



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

Fabio de Moura Martins

Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

Uberlândia
2017

Fabio de Moura Martins

Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Adélio José de Moraes

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo apoio, dedicação e amor oferecido a mim e principalmente pelas palavras ditas nos momentos de desânimo.

Agradeço a minha namorada Bruna Vieira Araújo pelo apoio durante a realização deste trabalho como também durante a vida.

Agradeço ao meu orientador Adélio José de Moraes sempre disposto a auxiliar da melhor forma possível em meu desenvolvimento.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia e a FEELT.

RESUMO

Este trabalho aborda conhecimentos básicos sobre a proteção de Sistemas Elétricos e Estruturas e as principais orientações fixadas pela norma ABNT 5419 – Proteção de Edificação contra Descargas Atmosféricas.

Descreve ainda, de forma sucinta, a norma e a metodologia de cálculo associada à proteção, ressaltando também as principais alterações pertinentes à sua atualização ocorrida no ano de 2015. Objetivando salientar os efeitos das modificações ocorridas, apresentam-se cálculos da proteção de um sistema teste utilizando as versões de 2005 e 2015 da norma ABNT 5419.

Palavras chave: Descargas Atmosféricas, SPDA, ABNT 5419, Sistemas Elétricos.

ABSTRACT

This work addresses basic knowledge about the protection of Electrical Systems and Structures and the main guidelines established by the ABNT 5419 - Protection of Buildings from Atmospheric Discharge.

It also briefly describes a standard and calculation methodology associated with protection, also highlighting the main suggestions for its updating in the year 2015. In order to emphasize the effects of the modifications, use the 2005 and 2015 versions of the ABNT 5419 standard.

Keywords: Atmospheric Discharge, SPDA, ABNT 5419, Electrical systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas da formação da descarga atmosférica nuvem – solo	18
Figura 2: Forma de onda da tensão de uma descarga atmosférica	18
Figura 3: Mapa Isoceráunico do território brasileiro	21
Figura 4: ZPR definido por um SPDA	26
Figura 5: Procedimento para analisar a necessidade da proteção e selecionar medidas de proteção contra surto	29
Figura 6: Método de medição de continuidade elétrica.....	47
Figura 7: Cone correspondente ao Método do Ângulo de Proteção	48
Figura 8: Ângulo de proteção de acordo com a classe do SPDA	49
Figura 9: Método da Esfera Rolante.....	50
Figura 10: Caso de subsistema de captores a um fio e um subsistema de aterramento em anel	55
Figura 11: Caso de subsistema de captores em malha e sistema de aterramento em anel	55
Figura 12: Laço em um condutor de descida	57
Figura 13: Comprimento mínimo l1 do eletrodo de aterramento de acordo com a classe do SPDA	59
Figura 14: ZPR onde o SPDA atua	69
Figura 15: Ângulo de proteção de acordo com a classe do SPDA	71
Figura 16: Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento – NBR 5419/2005	73
Figura 17: Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento – NBR 5419/2015	73
Figura 18: Edifício de aplicação	75
Figura 19: Mapa isoceráunico do Brasil NBR 5410-2005	77
Figura 20: Número NG de Itumbiara-Go	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas de uma descarga atmosférica	19
Tabela 2: Perdas e danos para uma estrutura considerando diferentes pontos de impacto de uma descarga atmosférica.....	23
Tabela 3: Valores típicos para risco tolerável em relação ao tipo de perda	27
Tabela 4: Fator de localização da estrutura	32
Tabela 5: Fator tipo de linha.....	33
Tabela 6: Fator de instalação da linha	34
Tabela 7: Fator ambiental da linha	34
Tabela 8: Valores de PB em função das medidas de proteção para reduzir danos físicos	35
Tabela 9: Valores de PTA em função das medidas de proteção adicional	36
Tabela 10: Valores de PSPD em função do NP do DPS utilizado	36
Tabela 11: Valores de CLD e CLI em função das condições de blindagem, isolamento e aterramento	37
Tabela 12: Valores de KS3 em função da fiação interna	38
Tabela 13: Valores de PTU em função das medidas de proteção	39
Tabela 14: Valores de PEB em função do NP do DPS utilizado	39
Tabela 15: Valores de PLD em função da resistência da blindagem e da tensão suportável de impulso	40
Tabela 16: Valores de PLI em função do tipo de linha e da tensão suportável de impulso	41
Tabela 17: Perda L1 - Valores de perda típica para cada zona.....	42
Tabela 18: Perda L1 - Valores médios típicos de LT, LF e LO	42
Tabela 19: Fator de redução rt em função do tipo de solo ou piso	42
Tabela 20: Fator de redução rp em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio	43
Tabela 21: Fator de redução rf em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura.....	43
Tabela 22: Fator hz aumentando a quantidade relativa de perda na presença de um perigo especial	43
Tabela 23: Perda L2 - Valores de perda para cada zona	44
Tabela 24: Perda L2: Valores médios típicos de LF e LO	44
Tabela 25: Perda L3 - Valores de perda para cada zona	44
Tabela 26: Perda L3 - Valor médio típico de LF.....	45
Tabela 27: Perda L4 - Valores de perda para cada zona	45
Tabela 28: Perda L4 - Valores médios típicos de LT, LF e LO	46
Tabela 29: Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe de SPDA	46
Tabela 30: Valores do raio da esfera rolante em função da classe do SPDA	50
Tabela 31: Valores do Método das malhas de acordo com a classe do SPDA.....	51
Tabela 32: Espessura mínima de chapas metálicas ou tubulações metálicas em sistema de captação	52
Tabela 33: Valores das distâncias entre os condutores de descida em função das classes do SPDA	54
Tabela 34: Valores do coeficiente kc	54
Tabela 35: Valores do coeficiente ki	57
Tabela 36: Valores do coeficiente km	57
Tabela 37: Valores aproximados do coeficiente kc	58
Tabela 38: Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descida.....	60
Tabela 39: Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento.....	61

Tabela 40: Dimensões mínimas dos condutores que interligam diferentes barramentos de equipotencialização (BEP ou BEL) ou que ligam essas barras ao sistema de aterramento	62
Tabela 41: Dimensões mínimas dos condutores que ligam as instalações metálicas internas aos barramentos de equipotencialização (BEP ou BEL)	63
Tabela 42: Comprimento de cabo a ser considerado segundo a condição de blindagem.....	64
Tabela 43: Comparação da eficiência de acordo com o nível de proteção.....	68
Tabela 44: Valores do ângulo de proteção de acordo com a classe do SPDA	70
Tabela 45: Comparação dos valores da malha captora de acordo com a classe do SPDA	71
Tabela 46: Comparação da distância entre os condutores de descida de acordo com a classe do SPDA	72
Tabela 47: Comparação dos valores do coeficiente k_i	74
Tabela 48: Fatores de ponderação	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFU – Universidade Federal de Uberlândia
FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SPDA: Sistema de Proteção contra Descargas Atmosférica
DPS: Dispositivo de Proteção contra Surtos
MPS: Medidas de Proteção contra Surtos
ZPR: Zona de Proteção contra Raios
BEP: Barramento de Equipotencialização Principal
BEL: Barramento de Equipotencialização Local
AD: Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas a uma estrutura isolada
ADJ: Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas a uma estrutura adjacente
AI: Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma linha
AL: Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas em uma linha
AM: Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma estrutura
AT: Alta Tensão
BT: Baixa Tensão
CD: Fator de localização
CDJ: Fator de localização de uma estrutura adjacente
CE: Fator ambiental
CI: Fator de instalação de uma linha
CLD: Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolação da linha para descargas atmosféricas na linha
CLI: Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolação da linha para descargas atmosféricas perto da linha
CT: Fator de tipo de linha para um transformador AT/BT na linha
D1: Ferimentos a seres vivos por choque elétrico
D2: Danos físicos
D3: Falhas de sistemas eletroeletrônicos
hz: Fator de aumento de perda quando um perigo especial está presente
KMS: Fator relevante ao desempenho das medidas de proteção contra LEMP
KS1: Fator relevante à efetividade da blindagem por malha de uma estrutura

KS2: Fator relevante à efetividade da blindagem por malha dos campos internos de uma estrutura

KS3: Fator relevante às características do cabeamento interno

KS4: Fator relevante à tensão suportável de impulso de um sistema

L: Comprimento da estrutura

LA: Perda relacionada aos ferimentos a seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura)

LB: Perda em uma estrutura relacionada a danos físicos (descargas atmosféricas à estrutura)

LL: Comprimento de uma seção da linha

LC: Perda relacionada à falha dos sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura)

LF: Perda em uma estrutura devido a danos físicos

LM: Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da estrutura)

LO: Perda em uma estrutura devido à falha de sistemas internos

LT: Perda devido a ferimentos por choque elétrico

LU: Perda relacionada a ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas na linha)

LV: Perda em uma estrutura devido a danos físicos (descargas atmosféricas na linha)

LW: Perda devido à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha)

LX: Perda consequente a danos relevantes à estrutura

LZ: Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha)

L1: Perda de vida humana

L2: Perda de serviço ao público

L3: Perda de património cultural

L4: Perda de valor económico

NX: Número de eventos perigosos por ano

ND: Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura

NDJ: Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura adjacente

NG: Densidade de descargas atmosféricas para a terra

NI: Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha

NL: Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma linha

NM: Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma estrutura

nz: Número de possíveis pessoas em perigo (vítimas ou usuários não servidos)

nt: Número total de pessoas (ou usuários atendidos) esperado

PA: Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura)

PB: Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura)

PC: Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura)

PEB: Probabilidade de reduzir PU e PV dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento quando EB (ligação equipotencial) é instalada

PLD: Probabilidade de reduzir PU, PV e PW dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas na linha conectada)

PLI: Probabilidade de reduzir PZ dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas perto da linha conectada)

PM: Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada)

PMS: Probabilidade de reduzir PM dependendo da blindagem, cabeamento e da tensão suportável do equipamento

PSPD: Probabilidade de reduzir PC, PM, PW e PZ quando um sistema coordenado de DPS está instalado

PTA: Probabilidade de reduzir PA dependendo das medidas de proteção contra tensões de toque e passo

PTU: Probabilidade de reduzir PU dependendo das medidas de proteção contra tensões de toque e passo

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

PV: Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas perto da linha conectada)

PW: Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha conectada)

PX: Probabilidade de danos relevantes à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura)

PZ: Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada)

rt: Fator de redução associado ao tipo de superfície do solo

rf: Fator redutor de perda dependente do risco de incêndio

rp: Fator redutor de perda devido às precauções contra incêndio

RA: Componente de risco (ferimentos a seres vivos- descarga atmosférica na estrutura)

RB: Componente de risco (danos físicos na estrutura - descarga atmosférica na estrutura)

RC: Componente de risco (falha dos sistemas internos -descarga atmosférica na estrutura)

RM: Componente de risco (falha dos sistemas internos -descarga atmosférica perto da estrutura)

Rs: Resistência da blindagem por unidade de comprimento de um cabo

RT: Risco tolerável

RU: Componente de risco (ferimentos a seres vivos - descarga atmosférica na linha conectada)

RV: Componente de risco (danos físicos na estrutura - descarga atmosférica na linha conectada)

RW: Componente de risco (falha dos sistemas internos -descarga atmosférica na linha conectada)

RX: Componente de risco para uma estrutura

RZ: Componente de risco (falha dos sistemas internos - descarga atmosférica perto da linha)

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 património cultural em uma estrutura

R4: Risco de perda de valor económico em uma estrutura

tZ: Tempo, em horas por ano, que pessoas estão presentes em um local perigoso

UW: Tensão suportável nominal de impulso de um sistema

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
2. DESENVOLVIMENTO.....	17
2.1.FENÔMENOS NATURAIS	17
2.1.1 Descargas Atmosféricas no Brasil	17
2.1.2 Geração das descargas atmosféricas.....	17
3. CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	18
3.1.FORMA DE ONDA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA	18
3.2.VALORES DA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	19
4. ORIENTAÇÕES PARA A PROTEÇÃO DAS PESSOAS	20
5. MAPA ISOCERÁUNICO.....	20
6. PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	22
6.1 PREJUÍZOS CAUSADOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	22
6.2. NECESSIDADE DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	24
6.3. MEDIDAS DE PROTEÇÃO.....	24
6.4. CRITÉRIOS PARA A PROTEÇÃO DAS ESTRUTURAS	25
7. GERENCIAMENTO DO RISCO DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA ATINGIR UMA ESTRUTURA	26
7.1. RISCOS E SUAS COMPONENTES	26
7.2. GERENCIAMENTO DE RISCO	28
7.3. ANÁLISE DOS COMPONENTES DE RISCO	29
7.3.1. Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na Estrutura (S1).....	29
7.3.2. Análise dos componentes de risco devido a descargas atmosféricas nas proximidades da estrutura (S2)	30
7.3.3. Análise dos componentes de risco devido a descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura (S3).....	30
7.3.4. Análise dos componentes de risco devido a descargas atmosféricas nas proximidades de uma linha conectada à estrutura (S4).....	31
7.3.5. Dividindo a estrutura	31
7.4. ANÁLISE DO NÚMERO ANUAL (N) DE EVENTOS PERIGOSOS	31
7.4.1. Princípios Básicos	31
7.4.2. Análise do número médio anual de eventos perigosos ND devido a descargas atmosféricas na estrutura e NDJ em estrutura adjacente	32
7.4.2.1. Determinação da área de exposição equivalente (AD).....	32
7.4.2.2. Localização relativa da estrutura	32
7.4.2.3. Número de eventos perigosos NDJ para uma estrutura adjacente:	33

7.4.2.3.1. Tipo de linha.....	33
7.4.3. Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NM devido a descargas atmosféricas próximas da estrutura	33
7.4.4. Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NL devido a descargas atmosféricas na linha	33
7.4.5. Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NI devido a descargas atmosféricas próximas à linha	34
7.5. AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE PX DE DANOS.....	35
7.5.1. Probabilidade PA de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico	35
7.5.2. Probabilidade PC de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falhas a sistemas internos.....	36
7.5.3. Probabilidade PM de uma descarga atmosférica perto de uma estrutura causar falha em sistemas internos.....	37
7.5.4. Probabilidade PU de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico.....	39
7.5.5. Probabilidade PV de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos.....	40
7.5.6. Probabilidade PW de uma descarga atmosférica em uma linha causar falha de sistemas internos	40
7.5.7. Probabilidade PZ de uma descarga atmosférica perto de uma linha que entra na estrutura causar falha dos sistemas internos	41
7.6. ANÁLISE DE QUANTIDADE DE PERDA LX	41
7.6.1. Quantidade relativa média de perda por evento perigoso	41
7.6.2. L1 – Perda de vida humana	41
7.6.3. L2 – Perda inaceitável de serviço ao público	44
7.6.4. L3 – Perda inaceitável de patrimônio cultural.....	44
7.6.5. L4 – Perda econômica	45
8. PERIGOS À VIDA E DANOS FÍSICOS A ESTRUTURA.....	46
8.1. SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	46
8.1.1. Continuidade da armadura de aço em estruturas de concreto armado	47
8.2. SISTEMA EXTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	48
8.2.1. Subsistema de Captação	48
8.2.2. Método do Ângulo de Proteção ou Método de Franklin	48
8.2.3. Método da Esfera Rolante ou Método Eletrogeométrico	50
8.2.4 Método das Malhas ou Método da Gaiola de Faraday	51
8.2.5 Captores para descargas laterais	52
8.2.6. Construção do subsistema de captação.....	53
8.2.7 Componentes naturais	53

8.2.8. Subsistema de Descida	54
8.2.8.1. Divisão da corrente da descarga atmosférica entre os condutores de descida	54
8.2.8.2. Posicionamento.....	56
8.2.8.3. Construção	56
8.2.8.4. Componentes Naturais.....	58
8.2.9. Subsistema de Aterramento	58
8.2.10. Componentes	60
8.2.10.1. Fixação	60
8.2.10.2 Materiais e Dimensões	60
8.3. SISTEMA INTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	62
8.3.1. Equipotencialização com o objetivo de proteger contra descargas atmosféricas	62
8.3.1.1. Equipotencialização para instalações metálicas	62
8.3.1.2. Equipotencialização para elementos condutores externos	63
8.3.1.3. Equipotencialização para sistemas internos	63
8.3.1.4. Equipotencialização para as linhas conectadas à estrutura a ser protegida	64
8.4. MANUTENÇÃO, INSPEÇÃO E DOCUMENTAÇÃO DE UM SPDA	64
8.5. MEDIDAS DE PROTEÇÃO CONTRA ACIDENTES COM A POPULAÇÃO.....	65
8.5.1. Medidas de proteção contra tensão de toque	65
8.5.2. Medidas de proteção contra tensão de passo	65
8.6. ESTRUTURAS COM MATERIAL SÓLIDO EXPLOSIVO.....	66
9. SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS INTERNOS NA ESTRUTURA ..	66
9.1. MEDIDAS BÁSICAS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS	66
9.2. ATERRAMENTO E EQUIPOTENCIALIZAÇÃO	66
10. MUDANÇAS NA NBR 5419.....	67
11. ESTUDO DE CASO	75
11.1.VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE UM SPDA UTILIZANDO NBR 5419 - 2005	75
11.2.VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE UM SPDA UTILIZANDO NBR 5419 - 2015	79
12. CONCLUSÃO.....	85
13. REFERÊNCIAS	86

1. INTRODUÇÃO

As descargas elétricas também conhecidas como raios são fenômenos da natureza de ocorrência inesperada que desde o princípio trazem diversos questionamentos ao homem, quer pelo seu barulho característico, quer pelos danos provocados.

Os raios são formações elétricas capazes de acarretar prejuízos materiais, incêndios em florestas e instalações prediais, quedas nas redes de energia elétrica, acidentes na aviação, embarcações marítimas e torres de plataformas de petróleo. As descargas elétricas podem inclusive provocar a morte (REIS, 2005).

As descargas elétricas são imprevisíveis e estão fora do controle humano, desta maneira é necessário que técnicas sejam desenvolvidas para se possa reduzir ou evitar seus efeitos prejudiciais às instalações e ao homem. Atualmente há diversas pesquisas e projetos à respeito de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) visando aperfeiçoar cada vez mais sua atuação nestes fenômenos. Um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é capaz de proteger estruturas, edificações e pessoas contra os efeitos negativos das descargas atmosféricas.

A associação entre o projeto de proteção e o projeto de construção civil possibilita a obtenção de um custo menor e uma proteção mais segura e eficaz. Logo, é notória a importância da instalação do SPDA e de sua monitoração.

O presente trabalho foi idealizado com base nos fundamentos apresentados pela norma NBR 5419, a mesma descreve os padrões de implantação de um projeto de proteção adequado e eficiente.

Seu objetivo principal é apresentar a base teórica acerca da norma NBR 5419 e suas alterações recentes, de forma clara e sucinta, visto que trata-se de um tema amplo e complexo. Portanto, podendo ser introduzido no cotidiano dos profissionais do ramo de Eletrotécnica, como uma base para consulta e estudo.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. FENÔMENOS NATURAIS

2.1.1 Descargas Atmosféricas no Brasil

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ocorrem cerca de 50 milhões de descargas atmosféricas por ano no Brasil. O país é um dos mais atingidos por raios em todo o mundo. A cada 50 mortes provocadas por descargas atmosféricas, uma acontece no Brasil.

