UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DYWLES DE SOUZA SOARES

GERENCIAMENTO DE RISCO: Estudo de caso em edificações para verificar a necessidade de aplicação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

TUCURUÍ – PA
2023

DYWLES DE SOUZA SOARES

GERENCIAMENTO DE RISCO: Estudo de casos em edificações para verificar a necessidade de aplicação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica do Campus de Tucuruí da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma

TUCURUÍ – PA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S676g Soares, Dywles de Souza.
GERENCIAMENTO DE RISCO : Estudo de caso em edificações para verificar a necessidade de aplicação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) / Dywles de Souza Soares. — 2023.
85 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2023.

1. descargas atmosféricas. 2. edificações. 3. gerenciamento de risco. I. Título.

CDD 620.0042

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Título	GERENCIAMENTO DE RISCO: Estudo de caso em edificações para verificar a necessidade de aplicação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)
Discente	DYWLES DE SOUZA SOARES
Matrícula	201733940025

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Rafael Suzuki Bayma (NDAE/CAMTUC/UFPA)	Orientador
2	Ana Carolina Neves Pardauil Pires (Dow)	Membro
3	Washington César Braga de Sousa (CAMTUC/UFPA)	Membro

Data da Defesa: 01/07/2023	Hora Início: 08:34	Hora Término: 08:50

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	**Examinador 1**	**Examinador 2**	**Examinador 3**
Formatação	9,5	9,2	9,5
Linguagem (gramática e semântica)	8,5	8,5	8,5
Conteúdo técnico	9,0	9,0	9,2
Média	**9,0**	**8,9**	**9,1**

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	**Examinador 1**	**Examinador 2**	**Examinador 3**
Sequência lógica de apresentação	8,5	8,3	8,5
Administração do tempo	7,0	7,0	7,0
Expressão oral	9,5	8,5	9,0
Domínio do tema	9,5	9,0	9,2
Média	**8,6**	**8,2**	**8,4**

Média por examinador	8,8	8,6	8,7
Média Final	**8,7**		
Conceito Final	**BOM**		

Ana Carolina N. Pardauil Pires
Membro

Washington César B. de Sousa
Membro

Rafael Suzuki Bayma
Orientador

_____
Coorientador

Emitido em 01/07/2023

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) Nº 3/2023 - NDAE (11.16.16)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 02/07/2023 23:06)
RAFAEL SUZUKI BAYMA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
NDAE (11.16.16)
Matrícula: ###466#0

(Assinado digitalmente em 04/07/2023 19:50)
WASHINGTON CESAR BRAGA DE SOUSA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###185#4

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANA CAROLINA NEVES PARDAUIL PIRES
Data: 06/07/2023 11:47:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sipac.ufpa.br/documentos/ informando seu número: **3** , ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)**, data de emissão: **02/07/2023** e o código de verificação: **98e18cc3b0**

Dedico este trabalho aos meus pais, que não mediram esforços para a realização deste sonho e desde muito cedo mostraram-me o caminho a ser seguido, por meio da educação que me deram e pelo amor que me dedicam incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e em segundo ao colegiado da Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, em especial aos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica, que ao longo do curso foram fundamentais em contribuir para que que minha graduação fosse a melhor possível.

Aos professores Jefferson Costa e André Felipe, pela inspiração pessoal. Ao meu orientador e professor Dr. Rafael Suzuki Bayma pela confiança em mim depositada e pela sua dedicação na orientação deste trabalho.

Aos meus pais, Antônio Anacleto Soares e Ana Gélia de Souza Soares, pela confiança e dedicação para com minha pessoa ao longo desses anos.

Aos meus irmãos, pelo companheirismo e amor mútuo, em especial, a minha irmã Naila, pelo carinho, atenção e cuidado diário dedicado à minha pessoa.

Agradeço em especial à companhia e amizade de Amanda Beatriz Ferreira Bezerra e Felipe Silveira Piano. Agradeço ao dois por estarem comigo nos momentos mais "desesperadores" de cada semestre; por me proporcionarem momentos de descontração e ânimo; pelos jogos de bilhar em momentos inesperados e caóticos; pela companhia diária em sala e corredores da Universidade; pelos trabalhos excepcionais de um verdadeiro time, que pouco tinham em comum, mas que sempre entenderam o significado do trabalho em equipe.

Agradeço também a todas as pessoas que acreditaram na realização deste trabalho e a tudo que me foi permitido viver durante esse processo. Obrigado por fazerem parte de um sonho, por serem quem são, por me fazerem enxergar a engenharia elétrica por outra ótica, tornando este momento algo impar em minha vida.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio-termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”

(Ayrton Senna)

RESUMO

As tempestades de chuva que comumente se formam em diversas regiões do Brasil, registram um alto índice de descargas atmosféricas; estas descargas, na maioria das vezes, partem das nuvens em direção à Terra. Consequentemente, esses fenômenos podem gerar inúmeras situações de riscos, as quais podem ocasionar danos à vida, danos físicos às estruturas e falhas no funcionamento de sistemas elétricos sensíveis. Embora as descargas atmosféricas sejam fenômenos naturais e imprevisíveis, existe uma maneira (dentro dos padrões normativos) de identificar eventuais situações de risco e aplicar devidas medidas de proteção, como por exemplo o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), o qual visa interceptar descargas atmosféricas, conduzi-las para a Terra e dissipá-las no solo, anulando ou reduzindo consideravelmente seus impactos. A etapa de análise preliminar que antecede o projeto do SPDA é denominada gerenciamento de risco e se caracteriza como um estudo estatístico/probabilístico, o qual visa identificar e quantificar prováveis perdas de vidas humanas, serviços ao público ou bens patrimoniais. A proposta deste trabalho consiste na análise do risco para a perda de vida humana em duas edificações localizadas em São Miguel do Guamá-PA, visando verificar se existe a necessidade da aplicação de SDPA nestas estruturas. Ambas as edificações apresentam semelhanças no gerenciamento de risco, porém seus respectivos resultados divergem quando comparados. O primeiro caso não apresenta risco para a perda de vida humana, enquanto que o segundo requer a aplicação de SPDA e DPS na entrada de linhas da estrutura.

Palavras – chave: descargas atmosféricas; edificações; gerenciamento de risco.

ABSTRACT

The rain storms that commonly form in different regions of Brazil register a high rate of atmospheric discharges; these discharges, most of the time, depart from the clouds towards the Earth. Consequently, these phenomena can generate numerous risk situations, which can cause damage to life, physical damage to structures and failures in the operation of sensitive electrical systems. Although lightning strikes are natural and unpredictable phenomena, there is a way (within regulatory standards) to identify possible risk situations and apply appropriate protection measures, such as the Atmospheric Discharge Protection System (SPDA), which aims to intercept atmospheric discharges, conduct them to Earth and dissipate them in the soil, nullifying or considerably reducing their impacts. The preliminary analysis stage that precedes the SPDA project is called risk management and is characterized as a statistical/probabilistic study, which aims to identify and quantify probable losses of human lives, services to the public or property. The purpose of this work is to analyze the risk of loss of human life in two buildings located in São Miguel do Guamá-PA, in order to verify if there is a need to apply SDPA in these structures. Both buildings have similarities in risk management, but their respective results differ when compared. The first case does not pose a risk of loss of human life, while the second requires the application of LPS and DPS at the entrance of the structure's lines.

Keywords: atmospheric discharges; buildings; risk management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura elétrica das nuvens de tempestades. 26
Figura 2- Parâmetro dos componentes da corrente de uma descarga atmosférica. 28
Figura 3 - Imagens de um vídeo mostrando o decaimento de uma bola luminosa simulando o comportamento luminoso de um raio globular. (a) 80ms; (b) 160 ms; (c) 240 ms. 29
Figura 4 - Principais etapas de uma descarga atmosférica nuvem-solo. (a) ruptura preliminar; (b) indução de cargas elétricas na superfície do solo; (c) momentos antes do encontro de líderes e (d) descarga. 29
Figura 5 - Descargas atmosféricas em diferentes situações. 32
Figura 6 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas. 33
Figura 7 - Fonte de danos, tipos de dados, tipos de perdas, associações e restrições. 34
Figura 8 - Acidentes de origem elétrica no ano de 2022. 35
Figura 9 - Acidentes com descargas atmosféricas no ano de 2022. 37
Figura 10 - Descarga atmosférica direta em uma linha secundária de energia. 38
Figura 11 - Surto de energia causado pelo impacto direto de raio em linha secundaria conectada à estrutura. 39
Figura 12 - Soma dos vários efeitos das descargas atmosféricas: acoplamento resistivo e indutivo. 39
Figura 13 - Ilustração: a) tensão de passo e b) tensão de toque. 40
Figura 14 - Ilustração de uma descarga lateral. 41
Figura 15 - Fluxograma de PDA. 42
Figura 16 - Subsistemas de um SPDA genérico. 43
Figura 17 - Detalhe de SPDA tipo Franklin em mastro de 3m x 2”. 45
Figura 18 - Detalhe de descida superficial em barra chata de alumínio. 46
Figura 19 - Detalhe de utilização de pilar metálico como descida natural. 48
Figura 20 - Detalhe de descida e aterramento de SPDA estrutural genérico. 48
Figura 21 - Detalhe de conexão das janelas com as descidas. 49
Figura 22 - Volume de proteção de um captor tipo Franklin em sistema híbrido. 51
Figura 23 -Gráfico da relação entre Classe e o ângulo de proteção de Franklin. 52
Figura 24 - Método da Esfera Rolante aplicado em uma subestação de alta tensão. 53
Figura 25 - Ilustração do método da Gaiola de Faraday. 54
Figura 26 - Zona de proteção contra raio. 56
Figura 27 - Mapa da densidade de descargas atmosféricas em tempo real. 59

Figura 28 - Área de exposição de uma estrutura isolada. 59
Figura 29 - Diferenças e similaridades dos parâmetros utilizados no gerenciamento de risco de ambos os casos. 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre Classe e o raio da Esfera Eletrogeométrica. 53
Tabela 2 - Relação entre classe e afastamento dos condutores da Gaiola de Faraday. 55
Tabela 3 - Relação entre Nível de Proteção e Classe do SPDA. 57
Tabela 4 - AGUAPA: características da estrutura e meio ambiente. 62
Tabela 5 - AGUAPA: linha de energia. 63
Tabela 6 - AGUAPA: linha de telecomunicações. 63
Tabela 7 - AGUAPA: fator válido para zona Z_{PR-0B}. 64
Tabela 8 - AGUAPA: áreas de exposição equivalente da estrutura e linhas. 65
Tabela 9 - AGUAPA: número esperado anual de eventos perigosos. 65
Tabela 10 - AGUAPA: risco R1 para estrutura não protegida. 69
Tabela 11 - Pousada: características da estrutura e meio ambiente. 71
Tabela 12 - Pousada: linha de energia. 71
Tabela 13 - Pousada: linha de telecomunicações. 72
Tabela 14 - Pousada: fator válido para a zona Z_{PR-0B}. 73
Tabela 15 - Pousada: áreas de exposição equivalente da estrutura e linhas. 74
Tabela 16 -Pousada: número esperado anual de eventos perigosos. 74
Tabela 17 - Pousada: risco R1 para estrutura não protegida. 76
Tabela 18 - Pousada: risco R1 para a estrutura após a aplicação de DPS nas linhas. 76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abracopel	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGUAPA	Associação Guamaense de Agropecuária, Pesca e Aquicultura
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NBR	Norma Brasileira
PA	Pará
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosférica
PDA	Proteção Contra Descargas Atmosféricas

LISTA DE SÍMBOLOS

A_D	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas a uma estrutura isolada;
$A_{I/P}$	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma linha de energia;
$A_{I/T}$	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma linha de telecomunicações;
$A_{L/P}$	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas em uma linha de energia de energia;
$A_{L/T}$	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas em uma linha de telecomunicações;
C_D	Fator de localização
$C_{E/P}$	Fator ambiental da linha de energia
$C_{E/T}$	Fator ambiental da linha de telecomunicações
$C_{I/P}$	Fator de instalação de uma linha de energia
$C_{I/T}$	Fator de instalação de uma linha de telecomunicações
C_{LD}	Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolação da linha para descargas atmosféricas na linha;
C_{LI}	Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolação da linha para descargas atmosféricas perto da linha;
$C_{T/P}$	Fator linha de energia
$C_{T/T}$	Fator linha de telecomunicações
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
D1	Danos às pessoas por choque elétrico
D2	Danos físicos
D3	Danos a sistemas elétricos internos
H	Altura da estrutura
h_z	Fator de aumento de perda quando um perigo especial está presente
L	Comprimento da estrutura
L_A	Perda relacionada aos ferimentos a seres vivos por choque elétrico causadas por descargas atmosféricas na estrutura;
L_B	Perda em uma estrutura relacionada a danos físicos (descargas atmosféricas à estrutura);

L_F	Perda em uma estrutura devido a danos físicos
L_L	Comprimento de uma seção de linha
L_U	Perda relacionada a ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas na linha);
L_V	Perda em uma estrutura devido a danos físicos (descargas atmosféricas na linha)
L_W	Perda devido à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha);
L_X	Perda consequente a danos relevantes à estrutura
L_Z	Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha);
L1	Perda de vida humana independentemente da situação em que ocorre a descarga atmosférica (incluindo danos permanentes);
L2	Perda de serviço público
L3	Perda de patrimônio cultural
L4	Perda de valore econômico, por danos ou falhas que acarretam em paradas de atividades com fins lucrativos;
N_D	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura;
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra
$N_{I/P}$	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha de energia;
$N_{I/T}$	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha de telecomunicações;
$N_{L/P}$	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma linha de energia;
$N_{L/T}$	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma linha de telecomunicações;
NP	Nível de proteção
n_t	Número total de pessoas (ou usuários atendidos) esperado
n_z	Número de possíveis pessoas em perigo (vítimas ou usuários não servidos).
P_A	Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura);
P_B	Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura)
P_C	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura)

P_{EB} Probabilidade de reduzir PU e PV dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento quando EB (ligação equipotencial) é instalada;

P_{LD} Probabilidade de reduzir PU, PV e PW dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas na linha conectada;

P_{TA} Probabilidade de reduzir PA dependendo das medidas de proteção contra tensões de toque;

P_U Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas perto da linha conectada);

P_V Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas perto da linha conectada);

R1 Risco de perda de vida humana em uma estrutura;

R2 Risco de perda de serviço ao público em uma estrutura

R3 Risco de perda de patrimônio cultural em uma estrutura

R4 Risco de perda de valor econômico em uma estrutura

R_A Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na estrutura);

R_B Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na estrutura);

R_C Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na estrutura);

r_f Fator redutor de perda dependente do risco de incêndio

R_M Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da estrutura);

r_p Fator redutor de perda devido às precauções contra incêndio

r_t Fator de redução associado ao tipo de superfície do solo

R_T Risco tolerável

R_U Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na linha conectada);

$R_{U/P}$ Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na linha de energia conectada);

$R_{U/T}$ Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na linha de telecomunicações conectada);

R_V	Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na linha conectada);
$R_{V/P}$	Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na linha de energia conectada);
$R_{V/T}$	Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na linha telecomunicações conectada;
R_W	Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na linha conectada;
S1	Fonte de dano – descargas atmosféricas na estrutura
S2	Fonte de dano – descargas atmosféricas perto da estrutura
S3	Fonte de dano – descargas atmosféricas na linha
S4	Fonte de dano – descargas atmosféricas perto da linha
W	Largura da estrutura
Z_n	Zonas de proteção
Z_{PR-0A}	Região suscetível a ocorrência direta de descargas atmosféricas e da influência de campo eletromagnético consequente;
Z_{PR-0B}	Região protegida contra a descargas direta, no entanto continua submetida a influência de campo eletromagnético consequente;
Z_{PR-1}	Zona onde a corrente de surto é limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes, blindagem espacial e/ou DPS na fronteira;
Z_{PR-2}	Zona interna a ZPR-1

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 Justificativa 22
1.2 Objetivos 23
1.2.1 Objetivo geral 23
1.2.2 Objetivos específicos 23
1.3 Estrutura do Trabalho 23
2 DA ELETRICIDADE ESTÁTICA ÀS FAÍSCAS NO CÉU 24
2.1 Descarga relâmpago 26
2.2 Classificação dos relâmpagos 28
2.3 O caminho dos relâmpagos em direção a terra (raios) 29
2.3.1 O ponto de impacto 30
2.3.2 As consequências de descargas atmosféricas em áreas ocupadas 33
3 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA) 42
3.1 Subsistema de captação 44
3.2 Subsistema de descidas 45
3.3 Subsistema de aterramento 47
3.4 Métodos de proteção 50
3.4.1 Ângulo de Proteção ou Método de Franklin 50
3.4.2 Esfera Rolante ou Método Eletrogeométrico 52
3.4.3 Gaiola de Faraday ou Método das Malhas 54
3.5 Zona de Proteção contra Raios (ZPR) 55
3.6 Níveis de Proteção 56
4 ESTUDO DE CASO: ESTRUTURA AGUAPA 58
4.1 Gerenciamento de risco 60
4.2 Dados e parâmetros da edificação AGUAPA 61
4.3 AGUAPA: Avaliação da probabilidade de perdas P_A, P_B, P_U e P_V 65
4.4 AGUAPA Avaliação da quantidade de perdas LA, LB, LU e LV 67
4.5 AGUAPA: Avaliação do risco R1 e necessidade de proteção 68
5 ESTUDO DE CASO: POUSADA 70
5.1 Gerenciamento de risco da edificação Pousada 70
5.2 Pousada: Dados e parâmetros 70

5.3 Pousada: Avaliação da probabilidade de perdas PA, PB, PU e PV 74
5.4 Pousada: avaliação da quantidade de perdas LA, LB, LU e LV 75
5.5 POUSADA: Avaliação do risco R1 e necessidade de proteção 75
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 77
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 81
ANEXO A - Planta de situação da edificação AGUAPA 84
ANEXO B - Planta de cobertura da Pousada 85

1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais, imprevisíveis de grande poder destrutivo e que historicamente eram atribuídas a ações divinas por meio das crenças populares, já que suas causas, por muito tempo, se mantiveram como desconhecidas. No entanto, as mitologias sobre descargas atmosféricas viriam a sofrer rupturas por volta do século XVIII, mais precisamente por intermédio de Benjamim Franklin, ao caracterizar estes fenômenos como correntes elétricas de alta intensidade e curta duração, as quais estariam, de alguma forma, associadas às nuvens que antecedem os fortes temporais de chuva (FILHO, S., 2005; MOURA; BONFIM, 2017).

No começo do século XX, os avanços das pesquisas sobre eletricidade tornaram possível o desenvolvimento de um modelo para a estrutura elétrica das nuvens e posteriormente a classificação de diferentes tipos de descargas atmosféricas. Dentre estes diferentes tipos estão as voltadas ao solo, que (direta ou indiretamente) podem causar danos irreversíveis. Atualmente no Brasil, são registradas em média anual 110 casos de mortes humanas devido a este tipo de fenômeno. Quando se analisa os efeitos desse fenômeno sobre a transmissão e distribuição da energia elétrica, estima-se que ele cause (através de desligamentos) prejuízos na ordem de R$ 1 Bilhão (ROSA, 2012; INPE 2023).

Da mesma forma que perdas de valor econômico e perdas de vida humana podem ser causadas por descargas atmosféricas, as perdas de serviço ao público e patrimoniais também estão associadas a este fenômeno. Danos mecânicos, incêndios, explosões, acidentes por choque elétrico, falhas ou mau funcionamento de sistemas internos, sobretensões em linhas de energia ou de telecomunicações e tensões induzidas devido a influência de descargas atmosféricas nas redondezas de uma estrutura ou diretamente sobre ela, são alguns exemplos que podem resultar em perdas de serviço ao público e patrimoniais (FILHO, J., 2017).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira 5419-1 (2015a), além do ponto do impacto, a intensidade e a duração de uma corrente elétrica atmosférica são fatores que influenciam diretamente as consequências de uma eventual descarga. Assim, levando em consideração a necessidade de proteção de uma estrutura quando se analisa os riscos aos quais ela está submetida, surge o conceito de Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), que tem como objetivo interceptar, conduzir e dissipar correntes elétricas atmosféricas pelo caminho mais seguro possível, em direção ao menor potencial elétrico, anulando ou minimizando seus impactos consideravelmente em decorrência de uma descarga direta sobre a estrutura.

Este trabalho tem como fundamento a análise de risco de dois casos particulares de estrutura do tipo edificação, ambas localizadas em São Miguel do Guamá -PA, zona rural (ANEXO A) e suburbana (ANEXO B). O intuito é verificar a necessidade da aplicação de SPDA via gerenciamento de risco, levando em consideração variáveis importantes como a média estatística da densidade de descargas atmosféricas na região definida, a probabilidade de danos e a quantidade média de perdas que podem ser causadas aos objetos de estudos. Todos os critérios de avaliação que consistem nas tomadas de decisões seguem as recomendações da ABNT NBR 5419-2, cujos procedimentos e especificidades são discutidos ao longo deste trabalho.

1.1 Justificativa

O interesse pela temática surgiu durante uma visita às obras de construção de uma edificação localizada na zona rural, no município de São Miguel do Guamá, interior do Pará (Anexo A). Durante a visita, foram identificadas irregularidades quanto aos padrões normativos de aterramento elétrico e a ausência de gerenciamento de risco para averiguar a necessidade da aplicação de SPDA, sob a alegação de que em outros casos semelhantes não houve necessidade de proteção. Porém, assumir essa hipótese como verdadeira sem antes fazer uma análise precisa, condiz com precipitação e pode levar a consequências desagradáveis, considerando o número de mortes (2194 casos registrados) envolvendo descargas atmosféricas entre 2000 e 2019, em todo o território nacional (Brasil), onde desse total de casos registrados, 26% deles ocorreram em zonas rurais e estão associadas ao agronegócio e demais atividades rurais (INPE, 2023).

Objetiva-se por meio de uma avaliação de riscos, evitar o mau dimensionamento do sistema de proteção ou mesmo de sua necessidade. Ações precipitadas, as quais não utilizam avaliação de risco, podem resultar em custos adicionais ou desnecessários; pequenos danos a fachadas e estrutura (danos patrimoniais); queima ou desligamento de equipamentos e sistemas eletricamente sensíveis como internet (danos de valor econômico e de serviços ao público); ou até mesmo acidentes, que em sua forma mais grave podem ocasionar a morte de pessoas ou animais (danos à vida) submetidos a tensões de toque e passo perigosas, durante eventuais descargas atmosféricas no local ou em suas proximidades.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a necessidade de aplicação de SPDA via gerenciamento de risco em duas estruturas do tipo edificação, zona rural e suburbana, respectivamente, conforme ABNT NBR 5419-2.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar o contexto histórico científico sobre descargas atmosféricas, suas classificações, características e consequências destrutivas;
- Descrever a configuração de um SPDA e os seus diferentes Níveis de Proteção, bem como suas relações com o gerenciamento de risco;
- Elaboração de gerenciamento de risco de SPDA em estruturas do tipo edificação e análise de resultados.

1.3 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 aborda uma visão geral do trabalho, sua justificativa, objetivos gerais e específicos a fim de despertar o interesse do leitor pela leitura.

O Capítulo 2 apresenta um contexto histórico das descargas atmosféricas, bem como as características elétricas das nuvens de tempestades, as classificações de diferentes tipos de descargas atmosféricas, suas causas e consequências destrutivas.

O Capítulo 3 aborda o conceito de SPDA como medida de proteção contra descargas atmosféricas, além de seus parâmetros, métodos e aspectos construtivos, ressaltando a importância do gerenciamento de risco como fator predominante em todas as etapas para o projeto de um sistema como este.

Os resultados do gerenciamento de risco de cada objeto de estudo e suas respectivas análises são apresentadas nos Capítulos 4, 5 e 6, respectivamente.

O trabalho se encerra com o Capítulo 7, onde são apresentadas as considerações finais, a proposta de um trabalho futuro e onde se enfatiza a importância da realização de um gerenciamento de risco antes da aplicação de um SPDA.

2 DA ELETRICIDADE ESTÁTICA ÀS FAÍSCAS NO CÉU

Registros de aproximadamente 600 a.C revelam que os gregos foram os primeiros a observar de perto os efeitos da eletricidade estática. Não obstante, várias civilizações, incluindo a própria Grécia, atribuíam os efeitos das descargas atmosféricas a manifestações divinas, uma vez que não podiam dominá-las ou explicá-las (FILHO, S., 2005; HAYT, 2013).

