

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO QUINTANILHA SANTINI

**COMPARAÇÃO ENTRE A ABNT NBR 5419 DO ANO DE
2005 E 2015 E APLICAÇÃO EM PROJETO**

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**COMPARAÇÃO ENTRE A ABNT NBR 5419 DO ANO DE 2005 E 2015 E
APLICAÇÃO EM PROJETO**

**Projeto de diplomação apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como parte dos requisitos para
Graduação em Engenharia Elétrica.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2016

RODRIGO QUINTANILHA SANTINI

**COMPARAÇÃO ENTRE A ABNT NBR 5419 DO ANO DE 2005 E 2015
E APLICAÇÃO EM PROJETO**

Este projeto foi analisado e julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – Prof. Orientador

Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho – Prof. Chefe do DELET

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA:

Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro (Prof. Dr) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Roberto Petry Homrich (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Igor Pasa Wiltuschnig (Eng.º) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, junho de 2016

Dedico este trabalho a vocês, que sempre me incentivaram a lutar pelos meus sonhos e me deram todo o suporte necessário para que eu pudesse realizá-los, meus pais, Carlos Santini e Jucinéia da Rocha Quintanilha, e minha mãe de coração, Carla Simone Gonzalez Gonçalves Santini.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares, pelo amor incondicional e pelo incentivo e conselhos em cada etapa de minha vida.

Ao Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pela oportunidade de orientação, pelos conhecimentos compartilhados ao longo do curso e pelo apoio extraclasse.

Ao meu irmão, Pedro Gonçalves Santini, pela parceria de vida, por ser meu melhor amigo, pelo apoio nos momentos mais complicados e pelas alegrias proporcionadas em muitos momentos da minha vida.

A minha namorada e amiga, Daniele Geovani Medeiros Duhart, pelo amor, pelo carinho e pela compreensão durante esta importante etapa da minha vida

Aos meus grandes amigos de longa data, por todos os ensinamentos compartilhados e por todos os momentos de alegria e descontração.

Aos meus colegas de curso, em especial ao meu grande amigo, Júlio César Kist Assmann, pelo companheirismo, pela honestidade, pelos momentos de alegria e descontração e pelos conhecimentos compartilhados.

A minha avó, Ivone Santini, por além de todo o carinho, amor e suporte, me proporcionar a moradia em um apartamento próximo a faculdade.

Em especial, um agradecimento ao meu pai, Carlos Santini, pelo amor incondicional, pelos momentos de alegria, pelo total apoio e por ter me guiado a ser quem hoje sou.

RESUMO

A instalação de proteção contra descargas atmosféricas é uma exigência do Corpo de Bombeiros e é regulamentada pela ABNT NBR 5419 no Brasil. O sistema de proteção contra descargas atmosféricas tem como objetivo a diminuição dos efeitos das descargas atmosféricas para a terra que possam causar danos a uma estrutura e seu interior.

Este trabalho apresenta uma análise preliminar da formação e parametrização das descargas atmosféricas e as etapas do projeto do sistema de proteção contra descargas atmosféricas para a terra. Uma metodologia para os projetos de proteção conforme as versões da ABNT NBR 5419 do ano de 2005 e 2015 é realizada considerando todos os pontos abrangidos na norma.

Por fim, a aplicação em projeto de uma blindagem projetada com a utilização da ABNT NBR 5419 do ano de 2015 se mostrou mais eficaz que quando baseado na versão anterior da ABNT NBR 5419. A expectativa para o cenário nacional com a entrada em vigor da nova versão da norma é de que haja um impacto positivo na integridade das edificações, bem como seus usuários e equipamentos.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas, Gerenciamento de Risco, Proteção contra descargas atmosféricas, ABNT NBR 5419.

ABSTRACT

The installation of protection against atmospheric discharges is required by the Fire Department and is regulated by the Brazilian Association of Technical Norms (ABNT NBR 5419). The system of protection against atmospheric discharges has by objective the diminishing of the effects from the atmospheric discharges to the earth that can cause damage to a structure and its interior.

This paper presents a preliminary analysis of formations and parameterization of the atmospheric discharges and the phases of the protection system against atmospheric discharges project to the earth. The methodology to the protection projects is realized considering all points covered by the Technical Norm ABNT NBR 5419 from the years 2005 and 2015.

Lastly, the project application of a projected blindage utilizing the Technical Norm ABNT NBR 5419 from the year of 2015 showed itself more efficient when compared to the latest version of the Technical Norm (2005). The expectations in the national background with the entrance of the new version of the Norm is that a positive impact should be noticed in the integrity from the edifications, as well as its users and equipments.

Keywords: Atmospheric discharges, Risk management, Protection against atmospheric discharges, ABNT NBR 5419.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição de cargas e diferenças de temperatura em nuvem de tempestade.....	23
Figura 2 – Processo de uma ocorrência de uma descarga positiva.	27
Figura 3 – Mapa de descargas atmosféricas – Brasil.....	28
Figura 4 – Impulso de corrente normalizado.	30
Figura 5 – Circuito simplificado de um gerador de impulso.	30
Figura 6 – Sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas.	32
Figura 7 – Haste de Franklin.	35
Figura 8 – Volume de proteção com haste Franklin.	36
Figura 9 – Condução da corrente da descarga atmosférica para o subsistema de descida e aterramento.....	37
Figura 10 – Avaliação da proteção da edificação pelo método das esferas rolantes.	39
Figura 11 – Conceito da distância R entre os líderes ascendente e descendente.	40
Figura 12 – Mapa Isoceráunico do território brasileiro.	44
Figura 13 – Área de exposição de uma estrutura retangular.....	45
Figura 14 – Laço formado por um condutor de descida.	54
Figura 15 – Valor do coeficiente k_c em uma configuração unidimensional.	56
Figura 16 – Valor do coeficiente k_c em uma configuração bidimensional.	56
Figura 17 – Valor do coeficiente k_c em uma configuração tridimensional.	57
Figura 18 – Comprimento mínimo dos eletrodos de aterramento não naturais.	60
Figura 19 – Método de medição a quatro fios.	64
Figura 20 – Conexões entre as quatro partes da ABNT NBR 5419.	66
Figura 21 – Impulso atmosférico normalizado.....	67
Figura 22 – Curva da componente longa da descarga atmosférica.	68
Figura 23 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas descendentes.....	69
Figura 24 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas ascendentes.....	69
Figura 25 – Distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas.	70
Figura 26 – Zona de proteção definida por um SPDA.....	75
Figura 27 – Zona de proteção definida por um MPS.....	75

Figura 28 – Arranjo de dois condutores paralelos para definição de forças eletrodinâmicas.	80
Figura 29 – Arranjo de dois condutores paralelos para definição de forças eletrodinâmicas.	80
Figura 30 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas <i>NG</i> da região norte.	91
Figura 31 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas <i>NG</i> da região nordeste.	91
Figura 32 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas <i>NG</i> da região centro-oeste.	92
Figura 33 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas <i>NG</i> da região sudeste.	92
Figura 34 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas <i>NG</i> da região sul.	93
Figura 35 – Planta baixa da estrutura retangular regular isolada e sua área de exposição equivalente.	94
Figura 36 – Estrutura de forma complexa.	95
Figura 37 – Planta baixa da estrutura de forma complexa e sua área de exposição equivalente.	95
Figura 38 – Procedimento para avaliação da eficiência do custo das medidas de proteção.	117
Figura 39 – Procedimento para avaliação da necessidade de medidas de proteção.	118
Figura 40 – Ângulos de proteção correspondentes à classe do SPDA e altura dos captadores.	125
Figura 41 – Laço em um condutor de descida.	128
Figura 42 – Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento correspondente ao nível de proteção do SPDA e a resistividade do solo.	131
Figura 43 – Princípios gerais para definição das zonas de proteção.	134
Figura 44 – Fluxograma da necessidade de SPDA para a ABNT NBR 5419 de 2005.	141
Figura 45 – Fluxograma do cálculo iterativo do gerenciamento de risco da ABNT NBR 5419 de 2015.	142
Figura 46 – Arranjos de aterramento conforme a ABNT NBR 5419.	144
Figura 47 – Índice cerâmico na região da estrutura.	146
Figura 48 – Área de exposição conforme a ABNT NBR 5419 de 2005.	147

Figura 49 – Método das esferas rolantes para a estrutura a ser protegida.	149
Figura 50 – Projeto de SPDA centro de referência de assistência social conforme ABNT NBR 5419:05.	150
Figura 51 – Detalhamento das conexões do SPDA.	151
Figura 52 – Transição da barra chata de alumínio para o subsistema de descidas.	151
Figura 53 – Caixa de conexão de medição com tampa desmontável por meio de ferramenta.	152
Figura 54 – Detalhamento da armadura de aço.	153
Figura 55 – Área de exposição conforme a ABNT NBR 5419 de 2015.	155
Figura 56 – Projeto de SPDA centro de referência de assistência social conforme ABNT NBR 5419:05.	160
Figura 57 - Caixa de conexão de medição com tampa desmontável por meio de ferramenta.	161
Figura 58 – Detalhamento das conexões do SPDA.	161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Níveis de proteção para classificação das estruturas.....	42
Quadro 2 – Fator A: Tipo de ocupação da estrutura.	46
Quadro 3 – Fator B: Tipo de construção da estrutura.	46
Quadro 4 – Fator C: Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas.....	47
Quadro 5 – Fator D: Localização da estrutura.....	47
Quadro 6 – Fator E: Topografia da região.....	47
Quadro 7 – Valores mínimos das correntes de pico das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante correspondentes aos devidos níveis de proteção.	49
Quadro 8 – Materiais do SPDA e condições de aplicação.	50
Quadro 9 – Posicionamento dos captores conforme nível de proteção e altura do captor.	51
Quadro 10 – Seções mínimas dos captores e anéis intermediários do SPDA.	52
Quadro 11 – Espessuras mínimas, em milímetros, dos captores naturais do SPDA.	53
Quadro 12 – Espaçamento médio dos condutores de descida não naturais.	54
Quadro 13 – Valor do coeficiente ki	55
Quadro 14 – Valor do coeficiente km	55
Quadro 15 – Seções mínimas dos condutores de descida do SPDA.....	58
Quadro 16 – Dimensões dos condutores de ligação equipotencial.....	63
Quadro 17 – Parâmetros das correntes das descargas atmosféricas obtidos do CIGRE.....	71
Quadro 18 – Valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção.	73
Quadro 19 – Valores mínimos das correntes de pico das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante correspondentes aos devidos níveis de proteção.	74
Quadro 20 – Probabilidades para os limites dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes aos devidos níveis de proteção.....	74

Quadro 21 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a erosão no ponto de impacto.	82
Quadro 22 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a aquecimento ôhmico nos componentes do subsistema de descidas.	83
Quadro 23 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a efeitos mecânicos nos componentes do subsistema de descidas.	83
Quadro 24 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a efeitos térmicos e mecânicos nas conexões do SPDA.	84
Quadro 25 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a erosão nos eletrodos de aterramento.	84
Quadro 26 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes aos efeitos térmicos, mecânicos e de arco no DPS contendo centelhador.	85
Quadro 27 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais para verificação do comportamento de DPS contendo óxido metálico em efeitos de sobrecarga.	86
Quadro 28 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais para verificação do comportamento de DPS contendo óxido metálico em efeitos dielétricos.	86
Quadro 29 – Fatores de localização de uma estrutura (<i>CD</i> ou <i>CDJ</i>).	96
Quadro 30 – Fator de instalação da linha (<i>CI</i>).	98
Quadro 31 – Fator do tipo da linha (<i>CT</i>).	98
Quadro 32 – Fator ambiental da linha (<i>CE</i>).	98
Quadro 33 – Valores da probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choques a seres vivos devido a tensões de passo e toque perigosas.	100
Quadro 34 – Valores da probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos.	100
Quadro 35 – Valores da probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falhas em sistemas internos dependentes do sistema coordenado de DPS e o nível de proteção.	101

Quadro 36 – Fatores de ponderação dependentes das condições de blindagem, aterramento e isolamento.....	101
Quadro 37 – Valor do fator $KS3$ dependente da fiação interna da estrutura.	103
Quadro 38 – Valor da probabilidade PTU de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas.....	105
Quadro 39 – Valor da probabilidade PEB relacionada ao nível de proteção para o qual os DPS foram projetados.	105
Quadro 40 – Valor da probabilidade PLD dependendo da resistência RS , em ohm por quilômetro, da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso UW do equipamento.....	105
Quadro 41 – Valor da probabilidade PLI dependendo do tipo da linha que adentra uma edificação a ser protegida e a tensão suportável dos seus sistemas internos.	106
Quadro 42 – Valores médios típicos de perdas $L1$ correspondente ao tipo de estrutura.	109
Quadro 43 – Fator de redução em função da superfície do solo ou piso.	109
Quadro 44 – Fator de redução em função das providências tomadas para redução das consequências de incêndio.	110
Quadro 45 – Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão nas estruturas.	110
Quadro 46 – Fator de aumento da quantidade relativa de perda na presença de perigo especial.	110
Quadro 47 – Valores médios típicos de perdas $L2$ correspondente ao tipo de estrutura.	112
Quadro 48 – Valores médios típicos de perdas $L3$ correspondente ao tipo de estrutura.	113
Quadro 49 – Valores médios típicos de perdas $L4$ correspondente ao tipo de estrutura.	115
Quadro 50 – Riscos toleráveis estabelecidos pela ABNT NBR 5419.....	115
Quadro 51 – Valores mínimos das correntes de pico das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante correspondentes aos devidos níveis de proteção.	120
Quadro 52 – Materiais do SPDA e condições de aplicação.	121

Quadro 53 – Materiais dos subsistemas de captação e descidas e condições de aplicação.	122
Quadro 54 – Materiais do SPDA e condições de aplicação.	123
Quadro 55 – Espaçamentos dos condutores em malha de acordo com a classe do SPDA.	125
Quadro 56 – Espessuras mínimas das chapas metálicas ou tubulações metálicas em sistemas de captação.....	126
Quadro 57 – Espaçamentos dos condutores de descida e interligações horizontais de acordo com a classe do SPDA.....	127
Quadro 58 – Coeficiente k_i em relação ao nível de proteção.	129
Quadro 59 – Coeficiente k_m em relação ao material isolante.....	129
Quadro 60 – Coeficiente k_c em relação ao número de descidas.	129
Quadro 61 – Dimensões mínimas dos condutores que interligam os barramentos de equipotencialização entre si e ao sistema de aterramento.....	133
Quadro 62 – Dimensões mínimas dos condutores que interligam os elementos metálicos internos aos barramentos de equipotencialização.	133
Quadro 63 – Seções transversais mínimas para os componentes de equipotencialização.....	136
Quadro 64 – Área da malha de Faraday ABNT NBR 5419 2005 x 2015.	143

LISTA DE SIGLAS

ELAT	Grupo de eletricidade atmosférica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ABNT/CB	Comitês Brasileiros da ABNT
ABNT/ONS	Organismos de Normalização Setorial
ABNT/CEE	Comissões de Estudo Especiais
NB	Norma Brasileira
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SPDA	Sistema De Proteção contra Descargas Atmosféricas
NP	Nível de Proteção
BEP	Barramento de Equipotencialização Principal
TAP	Terminal de Aterramento Principal
BEL	Barramento de Equipotencialização Local
PVC	Policloreto de Polivinila
MPS	Medidas de Proteção contra Surtos
CIGRE	<i>International Council on Large Electrical Systems</i>
LEMP	<i>Lightning electromagnetic impulse</i>
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO.....	19
1.2	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.3	OBJETIVOS.....	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E MEDIDAS DE PROTEÇÃO	23
2.1	ABNT NBR 5419	24
2.2	FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	25
2.3	PARAMETRIZAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	27
2.4	SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	31
2.4.1	Subsistema de captação	32
2.4.2	Subsistema de descida	33
2.4.3	Subsistema de aterramento	33
2.4.4	Métodos do SPDA.....	34
2.4.4.1	Princípio dos captores Franklin	34
2.4.4.2	Princípio da gaiola de Faraday.....	36
2.4.4.3	Método da esfera rolante ou método eletrogeométrico	38
2.5	NÍVEIS DE PROTEÇÃO DA ESTRUTURA A SER PROTEGIDA	41
3	ABNT NBR 5419:2005	43
3.1	GERENCIAMENTO DE RISCO	43
3.1.1	Densidade de descargas atmosféricas em uma região.....	43
3.1.2	Área de exposição de uma edificação.....	45
3.1.3	Fatores de ponderação da estrutura	46
3.1.4	Avaliação dos riscos e interpretação dos resultados	47
3.2	Aplicação do modelo eletromagnético.....	49
3.3	SUBSISTEMAS DO SPDA	49

3.3.1	Subsistema de captação	50
3.3.2	Subsistema de descida	53
3.3.3	Subsistema de aterramento	59
3.4	SISTEMA INTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DANOS.....	62
3.5	Ensaio de continuidade para armaduras de edificação.....	63
4	ABNT NBR 5419:2015.....	65
4.1	ABNT 5419 2015 PARTE 1: PRINCÍPIOS GERAIS	66
4.1.1	Parâmetros da corrente das descargas atmosféricas	66
4.1.2	Critérios para proteção de estruturas	72
4.1.3	Equação da corrente da descarga atmosférica.....	76
4.1.4	Efeitos das descargas atmosféricas e danos	77
4.1.4.1	Parâmetros para simulação da descarga atmosférica sobre os componentes do SPDA.....	81
4.2	ABNT 5419 2015 PARTE 2: GERENCIAMENTO DE RISCO	86
4.2.1	Fontes dos danos, tipos de danos e perdas.....	87
4.2.2	Tipos de riscos	88
4.2.3	Análise do número anual de eventos perigosos.....	90
4.2.4	Avaliação da probabilidade de danos.....	99
4.2.5	Análise de quantidade de perda.....	106
4.2.5.1	Perda de vida humana	107
4.2.5.2	Perda inaceitável de serviço público	111
4.2.5.3	Perda inaceitável de patrimônio cultural.....	112
4.2.5.4	Perda econômica	113
4.2.6	Risco tolerável e procedimento para avaliação dos custos das perdas e da necessidade de proteção	115
4.3	ABNT 5419-3: DANOS FÍSICOS A ESTRUTURAS E PERIGOS À VIDA	119
4.3.1	Classes do SPDA e parâmetros da corrente de descarga atmosférica	119

4.3.2	Subsistemas do sistema de proteção contra descargas atmosféricas	120
4.3.2.1	Subsistema de captação	124
4.3.2.2	Subsistema de descida	126
4.3.2.3	Subsistema de aterramento	130
4.3.3	Equipotencialização em proteção contra descargas atmosféricas	132
4.4	ABNT 5419 PARTE 4: SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS INTERNOS NA ESTRUTURA	133
4.4.1	Princípios gerais	134
4.4.2	Medidas básicas de proteção contra surtos	135
4.4.2.1	Aterramento e equipotencialização	135
4.4.2.2	Blindagem magnética e roteamento de linhas	137
4.4.2.3	Coordenação de DPS	137
5	COMPARAÇÃO ENTRE ABNT NBR 5419 DE 2005 E 2015	139
5.1	CORPO DA NORMA	139
5.2	GERENCIAMENTO DE RISCO	140
5.3	MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO	142
5.4	MÉTODO DE FRANKLIN	142
5.5	MÉTODO DA GAIOLA DE FARADAY	143
5.6	ELETRODOS DE ATERRAMENTO	143
6	ESTUDO DE CASO	145
6.1	PROJETO DE PDA CONFORME A ABNT NBR 5419 DE 2005	145
6.2	PROJETO DE PDA CONFORME A ABNT NBR 5419 DE 2015	154
7	CONCLUSÕES	163
	REFERÊNCIAS	164

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Segundo os dados do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), o Brasil é o país que mais recebe descargas atmosféricas no mundo, com cerca de mais de 50 milhões de descargas atmosféricas para a terra por ano. Conforme a empresa Ag Solve (2014) os dados obtidos nos últimos anos confirmam que uma a cada cinquenta morte por descarga atmosférica em todo mundo ocorrem no Brasil. E este número tende a aumentar devido ao crescimento da quantidade dos raios no Brasil de, em média, 11% para as cidades com mais de 200 mil habitantes.

O aumento expressivo da incidência de raios dos grandes centros urbanos é reflexo do aumento das tempestades e catástrofes climáticas. A ausência da cobertura vegetal e adensamento das mudanças antrópicas causam uma maior incidência de radiação solar e menor disponibilidade de água em grandes extensões de área, causando o fenômeno chamado de ilha de calor. Este quadro resulta em eventos de chuvas, ventos e raios mais fortes quando comparados a registros históricos dos mesmos locais.

A ABNT NBR 5419 é a norma brasileira responsável pela proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Através de um projeto adequado de proteção contra descargas atmosféricas, é possível reduzir a probabilidade de danos a construções, bem como suas instalações e ocupantes. Para uma maior compreensão do comportamento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e medidas de proteção contra surtos torna-se necessário a atualização do profissional em relação à norma e etapas de projeto, motivando o presente trabalho.

1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A versão da ABNT NBR 5419 do ano de 2005 sofreu alterações significativas com relação à eficiência da proteção contra descargas atmosféricas, recentemente,

no ano de 2015. No processo de planejamento do projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, muitos fatores probabilísticos relacionados às características da edificação, do meio em que se situa a edificação, das linhas de energia e sinal e tubulações que adentram à estrutura, foram adicionados, alterando relevantemente na avaliação da necessidade de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Métodos de proteção contra descargas atmosféricas também tiveram adequações ao cenário de densidade de descargas atmosféricas atual a novos estudos de capacidade de blindagem.

1.3 OBJETIVOS

Estudo das metodologias de projeto de proteção contra descargas atmosféricas normatizados pela ABNT NBR 5419 do ano de 2005 e entender os procedimentos para execução de projeto.

Estudo das metodologias de projeto de proteção contra descargas atmosféricas normatizados pela ABNT NBR 5419 do ano de 2015 e entender os procedimentos para execução de projeto apontando as alterações mais impactantes.

Elaborar um projeto de proteção contra descargas atmosféricas utilizando as duas versões da ABNT NBR 5419 e apresentar as diferenças quantitativas e de eficiência de proteção.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O vigente trabalho é composto por 6 capítulos, incluindo este introdutório. O Capítulo 2 aborda as referências teóricas do projeto contra descargas atmosféricas, bem como a norma brasileira de proteção contra descargas atmosféricas, o comportamento de uma descarga atmosférica e os métodos utilizados para proteção contra descargas atmosféricas.

O Capítulo 3 trata de uma revisão da versão predecessora da ABNT NBR 5419 abrangendo os requisitos e metodologia da norma para a realização de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas.

O Capítulo 4 trata de uma revisão da versão vigente da ABNT NBR 5419 abrangendo os requisitos e metodologia da norma para a realização de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas e aponta as principais alterações da norma em relação a sua versão anterior.

O Capítulo 5 trata de um estudo de caso utilizando-se paralelamente as duas versões da norma para o projeto de proteção contra descargas atmosféricas.

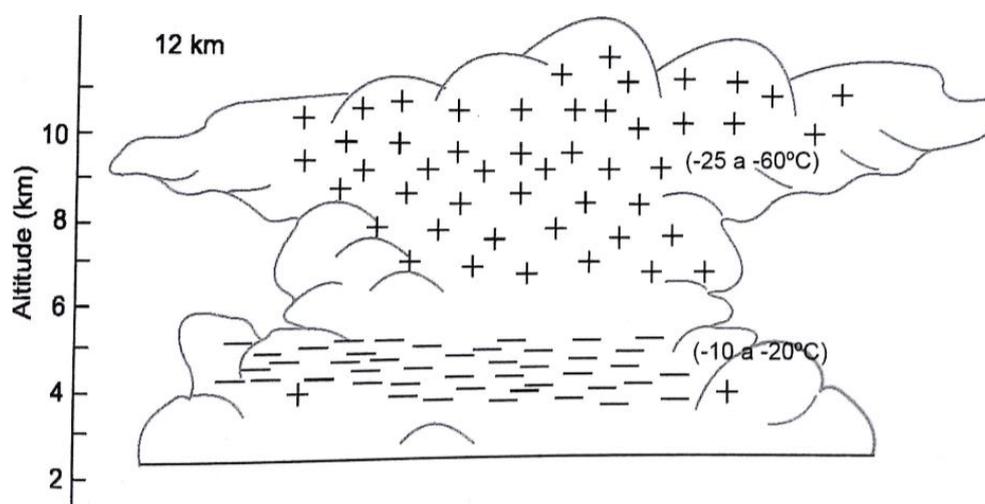
O Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo realizado ao longo deste trabalho.

2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E MEDIDAS DE PROTEÇÃO

O termo descarga atmosférica denota descargas que ocorrem intra-nuvens e entre nuvens e a terra. A melhor representação para este evento é a nuvem representada como um grande dipolo. Uma nuvem carregada pode chegar a uma altura de aproximadamente 12km do nível do solo variando sua extensão em alguns quilômetros quadrados, possuindo um formato de bigorna. A diferença de temperatura entre a face mais baixa e a mais alta da nuvem pode variar cerca de até 50 graus Celsius, o que causa a formação de correntes ascendentes do centro da nuvem e descendentes em sua borda. O bipolo é carregado pelo atrito oriundo do deslocamento de partículas dentro da nuvem (UMAN, 1984).

A Figura 1 representa uma distribuição típica de cargas elétricas em uma nuvem de tempestade (VISACRO FILHO, 2005).

Figura 1 – Distribuição de cargas e diferenças de temperatura em nuvem de tempestade.



Fonte: Silvério Visacro Filho, 2005.

O carregamento negativo na base do dipolo induz uma separação das cargas no solo, formando uma superfície eletricamente positiva na terra por toda extensão sob a nuvem e negativa em regiões afastadas. Como se sabe, o ar é um dos melhores dielétricos que existem, porém sempre há uma pequena porcentagem de moléculas ionizadas em seu entorno. Quando se tem uma diferença de potencial muito grande no ar, alguns desses íons são acelerados ganhando energia cinética, e, dependendo

do quão expressiva for essa diferença de potencial, a energia cinética desses íons pode ser aumentada o suficiente para causar colisões em cascata com outros íons, tornando o ar um elemento condutor de corrente elétrica (VISACRO FILHO, 2005).

2.1 ABNT NBR 5419

A ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, é o fórum nacional de normalização e foi fundada no ano de 1940 como uma organização privada sem fins lucrativos. A ABNT é responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (ABNT NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE).

A ABNT NBR 5419 é a norma responsabilizada pela proteção contra descargas atmosféricas no Brasil, e foi criada em 1977 como uma revisão da norma NB-1-65 do ano de 1970, pela Comissão de Estudo de Para-Raios para Sistemas de Transmissão e Distribuição. Em 1993 a norma sofreu alterações significativas em relação a sua versão anterior. No ano de 2001 a NBR 5419 revisou a sua versão do ano de 1993, baseando-se na norma internacional IEC 61.024, Protection of structures against lightning. No ano de 2005 a NBR 5419 passou por mais uma revisão, foi criada a Emenda 1, o qual foram substituídas tabelas e figuras baseadas em novos parâmetros da corrente da descarga atmosférica. Ao final do projeto que deu origem a versão de 2005 da NBR 5419, um grupo de estudos europeu (IEC TC81) já havia sido formado para uma atualização da norma internacional IEC 61.024, a qual era baseada a ABNT NBR 5419 de 2005. Em janeiro de 2006 a norma internacional IEC 61.024 ganhou uma nova versão totalmente reformulada, passando a se chamar IEC 62.305 e subdividiu-se em quatro volumes, sendo eles: princípios gerais, gerenciamento de risco, danos físicos e proteção de sistemas elétricos e eletrônicos no interior de estruturas protegidas.

A alteração da norma internacional a qual era baseada a ABNT NBR 5419 de 2005 gerou um projeto de revisão da norma brasileira. Então, após dez anos de estudo baseados na norma internacional IEC 62.305 - Lightning Protection, a nova versão da ABNT NBR 5419 foi publicada no ano de 2015 e foi dividida em quatro partes, bem como é disposta na norma internacional a qual foi baseada.

A expectativa da entrada em vigor da nova versão da ABNT NBR 5419 é de que haja um impacto positivo no setor elétrico de maneira geral, levando a mudanças no mercado de equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas, no comportamento dos profissionais e na integridade das edificações e de seus usuários.

2.2 FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Em questões de um projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas, a ABNT NBR 5419 considera dois tipos básicos de descargas, que costumam variar pela altitude do local onde ocorre a descarga. Em um local plano e em estruturas mais baixas, as descargas atmosféricas descendentes são as mais comuns, em oposição, para estruturas mais altas em locais mais acidentados, se predominam as descargas ascendentes (ABNT NBR 5419, 2015).

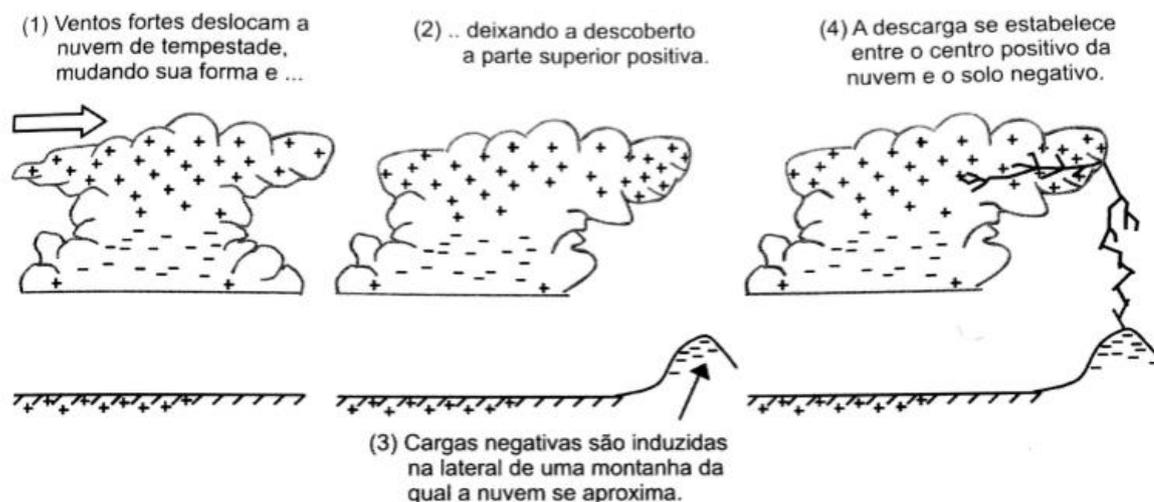
A primeira etapa de um relâmpago nuvem-solo é chamada de líder escalonado. Devido à grande diferença de potencial entre nuvem e solo, as cargas negativas do líder escalonado se movem por etapas de duração típica de um microssegundo, com pausa entre elas de 50 microssegundos, percorrendo durante cada etapa dezenas de metros até surgir na base da nuvem após alguns milissegundos e se dirigir ao solo. Durante o intervalo de tempo em que as cargas do líder se movimentam em direção ao solo, com uma velocidade de aproximadamente 100km/s, são produzidas variações de campo elétrico e magnético. Ao longo do canal de propagação da descarga atmosférica, um líder escalonado pode transportar cerca de 10C, e o tempo de alcance em um ponto próximo ao solo é em torno de algumas dezenas de milissegundos, tendo uma corrente média de aproximadamente 1kA que é transportada em um núcleo central do canal com alguns centímetros quadrados. Quando o canal do líder escalonado se aproxima do solo, a sua carga elétrica produz um campo elétrico intenso de cerca de 100 milhões de volts capaz de quebrar a rigidez dielétrica do ar próximo ao solo, ocasionando em um desprendimento de uma ou mais cargas positivas ascendentes do solo, que são denominadas líderes conectantes. Neste momento as cargas armazenadas no canal começam a se mover em direção ao solo iluminando o canal em todas as ramificações. As cargas depositadas no canal, bem como aquelas que estão ao redor e no topo do canal, movem-se em direção à terra pelo centro do canal por uma região com poucos centímetros de diâmetro.