A possível causa para a elevada frequência de descargas elétricas em nosso território é principalmente por seu clima quente que contribui para a formação de raios e tempestades. Alguns dados de levantamentos recentes confirmam esta explicação. Aproximadamente 86% dos casos com mortes entre os anos 2000 e 2014 ocorreram na primavera ou verão, estações nas quais as tempestades devido às altas temperaturas são mais frequentes (INPE, ANO 2014).

2.1.2 Geração das descargas atmosféricas

As nuvens apresentam eletrificação e concentração de cargas em diferentes partes de sua extensão, tal fato faz que estas adquiriram a característica de dipolo elétrico.

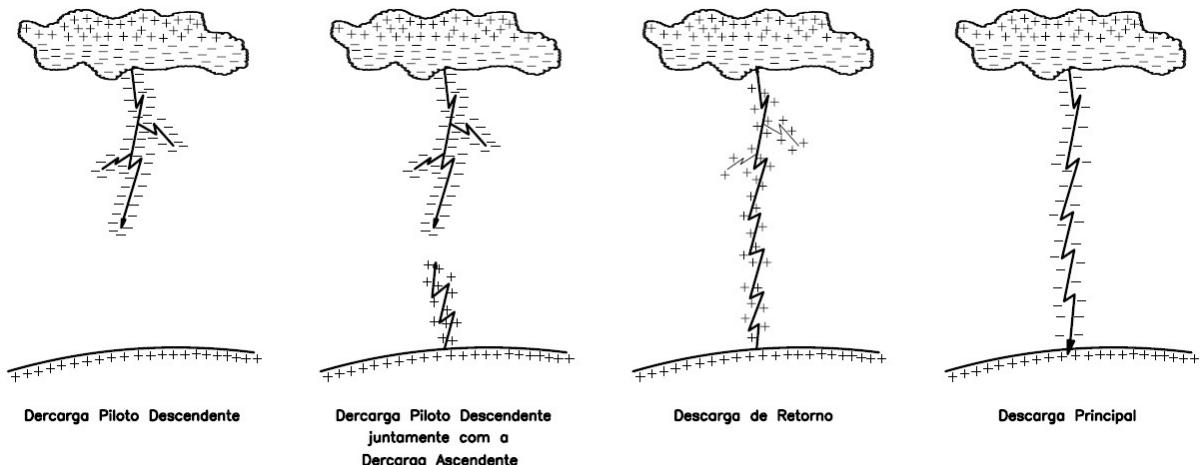
Algumas teorias buscam explicar este processo de eletrificação, como a teoria da precipitação e a teoria da convecção. Ambas concluem que na maior parte dos casos a nuvem se carrega negativamente em sua fração inferior e positivamente em sua fração superior (MAMEDE FILHO, 2011). Esta explicação é adotada para o processo de formação das descargas atmosféricas, ainda que a disposição de cargas na nuvem não ocorra em 100% das vezes.

A concentração de cargas negativas na fração inferior da nuvem acarreta uma enorme migração de cargas positivas para a região correspondente à sua “sombra” na terra. Quando a nuvem é carregada pelo vento, as cargas positivas se deslocam na terra, “escalando” pessoas, casas, prédios, torres, para-raios e morros, passando por diversas condições atmosféricas (KINDERMAN, 1992).

O aumento na diferença de potencial ou gradiente de tensão nuvem-terra pode superar a rigidez dielétrica do ar, de aproximadamente 3MV/m. Iniciando consequentemente o fenômeno conhecido por descarga piloto descendente. Este representa a migração das cargas negativas da nuvem para a terra (MAMEDE FILHO, 2011).

No momento em que as duas descargas se ligam “Attachment”, conectam o potencial da terra ao da nuvem provocando o surgimento de uma *descarga de retorno* que segue o caminho previamente ionizado desde a terra até a nuvem. E então é formada a descarga principal no sentido da nuvem para a terra (MAMEDE FILHO, 2011).

A figura 1 ilustra as etapas de formação da descarga atmosférica descritas anteriormente.



3. Características das descargas atmosféricas

3.1. Forma de onda da descarga atmosférica

A partir de dados de inúmeros estudos e pesquisas, comprovou-se que a corrente da descarga tem uma polaridade, ou seja, uma só direção. Além disso, foi possível ainda obter-se a forma de onda típica de uma descarga atmosférica, como ilustra a figura 2.

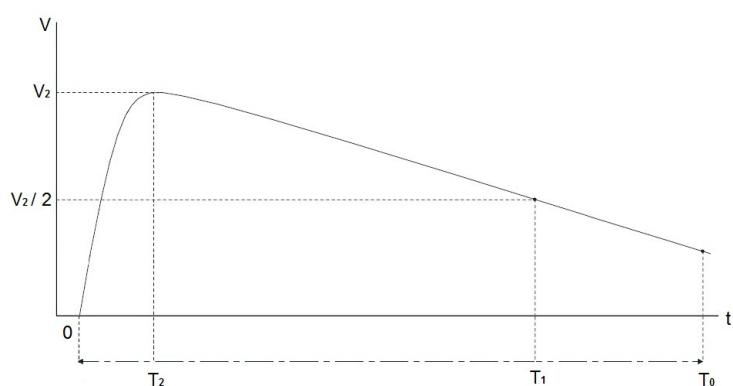


Figura 2: Forma de onda da tensão de uma descarga atmosférica

Ao analisar a figura 2, observa-se que seu valor máximo de tensão V2, ou Valor de Crista, é atingido no instante T2 e pode variar entre 1 e 10 μ s, recebendo o nome de Frente de Onda.

Após o Valor de Crista no instante T2, a tensão começa a cair, atingindo uma intensidade de 50% de V2 em um intervalo de tempo T1, que varia de 20 a 50 μ s e esse intervalo entre T2 e T1 recebe o nome de Tempo de Meia Cauda. A tensão então se torna quase zero ao final de T0, após um período que pode variar entre 100 e 200 μ s e recebe o nome de Tempo de Cauda.

A onda de tensão característica da descarga atmosférica foi normalizada com 1,2 μ s para o valor de Frente de Onda e 50 μ s para o valor do Tempo de Meia Cauda.

Essa onda de tensão é chamada de onda de 1,2 x 50 μ s. Já a onda de corrente da descarga atmosférica foi normalizada com 8 μ s para o valor de Frente de Onda e 20 μ s para o valor do Tempo de Meia Cauda. Assim, a onda de corrente da descarga atmosférica é conhecida como onda 8 x 20 μ s (MAMEDE FILHO, 2011).

É extremamente necessária a determinação dos valores típicos de tensão, corrente e tempo no dimensionamento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

3.2. Valores da descarga atmosférica

Algumas outras grandezas foram medidas e registradas e estão evidenciadas na tabela 1 (KINDERMAN, 1992):

Tabela 1: Características físicas de uma descarga atmosférica

Grandezas	Valores
Corrente	2.000 a 200.000 Ampères
Tensão	100 a 1.000 kV
Duração	70 a 200 μ s
Carga elétrica na nuvem	20 a 50 C
Potência Liberada	1 a 8 bilhões de kW
Energia	4 a 10 kWh
Tempo de crista	1,2 μ s
Tempo de meia cauda	50 μ s

Fonte: Adaptado de KINDERMANN (1992)

Segundo medições e estudos realizados por pesquisadores internacionais, ao analisar a curva de probabilidade da magnitude da corrente do raio, pode-se afirmar que (KINDERMAN, 1992):

- 70% das descargas atmosféricas excedem 10 kA;
- 50% das descargas atmosféricas excedem 20 kA;
- 20% das descargas atmosféricas excedem 40 kA;
- 5% das descargas atmosféricas excedem 80 kA.

4. ORIENTAÇÕES PARA A PROTEÇÃO DAS PESSOAS

A população pode tomar medidas de proteção inadequadas frente a fortes tempestades com ocorrência de descargas elétricas devido ao despreparo e medo. Buscar refúgio em um abrigo com um sistema de proteção contra descargas atmosférica é mais indicado a se proceder.

Caso não seja possível, o ideal é seguir as recomendações listadas a seguir, pois estas podem ser essenciais para a manutenção da segurança e da vida do indivíduo (MAMEDE FILHO, 2011):

- Retire-se da água e evite a posição de nado;
- Na praia, evite caminhar ou deitar na areia e procure abrigo;
- Em um pequeno barco ou jangada, recolha as varas de pesca e deite no assoalho da embarcação. Procure local para um desembarque seguro;
- Interrompa partidas esportivas e procure abrigo sob arquibancadas;
- Evite permanecer em picos de morros;
- Operários devem abandonar o topo de construções;
- Evite permanecer sob árvores isoladas. Se não encontrar abrigo, procure um local com maior número de árvores. Não deite no chão, fique agachado e com a cabeça baixa.

5. MAPA ISOCERÁUNICO

É importante conhecer o conceito e a aplicação do Mapa Isoceráunico antes de entendermos a necessidade de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

Por meio dele é realizada a verificação do número de dias com trovões por ano para o território definido em que se está projetando o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Gerando a partir disso, um índice conhecido por índice ceráunico, essencial para avaliar a necessidade de implantação de um SPDA.

A figura 3 ilustra o Mapa Isoceráunico do território brasileiro, obtido da norma NBR – 5419.

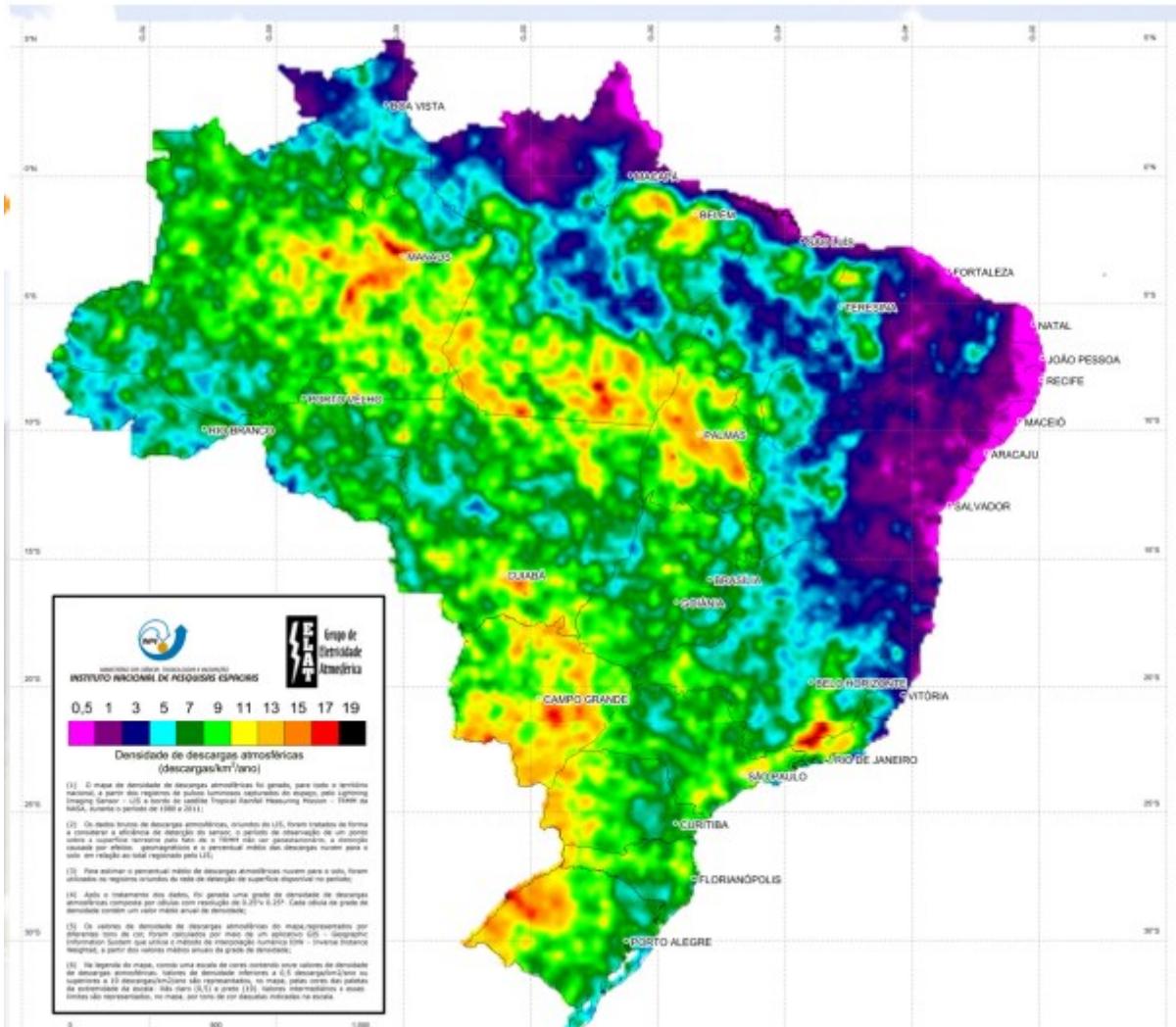


Figura 3: Mapa Isoceráunico do território brasileiro

Após criteriosa avaliação da figura 3, verifica-se que a área com menor incidência de descargas atmosféricas encontra-se na região litorânea do Nordeste. Enquanto o Sergipe é o estado com menor número de raios e o Rio Grande do Sul lidera com a maior concentração de descargas do país. No entanto, o maior número de episódios com vítimas fatais ocorre em Manaus, onde as densidades de descargas atmosféricas são altas.

A consequência mais grave deste fenômeno é a morte humana, porém os raios podem provocar os mais variados danos como, por exemplo, perdas materiais. Certamente os desligamentos na distribuição e transmissão de energia para a população são os danos de maior prejuízo anual, alguns levantamentos calculam um prejuízo aproximado de um bilhão de reais. A seguir, são listadas algumas das principais consequências provocadas por descargas atmosféricas (KINDERMANN, 1992):

- Incêndios em florestas, campos e prédios;
 - Destrução de estruturas e árvores;

- Colapso na rede de energia elétrica;
- Acidentes na aviação e em embarcações marítimas;
- Acidentes em torres de poços de petróleo;
- Acidentes nas plataformas marítimas de petróleo;
- Mortes de seres humanos e animais;

6. Proteção contra descargas atmosféricas

6.1 Prejuízos causados pelas descargas atmosféricas

A descarga elétrica ao atingir uma estrutura pode provocar danos ao seu interior, ocupantes e a própria estrutura. E ainda acarretar falhas aos sistemas internos. A extensão dos danos varia conforme alguns fatores associados à estrutura atingida como tipo de construção, função da estrutura, linhas elétricas e tubulações metálicas.

Para uma descarga atmosférica causar prejuízos, não é preciso que a estrutura seja atingida diretamente. De acordo com a NBR 5419 existem algumas situações diferentes em que a descarga atmosférica ocorre e provoca danos:

- S1: descargas atmosféricas diretamente sobre a própria estrutura;
- S2: descargas atmosféricas próximas à estrutura;
- S3: descargas atmosféricas diretamente sobre linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura;
- S4: descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura.

S1 é a situação que pode causar estragos em maior proporção à estrutura, conteúdo e aos ocupantes, seguida de S3, S2 e S4. No entanto, em se tratando de S2 e S4 são verificadas apenas falhas no funcionamento dos sistemas elétricos, sem oferecer riscos às vidas humanas.

Os danos às estruturas são divididos em três categorias (D1, D2 e D3), e cada uma destas produz no máximo quatro perdas diferentes (L1, L2, L3 e L4).

Danos:

- D1: a seres humanos em função de choques elétricos;
- D2: danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica) devido aos efeitos das correntes das descargas atmosféricas, incluindo centelhamento;
- D3: falhas de sistemas internos em função de pulsos eletromagnéticos;

Perdas:

- L1: perda de vida humana (incluindo ferimentos);
- L2: perda de serviço ao público;
- L3: perda de patrimônio cultural;
- L4: perda de valor econômico.

Na tabela 2 é possível observar a relação entre a fonte de dano, tipo de dano e tipo de perda.

Tabela 2: Perdas e danos para uma estrutura considerando diferentes pontos de impacto de uma descarga atmosférica

Local de impacto	Fonte de dano	Tipo de dano	Tipo de perda
Estrutura	S1	D1	L1, L4 ¹
		D2	L1, L2, L3 e L4
		D3	L1 ² , L2, L4
Próximo à estrutura	S2	D3	L1 ² , L2, L4
Linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas a estrutura	S3	D1	L1, L4 ¹
		D2	L1, L2, L3 e L4
		D3	L1 ² , L2, L4
Próximo a linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas à estrutura	S4	D3	L1 ² , L2, L4
¹ somente propriedades com perda de animais			
² somente para estruturas com risco de explosão, hospitais			

6.2. Necessidade de proteção contra descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais impossíveis de ser impedidos ou escoados. Embora medidas de proteção podem e devem ser tomadas para que se evite ou ao menos se reduza os danos causados à população e às construções. Sendo clara, a necessidade de implantação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

No entanto, não são todas as estruturas que carecem de um SPDA, é preciso analisar algumas variáveis e fazer o estudo de cada caso para se confirmar a necessidade de instalação de SPDA ou não. Quatro possíveis riscos são levados em consideração para a tomada de decisão segundo a NBR 5419, sendo eles:

- R1: risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;
- R2: risco de perdas ao serviço público;
- R3: risco de perdas do patrimônio cultural;
- R4: risco de perdas de valor econômico.

Cada critério de risco tem um valor tolerável, quando o risco apresenta-se acima de seu limite tolerável, conclui-se que é necessário um SPDA na estrutura. O risco R4 só é levado em consideração quando for considerada a vantagem econômica de instalação de SPDA.

6.3. Medidas de proteção

Para reduzir o dano D1 (dano a pessoas devido a choques elétricos), deve-se isolar partes condutoras que estão expostas, colocar avisos e restrições físicas, fazer equipotencialização por meio de um sistema de aterramento em malha ou fazer ligação equipotencial para as descargas atmosféricas.

Quando se trata do dano tipo D2 (danos físicos), a medida a ser tomada é a adoção do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) com três subsistemas (captação, descida e aterramento), isolação elétrica e equipotencialização para descargas atmosféricas.

O dano D3 (falhas dos sistemas eletroeletrônicos) pode ser evitado por meio de medidas de proteção contra surtos, como: aterramento e equipotencialização, blindagem magnética, interfaces isolantes, roteamento da fiação e sistema de dispositivos coordenados de proteção contra surtos.

6.4. Critérios para a proteção das estruturas

Quando se usa um SPDA, a primeira característica a se considerar é selecionada entre os quatro níveis ou classes disponíveis de proteção contra descargas atmosféricas - as classes I, II, III e IV, sendo a classe I a mais forte e a classe IV a mais fraca. Medidas de proteção contra descargas atmosféricas como o SPDA geram zonas de proteção contra essas descargas, conhecidas por zonas de proteção contra raios. Essas zonas são definidas, segundo a NBR 5419-1/2015, por:

ZPR 0_A: zona onde a ameaça ocorre em função da queda direta e ao campo eletromagnético da descarga atmosférica. Os sistemas internos podem estar sujeitos a corrente total ou parcial gerada pela descarga atmosférica.

ZPR 0_B: zona protegida contra queda direta, mas onde o campo eletromagnético total da descarga atmosférica é uma ameaça. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente parcial da descarga atmosférica.

ZPR1: zona onde a corrente de surto é limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e/ou DPS na fronteira. Uma blindagem espacial pode atenuar ainda mais o campo eletromagnético da descarga atmosférica.

ZPR2: zona onde a corrente de surto pode ser ainda mais limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e/ou DPS adicionais na fronteira. Uma blindagem espacial adicional pode ser usada para atenuar ainda mais o campo eletromagnético da descarga atmosférica.