Na primeira metade do século XVIII, ainda existiam muitos questionamentos quanto aos fenômenos elétricos. O cenário mudou significativamente a partir de 1709, com a publicação de estudos experimentais de Francis Hauksbee, acerca do que fora descrito como “luminescência” e da eletricidade estática causada por fricção (SILVA, PIMENTEL, 2008; ROSA, 2012).

Nomes como o Charles Du Fay e de Stephen Gray ficaram marcados graças ao importante papel que tiveram no avanço das pesquisas em eletricidade. Entre 1727 e 1729, Gray concluiu em suas observações experimentais que a condutibilidade (ou como ele chamou "virtude elétrica") não era uma característica presente em todos os corpos, isto é, alguns materiais demonstravam ser susceptíveis de “conduzir” eletricidade e outros não (ROSA, 2012). Em 1733, Du Fay reconheceu que alguns materiais teriam a capacidade de atrair ou repelir outros corpos, o que caracterizaria a existência de duas categorias distintas de corpos eletrizados produzindo efeitos inversos, as quais chamou de “Eletricidade vítrea” e de “Eletricidade resinosa” (ASSIS, 2018).

Ao dar continuidade às pesquisas de Du Fay, Jean-Antoine Nollet publicou um trabalho em 1745, no qual afirmava que a eletricidade poderia ser explicada pelo movimento de duas correntes de fluido elétrico em direções opostas, as quais estariam presentes em todos os corpos e em todas as circunstâncias; sendo assim, ao friccionar um outro corpo, carregando-o eletricamente e usando-o para excitar um outro, parte desse fluido escaparia através de seus poros, causando uma corrente efluente, ao mesmo tempo que era compensada por uma corrente afluente do mesmo fluido vindo de fora. Esta teoria explicaria também a atração e repulsão de corpos leves, com a hipótese de que eles eram capturados por uma das duas correntes opostas de fluido elétrico (SILVA, PIMENTEL, 2008).

Em pouco tempo essas informações se espalharam e foram bem aceitas em países da Europa. O holandês Pieter Musschenbroek e o alemão Ewald Kleist, simultânea e independentemente, passaram a investigar a possibilidade de armazenar eletricidade com base nos estudos de Gray e Du Fay, com a hipótese de que o desperdício lento da eletricidade era atribuído à “evaporação da matéria elétrica”, o que resultou no mais famoso experimento

daquela década, a Garrafa de Leyden. Através deste experimento, fez-se o registro de dois fatos importantes: a descrição de um choque elétrico por Musschenbroek, e o centelhamento causado pela corrente elétrica, observado por Kleist e difundido por Adam Spencer (SILVA, PIMENTEL, 2008; ROSA, 2012).

À mesma época da descoberta da Garrafa de Leyden, Benjamin Franklin pesquisou e desenvolveu uma teoria qualitativa para explicar os fenômenos eletrostáticos conhecidos até então. Naquele período, perceberam-se diversas analogias entre as pequenas faíscas e as descargas elétricas de laboratório com os intensos clarões observados no céu. “Seria o relâmpago um fenômeno de natureza elétrica?”; perguntas como essa foram o combustível para uma nova era de estudos (ROSA 2012; ASSIS, 2018).

Nesse contexto, Franklin passou a desenvolver a teoria de um único fluido elétrico, cujos efeitos seriam causados pelo deslocamento da matéria em vez de dois tipos distintos de eletricidade. Em uma carta enviada a John Mitchell em 29 de abril de 1749, Franklin supôs que os corpos seriam formados pela matéria comum e pela matéria elétrica – o “fogo elétrico” – que tinha o poder de atrair ou repelir elementos de sua própria natureza. Isto é, para ele, um corpo fica eletrizado à medida que perde ou ganha alguma quantidade de matéria elétrica mediante centelhamento. Aquele que perdia matéria elétrica era chamado de negativo e o que recebia o excesso, de positivo (MOURA, BONFIM, 2017).

Quanto à Garrafa de Leyden, Franklin deduziu que o lado de dentro da garrafa estaria carregado com “fogo elétrico” positivo, enquanto que o lado de fora, negativo e com as mesmas proporções e ainda, que devido à parede de vidro, o “fogo elétrico” estaria impedido de se deslocar. Dessa forma, a eletricidade ou o choque elétrico seria caracterizado pelo efeito do “fogo elétrico” positivo buscando anular o efeito de sua contraparte negativo – o que seria possível em decorrência de um corpo menos “resistente”. Assim, para Franklin, este mesmo princípio também estaria relacionado com as nuvens que antecedem a ocorrência de relâmpagos, com uma diferença de escala, segundo cartas enviadas a Michel, em 1749 (ROSA, 2012; MOURA, BONFIM, 2017).

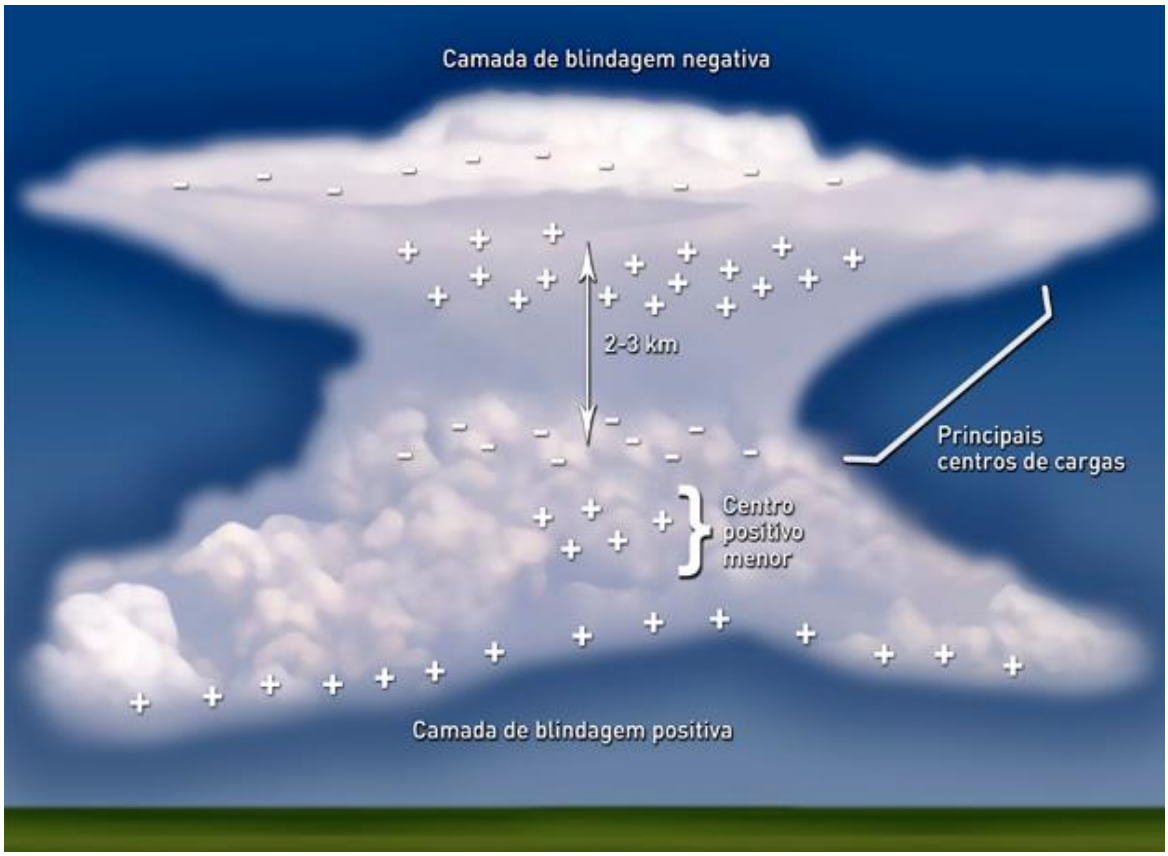
Pouco tempo depois, já convencido da natureza elétrica dos relâmpagos, em 1750, Franklin propôs experimentos para “capturá-los”, obviamente sem sucesso, devido à grande quantidade de energia. Porém, os experimentos serviram para corroborar suas hipóteses e torná-lo mundialmente famoso por suas invenções (ROSA, 2012).

2.1 Descarga relâmpago

Mais de dois séculos se passaram após a realização dos primeiros experimentos acerca da natureza dos raios e relâmpagos e conforme o previsto, esse fenômeno de fato está relacionado com a bipolaridade de cargas elétricas presentes no interior das nuvens de tempestade - chamadas *Cumulonimbus* (Cbs), as quais apresentam processos internos de transporte de massa, calor e cargas elétricas, com produção de um a quatro relâmpagos por minuto (CREDER, 2016; ASSIS, 2018).

Entre 1930 e 1970, diferentes modelos foram propostos para a estrutura elétrica das nuvens, porém o mais aceito foi aquele em que três centros de cargas são considerados, onde também se assume a existência de finas camadas de cargas na base e no topo da nuvem, denominadas camadas de blindagem. Assim, a organização desse conglomerado de cargas se dá por dois centros positivos, um na parte superior e o outro na parte inferior da nuvem (associado às cargas positivas provenientes do solo por efeito corona), além de um centro negativo entre ambos os centros positivos (que varia de dois a três quilômetros de distância do centro de carga positivo da parte superior da nuvem), conforme pode ser visto na Figura 1 (INPE, 2023).

Figura 1 - Estrutura elétrica das nuvens de tempestades.



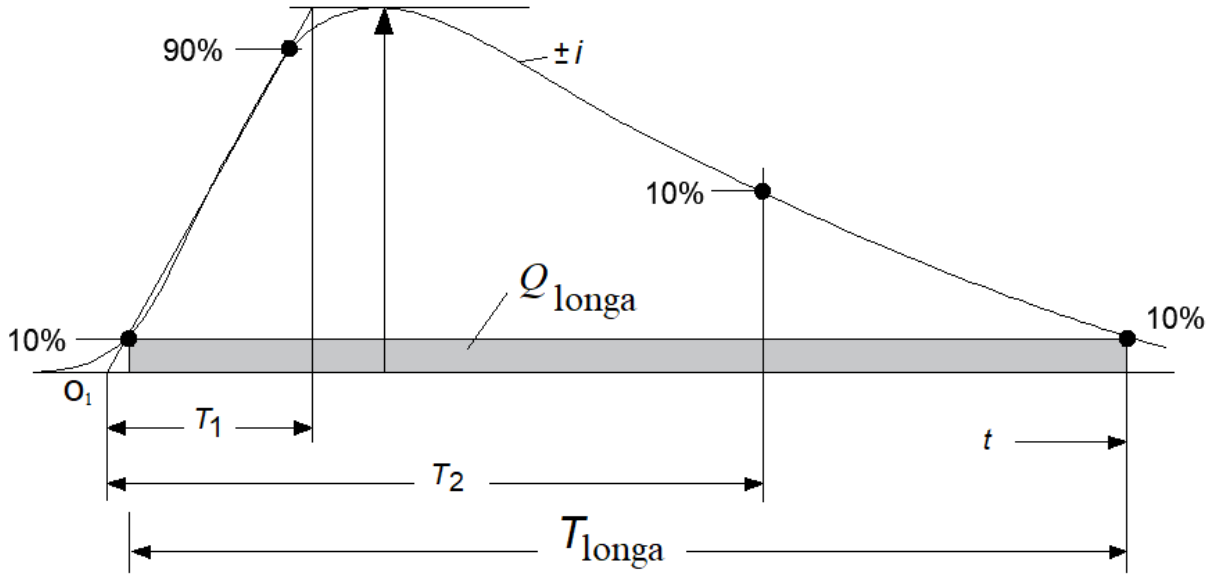
Fonte: INPE, 2023.

Já os relâmpagos, também conhecidos como descargas atmosféricas, são fenômenos que se propagam por canais ionizados difundidos pela transformação de energia eletrostática em energia eletromagnética, térmica e acústica. Embora o termo raio seja o mais conhecido popularmente, atribui-se exclusivamente a este conceito apenas os casos em que relâmpagos se conectam ao solo – pela descarga de retorno; um clarão comumente observado durante a formação de tempestades, dado o fechamento do canal ionizado nuvem-solo ou em raras ocasiões, solo-nuvem (NACCARATO, 2001; CREDER, 2016). Tais ocorrências se dão quando a intensidade do campo elétrico (em função da diferença de potencial entre regiões de cargas elétricas majoritariamente definidas) é forte o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar. Este processo caracteriza o evento que se expressa através do fluxo de uma corrente elétrica impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso ionizado parte da nuvem (na maioria das vezes) e em alguns casos atinge a superfície da Terra, percorrendo um trajeto tortuoso que varia de cinco a dez quilômetros, sendo, normalmente cheio de ramificações (NACCARATO, 2001; FILHO, S., 2005; INPE, 2023).

Outrossim, estudos experimentais de Franklin reverberam um efeito conhecido como poder das pontas, caracterizado pela tendência de acúmulo de cargas elétricas nas extremidades de superfícies pontiagudas (ou sobressalentes) de corpos carregados ou polarizados eletricamente. Nesse contexto, quando se analisa o solo como um referencial elétrico, irregularidades como edificações, torres, montanhas, árvores e seres vivos podem ser vistos como pontos favoráveis para o acúmulo de cargas precedidas pela primeira etapa de uma descarga do tipo nuvem-solo, onde o campo elétrico nos extremos de irregularidades no solo ou de pessoas em áreas abertas se intensifica (FILHO, J., 2017; ASSIS, 2018).

A corrente de uma descarga atmosférica consiste tipicamente de dois componentes distintos, o de curto e o de longa duração, como pode ser visto na Figura 2. A partir do gráfico da corrente de uma descarga atmosférica (i), no qual o primeiro componente está associado aos instantes iniciais da descarga partindo de uma origem virtual (O_1), caracterizado por um impulso de curta duração com intervalo de tempo inferior a dois milissegundos (tempo de frente T_1) e que posteriormente decai, como pode ser observado no intervalo de tempo até meio valor (T_2). Já o segundo componente, conhecido como componente longa (intervalo entre o valor 10 % na frente até o valor 10 % na cauda) da corrente de continuidade, é caracterizado graficamente pelo intervalo de tempo superior a 2 ms e menor que 1 s, isto é, a carga Q_{longa} no tempo T_{longa}, conforme pode ser observado ainda na Figura 2 (ABNT NBR 5419-1, 2015a).

Figura 2- Parâmetro dos componentes da corrente de uma descarga atmosférica.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5419-1, 2015a.

2.2 Classificação dos relâmpagos

Segundo Uman (1987, p. 10-20), existem pelo menos dois tipos fundamentais de relâmpagos: os que ocorrem no céu e os que envolvem o solo. Entre os relâmpagos que ocorrem no céu, existem três categorias principais:

(a) relâmpagos intranuvem, os quais ocorrem no interior da nuvem;

(b) relâmpagos entre nuvens, que ocorrem entre duas ou mais nuvens;

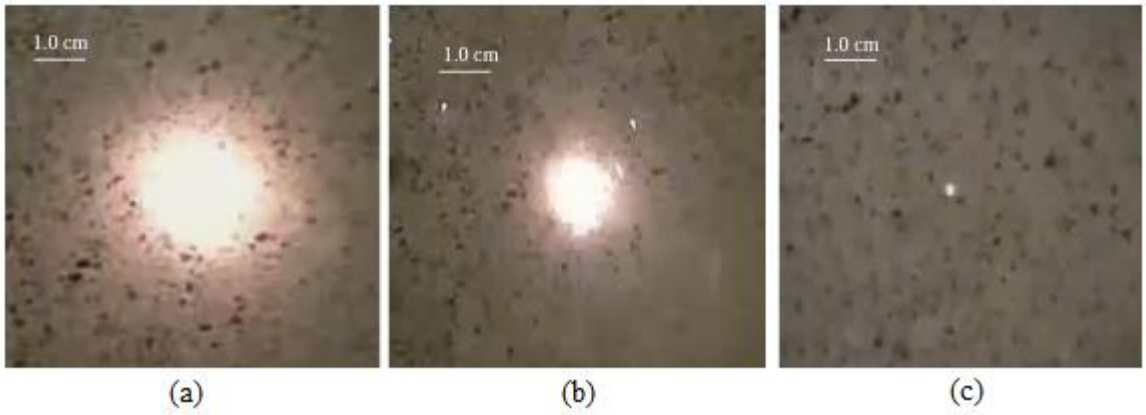
(c) relâmpagos no ar, que partem de uma nuvem, mas não chegam a realizar conexão com outras nuvens ou com o solo e terminam na própria atmosfera.

Os relâmpagos que envolvem o solo são comumente mais conhecidos devido ao seu poder destrutivo (associado a bens, serviços e à vida humana) e pela fácil visualização ao assumirem, de acordo com o sentido de movimento da carga líder, a denominação de nuvem-solo (transferência de cargas negativas para o solo) ou solo-nuvem (transferência de cargas positivas para a nuvem). Os relâmpagos do tipo nuvem-solo são também chamados de raios e correspondem a aproximadamente 90% das ocorrências de relâmpagos entre nuvem e terra, enquanto que os do tipo solo-nuvem são mais raros, podendo ocorrer no alto de montanhas, edifícios, torres e antenas (UMAM, 1987; NACCARATO, 2001; FILHO, S., 2005).

Existem ainda outras formas raras de relâmpagos, como aqueles que podem assumir diferentes formas (esféricas, nebulosas, difusas, múltiplas esferas), tamanhos, cores e comportamentos variados, chamados de relâmpagos globulares (como pode ser visto na Figura 3). Os relâmpagos globulares (que vez ou outra explodem) podendo queimar pessoas ou animais

próximos, são considerados um mistério, podendo apresentar correntes elétricas de ambas as polaridades (positiva e negativa), comumente ditos relâmpagos bipolares, cuja natureza estima-se estar relacionada com a de relâmpagos do tipo solo-nuvem (FILHO, S., 2005; PAIVA, 2009; INPE, 2023).

Figura 3 - Imagens de um vídeo mostrando o decaimento de uma bola luminosa simulando o comportamento luminoso de um raio globular. (a) 80ms; (b) 160 ms; (c) 240 ms.



Fonte: Adaptado de Paiva, 2009.

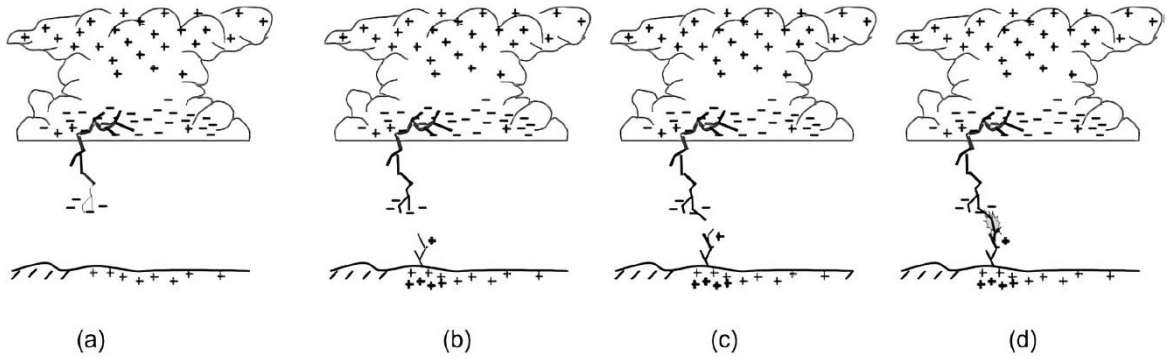
Tendo em vista que o presente trabalho visa analisar o gerenciamento de risco em uma edificação de baixa altitude e dado a raridade de relâmpagos caracterizados pela transferência de cargas elétricas positivas (solo-nuvem), este estudo estará restrito aos efeitos e ao comportamento, em diferentes etapas, de relâmpagos nuvem-solo negativos.

2.3 O caminho dos relâmpagos em direção a terra (raios)

Nuvens carregadas eletricamente, quando próximas o suficiente da superfície da Terra, induzem (na superfície do solo) cargas elétricas opostas àquelas presente na base da nuvem, ocasionando o surgimento de uma diferença de potencial elétrico e consequentemente de um campo elétrico de milhares de Volts por metro. Quando forte o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar (3×10^6 V/m), acelera as cargas elétricas negativas presentes na base da nuvem no sentido vertical, ocasionando uma ruptura preliminar entre o centro principal de cargas negativas e a camada de blindagem de cargas positivas, passando a se propagar em direção à Terra em função de um líder escalonado (FILHO, S., 2005; FILHO, J., 2017).

Figura 4 - Principais etapas de uma descarga atmosférica nuvem-solo. (a) ruptura preliminar; (b) indução de cargas elétricas na superfície do solo; (c) momentos antes do encontro de líderes e (d) descarga.

Figura 4 - Principais etapas de uma descarga atmosférica nuvem-solo. (a) ruptura preliminar; (b) indução de cargas elétricas na superfície do solo; (c) momentos antes do encontro de líderes e (d) descarga.



Fonte: Adaptado de Filho, S., 2005.

O esquema supracitado pode ser melhor compreendido a partir da Figura 4, onde é possível observar que quando a extremidade do líder escalonado se aproxima do solo (Figura 4a), antecedido de ramificações em busca de regiões com melhor condutividade elétrica na atmosfera, uma ou mais cargas ascendentes positivas (Figura 4b), denominadas líderes conectantes, referentes ao campo elétrico em torno de irregularidades na superfície do solo, intensifica-se ao ponto de romper a rigidez dielétrica do ar e se propagam a partir do solo em direção ao líder escalonado (Figura 4c).

Quando os dois líderes se encontram (Figura 4d), ocorre o fechamento de um circuito elétrico. Neste instante, uma frente de onda representando o potencial elétrico da Terra se propaga continuamente para cima, através do canal previamente ionizado, descarregando-o eletricamente. Forma-se então um intenso clarão, o que caracteriza a primeira descarga de retorno (FILHO, S., 2005; INPE 2023).

Se após uma descarga de retorno o raio terminar, o raio é dito simples. Do contrário, se após uma pausa uma nova descarga subsequente acontecer através do canal residual de uma descarga anterior, antecedida de um novo predecessor, chamado líder contínuo, tem-se então o que se conhece por raios múltiplos e ocorre quando a nuvem não se descarrega por completo. O que também explica o fato dos raios visualmente parecerem ser tremulares ao serem avistados, ao passo que vários deles estão ocorrendo em uma diferença de microssegundos. Inclusive, há registros de casos com mais de 26 descargas de retornos em um único raio (NACCARATO, 2001; FILHO, S., 2005; INPE, 2023).

2.3.1 O ponto de impacto

Como todo e qualquer fenômeno devastador da natureza, os relâmpagos passam a ter destaque pela grande quantidade de energia liberada no momento de uma descarga (uma corrente elétrica não alternada, na escala de milhares de Ampères, com velocidade em torno de

100.000 km/s), suficientemente intensa para gerar danos severos ou no mínimo irreversíveis ao ponto de impacto, incluindo a perda de vida humana (INPE, 2023).

Estudos revelam que a cada 50 mortes no mundo ocasionadas por raios, uma é em solo brasileiro, que lidera o ranking mundial em incidência de raios, sendo atingido por cerca de 78 milhões de descargas atmosféricas anualmente. A explicação para esse alto índice se dá pela localização geográfica do país, que se encontra majoritariamente na zona tropical do globo, onde os raios solares são perpendiculares à superfície e o verão na maior parte dessa região é quente e úmido, favorecendo a formação de nuvens com alta densidade de cargas elétricas (REBOITA. et al., 2012; INPE, 2023).

> Quando as descargas elétricas entram em contato direto com quaisquer tipos de construção, tais como edificações, tanques metálicos de armazenamento de líquidos não convenientemente aterrados, nas partes estruturais ou não de subestações etc., são registrados grandes danos materiais que poderiam ser evitados caso essas construções estivessem protegidas adequadamente por Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA). (FILHO, J., 2017, p. 1523).

