SPDA devem ser conectados eletricamente de modo a assegurar e permitir a medição e a verificação da continuidade elétrica de todo o subsistema. A conexão elétrica dos subsistemas de descida e de aterramento é feita através de conectores de medição bimetálicos em liga de alumínio com dois parafusos para cabos de 16 até 70 mm<sup>2</sup>, instalados dentro das caixas de medição suspensas. É necessário um conector bimetálico por caixa, totalizando quatro unidades.

É importante ressaltar que o uso de conectores bimetálicos é mais comum em conexões entre diferentes metais, como alumínio e cobre, por exemplo, a fim de evitar a corrosão galvânica. (ABNT, 2015)

A relação de componente e seu dimensionamento é expressa pela Tabela 39.

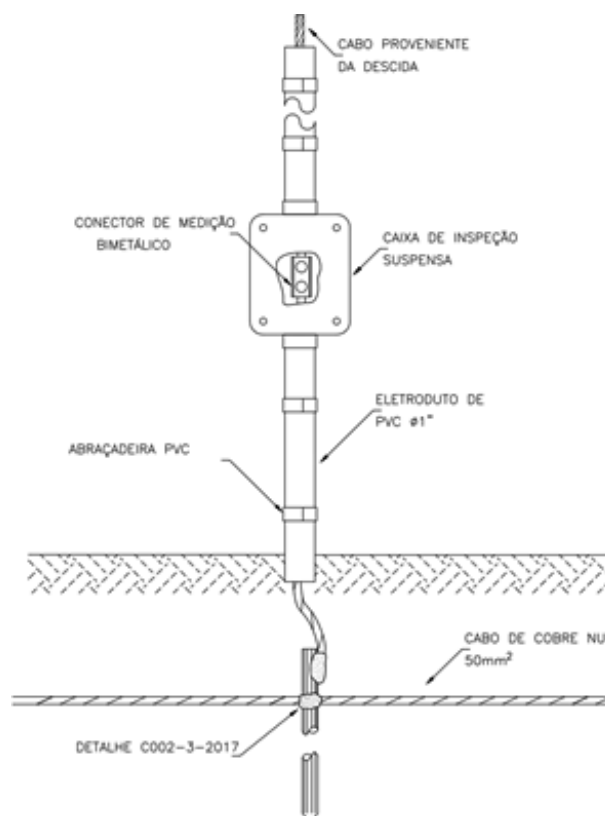
Tabela 39 - Configuração da caixa de inspeção tipo suspensa

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Caixa de inspeção suspensa de poliamida	123 x 158 x 87 mm bocal Ø 1"	4
Conector de medição bimetálico	Em liga de Alumínio com 2 Parafusos – Para Cabos 16-70mm <sup>2</sup>	4
Abraçadeira tipo D com cunha	Ø1"	16
Eletroduto de PVC (m)	Ø1" x 1 m	8

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Um metro e meio acima do solo devem ser instaladas caixas de inspeção, conforme Figura 30.

Figura 30 - Detalhe de junção entre descida e aterramento



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

O cabo de cobre nu, de acordo com o item 5.5.3 Conexões, da ABNT NBR 5419-3 (2015), Seção 5, deve estar conectado ao sistema de aterramento por meio de solda elétrica ou exotérmica. A saída da caixa de inspeção deve estar acoplada a um eletroduto de PVC de Ø1”, que acompanha o condutor até o solo.

### 3.9 Método de Franklin (híbrido)

#### 3.9.1 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação

Por emprego do método de Franklin (híbrido), foi projetada a distribuição espacial dos condutores do subsistema de captação. A vista superior da estrutura contendo os detalhes técnicos do subsistema de captação obtido por emprego do Método de Franklin está exibida no APÊNDICE J - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Franklin (vista superior)** deste documento.

O princípio de funcionamento do captor Franklin é baseado no fato de que as pontas dos objetos metálicos concentram as cargas elétricas em sua superfície, criando um campo elétrico intenso que favorece a formação de um canal de descarga elétrica em direção à haste, evitando descargas à estrutura que se deseja proteger.

O método de proteção Franklin para SPDA requer a instalação de mastros para os captadores Franklin, que são os principais elementos de captação de raios. Em consonância com a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), esses mastros devem ser de uma altura que permita que o captador fique a uma distância mínima de 2,5 m em relação à superfície mais alta da edificação ou estrutura a ser protegida. Essa distância é importante porque evita que o raio atinja diretamente a estrutura protegida, que poderia causar danos materiais e riscos à segurança das pessoas.

Além disso, a altura do mastro também é importante para garantir a eficácia do sistema de proteção. Isso porque a altura do captador Franklin influencia diretamente a área protegida pelo sistema. Quanto mais alto o captador, maior será a área de PDA. Portanto, a escolha da altura do mastro deve levar em consideração a altura da edificação ou estrutura a ser protegida, bem como a área que se deseja proteger. Em geral, quanto mais alta a edificação, maior deve ser a altura do mastro para garantir uma proteção adequada, de acordo com a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015).

Tomando por base o conteúdo da norma brasileira e através de consulta a empresas fornecedoras de produtos para projeto de SPDAs alturas de mastros disponíveis comercialmente podem variar de acordo com o fabricante e a região, mas os valores mais comuns de altura são de 2, 3, 4, 5 e 6 m.

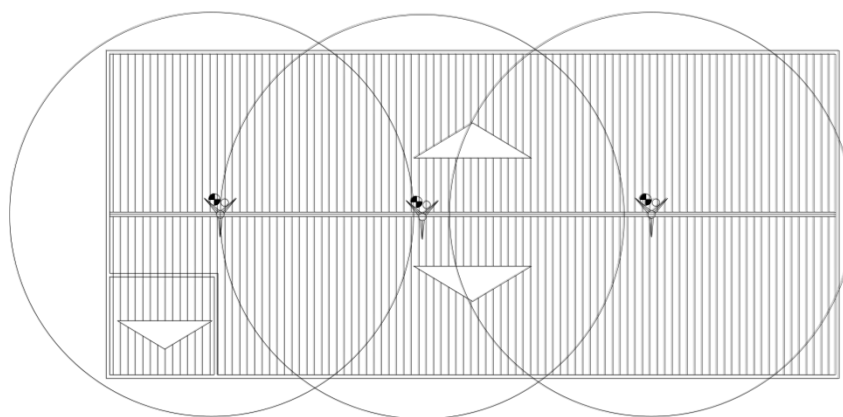
O volume de proteção provido por um mastro é definido pela forma de um cone circular cujo vértice está posicionado no eixo do mastro determinando o ângulo de proteção  $\alpha$ , cujo valor é dependente da Classe do SPDA, como mostrado na Tabela 20. Para este projeto, cuja SPDA tem Classe II, optou-se por utilizar mastros com 4 m de altura. Com estes dois critérios (Classe II e altura de 4 m), verificou-se que o valor do ângulo de proteção é de aproximadamente  $65^\circ$ , conforme gráfico da Figura 4, em que  $h$  é o valor da altura do mastro escolhido, expressa em metros, A Equação (11) fornece o raio da região a ser protegida:

$$r = h \times \tan\left(\frac{\pi}{180^\circ} \times \emptyset\right) \quad (11)$$

em que  $h$  é a altura do mastro e  $\emptyset$  é o ângulo de proteção. Portanto, para o projeto em questão o valor de  $r$  é de 8,6 m. Com este valor de raio, são feitas as projeções das circunferências de raio  $r = 8,60$  m (base do cone) sobre o telhado, buscando protegê-lo em sua totalidade, sendo o mastro traçado ao centro da circunferência. Para uma primeira tentativa, três captadores foram distribuídos ao longo do telhado, visando a maior proteção possível, evitando

deixar áreas desprotegidas. A Figura 31 apresenta o primeiro procedimento de teste com os mastros.

Figura 31 - Primeiro procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior

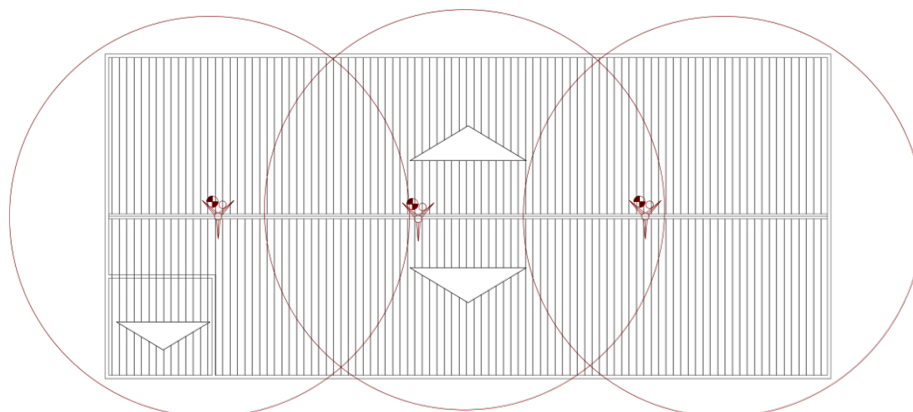


Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Por meio da Figura 31, é possível perceber que existem áreas que não foram cobertas pelas circunferências. Sendo assim, o procedimento requer uma melhor distribuição dos mastros e uma nova etapa de verificação.

A Figura 32 ilustra o segundo procedimento adotado no projeto. Para assegurar uma proteção eficaz para toda a área do telhado, foi necessário ajustar o espaçamento entre os mastros, aumentando o afastamento entre eles. Dessa forma, foi possível abranger uma área maior.

Figura 32 - Segundo procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior

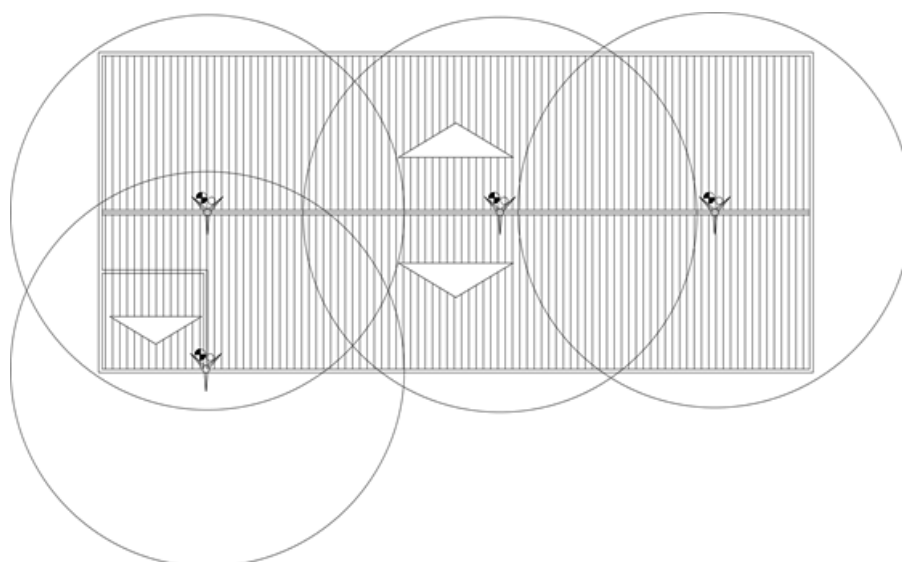


Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Na Figura 32 do projeto, é apresentado o segundo procedimento que foi realizado para cobrir a área do telhado com PDA. Nesse procedimento, o espaçamento entre os mastros foi ajustado para um afastamento maior, a fim de prover proteção para toda a área do telhado.

Porém, ainda existiam pequenas áreas que não foram cobertas pela região formada pelas circunferências dos mastros. Por isso, um terceiro teste precisou ser realizado. Na Figura 33, é apresentado o resultado da terceira tentativa, onde foi incluído um quarto mastro na extremidade para alterar a distribuição do conjunto e, assim, cobrir todas as áreas que antes não estavam protegidas.

Figura 33 - Terceiro procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior

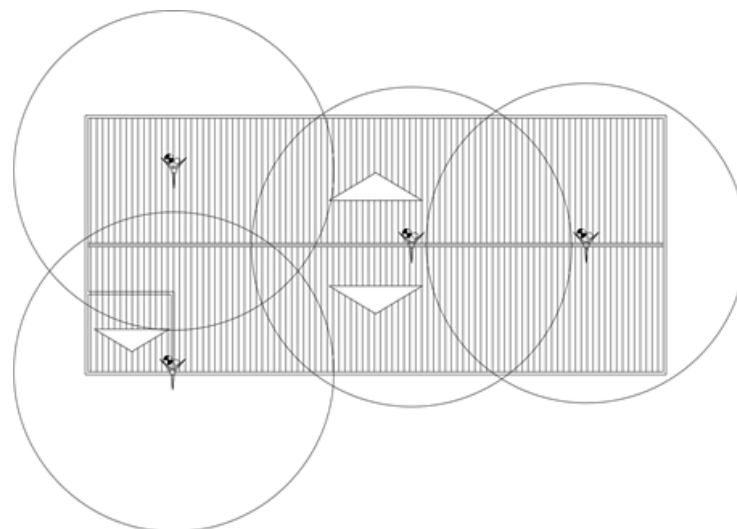


Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O gráfico da Figura 33 mostra que, mesmo com a inclusão de uma quarta circunferência, algumas áreas na extremidade da platibanda ainda não foram cobertas pelo sistema de captação. Diante disso, uma nova disposição dos captores se faz necessária para garantir a proteção total da área. É preciso, portanto, reorganizar os captores de modo a abranger toda a extensão da platibanda.

Para prover proteção completa ao telhado do museu, foram afixados quatro mastros, conforme pode ser observado na Figura 34. Eles foram instalados em locais estrategicamente selecionados para garantir a cobertura de toda a área da platibanda.

Figura 34 - Quarto procedimento para testagem da proteção por método Franklin utilizando mastros pela parte superior



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Para este projeto, foram utilizados quatro mastros de 3 m contendo individualmente uma descida. A escolha do mastro simples com redução se deu por diversas vantagens que ele apresenta. Em primeiro lugar, a simplicidade da instalação é um ponto a favor. Com apenas uma descida, o mastro com para-raios Franklin pode proteger toda a estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas. Além disso, o uso de um condutor também torna a manutenção do sistema mais fácil e econômica. (TERMOTÉCNICA PÁRA-RAIOS, 2022)

Outra vantagem do para-raios Franklin é o fato de ser amplamente utilizado em todo o mundo, sendo reconhecido por sua elevada eficiência na dispersão das correntes elétricas provenientes de raios (MODENA, 2021).

Por fim, a escolha do mastro com para-raios Franklin com uma descida foi reforçada pelo uso de latão cromado, que oferece maior resistência à corrosão e, portanto, aumenta a durabilidade do sistema.

Cada mastro utilizado no SPDA deve ser equipado com um para-raios Franklin para garantir a proteção adequada contra raios. Isso ocorre porque cada mastro é considerado um elemento isolado e independente no sistema de captação, e, portanto, é necessário que cada um possua sua própria descida para cada para-raios de modo a direcionar a corrente elétrica para o solo de forma segura. Caso um mastro não possua seu próprio para-raios, ele pode se tornar uma rota alternativa para a corrente elétrica do raio, o que pode colocar em risco a segurança das pessoas e a integridade do equipamento conectado. Além disso, a presença de um para-raios

em cada mastro garante que a corrente elétrica seja distribuída de forma uniforme e adequada para o solo, evitando sobrecargas elétricas e danos ao sistema de proteção. Diante disso, é necessário ter um para-raios Franklin para cada mastro, totalizando quatro unidades para o projeto.

Com base nas informações apresentadas anteriormente e nas necessidades específicas do projeto em questão, foi decidido que a opção mais adequada seria a utilização de quatro mastros com altura de 3 metros cada, com uma estrutura de 3 m x Ø2", conforme mostrado na Figura 19.

Para fixar e sustentar o mastro no SPDA, foi utilizado um conjunto de elementos estruturais conhecidos como estais. Para cada um dos mastros são necessários dois estais, sendo oito ao todo ou quatro conjuntos de duas unidades.

Diante do apresentado pela Figura 26, os quatro mastros precisam ser conectados entre si e ao sistema de descida. Para isso, optou-se por utilizar condutores de cobre nu que é comumente empregado para esta função. Além disso, o uso de cabos de cobre nu torna a instalação do sistema SPDA mais simples e econômica em comparação com outros materiais, como cabos isolados. Estes cabos vão percorrer tanto as extremidades da platibanda quanto a área do telhado de zinco.

O perímetro total da área superior que será necessário percorrer o cabo de cobre é de 139 metros  $(2 \times 31,20) + (4 \times 13,95) + (1 \times 4,32) + (1 \times 4,60) + (1 \times 4,60) + (1 \times (13,95/2)) = 138,70$  m).

Portanto a quantidade estimada de cabo de cobre encordado maciço é de 139 m, de 35 mm<sup>2</sup> x 7 Fios x Ø 2,50 mm.

Para fixação do cabo de cobre arredondado maciço, é recomendado, segundo a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), o uso de presilhas para cabo de cobre em latão, que são fabricadas em material resistente à corrosão, garantindo a durabilidade do sistema e oferecendo uma fixação segura, conforme descrito pela Termodécnica Pára-Raios (2022). Segundo a norma brasileira, é recomendado o uso de pelo menos duas presilhas de latão de Ø5 mm para cabos de cobre ou aço cobreado entre 35 e 50 mm<sup>2</sup>, dois parafusos autoperfurantes em aço inox de Ø4,2" x 32 mm<sup>2</sup> e duas buchas de nylon nº6 de Ø7 mm para fixar um cabo de cobre de 1 m. Sendo assim, são necessárias 278 unidades de cada material.

O subsistema de captação em mastros com captadores Franklin será conectado aos condutores de cobre nu, utilizando abraçadeira-guia simples de uma descida, que é um componente utilizado em SPDA para fixar os mastros em sua posição vertical e evitar que se movam ou caiam devido a forças externas, como ventos fortes.

Para este projeto, foi escolhida a base para mastro em alumínio fundido, de dimensão Ø2”, conforme Figura 19- Especificação de mastros com 1 conjunto de estais. Para cada mastro é necessária uma base, sendo 4 ao todo. Cada base requer quatro parafusos. Na alvenaria, são necessários 12 parafusos sextavados de ØM6 x 45 mm com 12 roscas soberba (três mastros). Já na telha metálica, são necessários 4 rebites (um mastro).

Para cada mastro é necessária uma base, sendo 4 ao todo. Cada base requer quatro parafusos. Na alvenaria, são necessários 12 parafusos sextavados de ØM6 x 45 mm com 12 roscas soberba (três mastros), em que o “ØM6” refere-se à medida da rosca do parafuso, indicando que tem um diâmetro nominal de 6 milímetros. Para garantir a estabilidade e segurança do sistema de mastro, também é utilizada um suporte. Ele é responsável por fixá-lo, seja na alvenaria ou na telha metálica, proporcionando uma base sólida e resistente para o sistema de captação de descargas atmosféricas. Para este projeto, foi escolhida a base para mastro em alumínio fundido, de dimensão Ø2”, conforme Figura 16.

Escolhidos parafusos sextavados como fixadores mecânicos pois são utilizados para ancorar objetos em paredes de alvenaria. Eles têm uma cabeça sextavada que é projetada para ser aparafusada com uma chave sextavada correspondente. O parafuso tem uma rosca que é projetada para penetrar na alvenaria e fornecer uma fixação segura. Eles são geralmente feitos de aço carbono, aço inoxidável ou latão e podem ser galvanizados ou revestidos para aumentar a resistência à corrosão. Já na telha metálica, são necessários 4 rebites (um mastro). A Tabela 40 traz o dimensionamento dos componentes utilizados no sistema captor e suas respectivas quantidades necessárias.

Tabela 40- Componentes básicos do subsistema de captação para o método de Franklin (híbrido)

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Cabo de cobre nu (m)	35 mm <sup>2</sup> - 7 Fios x Ø 2,50 mm	139
Presilha para cabo de cobre em latão	Ø 5 mm – Para Cabos de cobre ou aço cobreado 35 – 50mm <sup>2</sup>	278
Fixador universal de SPDA estanhado	Para 1 condutor 35mm <sup>2</sup>	54

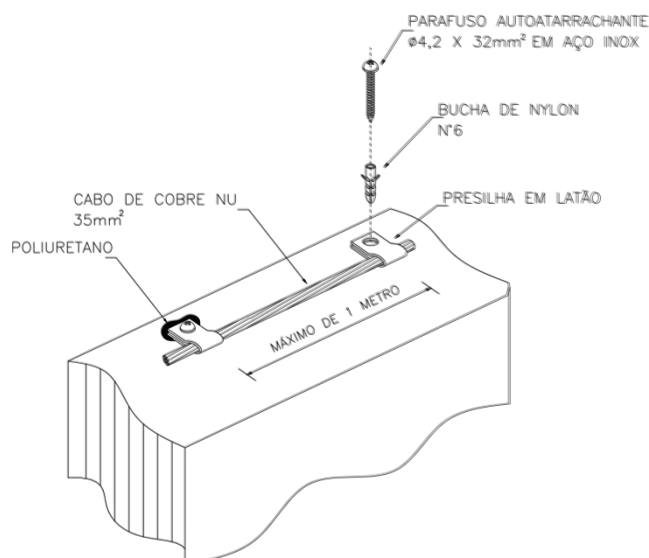
Bucha de nylon n°6	Ø7 mm	278
Parafuso autoperfurante em aço inox	Ø4,2" x 32 mm <sup>2</sup>	278
Para-raios Franklin latão cromado	-	4
Conjunto de estais rígido	Ø2" x 0,5 m	8
Poliuretano	Bisnaga	N/A
Mastro simples com redução	3m x Ø2"	4
Parafuso autoperfurante	Ø1/4" x 7/8"	54
Parafuso sextavado com rosca soberba em aço inox	ØM6 x 45 mm	12
Abraçadeira-guia simples para mastros	Ø2"	12
Base para mastro em alumínio fundido	Ø2"	4

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O desenho técnico da Figura 35 evidencia o detalhamento de instalação do cobre nu em alvenaria, em que sua afixação é realizada com uso de presilhas em latão e parafusos autoperfurantes.