Geralmente o pico da corrente, chamado valor de crista, é atingido em alguns microssegundos e decai para sua metade em cerca de 50 microssegundos, chamado tempo de meia cauda (ELAT, 2016).

Na minoria das vezes em que há uma descarga atmosférica para a terra, após ocorrer o fluxo da corrente de retorno, cessam-se os processos de transferência de cargas negativas para a terra, todavia na grande maioria das vezes ocorrem novas descargas através do mesmo canal, após o término da corrente de retorno. Nestes casos outros centros de carga da nuvem, localizados próximos ao canal, passam a suprir cargas negativas por meio de uma corrente reduzida, chamada de corrente de recarregamento do canal, ou *dart leader current*, normalmente variando entre 100 e alguns quiloampères. Assim, após o recarregamento do canal pode ocorrer uma descarga subsequente que transfere a carga armazenada para o solo através de uma corrente de retorno. Esse processo pode se repetir por algumas vezes, embora o mais comum é que ocorra, em média, por três vezes consecutivas (VISACRO FILHO, 2005).

Além das descargas negativas para a terra, podem-se ocorrer também descargas positivas para terra. Normalmente quando uma nuvem está carregada como um bipolo, a carga positiva na parte superior da nuvem se encontra blindada em relação à terra pela base negativa da nuvem, no entanto podem ocorrer ventos fortes de maior altitude que são capazes de deslocar a parte superior da nuvem descobrindo assim a parte superior positiva e eliminando tal blindagem. Então, quando existem partes elevadas no solo, como uma montanha, por exemplo, junto à parte lateral da nuvem, podem ocorrer descargas que interligam tais partes causando uma transferência de cargas positivas para a terra. Assim um canal descendente positivo pode evoluir a partir de um centro de cargas positivas e um canal ascendente negativo pode ocorrer a partir do solo, possibilitando neste caso uma eventual conexão entre esses canais e causando uma descarga positiva para o solo. Este tipo de descarga é mais raro que as descargas negativas para o solo, tornando-se mais usual na presença de objetos altos posicionados sobre elevações, porém são de maior intensidade, a direção da incidência das descargas tende a apresentar uma maior inclinação e possuem uma forma de onda com variações mais lentas. A Figura 2 mostra todas as etapas descritas neste parágrafo para a ocorrência de descargas positivas para a terra. (VISACRO FILHO, 2005).

Figura 2 – Processo de uma ocorrência de uma descarga positiva.



Fonte: Silvério Visacro Filho, 2005.

Ainda em alguns raros casos, registros de correntes de descargas atmosféricas mostram uma oscilação do sinal da corrente, que alguns pesquisadores designaram de descarga bipolar. Tal evento ocorre quando a extremidade superior de um canal de descarga negativa encontra um canal conectado a um centro de carga positiva na nuvem, possibilitando que quando a descarga negativa é cessada, passa a fluir pelo canal uma descarga positiva, ambas com formato impulsivo (VISACRO FILHO, 2005).

Pela natureza aleatória das descargas atmosféricas, mesmo para um tipo de descarga, podem haver variações bem significativas em suas formas de ondas. Porém ao se determinar escalas de tempo específicas e adequadas para comparação das curvas de corrente, pesquisadores verificaram que a dispersão no corpo principal da onda era pequena, podendo-se assim se adotar uma abordagem estatística para prever um comportamento característico de cada tipo de descarga.

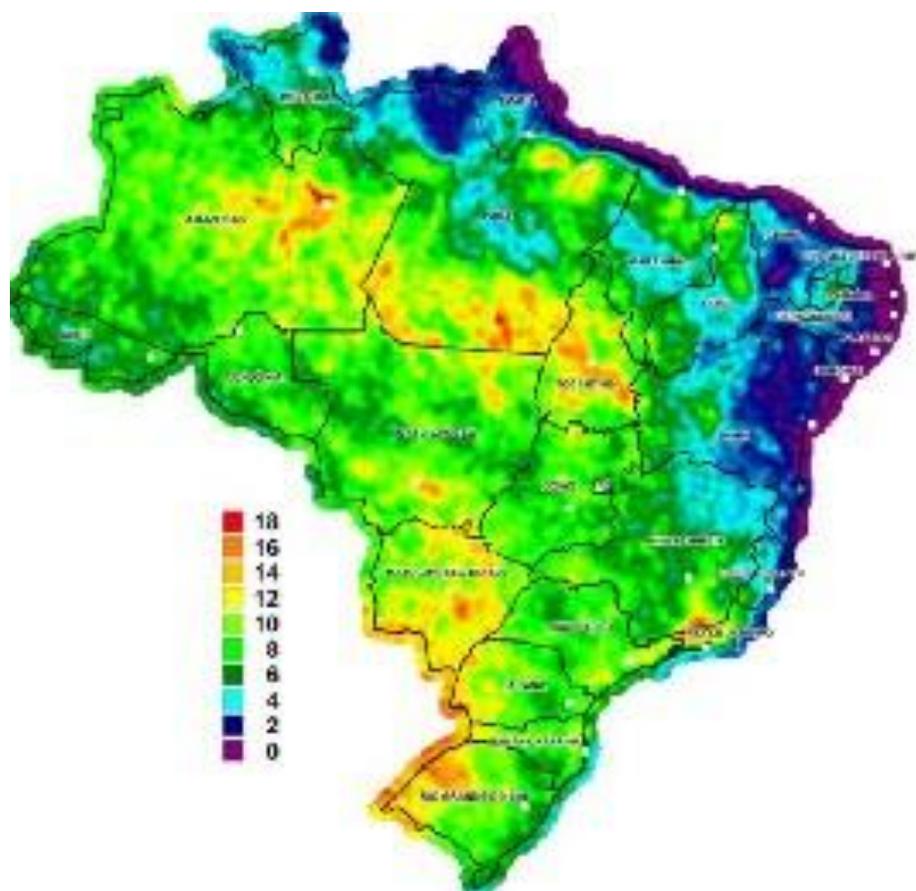
2.3 PARAMETRIZAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O conhecimento dos parâmetros de uma descarga atmosférica é de fundamental importância para o dimensionamento dos componentes de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Os parâmetros de maior interesse na perspectiva da engenharia de proteção são os parâmetros de frequência de incidência geográfica e os parâmetros físicos da descarga atmosférica.

Para uma avaliação de proteção de uma estrutura, indubitavelmente, o primeiro estudo que deve ser feito é a probabilidade do volume em questão ser atingido por uma descarga atmosférica. O parâmetro que quantifica a frequência de incidência é a densidade de descargas local, usualmente representada pelo índice N_g (ABNT NBR5419-2,2015).

Os valores de densidade de descargas atmosféricas são obtidos pelo mapa de densidade de descargas gerado pelo ELAT/INPE (Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para todo o território brasileiro, a partir de registros de pulsos luminosos capturados do espaço no período de 1998 a 2011, pelo sensor Lightning Imaging Sensor (LIS), que se localiza dentro do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission, da NASA (ABNT NBR5419-2,2015). É possível obter a densidade de descargas atmosféricas exata para uma edificação pelo endereço da web http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng/. A Figura 3 dispõe o mapa de densidade de descargas para o território brasileiro.

Figura 3 – Mapa de descargas atmosféricas – Brasil.



Fonte: ELAT, 2016.

Os parâmetros físicos da descarga atmosférica, por outro lado, são essenciais para o dimensionamento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. As curvas representadas para as descargas atmosféricas são modelagens das curvas registradas em estações de medição de descargas atmosféricas, e não representam fielmente uma onda de uma descarga atmosférica, não obstante, o emprego das ondas geradas em laboratórios decorre da necessidade de ensaios experimentais corriqueiros capazes de avaliar, dentro de certos parâmetros, o comportamento dos equipamentos, dispositivos e materiais frente a uma sobretensão associada a uma descarga atmosférica.

Um impulso de tensão é uma onda de tensão transitória aperiódica aplicada intencionalmente que em geral, cresce rapidamente até o valor de crista e depois decresce mais lentamente a zero (IEC 60-1 – High-voltage test techniques part 1). Por essa definição, uma das representações de onda de descarga muito utilizada para se compreender a corrente de descarga atmosférica é a curva normalizada dupla exponencial representada pela Figura 4. A Equação 1 define os parâmetros de entrada para a obtenção da curva dupla exponencial.

$$I(t) = i_0 \cdot A \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

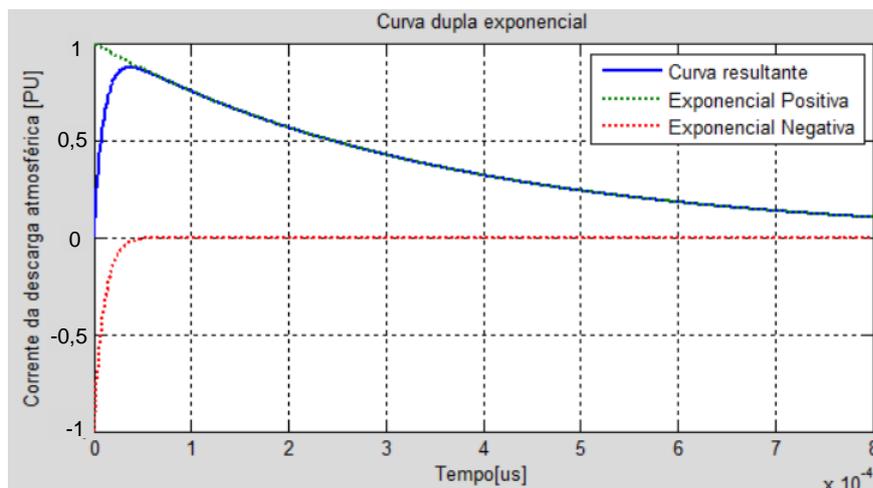
Onde:

$I(t)$ é a corrente atmosférica em função do tempo em quiloampéres (kA);

i_0 é o módulo do valor da corrente da descarga atmosférica no instante de tempo zero para cada uma das exponenciais isoladamente expressa em quiloampéres (kA);

A , α e β são constantes a serem determinadas que dependem do formato do impulso da corrente da descarga atmosférica.

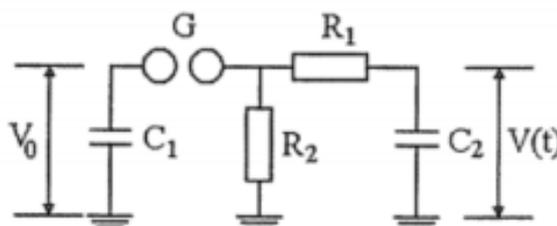
Figura 4 – Impulso de corrente normalizado.



Fonte: O Autor, 2016.

A adoção deste tipo de curva advém da facilidade de sua geração em ambiente laboratorial. Esta onda pode ser obtida a partir de um simples circuito como é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Circuito simplificado de um gerador de impulso.



Fonte: Silvério Visacro Filho, 2005.

Onde:

V_0 é a tensão de uma fonte DC externa, em volts (V);

C_1 é o capacitor de descarga, em Farads (F);

G é um centelhador de esferas;

R_1 é um resistor de amortecimento, em Ohm (Ω);

R_2 é um resistor de descarga, em Ohm (Ω);

C_2 é o capacitor utilizado como corpo de prova, em Farads (F).

O funcionamento do circuito da Figura 5 é bastante simples. Primeiramente o C_1 é conectado a uma fonte DC e carregado até o valor desejado, então ele é desconectado da fonte externa e o centelhador de esferas é disparado. Como $R_2 \gg R_1$, a corrente passa quase que inteiramente pelo resistor R_1 carregando C_2 . Quando as tensões dos capacitores ficam aproximadamente iguais, os dois capacitores começam a se descarregar por R_2 (ABNT NBR 6936, 1992).

A modelagem do circuito da Figura 5 é dada pela Equação 2.

$$V(t) = A. (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2)$$

Onde:

$$A = \frac{V_0}{R_1 C_2} \frac{1}{(b - a)};$$

$$a, b = \frac{\alpha_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)^2 - \alpha_2};$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1};$$

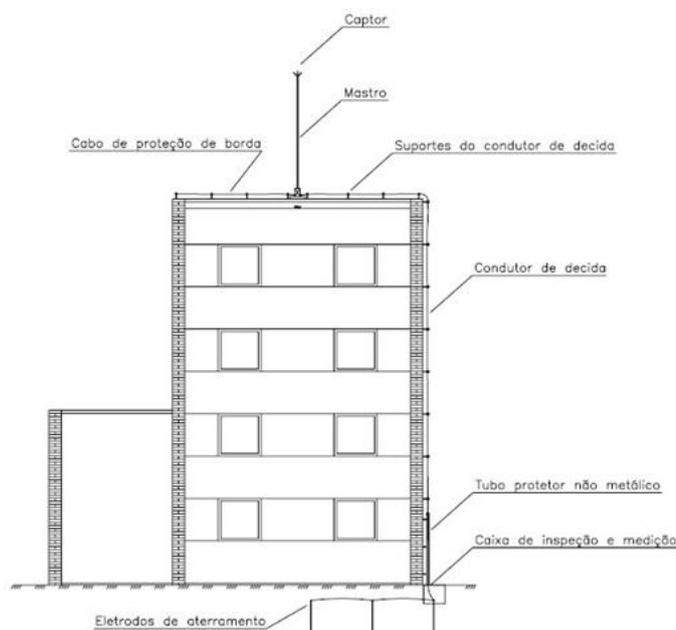
$$\alpha_2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}.$$

2.4 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) tem como objetivo básico a interceptação da incidência direta de um raio em uma estrutura e condução da corrente elétrica dispersando-a para a terra, pelos subsistemas de proteção, visando minimizar os impactos sobre a edificação. O SPDA é dividido em um subsistema de captação, o subsistema de descidas e o subsistema de aterramento que funcionam com um dreno ao solo da corrente elétrica incidente aos arredores ou na estrutura protegida.

A Figura 6 representa um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas.

Figura 6 – Sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas.



Fonte: Silvério Visacro Filho, 2016.

O sistema proteção contra descargas atmosféricas é composto por hastes e condutores e devem ser cuidadosamente projetados para que o risco de danos seja minimizado (ABNT NBR 5419-1, 2015).

2.4.1 Subsistema de captação

O subsistema captor é a parte do sistema de proteção contra descargas atmosféricas que recebe diretamente a incidência das descargas atmosféricas, tornando-se essencial o correto posicionamento do mesmo para que seja possível a condução da descarga atmosférica até a terra sem oferecer maiores riscos às instalações e estruturas existentes no volume protegido. A composição desse sistema é dada por hastes, condutores suspensos e/ou condutores em malha.

Os captores são divididos entre captores naturais e não naturais. Um elemento da construção de uma estrutura pode ser considerado um captor natural quando metálico e potencialmente exposto a descargas atmosféricas, porém a avaliação da continuidade deste componente é essencial para que possa ser considerado como

um elemento natural. Os captosres não naturais por sua vez são constituídos de elementos metálicos distribuídos para este fim.

A NBR5419 exige que um subsistema captor seja implementado respeitando ao menos um dos três métodos em questão: o método da esfera rolante, o método das malhas e o método do ângulo de proteção (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Quando obedecidas as exigências da NBR 5419, para o nível de proteção adequado a uma edificação, há uma significativa limitação da probabilidade de penetração das correntes provenientes das descargas atmosféricas em uma estrutura.

2.4.2 Subsistema de descida

O subsistema de descidas tem o propósito de reduzir ao máximo a probabilidade de danos ocorrentes pelas descargas atmosféricas que percorrem o SPDA. Esta redução é diretamente proporcional ao número de caminhos paralelos para a corrente elétrica nas descidas entre o sistema de captação e aterramento do sistema de proteção, bem como a seção transversal dos condutores de descida e a escolha dos trajetos das descidas visando obter o caminho mais curto possível entre os captosres e a terra. Ainda, para uma melhor dispersão da corrente da descarga atmosférica, devem ser implantados anéis condutores contornando toda a extensão da estrutura (ABNT NBR 5419-3, 2015).

2.4.3 Subsistema de aterramento

Um projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas é denominado eficiente na condição em que a corrente da descarga atmosférica incidente no sistema projetado é drenada pelos condutores do SPDA sem oferecer riscos de centelhamento para a estrutura, seus ocupantes e sua ocupação. O subsistema de aterramento trata da disposição dos eletrodos de aterramento aspirando uma baixa resistência para uma efetiva drenagem da corrente para o solo.

A resistência de aterramento deve ser compatibilizada com a resistividade do solo local, topologia e disposição de eletrodos de aterramento.

Conforme a revista O Setor Elétrico (Aterramentos Elétricos, 2010, p.30), muitos fatores são relevantes para a determinação da resistividade do solo, como o tipo do solo, sua umidade, a concentração de sais dissolvidos em água, a sua compactação, a capacidade de retenção de água, a continuidade física, a temperatura do solo, entre outras. No entanto é importante ressaltar a dificuldade de se estabelecer a relação desses fatores e o comportamento real da resistividade do solo, portanto a medição da resistividade no local, pela utilização de métodos e equipamentos específicos para esta função, obtém a resistividade do solo com maior exatidão.

Os requisitos básicos de um aterramento consistem na permissão do escoamento da corrente de descarga para a terra com baixo valor de resistência e em uma configuração dos eletrodos que permitem o controle do gradiente de potencial. De uma forma geral espera-se que um aterramento tenha capacidade suficiente de dispersão para o solo de determinados valores de corrente, sem, contudo, permitir que os potenciais na superfície deste solo atinjam níveis comprometedores à segurança (VISACRO FILHO, 2005).

2.4.4 Métodos do SPDA

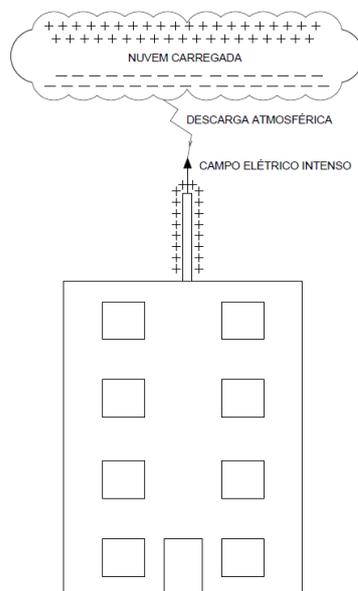
Fundamentalmente, existem três métodos válidos pela ABNT NBR 5419 para a disposição dos materiais do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. A principal diferença entre os tipos de sistemas de proteção reside na atuação dos mesmos e a aplicabilidade de cada método depende das características gerais do volume a ser protegido (ABNT NBR 5419-3,2015).

2.4.4.1 Princípio dos captadores Franklin

O método dos captadores é baseado no princípio das pontas, onde uma haste vertical é elevada no ponto mais alto de uma estrutura de maneira que quando a mesma se encontra sob uma nuvem carregada, produz uma alta concentração de

cargas elétricas e um campo magnético intenso tornando o ar condutor em suas proximidades, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Haste de Franklin.



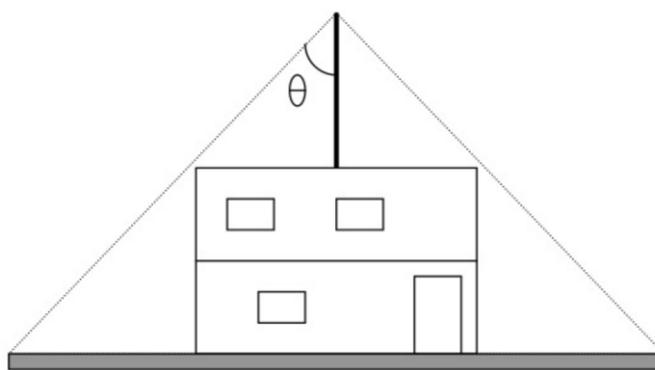
Fonte: Geraldo Kindermann, 2016.

A descarga captada pela ponta da haste é conduzida pelo subsistema de descida até escoar na terra pelo sistema de aterramento. É de suma importância o sistema de proteção contra descargas atmosféricas estar adequadamente instalado e dimensionado para que as tensões ao longo do sistema não sejam elevadas a ponto de comprometer a segurança da edificação e seus componentes interiores (VISACRO FILHO, 2005).

Ao longo dos estudos realizados a fim de se obter a região espacial de proteção dada a um sistema de para raios, muitos pesquisadores propuseram zonas de proteção como a de Gay Lussac em 1823, onde a zona protegida era dada por um cilindro de altura “h” e raio “2h”, ou a de Nelsens em 1892, onde a zona protegida era um cone de ângulo 30° entre sua altura e geratriz. Porém, estudos mais recentes afirmam que a zona de proteção para este método é em formato de cone com ângulo entre sua altura e geratriz variando dependendo da altura da edificação e o nível de proteção estabelecido pelo tipo e ocupação da estrutura (VISACRO FILHO, 2005).

O conceito da proteção pelo método do ângulo de proteção determina que qualquer descarga atmosférica destinada a atingir uma estrutura dentro do cone de proteção, seja desviada para o SPDA e drenada até a terra pelos seus subsistemas. Ao se utilizar o cone regular como zona espacial de proteção contra descargas atmosféricas, deve-se dimensionar a altura mínima da haste de Franklin de modo que a estrutura a ser protegida fique inteiramente dentro do volume de proteção, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Volume de proteção com haste Franklin.



Fonte: Kindermann, 1997.

2.4.4.2 Princípio da gaiola de Faraday

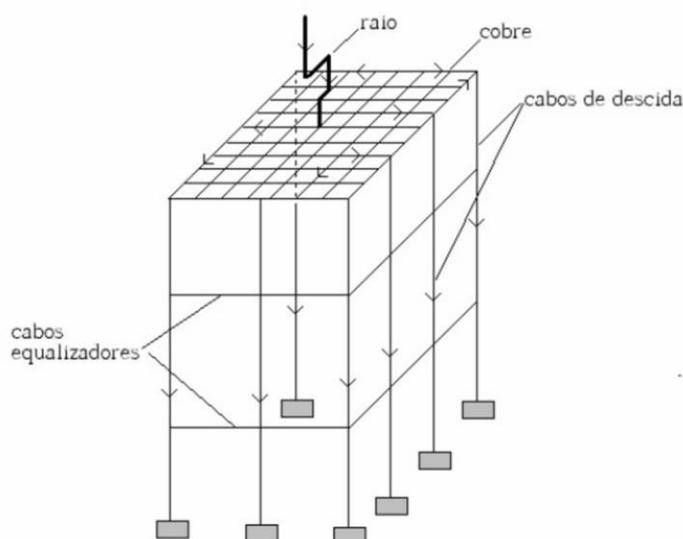
A filosofia da Gaiola de Faraday recebe esse nome em homenagem ao seu idealizador, o físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867). Faraday, em seus experimentos, percebeu que era possível blindar um volume dos efeitos eletromagnéticos quando esse volume era envolvido por uma gaiola metálica (KINDERMANN, 1997).

O princípio básico para a proteção do tipo gaiola de Faraday é a Lei de Lenz (H. F. E. Lenz, 1804-1864), que consiste na ideia de que qualquer sistema condutor em anel tende a reagir às variações de campos magnéticos pela circulação da corrente induzida no anel, que, por sua vez, cria um campo magnético contrário à variação do campo magnético indutor (KINDERMANN, 1997).

A gaiola de Faraday é formada por várias quadrículas de material condutor formando anéis em torno da edificação que, por sua configuração e material, blindam a estrutura protegendo-a da penetração do raio no seu interior. Em sua famosa experiência, Faraday demonstrou que quando correntes passam pela gaiola distribuídas uniformemente, o campo elétrico no interior do volume protegido é nulo, e, quando as correntes não são uniformes, o campo elétrico no interior do volume protegido não é nulo, mas se torna significativamente pequeno. Como nenhuma condição na natureza é um modelo ideal, a descarga atmosférica ao atingir uma estrutura produz uma dissipação não uniforme, causando induções internas devido à variação do campo magnético existente no interior da gaiola.

Basicamente, o funcionamento da proteção do tipo Gaiola de Faraday é bem-sucedido porque as correntes induzidas nas quadrículas criam campos magnéticos de oposição, levando o raio para as bordas da malha e o obrigando a fluir para o cabo de descida (KINDERMANN, 1997), como ilustrado na Figura 9.

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



Fonte: Kindermann, 1997.

A qualidade da blindagem que envolve a edificação é diretamente proporcional ao número de malhas que a Gaiola de Faraday possui, podendo-se assim constatar que um volume só é inteiramente protegido por esse método quando envolto por uma

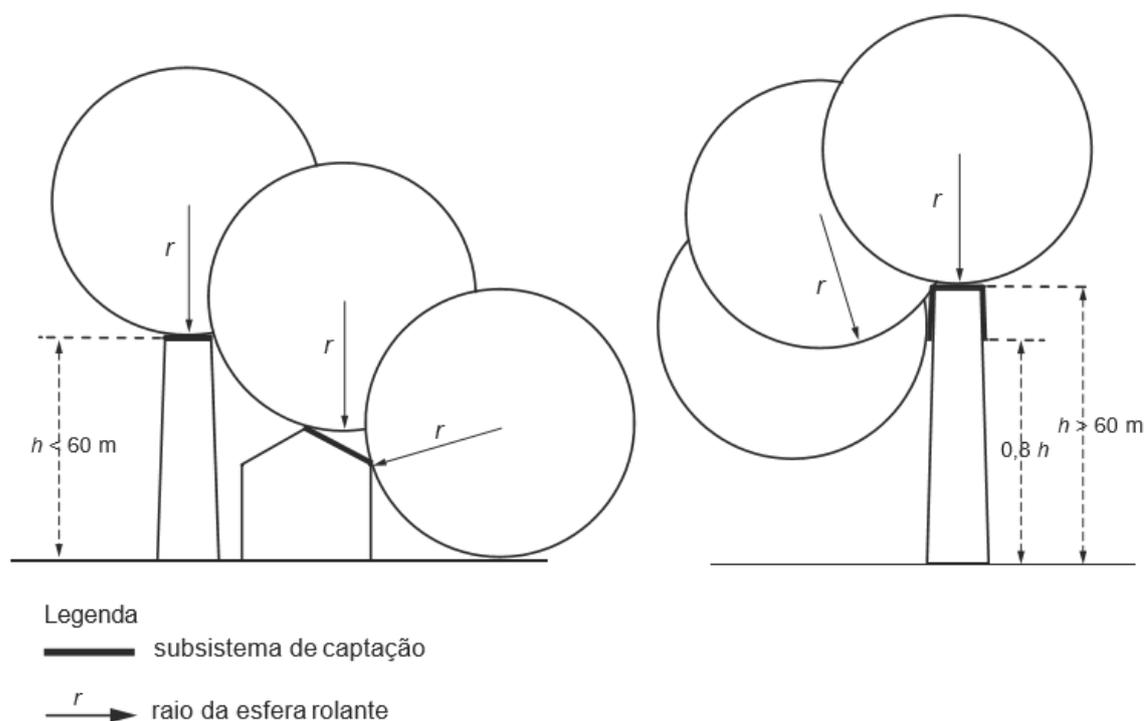
caixa metálica totalmente condutiva, porém, como isso é inviável na prática, as distâncias estipuladas dos espaçamentos das malhas, em questão de projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas, variam de acordo com o nível de proteção na qual é qualificada a estrutura (VISACRO FILHO, 2005).

No caso em que a cobertura de uma edificação é metálica e atende os requisitos de componente natural do SPDA da ABNT NBR 5419, esta forma uma blindagem completa da Gaiola de Faraday e dispensa a instalação de uma malha no topo da edificação (ABNT NBR 5419-3, 2015).

2.4.4.3 Método da esfera rolante ou método eletrogeométrico

De acordo com a ABNT NBR 5419 de 2015, o método eletromagnético ou método da esfera rolante é baseado na delimitação do volume de proteção dos captadores de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Esse método, muito utilizado para linhas de transmissão, foi simplificado para ser utilizado na proteção de edificações, e consiste basicamente em “rolar” uma esfera fictícia sobre o solo e o sistema de proteção de modo a determinar os pontos mais vulneráveis a descargas atmosféricas da estrutura, que é onde são os possíveis pontos para impacto direto de descargas atmosféricas e onde, por consequência deverão ser instalados os captadores do subsistema de captação. Portanto esse método tem muitas limitações por ser um método puramente geométrico, desconsiderando alguns fenômenos físicos essenciais com relação a descargas atmosféricas. A Figura 10 demonstra um modelo esquemático do método das esferas rolantes.

Figura 10 – Avaliação da proteção da edificação pelo método das esferas rolantes.

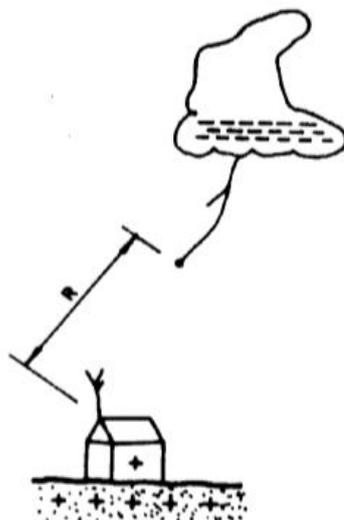


Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Conforme a terceira parte da versão vigente da ABNT NBR 5419, a incidência lateral de uma descarga atmosférica pode ocorrer para qualquer estrutura com a altura menor que o raio de atração, porém a probabilidade deste tipo de descarga é geralmente desprezível para alturas inferiores a 60 metros. Portanto, para estruturas com altura superior a 60 metros, deve-se considerar a instalação de um subsistema de captação também nas laterais da estrutura, como mostrado na Figura 10.

O modelo eletromagnético é fundamentado no conceito de raio de atração, que constitui na distância entre o canal descendente e a estrutura a qual ocorrerá o fechamento do percurso entre os canais descendente e ascendente, como ilustrado na Figura 11. Admita-se que a probabilidade de haver uma descarga atmosférica diretamente na estrutura é inversamente proporcional ao raio de atração (VISACRO FILHO, 2005).

Figura 11 – Conceito da distância R entre os líderes ascendente e descendente.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Durante muitos anos foram realizados testes laboratoriais com modelos em escalas reduzidas, registros fotográficos e filmagens de descargas atmosférica em torres instrumentadas, e foram desenvolvidas relações empíricas que relacionam o raio de atração com o valor de pico da corrente de descarga atmosférica. Tanto a versão da ABNT NBR 5419 de 2005 quanto a de 2015 utiliza a Equação 3 para a definição do raio de atração.

$$R_a = 10I_P^{0,65} \quad (3)$$

Onde:

R_a é o raio de atração, ou o raio da esfera rolante, expresso em metros (m);

I_P é a menor corrente de pico da descarga atmosférica em quiloampères (kA) para o determinado nível de proteção.

2.5 NÍVEIS DE PROTEÇÃO DA ESTRUTURA A SER PROTEGIDA

Conforme a primeira parte da ABNT NBR 5419 de 2015, o nível de proteção de uma estrutura ou classe de SPDA é um índice que classifica a proteção a ser utilizada associando as características da edificação a um conjunto de parâmetros da corrente da descarga atmosférica para garantir que os valores especificados em projeto não estejam super ou subdimensionados quando houver a ocorrência de uma descarga em uma determinada estrutura. A NBR 5419 determina quatro diferentes níveis de proteção dependentes dos parâmetros das estruturas a serem protegidas, os quais devem ser tomados como base nas decisões de projetos, se considerando os níveis de severidade da situação. Os níveis de proteção estabelecidos pela versão de 2005 da ABNT NBR 5419 são:

- Nível I: esse nível se refere aos danos de estruturas adjacentes, como indústrias petroquímicas de materiais explosivos. Portanto esse nível é o mais severo quanto à perda de patrimônio;
- Nível II: refere-se às construções protegidas, cuja falha do sistema de proteção contra descargas atmosféricas pode provocar danos de bens com valores estimáveis ou provocar pânico aos integrantes presentes na edificação atingida;
- Nível III: refere-se a estruturas de uso comum, como edifícios residenciais, lojas de departamento e indústrias de manufaturados simples;
- Nível IV: esse nível se refere a construções onde a presença de pessoas não é rotineira. Tais estruturas para este nível são compostas por materiais não inflamáveis, sendo o produto no interior delas também não inflamáveis, tais como armazéns de concreto para produtos de construção.