Apesar de todas essas informações acerca dos relâmpagos, é válido destacar que o fenômeno é de natureza aleatória. É até possível atribuir parâmetros por meio de distribuições estatísticas mediante dados de uma região onde eles possam atingir estruturas ou elevações próximas, mas nunca com uma certeza determinística. Conquanto, é possível classificá-las em duas categorias:

a) descargas diretas – como o próprio nome sugere, atingem diretamente estruturas, redes de energia elétrica ou tubulações metálicas que adentram nas estruturas e provocam perdas imediatas, como a de seres vivos, serviços públicos, patrimônio cultural e econômico;
b) descargas indiretas – não atingem um alvo em específico, mas produzem linhas de campo eletromagnético em suas redondezas que variam na escala de centenas de Volts, provocando surtos que podem adentrar a estrutura e causar falhas de equipamentos, incêndios ou explosões por centelhamento, além de trazer riscos por tensões induzidas de passo e toque.

Os danos causados por descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre estruturas (linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram as estruturas) ou que atingem objetos ou linhas elétricas em suas proximidades (descargas indiretas) e que são perigosas às pessoas, às próprias estruturas, seu conteúdo e às instalações elétricas internas de modo geral, são descritas conforme ABNT NBR 5419-1 por:

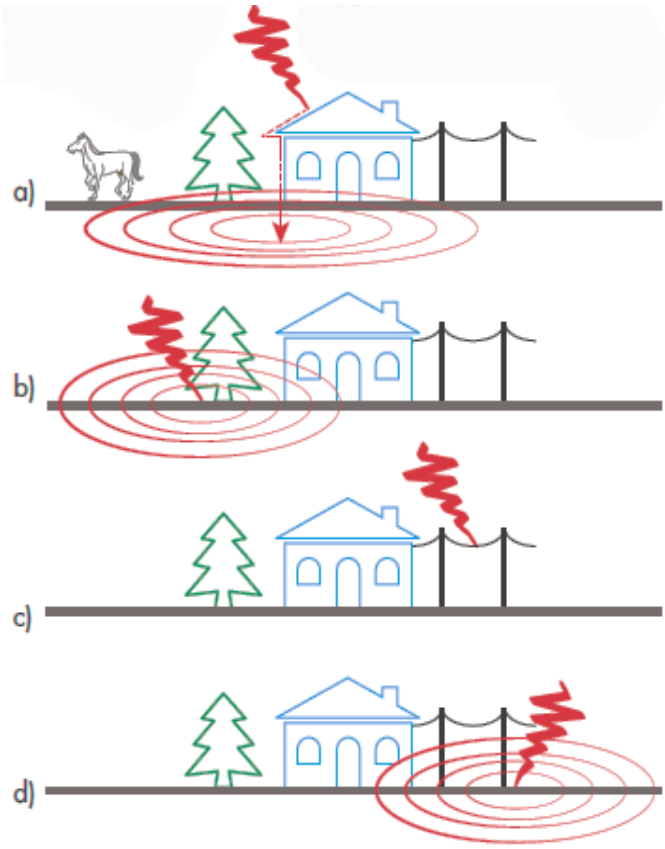
(a) S1 – descargas que atingem diretamente uma estrutura (Figura 5a);

(b) S2 – descargas que atingem indiretamente uma estrutura (Figura 5b);

(c) S3 – descargas que atingem diretamente linhas ou tubulações metálicas que adentram nas estruturas (Figura 5c);

(d) S4 – descargas que atingem indiretamente linhas ou tubulações metálicas (Figura 5b).

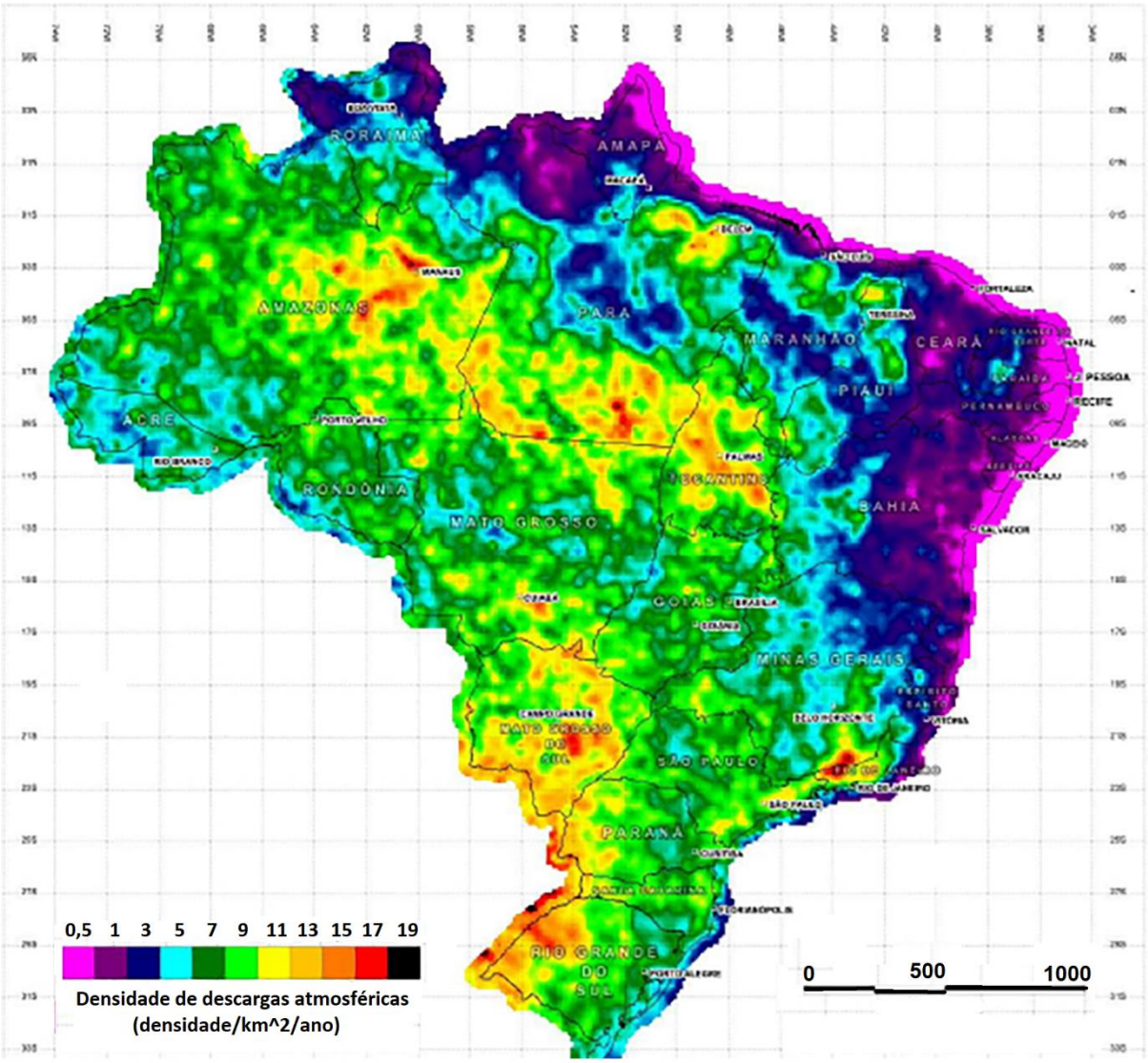
Figura 5 - Descargas atmosféricas em diferentes situações.



Fonte: Adaptado de Finder, 2011.

Segundo a ABNT NBR 5419-2 (2015b, p. 97), que dispõe de dados do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os menores índices de incidência de descargas atmosféricas ocorrem nas regiões litorâneas do país, predominantemente na região Nordeste do Brasil e nas fronteiras com a Guiana, Suriname e Guiana Francesa. Enquanto que em algumas regiões como as de fronteira com a Argentina e Paraguai, no estado do Amazonas, entre o Rio de Janeiro e Minas Gerais, Sul do Pará e Tocantins e sul do Mato Grosso, apresentam índices maiores, conforme mostra as legendas e informações contidas na Figura 6 e que também podem ser acessadas pela internet e em tempo real no site do próprio instituto (INPE, 2023).

Figura 6 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5419-2, 2015b.

2.3.2 As consequências de descargas atmosféricas em áreas ocupadas

Segundo a ABNT NBR 5419-1 (2015a, p. 11) as descargas atmosféricas podem causar três tipos básicos de danos:

a) D1 – danos às pessoas por choque elétrico;
b) D2 – danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica, liberação de produtos químicos) devido aos efeitos da corrente de descarga pelo canal de condução e;
c) D3 – danos a sistemas elétricos internos devido aos pulsos eletromagnéticos causados pela corrente elétrica das descargas atmosféricas por meio do acoplamento resistivo, indutivo e capacitivo.

Tais danos relacionam-se com diferentes tipos de perdas, que podem ocorrer de forma isolada ou em conjunto, sendo elas:

(e) L1 – perda de vida humana (incluindo-se danos permanentes);

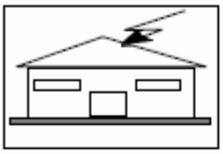
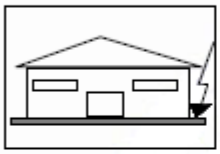
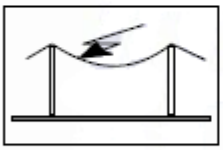
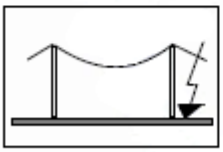
(f) L2 – perda de serviço público;

(g) L3 – perda de patrimônio cultural e;

(h) L4 – perda de valor econômico, por danos ou falhas que acarretam em paradas de atividades com fins lucrativos.

A relação entre fonte de danos, tipos de danos e seus respectivos tipos de perda, além de restrições no que diz respeito às perdas L1 e L4 para alguns casos específicos de danos e suas respectivas fontes, podem ser verificados na tabela contida na Figura 7.

Figura 7 - Fonte de danos, tipos de dados, tipos de perdas, associações e restrições.

Descarga atmosférica		Estrutura	
Ponto de impacto	Fonte de danos	Tipo de danos	Tipo de perdas
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 [a] L1, L2, L3, L4 L1 [b], L2, L4
	S2	D3	L1 [b], L2 , L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 [a] L1, L2, L3, L4 L1 [b], L2, L4
	S4	D3	L1[b], L2, L4

[a] Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos.

[b] Somente para estruturas com risco de explosão ou para hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos podem imediatamente colocar em perigo a vida humana.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 5419-2, 2015b.

Outro fator importante acerca dos tipos de danos e perdas, são os riscos que surgem em decorrência de descargas elétricas atmosféricas, aos quais pessoas, animais ou bens de valor econômicos ficam submetidos. Estes são classificados em:

(a) R1 – risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes);

(b) R2 – risco de perda de serviço ao público;

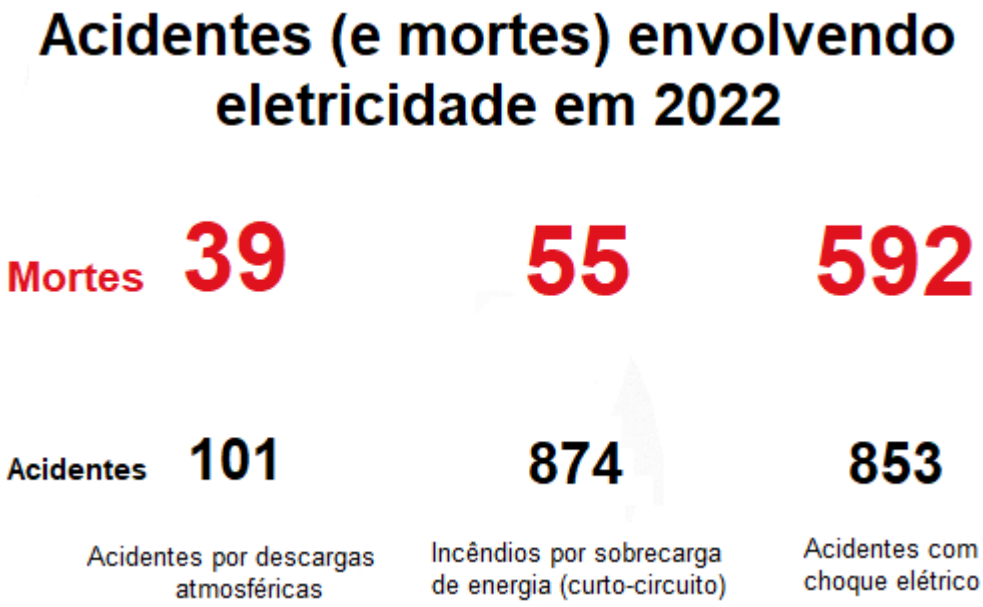
(c) R3 – risco de perda de patrimônio cultural e;

(d) R4 – risco de perda de valores econômicos.

Ao calcular um risco, os componentes de risco podem ser agrupados de acordo com as fontes e os tipos de danos. A partir desta análise, é possível estimar um valor relativo, R, de uma provável perda anual média de diferentes situações de risco, segundo a ABNT NBR 5419-1.

A perda de vida humana (L1), dada sua relevância, faz parte da estatística brasileira de acidentes de origem elétrica, onde, segundo a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (Abracopel), expôs 101 casos de acidentes ocasionados por descargas atmosféricas foram registrados em 2022, dos quais 39 foram fatais, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Acidentes de origem elétrica no ano de 2022.



Fonte: Souza et al., 2023.

Embora o número total de casos fatais tenha reduzido se comparado ao ano anterior (2021), com 40 casos registrados envolvendo descargas atmosféricas, Martinho et al. (2022) alertam sobre a importância de manter medidas de segurança mesmo dentro de edificações residências, as quais se destacam como um dos lugares mais propícios de ocorrer fatalidades, ocasionalmente devido sobretensões em linhas de energia e telecomunicações que as adentrem (INPE, 2023).

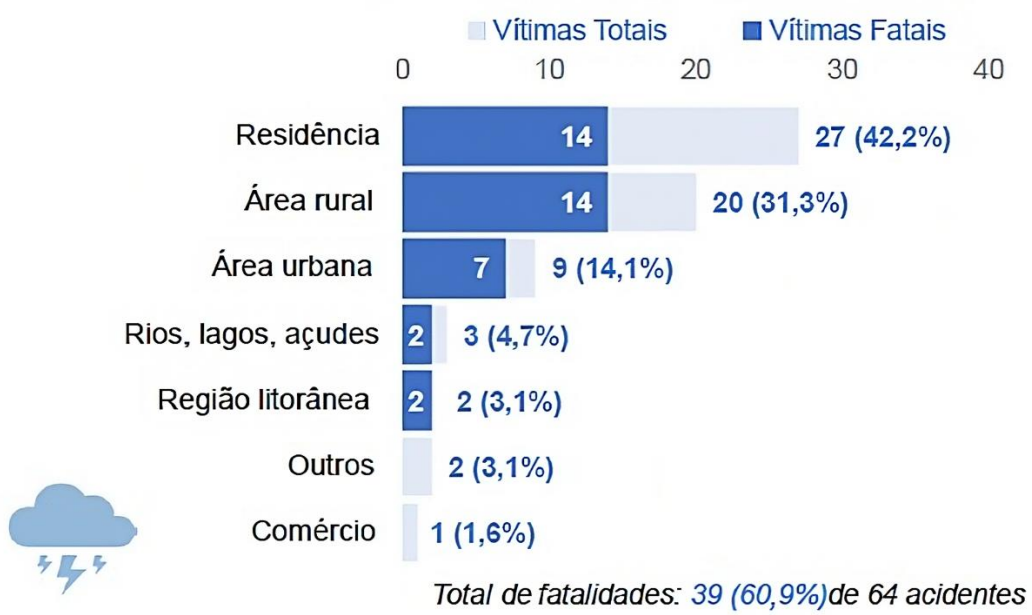
Nos casos de descargas atmosféricas nas redondezas de um ser vivo, o corpo da provável vítima fica submetida a situações de perigo por choque elétrico, podendo ser definido como uma perturbação de natureza e efeitos diversos que se manifestam no organismo (humano ou de outro animal), quando estes são percorridos por uma corrente elétrica, cujas perturbações variam conforme o percurso, a intensidade, o tempo, a espécie, a frequência e a tensão da

corrente elétrica a qual um indivíduo (pessoa ou animal) passa a ser submetido, podendo ser intensificados conforme o estado e condições orgânicas deste mesmo indivíduo no momento em que sofre o choque elétrico (FLORES, 2014).

Parestesia, contrações musculares, inconsciência, fibrilação ventricular, bloqueio das vias respiratórias e queimaduras, são efeitos comuns de um choque elétrico. Estudos datados na década de 1970 resultaram em outras descobertas a seu respeito, especificamente de sua ocorrência em seres humanos. Dentre as descobertas, está o limiar de percepção de uma corrente elétrica que o atravessa (em torno de 1 mA) e a máxima corrente elétrica tolerada para que haja interferências no sistema cardiovascular e respiratório (de 60mA a 100mA). Não obstante, verificou-se também que o corpo humano apresenta uma resistência de aproximadamente 1000Ω para um caminho de propagação de corrente elétrica entre a mão e o pé (incluindo órgãos vitais) ou entre ambos os pés de um indivíduo – uma resistência suficientemente pequena se comparado aos valores de pico de uma corrente elétrica atmosférica, que em 90% das vezes é na ordem de 5kA (FLORES, 2014; FILHO, J., 2017).

Informações coletadas pela Defesa Civil, Ministério da Saúde, Imprensa e dados de óbitos do próprio Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), apontam que a cada quatro acidentes com descargas atmosféricas, um envolve pessoas da zona rural trabalhando a céu aberto em atividades ligadas ao agronegócio. Estes dados não diferem das informações mais precisas sobre acidentes desta natureza apresentadas pela Abracopel no ano de 2023 (Figura 9), a qual afirma que dentre os casos de fatalidade 31,3% ocorreram em áreas rurais. Atribui-se majoritariamente a essa estatística pessoas do sexo masculino, visto que a força Franklin de trabalho rural é formada predominantemente por homens jovens com idade entre 20 e 29 anos (SOUZA et al., 2023).

Figura 9 - Acidentes com descargas atmosféricas no ano de 2022.



Fonte: Adaptado de Souza et al., 2023.

Paralelamente aos fatos, recomenda-se no momento de tempestades evitar locais abertos, como praias (incluindo o fato de estar na água em posição de nado), campos de futebol e similares, áreas rurais e áreas abertas em geral, como também evitar se abrigar embaixo de árvores isoladas ou permanecer sob elevadas altitudes como em picos de morro ou edificações. É fundamental procurar um lugar seguro para se abrigar, provido de análise de risco de acordo com a ABNT NBR 5419-2 e, se necessário, que comporte sistema de proteção contra descarga atmosférica (SPDA) adequado ou optar por lugares fechados como carros, caminhões e congêneres, desde que estejam devidamente fechados, dotados de superfícies metálicas e isoladas internamente (FILHO, J., 2017; SOUZA et al., 2023).

> Num conjunto de situações, em função de sua posição, o corpo da vítima se destaca como estrutura superior em relação ao ambiente local, tornando-a um ponto preferencial de incidência de descarga. [...] Nessas situações, a vítima "funciona" como um elemento captor. [...] Noutro conjunto de situações, ao se posicionar próxima de pontos preferenciais de incidência (como árvores, mastros etc.), a vítima se sujeita ao risco de servir de percurso de corrente, seja por descarga lateral ou por contato. Sujeita-se, ainda, a ser submetida a tensões de passo geradas pela corrente de descarga. (FILHO, S., 2005, p. 153 - 154).

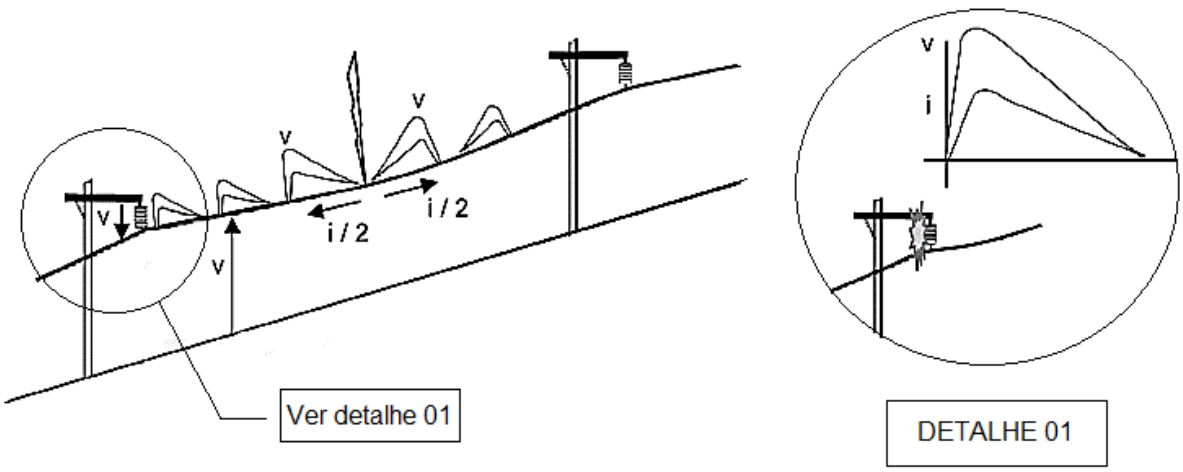
Ainda segundo Filho, S. (2005, pg. 155), quando não há a possibilidade de buscar um local seguro, a vítima deve ficar agachada com os pés e troncos próximos. Sob mesma perspectiva, recomendações do INPE (2023) sugerem ajoelhar-se e curvar-se para frente, colocando mãos nos joelhos e a cabeça entre eles, evitando sob qualquer hipótese se deitar sobre o solo, evitando assim estar sujeito a tensões de passo.

Mortes por incidência direta de descarga atmosféricas são frequentes, embora não sejam registradas de forma detalhada, estima-se que no mínimo 300 brasileiros são atingidos todos os anos, apesar da probabilidade de uma pessoa morrer atingida por um raio no Brasil ao longo de sua vida seja de 1 em 25.000 e que pode aumentar em até 25 vezes, conforme se muda as condições climáticas e geográficas (INPE, 2023).

Em incidências diretas, ressalta-se a existência de dois parâmetros importantes: a energia por unidade de resistência e o valor de pico da corrente elétrica atmosférica. O primeiro permite estabelecer a dimensão da energia transferida para a vítima quando percorrida pela corrente de descarga. O segundo é referente ao valor de pico da corrente e constitui o fator determinante para a morte imediata de seres vivos, dada a energia transferida na ordem de dezenas de bilhões de Joules, suficientemente capaz de causar uma parada cardiorrespiratória e, eventualmente, a carbonização de tecidos da vítima (FILHO, S., 2019; INPE, 2023).

Nessa perspectiva, ao atingir diretamente uma linha de energia (ver Figura 10), as descargas atmosféricas provocam surtos eletromagnéticos em sentidos opostos a partir da corrente injetada ao dividir-se igualmente no ponto de impacto, onde os valores de pico são muito acima do nível de suportabilidade do isolamento de linhas convencionais. Ao alcançar o isolamento que separa o condutor energizado e o suporte de uma torre ou de um poste tipicamente aterrado, a sobretensão ocasiona o rompimento e o estabelecimento de um arco elétrico (superficial ou volumétrico) através do isolador que suporta a fase (FILHO, S., 2005).

Figura 10 - Descarga atmosférica direta em uma linha secundária de energia.

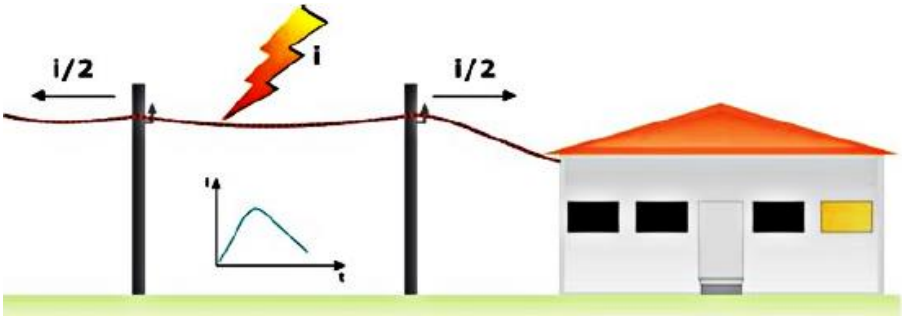


Fonte: Filho, S., 2005.