A figura 4 ilustra as zonas de proteção definido por um SPDA.

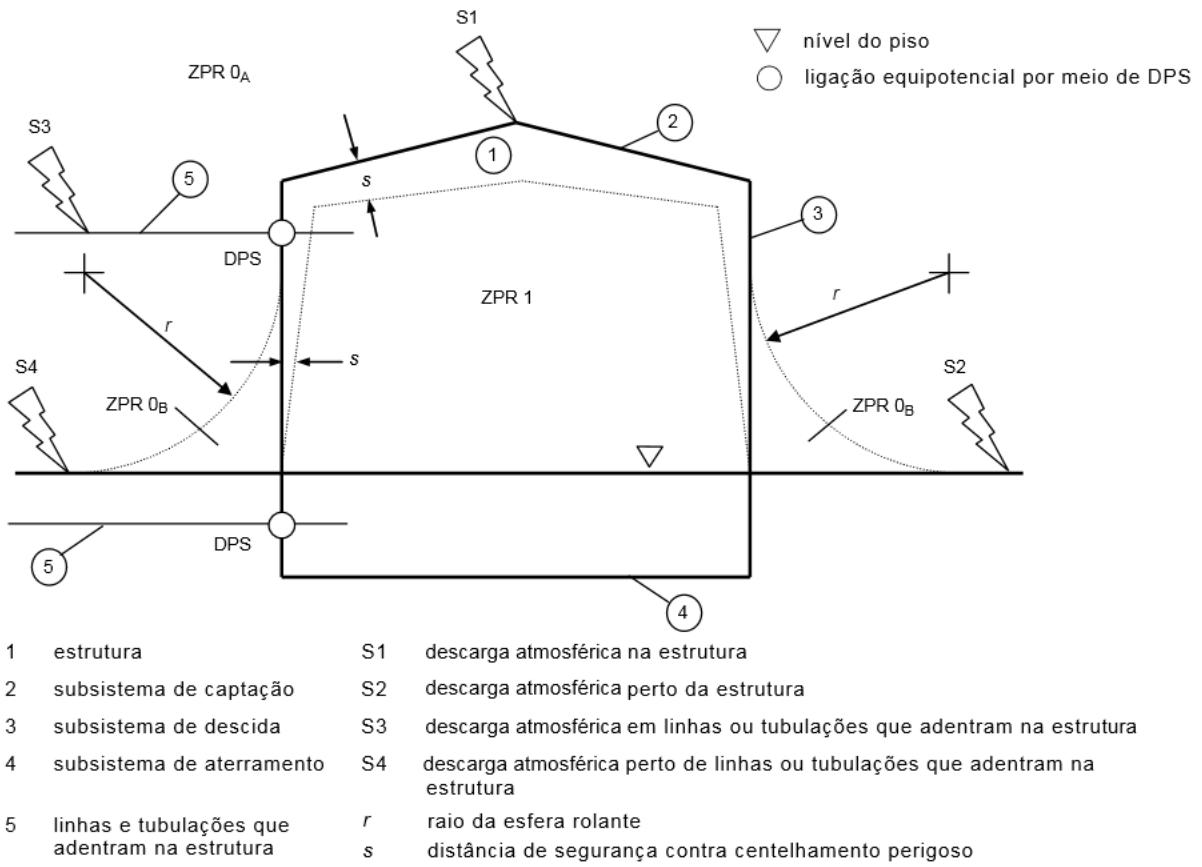


Figura 4: ZPR definido por um SPDA

Na figura 4 é possível observar que a ZPR 1 não está ligada diretamente ao sistema de captação. Isso ocorre porque há uma distância de segurança “s”, que será estudada mais adiante e que diminui a área de atuação da zona de proteção 1.

Ao ser instalado, o SPDA irá apresentar dois sistemas de proteção contra possíveis descargas atmosféricas, o sistema externo e o interno. O primeiro sistema consta do subsistema de captação - responsável por interceptar a descarga atmosférica -, do subsistema de descida – que faz com que a corrente proveniente da descarga atmosférica escoe para a terra de maneira segura – e do sistema de aterramento, responsável por dispersar a corrente na terra. Enquanto isso, o sistema interno através da distância de segurança e da ligação equipotencial evita que haja centelhamento na estrutura.

7. Gerenciamento do risco de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura

7.1. Riscos e suas componentes

Como mencionado na seção 6.2, de acordo com a NBR 5419 são quatro os riscos que devem ser analisados (R1, R2, R3 e R4). Para ser desconsiderada a instalação de um SPDA

relativamente a cada tipo de perda, o risco será expresso por um valor associado a uma provável perda anual média e que deverá ser menor do que seu valor tolerável. O valor tolerável para cada tipo de perda é dado na tabela 3.

Tabela 3: Valores típicos para risco tolerável em relação ao tipo de perda

Tipo de Perda	Risco Tolerável
L1 – Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
L2 – Perda de serviço ao público	10^{-3}
L3 – Perda de patrimônio cultural	10^{-4}

* O risco tolerável para o tipo de perda L4 é fixado em 10^{-3} caso os dados para comparação custo/benefício não sejam fornecidos.

Cada um dos quatro riscos será calculado através do somatório de seus componentes. Antes de explicar cada um dos componentes presentes, seguem as equações correspondentes aos riscos R1, R2, R3 e R4.

$$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}^1 + R_{M1}^1 + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1}^1 + R_{Z1}^1$$

$$R2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2}$$

$$R3 = R_{B3} + R_{V3}$$

$$R4 = R_{A4}^2 + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4}^2 + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4}$$

Todos os componentes com o superescrito ¹ devem ser incluídos caso a estrutura analisada corra risco de explodir, seja um hospital ou uma estrutura onde falhas dos sistemas internos possam pôr em perigo a vida humana. Os componentes com o superescrito ² apenas devem fazer parte do somatório de R4 se a estrutura puder ser exposta a perda de animais. Como pode ser visto através das equações, são oito os possíveis componentes de risco. Os mesmos serão divididos nas quatro fontes de danos (S1, S2, S3 e S4) e explicados a seguir, em conformidade com a norma NBR 5419-2/2015.

- Componentes de risco de descargas atmosféricas atingirem a estrutura diretamente:
 - RA: essa componente de risco está ligada ao tipo de perda L1 e, em casos de perda de vida animal, à perda L4. É referente a ferimentos nos seres vivos causados por choque elétrico provocado pela tensão de toque (diferença de potencial em que uma pessoa se encontra ao tocar em uma estrutura metálica no instante em que esteja passando uma corrente elétrica intensa, como um curto-círcuito ou descarga atmosférica) e tensão de passo (quando uma corrente elétrica é descarregada para o solo e ocorre uma elevação do potencial em torno do eletrodo de aterramento) dentro da estrutura e fora dela no entorno até 3 metros ao redor dos condutores de descida;

- RB: se refere a danos físicos causados por centelhamentos perigosos que possam vir a gerar incêndios ou explosões, colocando o meio ambiente em risco. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) estão ligados a essa componente;

- RC: referente a falhas nos sistemas internos provocadas por impulsos eletromagnéticos gerados pelas descargas atmosféricas. Está sempre relacionado às perdas L2 e L4, e a L1 apenas quando há risco de explosão.

- Componentes de risco de descargas atmosféricas atingirem região próxima à estrutura:
- RM: igual a componente RC.

- Componentes de risco de descargas atmosféricas atingirem linhas conectadas à estrutura:

- RU: componente de risco está ligada ao tipo de perda L1 e, em casos de perda de vida animal, à perda L4. É referente a ferimentos nos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura;

- RV: componente de risco se refere a danos físicos devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ao longo das linhas. Está relacionada aos tipos de perda (L1, L2, L3 e L4);

- RW: componente de risco se refere a falhas nos sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura. Está relacionada às perdas L2 e L4 em todos os casos e, apenas no caso de explosão, relacionada a L1.

- Componentes de risco de descargas atmosféricas atingirem região próxima às linhas conectadas à estrutura:
- R_Z : igual ao componente R_W .

7.2. Gerenciamento de Risco

Uma das principais informações da NBR 5419 é o gerenciamento de risco que não se encontrava incluído na versão 2005 da norma. O fluxograma da figura 5 é de extrema importância uma vez que, através do mesmo, fica visualizado todo o procedimento a ser seguido para determinar se há ou não a necessidade de instalação do SPDA e, em caso afirmativo, determinar quais são as medidas de proteção que devem ser tomadas.

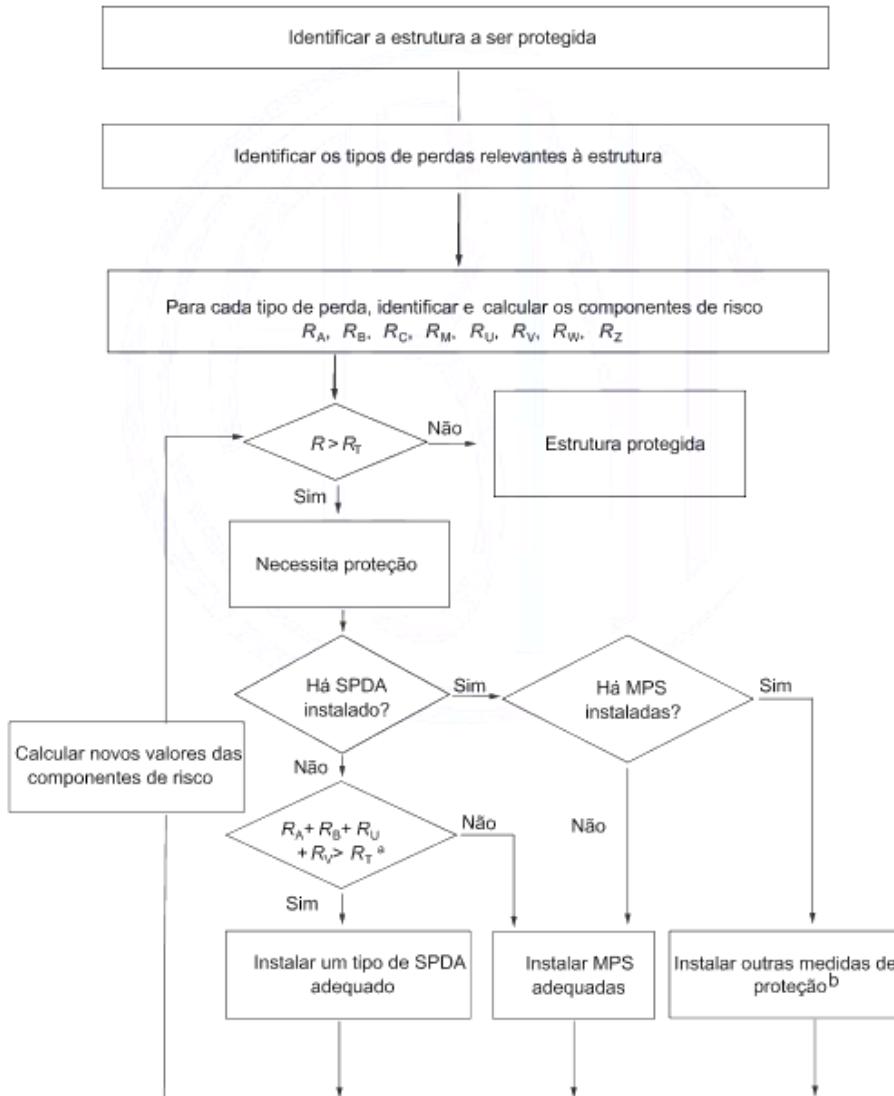


Figura 5: Procedimento para analisar a necessidade da proteção e selecionar medidas de proteção contra surto.

Se $R_A + R_B < R_T$ um SPDA completo não se faz necessário; neste caso DPS são suficientes, de acordo com a norma ABNT 5419-4.

O passo “instalar outras medidas de proteção” do gerenciamento de risco da figura 5 é referente aos fatores que influenciam as componentes de risco, como exemplo, sensores de fogo, blindagem de linhas internas e dispositivos de proteção contra surtos coordenados.

7.3. Análise dos componentes de risco

7.3.1. Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na Estrutura (S1)

- Correspondente ao dano D1 (ferimentos a seres vivos por choque elétrico):

$$RA = ND \times PA \times LA$$

Sendo ND o número médio anual de eventos perigosos, PA a probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico e La a perda relacionada aos ferimentos aos ferimentos a seres vivos por choque elétrico.

- Correspondente ao dano D2 (danos físicos):

$$RB = ND \times PB \times LB$$

Sendo PB a probabilidade de danos físicos à estrutura e LB a perda em uma estrutura relacionada a danos físicos.

- Correspondente ao dano D3 (falhas de sistemas internos):

$$RC = ND \times PC \times LC$$

Sendo PC a probabilidade de falha em sistemas internos e LC a perda relacionada à falha dos sistemas internos.

7.3.2. Análise dos componentes de risco devido a descargas atmosféricas nas proximidades da estrutura (S2)

- Correspondente ao dano D3 (falhas de sistemas internos):

$$RM = NM \times PM \times LM$$

7.3.3. Análise dos componentes de risco devido a descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura (S3)

- Correspondente ao dano D1 (ferimentos em seres vivos por choque elétrico):

$$RU = (NL + NDJ) \times PU \times LU$$

- Correspondente ao dano D2 (danos físicos):

$$RV = (NL + NDJ) \times PV \times LV$$

- Correspondente ao dano D3 (falhas em sistemas internos):

$$RW = (NL + NDJ) \times PW \times LW$$

7.3.4. Análise dos componentes de risco devido a descargas atmosféricas nas proximidades de uma linha conectada à estrutura (S4)

- Correspondente ao dano D3 (falhas nos sistemas internos):

$$RZ = NI \times PZ \times LZ$$

7.3.5. Dividindo a estrutura

De acordo com a NBR 5419, uma estrutura ao invés de assumir uma única zona, também pode ser dividida em “n” zonas, definidas, por exemplo, de acordo com o tipo de piso, blindagem espacial ou compartimentos a prova de fogo. Quando se tem duas zonas, por exemplo, dois valores devem ser definidos para cada um dos componentes de risco.

No caso dos parâmetros RA, RB, RU, RV, RW e RZ, quando se tem mais de uma zona e mais de um valor, o maior dentre os obtidos é que deve ser escolhido. Já para os componentes RC e RM, uma nova probabilidade deve ser calculada a fim de se obter o valor final do componente de risco. O novo cálculo das probabilidades para falhas em sistemas internos por descargas na estrutura (PC) e probabilidade de falha em sistemas internos por descargas perto da linha conectada (PM) é dado a seguir.

$$PC = 1 - (1 - PC1) \times (1 - PC2) \times \dots \times (1 - PCN)$$

$$PM = 1 - (1 - PM1) \times (1 - PM2) \times \dots \times (1 - PMN)$$

7.4. Análise do número anual (N) de eventos perigosos

7.4.1. Princípios Básicos

O número médio anual N de eventos perigosos é diretamente influenciado pelas características físicas da estrutura e pela atividade atmosférica que se tem na área onde se encontra essa estrutura. Para se obter o valor de N, é necessária a multiplicação de alguns fatores tais como NG (densidade de descargas atmosféricas para a terra) e a área equivalente da estrutura, considerando sempre fatores de correção para as características físicas da estrutura (NBR 5419).

O parâmetro NG é estimado através do mapa isocerâunico disponibilizado no site do INPE, onde basta indicar qual a região procurada para que retorne um valor para NG. Este mapa pode ser visto na Figura 03.

7.4.2. Análise do número médio anual de eventos perigosos ND devido a descargas atmosféricas na estrutura e NDJ em estrutura adjacente

7.4.2.1. Determinação da área de exposição equivalente (AD)

A área de exposição equivalente vai ser calculada através de fórmulas que levam em consideração apenas as dimensões da estrutura. Considerando que a estrutura a ser analisada tem forma retangular, e conhecendo-se seu comprimento (L), largura (W) e altura (H), todos em metros, é possível calcular o valor de AD a partir da fórmula a seguir.

$$AD = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2$$

Caso a estrutura analisada não seja retangular como dito anteriormente, é necessário que dois conjuntos de cálculos sejam feitos. O primeiro resolvendo a expressão anterior utilizando HMÍN (altura mínima da estrutura) e, em seguida, resolvendo a expressão abaixo utilizando HP (altura de saliência). Depois de obtidos os dois valores, escolhe-se o maior deles para representar a área de exposição equivalente.

$$AD' = \pi \times (3 \times HP)^2$$

7.4.2.2. Localização relativa da estrutura

O fator de localização (CD) é determinado a partir da localização da estrutura em função das demais estruturas no seu entorno, e retorna os valores mostrados na tabela 4, de acordo com a norma NBR 5419.

Tabela 4: Fator de localização da estrutura

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

Com a área de exposição equivalente calculada e o fator de localização determinado, calcula-se o número de eventos perigosos (ND) para a estrutura por:

$$ND = NG \times AD \times CD \times 10^{-6}$$

7.4.2.3. Número de eventos perigosos NDJ para uma estrutura adjacente:

7.4.2.3.1. Tipo de linha

O fator tipo de linha (CT) deve ser determinado a partir da tabela 5 de acordo com as especificações da linha em análise.

Tabela 5: Fator tipo de linha

Instalação	CT
Linha de energia ou sinal	1
Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)	0,2

Depois de determinado o fator tipo de linha (CT), determina-se o fator de localização da estrutura adjacente (CD) através da Tabela 4, e a área de exposição equivalente da estrutura adjacente ADJ (mesma fórmula utilizada para AD, porém com os valores de comprimento, largura e altura correspondentes a estrutura adjacente). Com os quatro fatores determinados, pode-se obter o valor do número de eventos perigosos NDJ para uma estrutura adjacente.

$$NDJ = NG \times ADJ \times CDJ \times CT \times 10^{-6}$$

7.4.3. Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NM devido a descargas atmosféricas próximas da estrutura

O valor de NM (número médio anual de eventos perigosos) é dado através do produto de dois fatores, NG e AM. AM é a área de exposição equivalente que se estende a uma linha localizada a uma distância D do perímetro da estrutura.

$$AM = 2 \times D \times (L + W) + \pi \times D^2, \text{ sendo } (L) \text{ comprimento e } (W) \text{ largura}$$

$$NM = NG \times AM \times 10^{-6}$$

7.4.4. Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NL devido a descargas atmosféricas na linha

O valor de NL (número médio anual de eventos perigosos devido à descargas na linha) pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$NL = NG \times AL \times CI \times CE \times CT \times 10^{-6}$$

O fator AL corresponde à área de exposição equivalente da linha e pode ser calculada a partir do comprimento da seção da linha (LL), em metros. Caso o comprimento tenha um valor desconhecido, deve ser assumido um valor igual a 1000 metros.

$$AL = 1000 \times L_L$$

O fator de instalação de linha (CI) terá seu valor obtido a partir da Tabela 6, onde se determina qual tipo de roteamento é feito na linha que teve seu tipo (CT) determinado anteriormente (Tabela 5). A área ambiental onde esta linha se encontra também deve ser avaliada. Neste caso, a área ambiental corresponde ao fator ambiental da linha (CE) obtido na Tabela 7.