São necessárias 100 presilhas em latão e 100 parafusos autoperfurantes para alvenaria considerando o perímetro de 100 metros ( $2 \times 13,95 + 2 \times 31,2 + 4,6 + 4,32 = 99,2$  m).

Figura 35 – Detalhe técnico da fixação do cabo de cobre em alvenaria na captação

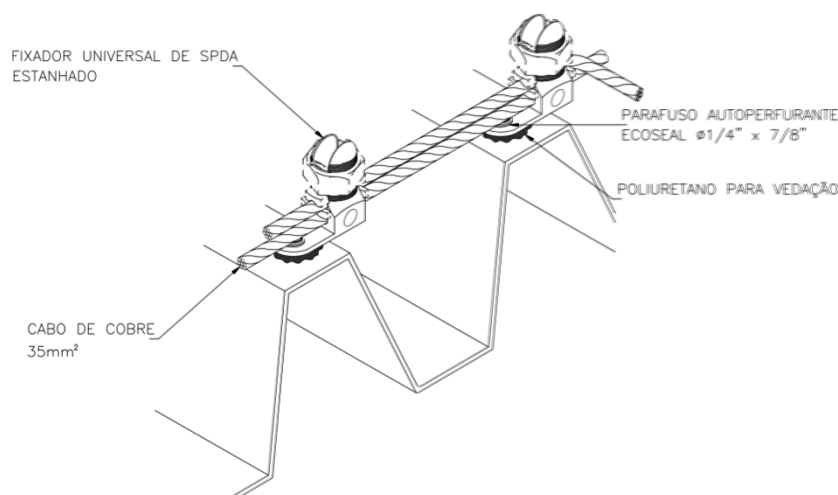


Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

O cobre é um material que pode sofrer corrosão em contato com outros metais, como a própria telha metálica, e o estanhado dos fixadores ajuda a proteger o cobre da corrosão. Já os parafusos autoperfurantes são uma opção conveniente e eficiente para perfurar a telha e fixar os fixadores sem a necessidade de realizar furação da telha, reduzindo o tempo e o esforço na instalação.

Além disso, os parafusos autoperfurantes também possuem boa resistência à corrosão e são capazes de fixar firmemente os fixadores na estrutura, garantindo a segurança e a eficiência do SPDA. A Figura 36 demonstra a configuração para instalação do cabo de cobre nu em telha metálica. Para sua afixação, são utilizados parafusos autoperfurantes e fixadores universais de SPDA estanhados, sendo estes últimos, os fixadores universais, componentes importantes em um SPDA, pois são responsáveis por fixar e unir as diferentes partes do sistema, como as hastes de captação, cabos de descida e aterramento.

Figura 36 - Derivação do cabo de cobre com fixadores universais na telha metálica

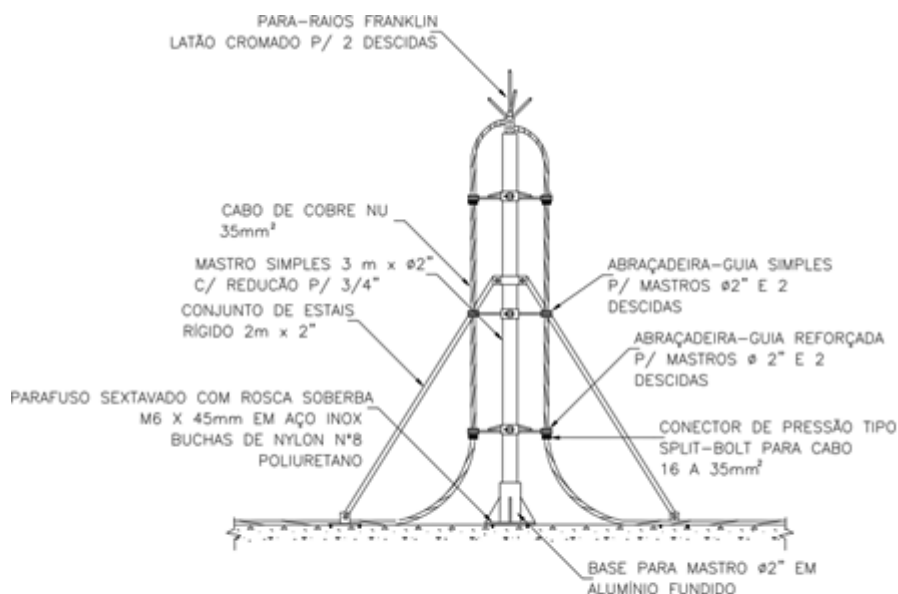


Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

Existem vários tipos de fixadores universais disponíveis no mercado, como os fixadores de aço inoxidável, fixadores de alumínio e fixadores de cobre. Para este projeto, serão utilizados fixadores universais para 1 condutor com seção de  $35\text{mm}^2$ . De acordo com a norma ABNT NBR 5419-3 (2015), que trata sobre a PDA, o espaçamento máximo entre os fixadores deve ser de 1 m. Diante disso, em telha metálica com perímetro de 54 metros ( $(2 \times 13,95) + 4,60 + (13,95/2) = 53,425$ ), são necessários 54 fixadores universais para cabo de  $35\text{mm}^2$  e 54 parafusos autoperfurantes com especificações de  $\text{Ø}4,2'' \times 32\text{mm}^2$ .

A Figura 37 apresenta o diagrama esquemático do mastro com o captor Franklin a ser instalado nos pontos ordenados pelo projeto.

Figura 37 - Para-raios tipo Franklin em mastro com três metros simples com duas descidas



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

### 3.9.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida

Conforme apresentado anteriormente, o espaçamento entre os condutores de descida para um SPDA Classe II deve ser de 10 metros, sendo admitido até 20% acima ou abaixo do valor especificado. A configuração do subsistema de descida, tanto a vista lateral, quanto a frontal e traseira é exibida nos Apêndices APÊNDICE K - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista lateral)**, APÊNDICE L - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista frontal)** e APÊNDICE M - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista traseira)**, respectivamente.

O perímetro total de 90,3 m ( $2 \times 13,95 + 2 \times 31,20 = 90,3$  m) resulta em comprimento total de 9,03 m com margem de  $\pm 1,806$  m.

Para este projeto, inicialmente, foram projetadas oito descidas principais (valor que está dentro do intervalo considerado, visto que os valores máximo e mínimo são de 10,836 metros e 7,224 metros, respectivamente).

Diante disso, serão quatro nos cantos da edificação, e duas no centro de cada lateral (esquerda e direita), totalizando oito, de modo a proporcionar uniformidade de instalação no telhado. A equivalência no número de descidas em relação ao método anterior tem como

finalidade evitar a exposição dos condutores na à frente e atrás do museu, sem causar impacto na sua estética visual.

As descidas nos cantos são conectadas diretamente à um eletrodo vertical de aterramento, instalado dentro da caixa de inspeção do tipo solo, enquanto as demais são interligadas ao anel de cobre.

As descidas nos cantos são conectadas diretamente a um eletrodo vertical de aterramento, instalado dentro da caixa de inspeção do tipo solo, enquanto as demais são interligadas ao anel de cobre para distribuir de forma uniforme a corrente elétrica gerada pelo raio. Segundo Cooray (2009), os cantos são áreas mais críticas em termos de impacto do raio, pois o campo elétrico é mais concentrado nesses pontos. Ainda de acordo com o professor, ao conectar a descida diretamente ao eletrodo de aterramento, a dissipação da energia elétrica do raio é mais eficiente. Além disso, a interligação das demais descidas ao anel de cobre evita que ocorram diferenças de potencial entre elas, reduzindo os riscos de danos aos equipamentos e estruturas próximos.

Escolheu-se por aplicar cabos de cobre arredondado maciço iguais aos utilizadas no subsistema de captação, para as descidas. A escolha do cobre também se deve à sua capacidade de suportar altas correntes elétricas sem superaquecer ou derreter, o que pode ocorrer com outros materiais menos condutivos. Isso é especialmente importante em SPDA, que podem gerar correntes elétricas extremamente altas durante uma tempestade.

Por esses motivos supracitados, os cabos de cobre arredondado maciço são amplamente utilizados em SPDA para garantir a segurança de pessoas, estruturas e equipamentos durante uma tempestade elétrica.

Para instalar as oito descidas no Museu, o perímetro total de cabo de cobre arredondado maciço de 35 mm<sup>2</sup> - 7 Fios x Ø 2,50 mm a ser utilizado deve ser de aproximadamente 61 m, que é a somatório de todas as alturas percorridas pelas decidas. A quantidade estimada do material é de 61 m. Para fixação do cabo de cobre arredondado maciço, é recomendado, segundo a NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), o uso de presilhas para cabo de cobre em latão, que são fabricadas em material resistente à corrosão, garantindo a durabilidade do sistema e oferecendo uma fixação segura, segundo o Catálogo de Produtos da Termotécnica Pára-Raios (2022). Sendo assim, são necessárias 122 unidades. Da mesma forma, são necessárias 122 unidades de parafuso.

Inicialmente foram determinadas oito descidas principais, sendo quatro nos cantos da edificação, e duas no centro das laterais (esquerda e direita), de modo a proporcionar simetria geométrica das descidas em relação à área do telhado. Para a inspeção dos condutores do

Museu, utilizou-se uma justificativa semelhante à dos métodos anteriores. No entanto, para esta etapa, foi adotado um procedimento distinto, que consistiu na instalação de caixas de inspeção do tipo solo.

Como critério de projeto, foi selecionado o emprego de cabos de cobre nu visando alta resistência à corrosão e deformação, além de serem muito maleáveis.

A relação de componentes e seus dimensionamentos são expressos pela Tabela 41.

Tabela 41 - Componentes básicos do subsistema de descida para o método Franklin (híbrido)

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Cabo de cobre nu (m)	35 mm <sup>2</sup> - 7 Fios x Ø 2,50 mm	61
Presilha para cabo de cobre em latão	Ø5 mm	122
Parafuso de fenda em aço inox	Ø 1/4" x 3/4"	122
Bucha de nylon n°6	Ø7 mm	122
Fixador ômega em latão	Ø5 mm	8

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Os cabos afixados por meio de presilhas, parafusos de fenda em aço inox e fixadores ômega em latão de Ø5 mm, seguem o modelo conforme Figura 29.

Diante disso, para este projeto, foram necessários oito fixadores ômega em latão, sendo instalado um em cada uma das oito descidas.

Como pode ser analisado, tanto pela Figura 29, quanto pelo APÊNDICE L - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista frontal)**, não há eletroduto na descida protegendo cada condutor. Neste sentido, é recomendado pela ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) instalar avisos visíveis de alerta contra choques na proximidade de cada cabo de cobre nu.

### **3.9.3 Configuração da inspeção em caixa tipo solo (enterrada)**

A configuração da inspeção em caixa do tipo solo (enterrada) descrita no item 6.2.3 da seção 6.2 do método Faraday se trata do mesmo sistema de caixa de inspeção em solo apresentado nesta seção. Ambos os sistemas utilizam caixas de inspeção em solo para permitir

o acesso aos equipamentos de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas. A utilização de caixas de inspeção enterradas é uma alternativa ao uso de caixas suspensas e oferece diversas vantagens, como maior proteção contra intempéries, menor impacto visual e facilidade de instalação. Portanto, trata-se do mesmo sistema de caixa de inspeção em solo (enterrada) utilizado no método Faraday descrito na seção 6.2.

### **3.10 Sistema de Proteção Interna**

Para as considerações de projeto, é importante destacar que o museu possui apenas um Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) e um Quadro de Distribuição de Circuitos (QDC). Essa informação é relevante pois influencia na seleção dos dispositivos de proteção, como os DPS, que devem ser instalados em pontos estratégicos do sistema elétrico para garantir a segurança e confiabilidade do mesmo.

O QGBT é responsável por receber a energia elétrica da concessionária e distribuí-la para o restante do sistema elétrico do museu. Já o QDC é responsável por distribuir a energia elétrica para os circuitos individuais que alimentam as cargas do museu.

Como o museu possui apenas um QGBT e um QDC, é importante selecionar dispositivos de proteção adequados para garantir a proteção contra sobretensões e surtos elétricos em todo o sistema elétrico. Isso inclui a instalação de DPS em pontos específicos como no QGBT e no QDC, bem como em outros pontos de entrada de energia elétrica, como os painéis solares, por exemplo.

De acordo com o exposto por Kafer (2018) e já mencionado previamente, a unidade industrial objeto de seu estudo possuía uma carga elétrica nominal de cerca de 50 quilowatts (kW). Extrapolando tal informação para a análise da edificação do museu, foi considerado uma carga elétrica similar de 50 kW. A carga elétrica em questão representa a magnitude de potência elétrica requerida pela edificação, a qual é demandada para alimentar os diversos equipamentos e sistemas elétricos em operação no ambiente em questão.

O gerenciamento e análise de risco mostrou uma incidência razoável de raios na estrutura, na linha de energia, de sinal e em locais próximos à edificação, o que demonstra uma grande probabilidade de danos ao museu. Tendo em mente a magnitude da carga elétrica instalada no museu (50 kW) e suas características (transformador externo à instalação, de 220/380V), as dimensões da estrutura e cada SPDA recomendados como solução, avalia-se que a instalação de DPS na entrada de energia, de acordo com o tipo de sistema de aterramento, é suficiente para reduzir significativamente os riscos de danos a sistemas internos.

O Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) tem como principal função detectar e desviar para o solo a energia excessiva que pode surgir em situações como descargas atmosféricas, manobras na rede elétrica ou outras fontes de surtos elétricos. Sua atuação é essencial para a proteção de equipamentos elétricos, pois evita danos causados por picos de tensão que podem resultar em falhas de funcionamento ou até mesmo em sua destruição. Além disso, o uso de DPS também contribui para a segurança das pessoas, prevenindo riscos de choques elétricos e incêndios decorrentes de sobrecargas na rede elétrica (ABNT, 2015c).

Ao instalar dispositivos DPS na entrada de energia, ele atua como uma primeira linha de defesa contra surtos elétricos e ajuda a proteger todos os equipamentos e sistemas elétricos conectados à rede elétrica interna da edificação (TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS, 2022).

Além disso, a instalação de DPS na entrada de energia é mais econômica e prática do que a instalação de vários dispositivos individuais de proteção em cada equipamento ou sistema elétrico conectado à rede interna (TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS, 2022).

Desta forma, a instalação de DPS na entrada de energia é uma medida de proteção elétrica eficaz e conveniente para garantir a segurança dos equipamentos e sistemas elétricos em uma edificação.

Embora a instalação de DPS na entrada de energia seja uma opção prática e econômica para proteger todos os equipamentos e sistemas elétricos conectados à rede elétrica interna de uma edificação, em algumas situações, a instalação de dispositivos individuais de proteção pode ser uma boa opção.

Isso pode ocorrer em casos em que equipamentos e sistemas elétricos específicos apresentam maior risco de danos ou falhas causadas por surtos elétricos, como é o caso de equipamentos eletrônicos sensíveis, como computadores, servidores, equipamentos de telecomunicação, entre outros. Nesses casos, a instalação de um DPS na entrada de energia pode não ser suficiente para proteger esses equipamentos, e a instalação de dispositivos individuais de proteção, como protetores de linha ou protetores de tomada, pode ser necessária para garantir uma proteção mais completa.

Segundo a norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), além disso, a instalação de dispositivos individuais de proteção pode ser uma opção viável em edificações maiores e mais complexas, em que a instalação de um único DPS na entrada de energia pode não ser suficiente para proteger todos os equipamentos e sistemas elétricos presentes na edificação. Nesses casos, a instalação de DPSs adicionais em pontos estratégicos da rede elétrica interna pode ser necessária para garantir uma proteção mais efetiva.

Neste sentido, projetou-se um segundo DPS para a estrutura, a ser instalado no quadro de distribuição (quadro secundário), a fim de prover maior proteção aos sistemas elétricos internos. Dessa forma, para este trabalho, serão utilizados DPS de Classe I e II.

De acordo com Kafer (2018), a fábrica em questão utilizava o sistema de aterramento TNS, caracterizado pela separação das funções de proteção e neutro por condutores distintos. No contexto deste projeto em questão, a análise do sistema de aterramento do museu também indica a utilização do sistema TNS.

O sistema de aterramento é parte integrante fundamental de uma instalação elétrica, pois garante a segurança dos usuários e dos equipamentos elétricos. Em sistemas TNS, o condutor de proteção é mantido isolado do neutro, o que permite que a função de proteção seja realizada de forma independente e segura. Além disso, o sistema TNS oferece uma maior proteção contra sobretensões e descargas atmosféricas, uma vez que a terra é compartilhada apenas pelos condutores de proteção.

A Norma Técnica 321.0001 da Celesc Distribuição S.A (2020), exige a implementação de um DPS Classe I com corrente nominal de impulso mínima de 12,5 kA em instalação com SPDA instalado. Para o QGBT, decidiu-se por selecionar o DPS modelo da Siemens Ag (2017), o Siemens 5SD7 414-1 25 kA Classe I de quatro módulos (um DPS ligado entre cada condutor fase e o condutor de proteção, além de um DPS instalado entre o neutro e o condutor de proteção). Esse dispositivo possui capacidade de dreno de corrente de surto até o valor máximo de corrente elétrica ( $I_{max}$ ) igual a 25 kA e opera com uma tensão máxima nominal ( $V_{UC}$ ) igual a 350 V. O DPS Siemens 5SD7 414-1 possui uma capacidade de dreno de corrente de surto até  $I_{max} = 25$  kA e opera a uma tensão máxima nominal ( $V_{UC}$ ) igual a 350V, o que o torna adequado para proteger sistemas elétricos com tensões nominais até 400V. Além disso, ele é projetado para ser instalado em quadros elétricos, como o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), oferecendo proteção para as fases e o neutro.

A Classe I indica que o DPS é adequado para proteger o sistema contra surtos provenientes de descargas atmosféricas, o que é especialmente importante em áreas com alta incidência de raios. Além disso, a capacidade de dreno de corrente de surto de 25 kA indica que o dispositivo pode dissipar correntes de pico elevadas, protegendo assim a instalação contra danos elétricos.

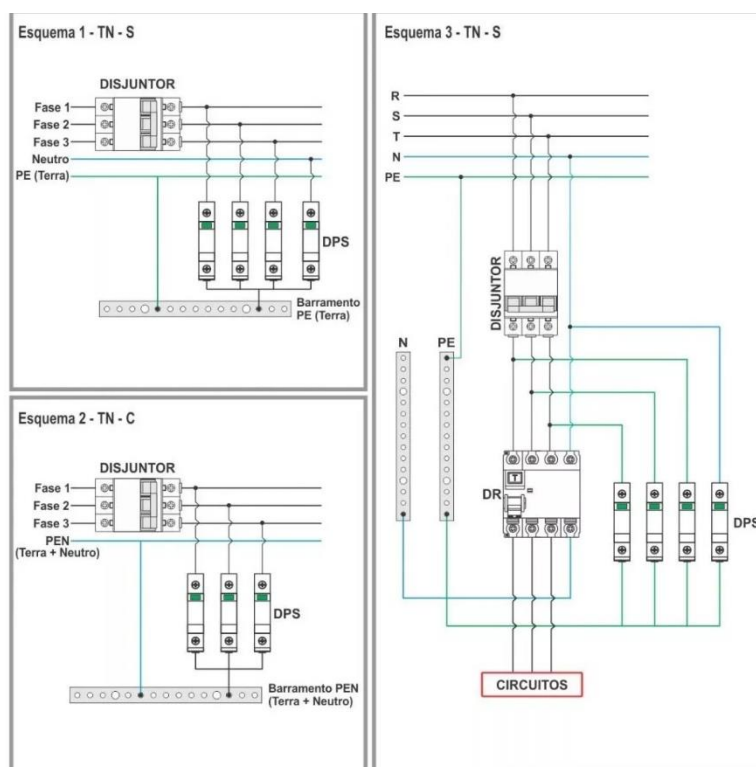
Em resumo, a seleção do DPS Siemens 5SD7 414-1 Classe I de quatro módulos é baseada nas características elétricas do sistema, nos requisitos normativos e nas especificações técnicas do dispositivo de proteção. Conforme exigido pela Norma Técnica 321.0001 da Celesc Distribuição S.A (2020), é necessário instalar um DPS Classe II no quadro geral de distribuição

de cada unidade consumidora. Para o quadro secundário (QD 01), foi selecionado o DPS da Clamper (2010), o Clamper Front 20 kA Classe II monopolar, sendo utilizado um dispositivo para cada fase e para o neutro, independentes. Esse DPS tem capacidade de dreno de corrente de surto até ( $I_{max}$ ) até 20 kA e opera a uma tensão máxima nominal ( $V_{UC}$ ) de 275 V.

O APÊNDICE N - **Posicionamento e dimensionamento do subsistema de equipotencialização (vista lateral)** mostra o diagrama esquemático para visualização dos DPS Classe I e II na estrutura. Além disso, evidencia o detalhe de instalação dos sistemas de aterramento e equipotencialização.

Com base na Figura 38, é possível observar o diagrama de montagem do Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) Classe I em um circuito trifásico.