Além disso, os efeitos de uma descarga direta em linhas também podem ocasionar desligamentos ou queima de equipamentos tanto das concessionárias quanto dos consumidores

(Figura 11), quando são transferidos para a rede de baixa tensão através do transformador e também pela atuação dos para-raios de média tensão (PIANTINI, 2019).

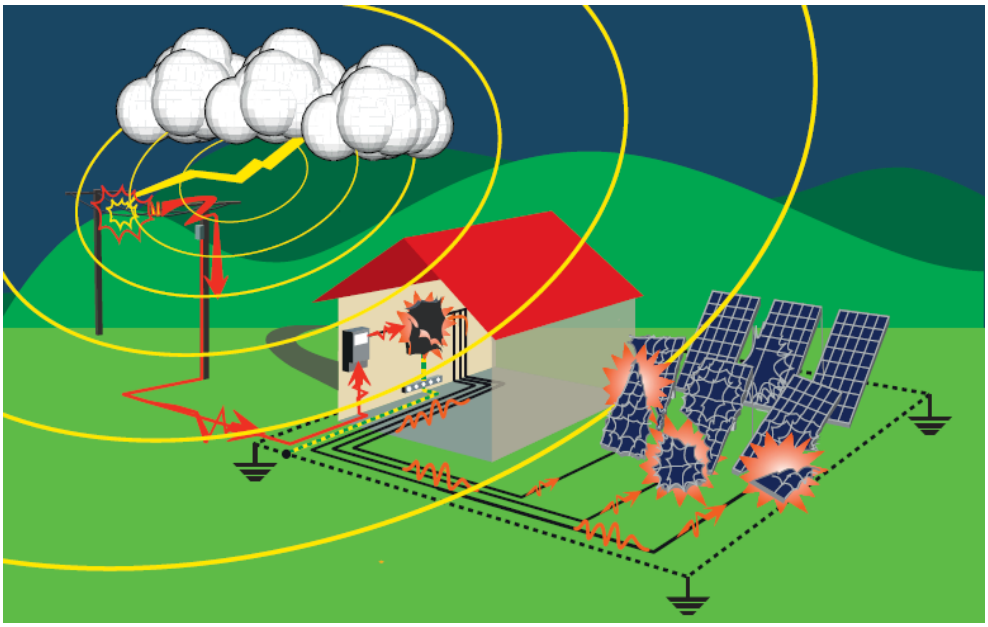
Figura 11 - Surto de energia causado pelo impacto direto de raio em linha secundaria conectada à estrutura.



Fonte: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2011.

Por outro lado, sobretensões induzidas por descargas nas proximidades de linhas também podem causar efeitos semelhantes, inclusive na rede de baixa tensão, embora sejam mais raros, pelo fato de estarem quase sempre abaixo da rede primária, a qual funciona como uma blindagem para a rede secundária. No entanto, não se pode dizer o mesmo sobre instalações elétricas nas proximidades, as quais não estejam devidamente protegidas por equipamento de proteção contra surtos ou até mesmo devidamente equipotencializadas e podem estar sujeitas a acoplamentos resistivos e indutivos nos casos em que haja tensões induzidas, como pode ser visto na Figura 12 (FINDER, 2012; PIANTINI, 2019).

Figura 12 - Soma dos vários efeitos das descargas atmosféricas: acoplamento resistivo e indutivo.



Fonte: Adaptado de Finder, 2012.

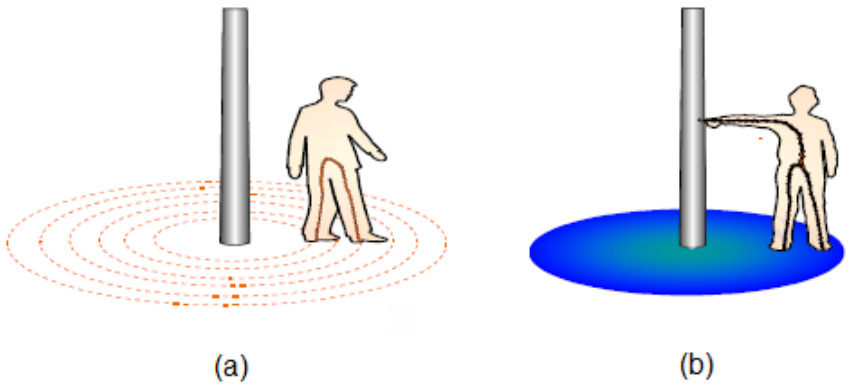
As tensões de passo (Figura 13a) também se relacionam a este evento, dado que o valor de pico de uma descarga atmosférica ao atingir uma estrutura aterrada ou até mesmo o solo

estabelece uma elevação de potencial elétrico entre pontos distintos na região. Em outras palavras, um ser vivo presente no local pode ficar submetido a uma diferença de potencial elevada sob influência de um campo elétrico se partes distintas de seu corpo (por exemplo os pés) estiverem em pontos diferentes de contato com o solo, constituindo, portanto, um circuito elétrico fechado pelo qual uma corrente elétrica se propaga. E segundo Filho. S., (2005):

> Mesmo para correntes impulsivas de curta duração como aquelas das descargas atmosféricas, tal diferença de potencial pode promover a circulação pelo corpo da vítima de correntes com intensidade capaz de gerar fibrilação ventricular e, eventualmente, morte. São raros os registros de morte de seres humanos atribuídos a descarga próxima. No entanto, é muito comum o relato da morte de gado em pastos, por ocorrências dessa natureza. Em alguns casos, reporta-se a morte simultânea de vários animais, particularmente na situação em que os mesmos se encontram abrigados próximos a árvores, durante tempestades. (FILHO, S., 2005, p. 143)

Já as tensões de toque (Figura 13b), como o próprio nome sugere, consiste em um contato direto (pessoa ou animal) com partes vivas de um sistema elétrico, onde uma corrente elétrica passa a se propagar (inclusive através de órgãos vitais) pelo corpo da vítima (KINDERMAM, 2001).

Figura 13 - Ilustração: a) tensão de passo e b) tensão de toque.

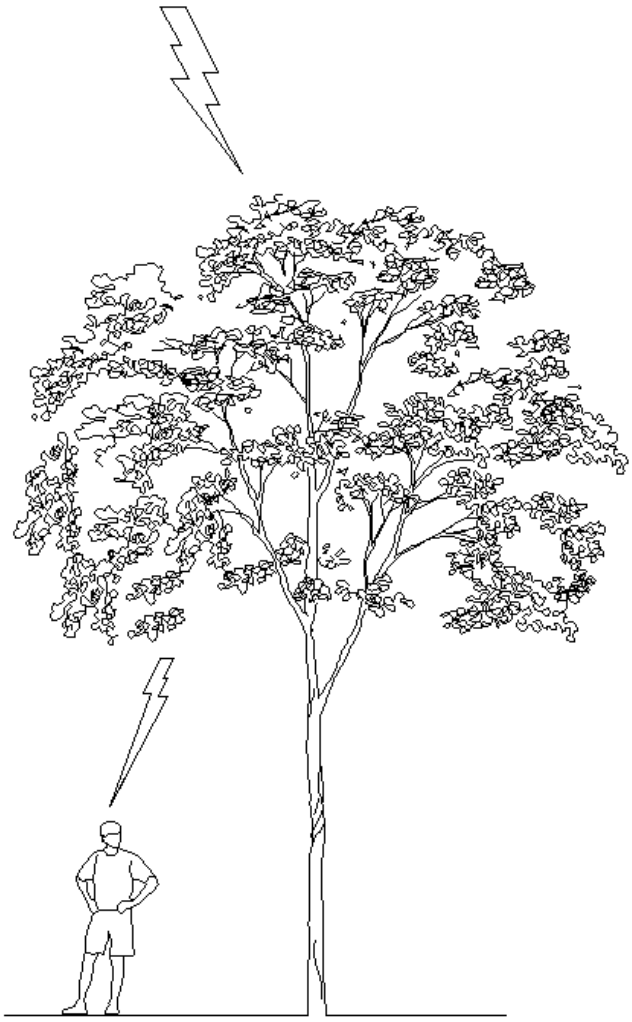


Fonte: Adaptado de Guimarães, 2020.

Outra casualidade são as descargas laterais que ocorrem quando um corpo ou objeto ficam submetidos a situações desejáveis para uma alternativa de condução da corrente elétrica atmosférica para o solo. Isto é, em seu percurso para a Terra, as descargas buscam se conectar à corrente de retorno, que por sua vez pode procurar caminhos de menor impedância para fechar um circuito, inclusive através de arcos no ar que conectam pontos com referenciais de boa condutividade em contato com o solo. Por exemplo, quando uma descarga incide sobre objetos elevados em áreas abertas, como em árvores, “faíscas” podem saltar de um ramo acima da vítima para a cabeça ou do tronco lateral (da árvore) para o corpo da vítima quando posicionada

ao lado, como mostra a Figura 14. É muito comum isto ocorrer em pastos ou áreas predominantemente abertas, onde se utiliza de árvores como abrigo durante tempestades de chuva (FILHO, S., 2005).

Figura 14 - Ilustração de uma descarga lateral.



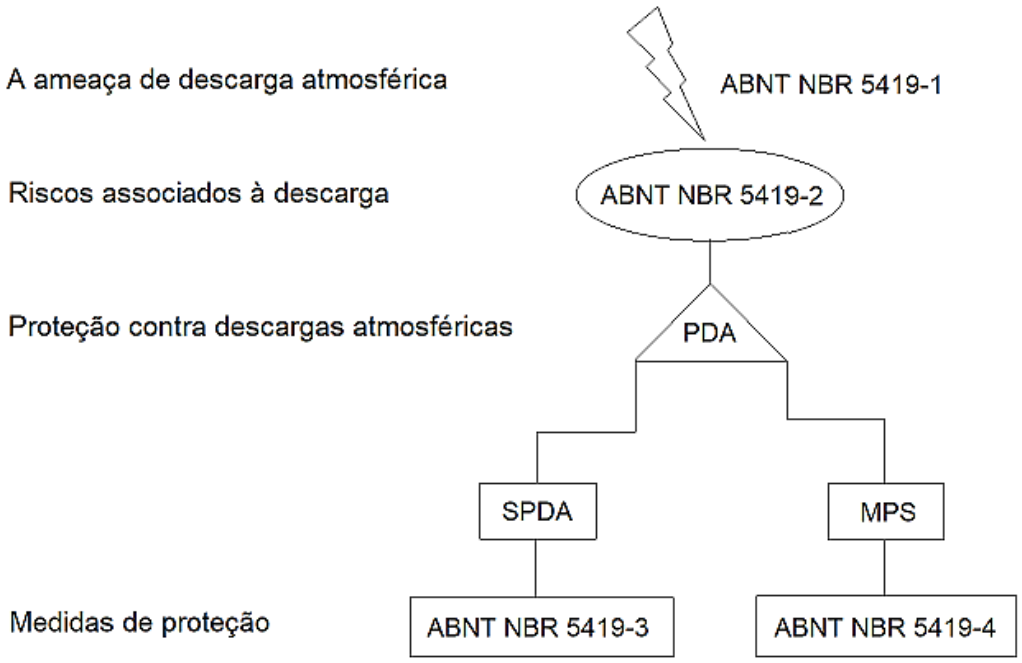
Fonte: Adaptado de Filho, S., 2005.

Em uma análise geral do panorama brasileiro, dados estatísticos do INPE revelam que entre 2000 e 2019, em diferentes cenários, houve um alto índice de acidentes causados por descargas atmosféricas e que estes também se relacionam a sérios prejuízos de valor econômico e a perda de vida humana. Com base nesses dados, estima-se que no Brasil o fenômeno mata em média 110 pessoas por ano, deixa mais 200 feridas e corresponde a cerca de 70% dos desligamentos de linhas de transmissão de energia elétrica e 40% das ocorrências em linhas de distribuição (além da queima de um número considerável de transformadores), onde os prejuízos anuais são na ordem de R$ 1 Bilhão (CUSTÓDIO, 2022; INPE, 2023).

3 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015a), o SPDA surge da necessidade de proteção contra descargas atmosféricas, mas isso não quer dizer que não haja outras medidas de proteção. No geral, o SPDA é parte integrante de uma Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA) e tem como função proteger estruturas, que em consonância com Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) para sistemas eletroeletrônicos sensíveis, resultam em um PDA (Figura 15). Ambas as medidas de proteção necessitam de um gerenciamento de risco. No entanto, este trabalho visa apenas à necessidade de aplicação de um SPDA e, portanto, o estudo se restringe a esse sistema em específico.

Figura 15 - Fluxograma de PDA.

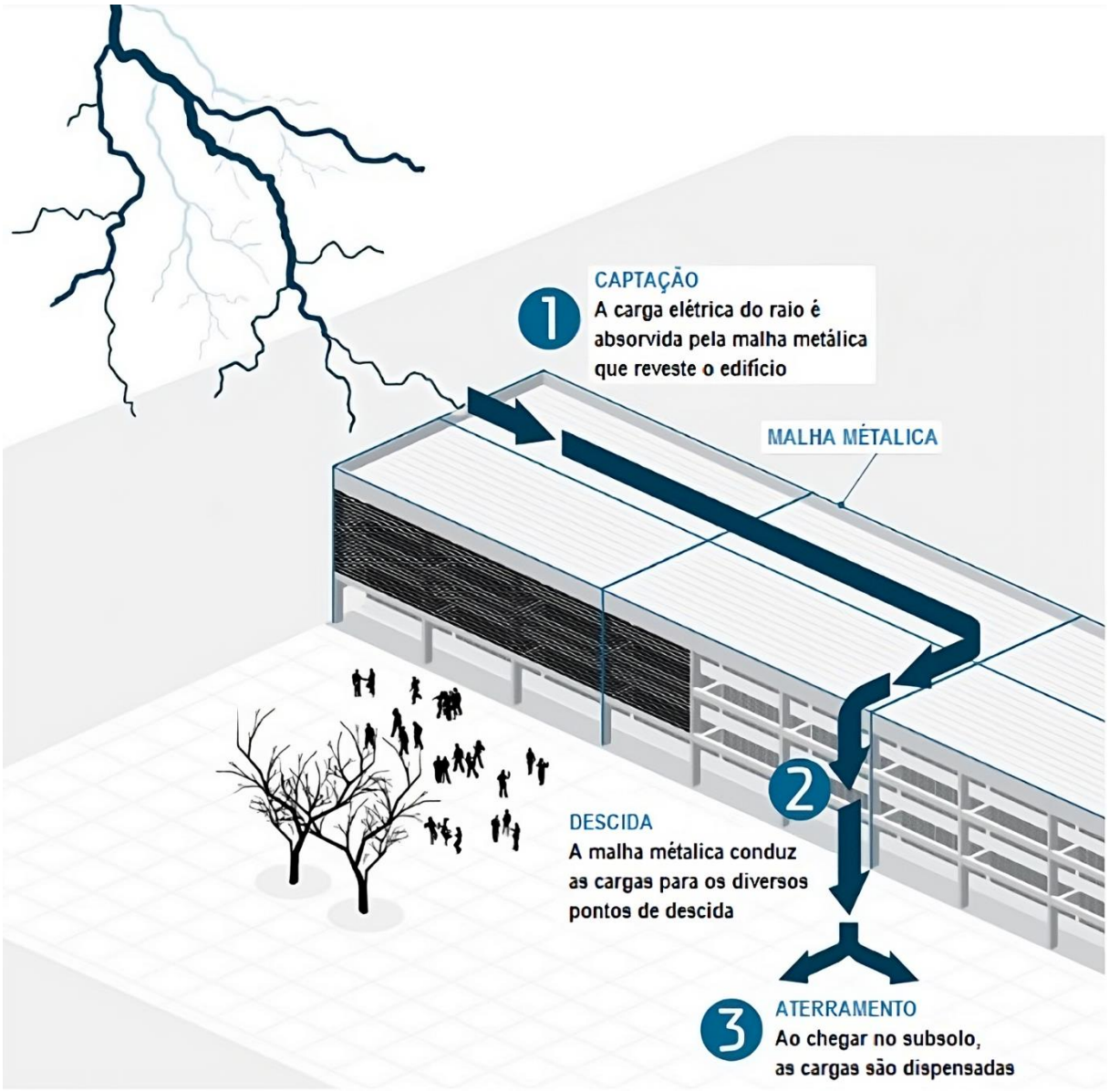


Fonte: Adaptada de ABNT NBR 5419-1, 2015a.

Para uma estrutura estar totalmente protegida, o ideal seria envolvê-la por inteiro com uma camada condutora, isto é, uma blindagem eletrostática interligada a uma ou mais malhas de aterramento devidamente equipotencializadas. No entanto, em termos práticos, isto seria inviável. Nesse contexto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tornou pública a Norma Brasileira 5419, constituída por quatro partes distintas e que periodicamente passam por revisões, sendo esta última realizada em 2015. Seu papel é regularizar e padronizar projetos e a execução de obras de PDA seguindo padrões de normas internacionais, tais como as da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC). Ademais, cada parte constituinte descreve separadamente etapas da uma proteção geral ou parcial, contra descargas atmosféricas, como mostra a Figura 15.

O para-raios, como é popularmente conhecido, é constituído de três subsistemas bem definidos (captação, descida e aterramento), que juntos constituem um SPDA, como mostra a Figura 16. No entanto, é válido destacar que o objetivo de um SPDA não é impedir a ocorrência de descargas atmosféricas, mas evitar a incidência direta da corrente elétrica a uma edificação ou sistemas de energia, conduzindo-a e dissipando-a na Terra (ABNT NBR 5419-1, 2015a; CREDER, 2016).

Figura 16 - Subsistemas de um SPDA genérico.



Fonte: Adaptado de Governo do Estado de São Paulo, 2009.

Além disso, existem diferentes possibilidades de construção de um SPDA, que vão desde a utilização de elementos da própria estrutura, os quais devem permanecer dentro ou na estrutura definitivamente e não podem ser modificados, até ao uso de elementos externos, que

podem ser superficiais ou isolados em relação à estrutura. Quanto à possibilidade de utilizar elementos naturais e externos, Filho, J. (2022) afirma que:

> Os SPDA podem ser projetados e construídos utilizando materiais *condutores naturais*, isto é, partes integrantes da estrutura que não podem ser alteradas, como armaduras de pilares e fundação, ou materiais *condutores não naturais*, isto é, aqueles que não integram a estrutura, como cabos de cobre, alumínio, aço, aço cobreado etc., e que foram ali instalados com a finalidade única de proteger a estrutura contra descargas atmosféricas. (FILHO, J., 2017, p. 1599).

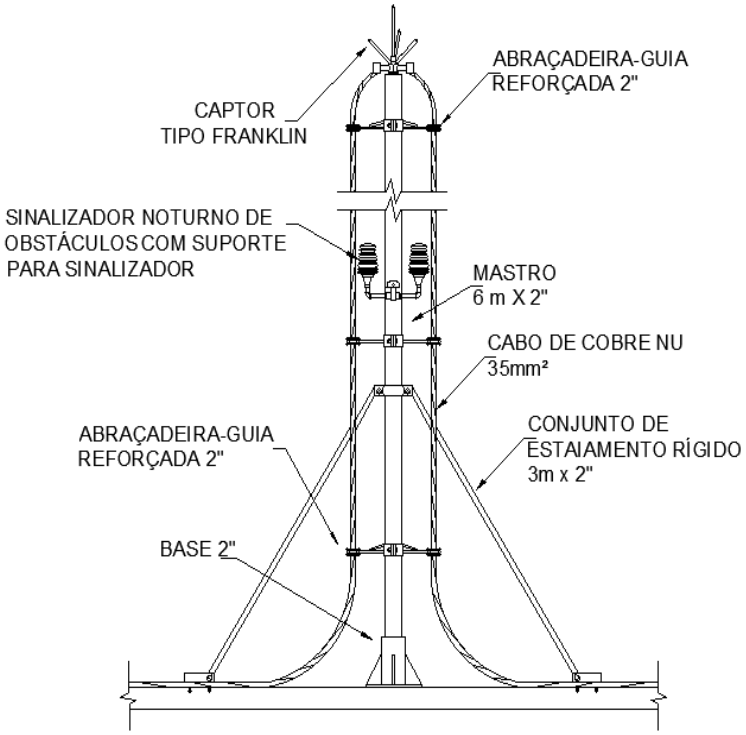
Outrossim, vale ressaltar que uma estrutura pode ser dita protegida por elementos naturais, se e somente se, estes elementos satisfazem condições normativas. Em contrapartida, essa mesma condição também se aplica aos casos de estruturas que utilizam elementos externos (superficiais ou isolados). Os elementos externos e superficiais ficam sobrepostos às estruturas. Já a recomendação de elementos externos isolados deriva da necessidade de uma distância de segurança, tratando-se de ambientes com atmosfera explosiva (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

3.1 Subsistema de captação

O primeiro ponto de contato de um SPDA com eventuais descargas atmosféricas se dá por elementos captores, isto é, pontos de sacrifício, condição que pode ser explicada pelo poder das pontas, devido ao acúmulo de cargas elétricas nas extremidades de elementos condutores, que neste caso, se encontram normalmente expostos e na parte mais elevada de uma edificação. Fusão e erosão de materiais podem ocorrer no ponto de impacto devido ao desenvolvimento de arcos e a alta densidade de corrente elétrica (ABNT NBR 5419-1, 2015a).

Estes captores são ditos naturais quando são partes inerentes de uma edificação, tal como telhados metálicos, mastros ou demais elementos que se sobressaem à estrutura, desde que satisfaçam as condições normativas. No entanto, os captores externos são os mais fáceis de serem identificados, tal como o captor tipo Franklin (ver Figura 17), constituído de quatro elementos em forma de ponta, geralmente instalados em mastros sobre edificações e que variam em altura ou ainda em telhados e extremidades de coberturas (FILHO, J., 2017).

Figura 17 - Detalhe de SPDA tipo Franklin em mastro de 3m x 2”.



Fonte: Adaptado de BiblioCAD, 2022.

3.2 Subsistema de descidas

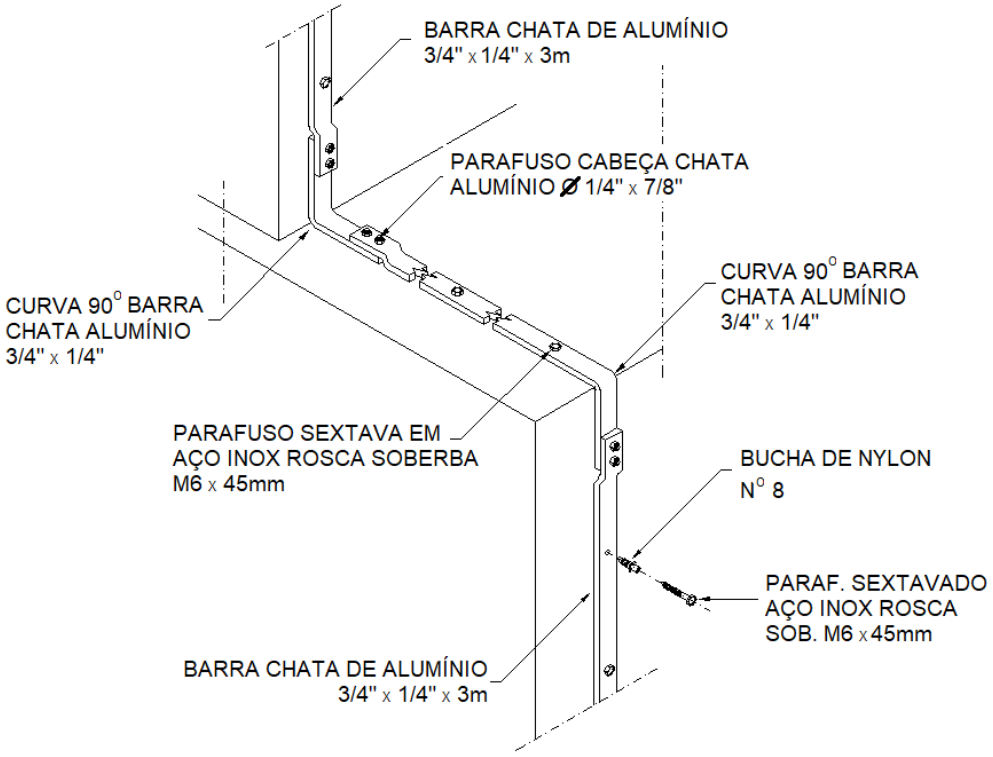
Interligado ao subsistema de captação, existem condutores de descidas em um trajeto bem definido para correntes elétricas elevadas que possam fluir pela estrutura devido às descargas atmosféricas interceptadas pelo subsistema de captação. Isso é necessário porque ao atingir uma edificação a corrente elétrica de uma descarga atmosférica é distribuída por vários caminhos ao longo da estrutura, até chegar ao menor potencial, propagando-se em escala de tempo de micro e milissegundos e com alta intensidade de energia. Logo, qualquer aquecimento nos condutores não é significativamente disperso durante o evento de curta duração e, portanto, este fenômeno é considerado adiabático. Tal condição reforça a importância de seguir os parâmetros normativos de projeto mediante normas técnicas, cujas recomendações antecedem de ensaios experimentais que simulam parâmetros das correntes elétricas atmosféricas (ABNT NBR 5419-1, 2015a; ABNT NBR 5419-2, 2015b).