A relação de níveis de proteção referente as características das estruturas a serem protegidas está disponibilizada no Quadro 1.

Quadro 1 – Níveis de proteção para classificação das estruturas.

Classificação da estrutura	Tipo da estrutura	Efeitos das descargas atmosféricas	Nível de Proteção
Estruturas comuns ¹	Residências	Perfuração da isolamento de instalações elétricas e de incêndio, e danos materiais. Danos normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio.	III
	Fazendas, estabelecimentos agropecuários	Risco direto de incêndio e tensões de passo perigosas. Risco indireto devido à interrupção de energia e risco de vida para animais devido à perda de controles eletrônicos, ventilação, suprimento de alimentação e outros.	III ou IV ²
	Teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas	Danos às instalações elétricas e possibilidade de pânico. Falha do sistema de alarme contra incêndio, causando atraso no socorro.	II
	Bancos, companhias de seguro, comerciais e outros	Mesmos efeitos listados para teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas, além de efeitos indiretos com a perda de comunicações, falhas dos computadores e perda de dados.	II
	Hospitais, casa de repouso e prisões	Como para escolas, além de efeitos indiretos para pessoas em tratamento intensivo e dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas.	II
	Indústrias	Efeitos indiretos conforme o conteúdo das estruturas, variando de danos pequenos a prejuízos inaceitáveis e perda de produção.	III
	Museus, locais arqueológicos	Perda de patrimônio cultural insubstituível.	II
Estruturas com risco confinado	Estações de telecomunicação, usinas elétricas, indústrias	Interrupção inaceitável de serviços públicos por breve ou longo período de tempo. Risco indireto para mediações devido a incêndios, e outros com risco de incêndio.	I
Estruturas com risco para os arredores	Refinarias, postos de combustível, fábricas de fogos, fábricas de munição	Risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores.	I
Estruturas com risco para o meio ambiente	Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios bioquímicos	Risco de incêndio e falhas de operação, com consequências perigosas para o local e para o meio ambiente.	I
<p>¹ ETI (equipamentos de tecnologia da informação) podem ser instalados em todos os tipos de estruturas, inclusive estruturas comuns. É impraticável a proteção total contra danos causados pelos raios dentro destas estruturas; não obstante, devem ser tomadas medidas (conforme a ABNT NBR 5410) de modo a limitar os prejuízos a níveis aceitáveis.</p> <p>² Estruturas de madeira: nível III; estruturas nível IV. Estruturas contendo produtos agrícolas potencialmente combustíveis (pós de grãos) sujeitos a explosão são considerados com risco para arredores.</p>			

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

3 ABNT NBR 5419:2005

A ABNT NBR 5419 de 2005 foi baseada nas IEC 61024-1:1990, IEC 61024-1-1:1991 – Guide A e IEC 61024-1-2:1998 – Guide B e incorpora a Emenda 1 de 29 de julho de 2005 cancelando e substituindo a edição anterior ABNT NBR 5419:2001.

Esta norma rege as condições de projetos objetivando a proteção contra descargas atmosféricas de estruturas com diversos tipos de ocupação, exceto sistemas ferroviários, sistemas elétricos e de comunicação externos à estrutura, veículos, aeronaves, navios e plataformas marítimas. A NBR 5419 também não contempla a proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra os impactos eletromagnéticos causados pelas descargas atmosféricas (ABNT NBR 5419, 2015).

O projeto de um SPDA seguido desta norma não impede que a estrutura, bem como os bens e pessoas que a habitam, sofram algum dano devido às descargas atmosféricas, entretanto a utilização da NBR 5419 para o referente projeto reduz de forma significativa os riscos sofríveis por uma edificação na ocorrência de um centelhamento perigoso (ABNT NBR 5419, 2015).

3.1 GERENCIAMENTO DE RISCO

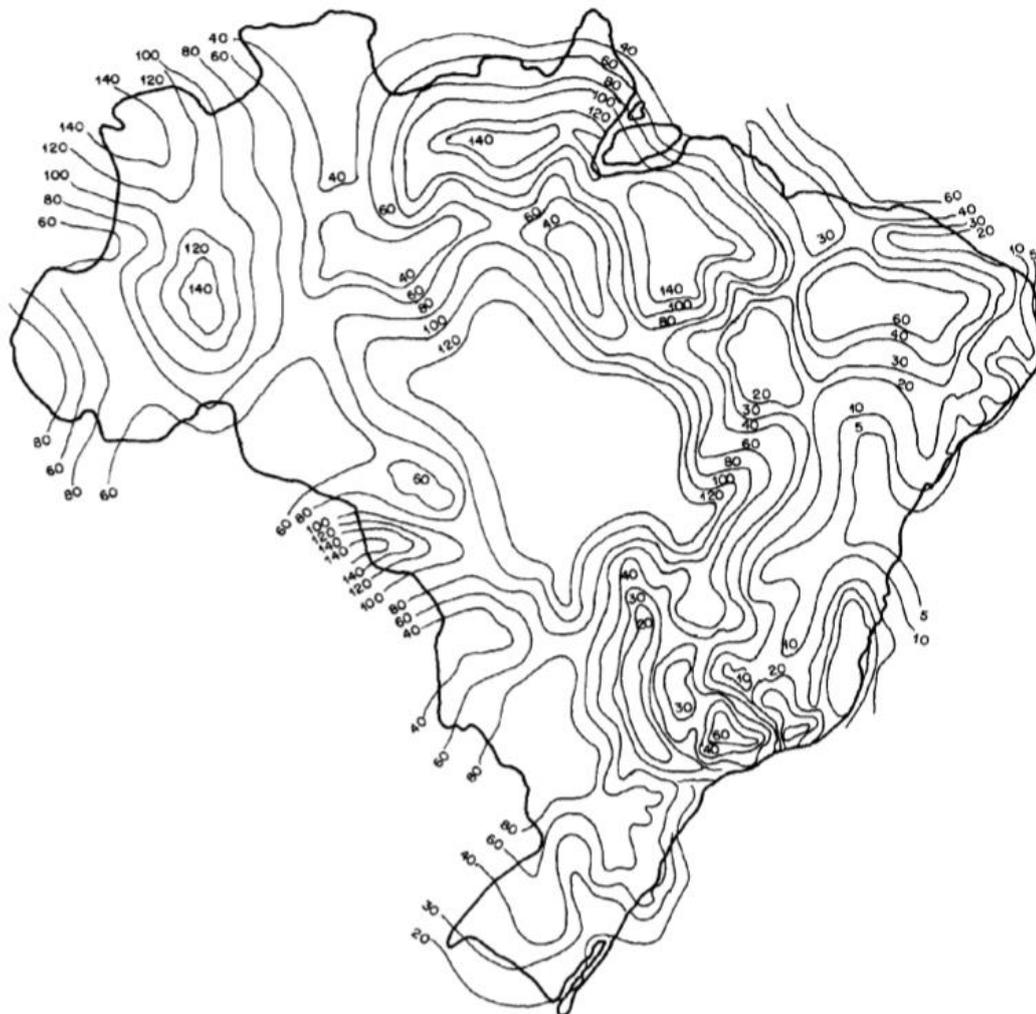
Os tipos de estruturas devem ser avaliados pela necessidade ou não de um sistema completo de proteção contra descargas atmosféricas. A ABNT NBR 5419 de 2005 estima tal necessidade através de uma equação considerando a densidade de descargas atmosféricas para a terra por ano na região onde se localiza a estrutura, a área de exposição equivalente da estrutura, e cinco fatores de ponderação vinculados às características da edificação em questão e seus arredores.

3.1.1 Densidade de descargas atmosféricas em uma região

A NBR 5419 de 2005 utiliza o índice cerâmico de uma região para estimar a densidade de descargas atmosféricas para a terra. Os índices cerâmicos classificam o número de dias de tempestades por ano em um dado local. Tais índices, em sua

maior parte, foram obtidos ainda no início do século XX por um intermédio de ponderações realizadas por observatórios espalhados pelo país. A Figura 12 representa o mapa isoceráunico do Brasil.

Figura 12 – Mapa Isoceráunico do território brasileiro.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

De acordo com a ABNT NBR 5419 de 2005, a densidade de descargas atmosféricas para a terra pode ser estimada pela Equação 4.

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (4)$$

Onde:

N_g é o número de raios por quilômetros quadrados ao ano ($1/\text{km}^2.\text{ano}$);

T_d é o número de dias de trovoadas por ano, obtido na Figura 12.

3.1.2 Área de exposição de uma edificação

A área de exposição de uma estrutura, ilustrada na Figura 13, leva em conta suas dimensões em todas as direções. Conforme a ABNT NBR 5419 de 2005 se considera que a área de exposição equivalente de uma edificação retangular simples é regida pela Equação 5.

$$A_e = L.W + 2.H.(L + W) + \pi.H^2 \quad (5)$$

Onde:

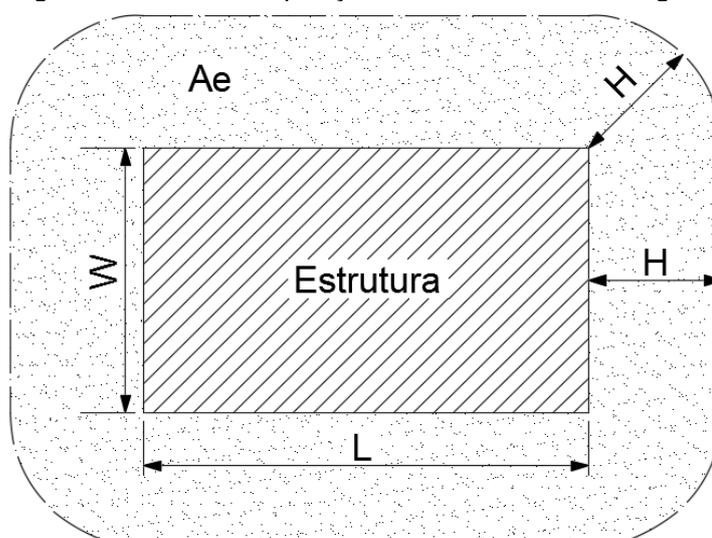
A_e é a área equivalente da estrutura em metros quadrados (m^2);

L é o comprimento da estrutura em metros (m);

W é a largura da estrutura em metros (m);

H é a altura da estrutura em metros (m);

Figura 13 – Área de exposição de uma estrutura retangular.



Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2005.

3.1.3 Fatores de ponderação da estrutura

Os fatores de proteção denotam a importância relativa do risco em cada caso. Não só os danos materiais sobre a estrutura são levados em consideração nos fatores de ponderação, como também a interrupção de serviços nela existentes. Os fatores estão dispostos nos Quadros 2 a 6 (ABNT NBR 5419, 2005).

Quadro 2 – Fator A: Tipo de ocupação da estrutura.

Tipo de Ocupação	Fator A
Casas e outras estruturas de porte equivalente	0,3
Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa	0,7
Fábricas, oficinas e laboratórios	1
Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo	1,2
Locais de afluência de público (por exemplo: igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposições, lojas de departamento, correios, estações e aeroportos, estádios de esportes)	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades	1,7

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Quadro 3 – Fator B: Tipo de construção da estrutura.

Tipo de Construção	Fator B
Estrutura de aço revestida, com cobertura não metálica ¹	0,2
Estrutura de concreto armado com cobertura não metálica	0,4
Estrutura de aço revestida ou de concreto armado com cobertura metálica	0,8
Estrutura de alvenaria ou concreto simples com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1
Estrutura de madeira ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1,4
Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples com cobertura metálica	1,7
Qualquer estrutura com teto de palha	2

¹Estruturas de metal aparente que sejam contínuas até o nível do solo estão excluídas desta tabela, porque requerem apenas um subsistema de aterramento.

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Quadro 4 – Fator C: Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas.

Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos	Fator C
Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos	0,3
Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos ¹	0,8
Subestações de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas e estações de rádio	1
Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições e locais de afluência de público	1,7
¹ Instalações de alto valor ou materiais vulneráveis a incêndios e às suas consequências.	

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Quadro 5 – Fator D: Localização da estrutura.

Localização	Fator D
Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (por exemplo: em grandes cidades ou em florestas)	0,4
Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar	1
Estrutura completamente isolada, ou que ultrapassa, no mínimo, duas vezes a altura de estruturas ou árvores próximas	2

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Quadro 6 – Fator E: Topografia da região.

Localização	Fator D
Planície	0,3
Elevações moderadas, colinas	1
Montanhas entre 300 e 900 metros	1,3
Montanhas acima de 900 metros	1,7

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

3.1.4 Avaliação dos riscos e interpretação dos resultados

A avaliação do projetista na versão predecessora da ABNT NBR 5419 é realizada por um simples produto apresentado pela Equação 6 que leva em conta basicamente parâmetros regionais e civis da edificação avaliada.

$$N_{dc} = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6} \cdot F_A \cdot F_B \cdot F_C \cdot F_D \cdot F_E \quad (6)$$

Onde:

N_{dc} é a o valor ponderado da frequência média anual de danos prevista para uma estrutura, expresso em descargas atmosféricas para a terra por ano (1/ano);

N_g é a densidade de descargas atmosféricas para a terra na região onde se encontra a edificação, expressa em descargas atmosféricas para a terra por quilômetro quadrado ao ano (1/km².ano);

A_e é a área de exposição equivalente da edificação, expressa em metros quadrados (m²);

$F_i, i \in \{A, B, C, D, E\}$, é o fator de ponderação dependente do tipo e localização da estrutura.

A necessidade ou não da instalação de um SPDA para a estrutura depende do valor de resultante da ponderação descrita na Equação 6. Os limites de riscos reconhecidos pela comunidade técnica internacional são:

- Riscos maiores que 10^{-3} são considerados inadmissíveis, confirmando a necessidade de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas;
- Para riscos entre 10^{-5} e 10^{-3} requer um acordo entre o projetista e o usuário para a conveniência da instalação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas;
- Quando os riscos são inferiores a 10^{-5} , a estrutura dispensa um sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

É válido destacar que a dispensa da instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas não garante que uma estrutura não possa ser atingida por um raio (ABNT NBR 5419, 2005).

3.2 Aplicação do modelo eletromagnético

O modelo eletromagnético deve delimitar o volume de proteção dos captadores de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas independente de como estejam constituídos.

O Quadro 7 dispõe os raios das esferas rolantes para os quatro níveis de proteção e suas determinadas correntes de pico mínimas da descarga atmosférica.

Quadro 7 – Valores mínimos das correntes de pico das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante correspondentes aos devidos níveis de proteção.

Critérios de interceptação			NP			
	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico mínima	<i>I</i>	<i>kA</i>	3	5	10	15
Raio da esfera rolante	<i>r</i>	<i>m</i>	20	30	45	60

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

3.3 SUBSISTEMAS DO SPDA

A ABNT NBR 5419 de 2005 especifica os critérios de projeto que devem ser utilizados para a realização de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, determinando os métodos de proteção, dimensionamento dos materiais e condições para utilização de componentes naturais para os subsistemas de captação, descida e aterramento do SPDA.

A norma exige que os materiais utilizados devem suportar os efeitos térmicos e eletrodinâmicos causados pela corrente da descarga atmosférica sem que haja danificações na estrutura ou centelhamento perigosos, bem como devem suportar esforços acidentais previsíveis. Os riscos de corrosão dos materiais utilizados devem ser previstos e compatíveis com a aplicação dos mesmos, bem como sua capacidade de condução de corrente (ABNT NBR 5419, 2005).

O Quadro 8 especifica materiais que podem ser utilizados em um SPDA conforme suas condições de aplicação, porém outros materiais condutores e com características mecânicas, elétricas e químicas também podem ser utilizados se justificados em projeto.

Quadro 8 – Materiais do SPDA e condições de aplicação.

Material	Aplicação				Corrosão		
	Ao ar livre	Enterrado	Embutido em concreto	Embutido em reboco	Resistência	Risco agravado	Eletrolítica
Cobre	Maciço, encordoadado ou como revestimento de haste de aço		-	Maciço ou encordoadado	A mais substâncias	Cloretos altamente concentrados; compostos sulfúricos; materiais orgânicos	-
Aço de construção comum ou galvanizado a quente	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	-	Boa, mesmo em solos ácidos	-	Com o cobre
Aço inoxidável	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	-	Maciço ou encordoadado	A muitas substâncias	Água com cloretos dissolvidos	-
Alumínio	Maciço ou encordoadado	-	-	-	-	Agentes básicos	Com cobre
Chumbo	Como revestimento		-	-	Altas concentrações de sulfatos	Solos Ácidos	-

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

3.3.1 Subsistema de captação

A distribuição dos captadores em uma edificação deve ser realizada levando em consideração ao menos um dos métodos de sistema de proteção contra descargas atmosféricas estabelecidos por esta norma, sendo eles o método do ângulo de proteção (método de Franklin), o método da esfera rolante (modelo eletromagnético) e condutores em malha (método da gaiola de Faraday).

O posicionamento dos captadores, bem como sua maneira de distribuição e capacidade de proteger um volume em questão dependem diretamente do nível de proteção adequado e, para o método de Franklin também depende da altura da edificação. Os requisitos disponibilizados pela versão da norma de proteção contra descargas atmosféricas do ano de 2005 para a distribuição dos captadores estão dispostos no Quadro 9.

Quadro 9 – Posicionamento dos captosres conforme nível de proteção e altura do captor.

Altura [m] NP	Ângulo de proteção (α) em função da altura (h) do captor e do Nível de proteção				Largura do módulo da malha
	0 - 20	21 - 30	31 - 45	46 - 60	
I	25°				5
II	35°	25°			10
III	45°	35°	25°		10
IV	55°	45°	35°	35°	20

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

O método de proteção de Franklin é restringido pela altura da edificação dependendo do seu nível de proteção previamente estabelecido, e, para estruturas com alturas inferiores a 60 metros, onde não se aplicam o método do ângulo de proteção, são válidos apenas os métodos da esfera rolante ou Gaiola de Faraday, que dependem somente do nível de proteção como disposto no Quadro 7 e no Quadro 9. Para alturas superiores a 60 metros a ABNT NBR 5419 de 2005 restringe a disposição do subsistema de captação à utilização do método da Gaiola de Faraday.

Para o projeto de subsistema de captação, a versão de 2005 da norma de proteção contra descargas atmosféricas ainda condiciona que para a utilização do método de malhas, a malha deve constituir um anel fechado com o seu comprimento igual ou inferior ao dobro de sua largura. Na norma ainda consta que, para um sistema de proteção contra descargas atmosféricas isolado da estrutura, o subsistema de captação deve distar pelo menos 2 metros de qualquer instalação metálica do volume protegido, e, contraditoriamente, para um sistema de proteção contra descargas atmosféricas não isolado, o subsistema captor pode ser instalado diretamente sobre o teto, desde que a corrente de descarga nos condutores deste subsistema não possam causar qualquer dano a estrutura e seus ocupantes.

Os materiais que devem ser utilizados para o subsistema de captação, bem como suas seções transversais mínimas independentemente de suas espessuras, estão dispostos no Quadro 10.

Quadro 10 – Seções mínimas dos captores e anéis intermediários do SPDA.

Material	Captore e anéis intermediários [mm ²]
Aço galvanizado a quente ou embutido em concreto	50
Cobre	35
Alumínio	70

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

A ABNT NBR 5419 de 2005 também especifica que qualquer elemento condutor exposto que possa ser atingido diretamente por uma descarga atmosférica deve ser considerado com parte do SPDA, como no caso de coberturas metálicas, mastros ou outros elementos salientes na cobertura, calhas de recolhimento de águas pluviais, estruturas metálicas para fachadas ou outros elementos metálicos expostos acima de 60 metros da superfície. Porém caso algum elemento condutor exposto não suporte o impacto direto de um raio, o mesmo deve estar dentro do volume protegido.

Os elementos metálicos expostos, caso satisfaçam os requisitos da norma de proteção contra descargas atmosféricas para serem considerados captore naturais, podem substituir parcialmente ou totalmente o subsistema de captação. Para um elemento ser considerado um captore natural, o mesmo deve atender aos seguintes requisitos (ABNT NBR 5419, 2005):

- A espessura do material metálico deve ser igual ou superior a 0,5 milímetros ou, quando for necessário a prevenção contra perfurações ou pontos quentes no volume a proteger, deve atender os requisitos do Quadro 11;
- Quando não for importante a prevenção contra perfurações ou pontos quentes no volume a proteger, a espessura do elemento metálico pode ser inferior a 2,5 milímetros;
- O elemento metálico não pode ser revestido de material isolante. Não é considerado como isolamento uma camada de pintura de proteção, ou até 0,5 milímetros de revestimento de asfalto ou até 1mm de PVC;
- A continuidade elétrica entre as diversas partes deve ser executada visando a durabilidade.

Quadro 11 – Espessuras mínimas, em milímetros, dos captosres naturais do SPDA.

Material	Não gera ponto quente	Não perfura	Pode perfurar
Aço galvanizado a quente	4	2,5	0,5
Cobre	5	2,5	0,5
Alumínio	7	2,5	0,5
Inox	4	2,5	0,5

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

3.3.2 Subsistema de descida

O subsistema de descida deve ser interligado por diversos condutores em paralelo em sua extremidade superior com o subsistema de captação e em sua extremidade inferior com o subsistema de aterramento de modo que a corrente de uma eventual descarga atmosférica percorra o menor caminho possível para reduzir o risco de centelhamento perigoso. Uma implantação de descidas de um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas deve ser considerada para construções de alvenaria ou de qualquer tipo que não contenha uma armadura metálica interligada, podendo ser até mesmo embutida. No entanto, para o caso de torres metálicas, postes e mastros, é totalmente dispensável a necessidade de condutores de descida paralelos ao longo de sua extensão.

No caso de uma instalação de um subsistema de descida isolado da estrutura, se deve prever um condutor de descida para cada estrutura de suporte quando o subsistema de captação for constituído de redes de condutores, entretanto, quando o subsistema de captosres for constituído de um ou mais mastros separados, ou um ou mais condutores horizontais separados, deve ser previsto um condutor de descida para cada mastro ou cada extremidade do condutor horizontal, respectivamente.

Quando a estrutura a ser protegida puder estar em contato direto com o subsistema de descidas sem o risco de explosão, incêndio ou falhas nos sistemas internos, pode ser projetado um sistema de descidas não isolado para o SPDA. Para esta situação, os espaçamentos entre os condutores de descidas dependem do nível de proteção em questão e do perímetro do topo da estrutura, como mostrado no

Quadro 12, considerando uma quantidade mínima de duas descidas para este subsistema.

Quadro 12 – Espaçamento médio dos condutores de descida não naturais.

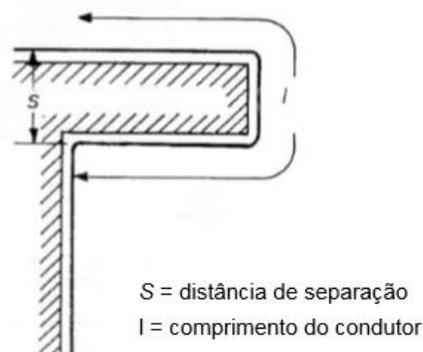
Nível de Proteção	Espaçamento médio [m]
I	10
II	15
III	20
IV	25

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

O Quadro 12 representa a distância média entre os condutores de descida, se considerando a segurança deste subsistema, além disso, os condutores de descida devem ser posicionados uniformemente em todo o perímetro, sendo instalado um condutor de descida em cada vértice da edificação, quando possível.

A ABNT NBR 5419 de 2005 ainda especifica outros requisitos para instalação da disposição das descidas do subsistema de descida não naturais, considerando que os mesmos devem ser instalados de maneira a passar no mínimo 50 centímetros de distância entre portas, janelas e outras aberturas na edificação. Os condutores devem ser retilíneos e verticais evitando configurações como a ilustrada na Figura 14, sendo conectado por anéis condutores em todo o perímetro da estrutura a cada 20 metros de distância, onde o primeiro anel deve ser o de aterramento, ou, na impossibilidade deste, deve estar situado no máximo a 4 metros do nível do solo.

Figura 14 – Laço formado por um condutor de descida.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

A situação da Figura 14 deve ser evitada a fim de reduzir a possibilidade de centelhamento perigosos, porém quando não for possível outra forma de descida dos condutores de descidas, deve-se projetar o “laço” de tal forma que a separação S atenda a Equação 7.

$$S \geq k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot l \quad 7$$

Onde:

S é a distância de separação mostrada na Figura 16 em metros (m);

k_i é um coeficiente adimensional que depende do nível de proteção do volume a ser protegido conforme o Quadro 13;

k_c é um coeficiente adimensional que depende do material de isolamento do condutor de descida conforme o Quadro 14;

k_m é um coeficiente adimensional que depende da configuração das Figuras 15 a 17;

l é o comprimento do condutor, expresso em metros (m).

Quadro 13 – Valor do coeficiente k_i .

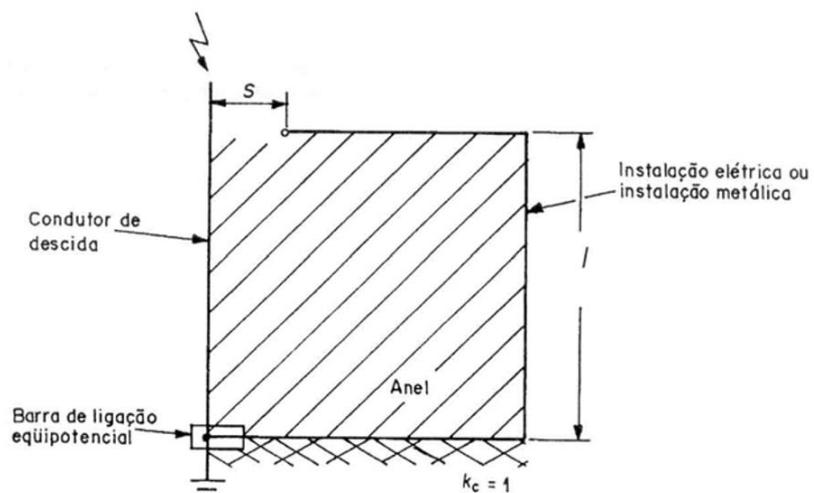
Nível de Proteção	k_i
I	0,1
II	0,075
III - IV	0,05

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

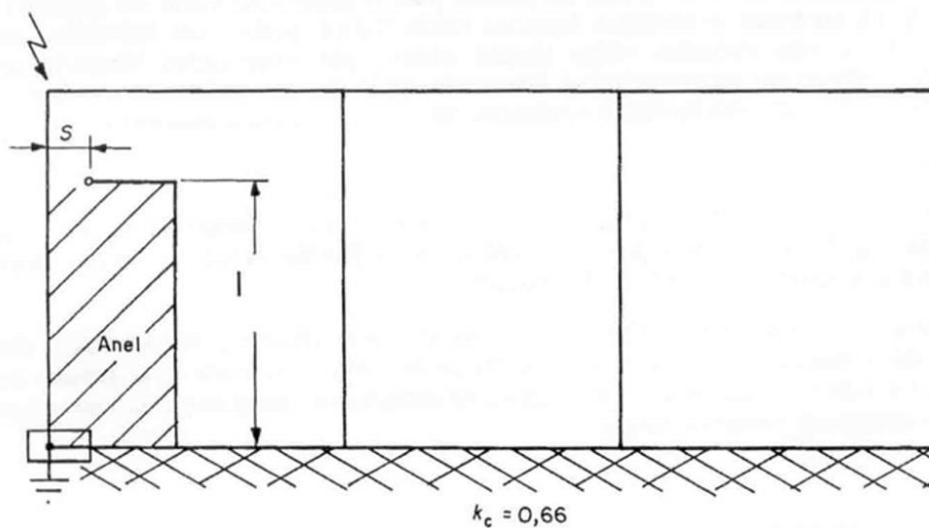
Quadro 14 – Valor do coeficiente k_m .

Material	k_m
Ar	1
Sólido	0,5

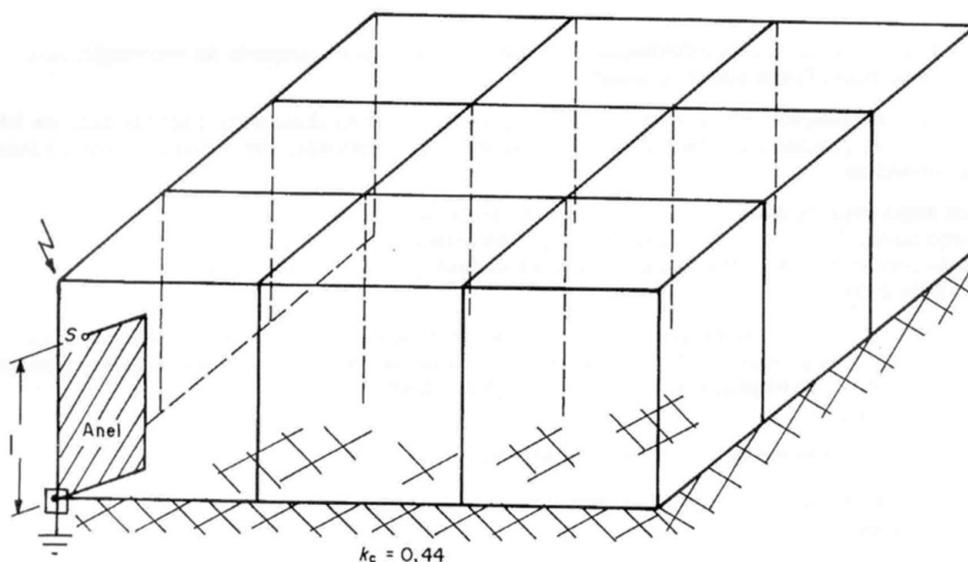
Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Figura 15 – Valor do coeficiente k_c em uma configuração unidimensional.

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Figura 16 – Valor do coeficiente k_c em uma configuração bidimensional.

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Figura 17 – Valor do coeficiente k_c em uma configuração tridimensional.

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Um sistema de descidas para um SPDA isolado deve ser considerado e instalado distando no mínimo 10 centímetros da edificação, quando a parede da estrutura a ser protegida for de material inflamável e a elevação da temperatura dos condutores de descida puderem resultar algum risco para este material. Caso contrário, se a parede da edificação for de material não inflamável, os condutores de descidas podem ser instalados embutidos ou fixados na estrutura, ou se for de material inflamável, porém não apresentar risco com o aquecimento dos condutores de descida, o sistema de descida pode ser instalado fixado na estrutura da edificação. Em um caso específico, quando o condutor escolhido para o subsistema de descidas é o alumínio, deve-se atentar que, mesmo com capa isolante, o mesmo não pode ser instalado dentro de calhas ou tubos de águas pluviais, para evitar que haja corrosão do condutor (ABNT NBR 5419, 2005).

Para os condutores de descida não naturais, a ABNT NBR 5419 de 2005 especifica o dimensionamento mínimo dos materiais condutores de descida dependendo da altura do edifício a ser protegido, como é disposto no Quadro 15.

Quadro 15 – Seções mínimas dos condutores de descida do SPDA.

Material	Descidas para estruturas inferiores a 20 metros [mm ²]	Descidas para estruturas superiores a 20 metros [mm ²]
Aço galvanizado a quente ou embutido em concreto	50	50
Cobre	16	35
Alumínio	25	70

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Os condutores de descidas, além de todas as especificações já mencionadas, devem ter o mínimo número de conexões possível, sendo elas por meio de soldagem exotérmica, oxiacetilênica ou elétrica, conectores de pressão ou compressão, rebites ou parafusos. Para a conexão de condutores chatos, como uma barra chata de alumínio, devem ser usados no mínimo dois parafusos M8 ou um parafuso M10 com porcas, e, ainda para este tipo de condutor de descida, se tiver uma espessura inferior a 2mm, devem ser utilizadas contraplacas com área mínima de 100 centímetros quadrados fixadas com, ao menos, dois parafusos M8. As conexões do tipo solda devem ser suportar a passagem da corrente de descarga atmosférica.