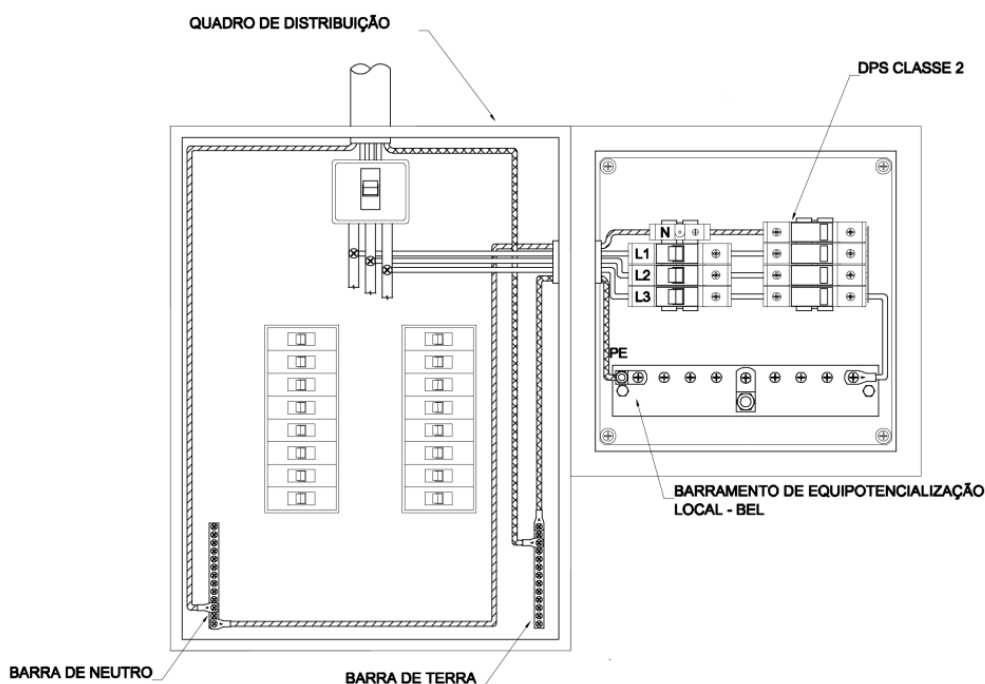
Figura 38 - Diagrama de montagem de DPS Classe I em um circuito trifásico



Fonte: Extraído de Termotécnica Para-raios (2022). Disponível <https://tel.com.br/>

Com base na Figura 39, é possível observar o diagrama de montagem do Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) Classe II em um circuito trifásico.

Figura 39 - Diagrama de montagem de DPS Classe II em um circuito trifásico



Fonte: Extraído de Termotécnica Para-raios (2022). Disponível <https://tel.com.br/>

### 3.11 Sistema de Equipotencialização

Além da instalação dos DPSs em pontos estratégicos do sistema elétrico, como no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) e no Quadro de Distribuição de Circuitos (QDC), é importante adotar medidas de equipotencialização para garantir a eficiência e efetividade do SPDA.

A equipotencialização consiste na interligação de todos os componentes do SPDA às demais referências de terra existentes no projeto, de forma a manter o potencial elétrico em todas as superfícies condutoras, barramentos e armaduras metálicas não aterradas. Isso garante que, em caso de uma descarga atmosférica, a corrente elétrica seja distribuída de maneira uniforme, evitando danos aos equipamentos e riscos de choque elétrico.

A conexão de todos os componentes do SPDA em um mesmo ponto é importante para garantir a equipotencialização e a segurança do sistema elétrico. Isso inclui a interligação dos condutores de descida, as hastes de aterramento, as malhas de terra, as armaduras metálicas, os para-raios, os equipamentos elétricos e outros componentes do sistema elétrico.

Dessa forma, ao adotar medidas de equipotencialização em conjunto com a instalação de DPSs, é possível garantir uma proteção eficaz e confiável contra descargas atmosféricas, prevenindo danos aos equipamentos e garantindo a segurança das pessoas.

No projeto elétrico de uma edificação, é necessário garantir a segurança e a eficiência do sistema de aterramento, que tem como objetivo evitar descargas elétricas e proteger as pessoas e os equipamentos. Uma das medidas adotadas é a instalação do Barramento de Equipotencialização, que interliga todos os elementos condutores do sistema elétrico e os conecta às demais referências de terra existentes no projeto.

O barramento de equipotencialização escolhido para o projeto do museu possui 7 furos, o que é considerado uma quantidade suficiente para atender às necessidades da instalação do museu, considerando que o número de furos em um barramento de equipotencialização está diretamente relacionado ao número de pontos de equipotencialização a serem conectados, segundo a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b). Assim, o barramento com 7 furos é suficiente para realizar a conexão de todos esses pontos de maneira adequada, garantindo a segurança elétrica da instalação, já que o projeto do Museu prevê até 5 pontos de equipotencialização (trilhos de elevadores, tubulação de incêndio, aterramento telefônico, aterramento elétrico, aterramento do para-raios, por exemplo).

Já o barramento de equipotencialização local é responsável por conectar os elementos do sistema elétrico que se encontram em um mesmo ambiente, garantindo a equipotencialização dentro de cada ambiente específico.

É comum que os barramentos de equipotencialização (BEP e BEL) fiquem em caixas de equipotencialização separadas para garantir a efetividade da equipotencialização e, em função dos objetos ou componentes localizados distantes um do outro. A caixa de equipotencialização é um compartimento destinado a abrigar os componentes do sistema de aterramento, como os próprios barramentos, as conexões de terra e os equipamentos de proteção contra surtos elétricos. A separação das caixas de equipotencialização é importante para evitar interferências eletromagnéticas entre os sistemas elétricos e garantir a segurança dos usuários e a proteção dos equipamentos elétricos. Além disso, a separação permite que os barramentos sejam dimensionados de forma adequada para cada sistema elétrico e que sejam realizadas as conexões de terra de acordo com as normas técnicas e de segurança, conforme a norma ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004). Assim, para este projeto, foram necessárias duas caixas de equipotencialização 210 x 210 x 90 mm, em aço, sendo uma para o BEP e outra para o BEL. Além disso, cada caixa contém um barramento de cobre com nove terminais de pressão em latão, sendo oito terminais para cabos de até 16 mm<sup>2</sup> e um terminal para cabo de até 50 mm<sup>2</sup>.

A caixa de equipotencialização de 210 x 210 x 90 mm, fabricada em aço, é um dos modelos mais populares e amplamente comercializados para SPDA no mercado, e com base nas informações contidas na seção de Elementos de Aterramento e Equipotencialização do

Catálogo de Produtos SPDA - MPS da Termotécnica Para-Raios (2022). Entretanto, esta dimensão é específica para cada projeto sendo dependente da quantidade de circuitos e componentes que devem ser conectados ao BEP ou BEL. Devido ao seu tamanho compacto e ao material de alta qualidade usado em sua fabricação, a caixa de equipotencialização de 210 x 210 x 90 mm é muito resistente e durável, capaz de suportar as condições ambientais adversas que são comuns em áreas propensas a tempestades e raios. Além disso, é fácil de instalar e oferece um alto grau de confiabilidade em termos de PDA.

Os terminais de compressão são frequentemente utilizados em caixas de equipotencialização de SPDA para garantir conexões seguras e duradouras entre os cabos de aterramento dos componentes do sistema. Algumas das vantagens de se utilizar terminais de compressão em caixas de equipotencialização incluem:

- a) Conexões seguras: os terminais de compressão são projetados para fornecer uma conexão segura e confiável entre os cabos de aterramento. Eles são capazes de suportar altas correntes elétricas e reduzem o risco de falhas ou desconexões dos cabos.
- b) Facilidade de instalação: os terminais de compressão são relativamente fáceis de instalar e não exigem muitas ferramentas ou habilidades especializadas. Eles podem ser facilmente montados nos cabos de aterramento usando uma ferramenta de compressão.
- c) Durabilidade: os terminais de compressão são feitos de materiais duráveis, como cobre ou alumínio, que são capazes de resistir à corrosão e ao desgaste. Isso significa que eles são capazes de manter uma conexão segura e confiável ao longo do tempo, reduzindo a necessidade de manutenção ou substituição.

Para garantir uma conexão segura e duradoura entre todos os componentes do sistema em um único ponto, é recomendável utilizar um terminal de compressão em cada um desses furos dos barramentos de equipotencialização.

No projeto em questão, foi utilizado um cabo de cobre isolado de 16 mm<sup>2</sup> para estabelecer a conexão entre os dois barramentos, contidos em caixas de equipotencialização separadas. Esta seção do cabo deve estar em concordância com os métodos de dimensionamento da seção do condutor de proteção principal do BEP ou BEL, de acordo com a ABNT NBR 5410 (2004). Embora existam materiais de revestimento isolante disponíveis para os cabos elétricos, a escolha do material e da seção do cabo dependerá das características elétricas específicas do sistema, que devem ser avaliadas de acordo com os critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004). A norma apresenta diretrizes para o

dimensionamento de condutores, levando em consideração fatores como a carga elétrica, a distância entre os pontos de alimentação e a seção transversal do condutor. Neste contexto, a conexão entre os dois barramentos foi estabelecida por meio de um cabo de cobre isolado de  $16 \text{ mm}^2$  com cerca de 13 m de comprimento. Para a conexão do DPS Classe II com o BEL são estimados 3 m de cabo de  $16 \text{ mm}^2$  e, para a conexão do DPS Classe I com o BEP são estimados 3 m de cabo de  $35 \text{ mm}^2$ . Sendo assim, são necessários 16 m de cabo de cobre isolado de  $16 \text{ mm}^2$  e 3 m de  $35 \text{ mm}^2$ , no total. A relação de componentes e seus dimensionamentos são expressos pela Tabela 42.

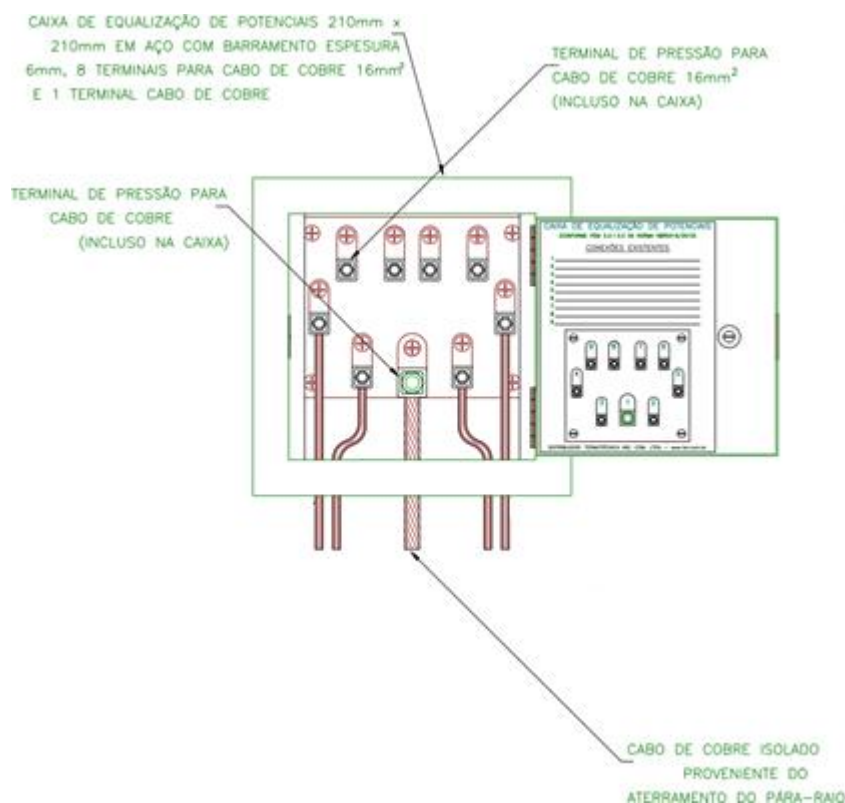
Tabela 42 – Componente básico do subsistema de equipotencialização

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>
Caixa de equipotencialização de potenciais	210 x 210 x 90 mm
Cobre isolado (m)	16 $\text{mm}^2$
Cobre isolado (m)	35 $\text{mm}^2$

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

A Figura 40 apresenta o detalhamento das possíveis ligações a serem realizadas na caixa de equipotencialização.

Figura 40 - Exemplo de ligações possíveis na caixa de equalização



Fonte: Adaptada de Termotécnica Para-raios (2022).

É importante destacar que o cálculo da seção do cabo de cobre do aterramento elétrico é um assunto muito amplo e complexo, e envolve diversos fatores que devem ser cuidadosamente considerados. Por essa razão, este cálculo não faz parte do escopo deste trabalho. No entanto, é importante salientar que o escopo deste trabalho inclui a determinação da seção do cabo de cobre do aterramento do para-raios.

### 3.12 Distâncias de Segurança

Em determinadas circunstâncias, a proximidade dos condutores de descida de um SPDA, externo à edificação, pode representar um perigo para a integridade física das pessoas, mesmo que ele tenha sido concebido e implementado em conformidade com as orientações apresentadas na norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015)

Em sistemas não estruturais, por exemplo, existem algumas medidas para reduzir a níveis toleráveis os riscos de choques provenientes de tensão de toque. Um artifício comum e que pode ser realizado, recomendado pela ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015) no item 8.1.1

Medidas de proteção contra tensões de toque, da Seção 8, é a criação de uma camada de 5 cm de espessura de asfalto ou de uma camada de 20 cm de espessura de brita em locais onde há aproximação de pessoas. Entretanto, em certos ambientes, é necessário promover restrições físicas, que visam impossibilitar o acesso às proximidades dos componentes do SPDA e aterramento.

Como exemplo de restrição física, tem-se a definição de distâncias de segurança, que são margens mínimas de segurança onde não haverá risco de centelhamento entre partes metálicas, visando prover isolamento elétrica.

Quando há uma descarga elétrica de alta intensidade entre duas partes de um circuito que possuem uma diferença de potencial significativa entre elas, pode vir a ocorrer o fenômeno elétrico conhecido como centelhamento. Isso pode ocorrer quando a distância entre as partes é muito pequena ou quando há algum material isolante ou condutor entre elas que não é capaz de suportar a diferença de potencial, gerando um arco elétrico ou uma faísca. (MELLO, 2017)

O risco de centelhamento entre partes metálicas pode ser perigoso, especialmente em ambientes com risco de explosão ou incêndio, por exemplo, em instalações elétricas de indústrias petroquímicas. Por isso, a restrição física, como a estabelecimento de distâncias de segurança, é uma medida importante para prevenir esse tipo de problema.

Dessa forma, estas restrições devem respeitar as distâncias de segurança entre o condutor e o ponto onde seres humanos podem entrar em contato.

O cálculo para verificar se há ou não necessidade de estabelecer distância de segurança na instalação é exigido pela norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c) sendo realizado por emprego da Equação (12):

$$S = \frac{ki}{km} \times kc \times l \quad (12)$$

em que  $S$  é a distância de segurança,  $ki$  é definido em função do NP desejado,  $km$  depende do material existente entre o condutor externo e a parte interna,  $kc$  depende da divisão da corrente de descarga entre os condutores do SPDA externo e  $l$  é o comprimento (em metros) ao longo do subsistema de captação ou de descida, desde o ponto onde a distância de segurança deve ser considerada até a equipotencialização mais próxima.

A Tabela 43 apresenta o NP e seu fator correspondente.

Tabela 43 - NP e seu fator correspondente para distância de segurança

<b>NP</b>	<i>ki</i>
I	0,08
II	0,06
III ou IV	0,04

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-3 (2015).

A Tabela 44 apresenta o tipo de material e seu fator relacionado.

Tabela 44 - Material existente entre o condutor externo e a parte interna

<b>Material</b>	<i>km</i>
Ar	1
Concreto, tijolo e madeira	0,5

Fonte: Extraída de NBR 5419-3 (2015).

Já a Tabela 45, apresenta a divisão da corrente de descarga entre os cabos do SPDA externo e seu fator correspondente.

Tabela 45 - Divisão da corrente de descarga entre os cabos do SPDA externo

<b>Nº de cabos de descida</b>	<i>kc</i>
1 (SPDA isolado)	1
2	0,66
3 ou mais	0,44

Fonte: Extraída de NBR 5419-3 (2015).

De posse dos fatores expressos na Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45, tem-se que  $ki = 0,06$ , pois o SPDA é definido como Classe II, conforme já apresentado anteriormente. Já  $km = 1$ , considerando que os condutores estão localizados no exterior do Museu, é possível inferir que o meio dielétrico presente entre o condutor externo e a parte interna é o ar. Além disso, a quantidade de descidas, em qualquer método de proteção indicado nas seções anteriores, é maior que 3, implicando em  $kc = 0,44$ .

A distância de segurança mínima em subsistemas de captação e de descida pode variar de acordo com a norma ou regulamentação aplicável em cada país ou região, bem como as características específicas do sistema em questão. No entanto, de modo geral, recomenda-se

manter uma distância mínima de segurança de 1 m entre o subsistema e quaisquer outras estruturas ou equipamentos que possam representar riscos de choque elétrico, curto-circuito ou centelhamento, conforme ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c).

No escopo deste projeto, a análise é focada no subsistema de descida, devido à presença de condutores elétricos externos em sua configuração, que percorrem as regiões próximas às janelas. A decisão de não analisar o sistema de captação se deve ao fato de que a área superior do Museu é pouco frequentada pelo público em geral e não há necessidade de manutenção regular nessa área ou pode haver barreiras físicas que impedem a presença de pessoas próximas à área de captação. Além disso, o item 6.3.1 Geral, da Seção 6 da norma brasileira não exige distância de segurança em estruturas metálicas ou de concreto com armadura interligada e eletricamente contínua, como é o caso do Museu, que possui telha metálica que cobre toda a edificação.

Para a descida, o critério de projeto adotado estabeleceu o valor de  $l = 5,2 m$  para a distância entre a descida e as janelas. Cabe ressaltar que o valor mínimo de referência para esse parâmetro é de 1 m, de acordo com a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015).

A passagem das descidas do SPDA próximo às janelas pode ser considerada um problema estético, pois pode afetar a aparência visual da edificação. No entanto, é importante avaliar o caso em questão de forma técnica e considerar que o principal objetivo da instalação do SPDA é garantir a segurança das pessoas e do patrimônio contra descargas atmosféricas.

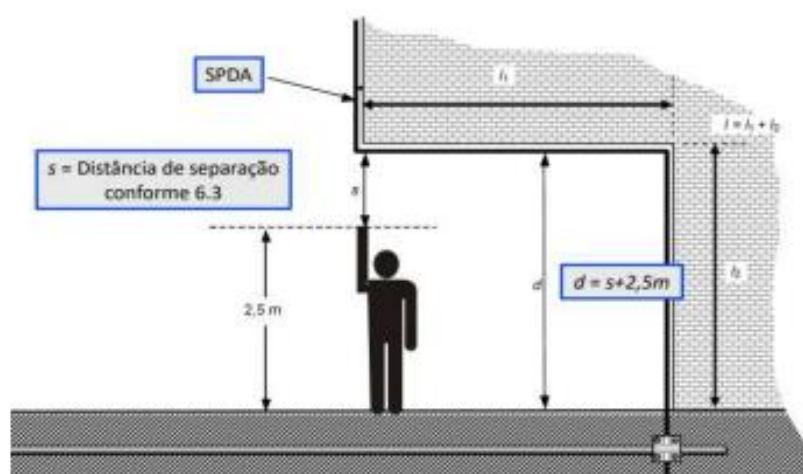
É compreensível que a aparência estética de um edifício seja importante, e que uma descida de para-raios em uma posição que polua as fachadas possa ser considerada um problema. No entanto, é importante lembrar que a segurança é uma prioridade essencial em qualquer projeto de construção, e a instalação correta e segura de uma descida de para-raios é crucial para evitar possíveis danos causados por raios.

Nesse sentido, a posição escolhida para a instalação da descida de para-raios foi determinada com base em critérios técnicos e de segurança, seguindo as diretrizes estabelecidas nas seções anteriores, tais como as distâncias mínimas de segurança, acessibilidade para manutenção e outros fatores relevantes. Dessa forma, é possível justificar que a posição escolhida para a descida de para-raios é segura e adequada, mesmo que possa não ser considerada a mais esteticamente agradável.

É importante ressaltar que o projeto foi elaborado seguindo as normas e diretrizes técnicas vigentes, garantindo que a instalação da descida de para-raios cumpra com todas as exigências de segurança. Além disso, é possível buscar alternativas que minimizem o impacto visual da descida, como a utilização de materiais e acabamentos adequados, por exemplo.

Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a segurança e a estética, e considerar que, em alguns casos, a segurança deve prevalecer sobre a aparência. É fundamental que o projeto seja executado de forma a garantir a segurança das pessoas e do patrimônio, sem comprometer a integridade estética do edifício. Na Figura 41, é possível observar a representação de uma pessoa em relação à distância do condutor mais próximo. O objetivo do uso do boneco na figura é simular uma situação específica, na qual se deve manter uma distância mínima para evitar o contato de seres vivos com partes metálicas.

Figura 41 – Demonstrativo da distância de segurança em subsistema de descida



Fonte: Extraída de Pablo Guimarães Professor (2022). Disponível em: <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/evite-centelhamentos-perigosos-sistema-de-protecao-interno>

Essa distância é estabelecida com base em normas e padrões de segurança elétrica, como a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), visando garantir a proteção das pessoas e prevenir acidentes elétricos. A Figura 41 ilustra visualmente a importância de manter essa distância de segurança.

Substituindo os valores supracitados de  $ki$ ,  $kc$ ,  $km$  e  $l$  na Equação (12), tem-se para a descida, o valor de  $S = 0,14 m$ . Diante desse valor, confirma-se que não é necessário equipotencializar o subsistema de descida com as janelas. Isso porque o resultado obtido, que atende à exigência mínima da norma, está abaixo da menor distância entre os condutores de descida e as janelas, em todos os casos apresentados anteriormente.

### 3.13 Avisos de Alerta Contra Choque

De acordo com a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), é possível implementar medidas de proteção visíveis para evitar danos a seres vivos causados por tensões de passo. Uma dessas medidas é a instalação de restrições físicas, barreiras ou sinalizações de alerta para minimizar a possibilidade de acesso a áreas perigosas. Um exemplo disso é a placa de advertência apresentada na Figura 42, que deve ser fixada ao lado dos condutores de descida dos sistemas de SPDA externos.

Figura 42 - Placa de advertência para as descidas



Fonte: Extraída de Termotécnica Para-raios (2022). Disponível em: <https://tel.com.br/produto/placa-de-advvertencia-risco-de-choque-eletrico/>

A

Figura 43 apresenta um exemplo de placa que deve ser afixada próximo aos componentes do subsistema de captação, com o objetivo de alertar sobre o perigo da presença de tensões elétricas elevadas. A instalação dessas placas é essencial para minimizar o risco de acidentes e garantir a segurança das pessoas que circulam nas áreas próximas ao subsistema de captação.