Tabela 6: Fator de instalação da linha

Roteamento	C_I
Aéreo	1
Enterrado	0,5
Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento (ABNT NBR 5419-4:2015, 5.2)	0,01

Tabela 7: Fator ambiental da linha

Ambiente	CE
Rural	1
Suburbano	0,5
Urbano	0,1
Urbano com edifícios mais altos que 20 m	0,01

7.4.5. Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NI devido a descargas atmosféricas próximas à linha

NI (número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas próxima à linha) é calculado de modo análogo a NL, de forma que o único parâmetro diferente correspondente à área de exposição equivalente deixa de ser AL (área de exposição equivalentes para descargas atmosféricas em uma linha) e passa a ser AI.

$$NI = NG \times AI \times CI \times CE \times CT \times 10^{-6}$$

A área de exposição equivalente de descargas atmosféricas para a terra perto da linha (AI) é calculada a partir do comprimento da seção da linha (LL) e que tem valor fixado em 1000 metros caso não possa ser medido.

$$A_I = 1000 \times L_L$$

7.5. Avaliação da probabilidade PX de danos

7.5.1. Probabilidade PA de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico

Esta probabilidade se dá em função do nível de proteção do SPDA que será utilizado PB (probabilidade de danos físicos à estrutura) apresentado pela tabela 8 e das medidas de proteção que serão acrescentadas para evitar tensões de passo e toque PTA (probabilidade de reduzir PA dependendo das medidas de proteção contra tensões de toque e passo) mostrado na tabela 9.

$$PA = PTA \times PB$$

Tabela 8: Valores de PB em função das medidas de proteção para reduzir danos físicos

Característica da estrutura	Classe do SPDA	P _B
Estrutura não protegida por SPDA	-	1
Estrutura protegida por SPDA	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Estrutura com subsistema de captação conforme SPDA classe I e com estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como subsistema de descida natural		0,01
Estrutura com cobertura metálica e um subsistema de captação, possivelmente incluindo componentes naturais, com proteção completa de qualquer instalação na cobertura contra descargas atmosféricas diretas e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como subsistema de descida natural		0,001

Tabela 9: Valores de PTA em função das medidas de proteção adicional

Medida de proteção adicional	P_{TA}
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	0,10
Isolação elétrica (por exemplo, de pelo menos 3 mm de polietileno reticulado das partes expostas - por exemplo, condutores de descida)	0,01
Equipotencialização efetiva do solo	0,01
Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida	0

7.5.2. Probabilidade PC de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falhas a sistemas internos

Esta probabilidade está diretamente ligada à presença de sistemas coordenados de DPS (dispositivos de proteção contra surtos) e PSPD (probabilidade de reduzir PC, PM, PW e PZ quando um sistema coordenado de DPS está instalado) e às condições sob as quais a linha na qual o sistema interno está conectado está sujeita (isolamento, aterramento e blindagem) (CLD). Na tabela 10 e 11 a seguir, estão representados os valores de PSPD em função no nível de proteção e os valores de CLD e CLI em função das condições de blindagem, tipo de isolamento e aterramento na linha e próximo a linha.

$$PC = PSPD \times CLD$$

Tabela 10: Valores de PSPD em função do NP do DPS utilizado

Nível de proteção (NP)	P_{SPD}
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
III – IV	0,05
II	0,02
I	0,01
NOTA 2	0,005 – 0,001

*NOTA 2: Os valores de PSPD podem ser reduzidos para os DPS que tenham características melhores de proteção (maior corrente nominal /N, menor nível de proteção Up etc.) comparados com os requisitos definidos para NP I nos locais relevantes da instalação.

Tabela 11: Valores de CLD e CLI em função das condições de blindagem, isolamento e aterramento

Tipo de linha externa	Conexão de entrada	C _{LD}	C _{LI}
Linha aérea não blindada	Indefinida	1	1
Linha enterrada não blindada	Indefinida	1	1
Linha de energia com neutro multiaterrado	Nenhuma	1	0,2
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,3
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,1
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Cabo protegido contra descargas atmosféricas ou cabeamento em dutos para cabos protegido contra descargas atmosféricas, eletrodutos metálicos ou tubos metálicos	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	0	0
(Nenhuma linha externa)	Sem conexão com linhas externas (sistemas independentes)	0	0
Qualquer tipo	Interfaces isolantes de acordo com ABNT NBR 5419-4	0	0

7.5.3. Probabilidade PM de uma descarga atmosférica perto de uma estrutura causar falha em sistemas internos

A probabilidade PM (probabilidade de falhas de sistemas internos através de descargas perto da linha conectada) está diretamente ligada às MPS (mecanismos de proteção contra surtos) através da fórmula abaixo.

$$PM = PSPD \times PMS$$

O fator PSPD já foi definido anteriormente, e tem seus valores apresentados na Tabela 10. O fator PMS é obtido a partir de um produto de quatro fatores, sendo o produto entre eles elevado ao quadrado.

$$PMS = (KS1 \times KS2 \times KS3 \times KS4)^2$$

Estes quatro parâmetros são apresentados, segundo a norma ABNT NBR 5419:2015/2, como sendo:

- KS1: leva em consideração a eficiência da blindagem por malha da estrutura, SPDA ou outra blindagem na interface ZPR 0/1;
- KS2: leva em consideração a eficiência da blindagem por malha de blindagem interna a estrutura na interface ZPR X/Y ($X>0$, $Y>1$);
- KS3: leva em consideração as características da fiação interna (Tabela 12);
- KS4: leva em consideração a tensão suportável de impulso do sistema a ser protegido (UW).

Dentro de uma ZPR os dois primeiros fatores podem ser calculados a partir das larguras de blindagem em forma de grade, ou dos condutores de descida do correspondente SPDA tipo malha, ou a distância entre as colunas metálicas da estrutura, ou a distância entre as estruturas de concreto armado atuando como um SPDA natural (wm1 e wm2), lembrando que o valor dos fatores não ser superiores a um.

$$K_{S1} = 0,12 \times w_{m1}$$

$$K_{S2} = 0,12 \times w_{m2}$$

Os valores para KS3 são dados a partir da tabela 12.

Tabela 12: Valores de KS3 em função da fiação interna

Tipo de fiação interna	K_{S3}
Cabo não blindado - sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços ¹	1
Cabo não blindado - preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes laços ²	0,2
Cabo não blindado - preocupação no roteamento no sentido de evitar laços ³	0,01
Cabos blindados e cabos instalados em eletrodutos metálicos ⁴	0,0001

¹condutores em laços com diferentes roteamentos em grandes edifícios (área do laço da ordem de $50m^2$)

²condutores em laços roteados em um mesmo eletroduto ou condutores em laço com diferentes roteamentos em edifícios pequenos (área do laço da ordem de $10 m^2$)

³condutores em laço roteados em um mesmo cabo (área do laço da ordem de $0,5m^2$)

⁴ blindados e eletrodutos metálicos interligados a um barramento de equipotencialização em ambas extremidades e equipamentos estão conectados no mesmo barramento equipotencialização

Assim como os três fatores anteriores, KS4 também tem seu valor limitado a 1, e pode ser determinado através da fórmula a seguir, onde UW é a tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido.

$$K_{S4} = \frac{1}{U_W}$$

7.5.4. Probabilidade PU de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico

O valor de PU (probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico através de descargas perto da linha) é dado por:

$$P_U = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD}$$

Dentre os quatro fatores que são necessários para a realização do cálculo dessa probabilidade, apenas CLD é de prévio conhecimento (Tabela 11). Os demais fatores PTU (probabilidade de reduzir PU dependendo das medidas de proteção), PEB (probabilidade de reduzir PU e PV dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento quando a ligação equipotencial é instalada) e PLD (probabilidade de reduzir PU, PV e PW dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento) são relacionados nas tabelas de 13 a 15.

Tabela 13: Valores de PTU em função das medidas de proteção

Medidas de proteção	P _{TU}
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos visíveis de alerta	0,1
Isolação elétrica	0,01
Restrições físicas	0

Tabela 14: Valores de PEB em função do NP do DPS utilizado

Nível de proteção	P _{EB}
Sem DPS	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
NOTA 4	0,005 – 0,001

*NOTA 4: Os valores de PEB podem ser reduzidos para DPS que tenham melhores características de proteção (correntes nominais maiores /N, níveis de proteção menores Up etc.) comparados com os requisitos definidos para NP I nos locais relevantes da instalação.

Tabela 15: Valores de PLD em função da resistência da blindagem e da tensão suportável de impulso

Tipo da linha	Condições de roteamento, blindagem e interligação	Tensão suportável U_W em kV				
		1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia ou sinal	Linha aérea ou enterrada, não blindada ou com a blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento	1	1	1	1	1
	Blindada aérea ou enterrada cuja blindagem está interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento	$5\Omega/\text{km} < R_S \leq 20\Omega/\text{km}$	1	1	0,95	0,9
		$1\Omega/\text{km} < R_S \leq 5\Omega/\text{km}$	0,9	0,8	0,6	0,3
		$R_S \leq 1\Omega/\text{km}$	0,6	0,4	0,2	0,04
						0,02

7.5.5. Probabilidade PV de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos

Todos os fatores que serão utilizados nesta equação já foram previamente tabelados e apresentados (Tabela 11, Tabela 14, Tabela 15).

$$PV = PEB \times PLD \times CLD$$

7.5.6. Probabilidade PW de uma descarga atmosférica em uma linha causar falha de sistemas internos

A fórmula de PW (probabilidade de falhas de sistemas internos por descargas atmosféricas na linha conectada) é dada a seguir:

$$PW = PSPD \times PLD \times CLD$$

Ao analisar a equação acima é possível afirmar que nenhum dos três fatores é desconhecido. Assim, ao consultar as Tabelas 10, 11 e 15 extraem os três valores necessários para obtenção do resultado.

7.5.7. Probabilidade PZ de uma descarga atmosférica perto de uma linha que entra na estrutura causar falha dos sistemas internos

A fórmula de PZ (probabilidade de falhas de sistemas internos por descargas atmosféricas perto da linha conectada) é dada:

$$PZ = PSPD \times PLI \times CLI$$

A tabela 16 mostra a probabilidade de reduzir PZ dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (PLI).

Tabela 16: Valores de PLI em função do tipo de linha e da tensão suportável de impulso

Tipo da linha	Tensão suportável UW em kV				
	1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Linhas de sinais	1	0,5	0,2	0,08	0,04

7.6. Análise de quantidade de perda LX

7.6.1. Quantidade relativa média de perda por evento perigoso

De acordo com a NBR 5419 a perda é referente a cada tipo de dano (D1, D2, D3) que pode ser causado por uma descarga atmosférica. Têm-se quatro diferentes tipos de perda, listadas a seguir.

- L1: perda de vida humana, incluindo ferimentos permanentes (número de vítimas);
- L2: perda de serviço público (número de pessoas que deixam de ser atendidas);
- L3: perda de patrimônio cultural (valor econômico da estrutura e de todo seu conteúdo);
- L4: perda de valores econômicos (valor da estrutura, conteúdo e animais, caso estejam presentes).

7.6.2. L1 – Perda de vida humana

A perda L1 é calculada para cada dano através das equações indicadas na tabela 17. A maioria dos fatores utilizados é tabelada, a não ser nz, nt e tz que correspondem a número de

pessoas na zona, número total de pessoas e tempo (em horas por ano) que as pessoas passam na zona, respectivamente.

Nesta equação, notam-se dois fatores que ainda não foram apresentados, PLI e CLI. O segundo, assim como CLD (Tabela 11) está relacionado ao isolamento, blindagem e aterramento aos qual a linha está sujeita. Enquanto isso, PLI relaciona o tipo de linha com a tensão suportável de impulso dos equipamentos.

Tabela 17: Perda L1 - Valores de perda típica para cada zona

Tipo de dano	Perda típica
D1	$LA = LU = rt \times LT \times nz/nt \times tz/8760$
D2	$LB = LV = rp \times rfx \times hz \times LF \times nz/nt \times tz/8760$
D3	$LC = LM = LW = LZ = LO \times nz/nt \times tz/8760$

Os valores médios típicos dos fatores LT, LF e LO, bem como os fatores: de redução da perda vida humana em função do tipo de piso ou solo (rt), de redução da perda devido a danos físicos de acordo com providências que podem ser tomadas para diminuir as consequências de um possível incêndio (rp), de redução da perda devido a danos físicos de acordo com o risco de explosão ou incêndio e de aumento da perda devido a danos físicos quando houver perigo especial, são apresentados nas tabelas 18 a 22 a seguir.

Tabela 18: Perda L1 - Valores médios típicos de LT, LF e LO

Tipos de danos	Valor de perda típico	Tipo de estrutura	
D1 ferimentos	L_T	0,01	Todos os tipos
D2 danos físicos	L_F	0,1	Risco de explosão
		0,1	Hospital, hotel, escola, edifício cívico
		0,05	Entretenimento público, igreja, museu
		0,02	Industrial, comercial
		0,01	Outros
		0,1	Risco de explosão
D3 falhas de sistemas internos	L_O	0,01	Unidade de terapia intensiva e bloco cirúrgico de hospital
		0,001	Outras partes de hospital

Tabela 19: Fator de redução rt em função do tipo de solo ou piso

Tipo de Superfície ²	Resistência de contato kΩ ¹	r_t
Agricultura, concreto	≤ 1	0,01
Mármore, cerâmica	1 a 10	0,001
Cascalho, tapete, carpete	10 a 100	0,0001
Asfalto, linóleo, madeira	≥ 100	0,00001

¹ valores medidos entre um eletrodo de 400 cm ² comprimido com uma força uniforme de 500 N e um ponto considerado no infinito
² uma camada de material isolante, por exemplo, asfalto, de 5 cm de espessura (ou uma camada de cascalho de 15 cm de espessura) geralmente reduz o perigo a um nível tolerável

Tabela 20: Fator de redução r_p em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio

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

Tabela 21: Fator de redução r_f em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura

Risco	Quantidade de risco	r_f
Explosão	Zonas 0, 20 e explosivos sólidos	1
	Zonas 1, 21	0,1
	Zonas 2, 22	0,001
Incêndio	Alto	0,1
	Normal	0,01
	Baixo	0,001
Explosão ou Incêndio	Nenhum	0

Tabela 22: Fator h_z aumentando a quantidade relativa de perda na presença de um perigo especial

Tipo de perigo especial	h_z
Sem perigo especial	1
Baixo nível de pânico (por exemplo, uma estrutura limitada a dois andares e número de pessoas não superior a 100)	2
Nível médio de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes entre 100 e 1000 pessoas)	5
Dificuldade de evacuação (por exemplo, estrutura com pessoas imobilizadas, hospitalares)	5
Alto nível de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes maior que 1000 pessoas)	10

7.6.3. L2 – Perda inaceitável de serviço ao público

Por considerar apenas a perda de serviço ao público, o dano D1 que corresponde a ferimentos aos seres humanos devido a choques elétricos não entra, mantendo apenas D2 (danos físicos em função dos efeitos das correntes de descargas atmosféricas) e D3 (falha em sistemas internos).

Como pode ser observado na tabela 23, os únicos valores que são alterados quando comparados a perda L1 são os valores médios típicos de LF (perda em uma estrutura devido a danos físicos) e LO (perda em uma estrutura devido a falha de sistemas internos), que agora assumem os valores mostrados na tabela 24.

Tabela 23: Perda L2 - Valores de perda para cada zona

Tipo de dano	Perda típica
D2	$LB = LV = rp \times rf \times LF \times nz/nt$
D3	$LC = LM = LW = LZ = LO \times nz/nt$

Tabela 24: Perda L2: Valores médios típicos de LF e LO

Tipo de dano	Valor da perda típica	Tipo de serviço
D2 danos físicos	LF	0,1
		0,01
D3 falhas de sistemas internos	LO	0,01
		0,001

7.6.4. L3 – Perda inaceitável de patrimônio cultural

Nesta perda, o único dano presente é o dano D2 que corresponde aos danos físicos (tabela 25). Dois novos fatores presentes na equação são cz e ct, valor do patrimônio cultural da zona e valor total da edificação e conteúdo da estrutura, respectivamente. E, novamente, LF possui um novo valor, apresentado na tabela 26.

Tabela 25: Perda L3 - Valores de perda para cada zona

Tipo de dano	Valor típico da perda
D2 danos físicos	$LB=LV= rp \times rf \times LF \times cz/ct$

Tabela 26: Perda L3 - Valor médio típico de LF

Tipo de dano	Valor típico da perda	Tipo de estrutura ou zona
D2 danos físicos	L_F	0,1 Museus, galerias

7.6.5. L4 – Perda econômica

Na última perda existente são considerados todos os tipos de danos (D1, D2 e D3), os quais possuem diferentes perdas típicas conforme mostrada na tabela 27.

Tabela 27: Perda L4 - Valores de perda para cada zona

Tipos de danos	Perda típica
D1	$LA = rt \times LT \times ca/ct$
D1	$LU = rt \times LT \times ca / ct$
D2	$LB = LV = rp \times rf \times LF \times (ca + cb + cc + cs) / ct$
D3	$LC = LM = LW = LZ = LO \times cs / ct$

Como pode ser visto na tabela 27 alguns parâmetros ainda não foram definidos. Para um melhor entendimento das fórmulas os fatores ca , cb , cc , cs e ct serão explicados a seguir, de acordo com a ABNT NBR 5419-2:2015

- c_a : valor correspondente aos animais que se encontram na zona;
- c_b : valor da parte relevante da zona;
- cc : valor do conteúdo da zona;
- c_s : valor dos sistemas internos incluindo suas atividades na zona;
- ct : valor total da estrutura (animais, conteúdo, edificação e sistemas internos incluindo suas atividades).

Os valores médios típicos LT (perda devido a ferimentos por choque elétrico), LF e LO têm seus valores estabelecidos de acordo com o tipo de estrutura, bem como mostra a tabela 28.

Tabela 28: Perda L4 - Valores médios típicos de LT, LF e LO

Tipos de danos	Valor de perda típico	Tipo de estrutura	
D1 ferimento devido à choque	LT	0,01	Todos os tipos somente onde animais são presentes
D2 danos físicos	LF	1	Risco de explosão
		0,5	Hospital, industrial, museu, agricultura
		0,2	Hotel, escola, escritório, igreja, entretenimento público, comercial
		0,1	Outros
D3 falha de sistemas internos	LO	0,1	Risco de explosão
		0,01	Hospital, industrial, escritório, hotel, comercial
		0,001	Museu, agricultura, escola, igreja, entretenimento público
		0,0001	Outros

8. Perigos à vida e danos físicos a estrutura

8.1. Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

As características do SPDA estão diretamente ligadas aos níveis de proteção e aos dados da estrutura na qual o SPDA será instalado. As possíveis classes do SPDA estão relacionadas aos níveis de proteção como mostra a tabela a 29.

Tabela 29: Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe de SPDA

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

Ao escolher a classe de SPDA, alguns parâmetros são modificados, uma vez que os mesmos têm seus valores determinados a partir da classe utilizada. Os parâmetros que dependem da escolha da classe são: parâmetros da descarga atmosférica, raio da esfera no método da esfera rolante, máximo afastamento dos condutores da malha para o método das malhas, ângulo utilizado no método do ângulo de proteção, distância entre os condutores de descida e dos condutores em anel, distância de segurança “s” e o mínimo comprimento dos eletrodos de terra (NBR 5419).

8.1.1. Continuidade da armadura de aço em estruturas de concreto armado

Quando se projeta um SPDA para uma estrutura, deve-se observar antes de qualquer coisa se esta estrutura possui armadura de aço eletricamente contínua dentro de uma estrutura de concreto armado, uma vez que esta pode servir de condutor natural da corrente da descarga atmosférica (NBR5419).