Todos os condutores de descida devem ser protegidos contra danos mecânicos por um eletroduto rígido PVC ou metálico no mínimo a 2,5 metros acima da superfície, sendo que se for metálico, o condutor de descida deve ser conectado nas extremidades do mesmo. E cada condutor de descida, com exceção dos condutores de descida naturais ou embutidos, deve ser conectado a uma caixa de medição instalada próxima do ponto de ligação ao eletrodo de aterramento, a qual deve ser possivelmente aberta exclusivamente por meio de ferramenta para possíveis medições de continuidade.

Segundo o mesmo caso do sistema de captação, o sistema de descidas também pode ser realizado por condutores de descidas naturais, quando esses são rigorosamente projetados conforme a norma ABNT NBR 5419 de 2005. Conforme a norma, na existência de pilares metálicos na estrutura, os mesmos podem ser utilizados como condutores de descida naturais. Da mesma forma, quando existirem elementos metálicos na edificação, os mesmos podem ser considerados naturais desde que sejam de aço galvanizado, cobre, alumínio ou aço inox, com no mínimo 0,5

milímetros de espessura. No caso de estruturas de concreto armado, as armaduras de concreto poderão ser utilizadas como descidas naturais, desde que sejam realizados diversos testes de continuidade entre o topo e a base de alguns pilares e também entre armaduras de pilares diferentes, constatando uma resistência de descida inferior a 1 Ohm. A norma ainda requisita que, para utilizar as armaduras de concreto da edificação como condutores de descidas naturais, pelo menos a metade dos cruzamentos das barras da armadura, estejam firmemente amarradas com arame de aço torcido, e as barras na região de trespasse apresentem um comprimento de sobreposição mínimo de 20 vezes o diâmetro das barras e sejam amarradas com arame de aço torcido, soldadas ou interligadas por uma conexão mecânica adequada.

Para as descidas naturais, a equalização dos condutores de descida devem ser equipotencializados a cada 20 metros, assim como para os condutores não naturais, e todas as massas metálicas devem ser ligadas diretamente a uma armadura local, que pode ser um pilar, uma viga ou laje, a qual deve ser ligada a um eletrodo de aterramento assim como o barramento de equipotencialização que são conectados todos os sistemas elétricos de potência e de sinal.

3.3.3 Subsistema de aterramento

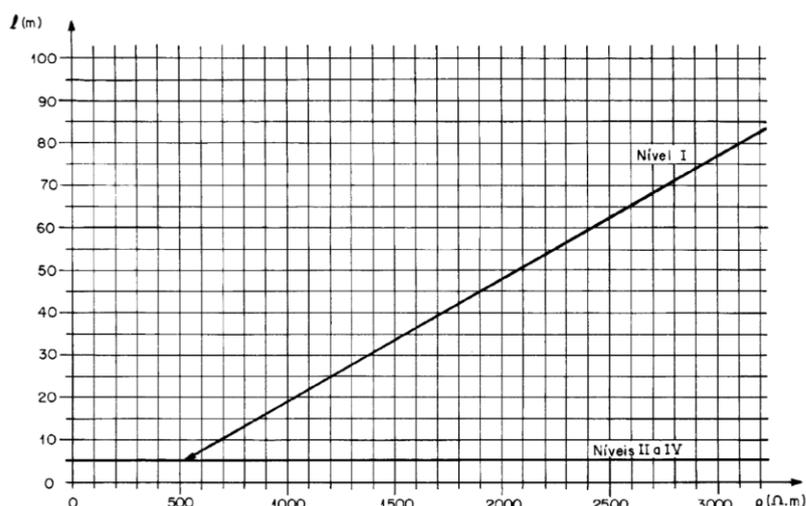
Para uma proteção contra raios, um subsistema de aterramento único e integrado à estrutura é a melhor opção para todas as finalidades, porém quando se tem vários sistemas de aterramentos em um empreendimento, os mesmos devem ser interligados por um material condutor de baixa impedância de modo que a interligação seja equipotencial. A ABNT NBR 5419 exige que, para um subsistema de aterramento não natural, o mesmo possua uma resistência de aproximadamente 10 Ohms, de maneira a reduzir gradientes de potencial no solo e, conseqüentemente, a probabilidade de centelhamento perigoso no sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Porém, em alguns terrenos, como no caso de terrenos de alta resistividade, pode se tornar impossível atingir tal resistência de aterramento, se tornando necessário técnicas como tratamento de solo para diminuir a resistividade do solo. De qualquer forma, a resistência, para condutores não naturais, deve ser

justificada em projeto assim como as técnicas utilizadas para atingir a resistência de aterramento de 10 Ohms se necessárias.

A norma rege que os tipos de eletrodos de aterramento a serem utilizados sejam pelas fundações da edificação como eletrodos naturais, condutores em anel, hastes verticais ou inclinadas e condutores horizontais radiais, se evitando os eletrodos em formas de placas ou pequenas grades para evitar o risco de corrosões. No caso dos eletrodos não naturais, podem ser utilizados eletrodos de cobre com seção mínima de 50 milímetros quadrados, ou eletrodos de aço galvanizado a quente ou embutido em concreto de no mínimo 80 milímetros quadrados de seção transversal.

A Figura 18 demonstra as especificações da ABNT NBR 5419 de 2005 para o comprimento mínimo dos eletrodos não naturais de aterramento conforme o nível de proteção e a resistividade do solo. Para solos onde a resistividade do solo diminua conforme a profundidade e que as camadas de baixa resistividade se encontrar abaixo do nível onde as hastes de aterramento normalmente são cravadas, se deve considerar eletrodos de aterramento mais profundos.

Figura 18 – Comprimento mínimo dos eletrodos de aterramento não naturais.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Preferencialmente, deve se utilizar as próprias armaduras do concreto das fundações da edificação como eletrodo natural de aterramento, porém, quando estas

não atendem os requisitos mínimos estabelecidos pela norma de proteção contra descargas atmosféricas, deve ser considerado a instalação dos eletrodos de aterramentos externamente ao volume a proteger, distando aproximadamente 1 metro das fundações da estrutura. Para eletrodos de aterramento formando condutores em anel ao redor da edificação, os mesmos devem ser instalados a uma profundidade mínima de 50 centímetros no solo. A instalação das hastes de aterramento deve ser feita de maneira uniforme ao longo do perímetro da estrutura e instaladas em paralelo com uma distância de separação inferior ao seu próprio comprimento (ABNT NBR 5419, 2005).

Conforme a ABNT NBR 5419 de 2005 a disposição dos eletrodos de aterramento não naturais pode ser realizada por dois arranjos, arranjo A e arranjo B.

O arranjo A é composto de eletrodos radiais e é indicado para solos de baixa resistividade (até 100 Ω .m) e para pequenas estruturas (com perímetro até 25 metros). Cada condutor de descida deve ser conectado a pelo menos um eletrodo distinto e devem ser instalados no mínimo dois eletrodos que não devem ter comprimento inferior ao estabelecido pela Figura 18 dependendo do nível de proteção. Para solos com resistividade inferior a 30 Ω .m, os comprimentos da Figura 18 podem ser desconsiderados se a resistência de aterramento equivalente for inferior a 10 Ω (ABNT NBR 5419, 2005).

O arranjo B é composto por eletrodos em forma de anel ao redor da edificação ou embutido nas fundações da estrutura e é obrigatório a utilização deste arranjo para estruturas com perímetro superior a 25 metros (ABNT NBR 5419, 2005)

Para a utilização das armaduras de aço embutidas nas fundações da estrutura como eletrodos de aterramento naturais, as mesmas devem respeitar as seguintes condições dispostas pela ABNT NBR 5419 de 2005.

- Cerca de 50 por cento dos cruzamentos e soldas das armaduras de aço das estacas, dos blocos de fundação e das vigas de baldrame devem ser firmemente amarradas com arame recozido, e as barras horizontais devem ser sobrepostas por no mínimo 20 vezes o seu diâmetro e firmemente amarrado com arame recozido ou soldadas;

- Fundação de alvenaria pode ser considerada como eletrodo de aterramento quando esta é envolvida por um anel condutor em todo seu perímetro, desde que o condutor do anel seja uma barra de aço de construção com diâmetro mínimo de 8 milímetros ou uma fita de aço com largura de 25 milímetros e espessura de 4 milímetros, com a largura posicionada na vertical;
- O eletrodo de aterramento natural deve ser conectado às demais partes metálicas que estruturam a edificação e devem ser então conectadas a um barramento de equipotencialização através de uma barra de aço com diâmetro mínimo de 8 milímetros ou uma fita de aço com 25 milímetros de largura e 4 milímetros de espessura.

3.4 SISTEMA INTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DANOS

Devido ao alto valor da corrente de uma descarga atmosférica que, ao atingir um sistema de proteção em uma edificação, flui nos elementos externos de um SPDA ou em outras partes condutivas da estrutura, a ABNT NBR 5419 de 2005 prevê ligações equipotenciais entre todos elementos metálicos da estrutura, bem como todas as instalações metálicas, elétricas e de sinal no interior da estrutura ou àquelas que adentram a estrutura.

A equipotencialização de um sistema visa minimizar as diferenças de potencial a níveis suportáveis às instalações e aos seres vivos, e constitui a medida mais eficaz para a redução dos riscos de incêndio, explosão e choques elétricos dentro do volume a ser protegido.

A norma ABNT NBR 5419 de 2005 solicita que seja instalado ao menos um barramento de equipotencialização principal (BEP ou TAP), no subsolo ou próximo ao quadro geral de baixa tensão, conectado ao subsistema de aterramento. Para estruturas que acima do nível do solo superam intervalos verticais de 20 metros e, exclusivamente, são providas de um sistema não isolado de proteção contra descargas atmosféricas, devem ser instaladas barras secundárias de ligação equipotencial, ou barramentos de equipotencialização local (BEL), a qual deve ser conectada à armadura de concreto do nível correspondente, mesmo estas não sendo

utilizadas como elementos naturais. Todas as estruturas metálicas que compõem a estrutura, bem como os elementos do SPDA e as instalações elétricas e de sinal, devem ser interligadas às barras de equipotencialização integradas à edificação por um condutor de cobre, aço ou alumínio, respeitando o dimensionamento disposto pela ABNT NBR 5419 de 2005 como é relacionado, independentemente do nível de proteção do SPDA, no Quadro 16.

Quadro 16 – Dimensões dos condutores de ligação equipotencial.

Material	Seção para suportar toda a corrente de descarga [mm ²]	Seção para suportar parte da corrente de descarga [mm ²]
Aço	50	16
Cobre	16	6
Alumínio	25	10

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

A ABNT NBR 5419 de 2005 ainda indica a instalação de um dispositivo de proteção contra surtos (DPS), em locais que permitam a inspeção com facilidade de acesso, quando uma ligação equipotencial direta não for permitida.

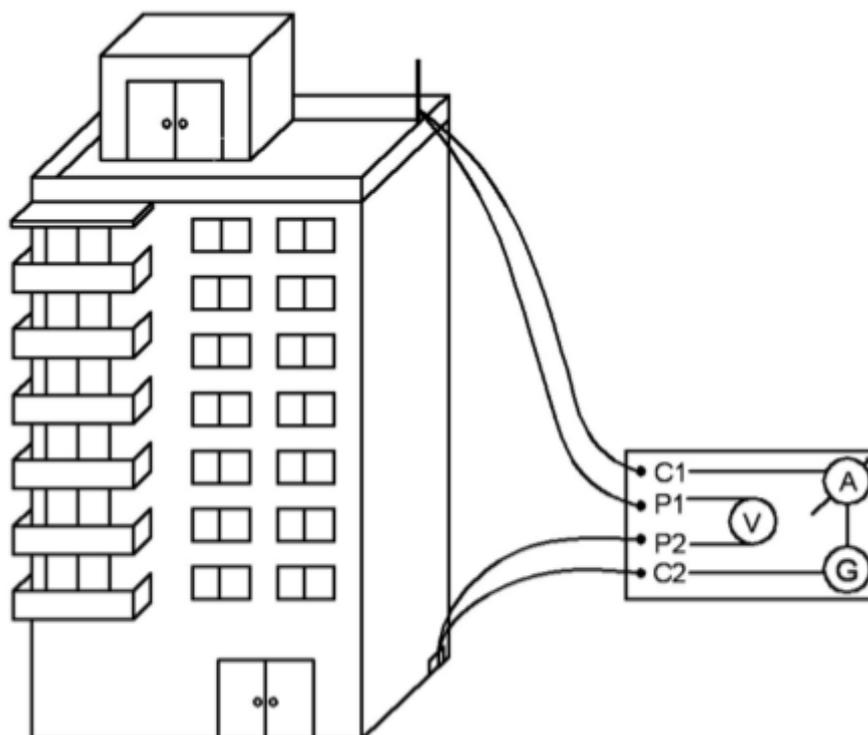
3.5 Ensaio de continuidade para armaduras de edificação

A utilização das armaduras de uma edificação como elementos naturais de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas é definida pela ABNT NBR 5419 de 2005 conforme a continuidade elétrica dessas armaduras. A medição da continuidade elétrica deve ser realizada com um instrumento adequado a resistência ôhmica entre a parte superior e inferior da estrutura, procedendo diversas medições entre diversos pontos diferentes na estrutura. A continuidade das armaduras é aceitável se os valores de resistência medidos forem iguais ou inferiores a 1 ohm (ABNT NBR 5419, 2005).

O instrumento de medição de continuidade deve utilizar a configuração de quatro fios, sendo dois para corrente e dois para tensão conforme a Figura 19, para

evitar o erro provocado pela própria resistência dos cabos de ensaio e de seus respectivos contatos em função da grande distância dos cabos por se tratar de medição entre o topo e a base de uma edificação.

Figura 19 – Método de medição a quatro fios.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

Não é admissível pela ABNT NBR 5419 de 2005 a utilização de multímetro convencional na função de ohmímetro, pois o mesmo não tem capacidade de injetar uma corrente suficiente no circuito a ponto de obter resultados significativos. No entanto podem ser utilizados miliohmímetros ou microhmímetros de quatro terminais que possam injetar uma corrente mínima de 1 ampere entre os pontos extremos da armadura sob ensaio, sendo capaz de medir a queda de tensão entre estes dois pontos. A resistência é calculada dividindo-se a tensão medida pela corrente injetada no circuito.

4 ABNT NBR 5419:2015

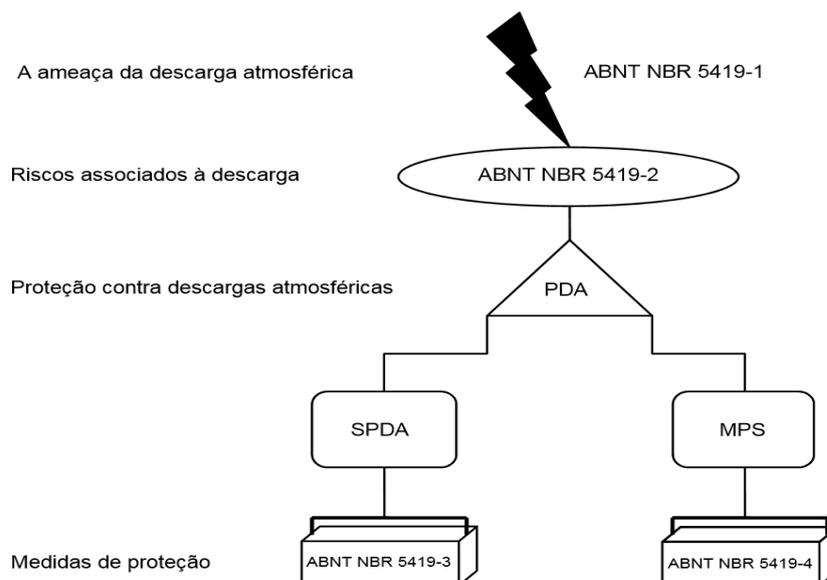
Publicada no dia 22 de maio de 2015, a nova versão da norma de proteção contra descargas atmosféricas, ABNT NBR 5419 de 2015, entrou em vigor exatamente um mês após sua publicação com uma configuração bem diferenciada das versões anteriores. Foram necessários dez anos de estudos baseados na norma IEC 62305 – Lightning Protection para enfim ser estruturada uma das mais importantes e utilizadas normas brasileiras que especifica os mínimos requisitos para a proteção contra descargas atmosféricas. A nova versão da norma possui trezentas e nove páginas e é dividida em quatro partes, sendo elas:

- Parte 1 – Princípios gerais;
- Parte 2 – Gerenciamento de risco;
- Parte 3 – Danos físicos a estruturas e perigos à vida;
- Parte 4 – Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.

A versão da norma NBR 5419 de 2015 tem como objetivo aumentar a eficiência de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas em relação à versão anterior. A necessidade de uma evolução da norma convém de um significativo aumento da densidade de descargas atmosféricas por ano em solo brasileiro (ELAT, 2009).

As quatro etapas para um sistema de proteção contra descargas atmosféricas dispostas na ABNT NBR 5419 do ano de 2015 se encontram relacionadas entre si como ilustrada na Figura 20, onde a proteção contra descargas atmosféricas é dividida em um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) e medidas de proteção contra surtos causados por impulso eletromagnético (MPS).

Figura 20 – Conexões entre as quatro partes da ABNT NBR 5419.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

4.1 ABNT 5419 2015 PARTE 1: PRINCÍPIOS GERAIS

A primeira parte da NBR 5419 de 2015 apresenta as informações relativas aos efeitos das descargas atmosféricas, valores das correntes das descargas, simulação da corrente da descarga, parâmetros de ensaios para simular os efeitos das descargas atmosféricas e os surtos devido às descargas atmosféricas em diferentes pontos da instalação.

Este capítulo da nova versão da norma é essencial para um bom entendimento dos efeitos das descargas atmosféricas a fim de um correto dimensionamento dos materiais para aguentar o impulso atmosférico. O mesmo contém uma vasta informação de como se comportam as descargas atmosféricas, o que não continha na versão anterior da norma.

4.1.1 Parâmetros da corrente das descargas atmosféricas

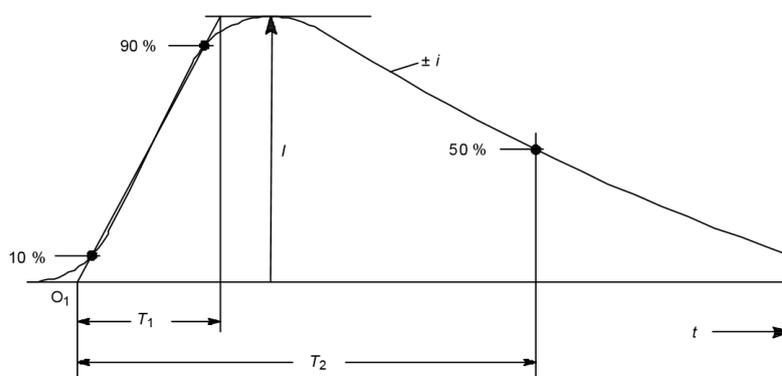
Em termos de proteção contra descargas atmosféricas, existem dois tipos básicos de descargas, sendo descendentes quando a descarga atmosférica é iniciada por um líder descendente, da nuvem para a terra, e ascendente quando a descarga é

iniciada por um líder ascendente, de uma estrutura aterrada para a nuvem. Na grande maioria das vezes as descargas são descendentes em locais planos e estruturas mais baixas, enquanto em locais acidentados e estruturas mais altas, essas tornam-se predominantes.

Para estudo de comportamento dos materiais são considerados dois tipos de descargas atmosféricas, sendo eles impulsos atmosféricos com duração inferior a 2 milissegundos e componentes longos com duração superior a 2 milissegundos.

Para se estudar o comportamento dos materiais do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, é de grande interesse a modelagem de uma equação da curva da corrente de descarga atmosférica. Para isso deve se analisar um modelo de curva de impulso atmosférico e conhecer os parâmetros que regem esta curva. A Figura 21 representa um impulso atmosférico com duração inferior a 2 milissegundos, enquanto a Figura 22 representa o comportamento dos componentes de longa duração, com tempo de duração superior a 2 milissegundos.

Figura 21 – Impulso atmosférico normalizado.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Onde:

T_1 é o tempo de frente em microssegundos (μs), definido como um parâmetro virtual de valor 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes em que a corrente atinge 10% e 50% de seu valor de pico;

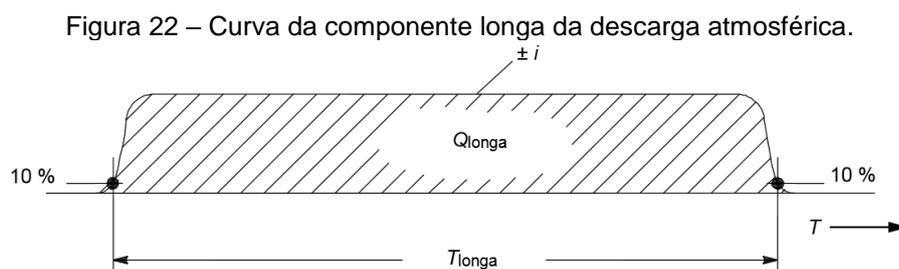
T_2 é o tempo de meia cauda em microssegundos (μs), definido como um parâmetro virtual que tem o valor do intervalo de tempo em que a curva da corrente decai em módulo até 50% de seu valor de pico;

O_1 é a origem virtual da corrente de impulso em microssegundos (μs), definido como o ponto de intersecção da curva da corrente com o eixo tempo;

i é a corrente da descarga atmosférica em quiloampères (kA), sendo essa positiva ou negativa como descrito na Figura 21;

t é o tempo em microssegundos (μs);

I é a corrente de pico da descarga atmosférica em quiloampères (kA).



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Onde:

T é o tempo em segundos (s);

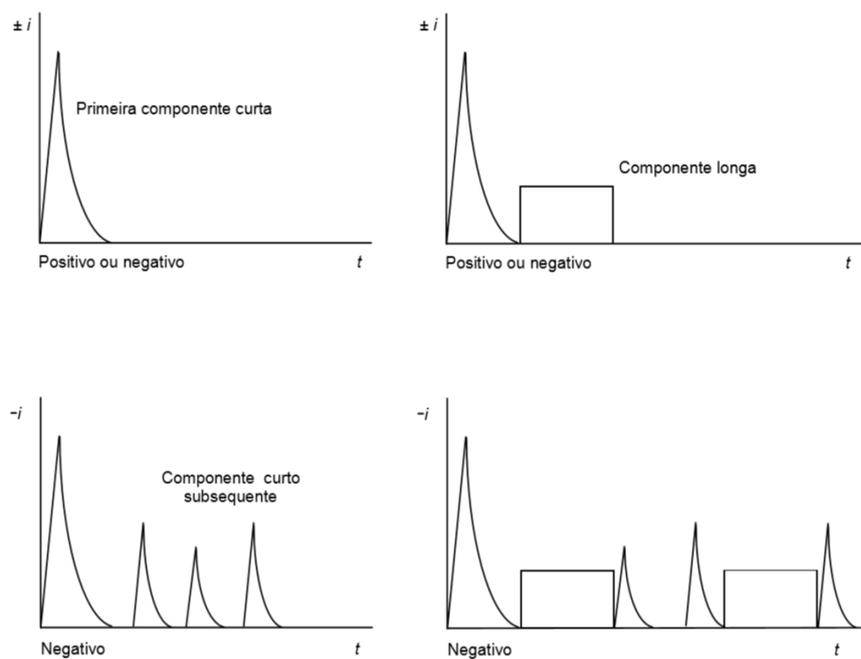
T_{longa} é o intervalo de tempo em segundos (s) em que a corrente da componente de longa duração da descarga atmosférica permanece entre 10% do valor de pico no crescimento e decrescimento da corrente, normalmente variando entre 2 milissegundos e 1 segundo;

i é a corrente da descarga atmosférica em quiloampères (kA), sendo essa positiva ou negativa como descrito na Figura 21;

Q_{longa} é o valor resultante da integral da corrente no tempo da componente de longa duração em Coulombs (C);

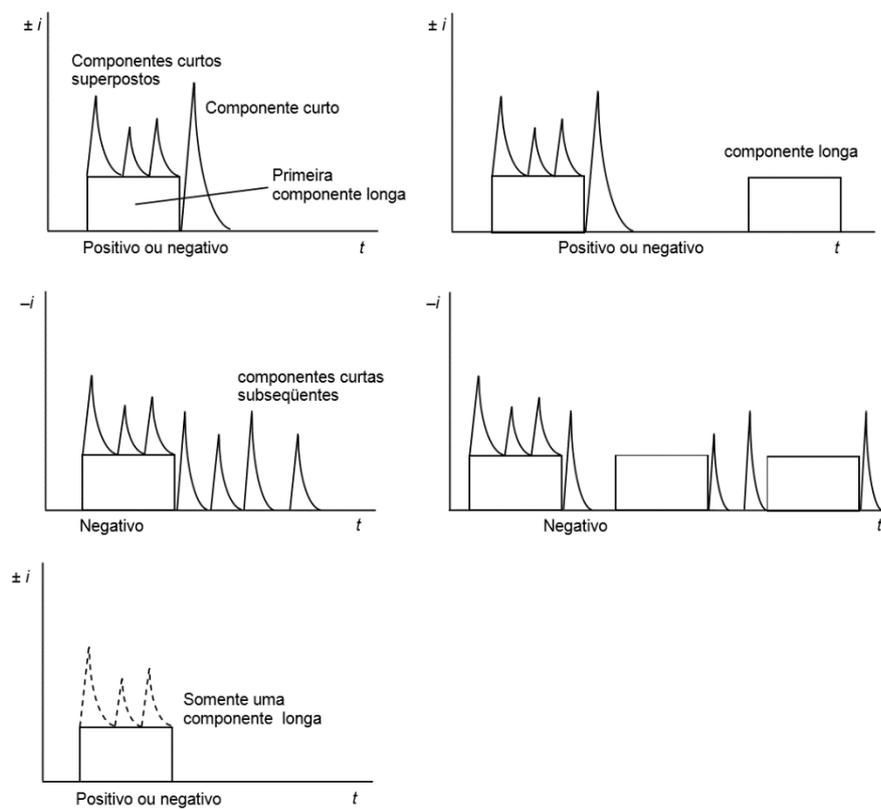
Além da polaridade da corrente, uma das particularidades das correntes das descargas atmosféricas é o que diferencia cada tipo de descarga atmosférica é a disposição de suas componentes. As posições dos componentes durante as descargas atmosféricas podem variar como primeira componente, componente subsequente e componente sobreposta. As variações típicas das componentes estão dispostas na Figura 23 para as descargas atmosféricas descendentes e na Figura 24 para as descargas ascendentes.

Figura 23 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas descendentes.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Figura 24 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas ascendentes.

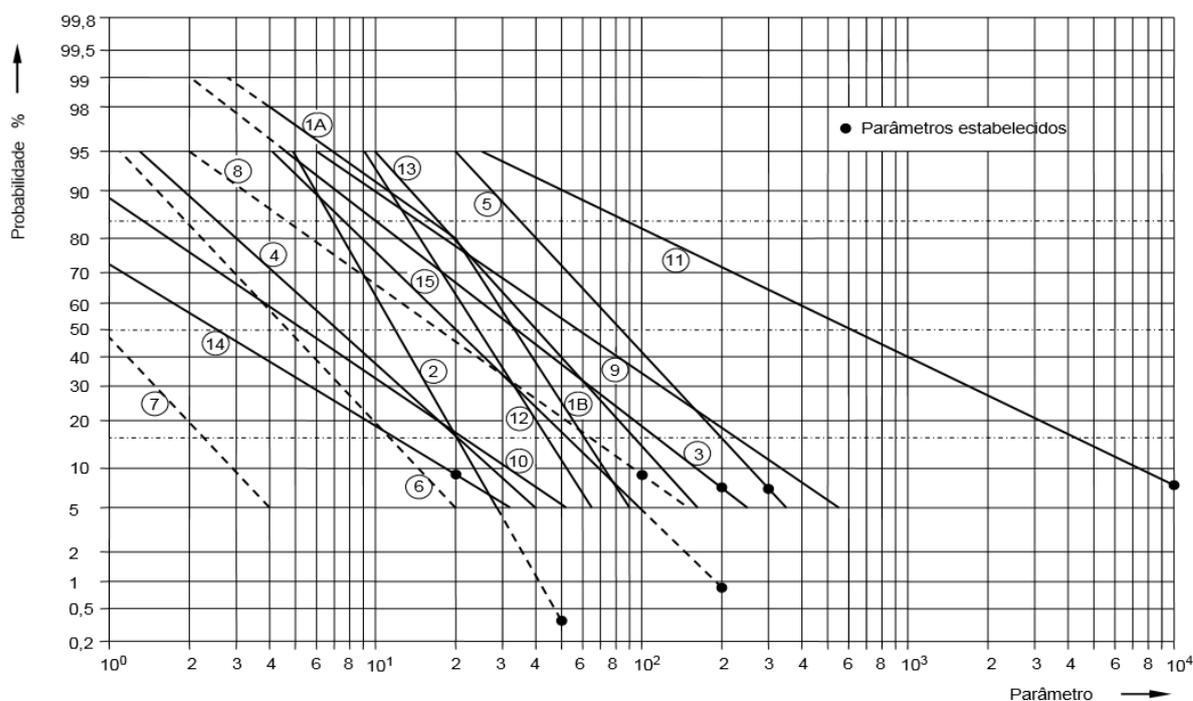


Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Nota-se que, pela Figura 24, a descarga ascendente sempre tem a componente longa, mesmo até quando não há impulsos superpostos. Porém os parâmetros dos impulsos das descargas ascendentes são inferiores dos que os parâmetros dos impulsos das descargas descendentes.

Para a ABNT NBR 5419 de 2015, os parâmetros da corrente da descarga atmosférica são baseados a partir de distribuições estatísticas que podem ser definidas como uma distribuição logarítmica normal, considerando uma relação de polaridade de 10% de descargas atmosféricas positivas e 90% negativas. Os resultados para os parâmetros das descargas atmosféricas utilizados pela versão atual da ABNT NBR 5419 são baseados nos resultados do International Council on Large Electrical Systems (CIGRE). A distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros das descargas atmosféricas baseadas nos dados fornecidos pelo CIGRE é demonstrada na Figura 25, sendo as linhas representadas com valores dos parâmetros definidos pela probabilidade de ocorrência dos mesmos entre 95 a 5 por cento.

Figura 25 – Distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Os valores para os parâmetros das correntes das descargas atmosféricas obtidos do CIGRE estão dispostos no Quadro 17 e representam os valores demonstrados na Figura 25 em relação às probabilidades de 5, 50 e 95 por cento de ocorrência do caso. No Quadro 17 também é disponibilizada a legenda das linhas dispostas na Figura 25.

Quadro 17 – Parâmetros das correntes das descargas atmosféricas obtidos do CIGRE.

Parâmetro	Valores			Tipo de componentes de descarga atmosférica	Linha na Figura 25
	95%	50%	5%		
$I(kA)$	7	35	90	Primeira curta negativa	1A+1B
	4,9	11,8	28,6	Subsequente curta negativa	2
	4,6	35	250	Primeira curta positiva	3
$Q_{flash} (C)$	1,3	7,5	40	Descarga atmosférica negativa	4
	20	80	350	Descarga atmosférica positiva	5
$Q_{curta} (C)$	1,1	4,5	20	Primeira curta negativa	6
	0,22	0,95	4	Subsequente curta negativa	7
	2	16	150	Primeira curta positiva	8
$W/R(kJ/\Omega)$	6	55	550	Primeira curta negativa	9
	0,55	6	52	Subsequente curta negativa	10
	25	650	15000	Primeira curta positiva	11
di/dt_{MAX} $kA/\mu s$	9,1	24,3	65	Primeira curta negativa	12
	9,9	39,9	161,5	Subsequente curta negativa	13
	0,2	2,4	32	Primeira curta positiva	14
$di/dt_{30/90\%}$ $kA/\mu s$	4,1	20,1	98,5	Subsequente curta negativa	15

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Onde:

I é a corrente de pico da descarga atmosférica em quiloampères (kA);

Q_{flash} é a carga de uma descarga atmosférica em Coulombs (C);

Q_{curta} é a carga do impulso atmosférico em Coulombs (C);

W/R é a energia específica da descarga atmosférica em watts por ohm (W/ Ω);

di/dt_{MAX} é a derivada máxima da curva da corrente em quiloampères por microssegundos (kA/ μs);

$di/dt_{30/90\%}$ é a derivada da corrente em função do tempo para as probabilidades de 30 e 90 por cento em quiloampères por microssegundos (kA/ μs).