> A área mínima da seção dos condutores deve ser suficiente para prevenir sobreaquecimento dos condutores a um nível que possa representar perigo de incêndio nas imediações. [...] a suportabilidade mecânica e os critérios de durabilidade também devem ser considerados para as partes expostas às condições atmosféricas e/ou corrosão. A avaliação do aquecimento do condutor devido à corrente da descarga atmosférica é algumas vezes necessária quando problemas possam surgir devido ao risco de ferimentos às pessoas e danos de fogo ou explosão. (ABNT NBR 5419-1, 2015a, p. 47).

Em situações em que há a possibilidade de utilizar elementos naturais para elaboração de um SPDA interno, o projetista deve avaliar a equipotencialização das armaduras da estrutura, como vigas e baldrames mediante testes de continuidade, validar os condutores como aptos, se assim estiverem, e aplicar os parâmetros e diretrizes de projeto, conforme Classe e Nível de Proteção determinados no gerenciamento de risco.

A priori, os condutores de descida devem ter um percurso curto, seguro e factível (como ilustra a Figura 18) e em conformidade com a Classe e o Nível de Proteção do SPDA. Dessa forma, os impactos da intensidade da corrente elétrica da descarga atmosférica são minimizados. Os condutores de descida devem ser projetados com afastamento entre si a uma distância que varia de 10 à 20 metros (conforme a Classe e o Nível de Proteção do SPDA externo) e, particularmente para alguns casos em que a edificação tenha altura igual ou superior a 60 metros, com anéis de equipotencialização em volta da mesma (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Figura 18 - Detalhe de descida superficial em barra chata de alumínio.



Fonte: Adaptado de BiblioCAD, 2022.

Durante o impacto de uma descarga atmosférica, uma parcela da energia é convertida em energia térmica, devido ao aquecimento resistivo dos condutores ou por arcos no ponto de impacto e em todas as partes isoladas de um SPDA. Outros efeitos, como centelhamentos, também podem surgir quando uma corrente muito alta é forçada a passar por uma junção entre dois materiais condutores ou, devido à tensão elétrica, quando a corrente é forçada a tomar

caminhos curvos, como o da Figura 18, além de efeitos mecânicos, causados por interações magnéticas e forças eletromecânicas entre condutores. Estas situações podem ocorrer inclusive simultaneamente e gerar situações de risco e perigos reais de incêndios e deformação em condutores nos cantos e laços que varia conforme a estrutura (ABNT NBR 5419-1, 2015a).

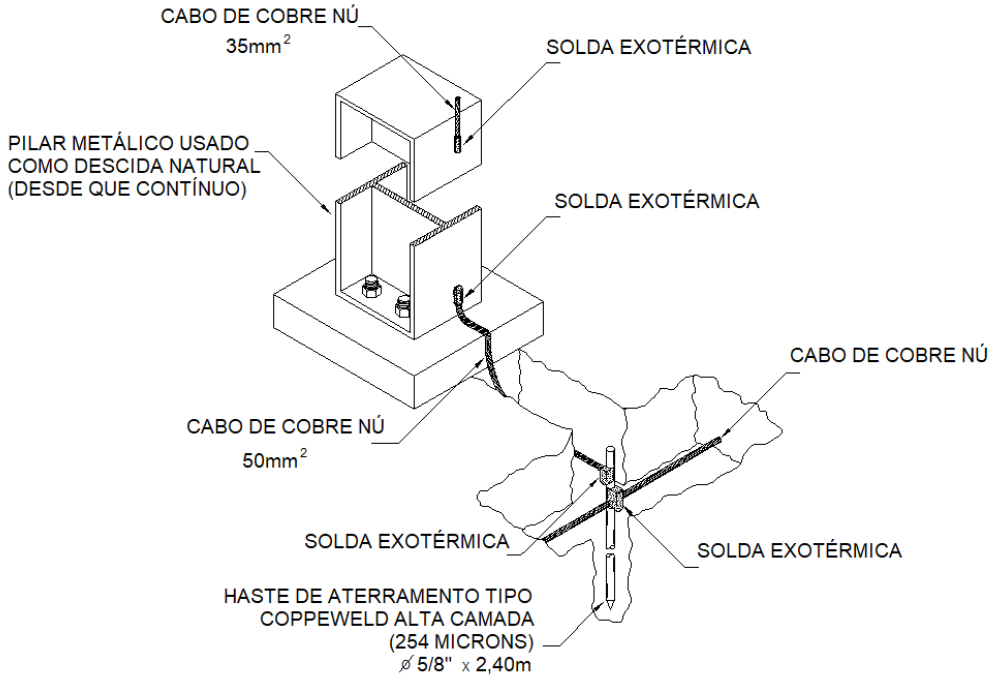
Em estruturas que comportam materiais inflamáveis, deve-se ter atenção à ocorrência de efeitos térmicos. Um estudo mais detalhado deve ser elaborado quando há a impossibilidade de utilizar um SPDA estrutural. Já em um sistema interno, os condutores ficam limitados ao concreto, que minimiza os efeitos decorrentes das descargas, além de os protegerem da ação do tempo. Outro fator importante a ser considerado é o efeito pelicular, caracterizado pela tendência de linhas de corrente elétrica fluírem na superfície dos condutores. No entanto, devido ao alto valor de pico da corrente elétrica de uma descarga atmosférica associada a um curto intervalo de tempo e, dadas as características físicas dos materiais e as configurações geométricas dos sistemas, suas contribuições são desprezíveis (ABNT NBR 5419-1, 2015a; ABNT NBR 5419-3, 2015c).

3.3 Subsistema de aterramento

A princípio, o subsistema de aterramento deve estar conectado ao subsistema de descida e subsequentemente ao de captação e tem como função dissipar de forma segura e em condições normais, a energia proveniente de descargas atmosféricas para a terra, e ainda, correntes elétricas de falta quando existe equipotencialização, priorizando a segurança de pessoas, animais, continuidade de serviços prestados ao público, bens de valor econômico e a vida humana (ABNT NBR 5419-2, 2015b; ABNT NBR 5419-3, 2015c).

A Figura 19 ilustra um subsistema de aterramento formado por materiais condutores interligados por eletrodos e conectores, os quais devem apresentar boa condutividade. O escoamento das correntes de choque não pode exceder os limites de parâmetros operacionais, equipamentos ou a continuidade de serviços. A necessidade de equipotencialização visa assegurar que uma pessoa nas proximidades de instalações aterradas não seja exposta ao perigo de choque elétrico por tensão de passo ou de toque (O SETOR ELÉTRICO, 2011).

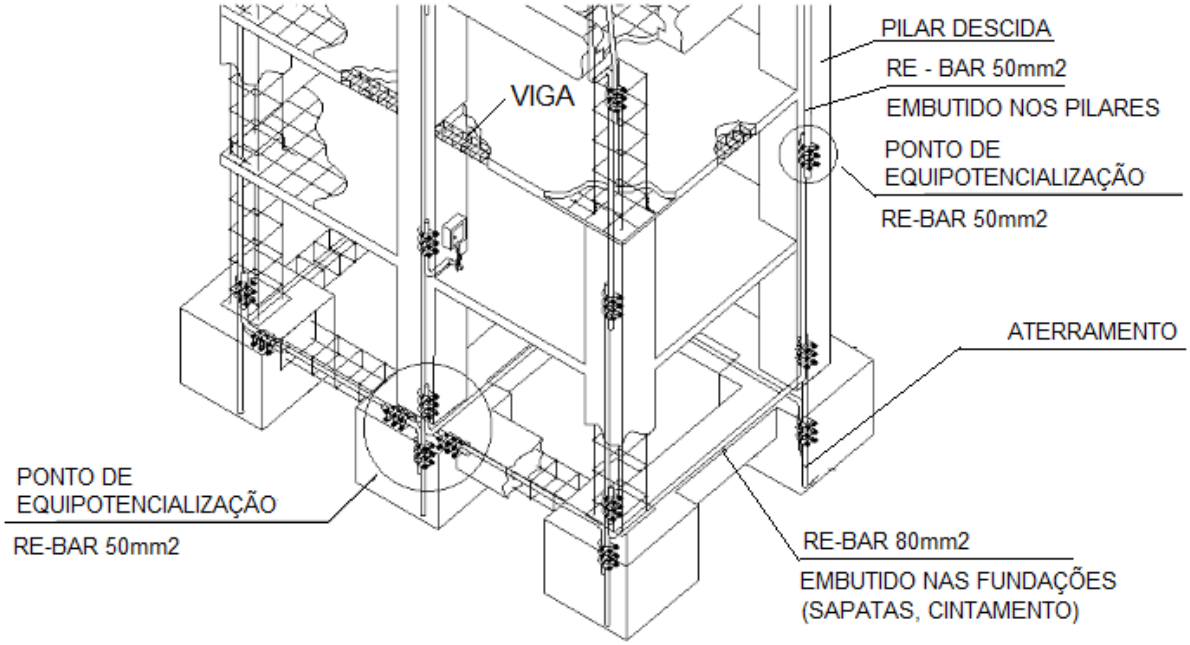
Figura 19 - Detalhe de utilização de pilar metálico como descida natural.



Fonte: Adaptado de BiblioCAD, 2022.

No caso de um SPDA estrutural, a malha de aterramento é conectada ou integrada às armaduras da própria estrutura (Figura 20), processo este realizado durante a fundação, em vigas e pilares junto ao solo, onde quaisquer outras malhas intrínsecas da edificação devem ter a malha da fundação como ponto em comum para equipotencialização (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Figura 20 - Detalhe de descida e aterramento de SPDA estrutural genérico.



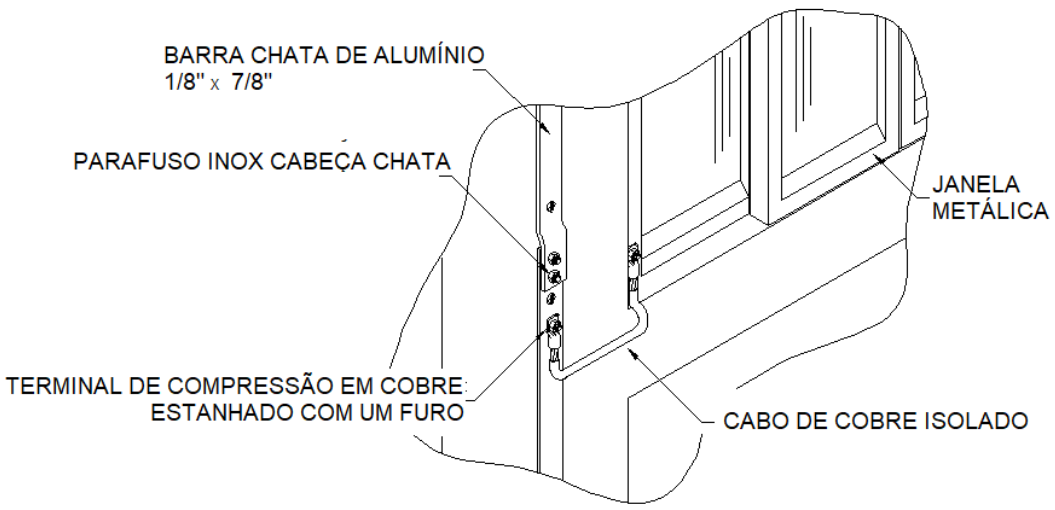
Fonte: Adaptado de BiblioCAD, 2022.

> Rigorosamente, equipotencialização é um conceito que somente se aplica em corrente contínua ou, de forma aproximada, em baixas frequências. Para as componentes de frequências mais altas das correntes das descargas atmosféricas, algumas das medidas tipicamente empregadas com finalidade de equipotencialização podem ter efeito de redução de tensão entre os pontos onde a ligação equipotencial é feita, contanto que essa ligação seja curta (por exemplo, não mais que poucas dezenas de centímetros para condutores cilíndricos de bitolas usuais em instalações elétricas). Medidas como o uso de cabos blindados, o encaminhamento de cabos por condutos metálicos ou próximos a grandes estruturas condutoras são geralmente mais eficientes e espacialmente mais abrangentes em alta frequência. A noção de equipotencialização de modo genérico, porém, é útil no controle da sobretensão durante a parte em que a progressão do impulso de corrente da descarga é mais lenta, sobretensão esta que pode estar associada a elevados níveis de energia por conta da longa duração. (ABNT NBR 5419-1, 2015a, p. 8).

Ressalta-se ainda que o aterramento estrutural não é um método restrito a um SPDA, uma vez que outras normas não só priorizam como também o recomendam para o caminho natural e seguro para a circulação de correntes de fuga, como é o caso da ABNT NBR 5410, que ainda em vigor, tornou obrigatória a realização de aterramento em edificações e a utilização do condutor-terra de proteção, embora negligenciados em alguns casos (BRASIL, 2006; POTÊNCIA, 2018).

O objetivo da manobra de equipotencialização é colocar todos os pontos de referência ou massas de um sistema sob um mesmo potencial elétrico, como ilustra a Figura 21. Nos sistemas de aterramento, o potencial elétrico deve ser o menor possível ou aproximadamente nulo, já que a equipotencialização não se trata apenas de conectar dois ou mais pontos de um sistema através de um condutor. Sobretudo, é necessário considerar os materiais a serem utilizados, bem como a espessura, o tipo, o comprimento, a distância e a continuidade elétrica entre os condutores do SPDA (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Figura 21 - Detalhe de conexão das janelas com as descidas.



Fonte: Adaptado de BiblioCAD, 2022.

3.4 Métodos de proteção

Atualmente existem três métodos de projeto regularizados pela ABNT NBR 5419-3:

(a) o Método do Ângulo de Proteção ou Método de Franklin;

(b) o Método da Esfera Rolante ou Método Eletrogeométrico e;

(c) o Método da Gaiola de Faraday ou Método das Malhas.

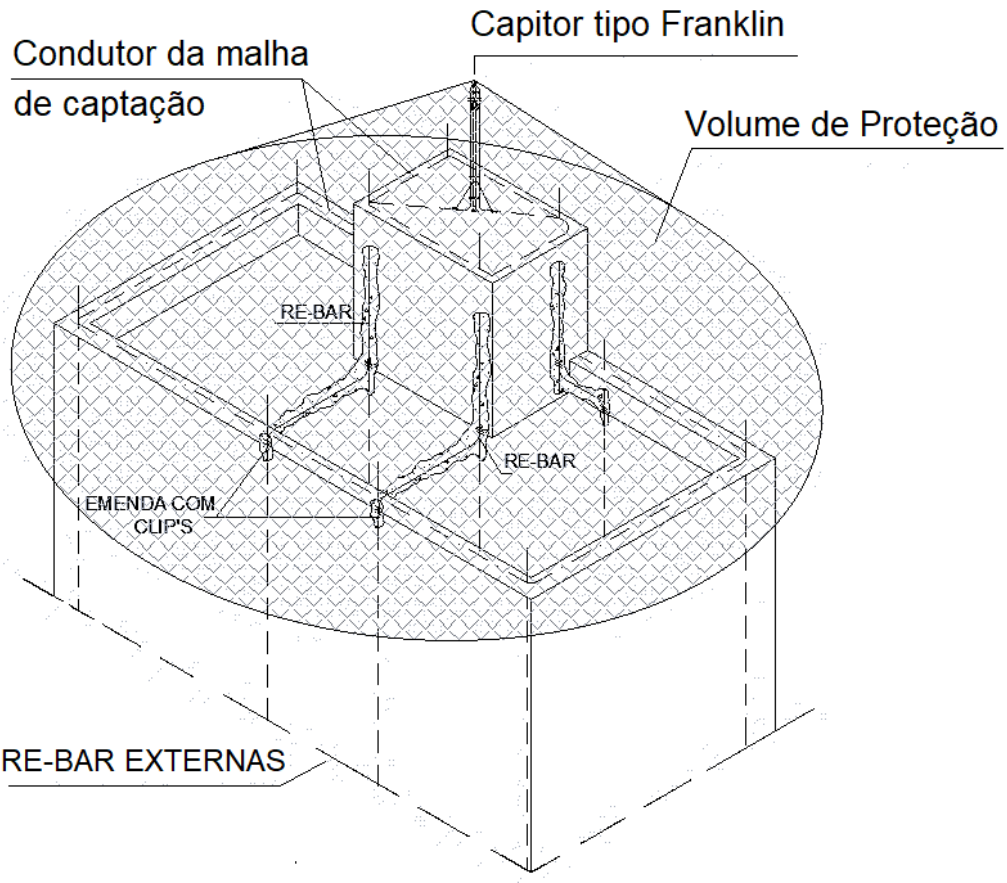
Cada um deles é precedido pelo tipo de edificação, tal como suas características e necessidades de proteção definidas. Em alguns casos específicos existe a possibilidade de unir métodos de proteção, gerando uma proteção híbrida.

3.4.1 Ângulo de Proteção ou Método de Franklin

Este método é uma adaptação de um experimento proposto por Benjamin Franklin, o qual consiste em um volume de proteção invisível no formato de um cone, onde o topo do captor, que recebe o seu nome (Franklin), se caracteriza como o vértice do volume invisível de proteção ao mesmo tempo que um ângulo formado entre a geratriz (plano de referência) e o centro desse cone (altura de um mastro acima do plano de referência), delimita o volume e proteção, que por sua vez, varia de acordo com o nível de proteção do sistema e com a altura do captor para com o plano de referência. Dessa forma, as descargas elétricas dentro dessa zona são mais facilmente escoadas pelo para-raios e é tipicamente indicado para coberturas ou estruturas de pequeno porte (FILHO, J., 2017).

A Figura 22 traz a ilustração da aplicação deste método. Verifica-se que o volume de proteção tem como referencial a base mais larga do topo do prédio, a qual utiliza de elementos naturais da própria edificação como subsistema de descida. Observa-se também a presença de mini captores nas bordas do plano de referência, o que caracteriza uma malha captora e consequentemente a aplicação de um SPDA híbrido.

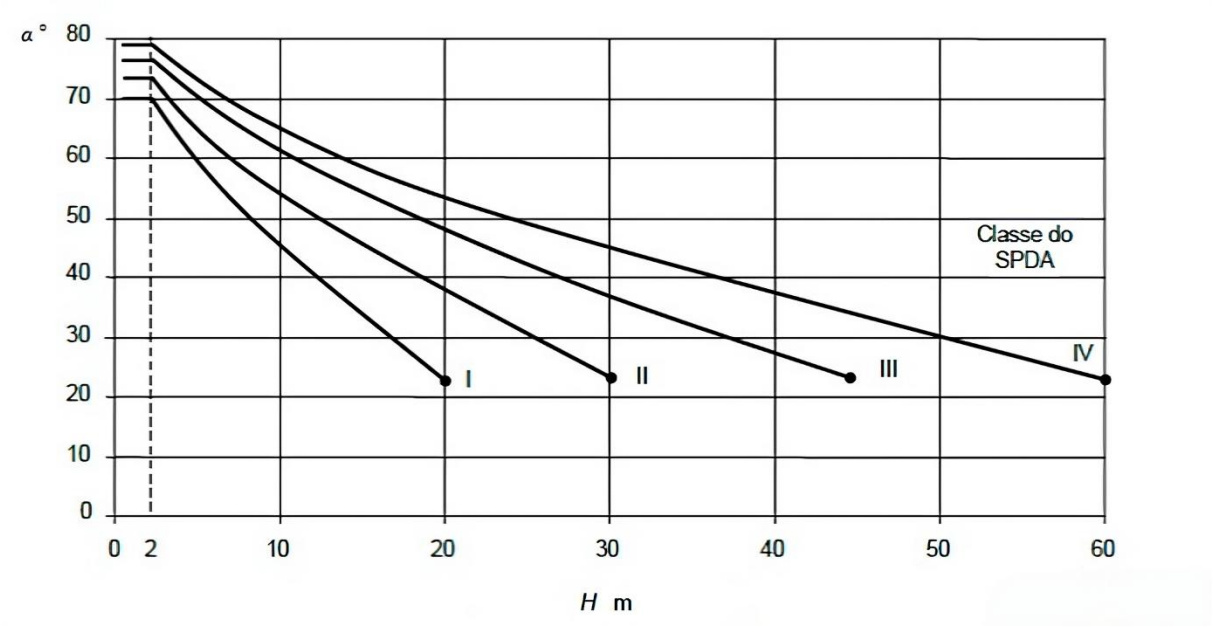
Figura 22 - Volume de proteção de um captor tipo Franklin em sistema híbrido.



Fonte: Adaptado de BiblioCAD, 2022.

Segundo a ABNT NBR 5419-3 (2015c, pg.10), o ângulo de proteção depende exclusivamente de duas variáveis, a altura do plano de referência da estrutura a ser protegida e a Classe do SPDA a ser instalada, como mostra a gráfico da Figura 23, onde H é a altura em metros do captor acima do plano de referência da área a ser protegida e α°, o ângulo de proteção. Para valores de altura acima dos valores finais de cada curva (Classes I a IV) são aplicáveis outros métodos de proteção dada a limitação do método em questão, ademais, o ângulo não é alterado para alturas abaixo de dois metros.

Figura 23 -Gráfico da relação entre Classe e o ângulo de proteção de Franklin.



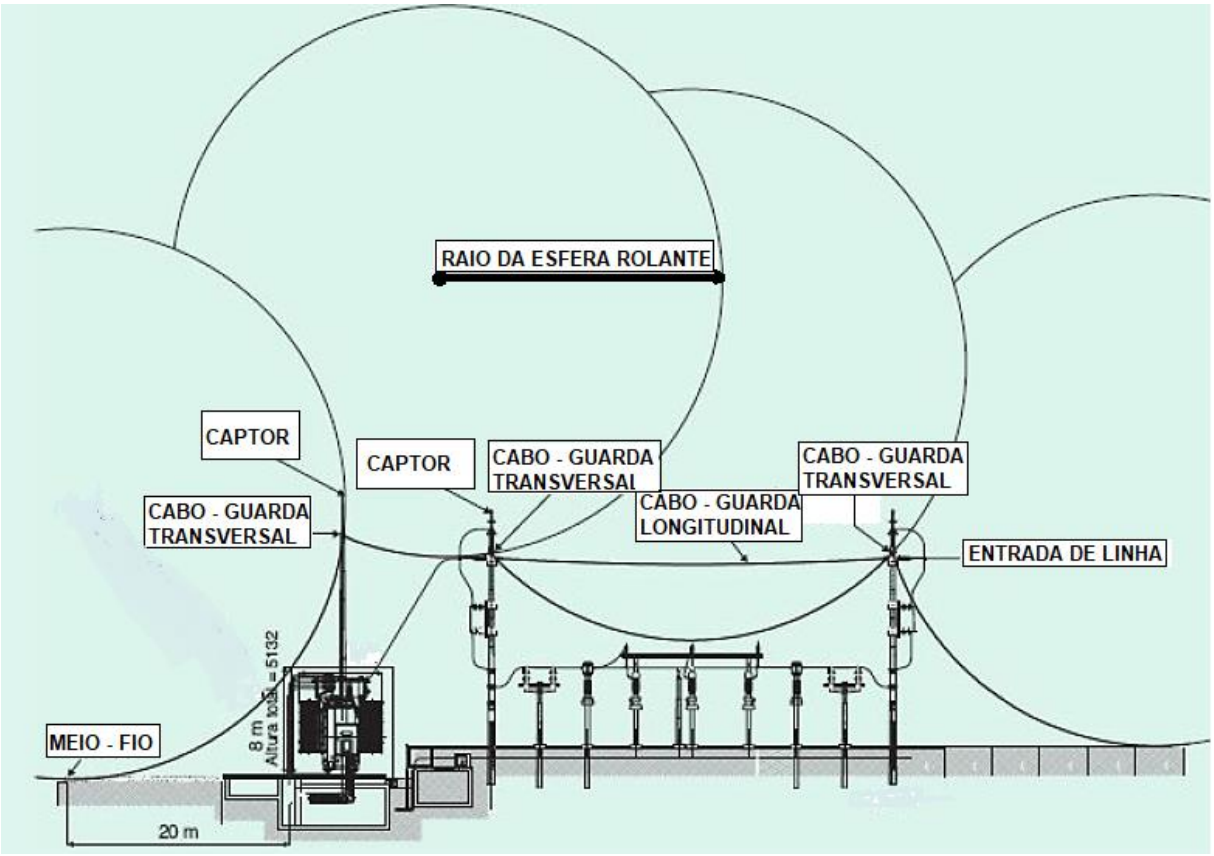
Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015b.