Para verificar se há continuidade elétrica nesta armadura de aço, primeiramente, a mesma deve ter no mínimo 50% das conexões entre as barras verticais e horizontais conectadas de maneira muito firme, além das conexões (unidas com arame recozido, cintas ou grampos, ou serem soldadas) entre as barras verticais apresentarem sobreposição mínima de 20 vezes seu diâmetro. Depois de verificadas as conexões, é necessária a realização de um ensaio de continuidade.

Este ensaio é feito com a utilização de um equipamento que forneça uma corrente elétrica entre 1 A e 10 A e que tenha uma frequência diferente de 60 Hz e seus múltiplos. Com o aparelho em mãos, deve-se medir a resistência ôhmica para diferentes segmentos da estrutura, a fim de se obter valores inferiores a 1Ω . Caso contrário, não há continuidade.

Com o SPDA instalado e com componentes naturais de descida, a verificação final deve ser feita. A medição nesta etapa é feita utilizando-se o mesmo equipamento. A resistência a ser calculada está entre a parte mais alta do subsistema de captação e o de aterrramento (conforme Figura 6) e não pode ultrapassar o valor de $0,2\Omega$.

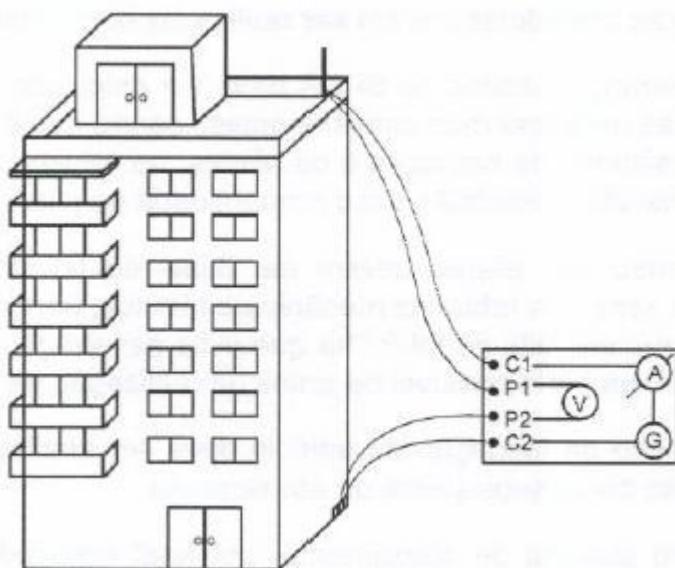


Figura 6: Método de medição de continuidade elétrica

8.2. Sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas

O SPDA externo tem por finalidade dispersar as descargas atmosféricas que atingem diretamente o topo ou a lateral da estrutura para a terra.

Este SPDA pode ser feito de componentes naturais, que são materiais condutores encontrados dentro ou na estrutura de forma definitiva (fazem parte da estrutura da construção), não podendo assim, ser modificados (viga metálicas, armaduras de aço para concreto armado, entre outras).

8.2.1. Subsistema de Captação

O subsistema de captação pode ser composto por hastes, condutores suspensos e/ou condutores em malha. O posicionamento desse subsistema é o responsável pelo volume da estrutura que vai ser protegido e deve estar de acordo com um dos três métodos previstos na norma: método do ângulo de proteção, método da esfera rolante ou método das malhas.

8.2.2. Método do Ângulo de Proteção ou Método de Franklin

Este método é utilizado em estruturas com área horizontal pequena e altura limitada de acordo com a classe do SPDA a ser implementado (NBR5419). O mesmo deve oferecer uma proteção que é efetivada através de um cone com vértice na extremidade superior do captor e cuja geratriz faz um ângulo α° com a vertical, mostrado na figura 7. Caso a área correspondente ao cone seja menor do que a área da edificação a ser protegida, mais de um captor deve ser instalado na edificação a fim de proteger a mesma em sua totalidade.

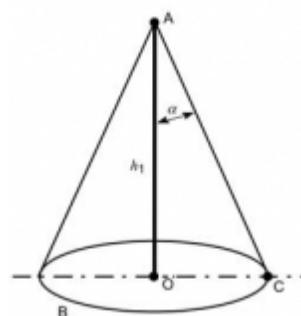


Figura 7: Cone correspondente ao Método do Ângulo de Proteção

Sendo:

A – Topo do Captor;

B – Plano de Referência;

OC – Raio do Cone;

h_1 – Altura de um mastro acima do plano de referência;

α – Ângulo que varia de acordo com a classe do SPDA e altura H em questão.

Através da Figura 7, pode-se mostrar que o valor do raio da base do cone em função da altura h_1 e do ângulo de proteção é dado por:

$$RP(OC) = h_1 \times \operatorname{tg}(\alpha), \text{ sendo } RP \text{ o valor do raio da base do cone.}$$

A partir da Norma NBR 5419-3/2015 pode-se obter os valores dos ângulos α correspondentes a cada classe de SPDA, mostrado pela figura 8, e assim aplicá-los no Método de Franklin.

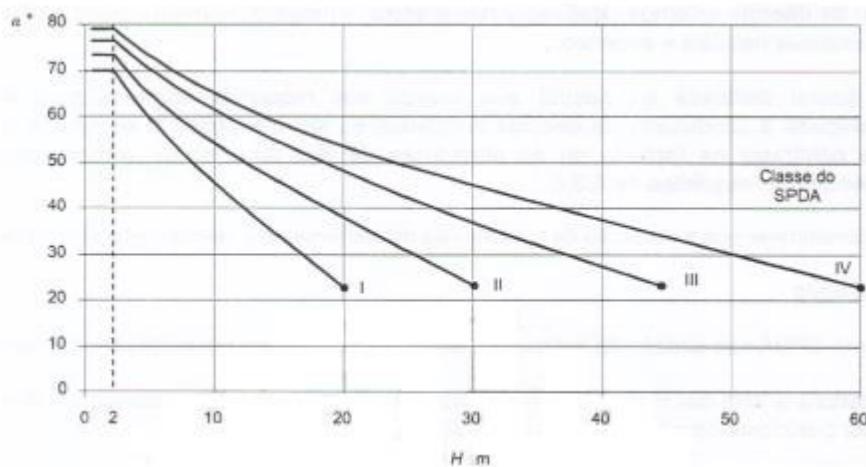


Figura 8: Ângulo de proteção de acordo com a classe do SPDA

No gráfico da figura 8 pode-se ver quatro curvas diferentes, correspondentes a cada uma das classes do SPDA. O eixo horizontal corresponde a altura - em metros - do captor acima do plano de referência da área a ser protegida (H), enquanto o eixo vertical corresponde ao valor do ângulo α , em graus. Sendo assim, pode-se notar que este método só pode ser utilizado em um SPDA classe I, por exemplo, se a altura H for de no máximo 20 metros. Caso contrário, só poderá ser implementado o Método das Malhas ou o Método da Esfera Rolante.

8.2.3. Método da Esfera Rolante ou Método Eletrogeométrico

Este método é mais utilizado em construções com altura mais elevada e/ou formas arquitetônicas complexas. Neste método utiliza-se uma esfera fictícia a qual rola pela estrutura em todas as possíveis direções, ilustrado pela figura 9. Se nenhum ponto da estrutura, com exceção do subsistema de captação, tocar na esfera fictícia, a área está protegida (NBR 5419).

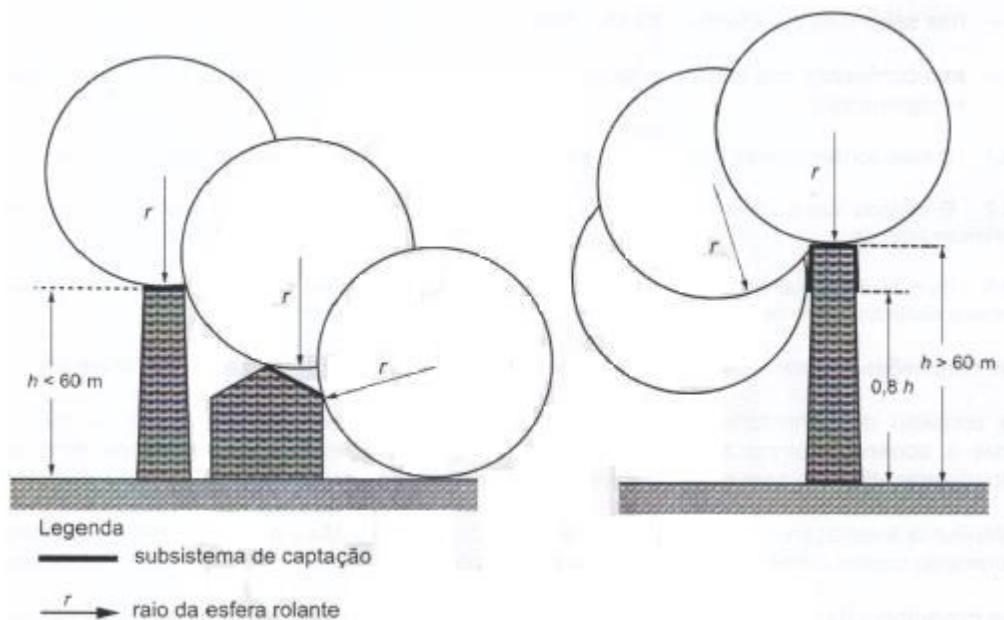


Figura 9: Método da Esfera Rolante

Todavia, esta esfera tem seu raio pré-determinado em função da classe do SPDA, como mostra a tabela 30.

Tabela 30: Valores do raio da esfera rolante em função da classe do SPDA

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

Através da tabela 30, é possível notar que a maior esfera possível, correspondente a Classe IV, tem um raio de 60 metros. Logo, caso a estrutura em questão tenha uma altura superior a 60 metros, a chance de uma descarga atmosférica atingir sua lateral deixa de ser desprezível, e passa a ser considerada a necessidade de instalação de captação na lateral da construção além da parte superior. Outra maneira de solucionar tal problema é adicionando

captores ao topo da construção, os quais vão aumentar a área protegida. A altura de tais captores é dada por:

$$H_c = R_e \times \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left[\frac{\frac{L_e}{2}}{R_e} + \sqrt{\frac{H_{ext}}{R_e}} \times \left(2 - \frac{H_{ext}}{R_e} \right) \right]^2} \right\}$$

Onde Re é o raio da esfera; Le é a largura da construção; Hext é a altura da extremidade da edificação e Hc a altura do captor, todos os valores expressos em metros.

8.2.4 Método das Malhas ou Método da Gaiola de Faraday

Este método é aconselhável para estrutura com uma grande área horizontal, diferentemente do Método de Franklin, além de ser apropriado para proteger superfícies planas laterais contra descargas atmosféricas (NBR 5419). O mesmo consiste em uma malha captora de condutores espaçados entre si de uma distância correspondente ao seu nível de proteção, apresentado pela tabela 31.

Tabela 31: Valores do Método das malhas de acordo com a classe do SPDA

Classe do SPDA	Máximo Afastamento dos Condutores da Malha, em metros
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

De acordo com a Norma NBR5419-3/2015 alguns requisitos devem ser cumpridos:

- Condutores captores devem ser instalados:
- Na periferia da cobertura da estrutura;
- Nas saliências da cobertura da estrutura;
- Nas cumeeiras dos telhados, se o declive deste exceder 1/10;
- As dimensões das malhas não podem ser maiores que os valores dados na tabela acima;
- O conjunto de condutores do subsistema de captação deve ser construído de tal modo que a corrente elétrica da descarga atmosférica sempre encontre pelo menos duas rotas condutoras distintas para o subsistema de aterramento;

- Nenhuma instalação metálica, que por suas características não possa assumir a condição de elemento captor, ultrapasse para fora o volume protegido pela malha do subsistema de captação;
- Os condutores da malha devem seguir o caminho mais curto e retilíneo possível da instalação.

Como pode ser visto, a norma não exige que mini captores sejam instalados. Todavia, recomenda-se instalá-los uma vez que os mesmos podem preservar os cabos de danos térmicos no caso de descargas atmosféricas os atingirem diretamente. Caso os mini captores sejam instalados, eles devem estar presentes nos cruzamentos de cabos, nas quinas e a cada 5 metros de perímetro.

8.2.5 Captores para descargas laterais

A probabilidade de descargas atmosféricas atingirem as estruturas lateralmente apenas é considerada para construções com mais de 60 metros de altura, sendo mais prováveis em locais com pontas ou saliências (marquises, varandas, etc).

A captação lateral pode ser feita com elementos metálicos externos que devem cumprir os valores mínimos apresentados na Tabela 32, ou com condutores externos de descida localizados nas arestas verticais da estrutura quando não houver a presença de condutores externos metálicos e naturais.

Tabela 32: Espessura mínima de chapas metálicas ou tubulações metálicas em sistema de captação

Classe do SPDA	Material	Espessura t (mm) ¹	Espessura t' (mm) ²
I a IV	Chumbo	-	2
	Aço (inoxidável, galvanizado a quente)	4	0,5
	Titânio	4	0,5
	Cobre	5	0,5
	Alumínio	7	0,65
	Zinco	-	0,7

1 t previne perfuração, pontos quentes ou ignição

2 t' somente para chapas metálicas, se não for importante prevenir a perfuração, pontos quentes ou problemas com a ignição

8.2.6. Construção do subsistema de captação

O subsistema de captação deve ser posicionado de acordo com o material com que é feita a cobertura da estrutura. O caso da cobertura feita por material não combustível é a mais simples, já que neste caso o subsistema pode ser instalado diretamente na superfície da cobertura. No caso de coberturas feitas por materiais prontamente combustíveis, o subsistema deve manter certa distância da superfície. Para o caso de coberturas feitas de palha ou sapê, sem a presença de barras de aço sustentando o material, é sugerida uma distância de no mínimo 0,15 metros, enquanto que para os demais materiais combustíveis esse valor cai para 0,10 metros.

Outro ponto importante além da instalação é que nenhuma parte do SPDA externo pode manter contato direto com partes altamente combustíveis da estrutura, e essas não podem nunca estar localizadas abaixo de qualquer componente metálico que possa vir a derreter caso uma descarga atmosférica o atinja.

8.2.7 Componentes naturais

Dentro da estrutura alguns elementos podem ser considerados como componentes naturais, os quais terão a finalidade de ser captores naturais. Todavia, nem todos podem tomar essa posição, mas apenas alguns listados a seguir (NBR 5419).

- Chapas metálicas no topo da estrutura a ser protegida, desde que:
- Haja durabilidade na continuidade elétrica entre as partes;
- A espessura da chapa metálica seja superior aos valores de t' atribuídos na tabela 32;
- A espessura da folha metálica ultrapasse os limites mínimos t dados na tabela 32.
- Componentes metálicos presentes na construção da cobertura;
- Partes metálicas que configuram características da estrutura e, portanto, devem ser permanentes;
- Tubulações metálicas e tanques na cobertura que tenham os valores pré-determinados pela tabela 39;
- Tubulações metálicas e tanques que possuam conteúdos que possam vir a explodir, desde que estes sejam feitos de materiais com espessura superior às tabeladas (tabela 32).

8.2.8. Subsistema de Descida

Este subsistema tem como principal função dispersar a corrente gerada pela descarga atmosférica para o solo, através de diferentes caminhos paralelos, que tenham o menor comprimento possível. Esses caminhos paralelos são espaçados de distâncias fixas, determinadas em função da classe do SPDA utilizado, que são mostrados pela tabela 33.

Tabela 33: Valores das distâncias entre os condutores de descida em função das classes do SPDA

Classe do SPDA	Distância (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20
* é aceitável que o espaçamento dos condutores de descida alcance até 20% além dos valores acima	

8.2.8.1. Divisão da corrente da descarga atmosférica entre os condutores de descida

O coeficiente da divisão da corrente de descarga atmosférica (KC) entre os condutores de descida presentes na estrutura está diretamente ligado ao número total de condutores de descida e suas respectivas posições, número dos condutores em anel de interligação, bem como aos tipos de subsistemas de captação e aterrramento, como é apresentado na tabela 34 e ilustrado pelas figuras 10 e 11.

Tabela 34: Valores do coeficiente kc

Tipos de captores	Número de condutores de descida (n)	Kc
		Arranjo de aterrramento em anel
Haste simples	1	1
Fio	2	0,5 ... 1 ¹
Malha	4 e mais	0,25 ... 0,5 ²
Malha	4 e mais, conectadas por condutores horizontais em anel	1/n ... 0,5 ³

¹ Faixa de valores de $kc = 0,5$ onde $c < h$ a $kc = 1$ com $c > h$

² A equação para kc de acordo com a Figura 12 é uma aproximação para estruturas em forma de cubo e $n \geq 4$. Os valores de h , cs e cd são fixados na faixa de 5m a 20m.

³ Se os condutores de descida são conectados por condutores em anel, a distribuição de corrente é mais homogênea nas partes mais baixas do sistema de descidas e kc é ainda mais reduzido. Isto é especialmente válido para estruturas altas.

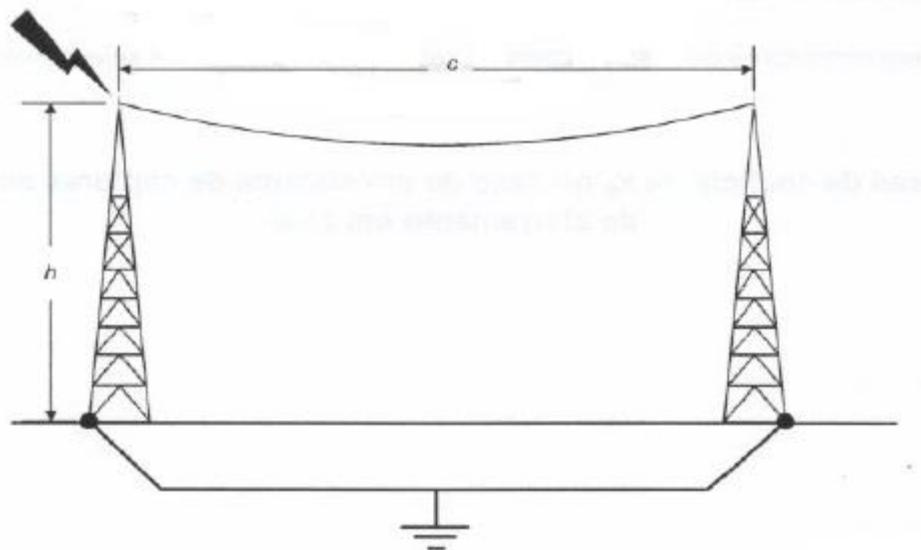


Figura 10: Caso de subsistema de captores a um fio e um subsistema de aterrramento em anel

Sendo a equação para obter o valor de KC neste caso de subsistema de captores a um fio:

$$KC = \frac{h + c}{2h + c}$$

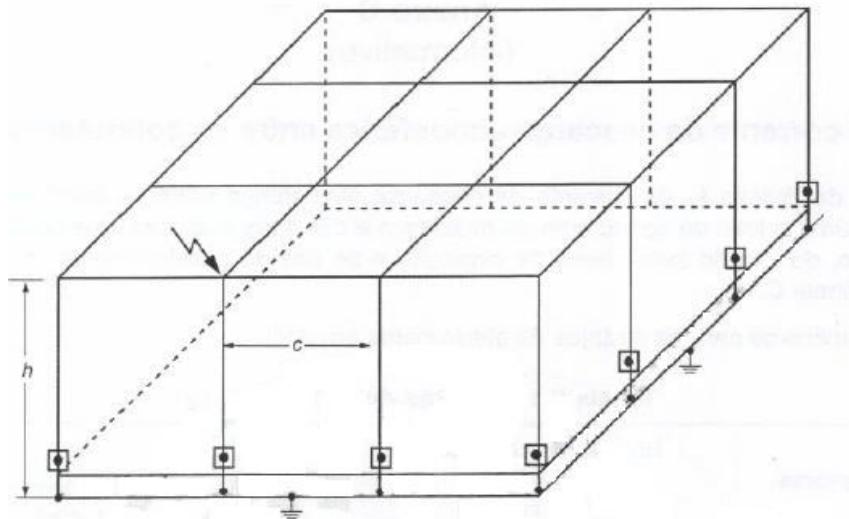


Figura 11: Caso de subsistema de captores em malha e sistema de aterrramento em anel

Sendo a equação para obter KC no caso de subsistema de captores em malha e sistema de aterrramento em anel descrito a seguir:

$$K_c = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2 \times 3\sqrt{\frac{c}{h}}$$

Sendo:

- c – distância de um condutor de descida ao próximo condutor de descida;
- n – número total de condutores de descidas;
- h – espaçamento (ou altura) entre os condutores em anel.