4.1.2 Critérios para proteção de estruturas

Uma proteção ideal a uma edificação consiste na blindagem contínua totalmente envolvente a uma estrutura e a instalação de ligações equipotenciais adequadas as linhas elétricas e de sinal e tubulações metálicas que adentram a estrutura. A condição de uma blindagem completa capaz de cobrir qualquer chance de penetração de descargas atmosféricas em seu volume protegido é frequentemente inviável, para tanto, os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5419 de 2015, quando utilizados em projetos de proteção contra descargas atmosféricas minimizam significativamente a probabilidade da ocorrência de qualquer dano por descarga atmosférica em uma edificação conforme o nível de proteção pré-estabelecido por esta norma.

A partir da distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros das descargas atmosféricas da Figura 26, são definidos os parâmetros de interesse para o dimensionamento dos elementos do SPDA dispostos no Quadro 18 considerando-se a probabilidade dos parâmetros em relação ao nível de proteção do SPDA. Os valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas reduzem 75% dos valores do nível de proteção I para o nível de proteção II e 50% do nível de proteção I para os níveis III e IV de proteção. Esta redução é linear para corrente de pico e carga de impulso, e quadrática para energia específica (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Quadro 18 – Valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção.

Primeiro impulso positivo			NP			
Parâmetros da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico	I	kA	200	150	100	
Carga do impulso	Q_{curta}	C	100	75	50	
Energia específica	W/R	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Parâmetros de tempo	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	10/350			
Primeiro impulso negativo ^a			NP			
Parâmetros da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Valor de pico	I	kA	100	75	50	
Taxa média de variação	di/dt	$kA/\mu s$	100	75	50	
Parâmetros de tempo	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	1/200			
Impulso subsequente			NP			
Parâmetros da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Valor de pico	I	kA	50	37,5	25	
Taxa média de variação	di/dt	$kA/\mu s$	200	150	100	
Parâmetros de tempo	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	0,25/100			
Componente longa de descarga atmosférica			NP			
Parâmetros da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Carga da componente longa	Q_{longa}	C	200	150	100	
Parâmetros de tempo	T_{longa}	s	0,5			
Descarga atmosférica			NP			
Parâmetros da corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Carga da descarga atmosférica	Q_{flash}	C	300	225	150	

^a O uso dessa fórmula de onda de corrente é de interesse somente para cálculos, não para ensaios

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

A versão vigente da norma de proteção contra descargas atmosféricas utiliza o método das esferas rolantes para determinação dos posicionamentos dos elementos condutores do SPDA de forma otimizada. O raio de atração da esfera rolante é calculado a partir da mínima corrente de pico da descarga atmosférica estabelecida pela ABNT NBR 5419 para cada nível de proteção. Os valores mínimos das correntes de pico da descarga atmosférica estabelecidos pela ABNT NBR 5419 de 2015 não

foram alterados em relação a versão predecessora da mesma nos três primeiros níveis de proteção do SPDA, portanto os valores mínimos das correntes de pico estão dispostos no Quadro 19, juntamente com os raios da esfera rolante para os determinados níveis de proteção.

Quadro 19 – Valores mínimos das correntes de pico das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante correspondentes aos devidos níveis de proteção.

Critérios de interceptação			NP			
	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico mínima	I	kA	3	5	10	16
Raio da esfera rolante	r	m	20	30	45	60

Fonte: ABNT NBR 5419-1:2015.

Os valores para os parâmetros das descargas atmosféricas apresentados na distribuição estatística da Figura 25, podem ser determinados por uma probabilidade ponderada, tal que a probabilidade dos valores dos parâmetros de uma descarga atmosférica estejam dentro dos limites máximos, como no Quadro 18, e mínimos, como no Quadro 19, variam para cada nível de proteção como é mostrado no Quadro 20 (ABNT NBR 5419-1, 2015).

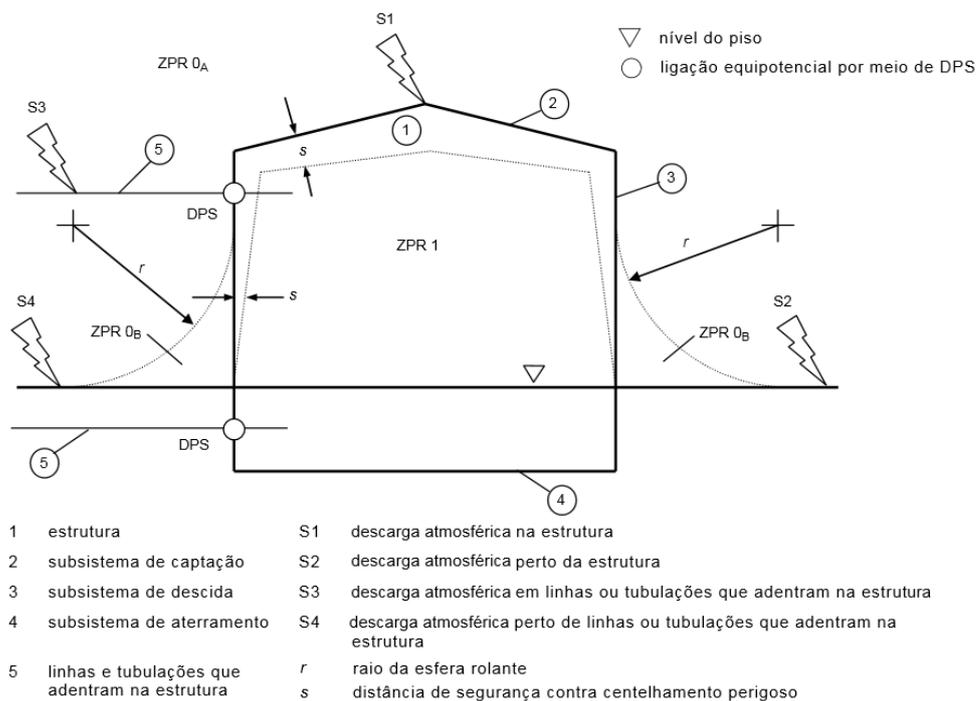
Quadro 20 – Probabilidades para os limites dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes aos devidos níveis de proteção.

Probabilidade de que os parâmetros das correntes sejam:	NP			
	I	II	III	IV
Menores que os valores apresentados no Quadro 18	0,99	0,98	0,95	0,95
Maiores que os valores apresentados no Quadro 19	0,99	0,97	0,91	0,84

Fonte: ABNT NBR 5419-1:2015.

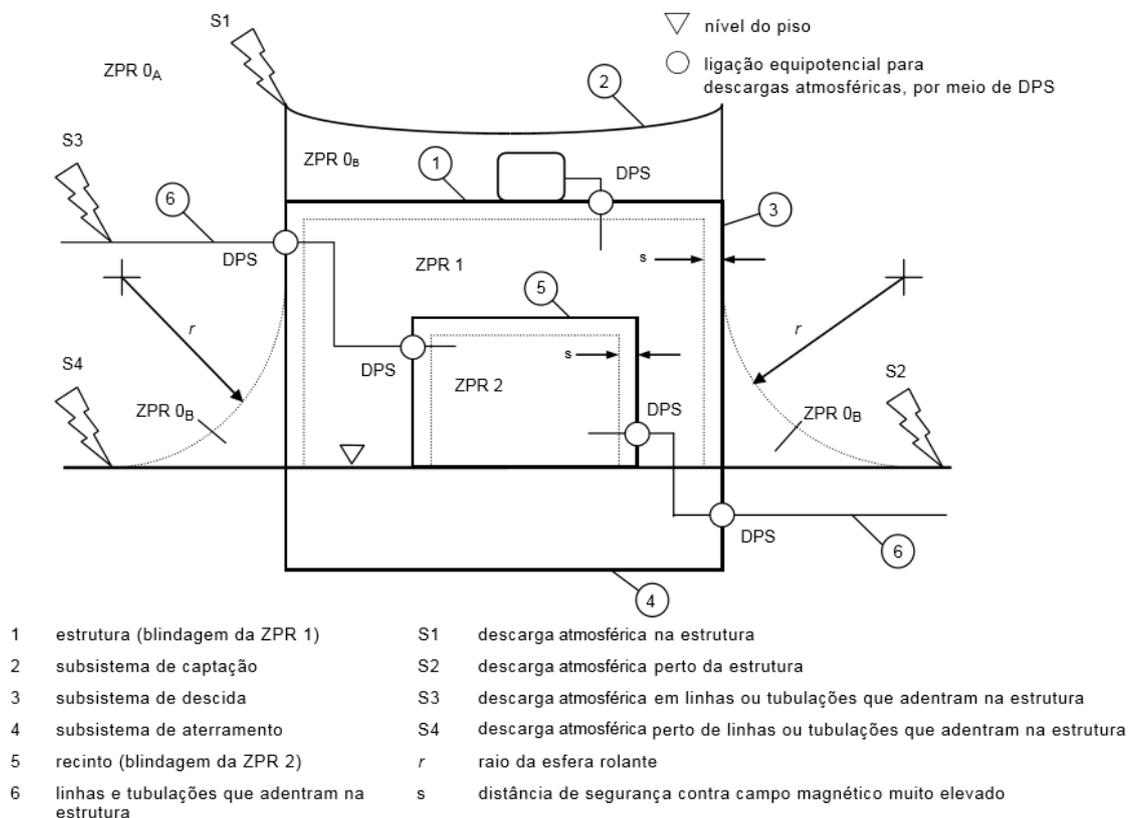
Os valores mínimos dos parâmetros da corrente das descargas atmosféricas dispostos no Quadro 19, juntamente com os raios das esferas rolantes correspondentes aos respectivos níveis de proteção, possibilitam a disponibilização dos componentes do subsistema de captação, e conseqüentemente a definição das zonas de proteção contra descargas atmosféricas como são esquematizadas na Figura 26 para um SPDA e na Figura 27 para um MPS.

Figura 26 – Zona de proteção definida por um SPDA.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Figura 27 – Zona de proteção definida por um MPS.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Onde:

ZPR 0_A é a zona ameaçada pela incidência direta e campo eletromagnético total da descarga atmosférica. Nesta zona as instalações internas podem estar sujeitas à corrente total ou parcial da descarga atmosférica;

ZPR 0_B é a zona protegida contra a incidência direta da descarga atmosférica, porém nesta zona a ameaça é o campo eletromagnético total da descarga atmosférica. As instalações podem estar sujeitas à corrente parcial da descarga atmosférica;

ZPR 1 é a zona protegida contra a incidência direta da descarga atmosférica. A corrente de surto nesta zona é limitada pela divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e dispositivos de proteção contra surto. Uma blindagem espacial pode atenuar o campo eletromagnético da descarga atmosférica;

ZPR 2 é a zona onde a corrente de surto pode ser ainda mais limitada pela divisão da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e dispositivos de proteção contra surto. Uma blindagem espacial pode atenuar ainda mais o campo eletromagnético da descarga atmosférica.

4.1.3 Equação da corrente da descarga atmosférica

As formas de onda das correntes do primeiro impulso positivo, primeiro impulso negativo e dos impulsos negativos subsequentes são definidas pela Equação 8.

$$i(t) = \frac{I_p}{k} \cdot \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} \cdot e^{-t/T_2} \quad (8)$$

Onde:

$i(t)$ é a corrente da descarga atmosférica em quiloamperes (kA);

I_p é a corrente de pico da descarga atmosférica em quiloamperes (kA);

k é o fator de correção adimensional para o valor de pico da corrente;

t é o tempo da descarga atmosférica em microssegundos (μs);

T_1 é o tempo de frente da descarga atmosférica em microssegundos (μs), definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes em que os valores de 10% e 90% da corrente de pico são atingidos;

T_2 é o tempo de meia cauda da descarga atmosférica em microssegundos (μs), definido como o intervalo de tempo entre a origem da curva da corrente e o instante em que o valor da corrente decai até metade do valor de pico.

Os valores definidos pela ABNT NBR 5419 de 2015 para os parâmetros da corrente de descargas atmosféricas para cada nível de proteção do SPDA é estimado se considerando a probabilidade de ocorrência de tais correntes em função da severidade do volume que o SPDA deve proteger, baseado na distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros da Figura 25. Para os quatro níveis de proteção, os valores dos parâmetros da corrente de descarga atmosférica estão dispostos no Quadro 18.

4.1.4 Efeitos das descargas atmosféricas e danos

A elevação da temperatura dos condutores de um SPDA ocasionada pela corrente da descarga atmosférica pode ser definida pela Equação 9 (ABNT NBR 5419-1, 2015).

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(e^{\frac{W/R \cdot \alpha \cdot \rho_0}{q^2 \cdot \gamma \cdot C_w}} - 1 \right) \quad (9)$$

Onde:

$\theta - \theta_0$ é a elevação da temperatura em kelvins (K);

α é o coeficiente de temperatura da resistência (K^{-1});

W/R é a energia específica do impulso da corrente em joule por ohms (J/Ω);

ρ_0 é a resistência ôhmica de um condutor na temperatura ambiente em ohm metro ($\Omega.m$);

q é a seção transversal de um condutor em metros quadrados (m^2);

γ é a densidade do material em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

C_w é a capacidade térmica, expressa em joule por quilograma kelvin ($J/kg.K$).

A fusão e a erosão dos materiais podem ocorrer no ponto de impacto. A ABNT NBR 5419 de 2015 utiliza do modelo de queda de tensão ânodo-cátodo para o cálculo dos efeitos térmicos no ponto de impacto do canal da descarga atmosférica em superfícies metálicas, pois, embora seja um modelo simples, o mesmo é particularmente efetivo em chapas de metal finas.

No modelo da queda de tensão ânodo-cátodo é assumido que a entrada de energia na região de contato do arco é igual a queda de tensão ânodo-cátodo multiplicada pela carga da corrente da descarga atmosférica, e, como a queda de tensão ânodo-cátodo é consideravelmente constante na faixa de corrente considerada, a energia na região de contato da chapa metálica é representada pela Equação 10.

$$W = u_{a,c} \int_0^{\infty} |i(t)| \cdot dt \quad (10)$$

Onde:

W é a energia em joules (J);

$u_{a,c}$ é a queda de tensão ânodo-cátodo em volts (V);

$i(t)$ é a corrente da descarga atmosférica em amperes (A);

t é o tempo da corrente da descarga atmosférica em segundos (s);

Em uma abordagem simples, a ABNT NBR 5419 de 2015 assume que a energia desenvolvida na região de contato do arco é utilizada somente para a fusão, e, a Equação 11 superestima um volume de metal fundido.

$$V = \frac{u_{a,c} \cdot Q}{\gamma} \frac{1}{C_w(\theta_s - \theta_u) + C_s} \quad (11)$$

Onde:

- V é o volume de metal fundido em metros cúbicos (m^3);
- $u_{a,c}$ é a queda de tensão ânodo-cátodo em volts (V);
- Q é a carga da corrente da descarga atmosférica em Coulombs (C);
- γ é a densidade do material em quilograma por metros cúbicos (kg/m^3);
- C_w é a capacidade térmica em joules por quilograma kelvin (J/kg.K);
- C_s é o calor latente de fusão em joules por quilograma (J/kg);
- θ_s é a temperatura de fusão em graus Celsius ($^{\circ}C$);
- θ_u é a temperatura ambiente em graus Celsius ($^{\circ}C$);

A corrente da descarga atmosférica pode causar danos por efeitos mecânicos nos componentes do sistema de proteção contra descargas atmosféricas que dependem, além dos parâmetros da corrente da descarga, das características elásticas da estrutura afetada e das forças de atrito que atuam entre os elementos do SPDA (ABNT NBR 5419-1, 2015).

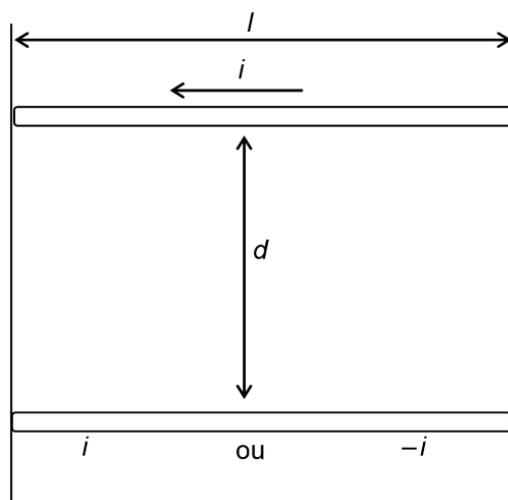
As interações eletromagnéticas entre os condutores do SPDA dependem das amplitudes das correntes que fluem nesses elementos, bem como da forma geral da corrente, sua duração e a configuração geométrica da instalação dos condutores. As forças eletrodinâmicas desenvolvidas pela corrente que flui por condutores em paralelo, como ilustrado na Figura 28, são calculadas pela Equação 10 (ABNT NBR 5419-1, 2015).

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i^2(t) \cdot \frac{l}{d} \quad (11)$$

Onde:

- $F(t)$ é a força eletrodinâmica, expressa em newtons (N);
- $i(t)$ é a corrente da descarga atmosférica, em amperes (A);
- μ_0 é a permeabilidade magnética do ar, em Henry por metro (H/m);
- l é o comprimento dos condutores, expresso em metros (m)
- d é a distância entre os trechos paralelos dos condutores, em metros (m).

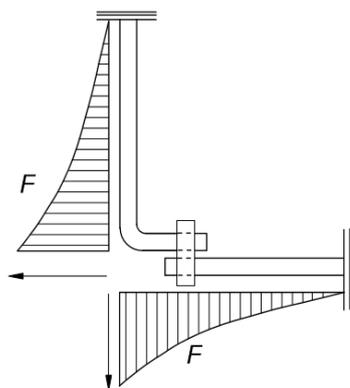
Figura 28 – Arranjo de dois condutores paralelos para definição de forças eletrodinâmicas.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Para o caso típico de conexão entre dois condutores a um ângulo de 90° , o diagrama de esforços para os elementos é disposto na Figura 29 (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Figura 29 – Arranjo de dois condutores paralelos para definição de forças eletrodinâmicas.



Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Uma deformação plástica acontece quando os esforços de tensionamento excedem o limite elástico do material, portanto os componentes do sistema de proteção contra descargas atmosféricas devem ser projetados com a prevenção das forças e do comportamento elástico (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Os efeitos térmicos e mecânicos acontecem simultaneamente na prática, portanto, se a seção do condutor for projetada conforme a ABNT NBR 5419 de 2015,

o condutor seguramente por suportar toda a ação causada pela corrente de descargas atmosféricas, sendo importante a verificação apenas da sua integridade mecânica.

O centelhamento perigoso é outro efeito causado pelo fluxo da corrente de descarga atmosférica no condutor do sistema de proteção, sendo crítico geralmente em ambientes inflamáveis ou na presença de materiais combustíveis. O centelhamento pode ser térmico ou por tensão (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Quando térmico, o centelhamento ocorre quando uma corrente muito elevada é forçada a fluir entre uma junção de materiais condutores, e a sua intensidade é associada pela energia específica da corrente, portanto, para o caso de centelhamento térmico, a fase mais crítica da descarga atmosférica é a primeira descarga de retorno (ABNT NBR 5419-1, 2015).

O centelhamento por tensão ocorre quando a corrente é forçada a fluir por caminhos curvos, como em uma junção em que a tensão induzida no laço excede a tensão disruptiva entre as partes metálicas. A tensão induzida é diretamente proporcional à indutância própria multiplicada pela taxa de subida da corrente de descarga atmosférica, portanto a componente mais crítica da descarga atmosférica para o centelhamento provocado por tensão é a descarga atmosférica subsequente negativa (ABNT NBR 5419-1, 2015).

4.1.4.1 Parâmetros para simulação da descarga atmosférica sobre os componentes do SPDA

Os principais parâmetros da corrente de descarga atmosférica que influenciam na integridade dos componentes sistema de proteção contra descargas atmosféricas são a corrente de pico, a carga, a energia específica, a duração da descarga atmosférica e a taxa de variação média da corrente. A constituição de um SPDA é realizada por diversos componentes diferentes com funções específicas no sistema. As considerações para os ensaios laboratoriais dependem da natureza dos componentes e dos esforços físicos que eles estão sujeitos, portanto, para a verificação dos desempenhos laboratoriais, deve-se considerar cada elemento do SPDA individualmente (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Nos componentes do subsistema de captação se tornam eminentes os efeitos térmicos, mecânicos e de erosão no ponto de impacto, particularmente em

componentes naturais como coberturas metálicas finas. Para os efeitos de erosão, os principais componentes da corrente da descarga atmosférica são a carga da componente de longa duração da descarga atmosférica e sua duração, sendo as descargas atmosféricas de curta duração, para este efeito, desconsideradas. A duração da corrente para este fenômeno de transferência de calor para o material é fundamental. No Quadro 21 estão dispostos os parâmetros relevantes a serem considerados nos cálculos dos valores de ensaios laboratoriais para os componentes do subsistema de captação do SPDA em seus respectivos níveis de proteção. A carga da componente de longa duração deve ser aplicada em um pulso único e o tempo de longa duração deve ser comparável ao tempo das descargas atmosféricas de longa duração (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Quadro 21 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a erosão no ponto de impacto.

NP	$Q_{longa}[C]$	T
I	200	$T < 1s$
II	150	$T < 1s$
III - IV	100	$T < 1s$

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Nos componentes do subsistema de descidas, os efeitos nos condutores podem ser térmicos, ocasionados por aquecimento resistivo, e mecânicos, pelas interações magnéticas (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Os efeitos resistivos são presentes em qualquer componente de um SPDA que conduz uma parte significativa da corrente da descarga atmosférica. O dimensionamento dos condutores deste subsistema deve ser suficiente para a prevenção do superaquecimento dos condutores a um nível que possa causar algum risco de incêndio nas imediações (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Em uma descarga atmosférica, as fases de alta energia específica da descarga atmosférica têm durações tão curtas que a geração de qualquer aquecimento na estrutura não pode ser significativamente dispersa durante o evento, sendo o fenômeno, portanto, considerado adiabático (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Contando que os condutores do SPDA sejam dimensionados visando suportabilidade térmica se considerando as Equações 14 a 16, a ABNT NBR 5419 de 2015 considera desnecessário a utilização de ensaios laboratoriais para a verificação do comportamento de um condutor sob o ponto de vista de elevação de temperatura, porém, caso um ensaio laboratorial de aquecimento ôhmico seja requisitado os parâmetros definidos pela versão vigente da norma de proteção contra descargas atmosféricas são determinados no Quadro 22.

Quadro 22 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a aquecimento ôhmico nos componentes do subsistema de descidas.

NP	$W/R[kJ/\Omega]$	T
I	10000	Configuração adiabática
II	5600	Configuração adiabática
III - IV	2500	Configuração adiabática

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Ainda para os condutores de descida, os efeitos mecânicos causados pela corrente da descarga atmosférica são relacionados às interações magnéticas onde a corrente da descarga atmosférica que flui em no SPDA é dividida entre condutores próximos um do outro ou quando há mudanças de direção (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Contando que os componentes para o subsistema de descidas do SPDA sejam dimensionados conforme a ABNT NBR 5419 de 2015, nenhum ensaio laboratorial é necessário, porém quando este for requisitado, os parâmetros para o ensaio laboratorial estão dispostos no Quadro 23 (ABNT NBR 5419, 2015).

Quadro 23 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a efeitos mecânicos nos componentes do subsistema de descidas.

NP	$I[kA]$	$W/R[kJ/\Omega]$
I	200	10000
II	150	5600
III - IV	100	2500

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Os componentes de conexão utilizados no sistema de proteção contra descargas atmosféricas são as partes mais vulneráveis a esforços térmicos e

mecânicos. No caso em que um conector instalado force o condutor a formar um ângulo reto, os principais efeitos dos esforços estão associados às forças mecânicas que tendem a vencer as forças de atrito entre as conexões e os condutores, tracionando as conexões. Os parâmetros para ensaios desses esforços nos componentes de conexão estão dispostos no Quadro 24.

Quadro 24 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a efeitos térmicos e mecânicos nas conexões do SPDA.

NP	$I[kA]$	$W/R[kJ/\Omega]$	T
I	200	10000	$T < 2ms$
II	150	5600	$T < 2ms$
III - IV	100	2500	$T < 2ms$

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Os eletrodos de aterramento podem sofrer erosão na região de contato com arcos elétricos, portanto este tipo de erosão não é de maior importância. A erosão mais problemática para os eletrodos de aterramento é relacionada a corrosão química e danos mecânicos causados por outros esforços, que não os eletrodinâmicos. Os parâmetros para simulação deste tipo de dano em eletrodos de aterramento estão dispostos no Quadro 25 (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Quadro 25 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes a erosão nos eletrodos de aterramento.

NP	$Q_{longa}[C]$	T
I	200	$T < 1s$
II	150	$T < 1s$
III - IV	100	$T < 1s$

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

A corrente da descarga atmosférica também pode causar efeitos em dispositivos de proteção contra surtos (DPS). A ABNT NBR 5419 de 2015 considera os efeitos para dois tipos de DPS, sendo eles com centelhador ou contendo varistores de óxido metálico.

Os efeitos em centelhadores causados pelas descargas atmosféricas podem ser relacionados à erosão dos eletrodos dos centelhadores por aquecimento, fusão e vaporização do material, ou aos esforços mecânicos por onda de choque da descarga atmosférica (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Os parâmetros para simulações laboratoriais para esforços dos DPS com centelhadores são o valor de pico, a carga, a duração, a energia específica e a taxa de subida do impulso da corrente, dispostos no Quadro 26 (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Quadro 26 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais correspondentes aos efeitos térmicos, mecânicos e de arco no DPS contendo centelhador.

NP	$I[kA]$	$Q_{curta}[C]$	$W/R[kJ/\Omega]$	$di/dt[kA/\mu s]$
I	200	100	10000	200
II	150	75	5600	150
III - IV	100	50	2500	100

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Para DPS com centelhador o valor de pico é determinante para a severidade da onda de choque. A carga da corrente da descarga atmosférica determina a entrada de energia no arco, a qual vai aquecer, fundir e provavelmente vaporizar parte do material do eletrodo na região do arco. A duração do impulso de corrente da descarga atmosférica é responsável pela transferência de calor para a massa do eletrodo e a propagação da frente de onda de fusão. A energia específica, por sua vez, determina a autocompressão magnética do arco e a física dos jatos de plasma no eletrodo, desenvolvidos na interface entre a superfície do eletrodo e o arco (ABNT NBR 5419-1, 2015).

Para DPS contendo varistores de óxido metálico os esforços causados pela corrente da descarga atmosférica podem ser de sobrecarga e descarga disruptiva. Os ensaios para este tipo de dispositivo de proteção contra surtos devem ser feitos isoladamente para a verificação do comportamento em cada condição de falha pois a falha DPS de óxido metálico é relacionada às suas características mais fracas, se tornando improvável a ocorrência de uma coesão entre os diferentes esforços danosos. Os parâmetros para simulação de DPS contendo óxido metálico por efeitos de sobrecarga estão dispostos no Quadro 27 e para efeitos dielétricos estão dispostos no Quadro 28 (ABNT NBR 5419, 2015).

Quadro 27 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais para verificação do comportamento de DPS contendo óxido metálico em efeitos de sobrecarga.

NP	$Q_{curta}[C]$
I	100
II	75
III - IV	50

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

Quadro 28 – Parâmetros das descargas atmosféricas para ensaios laboratoriais para verificação do comportamento de DPS contendo óxido metálico em efeitos dielétricos.

NP	$I[kA]$	T
I	200	$T < 2ms$
II	150	$T < 2ms$
III - IV	100	$T < 2ms$

Fonte: ABNT NBR 5419-1, 2015.

4.2 ABNT 5419 2015 PARTE 2: GERENCIAMENTO DE RISCO

A versão vigente de proteção contra descargas atmosféricas exige que o projetista efetue cálculos considerando, além dos fatores de ponderação utilizados na versão predecessora da ABNT NBR 5419, outros fatores, como características das estruturas vizinhas, linhas de energia e telecomunicação que adentram à estrutura, além de diversos fatores de ponderação relacionados ao meio em que se encontra a estrutura e seu tipo de ocupação e construção.

A análise reside no risco de uma descarga atmosférica, que ocorra na edificação, próxima a ela, em linhas que adentram a edificação ou próximo a elas, provocar danos às pessoas e edificações através de centelhamento, tensões de toque ou passo, falha nos equipamentos através de tensões induzidas ou transferidas. Todos os efeitos que provocam perdas devem ser considerados e atenuados com as devidas medidas de mitigação, sendo então comparados ao risco tolerável normalizado (ABNT NBR 5419-2, 2015).

4.2.1 Fontes dos danos, tipos de danos e perdas

Uma descarga atmosférica incidindo para a terra pode causar uma série de danos e conseqüentemente uma série de perdas. Para a finalidade de análise de risco de uma edificação é importante relacionar as fontes de danos aos tipos de danos e perdas, pois estes apresentam níveis diferentes de gravidade e são utilizados como fator de ponderação no cálculo de análise de risco (ABNT NBR 5419-2, 2015).

A corrente de descarga atmosférica pode atingir uma edificação por quatro distintos pontos de impacto (ABNT NBR 5419-2:2015), sendo eles:

- S_1 : descarga atmosférica atinge diretamente uma edificação;
- S_2 : descarga atmosférica atinge região próxima à edificação;
- S_3 : descarga atmosférica atinge diretamente a linha que adentra à edificação;
- S_4 : descarga atmosférica atinge proximamente à linha que adentra à edificação.

Pela ABNT NBR 5419 de 2015, as descargas atmosféricas podem causar três tipos de danos ao atingir um ponto na região de uma estrutura e esses dependem dos pontos de impacto da descarga. Os três tipos de danos possíveis são:

- D_1 : ferimento a seres vivos por choque elétrico;
- D_2 : danos físicos à estrutura;
- D_3 : falhas em sistemas eletroeletrônicos.

Por último, a versão atual da norma de proteção contra descargas atmosféricas delimita quatro tipos de perdas que podem ocorrer por um tipo de dano apenas ou tipos de danos combinados. Além disso, o tipo de dano depende das características da estrutura bem como seus ocupantes e instalações internas.

- L_1 : perda de vida humana (incluem ferimentos permanentes);
- L_2 : perda de serviço ao público;
- L_3 : perda de patrimônio cultural;
- L_4 : perda econômica.

4.2.2 Tipos de riscos

A vigente norma de proteção contra descargas atmosféricas relaciona quatro tipos de riscos que correspondem aos quatro tipos de perdas. A norma ainda decompõe cada um dos tipos de riscos em oito componentes que dependem da fonte de dano. Cada um dos quatro riscos pode ser considerado como o somatório de suas componentes (ABNT NBR 5419-2, 2015).

As componentes de risco devido a uma descarga atmosférica na estrutura são:

- R_A : componente relacionado a ferimentos nos seres vivos por choque elétrico devido as tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora da estrutura, nas zonas até 3 metros ao redor dos condutores de descidas. Para este risco as perdas podem ser do tipo L_1 e, caso a estrutura tenha animais vivos, podem ser também do tipo L_4 . Em estruturas especiais, como em estádios e nível superior de um estacionamento, se recomenda que esta etapa da norma seja considerada, pois os ocupantes desses locais podem estar vulneráveis a descargas diretas;
- R_B : componente relacionado a danos físicos causados por centelhamento perigoso dentro da edificação. Este centelhamento pode causar incêndio ou explosão. Neste caso se é considerado todos os tipos de perdas;
- R_C : componente relacionado a falhas dos circuitos internos por pulso eletromagnético (LEMP). Geralmente podem ocorrer as perdas do tipo L_2 e L_4 , e, no caso de explosões, incêndios, falhas de sistemas internos em hospitais ou outras estruturas no qual essas falhas podem colocar a vida humana em perigo direto, se pode considerar também o tipo de perda L_1 .