Figura 43 - Placa de advertência para a captação



Fonte: Extraída de iPlacas (2022). Disponível em: <https://www.iplacas.com.br/perigo-sistema-spda>

A Figura 44 apresenta um exemplo prático de como se pode aplicar sinalizações visíveis de alerta contra choque elétrico em instalações. Essas sinalizações têm como objetivo alertar as pessoas que frequentam a área sobre a presença de perigo elétrico e, assim, prevenir acidentes. É importante que essas sinalizações sejam claras e de fácil entendimento, garantindo que qualquer pessoa, independentemente do nível de conhecimento técnico, seja capaz de compreendê-las. A utilização de sinalizações visíveis de alerta é uma medida de segurança simples e eficaz, e deve ser adotada em todas as instalações elétricas, a fim de garantir a segurança de todas as pessoas envolvidas.

Figura 44 - Exemplo de aplicação de sinalizações visíveis de alerta contra choque elétrico.



Fonte: Extraída de Contra Incêndio (2022). Disponível em: <https://contraincendio.com.br/produto/sinalizacao-de-emergencia/proibicao-e-alerta/placa-de-sinalizacao-perigo-risco-choque/>

A Figura 45 apresenta uma placa de advertência que tem como objetivo informar e alertar sobre a necessidade de buscar abrigo em locais fechados em caso de eminência ou atuação de raios e chuva. Essa medida de segurança é fundamental para prevenir acidentes e proteger as pessoas de possíveis descargas elétricas que possam ser geradas por tempestades. É importante que essa placa seja posicionada em locais estratégicos e de fácil visualização, como entrada de prédios, parques, áreas abertas ou em locais onde as pessoas frequentemente se reúnem. Dessa forma, é possível aumentar a conscientização das pessoas sobre a importância de se proteger durante uma tempestade.

Figura 45 - Sinalização de advertência diante eventos com chuva e raios



Fonte: Extraída de Montal Para-raios (2022). Disponível em: <https://montal.com.br/para-raios-spda/produtos/sinalizacao-e-advertencia/05-placa-de-advertencia-pvc-p-areas-abertas/>

Considerando as medidas de proteção apresentadas anteriormente, é possível reduzir significativamente os riscos relacionados às tensões de passo em uma instalação

elétrica. Com a instalação de restrições físicas, barreiras ou sinalização de alerta, é possível minimizar a probabilidade de acesso a áreas perigosas. Além disso, as placas de advertência, como as apresentadas nesta seção, alertam as pessoas sobre os perigos e instruem sobre como agir em caso de emergência.

Ao adotar essas medidas de proteção, é possível garantir um ambiente mais seguro, reduzindo os riscos de choque elétrico e outros acidentes relacionados à eletricidade. Dessa forma, é fundamental que essas medidas sejam implementadas em todas as instalações elétricas, a fim de garantir a segurança das pessoas que circulam pelo local.

A implementação de sinalizações visíveis de alerta contra choque elétrico e placas de advertência é fundamental para garantir a segurança das pessoas que frequentam o museu. Estas sinalizações têm o objetivo de diminuir o valor da probabilidade de acidentes elétricos, aumentando a percepção de risco e conscientização dos visitantes e funcionários sobre os perigos da eletricidade.

A norma brasileira ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004) estabelece as diretrizes para a instalação de sinalizações de segurança em instalações elétricas, com a finalidade de garantir a proteção de pessoas e animais contra choques elétricos. Além disso, a sinalização também deve alertar sobre os perigos de incêndio e explosão, ajudando a prevenir esses tipos de acidentes.

Os exemplos de sinalizações apresentados nesta seção foram escolhidos de forma a atender às necessidades específicas do museu, considerando a localização dos equipamentos elétricos e o fluxo de pessoas no ambiente. As placas de advertência, por exemplo, foram selecionadas para indicar áreas de risco e alertar sobre a presença de equipamentos elétricos perigosos. Já as sinalizações de alerta contra choque elétrico foram instaladas em locais de maior risco, como próximo a quadros elétricos.

Portanto, é imprescindível que as sinalizações de segurança sejam implementadas de forma adequada, seguindo as normas e diretrizes estabelecidas. Isso garante a segurança dos visitantes e funcionários do museu, prevenindo acidentes elétricos e garantindo um ambiente seguro para todos.

### **3.14 Projeto do Aterramento Elétrico**

É importante esclarecer que, neste trabalho, não foram utilizados dados de solo de outra região para aplicação na análise e dimensionamento do sistema de aterramento do museu. Foi realizada uma mudança na atividade econômica exercida no local, onde a unidade fabril foi

substituída por um museu, e isso implicou na necessidade de ajustar a análise e gerenciamento de riscos.

Apesar da mudança de atividade econômica, as características do solo não foram alteradas. O museu está localizado no mesmo local (cidade e estado) onde estava a unidade fabril, e todas as dimensões físicas permaneceram inalteradas. Portanto, a estrutura do solo e suas propriedades elétricas não foram afetadas pela mudança de atividade econômica.

O estudo realizado por Kafer (2018) apresentou uma metodologia para o dimensionamento do subsistema de aterramento, desde a coleta de dados em campo até um método simplificado de prolongamento. No entanto, para avançar na análise proposta por Kafer (2018), este trabalho propôs uma modelagem matemática utilizando o software IP12win, que permite a inversão de curvas e a estratificação de camadas.

Ao contrário do estudo anterior, que utilizou a estratificação em duas camadas e não empregou o software de inversão de curva de resistividade aparente, este estudo optou por estratificar o solo em três camadas para aumentar a sensibilidade da análise. Os APÊNDICES N e O apresentam as descrições em detalhes do processo metodológico, que é uma contribuição valiosa para esta pesquisa.

No entanto, é importante destacar que, mesmo com a utilização de modelagem matemática avançada e aumento do número de camadas, não foi possível obter resultados distintos dos encontrados no estudo de Kafer (2018). Isso ocorreu porque o valor da resistência resultante após a inversão da curva foi próximo a 500 ohms, o que resultou em um processo de dimensionamento do subsistema de aterramento semelhante ao proposto por Kafer (2018), que também obteve um valor de resistência menor que 500 ohms.

Para futuras pesquisas, recomenda-se alterar o tipo e local do solo do terreno para obter resultados diferentes dos encontrados neste estudo. Isso pode aprimorar o entendimento sobre o tema e contribuir para o desenvolvimento da área.

#### **4. ANÁLISES DE RESULTADOS**

A Tabela 46 a seguir apresenta uma análise comparativa dos métodos de proteção contra descargas atmosféricas: Faraday, Franklin e Eletrogeométrico. Essa análise é baseada em uma série de critérios relevantes para avaliar o desempenho e a viabilidade de cada método.

Os critérios incluem eficiência de proteção, complexidade de instalação, adequação ao ambiente, estética, facilidade e rapidez da metodologia de projeto, quantidades necessárias, relação custo-benefício e disponibilidade de ferramentas de projeto. Cada critério foi avaliado

em uma escala de 1 a 5 para cada método, representando sua classificação em termos de desempenho em relação aos demais, onde 1 indica o nível mais crítico e 5 representa a classificação mais favorável. Essa análise proporciona uma visão abrangente das características e vantagens de cada método, auxiliando na escolha do mais adequado para determinado contexto e necessidades.

Tabela 46 - Comparação dos Métodos de Proteção contra Descargas Atmosféricas

<b>Crítérios</b>	<b>Faraday (híbrido)</b>	<b>Franklin (híbrido)</b>	<b>Eletrogeométrico (híbrido)</b>
Complexidade de Instalação	3	4	2
Adequação ao Ambiente	4	3	3
Estética	4	2	2
Fácil e rápida metodologia de projeto	3	4	2
Quantidades	2	3	3
Relação custo x benefício	2	3	3
Ferramentas de projeto	3	3	2

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

A complexidade de instalação analisa a dificuldade e complexidade envolvida na instalação de cada método de SPDA. Considera-se a facilidade de implementação, a necessidade de mão de obra especializada e o tempo requerido para concluir a instalação. Um método com baixa complexidade de instalação é vantajoso, pois economiza tempo e recursos, além de reduzir o risco de erros durante o processo.

Já adequação ao ambiente considera a capacidade de cada método de SPDA se adaptar às características específicas do local onde será instalado. Aspectos como clima, geografia e características estruturais da edificação são levados em conta. Um método que se adequa bem ao ambiente em questão será mais eficiente e terá maior durabilidade.

A estética diz respeito ao impacto visual do sistema de SPDA na arquitetura e design da edificação. Uma solução esteticamente agradável é desejável para preservar a aparência da estrutura sem comprometer a segurança contra descargas atmosféricas. Métodos que oferecem soluções discretas e integradas ao design da edificação são valorizados nessa classificação.

Em fácil e rápida metodologia de projeto, refere-se à facilidade e agilidade no desenvolvimento do projeto do sistema de SPDA. Consideram-se a disponibilidade de informações técnicas, a clareza das diretrizes normativas, a existência de ferramentas de apoio ao projeto e a facilidade de compreensão das especificações. Métodos que apresentam uma metodologia de projeto acessível e eficiente são valorizados nessa avaliação.

Já em quantidades, é analisada a quantidade de materiais e componentes necessários para implementar cada método de SPDA. Avaliam-se a eficiência do sistema na distribuição e utilização dos elementos de proteção, buscando minimizar a quantidade de componentes sem comprometer a segurança. Métodos que se destacam por otimizar o uso de materiais são considerados mais vantajosos.

Na relação custo x benefício, é considerada a relação entre o investimento necessário para implementar o sistema de SPDA e os benefícios proporcionados em termos de proteção contra descargas atmosféricas. Avaliam-se o custo dos materiais, a manutenção, a durabilidade e a eficácia do método. Métodos que oferecem uma relação equilibrada entre custo e benefício são valorizados nessa avaliação.

Por último, em ferramentas de projeto é avaliada a disponibilidade e acessibilidade de recursos que auxiliam no desenvolvimento do projeto do sistema de SPDA. Incluem-se softwares de simulação, cálculo e dimensionamento, normas técnicas atualizadas e guias de boas práticas.

Através da análise comparativa dos métodos de proteção contra descargas atmosféricas apresentada na Tabela 46, é possível observar diferenças de cada método. O método Faraday obteve uma pontuação elevada em adequação ao ambiente e facilidade de projeto. O método Franklin demonstrou ser uma opção equilibrada, obtendo pontuações consistentes em mais de uma categoria, como quantidades necessárias e relação custo-benefício, destacando-se pela sua metodologia simplificada e rápida. Já o método Eletrogeométrico se destacou pela estética e pela utilização de ferramentas de projeto avançadas. Essa análise oferece *insights* valiosos para projetistas, engenheiros e tomadores de decisão, permitindo a escolha do método mais adequado com base nas necessidades e características específicas de cada projeto. É importante ressaltar que a seleção do método de

proteção contra descargas atmosféricas deve considerar uma abordagem integrada, levando em conta aspectos técnicos, normativos, econômicos e ambientais para garantir a segurança e o funcionamento adequado das estruturas.

## 5. CONCLUSÃO

Em conclusão, o presente trabalho desempenha um papel importante ao abordar a norma ABNT NBR 5419 e suas quatro partes, que são frequentemente desafiadoras de compreender e podem se tornar cansativas durante a leitura. Além disso, a norma não fornece exemplos práticos com os métodos de Faraday, Franklin ou Eletrogeométrico, fornecendo aos projetistas e usuários pouca orientação em relação às possíveis combinações de materiais e suas quantidades adequadas.

Este trabalho visa preencher essa lacuna, oferecendo aos profissionais da área uma referência valiosa ao demonstrar que um mesmo projeto de SPDA pode ser realizado com diferentes materiais e variações nas quantidades. Essa flexibilidade permite que os projetistas adaptem as soluções às necessidades específicas de cada estrutura, levando em consideração fatores como o tipo de edificação, o ambiente circundante e as normas de segurança aplicáveis.

Um desafio enfrentado durante o desenvolvimento deste estudo foi a escassez de material atualizado disponível na internet em relação à versão mais recente da norma. Isso dificultou a busca por casos práticos que servissem como referência. Embora algumas empresas ofereçam cursos pagos sobre o tema, o custo dessas opções pode ser proibitivo para muitos profissionais em busca de conhecimento atualizado.

Diante desse cenário, este trabalho contribui ao fornecer uma fonte de informação acessível e abrangente, que aborda as aplicações práticas dos métodos de Faraday, Franklin e Eletrogeométrico, além de apresentar diferentes combinações de materiais e suas respectivas quantidades. Isso permite aos projetistas explorarem opções mais adequadas e econômicas para a implementação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Recomenda-se que futuros estudos continuem a expandir esse campo de pesquisa, fornecendo ainda mais exemplos práticos e atualizados para auxiliar os profissionais na aplicação eficaz da norma ABNT NBR 5419. Além disso, é fundamental que órgãos responsáveis e instituições acadêmicas se engajem na atualização e divulgação de informações relevantes sobre a norma, promovendo um melhor entendimento e facilitando a sua aplicação segura e eficiente.

Em última análise, este trabalho contribui para preencher uma lacuna de informações práticas na área de projetos de SPDA, capacitando os profissionais a tomarem decisões embasadas e personalizadas em relação aos materiais e quantidades a serem utilizados. Ao facilitar a compreensão e aplicação da norma, espera-se que a segurança contra descargas atmosféricas seja aprimorada, protegendo efetivamente as edificações e seus ocupantes.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT. **ABNT NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas: Princípios gerais**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a. . Acesso em: 22 dez. 2021.
- ABNT. **ABNT NBR 5419-2: Proteção contra descargas atmosféricas: Gerenciamento de risco**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.
- ABNT. **ABNT NBR 5419-3: Proteção contra descargas atmosféricas: Danos físicos a estruturas e perigos à vida**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015c. . Acesso em: 22 dez. 2021.
- ABNT. **ABNT NBR 5419-4: Proteção contra descargas atmosféricas: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015d.
- CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. **N-321.0001: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição**. Florianópolis: Celesc Distribuição S.A, 2019. . Acesso em: 21 dez. 2021.
- COORAY, V. **Lightning Protection**. 1. ed. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- DEKKER, A. J. **Electrical Engineering Materials**. New Delhi: Prentice-Hall, 1994(Prentice-Hall Electrical Engineering Series).
- EARLE R., W. The electrification of thunderstorms. [S. l.], 2001.
- EDUARDO MARCON KAFER. **SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA UMA INDÚSTRIA TÊXTIL: ESTUDO DE CASO**. 2018. 119 f. Monografia – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. . Acesso em: 22 dez. 2021.
- EMBRAPA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. dez. 2004. **Solos do Estado de Santa Catarina**. . Acesso em: 21 dez. 2021.
- EMF ENGENHARIA E SERVIÇOS TÉCNICOS. jun. 2023. **Danos causados por descargas atmosféricas**. Disponível em: <https://emf-engenharia.com.br/>.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. 4. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2017.
- KINDERMANN, G. **Descargas Atmosféricas**. 3. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2002.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- MELLO, C. A. **Proteção contra descargas atmosféricas: práticas e fundamentos teóricos**. São Paulo: Érica, 2017.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2021. Disponível em: <http://inpe.br/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR-10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade**. 4. ed. Brasília: Comissão Permanente Nacional sobre Segurança em Energia Elétrica, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-10-nr-10>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MODENA, J. **Quem disse que para-raio atrai o raio?** 1 jun. 2021. **O Setor Elétrico**. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/quem-disse-que-para-raio-atrai-o-raio-2/>. Acesso em: 21 dez. 2021.

PELLEGRINO. **Descargas Atmosféricas: Teoria, Prática e Estudos de Caso**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

SENADO FEDERAL. **Código de Defesa do Consumidor e normas correlatas**. 2. ed. Brasília: Coordenação de Edições Técnicas, 2017. Disponível em: [https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/533814/cdc\\_e\\_normas\\_correlatas\\_2ed.pdf](https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/533814/cdc_e_normas_correlatas_2ed.pdf).

TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS. Termotécnica Para-raios. 2022. **Termotécnica Para-raios**. [Revenda de equipamentos, fornecimento de projetos de engenharia, consultoria e treinamentos, em conformidade com as normas NBR5410, NBR5419 e NR10.]. Disponível em: <https://tel.com.br/>. Acesso em: 8 jan. 2022.

VISACRO FILHO, S. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

## **APÊNDICE A – Análise do Projeto Base Desenvolvido por Kafer**

O trabalho de conclusão de curso de Kafer (2018) submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, teve como objetivo realizar um levantamento técnico para a implementação de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (PDA) em um galpão industrial do ramo empresarial têxtil, localizado no município de Concórdia - SC. Durante a verificação das condições gerais da edificação, foi constatado que não havia nenhum sistema de proteção instalado, o que resultou em danos em equipamentos eletroeletrônicos da empresa após uma tempestade noturna.

O galpão industrial em questão possui um alto valor de investimento, estimado em mais de 1,7 milhões de reais, contendo desde máquinas e equipamentos elétricos até materiais para confecção de enxovais para bebês e vestuários para animais de estimação. Tanto o escritório administrativo quanto a cadeia produtiva estão localizados no mesmo imóvel, e cerca de 20 funcionários e diversos fornecedores frequentam o local diariamente. Além disso, a indústria está localizada em uma colina elevada, com índice cerâmico consideravelmente alto para a região (EMBRAPA, 2004).

É importante ressaltar que a densidade de descargas atmosféricas para a terra, também conhecida por índice cerâmico, é um parâmetro que indica a quantidade de descargas atmosféricas registradas por quilômetro quadrado ao longo de um ano. O mapa de densidade de descargas atmosféricas foi gerado pelo ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2021) para todo o território nacional, sendo considerado para todos os cálculos propostos pela norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b). A região de Concórdia apresentava um nível cerâmico superior a 10 descargas/km<sup>2</sup>/ano, conforme mapa contido no Apêndice P.

Para a elaboração do projeto de PDA, foram realizados levantamentos das características locais do solo, análises de riscos e definição de medidas de proteção. Além disso, foram dimensionados os sistemas contra descargas atmosféricas e de aterramento para a unidade fabril. A matéria-prima utilizada no processo fabril é predominantemente formada por espumas e tecidos de algodão.

Dessa forma, o projeto desenvolvido por Kafer (2018) teve como objetivo garantir a segurança do galpão industrial e dos funcionários, bem como evitar prejuízos financeiros causados por danos em equipamentos eletroeletrônicos, por meio da implementação de um SPDA adequado.

## A.1 Características Gerais da Instalação

A descrição contida no trabalho de Kafer (2018) revela as principais características estruturais do galpão industrial que foi objeto do projeto de PDA desenvolvido por ele. Segundo a descrição, o galpão consistia em um edifício de dois andares com base retangular, construído em concreto. O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades mecânicas, tais como alta resistência à compressão, durabilidade e facilidade de moldagem.

As características estruturais do edifício são importantes para a realização de um projeto de PDA, pois é necessário considerar a forma, a geometria e os materiais utilizados na construção para dimensionar adequadamente os sistemas de proteção. Na Tabela A 1, apresentada no trabalho de Kafer (2018), constam informações como a área total do edifício, a altura, a espessura das paredes, o tipo de cobertura, o tipo de laje, entre outras características importantes para o dimensionamento do SPDA.

Tabela A 1 - Principais aspectos estruturais da edificação

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidades/materiais</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Comprimento	m	L	13,95
Largura	m	W	31,2
Altura	m	H	7,6
Altura máxima	m	H <sub>max</sub>	8,8
Elevação máxima do terreno	m	$\Delta E_T$	11,90
Área interna	m <sup>2</sup>	A <sub>D</sub>	435,24
Área externa relevante	m <sup>2</sup>	A <sub>EXT</sub>	439,41
Material das paredes	Concreto	-	-
Material do telhado	Zinco	-	-
Material das esquadrihas	Alumínio	-	-
Material do piso	Concreto	-	-

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Além disso, é importante destacar que a avaliação das características estruturais do edifício deve ser feita em conjunto com a análise das características ambientais, tais como a densidade de descargas atmosféricas da região, o tipo de solo, a presença de árvores ou outras

estruturas próximas, entre outros fatores que podem influenciar na efetividade do sistema de proteção. Todos esses aspectos devem ser considerados na elaboração de um projeto de PDA adequado e eficiente

Kafer (2018) analisou as linhas de energia elétrica que alimentam a edificação objeto do estudo, a fim de avaliar o seu estado e garantir que o SPDA fosse dimensionado de forma adequada. Para isso, ele levantou informações como a tensão nominal, a corrente nominal, a seção transversal dos condutores e a altura em relação ao solo das linhas de energia elétrica.

Esses dados são importantes porque influenciam na escolha dos materiais e no dimensionamento do SPDA. Por exemplo, a altura das linhas em relação ao solo pode determinar se é necessária a instalação de um sistema de captação superior, como hastes captoras ou mastros, ou se é suficiente a proteção por meio de condutores de descida conectados diretamente à estrutura do prédio.

A Tabela A 2 extraída de (KAFER, 2018) apresenta as principais informações coletadas sobre as linhas de energia elétrica, que foram utilizadas para o dimensionamento do SPDA no projeto desenvolvido pelo autor.

Tabela A 2 - Principais aspectos da linha de energia

<b>Parâmetros</b>	<b>Comentário</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Comprimento	Valor assumido em m	$L_L$	1000
Fator de Instalação	Aérea	$C_I$	1
Fator tipo da linha	Energia	$C_T$	1
Fator ambiental	Suburbano	$C_E$	0,5
Blindagem da linha	N/A	$r_s$	1
Blindagem/isolação	N/A	$C_{LD}$	1
Estrutura adjacente	Valor assumido em $m^2$	$A_{DJ}$	250
Fator de localização	Isolado	$C_{DJ}$	1
Tensão suportável (KV)	-	$U_W$	2,5

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Conforme a Tabela A 2, o "N/A" é uma abreviação em inglês que significa "*Not Applicable*" ou "Não Aplicável", em português, e é utilizada para indicar que uma determinada informação ou questão não se aplica a uma determinada situação, contexto ou caso específico. Nesse sentido, no caso em questão, o fato de o "N/A" aparecer na tabela indica que nenhum comentário é aplicável sobre a blindagem ou isolamento da linha.