8.2.8.2. Posicionamento

O posicionamento de um SPDA é influenciado pelo fato do mesmo ser ou não isolado. Para um SPDA não isolado, o número de condutores de descida tem que ser igual ou maior do que dois, mesmo que o resultado da divisão perímetro por distâncias de acordo com a classe seja inferior (NBR 5419).

Quando se tem um SPDA isolado, os condutores de descida serão de acordo com o tipo de captor utilizado. Para captores em hastes ou mastros separados não metálicos nem interconectados às armaduras, deve haver no mínimo um condutor de descida em cada mastro. Um condutor de descida em cada suporte da estrutura é necessário no caso de condutores suspensos em catenária e um em cada suporte de terminação dos condutores para captores que formam uma rede de condutores. O único caso em que condutores de descida não são necessários ocorre quando os captores consistem em mastros metálicos e interconectados às armaduras.

8.2.8.3. Construção

Os condutores de descida devem ser colocados de maneira que tenham o caminho mais curto e direto para a terra, sendo posicionados paralelamente e verticalmente, a fim de evitar laços. Porém, em alguns casos isso não é possível, de modo que quando isso ocorre, deve ser calculada a distância de segurança “s”, que é ilustrada pela figura 12.

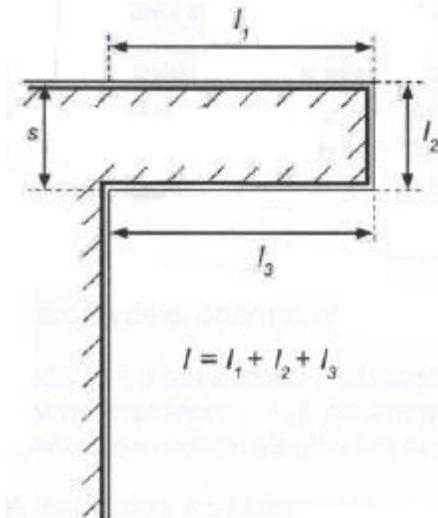


Figura 12: Laço em um condutor de descida

$$s = \frac{k_i}{k_m} \times k_c \times l$$

Os parâmetros k_i , k_m e k_c são dados de acordo com as tabelas 35, 36 e 37, respectivamente. O parâmetro l corresponde ao comprimento (m) ao longo do subsistema de captação ou descida, desde o ponto onde “s” é considerada até a equipotencialização mais próxima.

Tabela 35: Valores do coeficiente k_i

Nível de proteção do SPDA	K_i
I	0,08
II	0,06
III e IV	0,04

Tabela 36: Valores do coeficiente k_m

Material	K_m
Ar	1
Concreto, tijolos	0,5
1 no caso de vários materiais isolantes estarem em série, é uma boa prática usar o menor valor de k_m	
2 a utilização de outros materiais isolantes está sob consideração	

Tabela 37: Valores aproximados do coeficiente k_c

Número de descidas (n)	K_c
1 (somente para SPDA isolado)	1
2	0,66
3 ou mais	0,44

No caso de um SPDA não isolado, os condutores de descida podem ser instalados de acordo com o material com que a parede é feita. Se a parede for feita de material não combustível, os condutores podem ser colocados na superfície ou dentro da parede. Já se a parede for feita de material combustível, os condutores podem ficar na superfície da mesma contanto que, com a passagem da corrente da descarga atmosférica, o aumento da temperatura não gere perigo. No pior caso, que é com parede feita de material prontamente combustível, os condutores de descida devem manter uma distância de no mínimo 0,1 metros da parede.

8.2.8.4. Componentes Naturais

Algumas partes da estrutura podem ser consideradas condutores naturais de descida, tais como: instalações metálicas eletricamente contínuas, armaduras de estruturas de concreto armado eletricamente contínuas, elementos de fachada eletricamente contínuos e com espessuras superiores a t' (tabela 32), vigamento de aço interconectado da estrutura. Com a presença desses, não é necessária a instalação de outros condutores de descida (NBR 5419).

8.2.9. Subsistema de Aterrramento

Quando não é possível aproveitar as armaduras das fundações, na parte externa da estrutura deve-se utilizar um condutor em anel em contato com o solo por no mínimo 80% do seu comprimento total, ou um elemento condutor que interligue as armaduras que estão descontínuas da fundação (sapatas).

Utilizando-se um dos dois métodos mencionados acima, é preciso que o raio médio da área englobada pelos eletrodos seja maior ou igual a l_1 , cujo valor pode ser obtido através da figura 13.

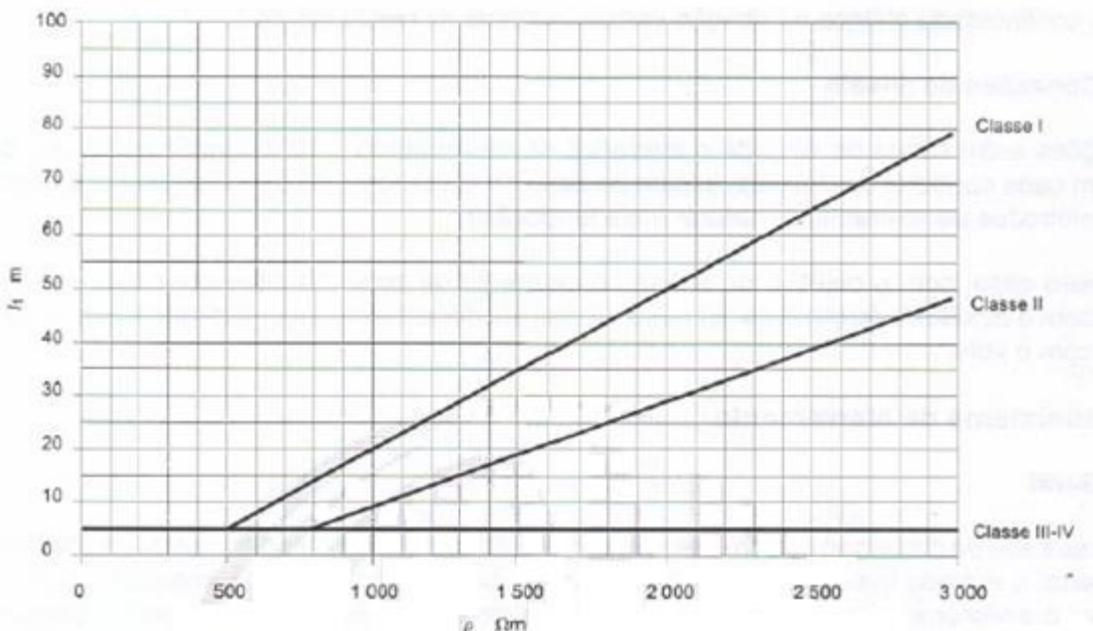


Figura 13: Comprimento mínimo l_1 do eletrodo de aterramento de acordo com a classe do SPDA

Na figura 13, nota-se que as classes III e IV são independentes da resistividade do solo. E, segundo a ABNT NBR 5419/3:2015, para solos com resistividade superior a 3000 $\Omega\text{.m}$, as curvas devem ser prolongadas de acordo com as seguintes equações:

$$l_1 = 0,03\rho - 10 \text{ (classe I)}$$

$$l_1 = 0,02\rho - 10 \text{ (classe II)}$$

Se a condição raio médio da área maior ou igual ao comprimento l_1 não for satisfeita, é necessário que sejam adicionados eletrodos horizontais ou verticais (ou inclinados) dados pelas expressões:

$$l_r = l_1 - r_e \text{ (componente horizontal)}$$

$$l_v = (l_1 - r_e) / 2 \text{ (componente vertical)}$$

A instalação do eletrodo de aterramento em anel deve estar a aproximadamente 1 metro de distância ao redor das paredes externas da estrutura e ter uma profundidade de 0,5 metro no mínimo.

No caso de subsistema de aterramento, a presença de algumas estruturas, como estruturas metálicas subterrâneas e armaduras de aço interconectadas nas fundações de

concreto podem servir como eletrodos naturais de aterramento, dispensando a necessidade de instalação de novos eletrodos.

8.2.10. Componentes

Um SPDA deve ser feito de materiais que suportem os efeitos que as correntes das descargas atmosféricas provocam sobre a estrutura. O SPDA deve ser feito com os materiais listados a seguir ou com materiais que apresentem características equivalentes.

8.2.10.1. Fixação

Os condutores de descida e captores devem ser instalados de maneira firme, a fim de não sofrerem danos em função de força eletrodinâmica ou mecânica. A fixação dos condutores do SPDA deve obedecer as distâncias máximas permitidas.

- Até 1 metro para condutores flexíveis (cabos e cordoalhas) na horizontal;
- Até 1,5 metro para condutores flexíveis (cabos e cordoalhas) na vertical ou inclinado;
- Até 1 metro para condutores rígidos (fitas e barras) na horizontal;
- Até 1,5 metro para condutores rígidos (fitas e barras) na vertical ou inclinado.

8.2.10.2 Materiais e Dimensões

Os materiais e as dimensões do SPDA são dados pelas tabelas 38 e 39. Na primeira são mostrados materiais e valores para os subsistemas de captação e de descida, enquanto que a segunda tabela corresponde ao subsistema de aterramento.

Tabela 38: Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descida

Material	Configuração	Área da seção mínima (mm ²)	Comentários
Cobre	Fita maciça	35	Espessura 1,75 mm
	Arredondado maciço	35	Diâmetro 6 mm

	Encordoado	35	Diâmetro de cada fio da cordoalha 2,5 mm
	Arredondado maciço (minicapacitores)	200	Diâmetro 16 mm
Alumínio	Fita maciça	70	Espessura 3 mm
	Arredondado maciço	70	Diâmetro 9,5 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,5 mm
	Arredondado maciço (minicapacitores)	200	Diâmetro 16 mm
Aço cobreado IACS 30%	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	50	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3 mm
Aço cobreado IACS 64%	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,6 mm
Aço galvanizado a quente	Fita maciça	50	Espessura mínima 2,5 mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	50	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm
	Arredondado maciço (minicapacitores)	200	Diâmetro 16 mm
Aço inoxidável	Fita maciça	50	Espessura 2 mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm
	Arredondado maciço (minicapacitores)	200	Diâmetro 16 mm

Tabela 39: Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento

Material	Configuração	Dimensões Mínimas		Comentários
		Eletrodo Cravado (Diâmetro)	Eletrodo não cravado	
Cobre	Encordoado	-	50 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3 mm
	Arredondado Maciço	-	50 mm ²	Diâmetro 8 mm
	Fita maciça	-	50 mm ²	Espessura 2 mm
	Arredondado Maciço	15 mm	-	-
	Tubo	20 mm	-	Espessura da parede 2 mm
Aço galvanizado a quente	Arredondado Maciço	16 mm	Diâmetro 10 mm	-
	Tubo	25 mm	-	Espessura da parede 2 mm
	Fita maciça	-	90 mm ²	Espessura 3 mm
	Encordoado	-	70 mm ²	-
Aço cobreado	Arredondado Maciço	12,7 mm	70 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,45 mm

	Encordoado	12,7 mm	70 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,45 mm
Aço inoxidável	Arredondado Maciço	15 mm	Diâmetro 10 mm	Espessura mínima 2 mm
	Fita maciça	15 mm	100 mm ²	Espessura mínima 2 mm

8.3. Sistema interno de proteção contra descargas atmosféricas

O SPDA interno tem por objetivo evitar que centelhamentos perigosos venham a ocorrer ou mesmo serem evitados através de ligações equipotenciais e isolação elétrica entre as partes.

8.3.1. Equipotencialização com o objetivo de proteger contra descargas atmosféricas

Para que a equipotencialização seja atingida, é necessário que o SPDA esteja interligado com sistemas internos, partes condutivas externas e linhas elétricas conectadas à estrutura ou instalações metálicas (NBR 5419). Essa interligação pode ser direta ou indireta, onde, na direta são usados condutores de interligação e na indireta são utilizados DPS (conexão direta não pode ser realizada) ou centelhadores (conexão direta é proibida).

8.3.1.1. Equipotencialização para instalações metálicas

A equipotencialização é realizada em função do tipo de SPDA. Para um SPDA externo isolado, deve ser implementada apenas no nível do solo, enquanto que, para um SPDA externo não isolado, as equipotencializações podem ser feitas na base da estrutura, próximo do nível do solo ou onde os requisitos de isolação não são cumpridos (NBR 5419). As dimensões mínimas dos condutores utilizados são mostradas nas tabelas 40 e 41 a seguir.

Tabela 40: Dimensões mínimas dos condutores que interligam diferentes barramentos de equipotencialização (BEP ou BEL) ou que ligam essas barras ao sistema de aterramento

Nível do SPDA	Modo de instalação	Material	Área da seção reta (mm ²)
I a IV	Não enterrado	Cobre	16
		Alumínio	25
		Aço galvanizado a fogo	50
	Enterrado	Cobre	50
		Alumínio	Não aplicável
		Aço galvanizado a fogo	80

Tabela 41: Dimensões mínimas dos condutores que ligam as instalações metálicas internas aos barramentos de equipotencialização (BEP ou BEL)

Nível do SPDA	Material	Área da seção reta (mm ²)
I a IV	Cobre	6
	Alumínio	10
	Aço galvanizado a fogo	16

No caso onde DPS sejam utilizados, eles devem obedecer à seguinte inequação:

$$I_{imp} \geq k_c \times I$$

Onde I_{imp} corresponde à corrente de impulso e $k_c \times I$ à corrente da descarga atmosférica que vai do SPDA externo para as instalações metálicas. Neste caso, a tensão de impulso disruptiva nominal tem que ser menor do que o nível de impulso suportável de isolamento entre as partes.

8.3.1.2. Equipotencialização para elementos condutores externos

Nesta situação, a equipotencialização deve ser feita desde as vizinhanças do ponto onde os elementos condutores externos penetram na estrutura analisada. No caso de não poder ser feita uma interligação direta, é necessário que os DPS tenham algumas características, tais como: nível de proteção menor do que o nível de suportabilidade a impulso da isolamento entre as partes, tensão de impulso disruptiva menor do que o nível de impulso suportável de isolamento entre as partes e corrente da descarga atmosférica que se dissipava através dos elementos condutores externos menor ou igual à corrente de impulso (NBR 5419).

8.3.1.3. Equipotencialização para sistemas internos

No caso de sistemas internos, a equipotencialização pode ser facilitada se os condutores dos sistemas internos estiverem dentro de eletrodutos metálicos ou forem blindados, uma vez que basta fazer ligações equipotenciais a esses eletrodutos ou às blindagens. Se nenhum desses dois casos estiver presente, os condutores vivos dos sistemas internos devem ter equipotencialização ao barramento de equipotencialização principal por meio de dispositivos de proteção contra surtos (NBR 5419).

8.3.1.4. Equipotencialização para as linhas conectadas à estrutura a ser protegida

Todos os condutores de cada linha devem ter DPS instalados ou serem equipotencializados diretamente. Assim como nos sistemas internos, se as linhas estiverem em eletrodutos metálicos ou forem blindadas, devem ser feitas ligações equipotenciais aos eletrodutos e as blindagens. Se as áreas das seções (S_c) dos eletrodutos ou das blindagens forem maior ou igual ao valor mínimo (S_{cmin}), as equipotencializações são desnecessárias.

$$S_{cmin} = \frac{I_f \times \rho_c \times L_c \times 10^6}{U_w} (\text{mm}^2)$$

Sendo:

- I_f : corrente que segue a blindagem (kA);
- ρ_c : resistividade da blindagem (Ω);
- L_c : comprimento do cabo (m);
- U_w : tensão suportável de impulso do sistema eletroeletrônico alimentado pelo cabo (kV).

Tabela 42: Comprimento de cabo a ser considerado segundo a condição de blindagem

Condição da blindagem	LC
Em contato com um solo de resistividade ρ (Ωm)	$LC \leq 8 \times \sqrt{\rho}$
Isolado do solo ou no ar	LC distância entre a estrutura e o ponto de aterrramento da blindagem mais próxima

A corrente de blindagem I_f tem diferentes limites em função da blindagem dos cabos.

$I_f = 8 \times SC$ (para cabos blindados)

$I_f = 8 \times n' \times S'C$ (para cabos não blindados)

Onde n' corresponde ao número de condutores, SC à seção da blindagem (mm^2) e $S'C$ à seção de cada condutor (mm^2).

8.4. Manutenção, inspeção e documentação de um SPDA

Em estruturas com SPDA, depois de realizadas as inspeções durante a construção e a instalação do SPDA, sempre que houver alguma obra que mude a configuração da estrutura

ou que haja suspeita de que a estrutura tenha sido atingida por uma descarga atmosférica, uma nova inspeção deve ser feita (Modena, 2017). Além disso, deve ser feita uma inspeção periódica de um ano para estruturas com risco de explosão, estruturas expostas à alta corrosão atmosférica ou estruturas que sejam responsáveis por servir serviços essenciais (água, energia, etc) e de três anos para as demais estruturas.

Depois de realizadas as inspeções, um documento deve ser gerado, indicando a necessidade ou não da instalação de SPDA e em caso afirmativo constar qual é a classe a ser utilizada. Além disso, no documento deve ter detalhado quais os materiais, dimensões e posições de todos os elementos que compõe o SPDA interno e externo.

8.5. Medidas de proteção contra acidentes com a população

8.5.1. Medidas de proteção contra tensão de toque

Um SPDA construído de acordo com a norma NBR 5419 também pode trazer risco para a vida de seres vivos caso alguma das condições a seguir não sejam satisfeitas.

- ter um subsistema de descida composto por no mínimo dez descidas naturais;
- ter uma pequena probabilidade de proximidade de pessoas;
- a presença de pessoas fora da estrutura durar pouco tempo;
- a resistividade da camada superficial do solo deve ser maior ou igual a $100 \text{ k}\Omega\text{m}$, considerando uma distância máxima de 3 metros até os condutores de descida.

Caso nenhuma dessas condições seja atendida, deve-se tomar medidas de proteção a fim de evitar problemas causados pela tensão de toque. A medida mais simples a ser tomada é colocar avisos para evitar que pessoas venham a tocar nos condutores de descida. Porém, por prudência também é indicado isolar os condutores de descida com materiais que suportem uma tensão de ensaio de 100 kV (NBR 5419).

8.5.2. Medidas de proteção contra tensão de passo

Para evitar que seres vivos fiquem feridos devido à tensão de passo, as mesmas condições dadas para tensão de toque devem ser tomadas. Caso nenhuma dessas condições seja satisfeita, medidas de proteção devem ser tomadas tais como: instalar avisos de alerta e impor restrições como barreiras para evitar a aproximação de pessoas e construir um eletrodo de aterramento reticular complementar em volta dos condutores de descida.