A componente de risco devido a uma descarga atmosférica em uma região próxima à estrutura é:

- R_M : componente relacionado a falhas dos circuitos internos por pulso eletromagnético (LEMP). Geralmente podem ocorrer as perdas do tipo L_2 e L_4 , e, no caso de explosões, incêndios, falhas de sistemas internos em hospitais ou outras estruturas no qual essas falhas podem colocar a vida humana em perigo direto, se pode considerar também o tipo de perda L_1 .

As componentes de risco devido a uma descarga atmosférica a uma linha que se encontra conectada à estrutura são:

- R_U : componente relacionado a ferimentos nos seres vivos por choque elétrico devido as tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora da estrutura, nas zonas até 3 metros ao redor dos condutores de descidas. Para este risco as perdas podem ser do tipo L_1 e, caso a estrutura se tratar de uma propriedade agrícola com animais vivos, também se pode considerar perdas do tipo L_4 ;
- R_V : componente relacionado a danos físicos causados por centelhamento perigoso entre as instalações externas e as partes metálicas das estruturas. Este centelhamento pode causar incêndio ou explosão e geralmente ocorre no ponta da entrada da linha na estrutura. Neste caso se é considerado todos os tipos de perdas;
- R_W : componente relacionado a falhas dos circuitos internos por sobretensões induzidas nas linhas que adentram à estrutura. Geralmente podem ocorrer as perdas do tipo L_2 e L_4 , e, no caso de explosões, incêndios, falhas de sistemas internos em hospitais ou outras estruturas no qual essas falhas podem colocar a vida humana em perigo direto, se pode considerar também o tipo de perda L_1 .

A componente de risco devido a uma descarga atmosférica em uma região próxima à estrutura é:

- R_Z : componente relacionado a falhas dos circuitos internos por pulso eletromagnético (LEMP). Geralmente podem ocorrer as perdas do tipo L_2 e L_4 , e, no caso de explosões, incêndios, falhas de sistemas internos em hospitais ou outras estruturas no qual essas falhas podem colocar a vida humana em perigo direto, se pode considerar também o tipo de perda L_1 . Esta componente de risco desconsidera os danos causados por uma descarga incidente a dutos que adentram a estrutura ou próximo a eles, pois a norma considera que exista um barramento de equipotencialização interligando todas as partes metálicas da estrutura, porém se o mesmo não existir, este tipo de risco também deve ser considerado.

4.2.3 Análise do número anual de eventos perigosos

A quantidade de eventos perigosos com influência de descargas atmosféricas é avaliada pela Equação 12.

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

Onde:

N_D é a quantidade de descargas atmosféricas para a terra na localização da estrutura por ano (1/ano);

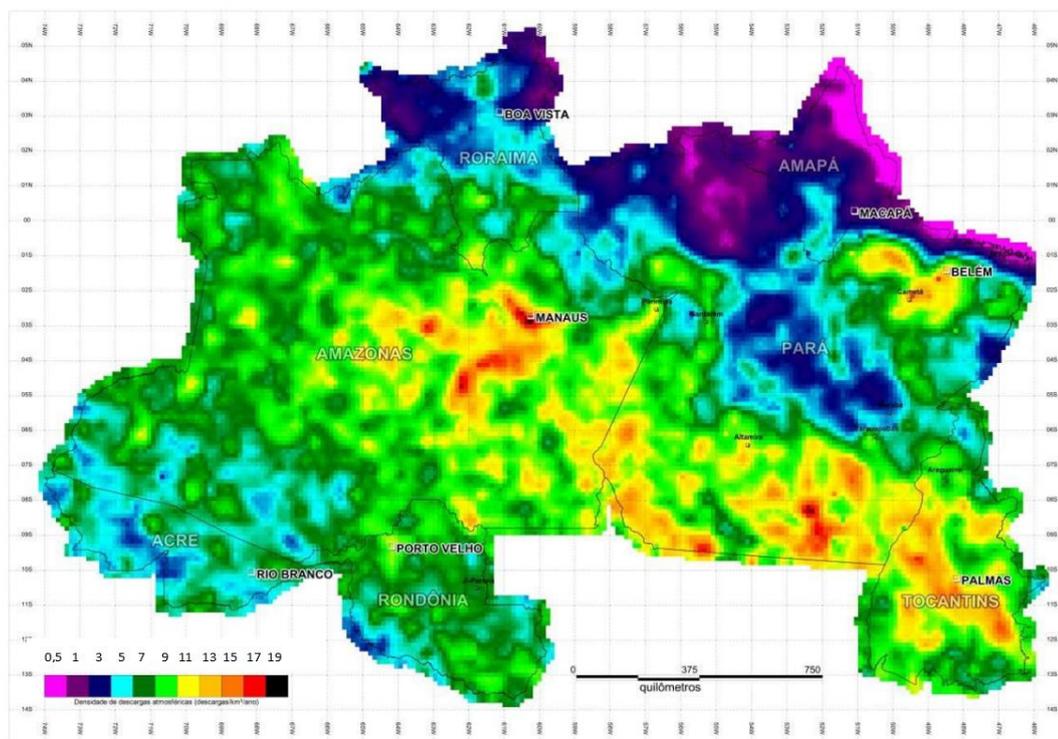
N_G é a densidade de descargas atmosféricas para a terra em descargas atmosféricas por quilômetro quadrado por ano (1/km².ano);

A_D é a área de exposição equivalente da estrutura em metros quadrados (m²);

C_D é fator de localização da estrutura.

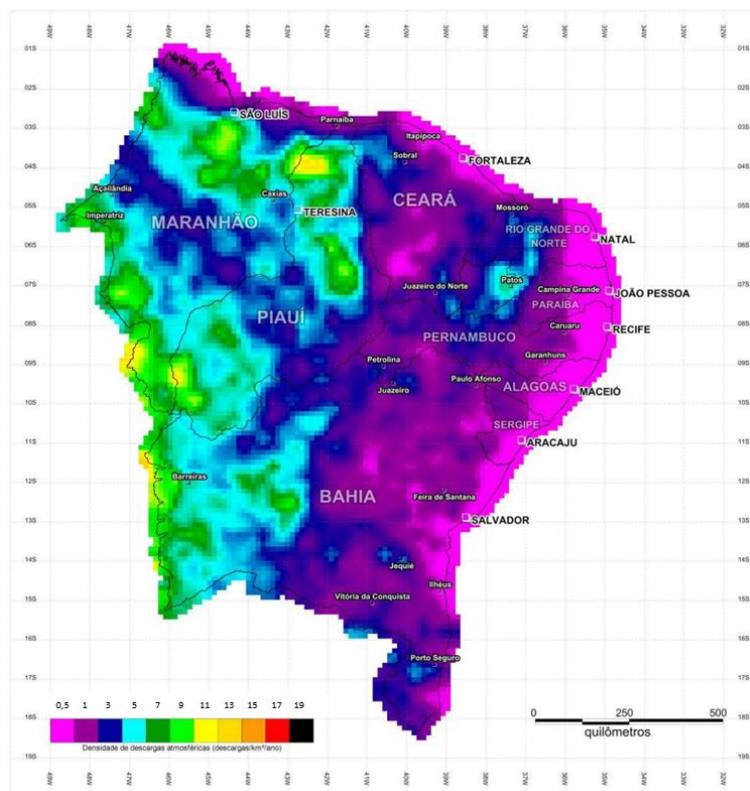
O número médio de descargas atmosféricas em uma estrutura por ano é obtido a partir do mapa de densidades de descargas por ano gerado pelo ELAT/INPE (Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O mapa de densidades atmosféricas para todo o território brasileiro está disposto em escala reduzida na Figura 3. O ELAT/INPE fornece, para uma melhor assertividade deste índice, os mapas de descargas atmosféricas da região norte, nordeste, centro-oeste, sudeste e sul dispostos, respectivamente nas Figuras 30 a 34.

Figura 30 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas N_c da região norte.



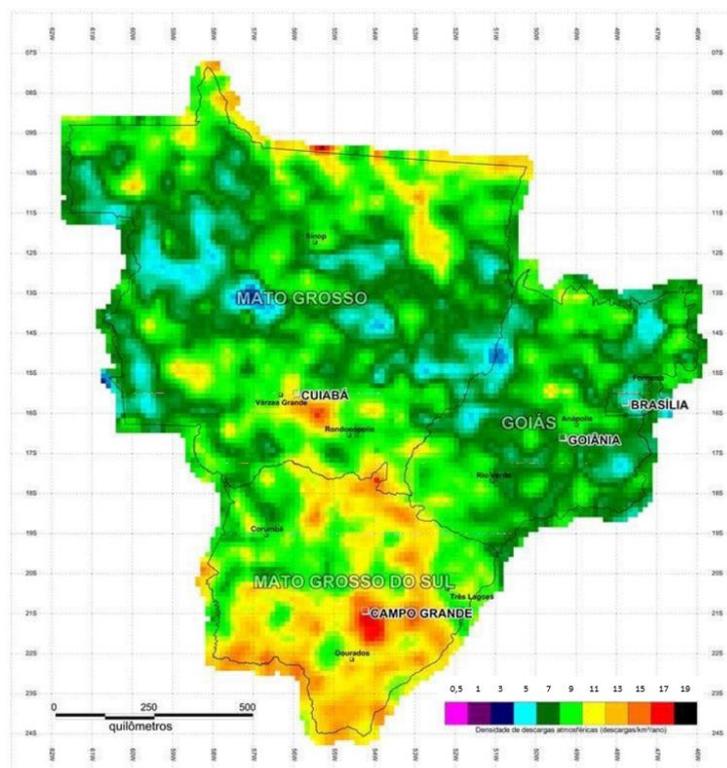
Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Figura 31 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas N_c da região nordeste.



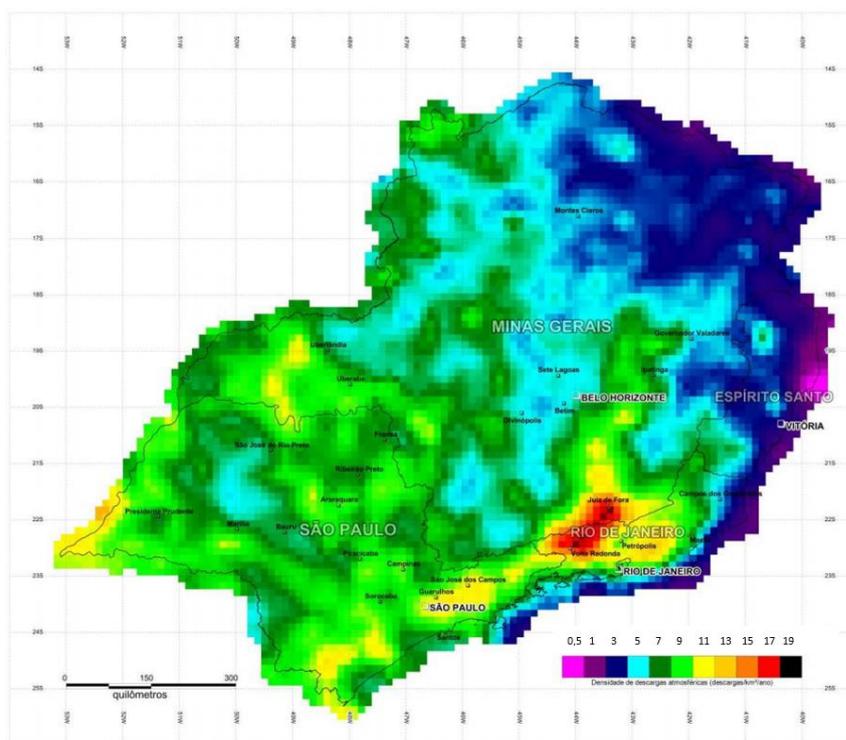
Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Figura 32 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas N_G da região centro-oeste.



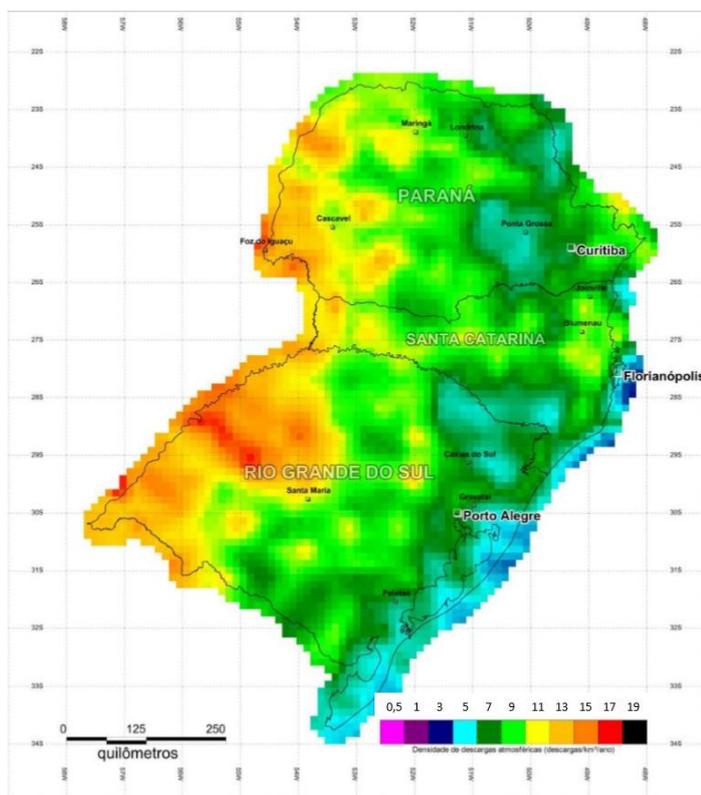
Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Figura 33 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas N_G da região sudeste.



Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Figura 34 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas N_G da região sul.



Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

A área de exposição da estrutura é determinada a partir de suas características geométricas. O caso mais simples para a identificação da área de exposição de uma estrutura é quando esta tem formato retangular com comprimento L , largura W e altura H , portanto, a área de exposição para esta estrutura pode ser calculada pela Equação 13 e está hachurada na Figura 35.

$$A_D = L \cdot W + 2 \cdot (3 \cdot H) \cdot (L + W) + \pi \cdot (3 \cdot H)^2 \quad (13)$$

Onde:

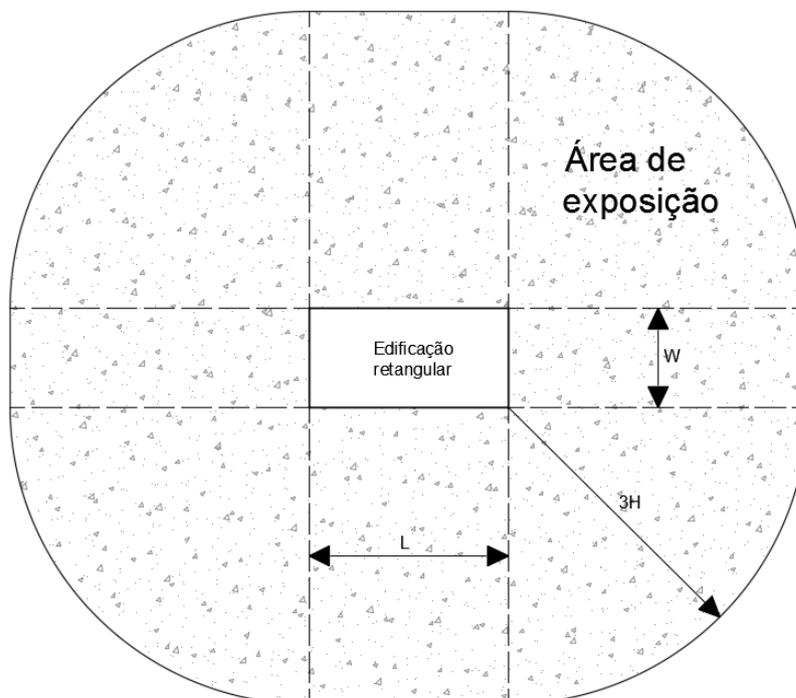
A_D é a área de exposição equivalente da estrutura retangular regular, expressa em metros quadrados (m^2);

L é o comprimento da estrutura, expresso em metros (m);

W é a largura da estrutura, expressa em metros (m);

H é a altura da estrutura, expressa em metros (m).

Figura 35 – Planta baixa da estrutura retangular regular isolada e sua área de exposição equivalente.



Fonte: Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2015.

Se a estrutura tiver uma forma complexa, como a estrutura da Figura 36, a sua área de exposição deve ser calculada por método gráfico. Um valor aproximado para a área de exposição de uma estrutura retangular com saliências na cobertura pode ser estimado pela superposição da área de exposição da estrutura retangular regular com as áreas de exposição das saliências no topo da estrutura, como disposto na Figura 37. A Equação 14 é utilizada para o cálculo da área de exposição da estrutura saliente (ABNT NBR 5419-2, 2015).

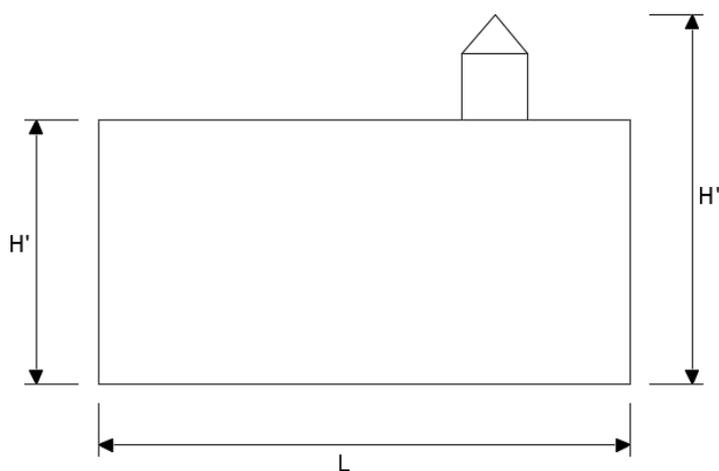
$$A_D' = \pi \cdot (3 \cdot H')^2 \quad (14)$$

Onde:

A_D' é a área de exposição equivalente da saliência no topo da estrutura, expressa em metros quadrados (m^2);

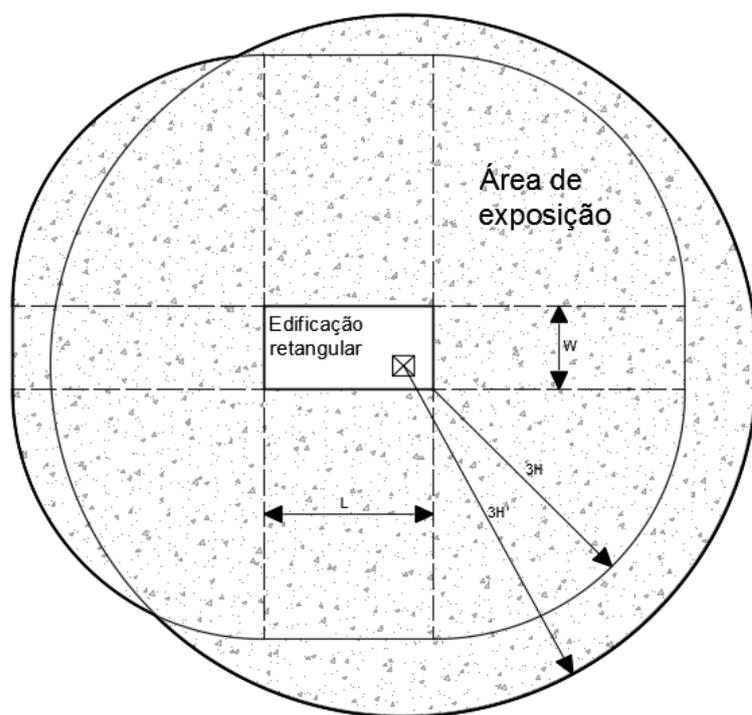
H' é a altura do topo da saliência em relação ao solo, expressa em metros (m).

Figura 36 – Estrutura de forma complexa.



Fonte: Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2015.

Figura 37 – Planta baixa da estrutura de forma complexa e sua área de exposição equivalente.



Fonte: Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2015.

Para a determinação de eventos perigosos para a estrutura pela incidência de descargas atmosféricas, a ABNT NBR 5419 de 2015 fornece os fatores de localização da estrutura quanto a edificações nas cercanias ou no solo dentro de uma distância igual a três vezes a altura da estrutura a ser protegida. O Quadro 29 apresenta os valores para o fator de localização da estrutura.

Quadro 29 – Fatores de localização de uma estrutura (C_D ou C_{DJ}).

Localização relativa de uma estrutura	C_D ou C_{DJ}
Estrutura cercada por objetos mais altos	0,25
Estrutura cercada por objetos de mesma altura ou mais baixos	0,5
Estrutura isolada	1
Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte	2

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

No caso da interligação entre a estrutura de interesse e uma estrutura adjacente localizada ao seu arredor por uma linha de sinal ou energia, deve-se prever a quantidade média de eventos perigosos devido à uma descarga atmosférica direta a estrutura conectada na extremidade de uma linha que adentra a edificação a ser protegida. O número médio de eventos perigosos a uma estrutura adjacente deve ser calculado pela Equação 15 (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$N_{DJ} = N_G \cdot A_{DJ} \cdot C_{DJ} \cdot C_T \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

Onde:

N_{DJ} é a quantidade de descargas atmosféricas para a terra na estrutura adjacente por ano (1/ano);

N_G é a densidade de descargas atmosféricas para a terra em descargas atmosféricas por quilômetro quadrado por ano (1/km².ano);

A_{DJ} é a área de exposição equivalente da estrutura adjacente em metros quadrados (m²);

C_{DJ} é fator de localização da estrutura adjacente obtida pelo Quadro 29;

C_T é o fator tipo da linha que interliga as estruturas.

A avaliação para o número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas próximas a estrutura também deve ser considerada, pois oferecem riscos diretos a estrutura, como risco de perda de vida humana, perda de serviço público ou perda de valores econômicos. A área de exposição para eventos de descargas atmosféricas nas proximidades da edificação de interesse é expressa pela Equação 16 (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$A_M = 2.500. (L + W) + \pi. 500^2 \quad (16)$$

Onde:

A_M é a área de exposição equivalente ao redor da estrutura a ser protegida em metros quadrados (m²);

L é o comprimento da edificação a ser protegida em metros (m);

W é a largura de uma edificação a ser protegida em metros (m).

A ABNT 5419 de 2015 também considera uma avaliação da quantidade de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas incidentes em linhas que adentram uma edificação. A quantidade de eventos perigosos para cada seção de uma linha é calculada pela Equação 17.

$$N_L = N_G. A_L. C_I. C_E. C_T. 10^{-6} \quad (17)$$

Onde:

N_L é a quantidade de descargas atmosféricas para a terra em uma seção de uma determinada linha que adentra uma edificação por ano (1/ano);

N_G é a densidade de descargas atmosféricas para a terra em descargas atmosféricas por quilômetro quadrado por ano (1/km².ano);

A_L é a área de exposição equivalente da linha em metros quadrados (m²) e estimada em uma área retangular de comprimento igual ao comprimento da linha e largura de 40 metros;

C_I é fator de instalação da linha;

C_E é fator ambiental;

C_T é o fator tipo da linha que interliga as estruturas.

Os fatores de instalação da linha, do tipo da linha e o fator ambiental estão dispostos nos Quadros 30 a 32.

Quadro 30 – Fator de instalação da linha (C_I).

Roteamento	C_I
Aéreo	1
Enterrado	0,5
Cabos enterrados completamente dentro e interligado a uma malha de aterramento	0,01

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 31 – Fator do tipo da linha (C_T).

Instalação	C_T
Linha de energia ou sinal	1
Linha de energia em alta tensão com transformador AT/BT	0,2

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 32 – Fator ambiental da linha (C_E).

Instalação	C_E
Rural	1
Suburbano	0,5
Urbano	0,1
Urbano com edifícios maiores de 20 metros	0,01

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

A ABNT NBR 5419 de 2015 também leva em consideração a incidência de descargas atmosféricas nas proximidades das linhas que adentram a estrutura a ser protegida, avaliando o número de situações perigosas para este caso como descrito na Equação 18.

$$N_I = N_G \cdot A_I \cdot C_I \cdot C_E \cdot C_T \cdot 10^{-6} \quad (18)$$

Onde:

N_I é a quantidade de eventos perigosos por ano devido a descargas atmosféricas para a terra próximas a uma linha que adentra uma edificação (1/ano);

N_G é a densidade de descargas atmosféricas para a terra em descargas atmosféricas por quilômetro quadrado por ano (1/km².ano);

A_I é a área de exposição equivalente para descargas atmosféricas nas proximidades da linha em metros quadrados (m²) estimada em uma área retangular de comprimento igual ao comprimento da linha e largura de 4 quilômetros;

C_I é fator de instalação da linha;

C_E é fator ambiental da linha;

C_T é o fator tipo da linha que interliga as estruturas.

4.2.4 Avaliação da probabilidade de danos

Considerando que a execução do sistema de proteção contra descargas atmosféricas seja realizada exatamente conforme os requisitos da ABNT NBR 5419 de 2015, a vigente versão da norma disponibiliza os valores de probabilidades de danos nas estruturas para o cálculo de ponderação do risco da edificação a ser protegida.

A probabilidade da ocorrência de choques a seres vivos por tensões de toque e passo devido a uma descarga atmosférica em uma estrutura dependem das medidas de proteção adicionais instaladas na edificação e das medidas de proteção para reduzir os danos físicos à estrutura. A Equação 19 determina a probabilidade de uma descarga atmosférica causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico.

$$P_A = P_{TA} \cdot P_B \quad (19)$$

Onde:

P_A é a probabilidade de ferimentos a seres vivos por choque elétrico;

P_{TA} é a probabilidade de uma descarga atmosférica causar choque a seres vivos por tensões de passo e toque perigosas, como disposto no Quadro 33;

P_B é a probabilidade de uma descarga atmosférica causar danos físicos em uma estrutura, como disposto no Quadro 34.

Quadro 33 – Valores da probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choques a seres vivos devido a tensões de passo e toque perigosas.

Medida de proteção adicional	P_{TA}
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	0,1
Isolação elétrica	0,01
Equipotencialização efetiva do solo	0,01
Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida	0

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 34 – Valores da probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos.

Características da estrutura	Classe do SPDA	P_B
Não protegida por SPDA	-	1
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 uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descida natural		0,01
Estrutura com cobertura metálica e um subsistema de captação, possivelmente incluindo componentes naturais, com proteção completa de qualquer instalação na cobertura contra descargas atmosféricas diretas e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descidas natural		0,001

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

A probabilidade da ocorrência de falhas nos sistemas internos por uma descarga atmosférica a uma estrutura pode ser estimada pela Equação 20, e pode ser reduzida com a instalação de um sistema de DPS adequado à medida de proteção (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$P_C = P_{SPD} \cdot C_{LD} \quad (20)$$

Onde:

P_C é a probabilidade de falhas nos sistemas internos;

P_{SPD} é a probabilidade de uma descarga atmosférica causar falha nos sistemas internos dependente do sistema coordenado de DPS, disposta no Quadro 35;

C_{LD} é um fator que depende das condições de blindagem, aterramento e isolamento da linha que o sistema interno está conectado, disposto no Quadro 36.

Quadro 35 – Valores da probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar falhas em sistemas internos dependentes do sistema coordenado de DPS e o nível de proteção.

Nível de Proteção	P_{SPD}
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
DPS com melhores características de proteção	0,005 - 0,001

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 36 – Fatores de ponderação dependentes das condições de blindagem, aterramento e isolamento.

Tipo de linha externa	Conexão na entrada	C_{LD}	C_{LI}
Linha aérea não blindada	Indefinida	1	1
Linha enterrada não blindada	Indefinida	1	1
Linha de energia com neutro multiterrado	Nenhuma	1	0,2
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 conexões com linhas externas	0	0
Qualquer tipo	Interfaces isolante	0	0

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

A probabilidade de uma descarga atmosférica que atinge uma região nas proximidades de uma estrutura causar falha em seus sistemas internos é calculada pela Equação 21 e pode ser reduzida por um SPDA em malhas, blindagens em malha, precauções de roteamento, superestimação da suportabilidade de tensão, interfaces isolantes e sistema coordenado de DPS.

$$P_M = P_{SPD} \cdot P_{MS} \quad (21)$$

Onde:

P_M é a probabilidade de uma descarga atmosférica próxima a estrutura causar falha nos sistemas internos da estrutura;

P_{SPD} é a probabilidade de uma descarga atmosférica causar falha nos sistemas internos dependente do sistema coordenado de DPS, disposta no Quadro 35;

P_{MS} é uma probabilidade que depende das características da blindagem e dos circuitos internos da estrutura, e pode ser obtido pela Equação 22.

$$P_{MS} = (K_{S1} + K_{S2} + K_{S3} + K_{S4})^2 \quad (22)$$

Onde:

K_{S1} é um fator que depende da eficiência da blindagem por malha da estrutura, SPDA ou qualquer outra blindagem, calculado a partir da Equação 23;

K_{S2} é um fator que considera a eficiência da blindagem por malha de blindagem interna a estrutura, e pode ser obtido a partir da Equação 24;

K_{S3} é um fator que leva em consideração as características dos circuitos internos da estrutura, obtido a partir do Quadro 37;

K_{S4} é um fator que considera a tensão suportável de impulso do sistema protegido, e é calculado a partir da Equação 25.

$$K_{S1} = 0,12 \cdot w_{m1} \quad (23)$$

$$K_{S2} = 0,12 \cdot w_{m2} \quad (24)$$

Onde:

w_{m1} e w_{m2} são as larguras da blindagem em forma em malha em milímetros (mm), dos condutores de descidas do tipo malha ou do espaçamento metálicos entre as colunas metálicas da estrutura, ou o espaçamento entre as estruturas de concreto armado atuando como componente natural do SPDA. Para blindagens metálicas e contínuas com espessura superiores a 0,1 milímetros, K_{S1} e K_{S2} são iguais a 0,0001.

$$K_{S4} = 1/U_W \quad (25)$$

Onde:

U_W é a tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido em quilovolts (kV).

Quadro 37 – Valor do fator K_{S3} dependente da fiação interna da estrutura.

Tipo de fiação interna	K_{S3}
Cabo não blindado – sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços	1
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes laços	0,2
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar laços	0,01
Cabos blindados e cabos instalados em eletrodutos metálicos	0,001

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Os fatores que determinam a probabilidade de falha dos sistemas internos de uma estrutura determinados pelas Equações 23 a 25 e pelo Quadro 37 são limitados a 1 e, no caso do fator K_{S4} , se existirem equipamentos com níveis diferentes de tensão suportável a impulso em um sistema interno, este fator é determinado pelo menor nível de tensão suportável de impulso (ABNT NBR 5419-2, 2015).

Quando uma descarga atmosférica atinge diretamente uma linha de energia ou sinal que adentra uma estrutura, os danos podem ser de ferimentos a seres vivos por meio de coque elétrico causado por tensões de toque perigosas, físicos como incêndio

ou explosão por centelhamento perigoso, e falha dos sistemas internos devido à sobretensões. Os valores das probabilidades de uma descarga atmosférica em uma linha que adentra uma estrutura causar tais danos podem ser calculados, respectivamente, pelas Equações 26 a 28.

$$P_U = P_{TU} \cdot P_{EB} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD} \quad (26)$$

$$P_V = P_{EB} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD} \quad (27)$$

$$P_W = P_{SPD} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD} \quad (28)$$

Onde:

P_U é a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico;

P_V é a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos a estrutura a ser protegida;

P_W é a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar falha nos sistemas internos da estrutura;

P_{TU} é a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre uma edificação causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas, considerando-se as medidas de proteção contra tensão de toque instaladas ou não, como disposto no Quadro 38;

P_{EB} é a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre uma edificação causar choque e tensões de toque perigosas a seres vivos, considerando-se o nível de proteção para qual os DPS foram projetados, como disposto no Quadro 39;

P_{LD} é a probabilidade de falha nos sistemas internos devido a uma descarga atmosférica incidente em uma linha que adentra a edificação de interesse, dependendo das características da linha, como disposto no Quadro 40;

P_{SPD} é a probabilidade que depende do sistema coordenado de DPS e o nível de proteção para o qual foram dimensionados, os valores para esta probabilidade são dispostos no Quadro 35;

C_{LD} é um fator dependente da blindagem, do aterramento e das condições de isolamento da linha, como disposto no Quadro 36.