De acordo com Kafer (2018), a alimentação elétrica era formada por uma linha aérea trifásica de 220/380V, que partia do transformador externo à instalação. Por conseguinte, a unidade industrial possuía uma carga de aproximadamente 50 kW. Diante disso, o fator de instalação da linha define o parâmetro  $C_I$ , conforme Tabela A.2 da ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), que sinaliza que a linha de energia é roteada em uma configuração aérea. O fator tipo de linha define o parâmetro  $C_T$ , conforme Tabela A.3 da ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), que indica que a instalação se destina à energia elétrica ou sinais elétricos, e neste contexto específico, se refere à energia elétrica. A área de exposição equivalente da estrutura adjacente é uma medida da superfície da estrutura que pode ser diretamente atingida por uma descarga atmosférica. Essa medida é expressa em metros quadrados e é utilizada para calcular o NP necessário para a estrutura adjacente. No trabalho de Kafer (2018), o valor da área foi assumido em  $250 \text{ m}^2$ .

Em obediência à norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), se o comprimento da seção da linha não for conhecido, é possível adotar um valor padrão de  $L_L = 1000 \text{ m}$ . Acrescentando a isso, a tensão suportável de impulso  $U_W$  é definida pelo fabricante de um equipamento ou de uma parte dele, e representa a capacidade específica da isolação do equipamento para suportar sobretensões transitórias. É importante notar que, para os efeitos da norma, apenas a tensão suportável entre os condutores vivos e a terra é considerada.

Nesse contexto, a Tabela 31 - Suportabilidade a impulso exigível dos componentes da instalação da ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004) apresenta o valor da tensão de impulso suportável requerida (kV) em função do nível de tensão nominal da instalação (V).

A suportabilidade a impulsos é a capacidade de um sistema elétrico resistir a sobretensões transitórias de curta duração causadas por descargas atmosféricas ou manobras de chaveamento na rede elétrica. Essas sobretensões podem danificar os equipamentos elétricos e eletrônicos conectados ao sistema.

A ABNT (2004) define as categorias de produtos e os níveis de suportabilidade a impulsos para os sistemas elétricos. No caso específico, em que o sistema é trifásico da ordem 220/380, 230/400, 277/480 e se trata de equipamentos de utilização em uma indústria, a categoria de produto é a II e o valor de tensão de impulso suportável requerida é de 2,5 kV.

Assim, para este tipo de sistema, é necessário garantir que ele seja capaz de suportar uma sobretensão transitória de pelo menos 2,5 kV para garantir a proteção dos equipamentos conectados a ele.

No tocante aos equipamentos de trabalho, a companhia operava com 15 máquinas de costura elétricas, um infestador de espuma automático, uma estação de bordados industrial, um compressor de ar, quatro vaporizadores de roupas e outros pequenos equipamentos que pouco impactavam na carga. Foi verificado que o único aterramento instalado no imóvel era composto por uma haste de terra instalada adjacente à entrada de energia (ramal de entrada) (Kafer, 2018, p. 36)

De acordo com Kafer (2018), não há, na unidade fabril, dispositivos de proteção contra surtos (DPS) instalados no quadro geral de baixa tensão (QGBT) ou quadro de distribuição. Entretanto, a concessionária de energia da região estabelece, em norma, a obrigatoriedade de instalação de um DPS em toda unidade consumidora, instalado na caixa de medição. Ademais, não foram encontrados sistemas externos de proteção, isto porque o galpão foi inspecionado na área externa, sendo também analisado o projeto em planta baixa (CELESC, 2019).

Para ponderar o risco de perda econômica, a edificação, seus equipamentos e materiais foram avaliados monetariamente no trabalho (KAFER, 2018), sendo que o imóvel foi estimado em R\$ 800 mil, com um inventário de aproximadamente R\$ 1,7 milhões, conforme a Tabela A 3. É importante ressaltar que alguns dos valores foram estimados e outros fornecidos com auxílio da companhia. Apesar do risco de perda econômica ser evidente, não foi feita uma análise de custo completa pelo autor.

Tabela A 3 - Relação dos bens contidos na edificação

<b>Equipamentos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
Máquina de costura	15	R\$3.200,00	R\$48.000,00
Infestador automático	1	R\$750.000,00	R\$750.000,00
Estação de bordados	1	R\$350.000,00	R\$350.000,00
Vaporizador de roupas	4	R\$500,00	R\$ 2.000,00
Compressor de ar	1	R\$2.800,00	R\$2.800,00
Ar-condicionado	4	R\$2.500,00	R\$10.000,00
Ventilador	4	R\$500,00	R\$2.000,00
Computador	9	R\$2.000,00	R\$18.000,00

CPU integrada	1	R\$16.000,00	R\$16.000,00
Equipamentos de suporte	-	R\$30.000,00	R\$30.000,00
Estoque de matéria prima	-	R\$450.000,00	R\$450.000,00
<b>Total</b>			<b>R\$1.678.800,00</b>

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

A análise de risco é uma etapa importante do processo de implementação do SPDA, que visa identificar as áreas que precisam de proteção e definir as medidas adequadas para minimizar os efeitos das descargas atmosféricas. O procedimento contido na norma é aplicado em todas as edificações e instalações industriais para garantir a proteção contra raios.

Na unidade fabril, Kafer (2018) aplicou o procedimento contido na norma para identificar as áreas que precisam de proteção. Para isso, ele identificou os tipos de perdas relativas às zonas da propriedade industrial, e para a unidade em questão, foi considerada somente uma zona de proteção, consistindo em seu interior.

As perdas aplicáveis para fábrica foram identificadas e dispostas na Tabela A 4. Com base nessa análise de risco, foram definidas as medidas de proteção adequadas para minimizar os efeitos das descargas atmosféricas na unidade fabril, garantindo a segurança de pessoas e proteção de equipamentos, instalações e materiais.

Tabela A 4 - Perdas consideradas para a unidade fabril

<b>Perdas Aplicáveis</b>	<b>Descrição</b>
L1	Perda de vida humana
L4	Perda de valor econômico

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Seguindo as orientações da ABNT (2015) em função das perdas avaliadas e apresentadas pela Tabela A 4, Kafer (2018) listou os riscos associados, conforme a Tabela A 5.

Tabela A 5 - Riscos considerados para a unidade fabril

<b>Riscos Aplicáveis</b>	<b>Descrição</b>
$R_1$	Risco de perda de vida humana
$R_4$	Risco de perda de valor econômico

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Após a avaliação das perdas, os riscos foram quantificados e as componentes individuais de cada um foram determinadas utilizando a Equação (6). Os valores das componentes estão listados na Tabela A 6.

Tabela A 6 - Componentes individuais dos riscos considerados para a unidade fabril

<b>Componentes</b>	<b>Risco</b>
$R_A, R_B, R_U, R_V$	$R_1$
$R_B, R_C, R_M, R_V, R_W, R_Z$	$R_4$

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Com os riscos calculados, estes precisam ser comparados aos riscos toleráveis da Tabela 4. Logicamente, serão relevantes somente os valores de risco para as perdas L1 e L4, tais como  $10^{-5}$  e  $10^{-2}$ , respectivamente. A norma brasileira (ABNT, 2015), estabelece que, caso os valores sejam maiores que os toleráveis, medidas de proteção precisam ser aplicadas com o intuito de minimizar as componentes de risco de considerável relevância.

Uma vez que os ajustes e escolha das medidas de proteção utilizam as informações provenientes da análise de risco, é importante ter um sistema automático para realizar os cálculos, com o intuito de permitir que o projetista de SPDA possa avaliar várias alternativas simultaneamente. Para isso, Kafer (2018) desenvolveu uma planilha em Excel que permite automatizar e gerir todo o processo metodológico. Além disso, os parâmetros de entrada foram subdivididos em grupos, apresentados pela Tabela A 7.

Tabela A 7 - Parâmetros de entrada em grupos

<b>Características</b>	<b>Referência</b>
Da estrutura	Tabela A 8
Da linha de energia	Tabela A 9
Da linha de sinal	Tabela A 10
Da zona de proteção	Tabela A 11

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Com base na classificação mostrada na Tabela A 7, a Tabela A 8, a Tabela A 9 e a

e a Tabela A 11 fornecem informações de entrada para alimentar a planilha em Excel criada por Kafer (2018). As tabelas referenciadas através das Tabela A 7 contêm os parâmetros relativos à estrutura, à linha de energia, à linha de sinal e à zona de proteção, conforme descrito em seu trabalho. A linha de energia é composta por cabos condutores que interligam os sistemas elétricos da estrutura ao sistema de aterramento do SPDA. Ela é responsável por transmitir a energia elétrica de forma segura e eficiente, garantindo que os equipamentos elétricos e eletrônicos funcionem adequadamente e evitando a ocorrência de danos ou falhas no sistema elétrico da estrutura. A linha de sinal é composta por cabos de baixa tensão e baixa corrente que interligam os equipamentos à terra. A presença da linha de sinal é essencial para garantir a integridade e o bom funcionamento dos equipamentos eletrônicos e de telecomunicações.

Tabela A 8 - Parâmetros característicos da estrutura

<b>Parâmetros de Entrada</b>	<b>Comentário</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Densidade de descargas atmosféricas (1/km <sup>2</sup> /ano)	Elevado	N <sub>G</sub>	10,3
Comprimento da estrutura	m	L	13,95
Largura da estrutura	m	W	31,20
Altura da estrutura	m	H	8,8
Fator de localização	Estrutura parcialmente isolada em colina	C <sub>D</sub>	1
SPDA	N/A	P <sub>B</sub>	1
Ligação equipotencial	Sem DPS	P <sub>EB</sub>	1
Blindagem espacial externa	Sem Blindagem	K <sub>S1</sub>	1

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Pela Tabela A 8, a blindagem espacial é um conjunto de medidas que incluem uma ou mais zonas de proteção contra raios, com o objetivo de proteger vários elementos de um mesmo local. Geralmente, essa proteção é realizada por meio de componentes metálicos interconectados da estrutura ou por grades metálicas instaladas com essa finalidade durante a construção. Em seu trabalho, Kafer (2018) considerou a inexistência de blindagem espacial externa na estrutura, assumindo o valor de  $K_{S1}$  máximo, de acordo com a norma brasileira (ABNT, 2015b).

Tabela A 9 - Parâmetros característicos da linha de energia.

<b>Parâmetros de Entrada</b>	<b>Comentário</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Comprimento (m)	Valor assumido	$L_L$	1000
Fator de instalação	Aérea	$C_I$	1
Fator tipo da linha	Sinal	$C_T$	1
Fator ambiental	Suburbano	$C_E$	0,5
Blindagem da linha ( $\Omega/\text{Km}$ )	N/A	$R_S$	1
Blindagem, aterramento, isolação	N/A	$C_{LD}$	1
Tensão suportável do sistema interno	-	$U_W$	2,5

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Tabela A 10 - Parâmetros característicos da linha de sinal

<b>Parâmetros de Entrada</b>	<b>Comentário</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Comprimento (m)	Valor assumido	$L_L$	1000
Fator de instalação	Aérea	$C_I$	1
Fator tipo da linha	Sinal	$C_T$	1
Fator ambiental	Suburbano	$C_E$	0,5
Blindagem da linha ( $\Omega/\text{Km}$ )	N/A	$R_S$	1
Blindagem, aterramento, isolação	N/A	$C_{LD}$	1
Tensão suportável do sistema interno	-	$U_W$	1,5

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

A blindagem da linha em SPDA, segundo a norma brasileira (ABNT, 2015), refere-se à aplicação de um revestimento condutor em cabos, conduítes e demais elementos que compõem a linha de captação do sistema. Esse revestimento tem como objetivo proporcionar uma camada extra de PDA, minimizando os efeitos de sobretensão e corrente elétrica gerados pela passagem de um raio.

Seguindo a mesma análise do ponto de vista da estrutura, Kafer (2018) considerou a inexistência de qualquer blindagem, tanto na linha de energia quanto na linha de sinal,

assumindo o valor máximo dos parâmetros na Tabela A 9, Tabela A 10 e Tabela A 11, de acordo com ABNT NBR 5419 (ABNT, 2015b).

Tabela A 11 - Parâmetros característicos da zona de proteção

Parâmetros de Entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Superfície do piso	Concreto	$r_t$	$10^{-2}$
Proteção contra choque na estrutura	Não há	$P_{TA}$	1
Proteção contra choque na linha	Não há	$P_{TU}$	1
Risco de incêndio	Normal	$r_f$	$10^{-2}$
Fiação interna de energia	Não blindada	$K_{S3}$	1
DPS coordenados na entrada de energia	Não há	$P_{SPD}$	1
Fiação interna de sinal	Não blindada	$K_{S3}$	1
DPS coordenados na entrada de sinal	Não há	$P_{SPD}$	1
Blindagem interna	Não blindada	$K_{S2}$	1
	Perigo especial	$h_z$	-
L1: perda de vida humana	D1: tensão de toque e passo	$L_T$	$10^{-2}$
	D2: devido a danos físicos	$L_F$	$2 \times 10^{-2}$
	D3: falha de sistema internos	$L_O$	-
L4: perda de valor econômico	D2: devido a danos físicos	$L_F$	0,5
	D3: falha de sistemas internos	$L_O$	$10^{-2}$
Número de pessoas	Na zona de proteção	$n_z$	25
Número de pessoas	Em toda a estrutura	$n_t$	25
Tempo na estrutura	Por pessoa	$t_z$	2170

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

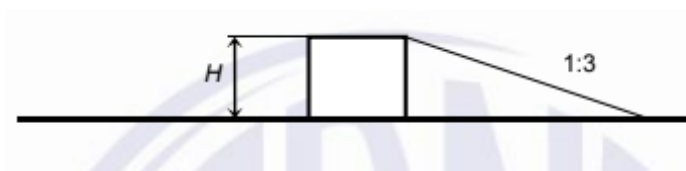
Conforme a norma ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), o símbolo  $t_z$ , presente na Tabela A 11, representa o tempo em horas por ano que pessoas permanecem em um local perigoso. Com base nisso, Kafer (2018) assumiu que, em média, uma única pessoa permanece na unidade fabril por 5,95 horas por dia, durante os 365 dias do ano.

A área de exposição equivalente da estrutura foi calculada por Kafer (2018) através da Equação (A 1), em que as variáveis descritas representam os valores das dimensões da unidade fabril, dispostos na Tabela A 8, já apresentada.

$$A_D = L \times W + 6 \times H \times L \times W + \pi \times (3 \times H)^2 \quad (\text{A } 1)$$

Após o cálculo, foi obtido um valor de área  $A_D = 24145,75 \text{ m}^2$ . Desta maneira, como é uma estrutura como formato retangular simples, baseado em Kafer (2018), o valor de H pode ser representado como a altura máxima, conforme o item A.2.1.1 Estrutura retangular da Seção A.2, do Anexo A da ABNT (2015) e ilustrado na Figura A 1.

Figura A 1 - Estrutura retangular



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5419-3, 2015.

Conforme ABNT (2015), o valor de eventos perigosos pode ser calculado pelo produto entre a área equivalente específica  $A_x$ , a densidade de descargas atmosféricas  $N_G$  e as constantes associadas às propriedades da estrutura  $K$ , conforme a Equação (A 2) abaixo.

$$N_X = A_X \times N_G \times K \quad (\text{A } 2)$$

em que  $N_X$  pode assumir diferentes valores em função da área equivalente que o corresponde, de acordo com a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b). A Tabela A 12 apresenta os valores de cada  $N_X$  extraídos da planilha de análise e gerenciamento de risco em Excel desenvolvida por Kafer (2018) e os valores totais estão dispostos posteriormente na Tabela A 13.

Tabela A 12 - Número de eventos perigosos calculados pela análise de risco

Nº eventos perigosos	Ponto de impacto	$N_G$	$A_D$	$A_{DJ}$	$A_M$	$A_L$	$A_I$	$C_D$	$C_{DJ}$	$C_T$	$C_I$	$C_E$
$N_D$	Na estrutura	10,3	24.145,7453	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-
$N_{DJ}$	Estrutura adja	10,3	-	-	-	-	-	-	0,5	1,0	-	-
$N_M$	Próx. à estrutura	10,3	-	-	830.525,0	-	-	-	-	-	-	-

$N_L$	Na linha	10,3	-	-	-	40.000,0	-	-	-	1,0	1,0	0,5
$N_I$	Próx. à linha	10,3	-	-	-	-	2.000.000,0	-	-	1,0	1,0	0,5

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Tabela A 13 - Número de eventos perigosos para cada ponto de impacto

Nº eventos perigosos	Total
$N_D$	0,497402
$N_{DJ}$	5,15
$N_M$	8,554408
$N_L$	0,206
$N_I$	10,30

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Após determinado o número de eventos perigosos a cada ponto de impacto, o próximo passo, de acordo com a Equação (6) proposta pela norma (ABNT, 2015) e aplicado por Kafer (2018), foi determinar as probabilidades de danos  $P_X$  disponibilizadas no Anexo B da norma (ABNT, 2015b). Estas probabilidades são aproximações estatísticas influenciadas, de modo geral, pela existência de medidas de proteção na estrutura.

## A.2 Probabilidade $P_A$ de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico

Seguindo os preceitos da norma brasileira (ABNT, 2015), o valor de probabilidade  $P_A$  de choque a seres vivos devido à tensão de toque e passo por uma descarga atmosférica em uma estrutura, dependem do SPDA adotado e das medidas de proteção adicionais e é definido pela Equação (A 3):

$$P_A = P_{TA} \times P_B \quad (\text{A } 3)$$

em que  $P_{TA}$  depende das medidas de proteção suplementares contra tensões de toque e de passo e  $P_B$  depende do NP contra raios (NP) para o qual o SPDA foi projetado de acordo com a norma (ABNT, 2015). Os valores de  $P_{TA}$  são apresentados pela Tabela A 14. Como não há medida de proteção adicional na estrutura, o valor de  $P_{TA} = 1$ .

Tabela A 14 - Valores de probabilidade  $P_{TA}$  de uma descarga atmosférica em uma estrutura

<b>Medida de proteção adicional</b>	$P_{TA}$
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	$10^{-2}$
Isolação elétrica (por exemplo, de pelo menos 3 mm de polietileno reticulado das partes expostas (por exemplo, condutores de descidas)	$10^{-2}$
Equipotencialização efetiva do solo	$10^{-3}$
Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida	0

Fonte: Extraído de ABNT NBR 5419-2, 2015.

### A.3 Probabilidade $P_B$ de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos

Um SPDA é oportuno como medida de proteção a fim de reduzir  $P_B$ . Entretanto, como a estrutura não está protegida por SPDA, o valor de  $P_B = 1$ , de acordo com a Tabela A 15. Desta forma, voltando à Equação (A 3), o valor calculado de  $P_A = 1$ .

Tabela A 15 - Valores de probabilidade  $P_B$  dependendo das medidas de proteção para reduzir

<b>Características da estrutura</b>	<b>Classe do SPDA</b>	$P_B$
Estrutura não protegida por SPDA	-	1
	IV	0,2
Estrutura protegida por SPDA	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Estrutura com subsistema de captação conforme SPDA Classe I e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descida natural		0,01
Estrutura com cobertura metálica e um subsistema de captação, possivelmente incluindo componentes naturais, com proteção completa de qualquer instalação na cobertura contra descargas atmosféricas diretas e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descidas natural		0,001

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2 (2015).

#### A.4 Probabilidade $P_C$ de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falha a sistemas internos

Um sistema que inclua DPS coordenado é satisfatório como uma medida de proteção para diminuir o valor de  $P_C$ . Em concordância com a norma brasileira (ABNT, 2015), a probabilidade  $P_C$  de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falha dos sistemas internos é dada pela Equação (A 4):

$$P_C = P_{SPD} \times C_{LD} \quad (\text{A } 4)$$

em que  $P_{SPD}$  depende do sistema coordenado de DPS conforme a Tabela A 16 e do NP contra raios (NP) para o qual os DPS foram projetados. Como não há sistema com DPS coordenado instalado, segundo Kafer (2018), o valor de  $P_{SPD} = 1$ .

Tabela A 16 - Valores de probabilidade de  $P_{SPD}$  em função do NP para o qual os DPS foram projetados

NP	$P_{SPD}$
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
NOTA 2	0,005 - 0,001

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Já  $C_{LD}$  é um fator que depende das condições de blindagem da linha a qual está ligada ao sistema interno. A Tabela A 17 dispõe dos valores de  $C_{LD}$ . Para esta análise em específico, foi considerado que a linha aérea não é blindada. Dessa forma, o valor de  $C_{LD} = 1$ .

Tabela A 17 - Valores dos fatores e dependendo das condições de blindagem

Tipo de linha externa	Conexão na entrada	$C_{LD}$	$C_{LI}$
Linha aérea não blindada	Indefinida	1	1
Linha enterrada não blindada	Indefinida	1	1
Linha de energia com neutro multiterrado	Nenhuma	1	0,2

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2, 2015.

## A.5 Probabilidade $P_M$ de uma descarga atmosférica perto de uma estrutura causar falha em sistemas internos

### A.5.1 Para a Linha de Energia

A probabilidade  $P_M$  de uma descarga elétrica próxima a uma edificação ocasionar danos em sistemas internos é determinada pelas MPS implementadas. Nesse sentido, caso não seja instalado um sistema coordenado de DPSs em conformidade com as exigências da norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), o valor de  $P_M$  deve ser igual a  $P_{MS}$ . Ademais, como já mencionado, o valor de  $P_{SPD}$  é de 1. O valor de  $P_M$  é ser dado pela Equação (A 5):

$$P_M = P_{SPD} \times P_{MS} \quad (\text{A } 5)$$

em que a Equação (A 6) pode ser reescrita através da Equação (A 6):

$$P_M = P_{MS} \quad (\text{A } 6)$$

onde o valor de  $P_{MS}$  é dado pela Equação (A 7):

$$(P_{MS} = K_{S1} \times K_{S2} \times K_{S3} \times K_{S4})^2 \quad (\text{A } 7)$$

em que  $K_{S1}$  e  $K_{S2}$  são relativos à blindagem por malha da estrutura. Os valores de  $K_{S1}$  e  $K_{S2}$  são dados pelas Equações (A 8) e (A 9):

$$K_{S1} = 0,12 \times w_{m1} \quad (\text{A } 8)$$

$$K_{S2} = 0,12 \times w_{m2} \quad (\text{A } 9)$$

em que a largura da blindagem em forma de grade ou dos condutores de descidas do SPDA tipo malha é representada por  $w_{m1}$  (m), enquanto a largura entre as colunas metálicas da estrutura ou o espaçamento entre as estruturas de concreto armado atuando como um SPDA natural é representado por  $w_{m2}$  (m).