3.4.2 Esfera Rolante ou Método Eletrogeométrico

Este método é baseado na premissa do movimento virtual de uma esfera (inicialmente tangente ao plano de referência e de raio bem definido conforme o Nível de Proteção o qual a edificação está submetida, cujo centro é localizado na extremidade do líder descendente antes de seu último salto) sobre uma estrutura, girando em todas as direções, de modo que nenhum ponto da estrutura entre em contato com a esfera virtual. Em termos mais práticos, este modelo de sistema se resume a um volume de proteção formado abaixo da esfera que tem como referência condutores que excedem a estrutura, de modo que, na ausência deles, a esfera certamente tocaria a estrutura. No ponto de contato entre o segmento de círculo (em um plano bidimensional) e a estrutura, um captor de sacrifício é instalado, pois entende-se que este seja o ponto mais provável no qual um raio poderia atingir essa estrutura. É tipicamente usado em edificações de cobertura complexa (CREDER, 2016).

Na Figura 24, tem-se o Método da Esfera Rolante aplicado a uma subestação de alta tensão – um alvo vulnerável a descargas atmosféricas. Diante do exposto, pode-se observar que os cabos se estendem ao comprimento da subestação na transversal e longitudinal. Frisa-se ainda, que esses cabos são previamente especificados pelo método em questão, dado que os condutores que protegem as linhas de fase devem ficar a uma distância significativa do solo e das próprias linhas energizadas (Instalações elétricas de média e alta tensão, 2021; OLIVEIRA, 2020).

Figura 24 - Método da Esfera Rolante aplicado em uma subestação de alta tensão.



Fonte: Adaptada de Mamede, 2017.

Mesmo que subestações de energia elétrica de alta tensão estejam corretamente protegidas por cabos-guarda e no seu nível mais elevado de confiabilidade, há sempre a possibilidade da descarga atmosférica “furar” o bloqueio de proteção e atingir os condutores de fase da linha ou os equipamentos no pátio de manobra. Nesse contexto, o volume de proteção soluciona essa problemática ao formar uma região que compreenda todos os elementos da subestação, cujo raio da esfera varia conforme a Classe do SPDA, como mostra a Tabela 1 (ABNT NBR 5419-3, 2015c; O SETOR ELÉTRICO, 2021).

Tabela 1 - Relação entre Classe e o raio da Esfera Eletrogeométrica.

Classe do SPDA	**Raio da esfera rolante em metros**
I	20
II	30
III	45
IV	60

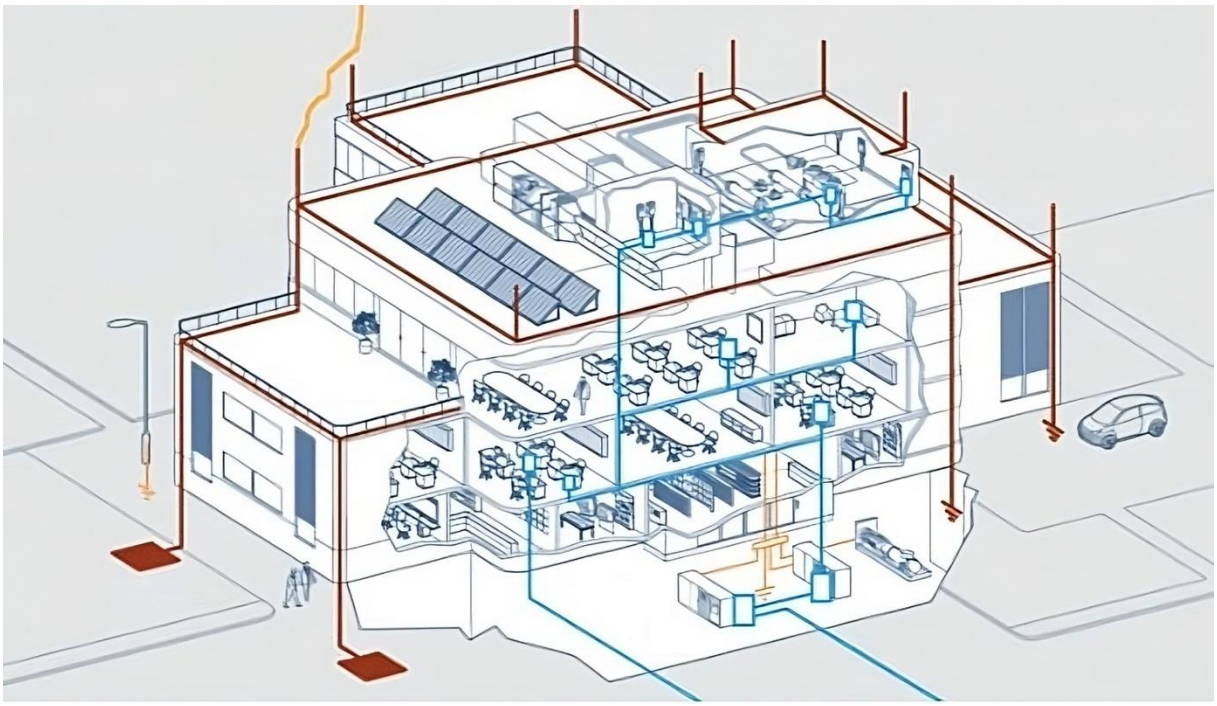
Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015b.

3.4.3 Gaiola de Faraday ou Método das Malhas

Essa abordagem consiste em proteger o topo e/ou as laterais de uma edificação com uma malha captora formada por material condutor, de modo a formar múltiplos nós e a dividir a corrente elétrica da descarga atmosférica, cujo caminho fechado forma a área de um polígono retangular; os lados deste polígono são congruentes ao afastamento definido pelo Nível de Proteção de uma estrutura a partir de uma análise preliminar de risco. Embora sejam mais onerosos, tipicamente são indicados para edificações com extensa área horizontal, a qual necessitaria de uma grande quantidade de captores do tipo Franklin para obter o mesmo percentual de proteção em Gaiola (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

A Figura 25 traz uma representação ilustrativa da aplicação da Gaiola de Faraday. Ressalta-se que o distanciamento dos condutores da malha (linhas no tom em marrom) depende da Classe do SPDA, que por sua vez, depende do gerenciamento de risco. Ademais, a presença de mini captores na malha captora, geralmente instalados em cantos ou nas proximidades das descidas do SPDA, advém da experiência do projetista, embora bastante comum, mas não obrigatória, em que se dá preferência a um ou mais pontos de sacrifício no subsistema de captação, o que facilita a manutenção do sistema quando necessário.

Figura 25 - Ilustração do método da Gaiola de Faraday.



Fonte: Adaptado de EMF Engenharia e Serviços Técnicos, 2021.

Assim como nos métodos anteriores, a Classe do SPDA é um fator determinante no aspecto construtivo, como mostra a Tabela 2, onde o máximo afastamento (em metros) dos

condutores da malha variam respectivamente conforme a Classe do SPDA a ser instalado (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Tabela 2 - Relação entre classe e afastamento dos condutores da Gaiola de Faraday.

Classe do SPDA	Máximo afastamento dos condutores da malha em metros
I	20
II	30
III	45
IV	60

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015b.

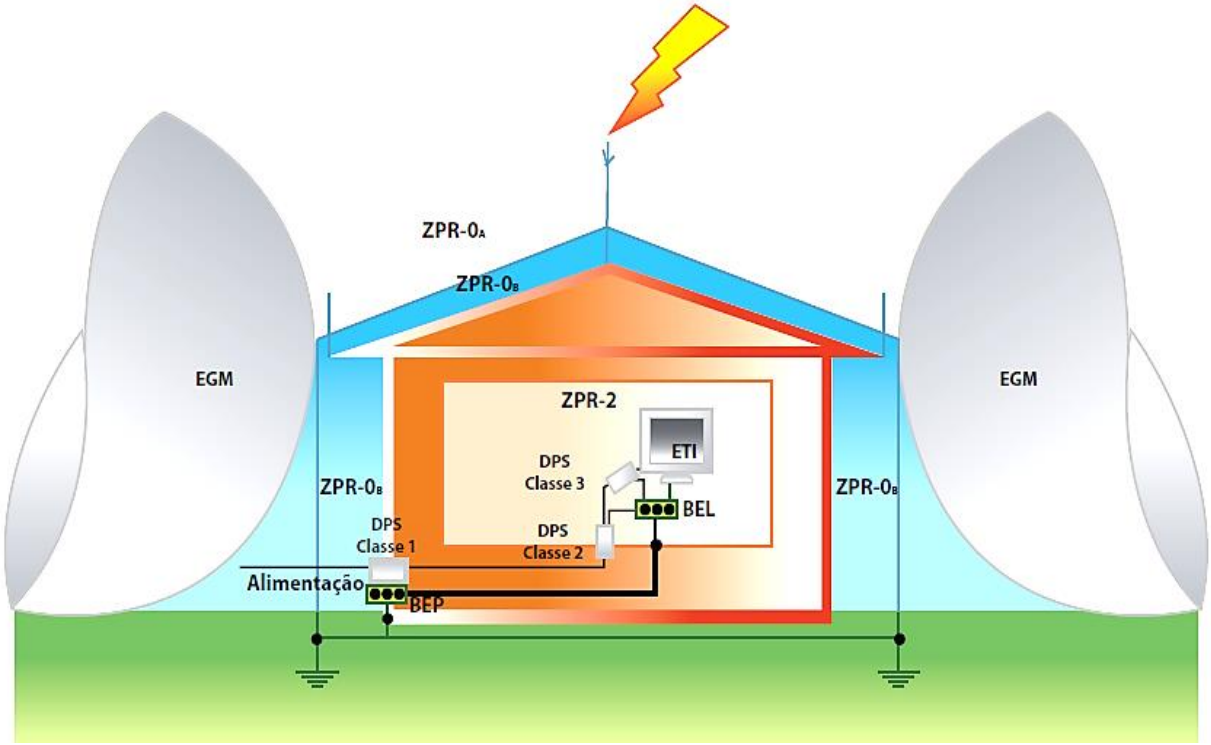
3.5 Zona de Proteção contra Raios (ZPR)

As Zonas de Proteção contra Raios (ZPR) precedem a elaboração de um SPDA, onde em um primeiro momento é necessário definir a natureza da estrutura a ser protegida e dividi-la em zonas. Quanto maiores os danos que possam vir a ocorrer no interior de uma zona, mais robusta deverá ser sua proteção. Normalmente esse paradigma se aplica a estruturas do tipo edificação, sejam elas residenciais, comerciais, prediais ou industriais (ABNT NBR 5419-1, 2015a).

A Figura 26 é um exemplo que estabelece zonas de proteção relacionadas a um SPDA, onde, conforme a revista Guia o SETOR ELÉTRICO de Normas Brasileiras (2011, p. 42) e a ABNT NBR 5419-2 (2015b, p. 20):

> (a) ZPR-0_A corresponde à região suscetível a ocorrência direta de descargas atmosféricas e da influência de campo eletromagnético consequente, as quais afetam os sistemas internos, podendo estar sujeitos à corrente total ou parcial da descarga atmosférica;
>
> (b) ZPR – 0_B é a região protegida contra a descargas direta, no entanto continua submetida a influência de campo eletromagnético consequente, o qual pode afetar sistemas internos, como mencionado anteriormente e;
>
> (c) ZPR – 1 a zona onde a corrente de surto é limitada pela divisão da corrente da descarga atmosférica e por interfaces isolantes, blindagem espacial e/ou DPS na fronteira. Portanto, dentro de ZPR 1 pode haver outras zonas, tal como ZPR – 2.

Figura 26 - Zona de proteção contra raio.



Fonte: Adaptado de O SETOR ELÉTRICO, 2011.

3.6 Níveis de Proteção

Os Níveis de Proteção levam em consideração as particularidades do efeito resultante da intensidade da corrente de uma descarga atmosférica, uma vez que estes níveis definem e estão diretamente associados a quatro Classes distintas de SPDA. Cada conjunto inclui regras dependentes e independentes do Nível de Proteção, tal como a escolha do método e dos subsistemas a serem aplicados.

> Quando falamos em risco, nesse contexto, referimo-nos aos danos e perdas resultados de uma descarga atmosférica que atinge uma estrutura (edificação, torre, tanques etc.) ou uma linha de energia ou de sinal, ou ainda áreas próximas à estrutura. A NBR 5419-2:2015 codifica as fontes, os tipos de danos e perdas, facilitando sua identificação ao longo do processo de cálculo para a definição da necessidade ou não de implementação de medidas de proteção da estrutura. (FILHO, J., 2017, p.1530).

As Classes, bem como os Níveis de proteção, são determinadas durante a elaboração de projeto, no qual o responsável técnico leva em consideração fatores intrínsecos e extrínsecos da estrutura a ser protegida. Este procedimento culmina no que é denominado Gerenciamento de Risco, no qual é feita uma análise, de um ou mais tipos de riscos que se encontram dentro de uma margem tolerável estabelecida pela ABNT NBR 5419-2.

A Tabela 3 apresenta a relação direta dos Níveis e Classes de SPDA, na qual pode-se observar que as Classes de Proteção variam de I a IV conforme os Níveis de Proteção. Por exemplo: se uma edificação necessita de proteção Nível I, sua Classe de SPDA respectivamente será de Grau I, o que significa que essa estrutura está sujeita a um risco alto de provável perda anual. Se uma edificação necessita de proteção Nível II, sua Classe de SPDA respectivamente será de Grau II e com isso apresenta um alto risco de uma provável perda anual, seja ela de vidas humanas, valor econômico ou cultural, porém inferior ao Grau I.

Tabela 3 - Relação entre Nível de Proteção e Classe do SPDA.

Nível de proteção	**Classe do SPDA**
I	I
II	II
III	III
IV	IV

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015b.

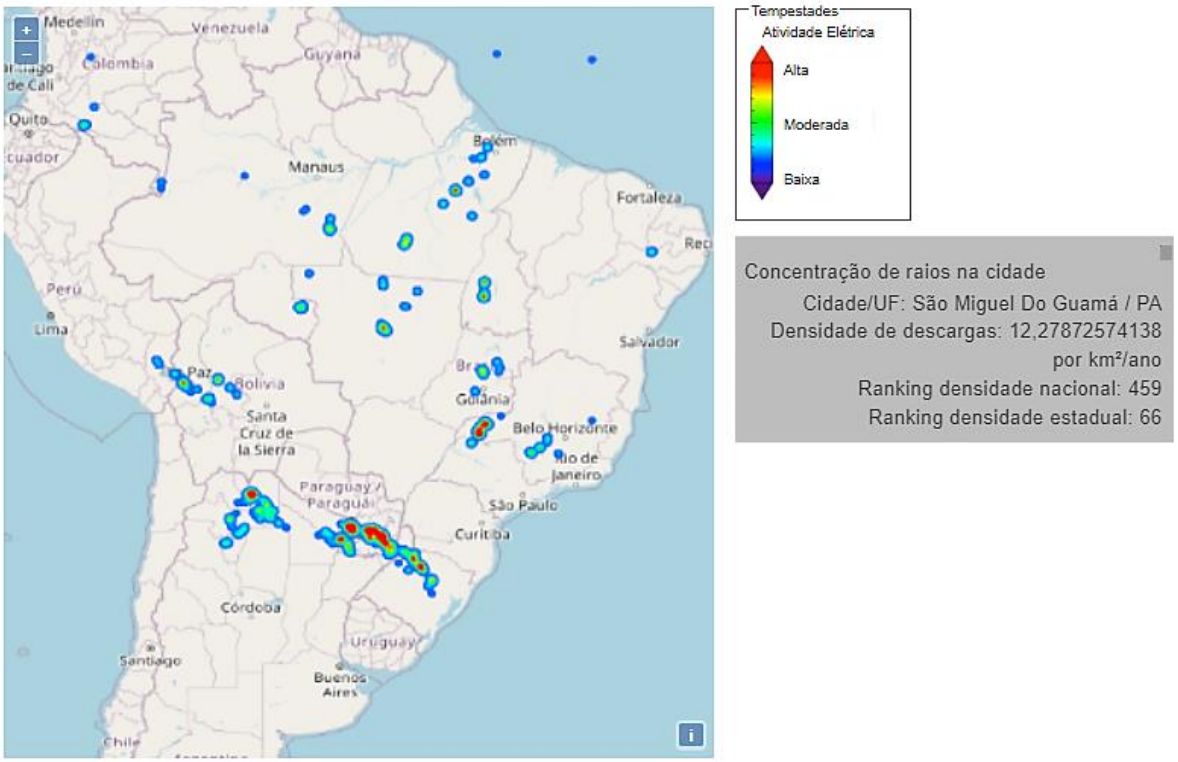
4 ESTUDO DE CASO: ESTRUTURA AGUAPA

O objeto de estudo é uma edificação que pertence à Associação Guamaense de Agropecuaristas, Pescadores e Aquicultores, também conhecida como AGUAPA, cuja estrutura é do tipo edificação (ANEXO A) localizada na zona rural, sob território plano, a 40 km do município de São Miguel do Guamá – PA e com duplicidades quanto a determinação de suas características extrínsecas.

Assim, assume-se que o objeto de estudo está isolado, sem nenhuma estrutura na vizinhança. O roteamento de linhas de energia e de telecomunicações se dá por via aérea. A estrutura não apresenta riscos que culminem em explosões e é exclusivamente voltada para servir a comunidade local, gerando emprego e renda com ênfase em processos manuais por 2080 horas por ano. Possui capacidade para atender 56 pessoas simultaneamente, portanto, este também é o número de pessoas a serem consideradas no gerenciamento de risco, onde se assume que não haverá nenhuma pessoa fora da edificação durante a tempestade de chuva. A partir disso, as zonas de proteção contra raios $Z_{PR\text{-}0A}$ (lado de fora da estrutura) e $Z_{PR\text{-}0B}$ (interior da estrutura) foram definidas.

O número médio anual de eventos perigosos no local atribuído ao parâmetro de densidade de descargas atmosféricas N_G na cidade de São Miguel do Guamá - PA, segundo o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE, com dados de todo território nacional, é de aproximadamente 12 por km^2 por ano, como pode ser visto na Figura 27.

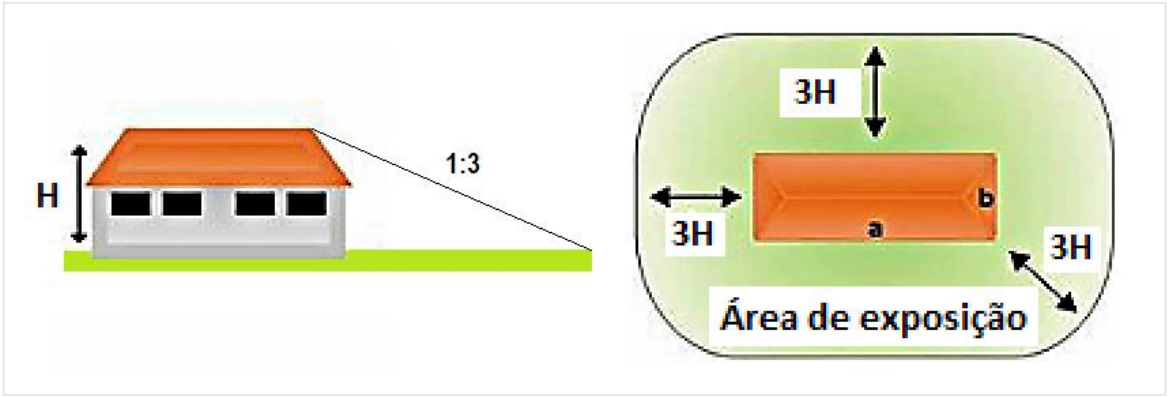
Figura 27 - Mapa da densidade de descargas atmosféricas em tempo real.



Fonte: Adaptado de INPE, 2023.

Segundo a ABNT NBR 5419-2 (2015b, p. 32), a área de exposição equivalente A_D para estruturas isoladas em solos planos é definida pela intersecção entre a superfície do solo com uma linha reta que tangencia partes mais altas da estrutura, que em rotação, demarca uma área de aproximadamente três vezes a sua altura (Figura 28), o que justifica a hipótese de a edificação estar isolada. Em relação ao roteamento de linhas de energia e de telecomunicações que ora eram por via área e ora por canais subterrâneos (apenas com relação a linha de energia), também foi levado em consideração o pior cenário possível, ou seja, de que as linhas que a adentram são exclusivamente de via aérea.

Figura 28 - Área de exposição de uma estrutura isolada.



Fonte: Adaptado de Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2011.

Ainda segundo ABNT NBR 5419-2 (2015b, p. 32), dado uma estrutura retangular isolada de comprimento L, largura W e altura H em solo plano, como é o caso da AGUAPA, a sua área de exposição equivalente pode ser definida por

$$A_D = LW + 2(3H)(LW) + \pi(3H)^2 \quad (1)$$

onde os parâmetros L, W e H são expressos em metros.

4.1 Gerenciamento de risco

Segundo a ABNT NBR 5419-1 (2015a, p. 11), as descargas atmosféricas podem causar três tipos básicos de danos, como descrito no item 2.3.2 do Capítulo 2 deste trabalho e estão relacionados a diferentes tipos de perdas.

No entanto, para que haja perda, antes é necessário que haja riscos. Nesse contexto em específico, o risco é um valor quantitativo que expressa uma provável perda anual média de vida ou bens relacionados à estrutura a ser protegida em virtude de eventuais descargas atmosféricas. A partir disso, surge o conceito de Gerenciamento de Risco.

No que se refere aos riscos, há pelo menos quatro tipos de riscos que são considerados para gerenciamento de risco de SPDA, estabelecidos pela ABNT NBR 5419-2 (2015b, p. 32) que por sua vez estão relacionados a três fatores:

a) número anual de eventos perigosos atrelados às descargas atmosféricas que influenciam a estrutura;
b) probabilidade de dano por uma das descargas atmosféricas dada sua classificação e;
c) quantidade média de perdas.

Os componentes são agrupados conforme a fonte de danos, seja (S1, S2, S3 e/ou S4) e definidos como R_A (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na estrutura), R_B (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na estrutura), R_C (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na estrutura), R_M (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da estrutura), R_U (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na linha conectada), R_V (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na linha conectada), R_W (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na linha conectada) e R_Z (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da linha); cada qual com suas particularidades e padrões bem definidos. Porém, algumas restrições são aplicadas no momento da análise, uma vez que nem sempre

todos os casos carecem de todos os componentes pré-determinados, cabendo ao responsável técnico a função de identificá-los durante o gerenciamento de risco.

Dada a localização da estrutura em análise e suas características, a perda de vida humana (L1) e a perda econômica (L4) passam a ser relevantes. Porém, devido à ausência de informações precisas acerca do custo de perdas estruturais (em comparação aos parâmetros normativos), a avaliação econômica se mostrou inconclusiva e, seguindo a decisão tomada pela presidente da AGUAPA, dispensável, o que implicou na necessidade de determinar somente o risco R1 para perda de vida humana (L1). Logo, as prováveis fontes de danos ao objeto de estudo se resumem a descargas diretas na estrutura (S1) e em linhas que a adentram (S3).