8.6. Estruturas com material sólido explosivo

Quando uma estrutura possui em seu interior materiais sólidos explosivos é aconselhável que o SPDA utilizado seja do tipo isolado. Além disso, nos locais onde esses materiais explosivos se encontram deve-se instalar, no lado externo, dispositivos de proteção contra surtos (DPS). Caso não seja possível a instalação no lado externo, é necessário que o DPS seja instalado no lado interno dentro de um invólucro contra explosão.

9. Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura

9.1. Medidas básicas de proteção contra surtos

Algumas medidas sempre devem ser tomadas com o intuito de proteger a estrutura contra possíveis danos provocados pelos impulsos eletromagnéticos gerados pelas descargas atmosféricas.

- Aterramento e equipotencialização: responsáveis por conduzir as correntes da descarga atmosférica diretamente para o solo e por diminuir as diferenças de potencial, reduzindo o campo magnético;
- Blindagem magnética e roteamento das linhas: assim como mencionado anteriormente, a blindagem é de extrema importância porque limita os surtos que vão fluir de uma zona mais externa para uma mais interna;
- Coordenação de DPS: a instalação de dispositivos de proteção contra surtos diminui os efeitos provocados por eles;
- Interfaces isolantes: essa medida é responsável por diminuir os efeitos em linhas que entram nas zonas de proteção geradas pelos surtos.

9.2. Aterramento e Equipotencialização

De acordo com a NBR 5419 o princípio básico desta medida é ter um subsistema de aterramento eficiente que encaminhe toda a corrente proveniente da descarga atmosférica para o solo e uma malha de equipotencialização responsável por diminuir a diferença de potencial e reduzir a intensidade de campo magnético.

O subsistema de aterramento deve ser realizado de acordo com o mencionado na seção 8.2.9 e a ligação equipotencial deve ser feita através de uma malha que interligue partes dos sistemas internos ou elementos condutores da estrutura. A interligação das partes dos sistemas internos pode ser feita com duas configurações diferentes, estrela (S) ou malha (M).

Caso a configuração empregada seja a estrela, a mesma deve estar ligada ao subsistema de aterramento apenas através de uma única barra de equipotencialização, fazendo com que seus componentes metálicos fiquem isolados de tal subsistema. Este tipo de configuração é ideal para sistemas internos que se encontram em pequenas zonas e que possuam um único ponto de entrada para todas as linhas.

Diferentemente da configuração estrela, a configuração em malha faz com que todos os componentes metálicos estejam em contato com diversos pontos de equipotencialização, sendo essa configuração preferível para grandes zonas ou até mesmo para toda uma estrutura que possua diferentes pontos de entrada de linhas.

10. Mudanças na NBR 5419

Com a atualização da NBR 5419 ocorreram algumas mudanças significativas, as quais, quando aplicadas, trazem uma maior segurança e eficiência para os SPDA.

A primeira mudança se deu no fato de que a norma de 2005 era constituída de quarenta e oito páginas e sem nenhuma divisão. Em contrapartida, quando a mesma foi atualizada no ano de 2015, passou a ter trezentas e cinqüenta e três páginas, divididas em quatro partes:

- Parte 1: parte referente aos princípios gerais, apresentando informações sobre os efeitos das descargas atmosféricas, valores de corrente de tais descargas, zonas de proteção, entre outros dados;
- Parte 2: parte que trata sobre o gerenciamento do risco. Nesta parte os parâmetros são apresentados, bem como a maneira de calcular o risco devido às descargas atmosféricas;
- Parte 3: parte que apresenta os danos físicos a estruturas e perigos à vida, apresentando dados referentes à seção dos condutores, aterramento, classes de proteção, métodos de captação, etc;

- Parte 4: parte referente a sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura, onde dados sobre DPS são apresentados.

Levando em consideração a nova configuração na NBR 5419, a seguir serão apresentadas as mudanças mais significativas.

Parte 1 – Princípios Gerais

A primeira mudança de extrema importância foi na eficiência dos Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas. Com o aprimoramento da norma e mudança de alguns parâmetros, a eficiência da medida de proteção aumentou em todas as classes, levando a uma segurança mais eficiente, mostrado pela tabela 43.

Tabela 43: Comparação da eficiência de acordo com o nível de proteção

Nível de Proteção	Eficiência	
	2005	2015
I	98%	99%
II	95%	97%
III	90%	91%
IV	80%	84%

Além disso, a antiga norma não explica a existência das zonas de proteção, as quais são importantes para o entendimento da proteção contra descargas atmosféricas, evidenciado na figura 14.

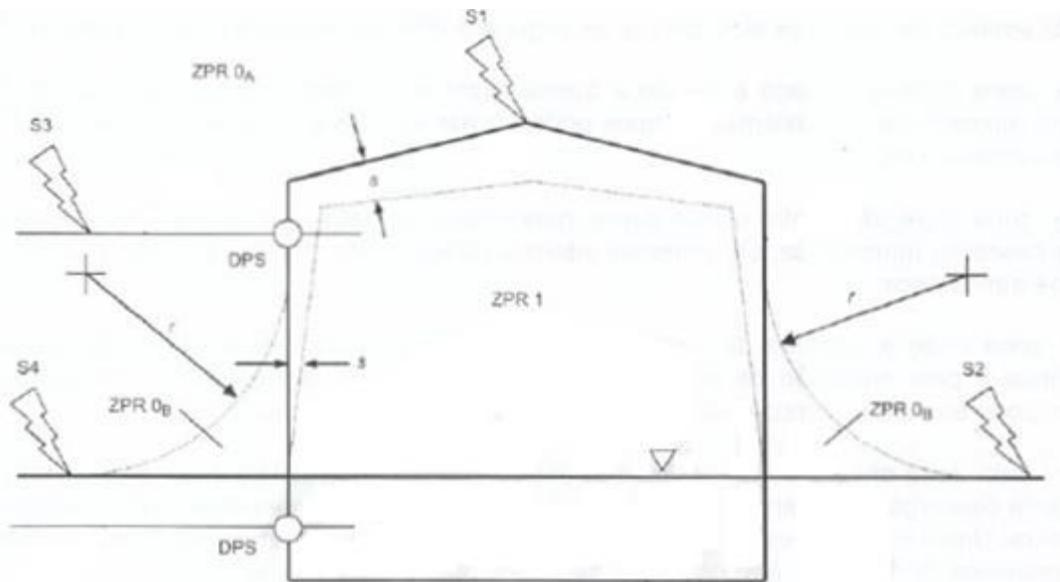


Figura 14: ZPR onde o SPDA atua

Na figura 14 podem ser vistas três zonas diferentes (ZPR0a, ZPR0b, ZPR1), cada uma com sua característica e áreas de proteção:

- ZPR0a: zona de proteção quando uma descarga atmosférica incide diretamente na estrutura;
- ZPR0b: zona que o SPDA dá cobertura em caso de incidência de descarga atmosférica direto na estrutura;
- ZPR1: zona que protege internamente a estrutura.

Parte 2 – Gerenciamento de Risco

Ao analisar a NBR 5419/2005 e sua versão atualizada em 2015, pode-se notar a correspondência entre o Anexo B da norma antiga (Análise da necessidade de proteção) com a Parte 2 (Gerenciamento de risco). Todavia, com a atualização, novos parâmetros responsáveis pela análise de risco foram adicionados e parâmetros já existentes tiveram alguns de seus valores modificados. Com a inclusão desses novos fatores é possível realizar um cálculo mais preciso e, consequentemente, resulta em um sistema mais seguro.

Ainda analisando o que antes era Anexo B, nota-se que a delimitação da área de exposição aumentou, uma vez que a distância que antes era H (altura da estrutura analisada) passou a ser três vezes maior, alterando assim o valor da área de exposição equivalente.

Parte 3 – Danos físicos à estrutura e perigos à vida

Um Sistema de Proteção Contra Surtos é dividido em três subsistemas: captação, descida e aterrramento. Com a atualização da norma, cada um destes subsistemas foi modificado de uma maneira que será apresentada a seguir, porém uma mudança que foi comum aos três se refere às tabelas de condutores, onde em todos os casos houve um aprimoramento com a inserção de novos materiais.

Para determinação da posição deste subsistema têm-se três métodos: método do ângulo de proteção (Franklin), método da esfera rolante (Eletrogeométrico) e método das malhas (Gaiola de Faraday). Todos os métodos já eram aceitos na norma antiga (2005), porém o Método de Franklin e o Método da Gaiola de Faraday tiveram alguns de seus valores alterados.

- Método do Ângulo de Proteção ou Método de Franklin

Este método foi o que apresentou as maiores mudanças uma vez que deixou de ter ângulos com valores fixos para cada classe e alturas correspondentes e passou a ser uma curva para cada uma das classes, gerando assim, uma maior flexibilidade nos valores dos ângulos em questão. Outra grande mudança foi que com a atualização da norma os pequenos captores passaram a ter um alcance muito maior do que antes. Ambas as mudanças serão mostradas a seguir pela tabela 44 e figura 15.

Valores dos ângulos de proteção referentes a NBR 5419/2005:

Tabela 44: Valores do ângulo de proteção de acordo com a classe do SPDA

Nível de Proteção	Ângulo de proteção (α) - Método de Franklin, em função da altura do captor (h) e do nível de proteção				
	0 - 20 m	21 - 30 m	31 - 45 m	46 - 60 m	> 60 m
I	25°	* ¹	* ¹	* ¹	* ²
II	35°	25°	* ¹	* ¹	* ²
III	45°	35°	25°	* ¹	* ²
IV	55°	45°	35°	25°	* ²

*¹ Aplicam-se somente os métodos eletromagnético, malha ou gaiola de Faraday
*² Aplica-se somente o método da gaiola de Faraday

Valores dos ângulos de proteção referentes a NBR 5419/2015:

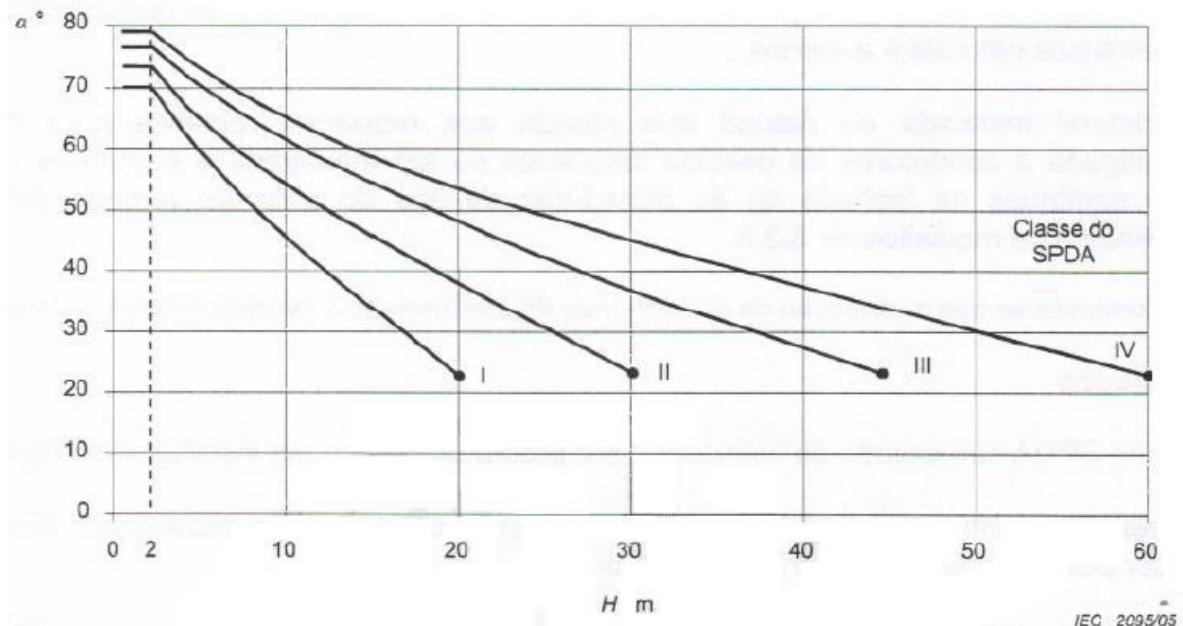


Figura 15: Ângulo de proteção de acordo com a classe do SPDA

Como pode ser visto na figura 15 a altura limite de cada uma das quatro classes foi mantida. Assim como na norma de 2005, caso a altura ultrapasse o valor máximo, o método de Franklin não poderá ser utilizado, tendo que escolher entre um dos outros dois métodos.

- Método das Malhas ou Método da Gaiola de Faraday

A principal mudança neste método se dá na forma pela qual a malha é construída. Em 2005, a malha não era necessariamente feita por quadrados, mas sim por quadrados e/ou retângulos, onde o comprimento não podia ser maior do que duas vezes a largura tabelada para cada uma das classes. Em contrapartida, na norma vigente o que se tem são valores tabelados de quadrados, uma vez que para todas as classes têm-se valores iguais de largura e comprimento.

Tabela 45: Comparaçāo dos valores da malha captora de acordo com a classe do SPDA

Nível de proteção	Largura do módulo da malha (m) - 2005	Máximo afastamento dos condutores da malha (m) - 2015 condutores da malha
I	5	5 x 5
II	10	10 x 10
III	10	15 x 15
IV	20	20 x 20

Subsistema de Descida

Ao se tratar da quantidade de descidas e seu espaçamento, lida-se diretamente com o nível de segurança que o SPDA em questão vai trazer para a estrutura a ser protegida. Isto ocorre porque quanto menor for a distância entre as descidas, maior será o número desta (N° de descidas = Perímetro da edificação / Distância entre as descidas), aumentando assim, a quantidade de pontos capazes de escoar a descarga atmosférica recebida na estrutura para o subsistema de aterramento.

Tabela 46: Comparação da distância entre os condutores de descida de acordo com a classe do SPDA

Nível de Proteção	Distância entre as descidas (m)	
	2005	2015
I	10	10
II	15	10
III	20	15
IV	25	20

Subsistema de Aterramento

De acordo com a NBR 5419/2005: “Para assegurar a dispersão da corrente de descarga atmosférica na terra sem causar sobretensões perigosas, o arranjo e as dimensões do subsistema de aterramento são mais importantes que o próprio valor da resistência de aterramento. Entretanto, recomenda-se, para o caso de eletrodos não naturais, uma resistência de aproximadamente $10\ \Omega$, como forma de reduzir os gradientes de potencial no solo e a probabilidade de centelhamento perigoso.”

Todavia, com a atualização da norma, este valor de resistência de aproximadamente $10\ \Omega$ foi retirado da norma.

Uma segunda alteração correspondente a este subsistema se deu nas condições nos arranjos de aterramento. O Arranjo A (NBR 5419/2005), o qual trazia uma explicação de aterramento pontual, aplicável em estruturas pequenas e com solos de baixa resistividade deixou de ser apresentando na NBR 5419/2015, permanecendo apenas o antigo Arranjo B, correspondente ao aterramento em anel. Além do aterramento em anel ter sido mantido na norma, foi acrescida a informação de que pelo menos 80% do comprimento total deve estar em contato com o solo.

Outra atualização significativa foi no que diz respeito ao comprimento mínimo do eletrodo de aterramento de acordo com a classe do SPDA. Em 2005, apenas o nível I de

proteção possuía comprimento mínimo enquanto que os demais (II, III, IV) eram independentes da resistividade do solo. Com a mudança, o nível II deixou de ser independente da resistividade do solo e passou a ter sua própria curva $\rho \times l_1$ que pode ser evidenciado pelas figuras 16 e 17 a seguir.

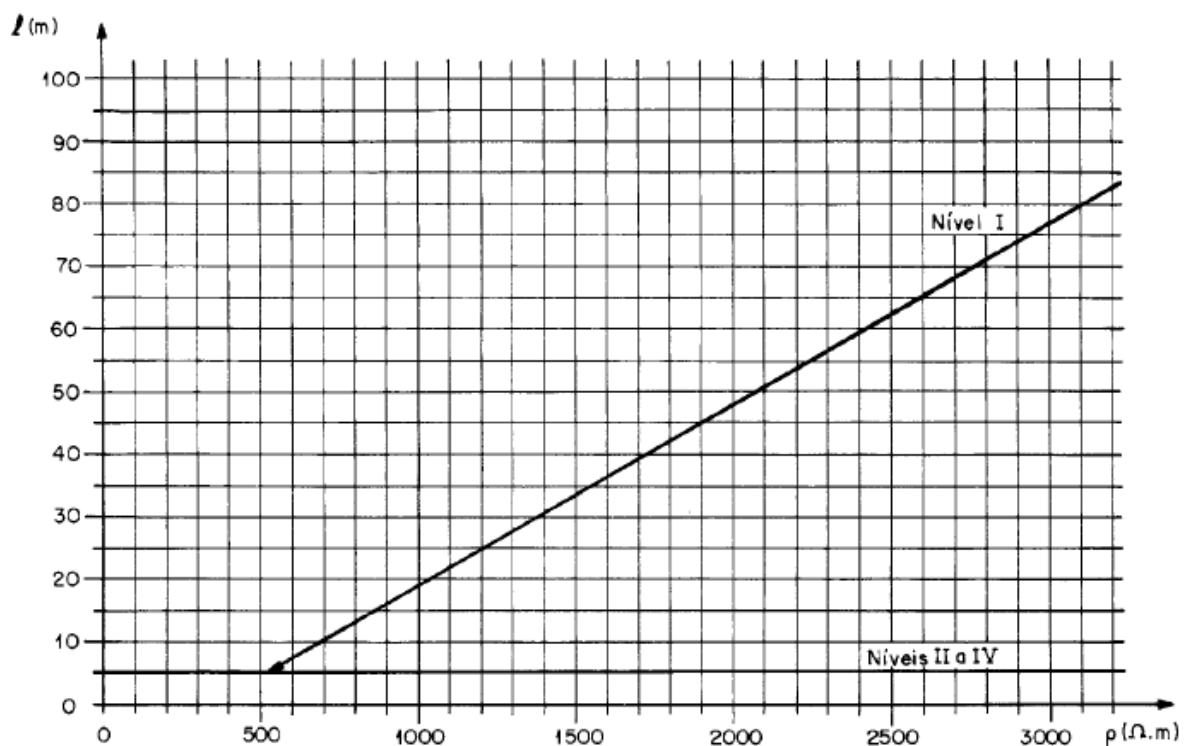


Figura 16: Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento – NBR 5419/2005

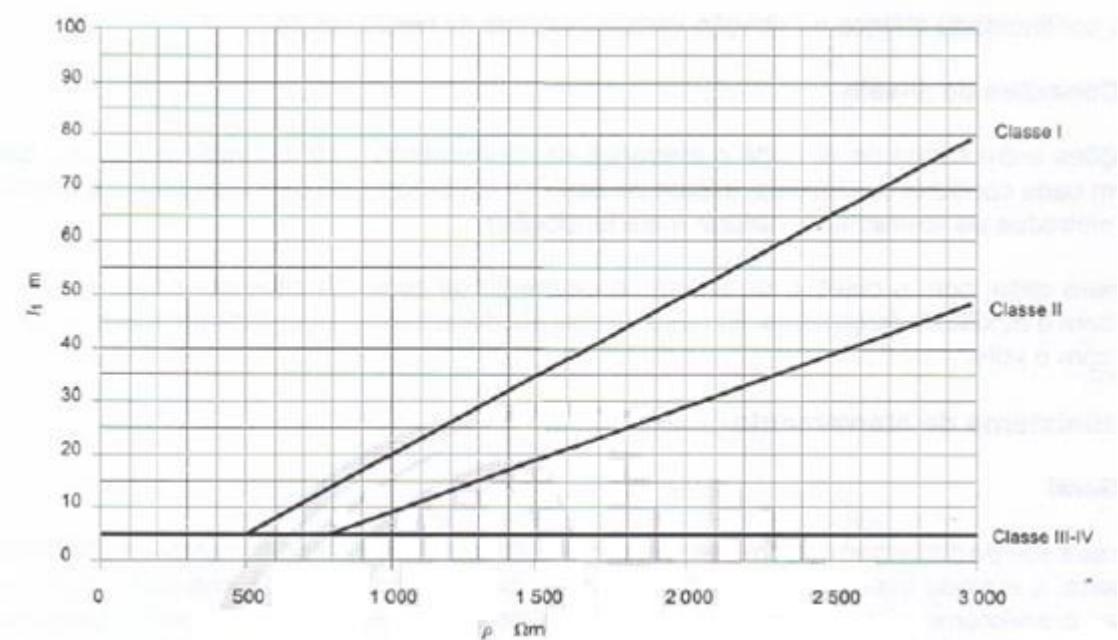


Figura 17: Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento – NBR 5419/2015

Em relação à fixação dos condutores do SPDA, distâncias máximas foram estabelecidas para os condutores flexíveis ou rígidos, estando esses na horizontal ou na vertical (ou inclinado).