Entretanto, tratando-se de condições de blindagem, para este trabalho, foram consideradas indefinidas ou inexistentes e por este motivo, os valores de  $K_{S1}$  e  $K_{S2}$  serão limitados a 1, que é o máximo permitido por norma, consistindo na medida mais conservadora possível. O valor de  $K_{S3}$  é fornecido pela Tabela A 18, em que o tipo de fiação interna é cabo não blindado e não há preocupação no roteamento no sentido de evitar laços e, dessa forma, o valor assumido de  $K_{S3} = 1$ .

Tabela A 18 - Valor do fator  $K_{S3}$  dependendo da fiação interna

<b>Tipo de fiação interna</b>	$K_{S3}$
Cabo não blindado – sem preocupação no roteamento no sentido de evitar l	1
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes	0,2
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar	0,01
Cabos blindados e cabos instalados em eletrodutos	0,0001

<sup>a</sup> Condutores em laço com diferentes roteamentos em grandes edifícios (área do laço da ordem de 50 m<sup>2</sup>).

<sup>b</sup> Condutores em laço roteados em um mesmo eletroduto ou condutores em laço com diferentes roteamentos em edifícios pequenos (área do laço da ordem de 10 m<sup>2</sup>).

<sup>c</sup> Condutores em laço roteados em um mesmo cabo (área do laço da ordem de 0,5 m<sup>2</sup>).

<sup>d</sup> Blindados e eletrodutos metálicos interligados a um barramento de equipotencialização em ambas extremidades e equipamentos estão conectados no mesmo barramento equipotencialização.

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2, 2015.

Por último, o fator  $K_{S4}$  é determinado pela Equação (A 10):

$$K_{S4} = \frac{1}{U_W} \quad (\text{A } 10)$$

em que  $U_W$  é a tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido, expressa em quilovolts (kV) e definida pela Tabela A 19 que resume os valores para as linhas de energia e sinal.

Tabela A 19 - Tensão suportável de impulso para as linhas de energia e sinal

<b>Tipo de linha</b>	$U_W$ (KV)
Energia	2,5
Sinal	1,5

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5410 (2004).

Com base na Equação (A 10) e na Tabela A 19, o valor de  $K_{S4}$  para a linha de energia é 0,4.

Retornando à Equação (A 7), tem-se que  $P_{MS} = 0,16$  e, portanto,  $P_M = 0,16$ , conforme Equação (A 6).

### ***A.5.2 Para a Linha de Sinal***

Seguindo a lógica anterior, podemos concluir que haverá mudança somente no valor de  $P_M$  para a linha, dado que a tensão suportável de impulso para a linha de sinal é menor. A tensão suportável de impulso para a linha de sinal é geralmente menor do que a da linha de energia devido às diferenças na natureza dos equipamentos protegidos por essas linhas. A linha de energia é responsável por fornecer energia elétrica para a estrutura e, portanto, precisa suportar altas tensões para garantir a continuidade do fornecimento de energia (TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS, 2022).

Por outro lado, a linha de sinal é responsável por proteger equipamentos eletrônicos e de telecomunicações que possuem uma sensibilidade maior a surtos elétricos e, portanto, precisam de uma proteção mais sensível. Esses equipamentos geralmente não suportam altas tensões e, portanto, a tensão suportável de impulso para a linha de sinal precisa ser menor para evitar danos aos equipamentos protegidos.

Além disso, as normas técnicas específicas para PDA estabelecem diferentes critérios para a seleção da tensão suportável de impulso para cada tipo de linha. A norma brasileira (ABNT, 2015b), por exemplo, estabelece que a tensão suportável de impulso para a linha de sinal deve ser de pelo menos 1,5 kV, enquanto a tensão suportável de impulso para a linha de energia deve ser de pelo menos 2,5 kV, como mostrado na Tabela A 19. Com base na Equação (A 10), o valor de  $K_{S4}$  para a linha de energia é  $\frac{2}{3}$ .

Retornando à Equação (A 7), e substituindo o valor de  $K_{S4}$ , tem-se que  $P_{MS} = \frac{4}{9}$  e, portanto:

$$P_M = \frac{4}{9} \approx 0,44.$$

### A.6 Probabilidade $P_U$ de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico

Em conformidade com a ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), os valores de probabilidade de ferimentos a seres vivos dentro da estrutura devido à tensão de toque por uma descarga atmosférica em uma linha que adentra à estrutura dependem das características da blindagem da linha, da tensão suportável de impulso dos sistemas internos conectados à linha, das medidas de proteção como restrições físicas ou avisos visíveis de alerta e interfaces isolantes ou DPS utilizados para ligação equipotencial na entrada da linha de acordo com a norma (ABNT, 2015b). O valor de  $P_U$  pode ser calculado pela Equação (A 11):

$$P_U = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} \quad (\text{A 11})$$

em que  $P_{TU}$  depende das medidas de proteção implantadas contra tensões de toque, como restrições físicas ou avisos visíveis de alerta. A Tabela A 20 fornece os valores de  $P_{TU}$ . Como não há medida de proteção instalada na estrutura, o valor assumido de  $P_{TU} = 1$ .

Tabela A 20 - Valores da probabilidade  $P_{TU}$  de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas

<b>Medida de proteção</b>	$P_{TU}$
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos visíveis de alerta	$10^{-1}$
Isolação elétrica	$10^{-2}$
Restrições físicas	0

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2, 2015.

A variável  $P_{EB}$  depende das ligações equipotenciais para descargas atmosféricas, conforme norma (ABNT, 2015b), e do NP contra descargas atmosféricas para o qual o DPS foi projetado, conforme Tabela A 21. Assumindo que não haja nenhum DPS instalado na estrutura, é importante notar que a probabilidade de ocorrência de um evento de dano por descarga atmosférica direta (DAD) é relativamente alta. Em consequência, o valor da probabilidade de

ocorrência de falha do SPDA devido a uma descarga atmosférica direta é  $P_{EB} = 1$ , o que significa que a estrutura não estaria adequadamente protegida contra surtos elétricos.

Tabela A 21 - Valor da probabilidade  $P_{EB}$  em função do NP para o qual o sistema DPS ou os dispositivos DPS ou ainda os DPSs foram projetados

NP	$P_{EB}$
Sem DPS	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
NOTA 4	0,005 – 0,001

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2 (2015).

Por outro lado, a probabilidade de falha de sistemas internos devido a descargas atmosféricas na linha conectada é indicada por  $P_{LD}$ . Os valores de  $P_{LD}$  são apresentados na Tabela A 22, em que é igual a 1 para ambos os tipos de linha. Por fim,  $C_{LD}$  é um fator que varia de acordo com a blindagem, o aterramento e as condições de isolamento da linha. Os valores de  $C_{LD}$  são apresentados na Tabela A 17. Considerando que a linha aérea não possui blindagem,  $C_{LD}$  é igual a 1. Retornando à Equação (A 11), o valor calculado para ambos os tipos de linha é  $P_U = 1$ .

Tabela A 22 - Valores da probabilidade  $P_{LD}$  dependendo da resistência  $R_S$  da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso  $U_W$  do equipamento

Tipo da linha	Condições do roteamento, blindagem e interligação	Tensão suportável $U_W$ em kV				
		1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia ou sinal	Linha aérea ou enterrada, não blindada ou com a blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento	1	1	1	1	1

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2 (2015).

#### A.7 Probabilidade $P_V$ de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos

De acordo com a regulamentação da ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), os índices de chance de danos físicos  $P_V$  devido a uma descarga elétrica em uma linha de entrada da construção estão relacionados com as particularidades do revestimento da linha, a resistência de impulso suportada pelos sistemas internos conectados à linha e as interfaces isoladoras ou dos DPSs instalados para as conexões equipotenciais na entrada da linha. O valor de  $P_V$  é calculado pela Equação (A 12):

$$P_V = P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} \quad (\text{A } 12)$$

em que os valores das variáveis já foram apresentados anteriormente e o cálculo resulta em  $P_V = 1$ , tanto para a linha de energia quanto para a linha de sinal.

#### **A.8 Probabilidade $P_W$ de uma descarga atmosférica em uma linha causar falha de sistemas internos**

Os índices de probabilidade  $P_W$ , conforme a regulamentação da norma (ABNT, 2015b), de uma descarga elétrica em uma linha de entrada da construção provocando falha dos sistemas internos, estão relacionados com as particularidades do revestimento da linha, a resistência de impulso suportada pelos sistemas internos conectados à linha e as interfaces isoladoras ou o sistema de proteção coordenado de DPS implementado. O valor de  $P_W$  é calculado pela Equação (A 13):

$$P_W = P_{SPD} \times P_{LD} \times C_{LD} \quad (\text{A } 13)$$

em que os valores das variáveis são os mesmos determinados na seção anterior e o cálculo resulta em  $P_W = 1$ , tanto para a linha de energia quanto para a linha de sinal.

#### **A.9 Probabilidade $P_Z$ de uma descarga atmosférica perto de uma linha que entra na estrutura causar falha dos sistemas internos**

De acordo com a regulamentação NBR 5419-2 (ABNT, 2015b), o índice de probabilidade  $P_Z$  de uma descarga elétrica em proximidade a uma linha de entrada da construção, provocando a falha dos sistemas internos, estão relacionados com as particularidades do revestimento da linha, a resistência de impulso suportada pelo sistema

interligado à linha e as interfaces isoladoras ou o sistema de proteção coordenado de DPS implementado. O valor de  $P_Z$  é obtido por emprego da Equação (A 14):

$$P_Z = P_{SPD} \times P_{LI} \times C_{LI} \quad (\text{A 14})$$

em que  $P_{LI}$  é a probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica perto de uma linha conectada, dependendo das características da linha e dos equipamentos, conforme Tabela A 23. Pela tabela, a tensão suportável é de 2,5 kV para a linha de energia e 1,5 kV para a linha de sinal. E, diante disso, assumem diferentes valores, sendo  $P_{LI} = 0,3$  e  $P_{LI} = 0,5$ , respectivamente. Por fim,  $C_{LI}$  é um fator que depende das condições da blindagem, do aterramento e da isolação da linha. Os valores de  $C_{LI}$  são apresentados na Tabela A 17. Ambas as linhas não são blindadas, portanto,  $C_{LI} = 1$ , para os dois tipos de linhas. Desse modo, ao final, os valores são  $P_Z = 0,3$  para a linha de energia e  $P_Z = 0,5$  para a linha de sinal.

Tabela A 23 - Valores da probabilidade  $P_{LI}$  dependendo do tipo da linha e da tensão suportável de impulso  $U_W$  dos equipamentos

Tipo da linha	Tensão suportável $U_W$ em kV				
	1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Linhas de sinais	1	0,5	0,2	0,08	0,04

Fonte: Extraída de ABNT NBR 5419-2, 2015.

A Tabela A 24 resume os valores de probabilidades calculados para facilitar a análise e comunicação desses resultados.

Tabela A 24 - Probabilidades de danos calculadas

Comp.	Trabalho	Energia										Sinal				$P_M$ (geral)
		$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P_M$	$P_U$	$P_V$	$P_W$	$P_Z$	$P_V$	$P_U$	$P_Z$	$P_W$	$P_M$		

Lucas	1	1	1	0,16	1	1	1	0,3	1	1	0,6	1	0,44	0,533
<b>Probab. danos</b>	<hr/>													
Kafer	1	1	1	1	1	0,8	0,7	1						

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

Em relação aos valores apontados por Kafer (2018), houve discrepâncias entre os valores de  $P_V$ ,  $P_W$ ,  $P_M$  e  $P_Z$ . Tal fato deriva da utilização em sua análise de linha de sinal blindada e neste trabalho, a blindagem é indefinida ou inexistente.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma análise detalhada da proteção contra descargas atmosféricas em um Museu com as piores condições de proteção, a fim de produzir resultados diferentes daqueles apresentados por Kafer (2018). Em nenhum momento a intenção deste trabalho é alterar os cálculos apresentados pelo autor da referência básica, mas sim desenvolver uma nova análise com foco específico em um cenário diferente. A falta de blindagem na linha de sinal utilizada neste estudo foi uma escolha proposital, com o objetivo de simular um cenário em que a proteção contra descargas atmosféricas é inadequada ou inexistente. A análise realizada pode contribuir para as práticas de proteção contra descargas atmosféricas em locais com características semelhantes às do Museu analisado neste trabalho. A planilha de análise e gerenciamento de risco desenvolvida por Kafer (2018) executou o cálculo das probabilidades utilizando a metodologia proposta pela ABNT NBR 5419-2 (ABNT, 2015b) e de valores informados pelo projetista de PDA. Como resultado, apresentou os valores das variáveis  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ ,  $P_M$ ,  $P_U$ ,  $P_V$ ,  $P_W$  e  $P_Z$ . A Tabela A 24 apresenta os valores de probabilidades calculados pela planilha desenvolvida por Kafer (2018) de acordo com a Equação (A 15):

$$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z \quad (\text{A } 15)$$

Seguindo a norma NBR ABNT 5419-2 (ABNT, 2015b), a componente de perda trata-se de uma quantidade relativa média de uma forma de dano para um determinado evento perigoso provocado por um raio, sendo considerados sua proporção e implicações. Os critérios de entrada que variam em função do tipo de perda avaliada, tal como L1, L2, L3, L4 e dano gerado correlacionado, se referem aos parâmetros utilizados para avaliar as perdas causadas por um evento perigoso provocado por um raio, podendo incluir fatores como a natureza da estrutura, as características do ambiente, a exposição à descarga elétrica, entre outros. Em outras

palavras, eles são as informações necessárias para quantificar as perdas causadas por um raio em um determinado cenário, permitindo que sejam adotadas medidas preventivas ou corretivas para minimizar os efeitos desses eventos perigosos.

Para obter os valores de  $L_X$ , foi utilizada a recomendação da norma brasileira (ABNT, 2015b), que apresenta os valores atribuídos a cada coeficiente. Dessa forma, os valores das perdas calculados e extraídos da planilha estão dispostos na Tabela A 25.

Tabela A 25 - Probabilidades de perdas calculadas

<b>Prob. perda</b>	$L_A$	$L_B$	$L_C$	$L_M$	$L_U$	$L_V$	$L_W$	$L_Z$
L1	2,4772 $\times 10^{-5}$	4,9543 $4 \times 10^{-5}$	-	-	2,4771 $7 \times 10^{-5}$	4,9543 $4 \times 10^{-5}$	-	-
L2	-	-	-	-	-	-	-	-
L3	-	-	-	-	-	-	-	-
L4	-	$2,50 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-3}$	-	$2,50 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-3}$	$6,67 \times 10^{-3}$

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Após finalizados os cálculos, os resultados apresentados pela planilha estão dispostos na Tabela A 26, como forma de auxiliar na identificação dos dados.

Tabela A 26 - Componentes de risco da estrutura em seu estado atual

<b>Riscos Relevantes</b>	<b>Descrição</b>	<b>Risco total</b>	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_M$	$R_U$	$R_V$	$R_W$	$R_Z$
$R_1$	1	5,02 $\times 10^{-5}$	1,23215 $\times 10^{-5}$	2,4643 $\times 10^{-5}$	-	-	5,1029 $\times 10^{-6}$	8,1647 $\times 10^{-6}$	-	-
$R_4$	2	1,96 $\times 10^{-1}$	-	1,24 $\times 10^{-3}$	4,97 $\times 10^{-3}$	8,55 $\times 10^{-2}$	-	8,1647 $\times 10^{-6}$	1,44 $\times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-1}$

<sup>1</sup> Vida Humana; <sup>2</sup> Valor econômico

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

Observando as componentes de risco  $R_X$  apresentadas pela Tabela A 26, é notável que os valores de  $R_A$  e  $R_B$  possuem maior influência e estão relacionados, respectivamente, à probabilidade de ferimentos em seres vivos e danos estruturais na edificação, de acordo com a ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015b). Contudo, o valor do risco total  $R_1$  está acima do risco de perda de vida humana tolerável  $R_T$ , que é  $10^{-5}$ . Neste mesmo sentido, tratando-se do risco  $R_4$ , as componentes  $R_C$ ,  $R_M$  e  $R_Z$  possuem maior peso e estão associadas a falhas em sistemas internos. Além disso, o valor do risco total  $R_4$  excede o risco tolerável de perda de valor econômico  $R_T$  que é  $10^{-3}$ . Neste contexto, o trabalho Kafer (2018) confirmou a necessidade de se adotar medidas de proteção na unidade fabril.

Kafer (2018), indica que dado que o custo de implementação do projeto é bastante inferior ao valor dos bens avaliados, não foi necessária a realização de uma análise de custo-benefício completa.

A análise de custo-benefício é uma técnica utilizada para avaliar se um projeto ou investimento é economicamente viável, comparando os custos envolvidos com os benefícios esperados. É uma ferramenta importante para tomar decisões de investimento com base em dados financeiros e econômicos.

No entanto, em alguns casos, o valor do projeto é tão baixo em relação aos bens avaliados que a análise de custo-benefício não é necessária, pois os benefícios do projeto são óbvios e evidentes. É possível que a implementação do sistema de proteção tenha um custo relativamente baixo, mas proporcione um benefício muito grande em termos de proteção dos bens avaliados.

O autor ainda ressalta que, mesmo sem a necessidade de realizar a análise de custo-benefício completa, é importante dimensionar o sistema de proteção de forma a encontrar a solução mais economicamente atrativa. Ou seja, é necessário buscar um equilíbrio entre o custo do projeto e o NP necessário, de modo que seja obtida a solução que ofereça o maior benefício possível com o menor custo.

Para reduzir o risco  $R_1$  a um valor inferior a  $10^{-5}$ , Kafer (2018) selecionou medidas de proteção que atacassem efetivamente as componentes críticas. Para tal objetivo, ele propôs a implementação das seguintes medidas de proteção:

- a) Instalação de um SPDA completo Classe III, modelado de acordo com o método Faraday, para neutralizar  $R_A$  e  $R_B$  através da redução da probabilidade  $P_B$ . De acordo com a norma (ABNT, 2015b), a medida reduz o fator para um décimo do valor original.

b) Instalação de um DPS nível I na entrada de energia, dimensionado para 12,5 kV. Em atendimento ao requisitado pela Norma Técnica N-321.0001 (CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A, 2019) para qualquer edificação com SPDA externo. O dispositivo reduz praticamente todas as variáveis associadas ao risco de falha em sistemas internos para  $10^{-2}$ .

Após inserir as medidas de proteção, Kafer (2018) executou novamente o cálculo das componentes de risco da Tabela A 26, mas dessa vez observando as novas informações e verificando o resultado. A Tabela A 27 apresenta os novos valores das componentes levando em consideração as novas medidas estipuladas por Kafer (2018).

Tabela A 27 - Componentes de risco recalculadas com SPDA Classe III e DPS

Riscos Relevantes	Descrição	Risco total	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$R_M$	$R_U$	$R_V$	$R_W$	$R_Z$
R1	<sup>1</sup>	$8,9 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-5}$	-	-	$5,1 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	-	-
R3	<sup>2</sup>	$3,92 \times 10^{-4}$	-	$2,5 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-4}$	-	$1,0 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-4}$

<sup>1</sup>Vida Humana; <sup>2</sup> Valor econômico

Fonte: Extraído de Kafer (2018).

As medidas de proteção reduziram tanto o risco de perda de vida humana  $R_1$ , quanto o risco de perda de valor econômico  $R_4$ , para valores inferiores aos respectivos riscos toleráveis.

### A.10 Projeto do SPDA Proposto por Kafer (2018)

O trabalho Kafer (2018) trata da implementação de um SPDA em uma unidade fabril. O SPDA é um sistema de proteção elétrica que tem como objetivo proteger as estruturas de edificações e seus ocupantes contra os efeitos prejudiciais das descargas atmosféricas. O texto menciona que foi necessário implementar um SPDA Classe III na estrutura da unidade fabril, seguindo um procedimento de projeto específico. A classe de proteção de um SPDA indica o NP que o sistema é capaz de oferecer, levando em consideração as características da estrutura e do ambiente em que está inserido (KAFER, 2018).