Quanto aos componentes de risco, segundo a ABNT NBR 5419-2, apenas os componentes de risco R_A, R_B, R_U e R_V condizem com as características do local, já que os demais componentes são atribuídos somente aos casos em que estruturas apresentem riscos de explosão ou agreguem áreas hospitalares que demandam da utilização de equipamentos elétricos essenciais para salvar vidas ou quando a falha dos sistemas internos imediatamente possa colocá-las em perigo. Assim, as fontes de danos S1 e S3 tipificam os componentes para este estudo de caso em:

a) R_A: que relaciona os ferimentos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e/ou de passo, e que podem ocorrer aos seres vivos, dentro da estrutura e fora dela, nas zonas até 3 m ao redor dos condutores de descidas. Os quais podem gerar perdas de vida humana L1 e L4;
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. Perdas L1, L2, L3 e L4 podem ocorrer;
c) R_U: relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura. Perda do tipo L1 e L4 podem ocorrer, inclusive no caso de propriedades agrícolas contento animais;
d) R_V: relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos) devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ao longo das linhas. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem ocorrer.

4.2 Dados e parâmetros da edificação AGUAPA

Nesta seção são apresentadas informações da AGUAPA necessárias para a realização do gerenciamento de risco de SPDA, conforme condições inicias supracitadas.

Na Tabela 4 estão descritas as informações importantes acerca da estrutura e que são requeridas o gerenciamento de risco, tais como: a densidade de descargas atmosféricas N_G para a terra na determinada região; suas dimensões, o fator de localização, a probabilidade PB de uma descarga na estrutura causar danos físicos, as particularidades dos dispositivos de proteção contra surtos utilizados para ligação equipotencial na entrada de linhas, que por sua vez estão associados ao nível de proteção contra descargas atmosféricas para o qual o DPS foi projetado e a eficiência da blindagem por malha (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Tabela 4 - AGUAPA: características da estrutura e meio ambiente.

Parâmetros de entrada	**Comentário**	**Símbolo**	**Valor**
Densidade de descargas para a terra (1/km^2/ano)		N_G	12,27872574138 [a]
Dimensão da estrutura (m)		L, W, H	35.53, 10, 4.8
Fator de localização da estrutura**	Estrutura isolada	C_D	1 [b]
SPDA**	Nenhum	P_B	1 [b]
Ligação equipotencial**	Nenhuma	P_{EB}	1 [b]

[a] Dado obtido do INPE, 2023.

[b] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: O autor.

Informações mais precisas sobre os parâmetros de entrada da linha de energia na estrutura estão presentes na Tabela 5. O comprimento, o fator de instalação (aérea ou enterrada), o tipo de linha (baixa, média ou alta tensão), o fator ambiente, instalações nas proximidades, aterramento, além de características intrínsecas como blindagem, isolação e tensão suportável são fatores importantes para análise de risco.

Tabela 5 - AGUAPA: linha de energia.

Parâmetros de entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Comprimento (m)		L_L	150
Fator de Instalação	Aéreo	$C_{I/P}$	1 [c]
Fator tipo da linha	Linha BT	$C_{T/P}$	1 [c]
Fator do ambiente	Rural	$C_{E/P}$	1 [c]
Blindagem, aterramento, isolação	Nenhuma	C_{LD}	1 [c]
Probabilidade de falha	Total	P_{LD}	1 [c]

[c] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: O autor.

De forma semelhante a Tabela 6, informações mais precisas sobre os parâmetros de entrada da linha de telecomunicações que adentram a estrutura estão presentes na Tabela 7, que leva em conta fatores como: o comprimento, a característica de instalação (aérea ou enterrada), o tipo de linha (baixa, média ou alta tensão), o fator ambiente, instalações nas proximidades, aterramento, além de características intrínsecas como blindagem, isolação e tensão suportável que também são fatores importantes para análise de risco.

Tabela 6 - AGUAPA: linha de telecomunicações.

Parâmetros de entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Comprimento (m)		L_L	1000
Fator de Instalação	Aéreo	$C_{I/T}$	1 [d]
Fator tipo da linha	Linha BT	$C_{T/T}$	1 [d]
Fator do ambiente	Rural	$C_{E/T}$	1 [d]
Blindagem, aterramento, isolação	Nenhuma	C_{LD}	1 [d]
Probabilidade de falha	Total	P_{LD}	1 [d]

[d] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: O autor.

A zona $Z_{PR\text{-}0A}$ da estrutura, que compreende a zona a ser protegida, contém fatores internos que influenciam no resultado da proteção. A Tabela 7 contém informações necessárias,

tais como: medidas de proteção contra choques (avisos, áreas restritas), proteção contra incêndio caso exista o risco, características das linhas que adentram a estrutura, danos que remetem a perdas econômicas ou de valor inestimável.

Tabela 7 - AGUAPA: fator válido para zona $Z_{PR\text{-}0B}$.

Parâmetros de entrada	**Comentário**	**Símbolo**	**Valor**
Tipo de piso	Mármore	r_t	10^{-3} *
Proteção contra choque (descarga na estrutura)	Nenhuma	P_{TA}	1 *
Proteção contra choque (descarga na linha)	Nenhuma	P_{TU}	10^{-2} *
Risco de incêndio	Normal	r_f	10^{-2} *
Proteção contra incêndio	Extintores	r_p	0,5 *
L1: Perda de vida humana	Perigo especial	h_Z	1 *
	D1: devido à tensão de toque e passo	L_T	10^{-2} *
	D2: devido a danos físicos	L_F	10^{-2} *
Fator para pessoas na zona	Equação	□	0,2374429224
Parâmetros resultantes		L_A ♦	$1{,}780821918\times10^{-6}$
		L_U ♦	$1{,}780821918\times10^{-6}$
		L_B ¤♦	$8{,}904109589\times10^{-6}$
		L_V ¤♦	$8{,}904109589\times10^{-6}$

* Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

□ $\left(\frac{n_Z}{n_t}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right)$

♦ $L_A = L_U = r_t L_T \left(\frac{n_Z}{n_T}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right)$

¤♦ $L_B = L_V = r_p r_f h_z L_F \left(\frac{n_Z}{n_T}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right)$

Fonte: O autor.

Os cálculos referentes à área de exposição da estrutura AGUAPA, linhas de energia e de telecomunicações, foram realizados conforme apresentado na Tabela 8. A mesma também contém os resultados dos respectivos fatores que influenciam o resultado da análise.

Tabela 8 - AGUAPA: áreas de exposição equivalente da estrutura e linhas.

	Símbolo	Resultado (1/ano)	Equação
Estrutura	A_D	2318,004653	$A_D = LW + 2(3H)(L + W) + \pi(3H)^2$ ®
Linha de energia	$A_{L/P}$	6000	$A_{L/P} = 40L_L$ ®
Linha de Telecom	$A_{L/T}$	40000	$A_{L/P} = 40L_L$ ®

® Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: Adaptado de ABNT 5419-2, 2015.

A Tabela 9 resume os cálculos e os respectivos resultados de fatores que influenciam o número anual de eventos perigosos e na análise de risco.

Tabela 9 - AGUAPA: número esperado anual de eventos perigosos.

	Símbolo	Resultado (m^2)	Equação
Estrutura	N_D	0,0284621434	$N_D = N_G A_D C_D \times 10^{-6}$ ©
Linha de energia	$N_{L/P}$	0,07367235445	$N_{L/P} = N_G A_{L/P} C_{I/P} C_{E/P} C_{T/P} \times 10^{-6}$ ©
Linha Telecom	$N_{L/T}$	0,4911490297	$N_{L/T} = N_G A_{L/T} C_{I/T} C_{E/T} C_{T/T} \times 10^{-6}$ ©

© Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: O autor.

4.3 AGUAPA: Avaliação da probabilidade de perdas P_A, P_B, P_U e P_V

A probabilidade de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura e causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico (P_A) é matematicamente expressa, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015b, p. 40), por

$$P_A = P_{TA} P_B \tag{2}$$

onde P_{TA} depende das medidas de proteção adicionais contra tensões de toque e passo; P_B é a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos e depende do nível de proteção contra descargas atmosféricas. Como neste caso específico não há SPDA instalado e não existem medidas de proteção contra tensões de toque e/ou tensão de passo, os coeficientes P_{TA} e P_B assumem valor unitário, portanto,

$$P_A = 1 \tag{3}$$

Quando a descarga atmosférica atinge a linha que adentra a estrutura (seja de energia ou de telecomunicações), há probabilidade de seres humanos em seu interior sofrerem ferimentos devido às tensões de toque (P_U). No entanto, esse risco depende de alguns fatores, tais como: a blindagem da linha da tensão suportável de impulso, sistemas intrínsecos da estrutura que estão conectados à linha, das medidas de proteção como restrições físicas, interfaces isolantes e dispositivos de proteção contra surtos vide ligação equipotencial na entrada da linha, conforme ABNT NBR 5419-3.

Conhecido os fatores que influenciam P_U; a relação entre eles, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015b, p. 45), é expressa por

$$P_U = P_{TU} P_{EB} P_{LD} C_{LD} \tag{4}$$

onde P_{TU} depende das medidas de proteção para tensões de toque; P_{EB} depende das ligações equipotenciais para descargas atmosféricas; P_{LD} é a probabilidade de falhas de sistemas internos e C_{LD} é o fator que depende das características de blindagem da linha. Como todos os coeficientes supracitados da equação assumem valor unitário (ver Tabela 4 e 5), exceto P_{TU} (Tabela 7), a probabilidade de sofrer ferimentos devido tensões de toque é de

$$P_U = 0{,}01 \tag{5}$$

Já a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha (seja de energia ou telecomunicações) causar danos físicos (P_V), é dado pela equação (6) e depende de alguns fatores, como por exemplo: a blindagem da linha da tensão suportável de impulso, sistemas intrínsecos da estrutura que estão conectados à linha, interfaces isolantes e dispositivos de proteção contra surtos vide ligação equipotencial na entrada da linha, conforme ABNT (2015c).

A relação entre eles, segundo a ABNT NBR 5419-2, pode ser expressa matematicamente como

$$P_V = P_{EB} P_{LD} C_{LD} \tag{6}$$

onde P_{EB} depende das ligações equipotenciais para descargas atmosféricas; P_{LD} é a probabilidade de falhas de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica e C_{LD} é o fator que depende das características de blindagem da linha. Como todos os coeficientes do lado direito da equação (6) assumem valor unitário (ver Tabela 4 e 5), a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha que adentra a estrutura causar danos físicos é de

$$P_V = 1 \tag{7}$$

O valor numérico de cada probabilidade está diretamente relacionado a R1.

4.4 AGUAPA Avaliação da quantidade de perdas LA, LB, LU e LV

É dado como perda, segundo a ABNT NBR 5419-2, a quantidade média relativa a um tipo particular de dano causado por descargas atmosféricas, considerando sua extensão e efeitos (inerentes às características e ao conteúdo de uma zona) que podem elevar ou reduzir o valor de seus respectivos componentes e o da perda em si.

Neste estudo de caso, a quantidade de pessoas que estarão em determinada zona e o número total de pessoas na estrutura por inteira, bem como o tempo em horas que estarão submetidos anualmente a fonte de dano e da respectiva perda, são fatores determinantes.

Neste caso, as perdas relacionadas aos ferimentos causados a seres vivos por choque elétrico (devido descargas atmosféricas à estrutura ou nas linhas que as adentrem), podem ser descritas matematicamente da seguinte forma

$$L_A = L_U = r_t L_T \left(\frac{n_z}{n_t}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right) \tag{8}$$

onde L_T é o número médio típico de vítimas por choque elétrico; r_t é um fator de redução da perda de vida humana dependendo das características do solo; 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 durante o qual as pessoas estão presentes na zona (em horas por ano).

Substituindo os valores de cada coeficientes do lado direito da Equação (8), conforme informações da Tabela 7, é possível obter

$$L_A = L_U = 1{,}780821918 \times 10^{-6} \tag{9}$$

Já as perdas em uma estrutura relacionada a danos físicos - D2 (descargas atmosféricas à estrutura ou as linhas que as adentrem), neste estudo de caso, podem ser descritas de modo que

$$L_B = L_V = r_p r_f h_z L_F \left(\frac{n_z}{n_t}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right) \tag{10}$$

onde L_F é o número médio típico de vítimas por danos físicos; r_p o fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para reduzir as consequências do incêndio; r_f é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou do risco de explosão da estrutura; h_f é um fator de redução da perda de vida humana dependendo do tipo de solo; 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 que as pessoas ficam na zona, em horas por ano.

Substituindo os valores de cada coeficientes da equação (10) conforme informações da Tabela 7, é possível obter

$$L_B = L_V = 8{,}904109589 \times 10^{-6} \quad (11)$$

Embora sejam valores muito pequenos, podem afetar diretamente o valor de R1.

4.5 AGUAPA: Avaliação do risco R1 e necessidade de proteção

O risco de perda de vida humana é o resultado da soma de seus componentes na zona interna $Z_{PR\text{-}0B}$, de modo que

$$R1 = R_A + R_B + R_U + R_V \quad (12)$$

onde

$$R_A = N_D P_A L_A \quad (13)$$

$$R_B = N_D P_B L_B \quad (14)$$

$$R_U = R_{U/P} + R_{U/T} = N_{L/P} P_U L_U + N_{L/T} P_U L_U \quad (15)$$

$$R_V = R_{V/P} + R_{V/T} = N_{I/P} P_V L_V + N_{I/T} P_V L_V \quad (16)$$

Portanto, a avaliação do risco de perda de vida humana (R1) para este caso, se dá a partir do resultado obtido pela equação (10), dada a soma de seus componentes expressos pelas equações (13), (14), (15) e (16), agrupados de acordo com as fontes e os tipos de danos.

Conhecidos os valores dos componentes R_A, R_B, R_U (para linha de energia e telecomunicações) e R_V (para linha de energia e telecomunicações) do risco de perda de vida humana (R1) na zona $Z_{PR\text{-}0B}$ (interior da estrutura) e somados conforme equação 12, o resultado do risco R1 é um valor menor que o risco tolerável (RT), conforme mostra a Tabela 10, portanto, a instalação de um SPDA ou de outras medidas de segurança como a blindagem de linhas e/ou alterações das características intrínsecas da estrutura não são necessárias. requerida.

Tabela 10 - AGUAPA: risco R1 para estrutura não protegida.

.	Símbolo	**Z_{PR-0B}**	**Estrutura**
D1 Ferimento	R_A	$0{,}0050\times10^{-5}$	**$0{,}0050\times10^{-5}$**
	$R_U = R_{U/P} + R_{U/T}$	$0{,}0010\times10^{-5}$	**$0{,}0010\times10^{-5}$**
D2 Danos físicos	R_B	$0{,}0253\times10^{-5}$	**$0{,}0253\times10^{-5}$**
	$R_V = R_{V/P} + R_{V/T}$	$0{,}5029\times10^{-5}$	**$0{,}5029\times10^{-5}$**
Total		**$0{,}5342\times10^{-5}$**	**$R_1 = 0{,}5342\times10^{-5}$**
Tolerável		**R1 < RT: proteção contra descargas atmosféricas não é requerida**	**$RT = 1\times10^{-5}$**

Fonte: Dados do autor.

Embora os valores de cada componente de risco estejam expressos apenas por quatro casas decimais; todas as casas decimais foram consideradas para efeito de cálculo.

5 ESTUDO DE CASO: POUSADA

O objeto de estudo é uma edificação do tipo pousada, com capacidade para atender 40 pessoas simultaneamente, cuja estrutura é predominantemente retangular e se encontra localizada no município de São Miguel do Guamá, no Pará, às margens da BR-010, sob território isolado (sem nenhuma estrutura nas vizinhanças) e funciona em média por 2080 horas por ano. Tem a capacidade para atender 84 pessoas simultaneamente e o roteamento da linha de energia e de telecomunicações se dá de forma subterrânea e por via aérea, respectivamente. Além disso, a mesma não apresenta riscos de explosões e é exclusivamente voltada para servir de acomodação, onde se assume que não haverá nenhuma pessoa fora da edificação durante a tempestade de chuva. A partir disso, as zonas de proteção contra raios, $Z_{PR\text{-}0A}$ (externa) e $Z_{PR\text{-}0B}$ (interna a edificação), foram definidas.

5.1 Gerenciamento de risco da edificação Pousada

Dada a situação de localização da estrutura em análise e suas características, a perda de vida humana (L1) e a perda econômica (L4) são relevantes. Porém, uma avaliação econômica não foi requerida, o que implica na necessidade de determinar somente o risco R1 para perda de vida humana (L1), logo, as prováveis fontes de danos se resumem a S1 e S3.

5.2 Pousada: Dados e parâmetros

Nesta seção são apresentadas informações da Pousada necessárias para a realização do gerenciamento de risco de SPDA, conforme condições inicias supracitadas.

Na tabela 11, há dados importantes da estrutura, tais como: a densidade de descargas atmosféricas N_G para a terra na determinada região; suas dimensões; o fator de localização; a probabilidade P_B de uma descarga na estrutura causar danos físicos; as particularidades dos dispositivos de proteção contra surtos utilizados para ligação equipotencial na entrada de linha de energia ou telecomunicações que, por sua vez, estão associados ao nível de proteção contra descargas atmosféricas, para o qual o DPS foi projetado e a eficiência da blindagem por malha (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Tabela 11 - Pousada: características da estrutura e meio ambiente.

Parâmetros de entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Densidade de descargas para a terra (1/km^2/ano)		N_G	12,27872574138 *
Dimensão da estrutura (m)		L, W, H	77, 18, 5
Fator de localização da estrutura	Estrutura isolada	C_D	1 [e]
SPDA	Nenhum	P_B	1 [e]
Ligação equipotencial	Nenhuma	P_{EB}	1 [e]

* Dado obtido do INPE, 2023.

[e] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: Dados do autor.

Informações mais precisas sobre os parâmetros de entrada da linha de energia na estrutura estão presentes na Tabela 12. O comprimento, o fator de instalação (aérea ou enterrada), o tipo de linha (baixa, média ou alta tensão), o fator ambiente, instalações nas proximidades, aterramento, além de características intrínsecas como blindagem, isolação e tensão suportável são fatores importantes para análise de risco.

Tabela 12 - Pousada: linha de energia.

Parâmetros de entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Comprimento (m)		L_L	20
Fator de Instalação	Aéreo	$C_{I/P}$	0,5 [f]
Fator tipo da linha	Linha BT	$C_{T/P}$	1 [f]
Fator do ambiente	Suburbano	$C_{E/P}$	0,5 [f]
Blindagem, aterramento, isolação	Nenhuma	C_{LD}	1 [f]
Probabilidade de falha	Total	P_{LD}	1 [f]

[a] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: Dados do autor.

De forma semelhante a Tabela 12; informações mais precisas sobre os parâmetros de entrada da linha de telecomunicações que adentram a estrutura estão presentes na Tabela 13, que dispõe de fatores como o comprimento, a característica de instalação (aérea ou enterrada),

o tipo de linha (baixa, média ou alta tensão), o fator ambiente, instalações nas proximidades, aterramento, além de características intrínsecas como blindagem, isolação, tensão suportável que também são fatores importantes para análise de risco.

Tabela 13 - Pousada: linha de telecomunicações.

Parâmetros de entrada	**Comentário**	**Símbolo**	**Valor**
Comprimento (m)		L_L	500
Fator de Instalação	Aéreo	$C_{I/T}$	1 [g]
Fator tipo da linha	Linha BT	$C_{T/T}$	1 [g]
Fator do ambiente	Suburbano	$C_{E/T}$	0,5 [g]
Blindagem, aterramento, isolação	Nenhuma	C_{LD}	1 [g]
Probabilidade de falha	Total	P_{LD}	1 [g]

[b] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: Dados do autor.

Fatores internos e que compreendem a zona $Z_{PR\text{-}0A}$ da estrutura são apresentados na Tabela 14, que abrange informações como: o tipo de piso; se há medidas de proteção contra choques (avisos, áreas restritas); risco de incêndio; proteção contra incêndio caso exista o risco; blindagem espacial contra tensões induzidas; as características das linhas de energia e telecomunicações dentro da estrutura; danos que remetem a perda de vida humana bem como das perdas associadas aos componentes de risco de perda supracitada.

Tabela 14 - Pousada: fator válido para a zona $Z_{PR\text{-}0B}$.

Parâmetros de entrada	**Comentário**	**Símbolo**	**Valor**
Tipo de piso	Concreto	r_t	10^{-2} ∴
Proteção contra choque (descarga na estrutura)	Nenhuma	P_{TA}	1 ∴
Proteção contra choque (descarga na linha)	Isolação elétrica	P_{TU}	10^{-2} ∴
Risco de incêndio	Normal	r_f	10^{-2} ∴
Proteção contra incêndio	Nenhuma	r_p	1 ∴
L1: Perda de vida humana	Perigo especial	h_Z	2 ∴
	D1: devido à tensão de toque e passo	L_T	10^{-2} ∴
	D2: devido a danos físicos	L_F	10^{-1} ∴
Fator para pessoas na zona	∵		0,3333
Parâmetros resultantes		L_A	$3,3333\times10^{-5}$ ∷
		L_U	$3,3333\times10^{-5}$ ∷
		L_B	$6,6666\times10^{-4}$ ∸
		L_V	$6,6666\times10^{-4}$ ∸

∵ Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

∴ $\left(\frac{n_Z}{n_t}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right)$

∷ $L_A = L_U = r_t L_T \left(\frac{n_Z}{n_T}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right)$

∸ $L_B = L_V = r_p r_f h_z L_F \left(\frac{n_Z}{n_T}\right)\left(\frac{t_z}{8760}\right)$

Fonte: O autor.

Os cálculos necessários da área de exposição equivalente à estrutura e linhas de energia e telecomunicações foram realizados conforme Tabela 15. A tabela também contém os resultados dos respectivos fatores que influenciam o resultado da análise.

Tabela 15 - Pousada: áreas de exposição equivalente da estrutura e linhas.

	Símbolo	Resultado (1/ano)	Equação
Estrutura	A_D	4942,858347	$A_D = LW + 2(3H)(LW) + \pi(3H)^2$ [Δ]
Linha de energia	$A_{L/P}$	$8{,}0 \times 10^2$	$A_{L/P} = 40L_L$ [Δ]
Linha de Telecom	$A_{L/T}$	$2{,}0 \times 10^4$	$A_{L/P} = 40L_L$ [Δ]

[Δ] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: O autor.

A Tabela 16 dispõe dos cálculos e de seus respectivos resultados de fatores que influenciam o número anual de eventos perigosos e a análise de risco.

Tabela 16 -Pousada: número esperado anual de eventos perigosos.

	Símbolo	Resultado (m^2)	Equação
Estrutura	N_D	0,06069200202	$N_D = N_G A_D C_D \times 10^{-6}$ [ˇ]
Linha de energia	$N_{L/P}$	0,002455745148	$N_{L/P} = N_G A_{L/P} C_{I/P} C_{E/P} C_{T/P} \times 10^{-6}$ [ˇ]
Linha Telecom	$N_{L/T}$	0,1227872574	$N_{L/T} = N_G A_{L/T} C_{I/T} C_{E/T} C_{T/T} \times 10^{-6}$ [ˇ]

[ˇ] Informações obtidas da ABNT NBR 5419-2:2015.

Fonte: Dados do autor.

5.3 Pousada: Avaliação da probabilidade de perdas PA, PB, PU e PV

A probabilidade de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura e causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico (PA), como visto no capítulo anterior, é definida pela Equação (2) e como neste caso em específico também não há SPDA instalado e não existe medidas de proteção contra tensões de toque e/ou tensão de passo, os coeficientes P_{TA} e P_B assumem valor unitário, portanto,

$$P_A = 1 \tag{15}$$

Já as probabilidades P_U e P_V são dadas pelas equações (2) e (3), também vistas no capítulo anterior, respectivamente, pelas quais é possível obter

$$P_U = 0{,}01 \tag{16}$$

e

$$P_V = 1 \tag{17}$$

Coincidentemente, os valores apresentam familiaridade com os valores obtidos no primeiro caso. No entanto, ambos os casos se utilizam de padrões normativos da ABNT.