Quadro 38 – Valor da probabilidade P_{TU} de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas.

Medida de proteção	P_{TU}
Nenhuma	1
Avisos visíveis de alerta	0,1
Isolação elétrica	0,01
Restrições físicas	0

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 39 – Valor da probabilidade P_{EB} relacionada ao nível de proteção para o qual os DPS foram projetados.

Nível de proteção	P_{EB}
Sem DPS	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
DPS com melhores características de proteção	0,005 - 0,001

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 40 – Valor da probabilidade P_{LD} dependendo da resistência R_S , em ohm por quilômetro, da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso U_W do equipamento.

Tipo de Linha	Condições do roteamento, blindagem e interligação	Tensão suportável U_W em quilovolts					
		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	$5 < R_S \leq 20$ [Ω/km]	1	1	0,95	0,9	0,8
		$1 < R_S \leq 5$ [Ω/km]	0,9	0,8	0,6	0,3	0,1
		$R_S \leq 1$ [Ω/km]	0,6	0,4	0,2	0,04	0,02

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Finalizando a análise de probabilidade de danos, o caso em específico em que uma descarga atmosférica atinge uma região próxima a uma linha que adentra uma estrutura e possa causar falha nos sistemas internos da edificação em questão pode ser calculada pela Equação 29, e dependem das características da blindagem da

linha, da tensão suportável do sistema interno da estrutura e das interfaces isolantes ou do sistema coordenado de DPS instalado (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$P_Z = P_{SPD} \cdot P_{LI} \cdot C_{LI} \quad (29)$$

Onde:

P_Z é a probabilidade de uma descarga atmosférica próxima a uma linha causar falha aos sistemas internos de uma estrutura;

P_{SPD} é a probabilidade que depende do sistema coordenado de DPS e o nível de proteção para o qual foram dimensionados, os valores para esta probabilidade são dispostos no Quadro 35;

P_{LI} é uma probabilidade que depende do tipo da linha que adentra a estrutura a ser protegida e da tensão suportável dos equipamentos, disposta no Quadro 41;

C_{LI} é um fator dependente das condições da blindagem, do aterramento e da isolação da linha, como disposto no Quadro 36.

Quadro 41 – Valor da probabilidade P_{LI} dependendo do tipo da linha que adentra uma edificação a ser protegida e a tensão suportável dos seus sistemas internos.

Tipo da linha	Tensão suportável U_W em quilovolts				
	1	1,5	2,5	4	6
Energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Sinal	1	0,5	0,2	0,08	0,04

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

4.2.5 Análise de quantidade de perda

A ABNT NBR 5419 de 2015 trata cada tipo de perda relacionada ao tipo de risco para cada zona de proteção da estrutura a ser protegida. Para tanto esta norma recomenda que as equações utilizadas para os tipos de perdas sejam utilizadas apenas como fonte primária para os valores de perda, se tornando necessária uma avaliação mais detalhada para o caso em que a descarga atmosférica possa envolver estruturas na redondeza da edificação em questão ou o meio ambiente.

Conforme a ABNT NBR 5419-2 de 2015 as perdas são divididas em perda de vida humana (L_1), perda de serviço público (L_2), perda de patrimônio cultural (L_3) e perda de valores econômicos (L_4), e cada tipo de perda deve ser relacionado para cada tipo de dano, sendo eles ferimentos aos seres vivos por choque elétrico (D_1), danos físicos (D_2) e falhas nos sistemas eletrônicos (D_3).

4.2.5.1 Perda de vida humana

O valor para perda de vida humana deve ser calculado para cada zona de proteção da estrutura e dependem de fatores de ponderação relacionados ao número de pessoas que frequentam cada zona, o número de pessoas que frequentam a totalidade da estrutura, o tempo em horas por ano durante o qual as pessoas estão presentes na zona e valores típicos de perdas para os tipos de estruturas bem como as providências nela para proteção contra descargas atmosféricas (ABNT NBR-2, 2015).

Para os tipos de danos D_1 , D_2 e D_3 , as perdas típicas podem ser calculadas, respectivamente, a partir das Equações 30 a 32 (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$L_A = L_U = r_t \cdot L_T \cdot \frac{n_z}{n_t} \cdot \frac{t_z}{8760} \quad (30)$$

$$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_F \cdot \frac{n_z}{n_t} \cdot \frac{t_z}{8760} \quad (31)$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \cdot \frac{n_z}{n_t} \cdot \frac{t_z}{8760} \quad (32)$$

Onde:

L_A e L_U são as perdas equivalentes a ferimentos a seres vivos causadas por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura para descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura e descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_B e L_V são as perdas equivalentes aos danos físicos a estrutura causadas por centelhamento perigoso, podendo causar incêndio ou explosão, causados por descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura e descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_C , L_M , L_W e L_Z são as perdas equivalentes a falhas dos sistemas internos causados por LEMP para descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura, próxima da estrutura, em uma linha conectada a estrutura e próxima a uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_T é o número típico médio de vítimas feridas por choque elétrico devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 42;

L_F é o número típico médio de vítimas por dano físico devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 42;

L_O é o número típico médio de vítimas por falha no sistema interno devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 42;

r_t é um fator de redução da perda dependendo do tipo de solo ou piso, obtido no Quadro 43;

r_p é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para o risco de explosão na estrutura, obtido no Quadro 44;

r_f é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou explosão da estrutura, obtido no Quadro 45;

h_z é um fator de aumento da perda de vida humana devido a danos físicos quando tiver algum perigo especial presente, obtido no Quadro 46;

n_z é o número de pessoas dentro da zona;

n_t é o número de pessoas total na estrutura;

t_z é o tempo durante o qual as pessoas estão presentes na zona, expresso em horas por ano (h/ano).

Quadro 42 – Valores médios típicos de perdas L_1 correspondente ao tipo de estrutura.

Tipo de Dano	Valor típico de perda		Tipo de estrutura
D_1	L_T	0,01	Todos os tipos
D_2	L_F	0,1	Risco de explosão
		0,1	Hospital, hotel, escola ou edifício cívico
		0,05	Entretenimento público, igreja ou museu
		0,02	Industrial ou comercial
		0,01	Outros
D_3	L_O	0,1	Risco de explosão
		0,01	Unidade de terapia intensiva e bloco cirúrgico de hospital
		0,001	Outras partes de hospital

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Os valores dispostos no Quadro 42 para os valores médios típicos de perdas correspondentes ao tipo da estrutura se referem ao atendimento contínuo de pessoas na estrutura, no caso em que os danos devido às descargas atmosféricas envolverem estruturas nas redondezas, uma perda adicional deve ser adicionada ao tipo de perda por danos físicos (L_F).

Quadro 43 – Fator de redução em função da superfície do solo ou piso.

Tipo de superfície	Resistência de contato $k\Omega$	r_t
Agricultura ou concreto	≤ 1	0,01
Mármore ou cerâmica	1 – 10	0,001
Cascalho, tapete ou carpete	10 – 100	0,0001
Asfalto, linóleo ou madeira	≥ 100	0,00001

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 44 – Fator de redução em função das providências tomadas para redução das consequências de incêndio.

Providências	r_p
Nenhuma ou estruturas com qualquer risco de explosão	1
Extintores, instalações de alarme manuais, instalações físicas operadas manualmente, hidrantes, compartimentos a prova de fogo, ou rotas de escape	0,5
Instalações físicas operadas manualmente ou instalações de alarme automático se protegidas contra sobretensões e outros danos e considerando que os bombeiros possam chegar em menos de 10 minutos	0,2

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 45 – Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão nas estruturas.

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

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

Quadro 46 – Fator de aumento da quantidade relativa de perda na presença de perigo especial.

Tipo de perigo especial	h_z
Nenhum	1
Baixo nível de pânico, com menos de 100 pessoas na estrutura	2
Nível médio de pânico, para eventos culturais ou esportivos com número de pessoas entre 100 e 1000	5
Dificuldade de evacuação	5
Alto nível de pânico, para eventos culturais ou esportivos com número de pessoas excedendo 1000	10

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

4.2.5.2 Perda inaceitável de serviço público

O valor para perda de serviço público deve ser calculado para cada zona de proteção da estrutura e dependem de fatores de ponderação relacionados ao número relativo médio típico de usuários não servidos resultante dos danos físicos da estrutura e de falhas de sistemas internos perante a um evento perigoso, bem como fatores de ponderação que dependem das providências tomadas para redução de consequências de incêndio ou risco de incêndio (ABNT NBR-2, 2015).

Para os tipos de danos D_2 e D_3 , as perdas típicas podem ser calculadas, respectivamente, a partir das Equações 33 e 34 (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot L_F \cdot \frac{n_z}{n_t} \quad (33)$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \cdot \frac{n_z}{n_t} \quad (34)$$

Onde:

L_B e L_V são as perdas equivalentes aos danos físicos a estrutura causadas por centelhamento perigoso, podendo causar incêndio ou explosão, causados por descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura e descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_C , L_M , L_W e L_Z são as perdas equivalentes a falhas dos sistemas internos causados por LEMP para descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura, próxima da estrutura, em uma linha conectada a estrutura e próxima a uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_F é o número típico médio de usuários não servidos por dano físico devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 47;

L_O é o número típico médio de usuários não servidos por falha no sistema interno devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 47;

r_p é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para o risco de explosão na estrutura, obtido no Quadro 44;

r_f é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou explosão da estrutura, obtido no Quadro 45;

n_z é o número de pessoas dentro da zona;

n_t é o número de pessoas total na estrutura;

Quadro 47 – Valores médios típicos de perdas L_2 correspondente ao tipo de estrutura.

Tipo de Dano	Valor típico de perda	Tipo de serviço	
D_2	L_F	0,1	Gás, água ou fornecimento de energia
		0,01	TV ou linhas de sinais
D_3	L_O	0,01	Gás, água ou fornecimento de energia
		0,001	TV ou linhas de sinais

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

4.2.5.3 Perda inaceitável de patrimônio cultural

O valor para perda de patrimônio cultural deve ser calculado para cada zona de proteção da estrutura e dependem de fatores de ponderação relacionados ao número relativo médio típico de valores atingidos pelos danos físicos devido a um evento perigoso, bem como fatores de ponderação que dependem das providências tomadas para redução de consequências de incêndio ou risco de incêndio e o valor do patrimônio cultural e total da edificação e o conteúdo da estrutura (ABNT NBR-2, 2015).

Para o tipo de dano D_2 as perdas típicas podem ser calculadas a partir da Equação 35 (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot L_F \cdot \frac{C_z}{C_t} \quad (35)$$

Onde:

L_B e L_V são as perdas equivalentes aos danos físicos a estruturas causadas por centelhamento perigoso, podendo causar incêndio ou explosão, causados por

descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura e descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_F é o número típico de todos os valores atingidos por dano físico devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 48;

r_p é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para o risco de explosão na estrutura, obtido no Quadro 44;

r_f é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou explosão da estrutura, obtido no Quadro 45;

c_z é o valor do patrimônio cultura da zona;

c_t é o valor do patrimônio cultural da edificação e o conteúdo da estrutura;

Quadro 48 – Valores médios típicos de perdas L_3 correspondente ao tipo de estrutura.

Tipo de Dano	Valor típico de perda		Tipo de estrutura ou zona
D_2	L_F	0,1	Museus ou galerias

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

4.2.5.4 Perda econômica

O valor para perda econômica deve ser calculado para cada zona de proteção da estrutura e dependem de fatores de ponderação relacionados às características da zona, os valores das zonas, bem como fatores de ponderação que dependem das providências tomadas para redução de consequências de incêndio ou risco de incêndio e o valor do patrimônio cultural e total da edificação e o conteúdo da estrutura (ABNT NBR-2, 2015).

Para os tipos de danos D_1 , D_2 e D_3 , as perdas típicas podem ser calculadas, respectivamente, a partir das Equações 36 a 38 (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$L_A = L_U = r_t \cdot L_T \cdot \frac{c_a}{c_t} \quad (36)$$

$$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_F \cdot \frac{c_a + c_b + c_c + c_s}{c_t} \quad (37)$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \cdot \frac{c_s}{c_t} \quad (38)$$

Onde:

L_A e L_U são as perdas equivalentes a ferimentos a seres vivos causadas por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentre da estrutura para descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura e descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_B e L_V são as perdas equivalentes aos danos físicos a estruturas causadas por centelhamento perigoso, podendo causar incêndio ou explosão, causados por descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura e descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_C , L_M , L_W e L_Z são as perdas equivalentes a falhas dos sistemas internos causados por LEMP para descargas atmosféricas incidentes diretamente à estrutura, próxima da estrutura, em uma linha conectada a estrutura e próxima a uma linha conectada a estrutura, respectivamente;

L_T é o valor relativo médio de todos os valores danificados por choque elétrico devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 49;

L_F é o valor relativo médio de todos os valores danificados por dano físico devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 49;

L_O é o valor relativo médio de todos os valores danificados por falha no sistema interno devido a um evento perigoso, obtido no Quadro 49;

r_t é um fator de redução da perda de animais dependendo do tipo de solo ou piso, obtido no Quadro 43;

r_p é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para o risco de explosão na estrutura, obtido no Quadro 44;

r_f é um fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou explosão da estrutura, obtido no Quadro 45;

c_a é o valor dos animais na zona;

c_b é o valor da edificação relevante na zona;

c_c é o valor do conteúdo da zona;

c_s é o valor dos sistemas internos incluindo suas atividades na zona;

c_t é o valor total da estrutura.

Quadro 49 – Valores médios típicos de perdas L_4 correspondente ao tipo de estrutura.

Tipo de Dano	Valor típico de perda		Tipo de estrutura
D_1	L_T	0,01	Todos os tipos onde somente há animais presentes
D_2	L_F	1	Risco de explosão
		0,5	Hospital, industrial, museu e agricultura
		0,2	Hotel, escola, escritório, igreja, entretenimento público e comercial
		0,1	Outros
D_3	L_O	0,1	Risco de explosão
		0,01	Hospital, industrial, escritório, hotel e comercial
		0,001	Museu, agricultura, escola, igreja e entretenimento público
		0,0001	Outros

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

4.2.6 Risco tolerável e procedimento para avaliação dos custos das perdas e da necessidade de proteção

A ABNT NBR 5419 de 2015 especifica que o responsável técnico pelo projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve identificar o risco tolerável à estrutura a ser protegida, porém a norma apresenta os valores típicos de risco tolerável em relação ao tipo de perda estabelecidos no Quadro 50.

Quadro 50 – Riscos toleráveis estabelecidos pela ABNT NBR 5419.

Tipo de perda		R_T
L_1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
L_2	Perda de serviço público	10^{-3}
L_3	Perda de patrimônio cultural	10^{-4}
L_4	Perda de valor econômico	10^{-3}

Fonte: ABNT NBR 5419-2, 2015.

O risco tolerável para perdas de valor econômico deve ser estabelecido por uma avaliação do custo, sendo utilizado o valor estabelecido no quadro 50 apenas na falta de dados para a análise de custo (ABNT NBR 5419-2, 2015).

A proteção contra descargas atmosféricas é justificada se o valor econômico anual for positivo. A Equação 39 determina o valor econômico anual (ABNT NBR 5419-2, 2015).

$$S_M = C_L - (C_{PM} + C_{RL}) \quad (39)$$

Onde:

S_M é o valor econômico anual em reais (R\$);

C_L é o custo da perda em uma determinada zona em reais (R\$), obtido pela Equação 40;

C_{PM} é o custo anual das medidas de proteção em reais (R\$), obtido pela Equação 41;

C_{RL} é o custo total de perda residual em uma estrutura apesar das medidas de proteção em reais (R\$), obtido pela Equação 42.

$$C_L = R_4 \cdot c_t \quad (40)$$

Onde:

C_L é o custo da perda em uma determinada zona em reais (R\$);

R_4 é o risco associado à perda de valor em todas as zonas;

c_t é o custo total da estrutura em reais (R\$).

$$C_{PM} = C_P \cdot (i + a + m) \quad (41)$$

Onde:

C_{PM} é o custo anual das medidas de proteção em reais (R\$);

C_P é o custo das medidas de proteção em reais (R\$);

i é a taxa de juros;

a é a taxa de amortização;
 m é a taxa de manutenção.

$$C_{RL} = \sum R'_{4Z} \cdot c_t \quad (42)$$

Onde:

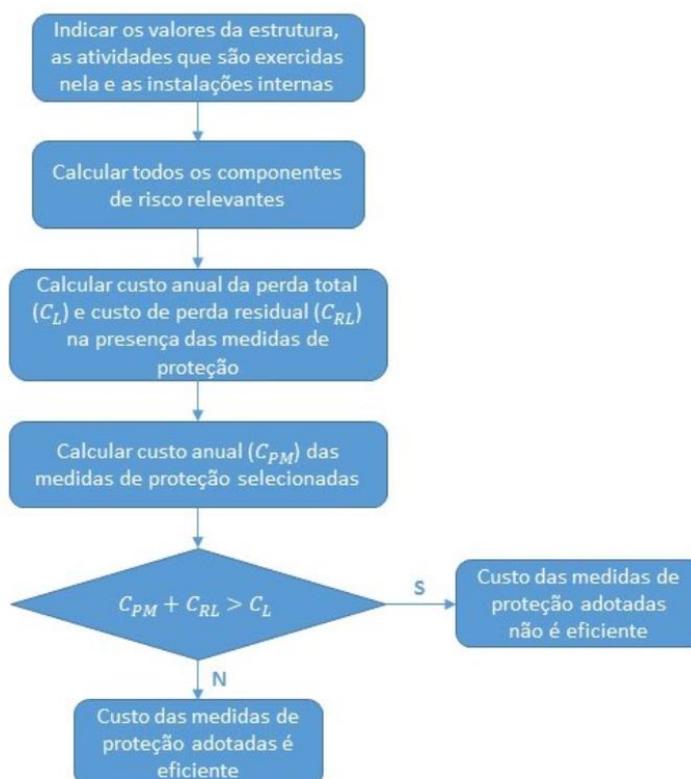
C_{RL} é o custo total de perda residual em uma estrutura, em reais (R\$), apesar das medidas de proteção;

R'_{4Z} é o risco relacionado à perda de valor em uma zona desconsiderando as medidas de proteção;

c_t é o custo total da estrutura em reais (R\$).

A Figura 38 representa o procedimento para a avaliação da eficiência do custo das medidas de proteção.

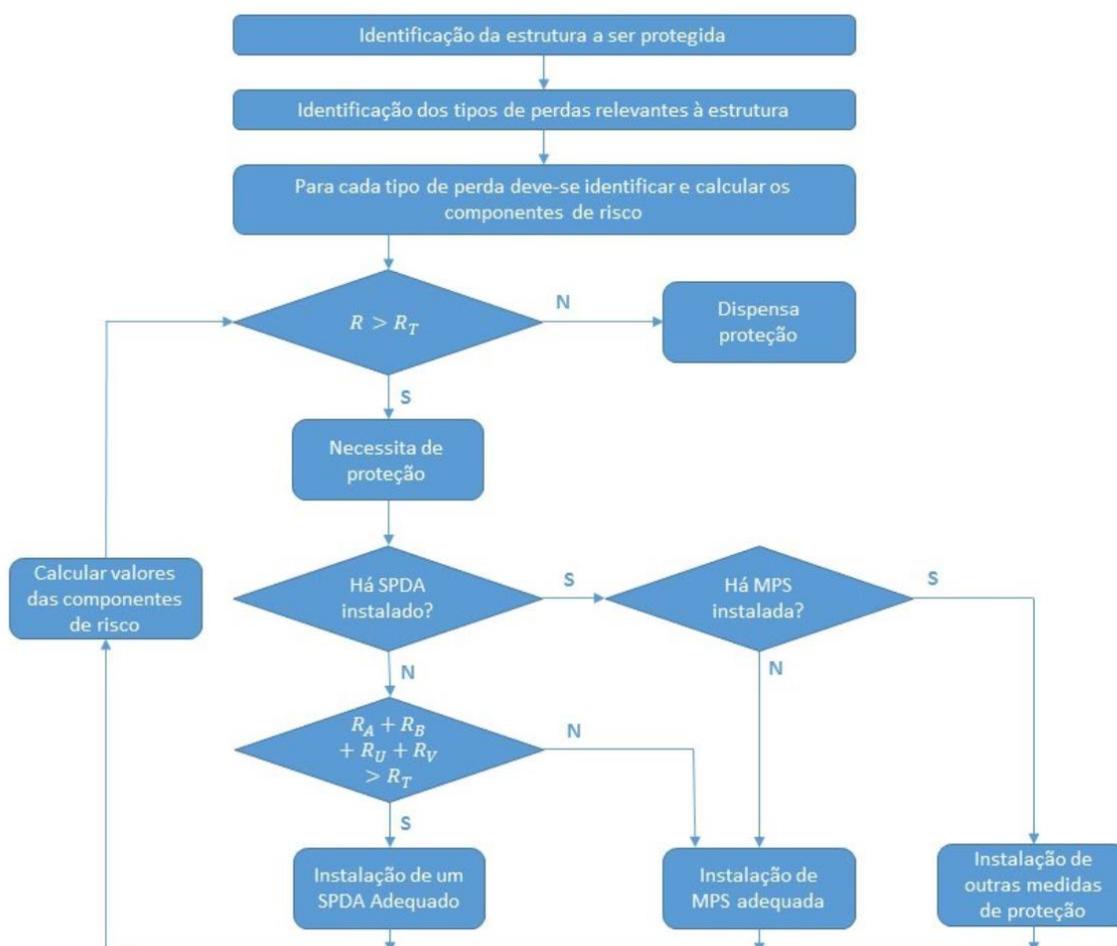
Figura 38 – Procedimento para avaliação da eficiência do custo das medidas de proteção.



Fonte: Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2015.

A necessidade de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas consiste basicamente em avaliar cada tipo de risco da estrutura e comparar o risco total da estrutura com os riscos toleráveis para cada tipo de perda, então, caso o risco calculado seja menor que o risco tolerável não é necessária a proteção contra descargas atmosféricas, e, caso do risco calculado supere o risco tolerável, as medidas de proteção devem ser adotadas visando reduzir o risco total da estrutura abaixo do risco tolerável (ABNT NBR 5419-2, 2015). A Figura 39 representa o procedimento para a avaliação da necessidade de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Figura 39 – Procedimento para avaliação da necessidade de medidas de proteção.



Fonte: Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2015.

4.3 ABNT 5419-3: DANOS FÍSICOS A ESTRUTURAS E PERIGOS À VIDA

A terceira parte da nova norma de proteção contra descargas atmosféricas trata das medidas de proteção a serem tomadas para proteger o interior e ao redor de uma edificação contra todos os tipos de danos ocorridos na segunda parte desta norma. A medida de proteção mais usual e obviamente a mais eficaz é o SPDA.

A principal função do sistema de proteção contra descargas atmosféricas é a interceptação da descarga atmosférica destinada à estrutura, por meio de um subsistema de captação, e a condução a corrente do impulso atmosférico de forma segura, pelos subsistemas, dispersando essa quando encontrada no subsistema de aterramento. Os materiais que compõem os subsistemas em questão devem ser cuidadosamente dimensionados e devem respeitar minuciosamente a NBR 5419 para que seja evitado centelhamento perigoso para a estrutura, suas instalações e seus ocupantes (ABNT NBR 5419-3, 2015).

4.3.1 Classes do SPDA e parâmetros da corrente de descarga atmosférica

A definição do nível de proteção relacionado às características de um volume a ser protegido não alterou em relação à versão predecessora da ABNT NBR 5419, portanto a relação dos níveis de proteção com as características de uma edificação está disposta no Quadro 1.

A ABNT 5419 de 2015 dimensiona os elementos do SPDA, bem como o volume de proteção da estrutura e disposição dos elementos condutores considerando os valores dos parâmetros da corrente de descargas atmosféricas máximos e mínimos para cada nível de proteção definidos no Quadro 18 e Quadro 19, e assume-se que a eficiência de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas de um determinado nível de proteção é igual a probabilidade dos parâmetros da descarga atmosférica estarem dentro destes limites, isto é, a eficiência de um SPDA que é dimensionado de acordo com a ABNT NBR 5419 de 2015 para um determinado nível de proteção é disposta no Quadro 20.

O modelo eletrogeométrico, ou método das esferas rolantes, é utilizado para otimização da disposição dos elementos condutores do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Como descrito na Equação 3, o raio da esfera fictícia é diretamente proporcional a menor corrente de pico da descarga atmosférica relacionada ao nível de proteção do SPDA. Na versão vigente da ABNT NBR 5419 os valores mínimos da corrente de pico das descargas atmosféricas não foram alterados para os três níveis de proteção mais significativos, alterando apenas no nível de proteção IV, portanto os raios de atração do modelo eletromagnético são os mesmos apresentados na versão predecessora da norma. Os raios da esfera rolante correspondentes aos quatro níveis de proteção do SPDA estão dispostos no Quadro 51.

Quadro 51 – Valores mínimos das correntes de pico das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante correspondentes aos devidos níveis de proteção.

Critérios de interceptação			NP			
	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico mínima	<i>I</i>	<i>kA</i>	3	5	10	16
Raio da esfera rolante	<i>r</i>	<i>m</i>	20	30	45	60

Fonte: ABNT NBR 5419-1:2015.

4.3.2 Subsistemas do sistema de proteção contra descargas atmosféricas

A versão vigente da ABNT NBR 5419 apresenta um aumento quantitativo em relação aos materiais utilizados no sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Uma das alterações mais significativas, além da quantidade de materiais, é a adequação da bitola de alguns condutores utilizados nos subsistemas do SPDA conforme a prática usual do país (O Setor Elétrico, 2015).

Com exceção do método geométrico, houveram alterações significativas em relação ao método de Franklin e o método da gaiola de Faraday, aumentando a quantidade de materiais a serem utilizados nos subsistemas de captação, descidas e aterramento. No entanto, resumidamente, as alterações de projeto de SPDA conforme a versão vigente da norma ABNT NBR 5419 beneficiam na eficiência dos subsistemas

de proteção e, conseqüentemente, impactam em um aumento nas quantidades de elementos para atender as mínimas exigências da norma.

Em relação à utilização dos materiais do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, a ABNT NBR 5419 de 2015 determina que os materiais utilizados na construção civil devam suportar alguns danos, como a possibilidade de corrosão, tanto da estrutura a ser protegida, quanto dos próprios elementos do SPDA, além de suportar os efeitos eletromagnéticos da corrente de descarga atmosférica e esforços acidentais previsíveis sem serem danificados (ABNT NBR 5419-3, 2015).

As condições de utilização para os materiais de SPDA, bem como suas características de corrosão propostas pela atual versão da norma de proteção contra descargas atmosféricas está disposta no Quadro 52, o qual determina as condições de aplicabilidade dos materiais utilizados do SPDA em relação imunidade à corrosão. Em circunstâncias especiais, o projeto de SPDA deve conter em seu memorial de cálculo as condições de imunização de corrosão (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Quadro 52 – Materiais do SPDA e condições de aplicação.

Material	Aplicação				Corrosão		
	Ao ar livre	Enterrado	No concreto ou reboco	No concreto armado	Resistência	Risco agravado	Podem ser destruídos por acoplamento galvânico
Cobre	Maciço, encordoado ou como cobertura	Maciço, encordoado ou como cobertura	Maciço, encordoado ou como cobertura	Não permitido	Boa em muitos ambientes	Compostos sulfurados; Materiais orgânicos; Altos conteúdos de cloretos.	-
Aço galvanizado a quente	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Aceitável no ar, em cloreto e em solos salubres	Altos conteúdos de cloretos.	Cobre
Aço inoxidável	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Boa em muitos ambientes	Altos conteúdos de cloretos.	-
Aço revestido por cobre	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Maciço ou encordoado	Não permitido	Boa em muitos ambientes	Compostos sulfurados	-
Alumínio	Maciço ou encordoado	Não permitido	Não permitido	Não permitido	Boa em atmosferas com baixa concentração de sulfadrado e cloreto	Soluções alcalinas	Cobre

Fonte: ABNT NBR 5419-3:2015.

Conforme a norma ABNT NBR 5419 de 2015 as fixações entre condutores do SPDA devem estar distanciadas em até 1 metro para condutores no sentido horizontal e até 1,5 metros no sentido vertical, em questões preventivas contra afrouxamento ou quebra de condutores por forças eletrodinâmicas ou mecanismos acidentais. A quantidade das conexões entre condutores do sistema de proteção deve ser minimizada ao longo dos subsistemas e devem ser efetuadas de forma segura por meio de solda elétrica ou exotérmica e conexões mecânicas de pressão ou compressão, vetando a utilização emendas nos condutores.

O Quadro 53 é disponibilizado pela ABNT NBR 5419 de 2015 e deve ser utilizado para o dimensionamento dos elementos não naturais dos subsistemas de captação e de descida do SPDA.

Quadro 53 – Materiais dos subsistemas de captação e descidas e condições de aplicação.

Material	Configuração	Área da seção mínima [mm ²]	Comentários ⁴
Cobre	Fita Maciça	35	Espessura 1,75mm
	Arredondado maciço ⁴	35	Diâmetro 6mm
	Encordoado	35	Diâmetro cada fio 2,5mm
	Arredondado maciço ²	200	Diâmetro 16mm
Alumínio	Fita Maciça	70	Espessura 3mm
	Arredondado maciço	70	Diâmetro 9,5mm
	Encordoado	70	Diâmetro cada fio 3,5mm
	Arredondado maciço ²	200	Diâmetro 16mm
Aço cobreado IACS 30% ⁵	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8mm
	Encordoado	50	Diâmetro cada fio 3mm
Alumínio cobreado IACS 64%	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8mm
	Encordoado	70	Diâmetro cada fio 3,6mm
Aço galvanizado a quente ¹	Fita Maciça	50	Espessura mínima 2,5mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8mm
	Encordoado	50	Diâmetro cada fio 1,7mm
	Arredondado maciço ²	200	Diâmetro 16mm
Aço inoxidável ³	Fita Maciça	50	Espessura 2mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8mm
	Encordoado	70	Diâmetro cada fio 1,7mm
	Arredondado maciço ²	200	Diâmetro 16mm

¹ O recobrimento a quente deve ser realizado conforme a norma ABNT NBR 6323 [1];
² Aplicado apenas a mini captotes. Quando esforços mecânicos, como a força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 milímetros e comprimento máximo de 1 metro;
³ Composição mínima AISI 304 ou composto por cromo 16%, níquel 8% e carbono 0,07%;
⁴ Admite-se tolerância nos valores mínimos de 5%, exceto para os fios das cordoalhas, onde a tolerância é 2%;
⁵ Cordoalha cobreada deve ter condutividade mínima de 30% IACS.

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

A versão atual da ABNT NBR 5419 ainda especifica o dimensionamento dos materiais não naturais dos eletrodos de aterramento que devem ser atendidos precisamente como se encontram no Quadro 54, especialmente se os condutores dos subsistemas de captação e descida estiverem em contato direto com o solo.

Quadro 54 – Materiais do SPDA e condições de aplicação.

Material	Configuração	Dimensões mínimas		Comentários ³
		Eletrodo cravado Diâmetro [mm]	Eletrodo não cravado	
Cobre	Encordoado	-	Seção 50 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3mm
	Arredondado maciço	-	Seção 50 mm ²	Diâmetro 8mm
	Fita maciça	-	Seção 50 mm ²	Espessura 2mm
	Arredondado maciço	15	-	-
	Tubo	20	-	Espessura da parede 2mm
Aço galvanizado à quente ¹	Arredondado maciço	16	Diâmetro 10mm	-
	Tubo	25	-	Espessura da parede 2mm
	Fita maciça	-	Seção 90 mm ²	Espessura 3mm
	Encordoado	-	Seção 70 mm ²	-
Aço cobreado	Arredondado maciço Encordoado	12,7	Seção 70 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,45mm
Aço inoxidável ²	Arredondado maciço Fita maciça	15	Diâmetro 10mm Seção 100mm ²	Espessura mínima 2mm

¹ O recobrimento a quente deve ser realizado conforme a norma ABNT NBR 6323 [1];
² Composição mínima AISI 304 ou composto por cromo 16%, níquel 8% e carbono 0,07%;
³ Admite-se tolerância nos valores mínimos de 5%, exceto para os fios das cordoalhas, onde a tolerância é 2%.