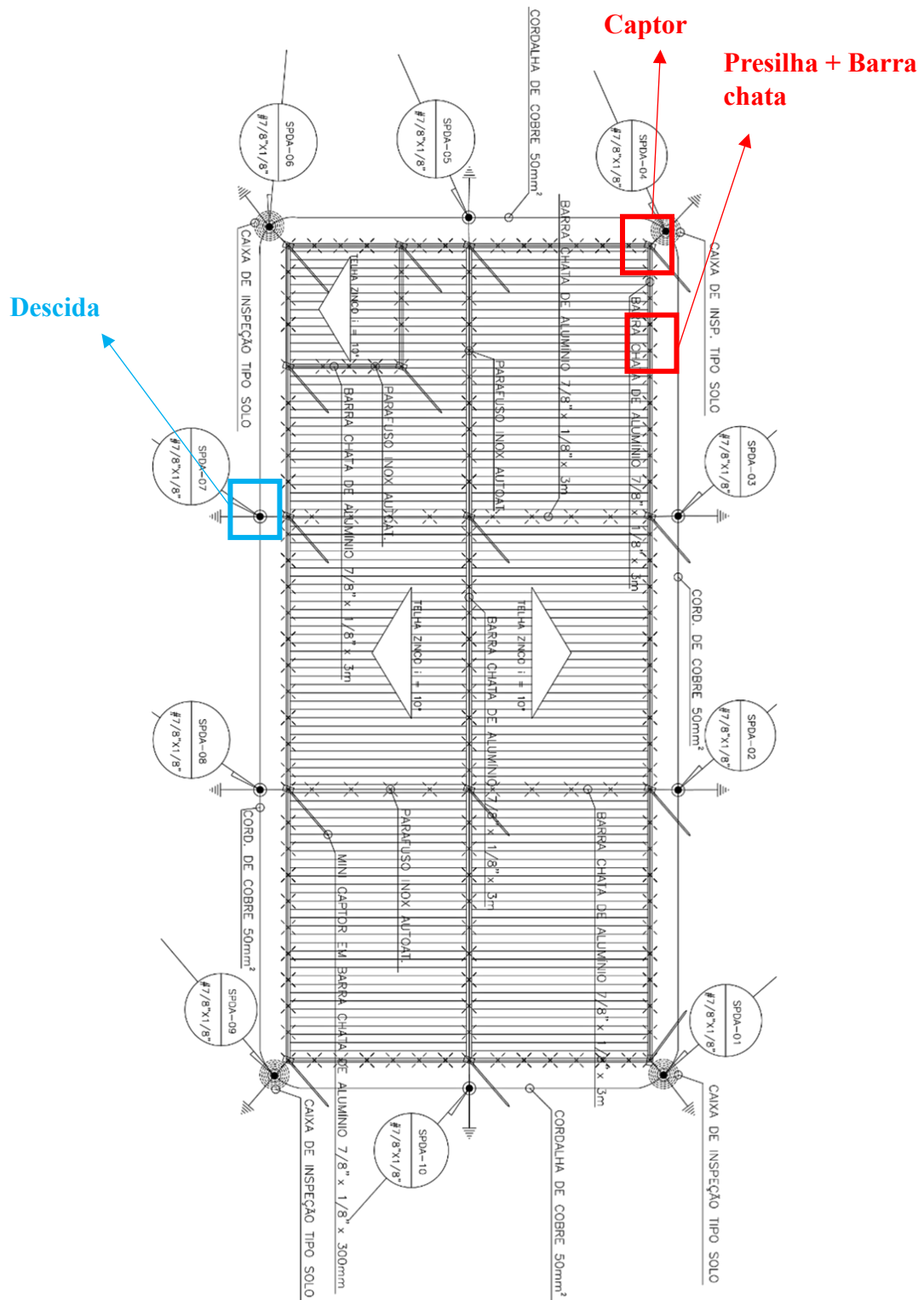
O SPDA externo, mencionado no texto, tem como função principal reduzir a probabilidade de danos a seres vivos e danos estruturais causados por uma descarga atmosférica. Já o sistema interno tem como objetivo evitar a falha de sistemas internos, como equipamentos eletrônicos e sistemas de comunicação (KAFER, 2018).

Para projetar o SPDA, Kafer (2018) menciona a utilização do método de Faraday, que é um método clássico de PDA. Esse método consiste em criar uma malha metálica envolvendo a estrutura a ser protegida, que funciona como um "caminho" para a descarga atmosférica. A malha é conectada a um sistema de captação, que tem a função de conduzir a descarga até o solo (KAFER, 2018).

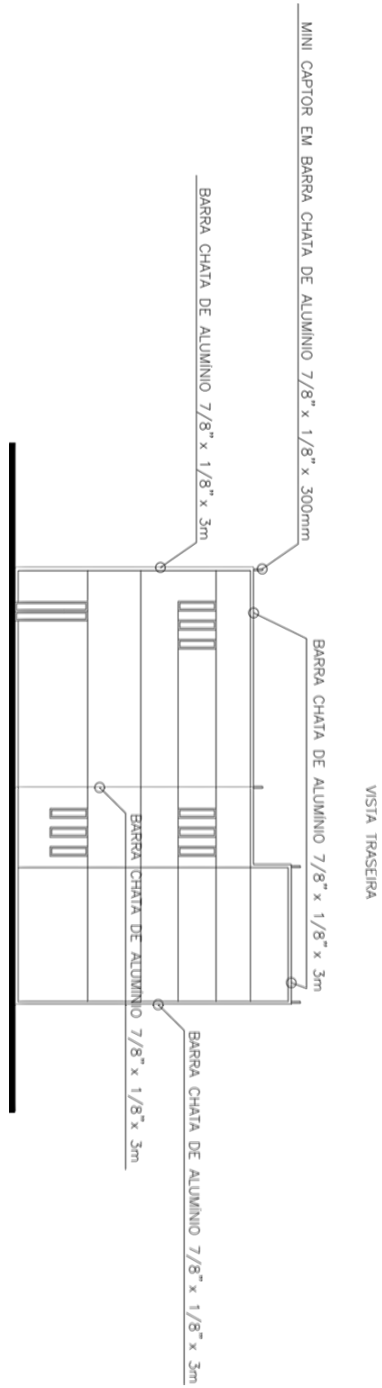
O referido autor optou por utilizar barras chatas de alumínio nos subsistemas de captação e descida ao invés de hastes pontiagudas tradicionais para minimizar os efeitos estéticos do SPDA. Embora as barras chatas de alumínio possam ser menos chamativas do que as hastes pontiagudas tradicionais, a sua eficiência na captação das descargas e na proteção da edificação pode depender de diversos fatores, tais como o seu comprimento, largura e espessura, bem como da sua disposição no sistema de captação. Segundo Mello (2017), as hastes pontiagudas são mais eficientes na captação das descargas atmosféricas, pois apresentam um campo elétrico mais intenso em suas pontas, o que facilita o início do processo de ionização do ar ao seu redor. Entretanto, a escolha do tipo de sistema de captação mais adequado deve levar em consideração não apenas a sua eficiência, mas também outros aspectos, como o impacto visual, a durabilidade e a resistência a intempéries e vandalismo, por exemplo.

Por fim, o texto menciona que a conexão com cada uma das quatro hastes de aterramento instaladas nos quatro cantos da unidade foi feita por cabos de cobre interligados às barras de descida através da caixa de inspeção. Cada haste de aterramento é responsável por garantir a dissipação da corrente elétrica da descarga atmosférica para o solo de forma segura, evitando danos à estrutura protegida e seus ocupantes. A caixa de inspeção é um elemento do SPDA que permite a inspeção e manutenção do sistema de proteção (KAFER, 2018).

**APÊNDICE B – Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Faraday (vista superior)**

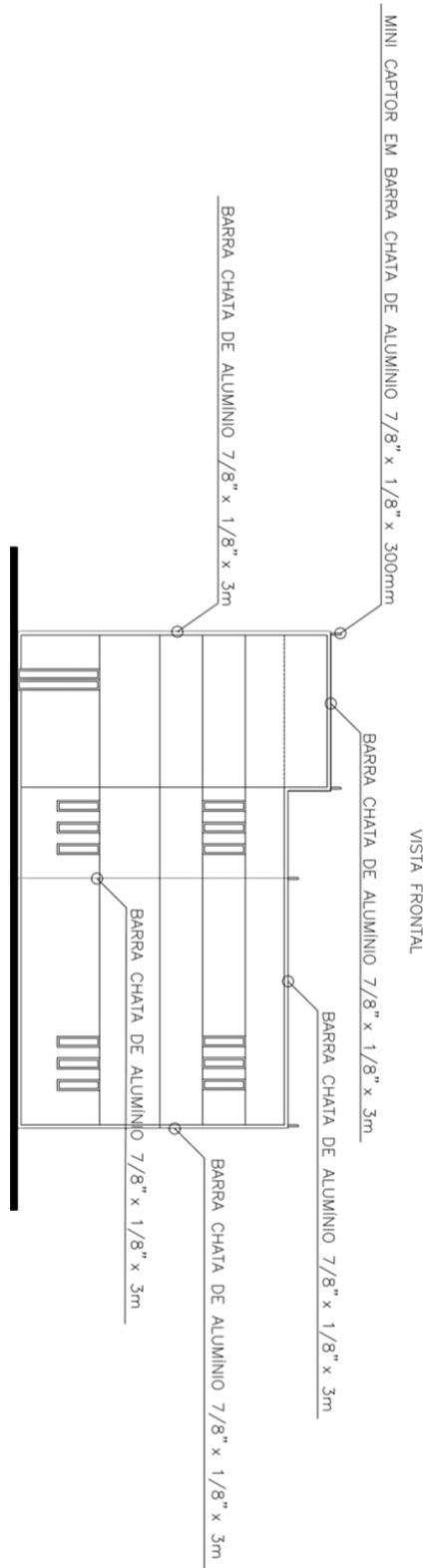


**APÊNDICE C - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Faraday (vista traseira)**

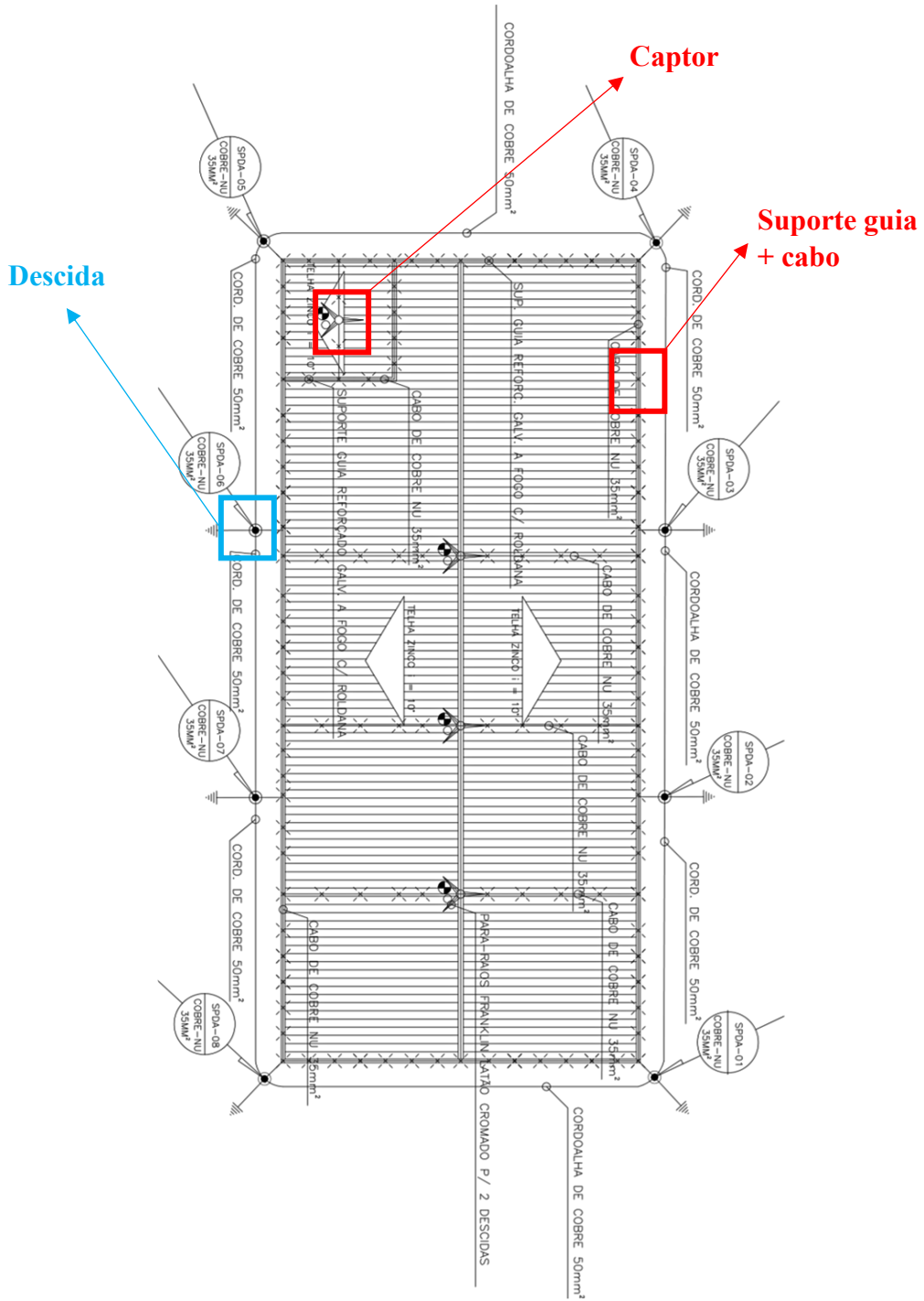




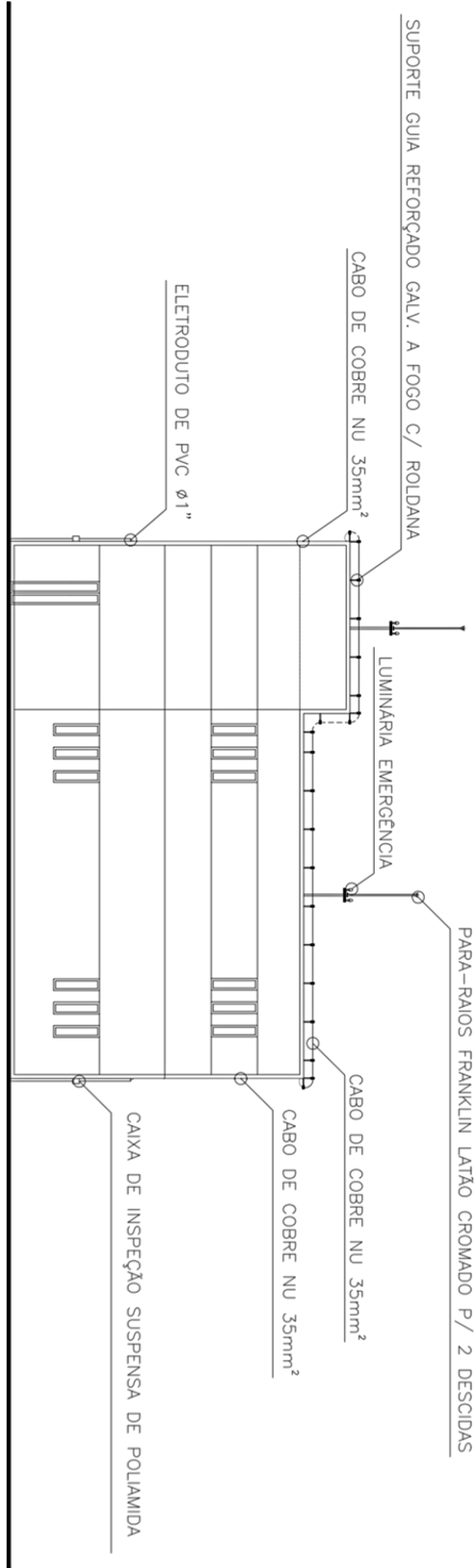
**APÊNDICE E - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Faraday (vista frontal)**



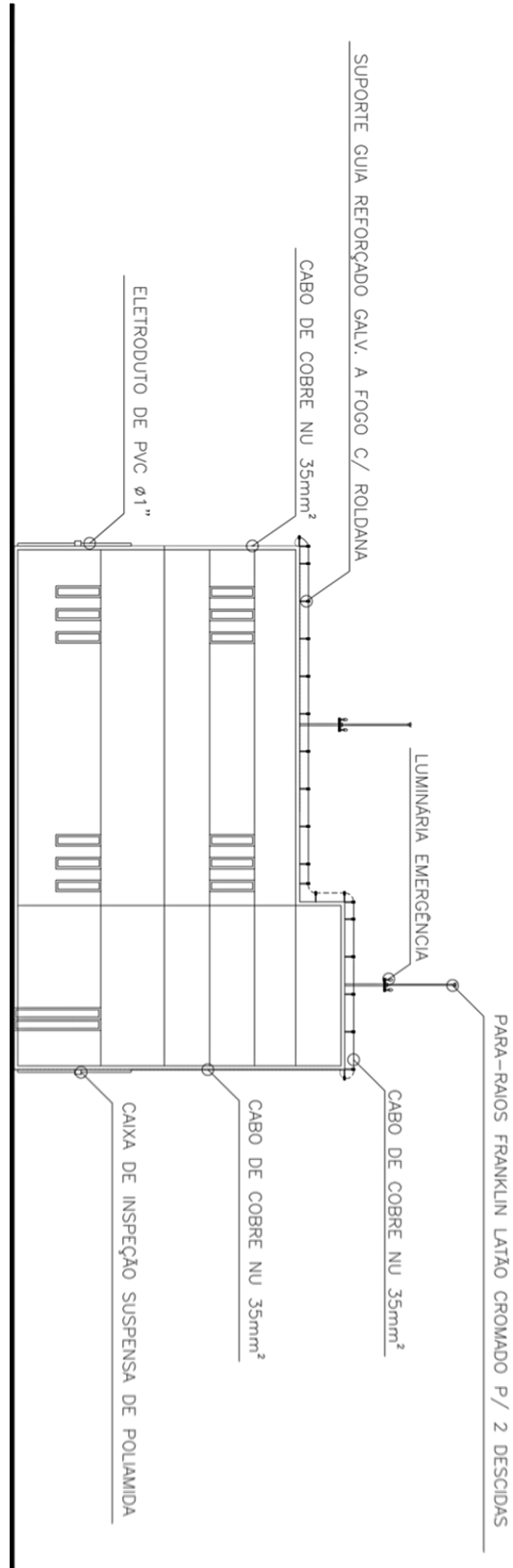
### APÊNDICE F - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de captação pelo Método Eletrogeométrico (vista superior)



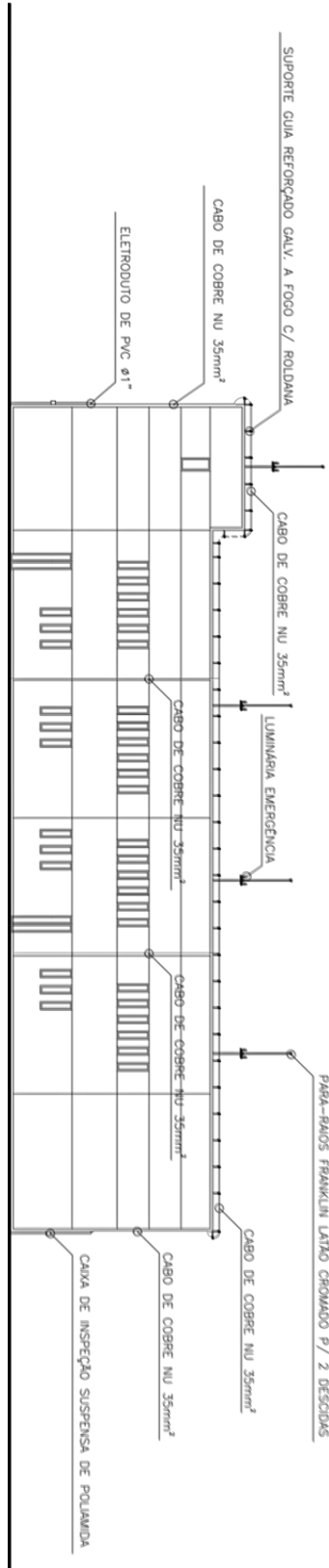
**APÊNDICE G - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista frontal)**