5.4 Pousada: avaliação da quantidade de perdas LA, LB, LU e LV

As perdas para cada tipo de zona são expressas pelas Equações (4) e (5), também vistas no capítulo anterior, onde substituindo os seus respectivos parâmetros é possível obter

$$L_A = L_U = 3{,}333333333 \times 10^{-5} \tag{18}$$

e

$$L_B = L_V = 6{,}666666667 \times 10^{-4} \tag{19}$$

Diferente do que ocorre no primeiro caso, no segundo, as perdas relacionadas aos ferimentos causados a seres vivos por choque elétrico são consideravelmente maiores.

5.5 POUSADA: Avaliação do risco R1 e necessidade de proteção

A avaliação do risco de perda de vida humana (R1) na Pousada se dá de forma semelhante ao descrito no item 4.5 do capítulo anterior deste trabalho, cuja análise segue padrões normativos da ABNT NBR 5419-2.

Conhecidos os valores dos componentes R_A, R_B, R_U (para linha de energia e telecomunicações) e R_V (para linha de energia e telecomunicações) do risco de perda de vida humana (R1), na zona $Z_{PR\text{-}0B}$ (interior da estrutura), conforme mostra a Tabela 17, é possível verificar que a Pousada apresenta um risco R1 acima do limite tolerável (considerando quatro casas decimais) pela ABNT NBR 5419-2 e deriva majoritariamente dos componentes de risco R_B e R_V.

Tabela 17 - Pousada: risco R1 para estrutura não protegida.

	Símbolo	Z_{PR-0B}	**Estrutura**
D1 Ferimento	R_A	$0{,}2023\times10^{-5}$	$0{,}2023\times10^{-5}$
	$R_U = R_{U/P} + R_{U/T}$	$0{,}0041\times10^{-5}$	$0{,}0041\times10^{-5}$
D2 Danos físicos	R_B	$4{,}0461\times10^{-5}$	$4{,}0461\times10^{-5}$
	$R_V = R_{V/P} + R_{V/T}$	$8{,}3495\times10^{-5}$	$8{,}3495\times10^{-5}$
Total		$\mathbf{12{,}6020\times10^{-5}}$	$\mathbf{R_1 = 12{,}6020\times10^{-5}}$
Tolerável		**R1 > RT: proteção contra descargas atmosféricas é requerida**	$\mathbf{RT = 1\times10^{-5}}$

Fonte: Dados do autor.

Para este caso em especifico, a instalação de um SPDA é uma medida requerida, bem como a proteção contra surtos nas linhas que adentram a estrutura. Dentre as medidas adequadas, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015b, p. 46), optar pela instalação de um SPDA Classe III, reduz o valor de PB de 1 para 0,1, de mesmo modo que optar pela instalação de DPS de NP III na entrada das linhas de energia e de telecomunicações da Pousada, reduz o valor de PEB de 1 para 0,05 e os valores de PU e PV pelo mesmo fator. Consequentemente, novos valores de componentes de risco são obtidos, como mostrados na Tabela 18, onde R1 é tolerável (ABNT NBR 5419-1, 2015a).

Tabela 18 - Pousada: risco R1 para a estrutura após a aplicação de DPS nas linhas.

	Símbolo	Z_{PR-0B}	**Estrutura**
D1 Ferimento	R_A	≈ 0	≈ 0
	$R_U = R_{U/P} + R_{U/T}$	≈ 0	≈ 0
D2 Danos físicos	R_B	$0{,}4046\times10^{-5}$	$\mathbf{0{,}4046\times10^{-5}}$
	$R_V = R_{V/P} + R_{V/T}$	$0{,}4174\times10^{-5}$	$\mathbf{0{,}4174\times10^{-5}}$
Total		$\mathbf{0{,}8220\times10^{-5}}$	$\mathbf{R_1 = 0{,}8220\times10^{-5}}$
Tolerável		**R1 < RT: proteção contra descargas atmosféricas não é requerida**	$\mathbf{R_T = 1\times10^{-5}}$

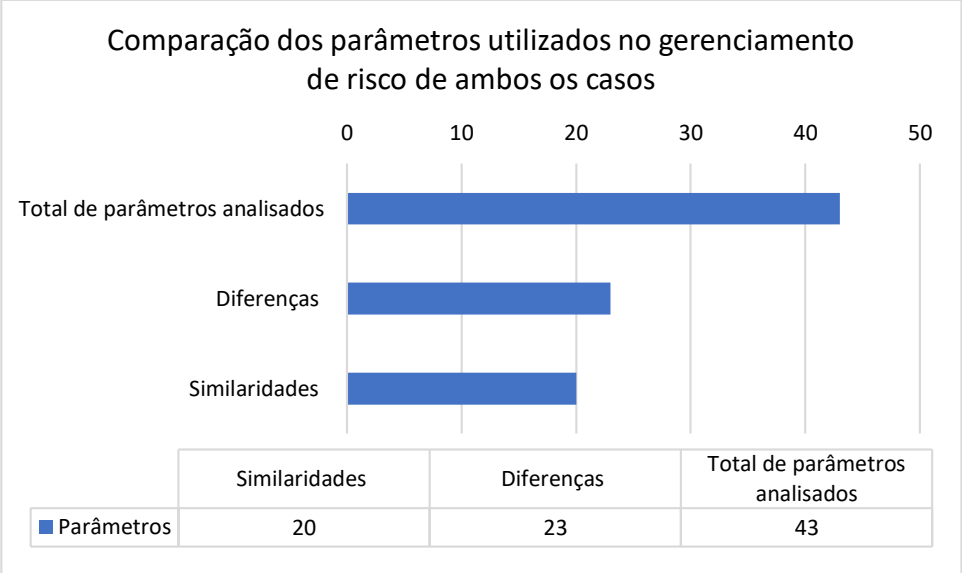
Fonte: O autor.

Embora os valores de cada componente de risco estejam expressos apenas por quatro casas decimais; todas as casas decimais foram consideradas para efeito de cálculo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, dois casos reais e distintos de gerenciamento de risco para SPDA são apresentados: o Caso 1 consiste de uma edificação denominada AGUAPA e o Caso 2 consiste de uma edificação do tipo Pousada. Embora existam muitas semelhanças entre ambos os casos, no que diz respeito aos parâmetros de cada gerenciamento de risco, conforme mostra o gráfico contido na Figura 29; quando comparados, apresentam resultados distintos.

Figura 29 - Diferenças e similaridades dos parâmetros utilizados no gerenciamento de risco de ambos os casos.



Fonte: O autor.

No Caso 1, todos os cômodos internos da estrutura correspondem à zona $Z_{PR\text{-}0B}$ que implica perigo para a perda de vida humana, uma vez que não foram identificadas particularidades que favorecessem a existência de uma segunda zona dentro do ambiente interno. Outro fator importante diz respeito à zona $Z_{PR\text{-}0A}$ que compreende a área externa, pois, é possível afirmar, que nela não há perigo de perda de vida humana dada uma das condições iniciais para o gerenciamento de risco na edificação, a qual assume que todas as pessoas consideradas no gerenciamento estão abrigadas dentro da edificação na ocorrência de fortes temporais de chuva. Sendo assim, o risco R1 para o ambiente externo em relação a estrutura é praticamente nulo e os componentes de risco se restringem à zona $Z_{PR\text{-}0B}$, ou seja, ao ambiente interno.

No que concerne o gerenciamento de risco AGUAPA, é possível verificar que não há risco de perda de vida humana significativo nas condições pré-estabelecidas em $Z_{PR\text{-}0B}$, uma vez que o valor de R1 se encontra abaixo do valor tolerável pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015b), conforme mostra a Tabela 10.

Já no Caso 2, todos os cômodos internos, de forma semelhante ao Caso 1, também compreendem uma única zona de perigo (Z_{PR-0B}) e o risco fora da estrutura é também considerado nulo. Entretanto, o resultado de seu respectivo gerenciamento de risco aponta uma ameaça eminente de perda de vida humana nas condições pré-estabelecidas, de aproximadamente treze vezes maior do que o risco tolerável pela ABNT NBR 5419-2, conforme mostra a Tabela 17 que deriva majoritariamente dos componentes de risco R_B e R_V.

Para o Caso 2 é possível afirmar que os valores de R_B e R_V são predominantes na composição de R1 e o tornam maior que o risco tolerável por dois fatores:

(a) devido a área de exposição das linhas de telecomunicações que adentram as estruturas e da própria estrutura, sujeitas a um maior perigo de eventuais descargas atmosféricas, tendo em vista a maior exposição, inclusive se comparado ao Caso 1;
(b) devido estrutura está isolada, isto é, por não haver outras estruturas pela vizinhança, além de possuir maior extensão de área que o objeto de estudo do Caso 1.

Logo, para reduzir os componentes de risco R_B e R_V de modo que R1 chegue a um valor tolerável, conforme Tabela 18; a estrutura deve possuir no mínimo SPDA Classe III e DPS de Nível de Proteção III para a entrada de linhas (ABNT NBR 5419-2, 2015b).

Embora existam muitas definições que possam ser empregadas ao termo Entrada de Linha, a ABNT NBR 5419-2 a define como o ponto que excede a fronteira de Z_{PR-0A} e adentra a estrutura, isto é, Z_{PR-0B}, e não pode ser confundido com Ponto de Entrega, termo definido pela ABNT NBR 5410 (2004, p. 8), como o "ponto de conexão do sistema elétrico da empresa distribuidora de eletricidade com a instalação elétrica da(s) unidade(s) consumidora(s) e que delimita as responsabilidades da distribuidora, definidas pela autoridade reguladora".

Entretanto, mediante as duas definições apresentadas, dúvidas podem surgir em relação à posição dos DPS nas instalações. Sendo assim, é necessário esclarecer que para o caso de uma descarga direta sobre linhas em Z_{PR-0A}, é possível afirmar que um DPS de Nível de Proteção III instalado na fronteira entre Z_{PR-0A} e Z_{PR-0B} não é suficiente para amortizar o impulso da corrente de uma descarga atmosférica direta sobre a linha e sendo este normalmente utilizado para acabamentos de proteção. Logo, a ABNT NBR 5419-2 recomenda a aplicação de DPS de Nível de Proteção I na periferia de Z_{PR-0B}, os quais são projetados especificamente para esta finalidade.

No mais, para a construção de um SPDA, tal como o requerido no Caso 2, cabe ao engenheiro responsável verificar o método ou até mesmo a junção de métodos de proteção complementares para abranger a estrutura de maneira significativa, em consonância com a relação custo benefício favorável (ABNT NBR 5419-3, 2015c).

Vê-se, portanto, que para ambos os casos as soluções divergem, embora ambas as estruturas apresentem muitas semelhanças no gerenciamento de risco.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudado de forma ampla o assunto da proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Aquelas que se conectam diretamente ao solo foram estudadas com maior ênfase. Consequentemente, estudaram-se as maneiras mais usuais de proteção para estruturas contra estes tipos de descargas. Percebe-se que negligenciar estas medidas em obras de Engenharia pode resultar em incêndios, explosões ou até mesmo na perda de vida humana.

Com base na problemática supracitada, o conceito de SPDA passa a ser abordado, bem como sua finalidade e de seu Órgão Fiscalizador (que no caso do Brasil é a ABNT), restrito aos casos nos quais as descargas atmosféricas podem incidir diretamente sobre uma estrutura majoritariamente fechada e não incluem a proteção de áreas abertas, tal como praias, estacionamentos de estabelecimentos comerciais ao ar livre e campos de futebol.

Dois casos reais e distintos de gerenciamento de risco são levados em consideração para verificação da necessidade da aplicação de SPDA em duas estruturas do tipo edificação (ANEXO A e B), além de demonstrar a importância da análise preliminar de risco e, consequentemente, evidenciar as particularidades de cada caso. Nota-se que embora sejam semelhantes em muitos aspectos, os dois estudos de caso apresentaram resultados distintos.

Este trabalho demonstra que utilizar conclusões de um gerenciamento de risco de um caso em particular como parâmetro para outras situações é uma maneira equivocada e precipitada de resolver problemas, o que pode resultar na omissão de eventuais riscos ou no mau dimensionamento dos sistemas de proteção, isto é, em sistemas ineficientes, superdimensionado (no que se refere ao Nível e Classe do SPDA, DPS), ou no pior dos cenários, na perda de vida humana.

Quanto aos resultados, foi verificado que o primeiro caso não apresenta risco significativo para perda de vida humana, enquanto que o segundo, requer SPDA e a instalação de DPS de Nível de Proteção I na entrada de linhas na estrutura. Ainda quanto ao Caso 2, fica em aberto a possibilidade de trabalho futuro, isto é, da elaboração do projeto que contemple a proteção da Pousada, assim requerida pelo resultado do seu respectivo gerenciamento de risco, como verificado no Capítulo 5 deste trabalho.

Pode-se afirmar que os objetivos deste trabalho foram alcançados, pois ficou clara a importância da realização do gerenciamento de risco para SPDA, uma vez que ela permite objetivamente evitar a precipitação de medidas de proteção não necessárias e onerosas, assim como a negligência de riscos severos à estrutura ou seus usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASSIS, A. K. T. **Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade**. Campinas, SP: Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2018.

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

ABNT NBR 5419-1. **Proteção contra descargas atmosféricas: parte 1: princípios gerais**. Rio de Janeiro, 2015a.

ABNT NBR 5419-2. **Proteção contra descargas atmosféricas: parte 2: gerenciamento de risco**. Rio de Janeiro, 2015b.

ABNT NBR 5419-3. **Proteção contra descargas atmosféricas: parte 3: danos físicos a estruturas e perigos à vida**. Rio de Janeiro, 2015c.

BRASIL. **Lei nº 11.377, de 26 de julho de 2006**. Determina a obrigatoriedade de as edificações possuírem sistema de aterramento e instalações elétricas compatíveis com a utilização de condutor-terra de proteção, bem como torna obrigatória a existência de condutor-terra de proteção nos aparelhos elétricos que especifica. Brasília, DF: Presidência da República, [2006]. Disponível em: https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=11337&ano=2006&ato=84cQTSU5kMRpWT9ef. Acesso em: 28 out. 2022.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 16ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual Orientador** – **SPDA**: proteção contra descargas elétricas: proteção contra surtos, São Paulo: Sabesp, 2011. Disponível em: https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/asabesp_doctos/espaco_empreendedor/manual_orientador_SPDA_pdf.pdf. Acesso em: 3 nov. 2022.

CUSTÓDIO, A. A cada 50 mortes por raios no mundo, uma é no Brasil; saiba como se proteger. **GZH**. Porto Alegre, ano 6, 26 abril 2022, ambiente. Disponível em: https://gauchazh.clicrbs.com.br/ambiente/noticia/2022/04/a-cada-50-mortes-por-raios-no-mundo-uma-e-no-brasil-saiba-como-se-proteger-cl2gln7qv007e019imbse9cxy.html#:~:text=uma%20forte%20tempestade.-,A%20cada%2050%20mortes%20por%20raios%20no%20mundo%2C%20uma%20%C3%A9,anuais%20de%20R%24%201%20bilh%C3%A3o.. Acesso em: 14 set. 2022.

SOUZA, D. et al. **Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2023 – Ano base 2022**. Salto-SP: Abracopel, 2023. DOI: 10.29327/5194308.

E M F ENGENHARIA E SERVIÇOS TÉCNICOS LTDA. **Entenda mais**. Rio de Janeiro: EMF Engenharia e Serviços Técnicos, 2021. 9 p. Disponível em: https://emf-engenharia.com.br/spda/. Acesso em: 28 out. 2022.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 9ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

FILHO, S. V. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. 1ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

FINDER. **Guia para aplicação de Dispositivos de Proteção contra Surtos - DPS 2012.2**. São Caetano do Sul: Finder, 2012. Disponível em: https://www.findernet.com/pt/brasil/suporte/catalogo-geral/. Acesso em: 26 out. 2022.

FLORES, A. J. M., **Análise e Aplicação de Métodos para o Cálculo da Resistência de Terra em Sistemas com *N* Elétrodos Instalados em Solos Heterogéneos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto - Portugal, 2014.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de orientação para manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas nas escolas – para-raios**. São Paulo: Secretaria da Educação, 2009. Disponível em: https://deitarare.educacao.sp.gov.br/pararaios-escolas/. Acesso em: 19 out. 2022.

GUIMARÃES, P. Tensão de Passo e Tensão de Toque. Pablo Guimarães – Professor, 2020. Disponível em: https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/tensao-de-passo-e-tensao-de-toque#:~:text=As%20tens%C3%B5es%20de%20passo%20e,e%20o%20p%C3%A9)%2C%20respectivamente.&text=No%20momento%20em%20que%20ocorre,corrente%20gera%20tens%C3%B5es%20no%20solo.. Acesso em: 14 out. 2022.

HAYT, W. H. J.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

Instalações elétricas de média e alta tensão. **O SETOR ELÉTRICO**. São Paulo: Atitude Editorial, v. 16, 177, p. 16-22, mar. 2021. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/fasciculos-completos/. Acesso em: 28 out. 2022.

INPE. **Grupo de eletricidade atmosférica**. São José dos Campos, 2023. Disponível em: http://www.inpe.br/webelat/homepage/. Acesso em: fev. 2023.

KINDERMAN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3ª ed. Porto Alegre: Sagra - D.C. Luzzatto, 1995.

MARTINHO, M. et al. **Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2022 – Ano base 2021**. Salto-SP: Abracopel, 2022. Salto - SP: Abracopel, 2022. DOI: 10.29327/560614.

MARTINS, P. Ambientes mais seguros. **POTÊNCIA**. Santo André, ano 16, n. 183. p. 30-39, mar. 2021.

MORENO, H. et al. **Guia o setor elétrico de normas brasileiras**. São Paulo: Atitude Editorial, 2011. *E-book*. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/ebooks-revista-o-setor-eletrico/. Acesso em: 9 set. 2022.

MOURA, B. A.; BONFIM, T. Benjamin Franklin e a formação de temporais com raios e trovões: tradução comentada de uma carta a John Mitchel. *In* MOURA, B. A.; BONFIM, T. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 34, n. 2, p. 460-478, 2017.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. 2001. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e da Tecnologia, São José dos Campos, 2001.

OLIVEIRA, C. T. Método eletrogeométrico: modelagem matemática para cálculo da corrente que mantém a blindagem nas estruturas das linhas de subtransmissão. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, V, 2020, Campina Grande. **Anais** [...]. Campina Grande: Realize Editora, 2020. p. 4-6. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2020/TRABALHO_EV138_MD1_SA23_ID1162_11112020160702.pdf. Acesso em: 3 nov. 2022.

PAIVA, G. S. GERAÇÃO E MECANISMO DE FORMAÇÃO DE RELÂMPAGOS GLOBULARES. 2009. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós – Graduação em Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PIANTINI, A. Sobretensões Atmosféricas em Redes de Baixa Tensão. **O SETOR ELÉTRICO**, v. 14, p. 64-69, 2019.

PINHEIRO, A. L. S., et al. ELABORAÇÃO DE PROJETO DE SPDA, EM GALPÃO FABRIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **PROJECTUS**, Rio de Janeiro, v. 4, n.1, p. 102-124, 2019. Disponível em: https://revistas.unisuam.edu.br/index.php/projectus/issue/view/25. Acesso em 21 set. 2022.

REIS, T. P. **Análise das Sobretensões Máximas de Origem Atmosférica Conduzidas nas Redes de Distribuição de Baixa Tensão**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

REBOITA, M. et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. Rio Grande, RS: Repositório Institucional da Universidade Federal do Rio Grande, 2012.

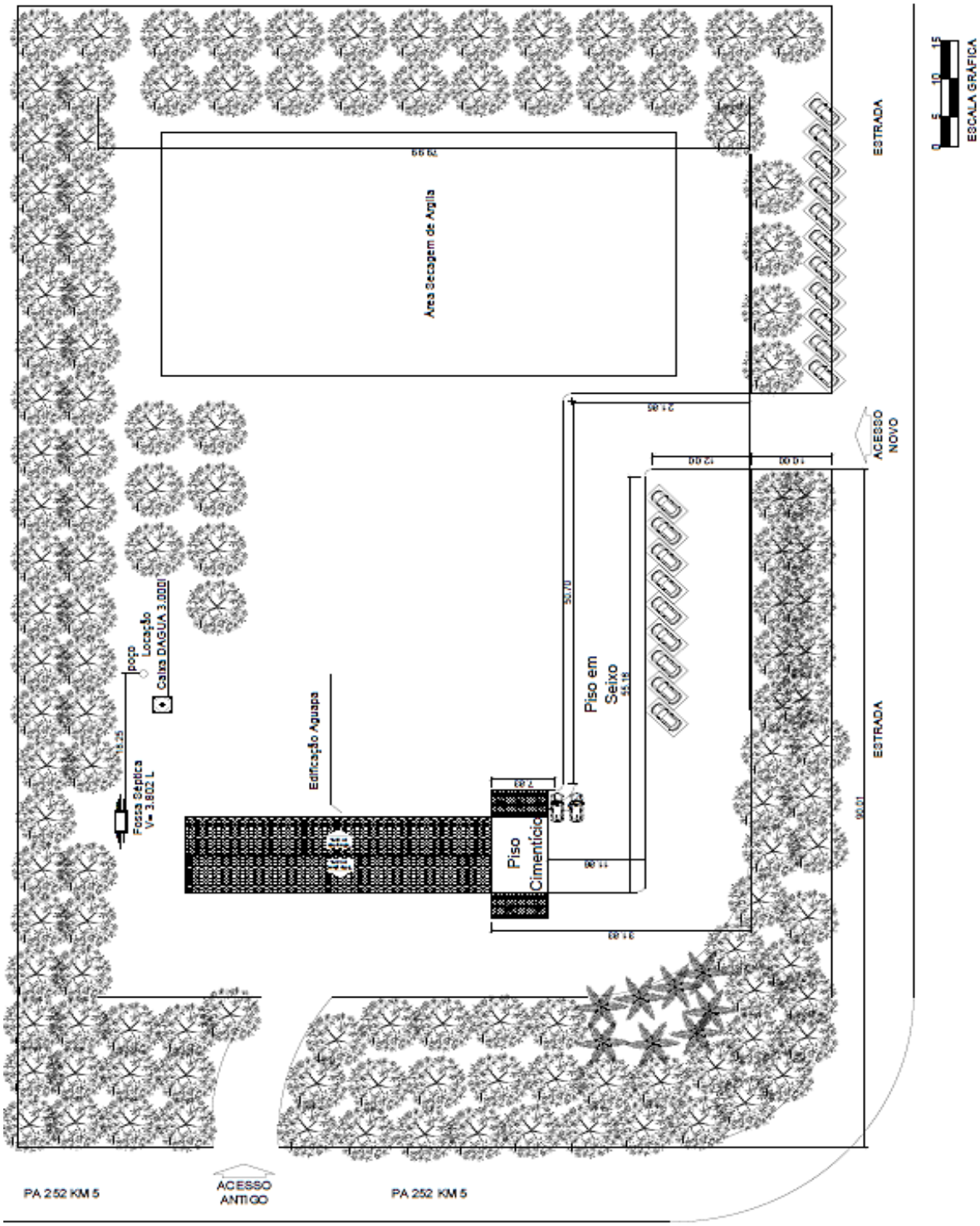
ROSA, C. A. P. **História da Ciência: a ciência moderna**. 2ª ed. Brasília, DF: Fundação Alexandre de Gusmão, 2012.

SILVA, C. C.; PIMENTEL, A. C. **As atmosferas elétricas de Benjamin Franklin e as interações elétricas no século XVIII**. In: MARTINS, R. A.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H.; MARTINS, L. Al-Chueyr P. (Org.). Filosofia e História da Ciência no Cone Sul. Seleção de Trabalhos do 5o Encontro. 1ed.Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC), 2008, v. 1, p. 117-124. Disponível em: http://www.afhic.com/wp-content/uploads/2018/12/As-atmosferas-eletricas.pdf.Acesso em: 12 set. 2022.

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**. London: Academic Press, 1987.

134.498 Blocos AutoCAD para download grátis e Premium. **BiblioCAD**, 2023. Disponível em: < https://www.bibliocad.com/pt/>. Acesso em: 04/02/2022.

ANEXO A – Planta de situação da edificação AGUAPA



ANEXO B - Planta de cobertura da Pousada