Quando se analisa a isolação elétrica do SPDA externo, pode-se notar que a distância de segurança “s” continua tendo a mesma fórmula, porém os valores do coeficiente k_i ao quais ela está relacionada tiveram seus valores modificados, enquanto que os valores dos coeficientes k_m e k_c se mantiveram.

Tabela 47: Comparaçāo dos valores do coeficiente k_i

Nível de Proteção	Valores de coeficiente k_i	
	2005	2015
I	0,1	0,08
II	0,075	0,06
III e IV	0,05	0,04

Como pode ser visto na tabela 47 os valores do coeficiente k_i diminuíram em todas as classes, o que faz com que a distância de segurança “s” também diminua, já que são diretamente proporcionais. Mais uma vez, as alterações realizadas na NBR 5419 trazem uma maior segurança.

Parte 4 – Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura:

Dentre as partes acima mencionadas, tem-se que o conteúdo referente a parte 4 da nova NBR 5419 não tinha uma dedicação exclusiva na NBR 5419/2005. Com a atualização da norma, uma parte foi dedicada exclusivamente a sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura (Gonçalves, 2015). Neste novo conteúdo foram introduzidas medidas de proteção contra surtos (MPS), onde é possível ver projetos e instalações das mesmas, além de ter explicaçāo sobre as zonas de proteção contra raios (ZPR) e principalmente sobre os dispositivos de proteção contra surtos (DPS), os quais são de extrema importância para proteção de aparelhos eletroeletrônicos.

11. Estudo de caso

11.1. Verificação da necessidade de um SPDA utilizando NBR 5419 - 2005

Será utilizado como exemplo de aplicação o edifício em construção na cidade de Itumbiara-Go, contendo as dimensões citadas abaixo da imagem da fachada do edifício (figura 18) feita no programa AutoCad.

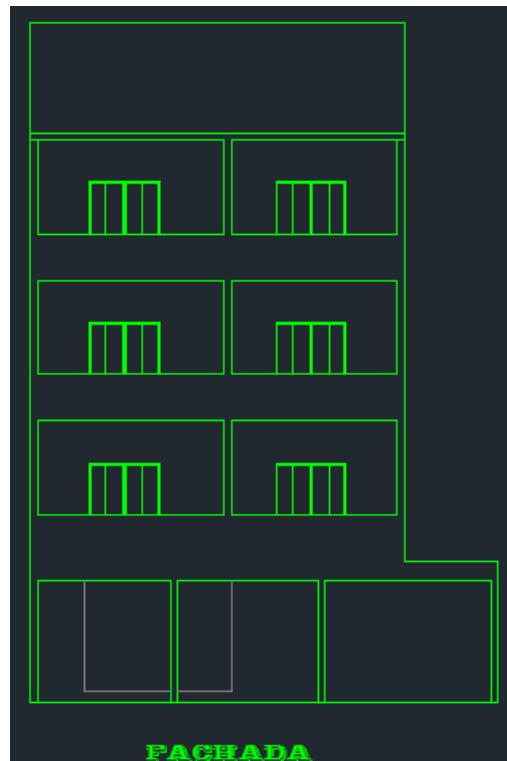


Figura 18: Edifício de aplicação

➤ Dimensões da edificação:

Altura: 14,50 metros

Largura: 8,0 metros

Comprimento: 24,20 metros

➤ Avaliação do risco de proteção

A área de exposição equivalente (A_e) corresponde à área do plano da estrutura prolongada em todas as direções, de modo a levar em conta sua altura. Os limites da área de exposição equivalente estão afastados do perímetro da estrutura por uma distância correspondente à altura da estrutura no ponto considerado.

$$Ae = a \times b + 2 \times h(a + b) + \pi \times h^2 [km^2]$$

Onde:

Ae = Área de exposição em km^2

a = comprimento da estrutura em km ;

b = Largura da estrutura em km ;

h = Altura da estrutura em km .

$$Ae = 1787.585 \times 10^{-6} [km^2]$$

➤ Densidade de descargas para a terra

A densidade de descargas atmosféricas para a terra (N_g) é o número de raios para a terra por km^2 por ano.

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} [(raios/km^2)/ano]$$

Neste caso, utilizando o mapa isoceraúnico (figura 19), temos que T_d para a região de Itumbiara-Go é 60.

$$N_g = 6.68 \left[\frac{\text{descargas}}{\frac{km^2}{\text{ano}}} \right]$$



Figura 19: Mapa isoceráunico do Brasil NBR 5410-2005

➤ Freqüência média anual previsível de descargas

Freqüência média anual previsível (N_d) de descargas atmosféricas sobre uma estrutura.

$$N_d = Ae \times N_g \text{ [raios/ano]}$$

$$N_d = 1.19 \times 10^{-2}$$

➤ Fatores de ponderação

Os fatores de ponderação denotam a importância relativa do risco em cada caso.

$$N = N_d \times A \times B \times C \times D \times E$$

Onde:

N = Frequência média anual admissível de danos causados por raios;

A = Fator referente ao tipo de ocupação da estrutura;

B = Fator referente ao tipo de construção da estrutura;

C = Fator referente ao tipo do conteúdo da estrutura e aos efeitos indiretos das descargas atmosféricas

D = Fator referente à localização da estrutura;

E = Fator referente à Topografia da região.

A tabela 48 evidencia os valores correspondentes aos fatores de ponderação utilizados para este caso.

Tabela 48: Fatores de ponderação

Fator de ponderação	Descrição	Valor
A: Tipo de ocupação da estrutura	Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos	1,2
B: Tipo de construção da estrutura	Estrutura de alvenaria ou concreto simples com qualquer cobertura (exceto metálica ou palha)	1,4
C: Conteúdo e efeitos indiretos das descargas atmosféricas	Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não tenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos	0,3
D: Localização da estrutura	Estrutura localizada em área contendo poucas estruturas ou árvores de altura igual ou menor	1,0
E: Topografia da região	Planície	0,3

$$N = 0,0119 \times 1,2 \times 1,4 \times 0,3 \times 1,0 \times 0,3$$

$$N = 0,0018 \text{ raios/ano}$$

Assim, com o valor de N calculado, estima-se a necessidade de um SPDA na estrutura, de acordo com o critério abaixo estabelecido pela NBR 5419:

- $N \geq 10^{-3}$: a estrutura requer SPDA.
- $10^{-5} < N < 10^{-3}$: a utilização de SPDA fica a critério do projetista e usuário.
- $N \leq 10^{-5}$: não há necessidade de SPDA.

De acordo com o critério, neste caso a estrutura necessita de SPDA ($N > 10^{-3}$).

11.2. Verificação da necessidade de um SPDA utilizando NBR 5419 - 2015

Será utilizado o mesmo edifício (figura 18) para a verificação.

➤ **Dimensões da edificação:**

Altura: 14,50 metros

Largura: 8,0 metros

Comprimento: 24,20 metros

Deve-se levar em conta quais os tipos de perda possíveis nesta construção. Como listadas anteriormente, são quatro as possíveis perdas:

- L1: perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes);
- L2: perda de serviço ao público;
- L3: perda de patrimônio cultural;
- L4: perda de valores econômicos (estrutura, conteúdo e perda de atividades).

Para este caso será considerado apenas a perda de vida humana incluindo ferimentos permanentes (L1).

O primeiro parâmetro que deve se ter, é o correspondente à densidade de descargas atmosféricas para a terra (NG). Este parâmetro é dado através do mapa de curvas isocerâmicas, que foi atualizado e é disponibilizado no site do INPE. Através deste mapa, pode-se obter o valor de NG equivalente à região de Itumbiara-Go, conforme mostrado pela figura 20.



Figura 20: Número NG de Itumbiara-Go

Assim, tem-se que $N_g = 7.9 \left[\frac{\text{descargas}}{\text{km}^2 \text{ ano}} \right]$

Já sabe-se por se tratar da mesma estrutura que a área de exposição é:

$$Ad = 1787.585 \text{ m}^2$$

➤ Número de eventos perigosos ND para a estrutura

O número de eventos perigosos devidos às descargas atmosféricas na estrutura é dado pela equação:

$$N_D = N_g \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$$

Os parâmetros NG e AD já foram encontrados, todavia, o fator de localização da estrutura (CD), deve ser estabelecido através da Tabela 4. Como a estrutura é cercada por objetos de mesma altura ou mais baixa tem-se que Cd=0,5.

$$N_D = 7.9 \times 1787.585 \times 0.5 \times 10^{-6}$$

$$N_D = 70.6 \times 10^{-4}$$

➤ **Avaliação do número médio anual de eventos perigosos NL devido a descargas atmosféricas na linha**

Ao se analisar esta equação é possível perceber que apenas NG é prévio conhecimento. Os parâmetros CT (fator tipo de linha), CI (fator de instalação da linha), CE (fator ambiental) foram dados pelas Tabelas 5, 6 e 7, respectivamente. A instalação da linha será enterrada (CI = 0,5), tipo de linha baixa tensão (CT = 1,0) e o prédio está localizado em uma área urbana (CE = 0,1). Outro fator que deve ser considerado é a área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha, dada através da equação:

$$AL = 40 \times LL$$

O comprimento da seção da linha (LL) quando não conhecido, deve-se adotar 1000.

$$AL = 40 \times 1000$$

$$AL = 40000$$

$$NL = NG \times AL \times CI \times CE \times CT \times 10^{-6}$$

$$NL = 15.8 \times 10^{-2}$$

➤ **Probabilidade PA de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico**

A equação da probabilidade PA (de ferimentos de seres vivos por choque elétrico) é dado:

$$PA = PTA \times PB$$

Assim como mostrado na Tabela 9, a probabilidade PTA está diretamente ligada às medidas de proteção adicionais que vão ser colocadas no estabelecimento, neste caso não será adotado nenhuma proteção adicional, sendo assim PTA = 1. Outro fator de importância nesta expressão é a probabilidade PB (Tabela 8), que neste caso será escolhida a opção onde se tem uma estrutura não protegida por SPDA (PB = 1).

$$PA = 1$$

- **Probabilidade PU de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico**

$$PU = PTU \times PEB \times PLD \times CLD$$

De acordo com a Tabela 13, PTU assumirá valor igual a 1 por não ter medida de proteção e como ainda não foi considerada instalação de DPS, PEB = 1 (Tabela 14). Levando-se em consideração que a tensão suportável de impulso é de 2,5 kV e que a linha de energia é enterrada e não blindada, temos, através da Tabela 15, PLD = 1 e CLD = 1 (Tabela 11).

$$PU = 1 \times 1 \times 1 \times 1$$

$$PU = 1$$

- **Probabilidade Pv de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos**

A probabilidade PV (de falhas em sistemas internos devido a descargas perto da linha) é dado pela equação:

$$PV = PEB \times PLD \times CLD$$

Considerando os valores de PEB, PLD e CLD adotados para a probabilidade PU calculada anteriormente, tem-se:

$$PV = 1$$

- **L1 – Perda de vida humana**

No tipo de perda L1 todos os tipos de danos estão presentes, gerando assim, nove valores de perda típica, subdivididos em três categorias (D1, D2, D3) como é mostrado na tabela 17.

Começando pelos fatores presentes no dano 1 (D1) tem-se o fator rt o qual está relacionado a redução da perda humana dependendo do tipo de solo ou piso da construção. No caso do edifício será utilizado um piso de cerâmica, que através dos dados da Tabela 19 obtém-se um valor de 10^{-3} para rt .

O parâmetro LT corresponde ao número relativo médio de vítimas feridas por choques elétricos, que assume o valor de 10^{-2} para qualquer tipo de estrutura (Tabela 18). O número total de pessoas na zona (nz), o número total de pessoas no edifício (nt), bem como o tempo que as pessoas estão presentes na zona (tz), são dados que não são tabelados, mas sim informados. No estudo em questão, será considerada apenas uma zona, com isso nz = nt e um tempo tz equivalente a 8760 (horas anuais).

Com todos os dados coletados é possível se obter os valores para LA e LU. Considerando que serão 6 apartamentos contendo 4 pessoas em média em cada apartamento, 24 pessoas no total.

$$LA = LU = 10^{-3} \times 10^{-2} \times \frac{24}{24} \times \frac{8760}{8760}$$

$$LA = 10^{-5}$$

Analizando-se os danos físicos (D2) tem-se, primeiramente, o fator rp o qual depende das providências que vão ser tomadas para reduzir as consequências do incêndio, como mostra a Tabela 20. No caso em questão, as providências a serem tomadas, serão instalar extintores, hidrantes, entre outros, retornando um valor de 0,5 para rp.

O fator rf está diretamente ligado ao risco de incêndio ou de explosão caso a estrutura venha a ser atingida por uma descarga atmosférica. Considerando-se um risco normal de incêndio, o valor obtido pela Tabela 21 é de 10^{-2} para rf.

Ao indicar quantas pessoas estão presentes na estrutura, pode-se analisar o nível de pânico que será gerado em caso de incêndio, e consequentemente obter o valor de hz (Tabela 22), que neste caso será igual a 2 ,baixo nível de pânico.

O número relativo médio de vítimas por danos físicos LF é subdividido em tipos de estrutura, como mostra a Tabela 18. No caso do edifício será utilizado o valor de 10^{-2} , uma vez que a estrutura será considerada como hotel. Com isso, é possível obter os valores desejados para esse tipo de dano.

$$LB = LV = Rp \times Rf \times Hz \times Lf \times \frac{nz}{nt} \times \frac{tz}{8760}$$

$$LB = 10^{-4}$$

➤ R1 – Risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas

$$R1 = RA1 + RB1 + RC1^1 + RM1^1 + RU1 + RV1 + RW1^1 + RZ1^1$$

Os componentes com expoente igual a um apenas serão utilizados em caso de estruturas com risco de explosão ou hospitais. Como a estrutura estudada não é um hospital, nem tem risco de explosão, o risco R1 se reduzirá a seguinte expressão:

$$R1 = RA1 + RB1 + RU1 + RV1$$

Onde os quatro fatores de risco são calculados da seguinte forma:

$$RA = ND \times PA \times LA$$

$$RB = ND \times PB \times LB$$

$$RU = (NL + NDJ) \times PU \times LU$$

$$RV = (NL + NDJ) \times PV \times LV$$

Substituindo os valores encontrados anteriormente, tem-se:

$$RA = 7.06 \times 10^{-8}$$

$$RB = 7.06 \times 10^{-7}$$

$$RU = 1.58 \times 10^{-6}$$

$$RV = 1.58 \times 10^{-5}$$

Para Ru deve-se considerar ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na linha de energia e descargas na linha de sinal (telefonia).

Como não se sabe a distância da linha, foi adotado 1000 para ambos como recomenda a norma, sendo assim, terão valores iguais. E como não há estruturas próximas, Ndj assume valor 0.

Sendo assim, tem-se que:

$$R1 = 7.06 \times 10^{-8} + 7.06 \times 10^{-7} + 2 \times (1.58 \times 10^{-6}) + 2 \times (1.58 \times 10^{-5})$$

$$R1 = 3.5 \times 10^{-5}$$

O valor encontrado foi maior do que o risco tolerável 10^{-5} (Tabela 03), conclui-se que um SDPA é necessário para essa estrutura.

12. Conclusão

O tema proposto pelo trabalho foi desenvolvido de forma didática, verificando os parâmetros de descargas atmosféricas relevantes para a realização de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas.

Foi possível verificar algumas diferenças entre a antiga e atual norma vigente. Pode-se citar que a eficiência do sistema de proteção, com os requisitos da ABNT NBR 5419 de 2015, teve um aumento significativo em relação à proteção realizada baseada na versão anterior da ABNT NBR 5419. A principal diferença entre as duas versões da norma é o gerenciamento de risco que se tornou uma ferramenta interativa no projeto, capaz de classificar o nível de proteção do SPDA e verificar se a proteção utilizada é adequada para a estrutura a ser protegida.

Considerando as diferenças entre as normas, foi realizado ainda no presente trabalho um estudo de caso para analisar a necessidade da instalação de um SPDA no município de Itumbiara no estado de Goiás, utilizando-se como referência a norma de 2005 da ABNT NBR 5419, e, posteriormente, a versão de 2015 da mesma. Com os valores obtidos pôde-se observar que nos dois casos houve a necessidade de instalação do SPDA na obra, porém a nova NBR 5419 utiliza-se de mais parâmetros para o cálculo, o que leva a maior segurança da obra.

A partir das observações e resultados gerados pelo trabalho, é possível concluir que engenheiros eletricistas consigam determinar a necessidade de instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas sem qualquer restrição. No entanto, mesmo se tratando de algo simples em tese, é imprescindível a leitura e estudo prévio norma NBR5419-2015 visto que alguns detalhes e particularidades devam ser levados em consideração de maneira cautelosa.

13. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1**: proteção contra descargas atmosféricas parte 1: princípios gerais. Rio de Janeiro, 2015. 67 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-2**: proteção contra descargas atmosféricas parte 2: gerenciamento de risco. Rio de Janeiro, 2015. 104 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-3**: proteção contra descargas atmosféricas parte 3: danos físicos a estruturas e perigos à vida. Rio de Janeiro, 2015. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-4**: proteção contra descargas atmosféricas parte 4: sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Rio de Janeiro, 2015. 87 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAL – INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage>> Acesso em 10 de setembro de 2017.

GONÇALVES, FRANCISCO. **NBR 5419: principais mudanças e impacto em projetos de SPDA**. Alto QI. Disponível em: <<http://maisengenharia.altoqi.com.br/eletro/nbr-5419-principais-mudancas-impacto-projetos-spda/>>. Acesso em 18 setembro de 2017.

KINDERMANN, G. **Descargas Atmosféricas**. Rio Grande do Sul, 1992.

MAMEDE FILHO, J. **Instalação Elétrica Industrial**. Rio de Janeiro, 2011.

MODENA, JOBSON. **Inspeção no SPDA**. Portal o setor elétrico. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/inspecao-no-spda>> Acesso em 25 setembro de 2017.