**APÊNDICE H - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista traseira)**

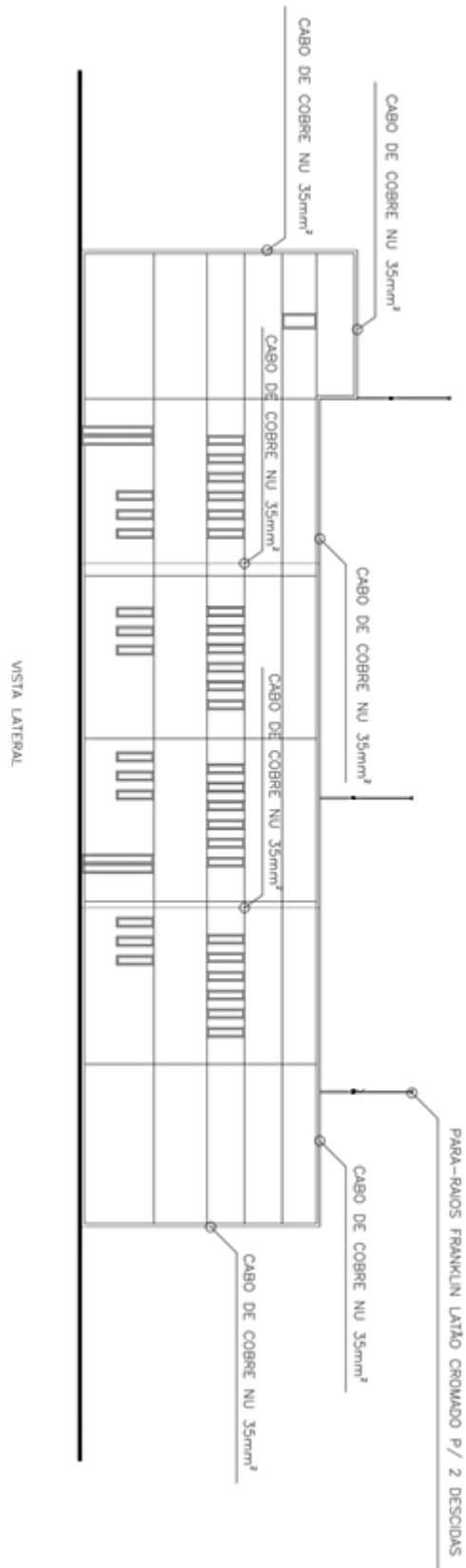


**APÊNDICE I - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Eletrogeométrico (vista lateral)**

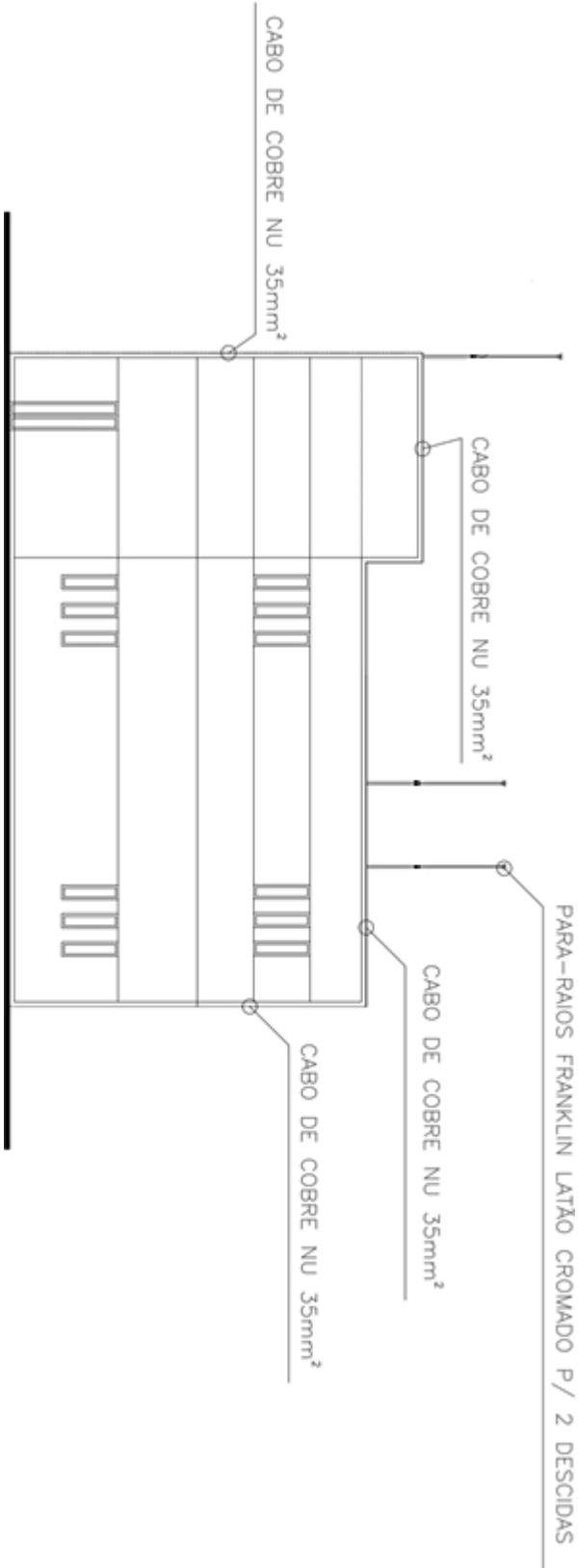




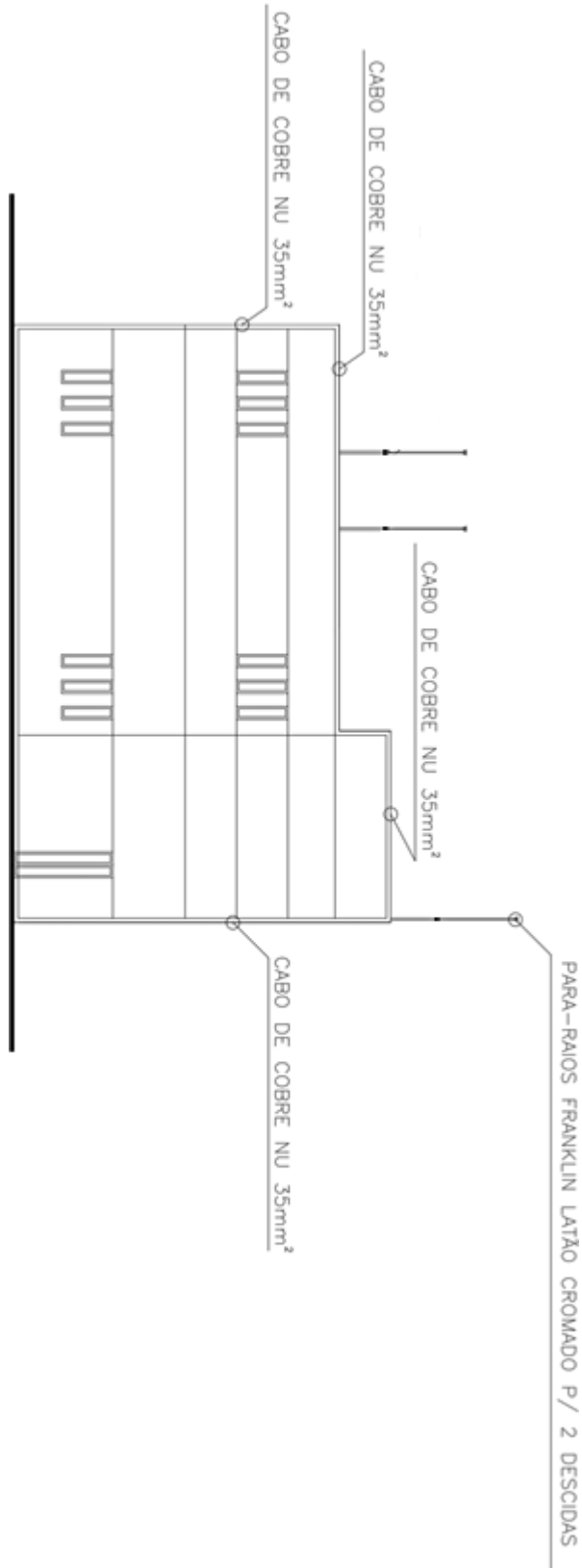
**APÊNDICE K - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista lateral)**



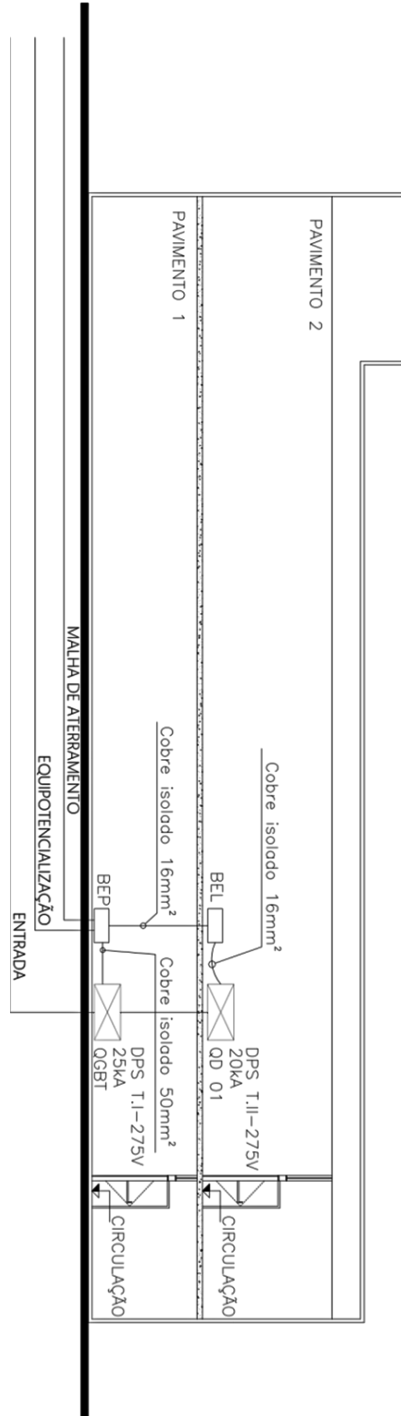
**APÊNDICE L - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista frontal)**



**APÊNDICE M - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida pelo Método Franklin (vista traseira)**



**APÊNDICE N - Posicionamento e dimensionamento do subsistema de equipotencialização (vista lateral)**



## APÊNDICE O - Condições Gerais nos Arranjos de Aterramento

A norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015), que trata da PDA, enfatiza a importância da geometria e das dimensões do subsistema de aterramento na condução e distribuição da corrente da descarga para a terra em altas frequências. Nesse sentido, a norma sugere que a resistência de aterramento da malha seja a menor possível, mas não define nenhum valor recomendado. O objetivo é reduzir sobretensões perigosas e garantir a segurança do sistema elétrico. Portanto, é importante que o dimensionamento da malha de aterramento seja realizado com base em uma análise criteriosa das características do solo e da estrutura a ser protegida, considerando-se os parâmetros definidos na norma.

A norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015) estabelece um critério importante para o dimensionamento da malha de aterramento, que é o raio equivalente da malha. Esse raio deve ser igual ou superior ao comprimento mínimo, que é determinado pela resistividade do solo e pelo NP da edificação. O raio equivalente é calculado a partir do raio da circunferência que tenha a mesma área da malha de aterramento. Portanto, para verificar se a malha é suficiente, é necessário realizar um teste com base na Equação (O 1):

$$r_e \geq L_1 \quad (\text{O } 1)$$

em que  $r_e$  é o raio equivalente da malha e  $L_1$  é o comprimento mínimo. Esse critério é fundamental para garantir a efetividade da PDA e reduzir os riscos para as pessoas e para o patrimônio.

O conhecimento prévio das dimensões e características da edificação, bem como do NP e resistividade do solo, é fundamental para a determinação do eletrodo mínimo de aterramento, que é responsável por garantir a segurança da estrutura em relação a descargas atmosféricas e sobretensões. No caso específico do Museu, sabe-se que se trata de uma construção com formato prismático simples, com medidas de comprimento e largura bem definidas, tais como comprimento de 13,95 m, largura de 31,20 m e área total  $A = 435,24 \text{ m}^2$ . Ademais, é preciso levar em conta o NP Classe II da estrutura e a resistividade do solo local de  $310,71 \Omega \cdot \text{m}$ , que já foram obtidos conforme resultados descritos no trabalho de Kafer (2018). Com base nestes dados, será possível determinar o tamanho mínimo do eletrodo de aterramento necessário para atender às normas e garantir a segurança da edificação.

O valor do raio equivalente pode ser calculado utilizando a Equação (O 2):

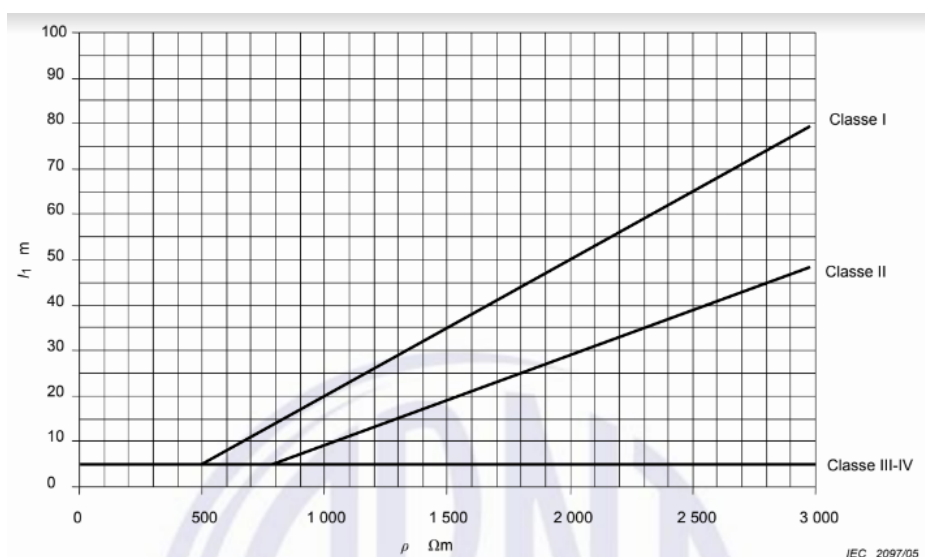
$$r_e = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (\text{O } 2)$$

em que  $A$  é a área total da edificação. Diante disso, o valor de  $r_e$  pode ser encontrado substituindo as variáveis pelos valores já mencionados, na Equação (O 3):

$$r_e = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{435,24}{\pi}} = 11,77 \quad (\text{O } 3)$$

O valor de  $L_1$  é uma medida importante para o cálculo do eletrodo mínimo de aterramento. Ele é determinado pela NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), que leva em consideração o NP da estrutura e a resistividade do solo. De acordo com a norma, o valor de  $L_1$  deve ser igual ou superior ao comprimento mínimo da malha de aterramento. Para obter o valor de  $L_1$ , é possível utilizar o gráfico da Figura O 1, que relaciona NP II e resistividade do solo.

Figura O 1 - Comprimento mínimo  $L_1$  do eletrodo de aterramento de acordo com a Classe do SPDA



Fonte: Extraído de NBR 5419-3, 2015.

Pelo gráfico da Figura O 1, é possível extrair o valor de  $L_1 = 5 \text{ m}$ , já que o valor de  $310,71 \Omega\text{.m}$  é menor que  $500 \Omega\text{.m}$ . Diante disso, voltando à Equação (O 4), tem-se que:

$$11,77 \geq 5$$

(O 4)

em que a condição da Equação (O 4) é essencial para garantir que o anel de aterramento é suficiente para atender às necessidades do projeto, evitando assim a instalação de eletrodos adicionais. No entanto, como uma medida conservadora e visando alcançar mais camadas do solo, será instalado um conjunto adicional de quatro hastes nas arestas da malha, coincidindo com os cantos da estrutura. Isso se justifica porque as camadas mais profundas do solo apresentam uma melhor condutividade elétrica e um bom escoamento. Portanto, a instalação de mais hastes permitirá que a malha de aterramento alcance essas camadas e garanta um sistema de aterramento ainda mais seguro e eficiente. Dessa forma, mesmo que a condição da Equação (O 4) seja satisfeita, a instalação de hastes adicionais pode trazer benefícios significativos para a eficácia do sistema de aterramento.

#### **APÊNDICE P - Instalação dos Eletrodos de Aterramento**

Em conformidade com a NBR 5419-3 (ABNT, 2015c), para subsistemas de aterramento, o arranjo a ser utilizado consiste em condutor em anel, externo à estrutura a ser protegida, em contato com o solo por pelo menos 80% do seu comprimento total. Estes eletrodos de aterramento podem também ser do tipo malha de aterramento. Além disso, devem ser consideradas medidas preventivas para evitar eventuais situações que envolvam tensões superficiais perigosas. Embora 20 % do eletrodo convencional possa não estar em contato direto com o solo, a continuidade elétrica do anel deve ser garantida ao longo de todo o seu comprimento.

Ainda de acordo com a norma, 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 e deve ser instalado de tal maneira a permitir sua inspeção durante a construção. 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, segundo a norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c).

A solução adequada para a estrutura do Museu consiste em um anel retangular de cobre nu de 50 mm<sup>2</sup>, com quatro hastes de aterramento de Ø 5/8" x 2,40 m de comprimento soldadas nas arestas. Conforme apresentado por Kafer (2018), há um desnível no terreno e as

condições de clima e tempo são regulares. Diante disso, os valores de profundidade do anel serão os mesmos adotados por ele, variando entre 0,7 m (fachada frontal da estrutura) e 1,4 m (laterais). Ademais, todas as conexões atinentes ao sistema de aterramento devem ser efetuadas por meio de solda exotérmica, até mesmo aquelas que levam ao subsistema de descida.

O método de estratificação adotado por Eduardo Marcon Kafer (2018) não é o mesmo que o realizado neste trabalho e os resultados alcançados por ambos foram distintos. No trabalho de Kafer (2018), o solo foi estratificado em duas camadas e não foi mencionada a utilização de software para realizar a inversão da curva das resistividades aparentes do solo. Por sua metodologia de trabalho, chegou-se aos resultados que podem ser consultados pela Tabela P 1.

Tabela P 1 - Parâmetros resultantes da estratificação do solo em duas camadas proposto por Kafer (2018)

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\rho_1(\Omega.m)$	279
$\rho_2(\Omega.m)$	121
$\rho_2/\rho_1$	0,433
$M_0$	0,86
$\rho_m(\Omega.m)$	240

Fonte: Extráido de Kafer, 2018.

Para este trabalho, as camadas 1, 2 e 3 tem valores de resistividade de 349,2  $\Omega.m$ , 172,80  $\Omega.m$  e 497,10  $\Omega.m$ . Mesmo considerando o mesmo local e tipo de solo, a alteração do número de camadas pode ser uma escolha metodológica válida para aumentar a sensibilidade da análise. Além disso, a modelagem matemática realizada neste estudo pode ter permitido uma estratificação mais precisa do solo em relação ao método simplificado de prolongamento utilizado por Kafer (2018), o que pode ter levado a diferenças nos valores de resistividade encontrados para cada camada. Dessa forma, a alteração das camadas pode ter sido uma escolha necessária para aprimorar a metodologia utilizada e permitir uma análise mais precisa do subsistema de aterramento.

Comparando os dados de Kafer (2018) na Tabela P 1 e deste trabalho, há uma diferença percentual de 25,16% entre os valores de resistividade da primeira camada e 42,80% entre os valores da segunda camada. As discrepâncias podem ser justificadas pelo número de camadas utilizado em cada estudo, pela utilização de software aparentemente distinta à que

Kafer (2018) utilizou, pelo processo de estratificação, em que Kafer (2018) trabalhou um método simplificado de prolongamento e este estudo realizou uma modelagem matemática por meio do software IP12win, que manipulou os dados para a inversão de curva.

Nos quatro cantos salientes da estrutura, os condutores da descida serão conectados em hastes no aterramento, como informado anteriormente.

Foram utilizadas hastes de aterramento tipo Copperweld, porque a camada espessa de cobre aumenta significativamente a condutividade elétrica e a resistência à corrosão da haste. O cobre é um excelente condutor elétrico, com resistividade elétrica cerca de 40 vezes menor do que a do aço material utilizado no núcleo das hastes Copperweld. Além disso, a camada espessa de cobre aumenta a área de contato entre a haste e o solo, reduzindo a resistência elétrica do sistema de aterramento (TERMOTÉCNICA PARA-RAIOS, 2022).

Para este projeto, são necessárias quatro hastes de  $\varnothing 5/8'' \times 2,40$  m, sendo instaladas uma em cada canto do Museu.

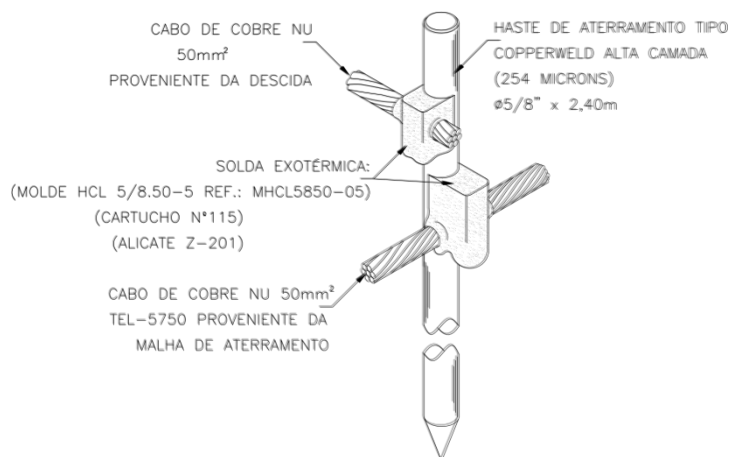
A técnica de solda exotérmica é essencial para a realização completa do projeto, visto que todas as quatro conexões entre as hastes de aterramento e o anel de aterramento devem ser feitas de maneira confiável e duradoura.

Essa técnica consiste na fusão de dois materiais diferentes, geralmente cobre e alumínio, através de um reagente químico que libera uma grande quantidade de energia térmica, fundindo os materiais de forma permanente. Isso resulta em uma conexão muito resistente e duradoura, capaz de suportar cargas elétricas elevadas e altas correntes elétricas.

Ao utilizar a técnica de solda exotérmica, evita-se o uso de conexões por meio de parafusos, por exemplo, que podem afrouxar com o tempo, gerando problemas de conexão elétrica e, conseqüentemente, de segurança. Além disso, as conexões por meio de parafusos ou outros dispositivos podem gerar pontos de alta resistência elétrica, o que prejudica a eficiência do sistema de aterramento. Diante disso, para este projeto, são necessários quatro pontos de solda exotérmica, conectando o anel às quatro hastes.

A Figura P 1 dispõe da representação esquemática da haste de aterramento em conexão com o cabo de cobre nu vindo da descida e com o anel de aterramento.

Figura P 1 - Detalhe de conexão e solda da haste de aterramento



Fonte: Termotécnica Para-raios, 2022.

Como o anel de aterramento deve ficar posicionado à distância aproximada de 1 m ao redor das paredes externas, conforme a norma ABNT NBR 5419-3 (ABNT, 2015c). Para determinar o seu perímetro ao redor do museu, é necessário levar em consideração as dimensões do mesmo e a distância que o anel deve ficar posicionado em relação às paredes externas. No caso do edifício em questão, que possui dimensões de 31,20 metros por 13,95 metros, o anel de aterramento deve ficar posicionado a uma distância aproximada de 1 metro ao redor das paredes externas.

Com base nessas informações, é possível calcular o perímetro do retângulo que envolve o edifício, adicionando 2 metros para cada lado, o que resulta no perímetro do anel de aterramento. Sendo assim, o comprimento do retângulo será de 33,20 metros e a largura será de 15,95 metros.

O cálculo do perímetro do retângulo será feito multiplicando-se a soma dos lados por 2, que resulta em 98,30 metros. Para obter o perímetro do anel de aterramento, são adicionados 2 metros para cada lado, o que resulta em 102,30 metros.

Portanto, pode-se concluir que o perímetro do anel de aterramento para o museu de 31,20 x 13,95 metros é de aproximadamente 102,30 metros.

A escolha do cobre nu com área de seção transversal de 50 mm<sup>2</sup> para implementação do anel de aterramento pode ser justificada pelo fato de que o cobre é um excelente condutor elétrico e apresenta alta durabilidade e resistência à corrosão, sendo capaz

de conduzir correntes elétricas de forma segura e eficiente para o solo. Além disso, uma área de seção transversal de 50 mm<sup>2</sup> com diâmetro de cada fio da cordoalha de 3 mm, é suficiente para garantir uma baixa resistência de aterramento, atendendo as configurações e dimensões mínimas dos condutores do subsistema de aterramento dispostas na Tabela 7 – Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento do item 5.6.2 Dimensões, da Seção 5, da NBR 5419-3 (ABNT, 2015).

Os componentes do aterramento e suas respectivas dimensões e quantidades podem estão apresentados na Tabela P 2.

Tabela P 2 - Componentes básicos do Aterramento

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Hastes de aterramento tipo Copperweld	Ø 5/8" x 2,40 m	4
Solta exotérmica 150 GR	-	4
Cabo encordoado de cobre nu (m)	50 mm <sup>2</sup> - 7 Fios x Ø 3,00 mm	102,30

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