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

A sintonia e coordenação entre os projetos e a execução das estruturas a serem protegidas e do SPDA possibilitam um maior número de soluções a serem adotadas e, conseqüentemente, uma otimização no custo da obra. É preferível que o projeto estrutural de uma edificação seja realizado objetivando a viabilidade das partes metálicas como componentes naturais do SPDA (ABNT NBR 5419-3, 2015).

A armadura de aço em estruturas de concreto armado pode ser utilizada como componente natural do SPDA, contando que seja considerada eletricamente contínua. A ABNT NBR 5419 do ano de 2015 determina, exatamente como em sua versão

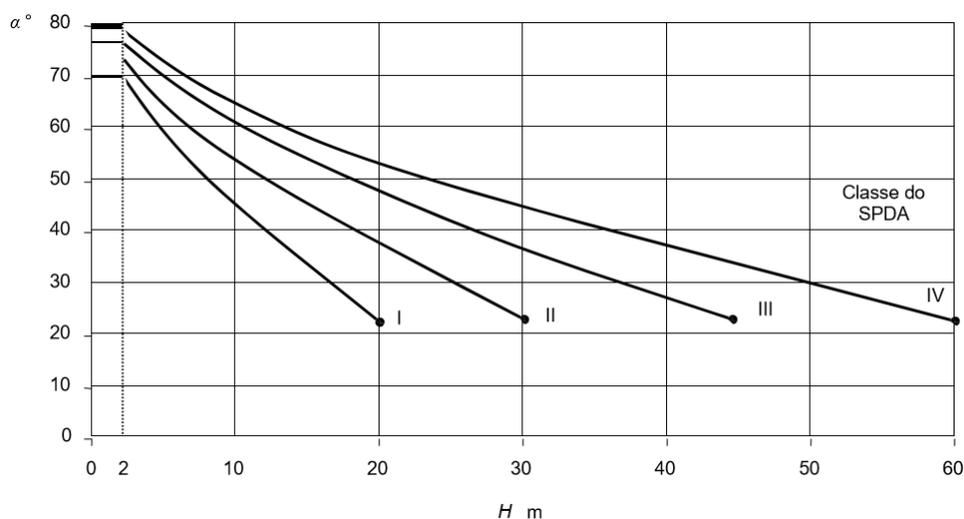
anterior, que a armadura de aço em estruturas de concreto armado é considerada eletricamente contínua se ao menos a metade das conexões entre barras horizontais e verticais sejam firmemente conectadas, e as conexões entre barras verticais forem soldadas, ou unidas por arame recozido, grampos ou cintas, e trespasadas com sobreposição mínima de 20 vezes o seu diâmetro. Para estruturas executadas com armadura de aço em concreto, bem como as estruturas pré-fabricadas, a resistência elétrica total entre o topo e a base da edificação não pode superar 0,2 ohms em ensaios de continuidade. Para a mesma situação, na versão predecessora da ABNT NBR 5419, o valor da resistência elétrica entre a base e o topo da edificação era de 1 ohm, ou seja, a versão vigente da norma se torna mais rigorosa quanto a continuidade para armaduras de aço em concreto armado.

4.3.2.1 Subsistema de captação

A disposição dos elementos do subsistema de captação é realizada pelos métodos de sistema de proteção contra descargas atmosféricas apresentados pela ABNT NBR 5419 de 2015, onde o modelo eletrogeométrico identifica os pontos vulneráveis a uma descarga atmosférica direta na edificação, e os métodos da malha de Faraday e do captor Franklin dependem, sobretudo, do nível de proteção do SPDA e da altura da edificação a ser protegida.

Na versão anterior da ABNT NBR 5419, o ângulo de proteção dos captores era estabelecido por valores fixos para cada nível de proteção, sendo o menor ângulo correspondente ao nível de proteção mais severo. Na versão vigente da ABNT NBR 5419, o ângulo de proteção para cada nível de proteção é definido por uma curva dependendo da altura do captor a cima do plano de referência. A variação do ângulo de proteção é inversamente proporcional à altura da edificação a ser protegida, quando esta é superior a 2 metros. As curvas correspondentes aos ângulos de proteção para cada classe do SPDA em relação à altura do captor estão dispostas na Figura 40.

Figura 40 – Ângulos de proteção correspondentes à classe do SPDA e altura dos captores.



Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Conforme a ABNT NBR 5419 de 2015, o subsistema de captação pode ser disposto por condutores em malha respeitando os máximos afastamentos dos condutores em malha correspondente a cada nível de proteção estabelecido para a edificação a ser protegida, conforme o Quadro 55.

Quadro 55 – Espaçamentos dos condutores em malha de acordo com a classe do SPDA.

Classe do SPDA	Máximo afastamento dos condutores em malha [metros]
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Pesquisas indicam que a probabilidade do impacto de descargas atmosféricas de baixa amplitude na fachada de estruturas menores de 60 metros de altura são suficientemente baixas podendo ser desconsideradas. Para estruturas com esta particularidade, os elementos como telhados e saliências horizontais devem ser protegidos de acordo com a classe do SPDA determinada pela avaliação de risco de incidência direta de uma descarga atmosférica no volume da edificação. No entanto,

a probabilidade da ocorrência de descargas laterais deve ser considerada para estruturas com altura superior a 60 metros, especialmente em saliências da edificação (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Considerando que apenas uma pequena porcentagem das descargas atmosféricas possa ser lateral e que este tipo de descarga tem amplitude significativamente reduzida em relação aos outros tipos de descargas atmosféricas, a ABNT NBR 5419 de 2015 determina que uma instalação de captação lateral seja instalada nas saliências da edificação respeitando os critérios de instalação determinados, ao menos, pelo nível de proteção IV.

A instalação da captação lateral é satisfeita na presença de elementos metálicos nas saliências da estrutura, conforme o dimensionamento do Quadro 56 e deve ser interligada ao subsistema de descida da edificação, ou estruturas metálicas eletricamente contínuas na fachada ou em armaduras de aço do concreto armado dos pilares que sejam condicionados como componente natural do SPDA.

Quadro 56 – Espessuras mínimas das chapas metálicas ou tubulações metálicas em sistemas de captação.

Material	Espessura [mm] prevenção necessária perfuração, pontos quentes ou ignição	Espessura [mm] chapas metálicas prevenção não necessária contra perfuração, pontos quentes ou ignição
Chumbo	-	2
Aço inoxidável e galvanizado a quente	4	0,5
Titânio	4	0,5
Cobre	5	0,5
Alumínio	7	0,65
Zinco	-	0,7

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

4.3.2.2 Subsistema de descida

Conforme a ABNT NBR 5419 do ano de 2015, o subsistema de descidas deve conter diversos caminhos paralelos com menor comprimento possível para a

circulação da corrente da descarga atmosférica com a finalidade da redução da probabilidade de danos, e deve haver uma equipotencialização deste subsistema com os demais componentes condutores da estrutura protegida conforme os requisitos de equipotencialização especificados para esta norma.

Os condutores de descidas devem ser distanciados por um espaçamento variando no máximo 20 por cento dos valores especificados no Quadro 57, bem como os espaçamentos entre interligações horizontais dos mesmos, equivalente a cada nível de proteção.

Quadro 57 – Espaçamentos dos condutores de descida e interligações horizontais de acordo com a classe do SPDA.

Classe do SPDA	Distâncias em metros
I	10
II	10
III	15
IV	20

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

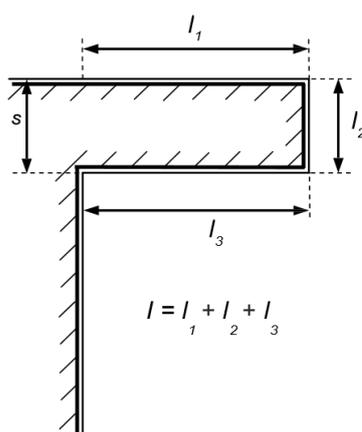
No caso de um SPDA isolado, o posicionamento das descidas deve atender as especificações dos captores. Se os captores forem hastes em mastros separados não metálicos nem interconectado às armaduras da estrutura, é necessário a instalação de ao menos um condutor de descida para cada mastro, sendo desnecessário a disposição de condutores de descidas para mastros metálicos ou interconectados às armaduras da estrutura. Se os captores consistirem em condutores suspensos ou formam uma rede de condutores, é necessário a instalação de ao menos um condutor de descida para cada suporte de terminação de condutores (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Para um SPDA não isolado, o número de condutores de descidas deve ser disposto uniformemente pelo perímetro da estrutura de acordo com o Quadro 57, porém, se o cálculo da quantidade de descidas em relação ao nível de proteção e ao perímetro da estrutura for inferior a 2, devem ser instalados ao menos dois condutores de descida utilizando o espaçamento mais uniforme possível. Os condutores de

descidas devem ser instalados preferencialmente em cada canto saliente da estrutura (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Conforme a ABNT NBR 5419 do ano de 2015, os condutores de descidas devem ser projetados de maneira a percorrerem o caminho mais curto e direto até o solo evitando a formação de laços em seu caminho, como apresentado no Figura 41. Porém, em situações em que a variação de direção dos condutores de descida não possa ser evitada, se deve prever um certo espaçamento entre os condutores paralelos para se evitar esforços eletrodinâmicos prejudiciais à integridade dos materiais utilizados.

Figura 41 – Laço em um condutor de descida.



Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

A distância de segurança S representada na Figura 41 é estimada pela Equação 43, a qual depende dos níveis de isolamento do SPDA.

$$S = \frac{k_i}{k_m} \cdot k_c \cdot l \quad (43)$$

Onde:

S é a distância de segurança entre os dois condutores em paralelo, expressa em metros (m);

k_i é um coeficiente que depende do nível de proteção do SPDA, disposto no Quadro 58;

k_m é um coeficiente que depende do material isolante, disposto no Quadro 59, onde para o caso de diversos materiais isolantes em série, deve-se utilizar o menor valor para este coeficiente;

k_c é um coeficiente que depende da quantidade de descidas, disposto no Quadro 60;

l é o comprimento total do laço, expresso em metros.

Quadro 58 – Coeficiente k_i em relação ao nível de proteção.

Classe do SPDA	k_i
I	0,08
II	0,06
III - IV	0,04

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Quadro 59 – Coeficiente k_m em relação ao material isolante.

Material isolante	k_m
Ar	1
Concreto ou tijolos	0,5

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Quadro 60 – Coeficiente k_c em relação ao número de descidas.

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

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Se a parede da edificação a ser protegida é feita de material não combustível, os condutores de descida podem ser posicionados na superfície ou dentro da parede em questão. Porém se a parede for de material combustível, os condutores de descidas poderão ser instalados na superfície da parede desde que a elevação da temperatura dos condutores devido à passagem da corrente elétrica das descargas atmosféricas não causa perigo para o material da parede, caso contrário, a instalação

dos condutores de descida deve respeitar uma distância mínima de 10 centímetros da superfície da parede da estrutura (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Conforme a versão vigente da ABNT NBR 5419, os componentes da estrutura podem ser considerados naturais se forem instalações metálicas eletricamente contínuas fixadas conforme os requisitos da norma e com dimensões conforme o Quadro 53, armaduras das estruturas de concreto armado eletricamente contínuas conforme os requisitos desta norma, vigamento de aço interconectado da estrutura e elementos de fachada desde que as dimensões dos materiais condutores destes respeitem os dimensionamentos descritos no Quadro 53 e com espessuras das chapas metálicas sem prevenção contra perfuração, pontos quentes ou ignição iguais ou superiores às dispostas no Quadro 56.

Nas junções entre os cabos de descidas e os eletrodos de aterramento deve ser instalada uma conexão de ensaio, exceto para condutores de descida natural conectado em eletrodos de aterramento naturais (ABNT NBR 5419-3, 2015).

4.3.2.3 Subsistema de aterramento

A versão vigente da norma não estabelece uma resistência de aterramento mínima, porém requisita que os eletrodos de aterramento sejam projetados visando a menor resistência de aterramento possível para uma dispersão da corrente elétrica da descarga atmosférica para a terra sem impactar à estrutura protegida, os componentes do SPDA, os ocupantes da estrutura e as instalações no interior da estrutura.

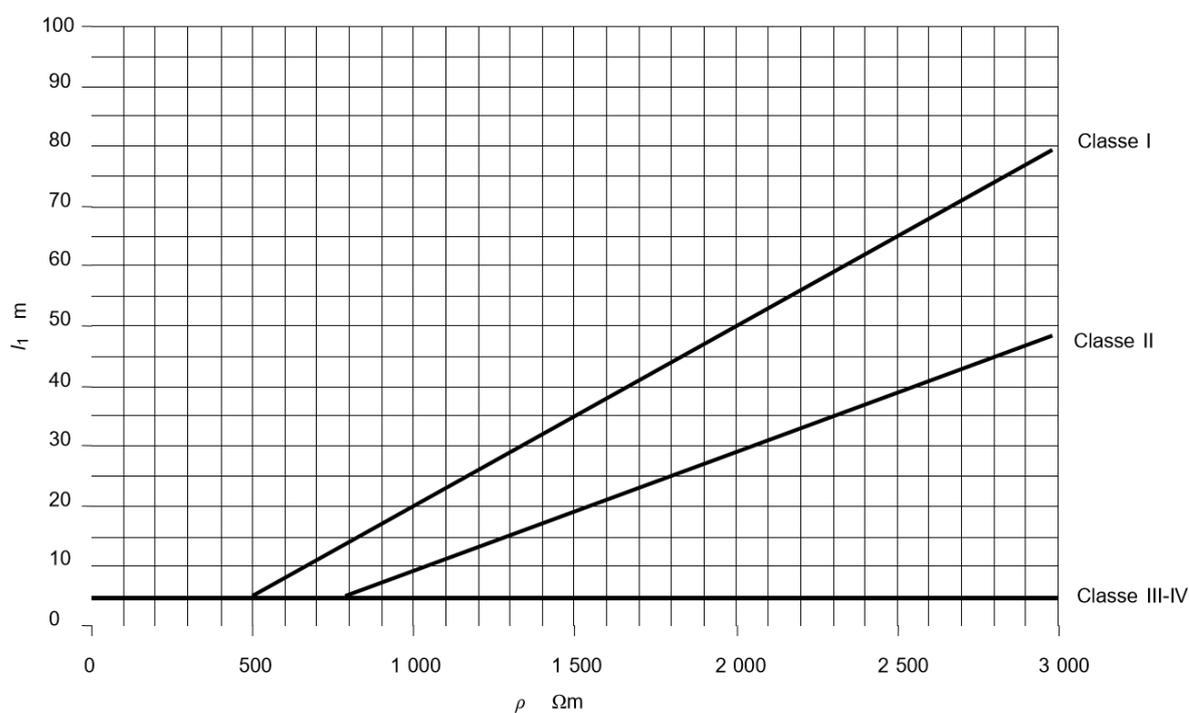
É preferível um único arranjo de eletrodos de aterramento integrado para uma edificação a ser protegida, interligando equipotencialmente o sistema de proteção contra descargas atmosféricas, os sistemas de energia elétrica e sinal, e todas as partes metálicas existentes na edificação (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Preferencialmente, para os eletrodos de aterramento, deve-se utilizar as armaduras da fundação da edificação, porém, na impossibilidade desta, o arranjo dos eletrodos de aterramento deve ser em forma de anel, externo a estrutura protegida, em contato com o solo por pelo menos 80 % do seu comprimento total, ou com um

elemento condutor interligando as armaduras descontínuas da fundação. Para situações que envolvam tensões superficiais perigosas, devem ser consideradas medidas preventivas (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Para eletrodos em anel ou interligando a fundação descontínua, o raio médio da área abrangida pelos eletrodos não deve ser inferior ao valor do comprimento do eletrodo especificado na Figura 42 para cada nível de proteção do SPDA (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Figura 42 – Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento correspondente ao nível de proteção do SPDA e a resistividade do solo.



Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Quando o valor requerido do comprimento do eletrodo de aterramento for superior ao raio médio da área abrangida pelos eletrodos, eletrodos horizontais, com comprimento equivalente a diferença entre o comprimento requerido pela Figura 42 e o comprimento do raio da área abrangida, ou verticais, com comprimento equivalente à metade de tal diferença, devem ser instalados (ABNT NBR 5419-3, 2015).

Os condutores em anel devem ser instalados a uma profundidade mínima de 50 centímetros e devem distanciar aproximadamente 1 metro ao redor das paredes externas da estrutura. No caso da impossibilidade deste tipo de instalação, o mesmo deve ser instalado internamente requisitando medidas para minimização do risco causado por tensões superficiais (ABNT NBR 5419-3, 2015).

4.3.3 Equipotencialização em proteção contra descargas atmosféricas

Conforme a ABNT NBR 5419 de 2015, deve ser realizada uma ligação equipotencial entre os elementos do SPDA e as instalações metálicas, sistemas internos, demais partes condutivas e linhas elétricas externas a estrutura. A equipotencialização pode ser direta, por meio de condutores de ligação, ou indireta por dispositivos de proteção contra surtos e centelhadores (ABNT NBR 5419-3, 2015).

No caso de um SPDA isolado, a equipotencialização deve ser efetuada somente ao nível do solo, entretanto para um SPDA não isolado deve ser construída e instalada uma barra de ligação equipotencial ao nível do solo ou próximo a este nível. E no caso de uma estrutura extensa em suas dimensões, devem ser instaladas tantas barras de equipotencialização local (BEL) quantas forem necessárias, distanciando aproximadamente 20 metros de outra barra de equipotencialização. O BEP e BEL devem ser interligados entre si e ao sistema de aterramento por condutores de material e dimensões especificadas no Quadro 61. Todos os sistemas internos, bem como as instalações condutoras da estrutura devem ser interligadas aos barramentos de equipotencialização por condutores de material e dimensões especificadas no Quadro 62.

Quadro 61 – Dimensões mínimas dos condutores que interligam os barramentos de equipotencialização entre si e ao sistema de aterramento.

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

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

Quadro 62 – Dimensões mínimas dos condutores que interligam os elementos metálicos internos aos barramentos de equipotencialização.

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

Fonte: ABNT NBR 5419-3, 2015.

4.4 ABNT 5419 PARTE 4: SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS INTERNOS NA ESTRUTURA

A quarta e última parte da norma ABNT NBR 5419 de 2015 trata do sistema interno da estrutura, ou seja, abrange o sistema de proteção contra os possíveis danos nos sistemas eletroeletrônicos existentes nas estruturas.

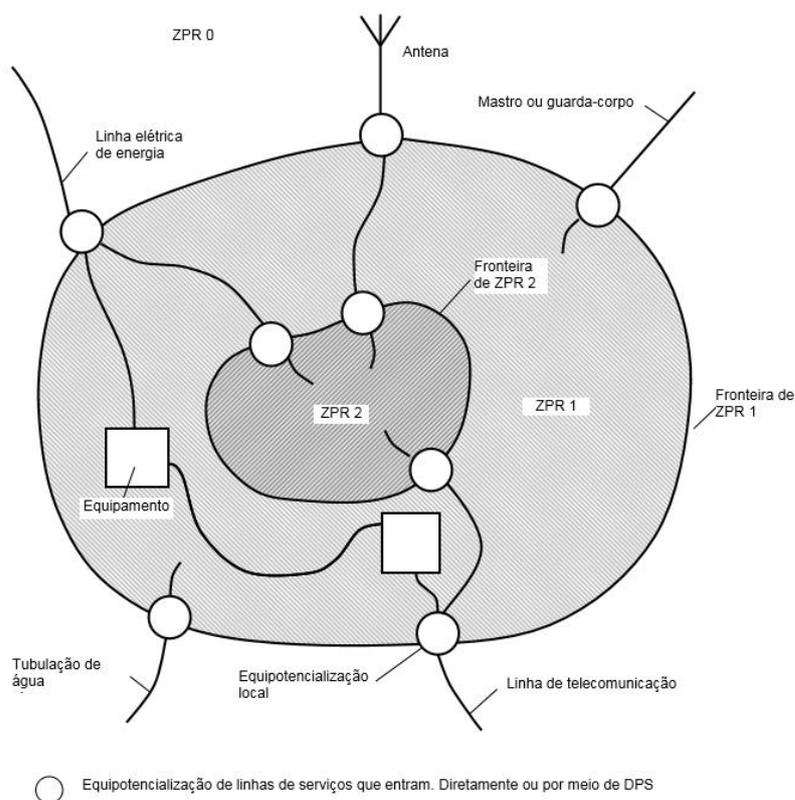
Os principais danos ocorridos nas instalações do interior da estrutura são relacionados ao pulso eletromagnético devido às descargas atmosféricas (LEMP ou lightning electromagnetic pulse) que ocorrem por meio de surtos conduzidos ou induzidos que são transmitidos para o interior da estrutura por meio de cabos que adentram a estrutura ou que são criados pela própria descarga atmosférica que atinge a estrutura ou o solo próximo a estrutura, ou que ocorrem por efeitos dos campos eletromagnéticos que são irradiados para os equipamentos, que, por sua vez, são

gerados pela corrente que flui no canal das descargas atmosféricas diretas ou pela corrente parcial da descarga fluindo pelos subsistemas do SPDA (ABNT NBR 5419-4, 2015).

4.4.1 Princípios gerais

As medidas de proteção contra impulsos eletromagnéticos, conforme a quarta parte da ABNT NBR 5419 de 2015, é baseada no conceito de zonas de proteção contra raios (ZPR). As zonas de proteção são associadas diretamente à parte espacial onde a severidade do LEMP é compatível com a suportabilidade dos sistemas internos existentes na estrutura. As zonas de proteção são distribuídas conforme o esquema da Figura 43, que representa uma divisão de zonas de proteção contra raios onde todos os elementos metálicos, bem como as linhas de energia e sinal externos à estrutura são equipotencializados por dispositivos de proteção contra surto. (ABNT NBR 5419-4, 2015).

Figura 43 – Princípios gerais para definição das zonas de proteção.



Fonte: ABNT NBR 5419-4, 2015.

Onde:

ZPR_0 é a zona onde a ameaça é devido a não atenuação do campo eletromagnético da descarga atmosférica e onde os sistemas internos podem estar sujeitos às correntes de surto totais ou parciais;

ZPR_1 é a zona onde a corrente de surto é limitada por meios de barras de equipotencialização na fronteira de ZPR_1 ;

ZPR_2 é a zona onde a corrente de surto é ainda mais limitada por barras de equipotencialização na fronteira de ZPR_2 .

4.4.2 Medidas básicas de proteção contra surtos

As medidas de proteção contra surtos devem ser projetadas para equipamentos de proteção contra surtos, por meio de sistemas de DPS coordenados, e para campos eletromagnéticos, por meio de equipotencialização e blindagem dos equipamentos (ABNT NBR 5419-4, 2015).

4.4.2.1 Aterramento e equipotencialização

O sistema de aterramento é responsável pela dispersão da corrente das descargas atmosféricas para a o solo. Com a finalidade da diminuição das diferenças de potencial e conseqüentemente redução do campo magnético causado pela corrente das descargas atmosféricas, deve ser realizado uma rede de equipotencialização no sistema de aterramento (ABNT NBR 5419-4, 2015).

Partindo do pressuposto que o sistema de aterramento seja projetado conforme a terceira parte da ABNT NBR 5419 e que, para um caso específico, um determinado empreendimento contenha mais de um sistema de aterramento, os mesmos devem ser interligados por vários condutores de equipotencialização em paralelo percorrendo os mesmos caminhos dos cabos elétricos ou cabos instalados nos dutos de concreto armado os quais se encontram integrado aos sistemas de aterramento existentes (ABNT NBR 5419-4, 2015).

Conforme a ABNT NBR 5419-4 de 2015, uma ligação equipotencial de baixa impedância minimiza as diferenças de potencial e reduzem os efeitos do campo magnético entre todos os equipamentos nas zonas de proteção. As ligações equipotenciais podem ser arranjadas como uma malha tridimensional com múltiplas interligações entre todos os componentes metálicos da estrutura, as barras de equipotencialização e as blindagens das zonas de proteção.

Os materiais, dimensões e condições de utilização dos componentes de equipotencialização devem atender a ABNT NBR 5419-3 de 2015, e devem atender a seção transversal mínima especificada no Quadro 63.

Quadro 63 – Seções transversais mínimas para os componentes de equipotencialização.

Componentes de Equipotencialização		Material	Seção transversal [mm ²]
Barras de equipotencialização (Cobre, aço cobreado ou galvanizado)		Cobre	50
		Ferro	50
Condutores de conexão de barras de equipotencialização para subsistema de aterramento		Cobre	50
		Ferro	80
Condutores de conexão entre barras de equipotencialização conduzindo uma parcela significativa ou o total da corrente do raio		Cobre	16
		Alumínio	25
		Ferro	50
Condutores para conexão entre partes metálicas internas da instalação e as barras de equipotencialização conduzindo uma parcela da corrente do raio		Cobre	6
		Alumínio	10
		Ferro	16
Condutores de aterramento para o DPS conduzindo uma parcela ou o total da corrente do raio	Classe I	Cobre	16
	Classe II		6
	Classe III		1
	Outros		1

Fonte: ABNT NBR 5419-4, 2015.

4.4.2.2 Blindagem magnética e roteamento de linhas

A blindagem espacial corresponde ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas das estruturas e define as zonas de proteção que podem, dependendo da configuração, cobrir uma totalidade ou parte da estrutura a ser protegida. Os métodos para blindagem de uma estrutura devem atender aos requisitos de projetos especificados na ABNT NBR 5419-3 de 2015. É aconselhável que tal medida de proteção seja providenciada nos primórdios do projeto em função do alto custo para uma readequação em uma estrutura existente (ABNT NBR 5419-4, 2015).

O atendimento do dimensionamento mínimo dos materiais especificados nos Quadros 52 e 55 referentes à ABNT NBR 5419-3 de 2015 é desnecessário na fronteira entre as zonas de proteção contra raios 1 e 2, ou entre zonas mais protegidas, respeitando o afastamento mínimo entre condutores especificado na Equação 43, ou se nas fronteiras de qualquer zona de proteção contra raios o número de eventos perigosos, calculado pela Equação 12, for desprezível.

4.4.2.3 Coordenação de DPS

A proteção contra surtos de sistemas internos é realizada pelo sistema de coordenação de DPS para linhas de sinais e energia. Em medidas de proteção contra surto utilizando o conceito de zonas de proteção contra raios, os DPS devem ser instalados em cada ponto em que uma linha de energia ou sinal adentra na zona de proteção em questão, podendo haver a necessidade de DPS adicionais se a distância entre a localização do DPS e o equipamento a ser protegido for consideravelmente longa (ABNT NBR 5419-4, 2015).

5 COMPARAÇÃO ENTRE ABNT NBR 5419 DE 2005 E 2015

5.1 CORPO DA NORMA

O primeiro impacto entre as versões do ano de 2005 e 2015 da ABNT NBR 5419 se encontra na estrutura da norma. Porém ambas são apresentadas como a disposição da norma internacional as quais são baseadas.

A ABNT NBR 5419 do ano de 2005, baseada na norma internacional IEC 61024, tem apenas 49 páginas contendo a metodologia do projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

A ABNT NBR 5419 do ano de 2015, baseada na norma internacional IEC 62305, é composta por 309 páginas divididas em quatro partes, sendo elas:

- Parte 1 – Princípios Gerais;
- Parte 2 – Gerenciamento de Risco;
- Parte 3 – Danos físicos a estruturas e perigos à vida;
- Parte 4 – Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.

A primeira parte da versão vigente da ABNT NBR 5419 trata de um forte embasamento teórico na obtenção dos parâmetros das descargas atmosféricas, que não era abrangida em sua versão de 2005. Tais parâmetros são importantíssimos para a compreensão do comportamento da corrente das descargas atmosféricas nos materiais do sistema de proteção a serem projetados. Nesta parte da norma também são dispostos modelos simples de gerador de ensaios para a simulação dos parâmetros das descargas atmosféricas, bem como os parâmetros de entrada dos ensaios para simular efeitos específicos em cada subsistema do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Além da primeira parte da norma, a parte 4 da ABNT NBR 5419 de 2015 supre uma lacuna existente em sua versão predecessora com relação à proteção dos sistemas elétricos e eletrônicos no interior da edificação. Esta parte da norma se baseia no conceito de zonas de proteção contra raios, em que cada zona demanda uma medida de proteção. Espera-se que com o emprego desta última parte da norma, haja um refinamento da proteção interna das edificações, o que acarreta em um

aumento da vida útil dos equipamentos internos, bem como um benefício dos ambientes internos que contenham equipamentos eletrônicos sensíveis.

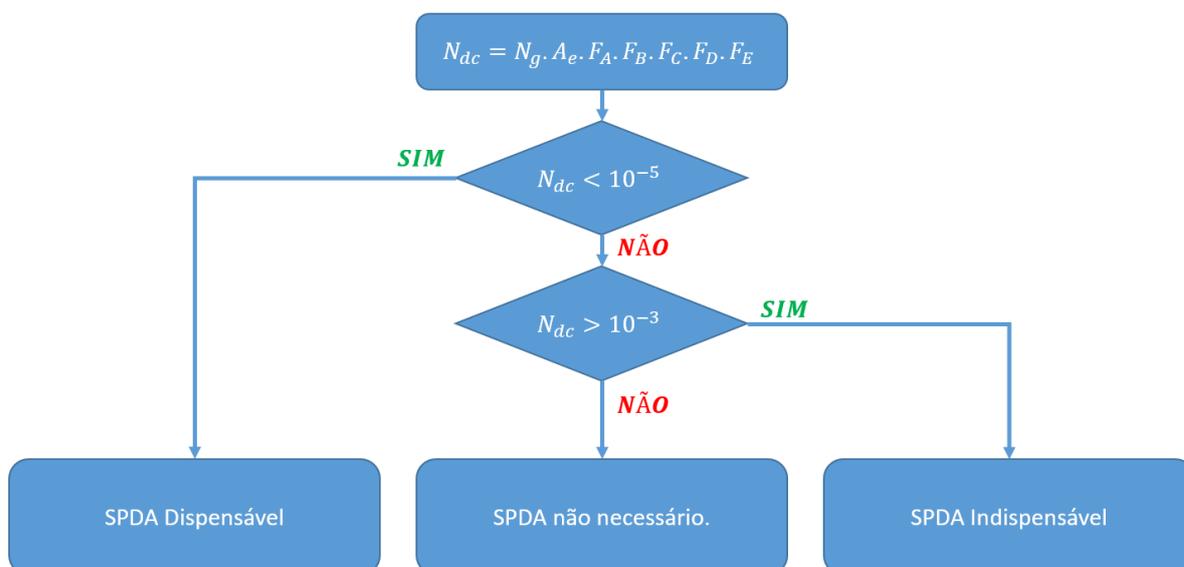
5.2 GERENCIAMENTO DE RISCO

O gerenciamento de risco na versão da norma de 2005 é descrito no Anexo B da norma com o título “Método de seleção do nível de proteção”, porém esta versão da norma não seleciona o nível de proteção da estrutura de fato. Para a ABNT NBR 5419 do ano de 2005 o nível de proteção é um parâmetro dependente do tipo da estrutura e os efeitos das descargas atmosféricas sobre esta, e é especificado a partir da análise do Quadro 1.

A análise do enquadramento da estrutura na necessidade de um SPDA, para a versão de 2005 da ABNT NBR 5419 é realizada pelo produto entre a densidade de descargas atmosféricas para a região a ser protegida e a área de exposição da estrutura. Tal produto é denominado frequência anual previsível de danos para a estrutura, e é, posteriormente, ponderado por cinco fatores, dispostos nos Quadros 2 a 6, assim como é mostrado na Equação 6.

Após se obter o valor ponderado das descargas atmosféricas por ano na estrutura a ser protegida, compara-se este valor ao número admissível de danos para a verificação da necessidade do SPDA. Tal processo é disposto na Figura 44.

Figura 44 – Fluxograma da necessidade de SPDA para a ABNT NBR 5419 de 2005.

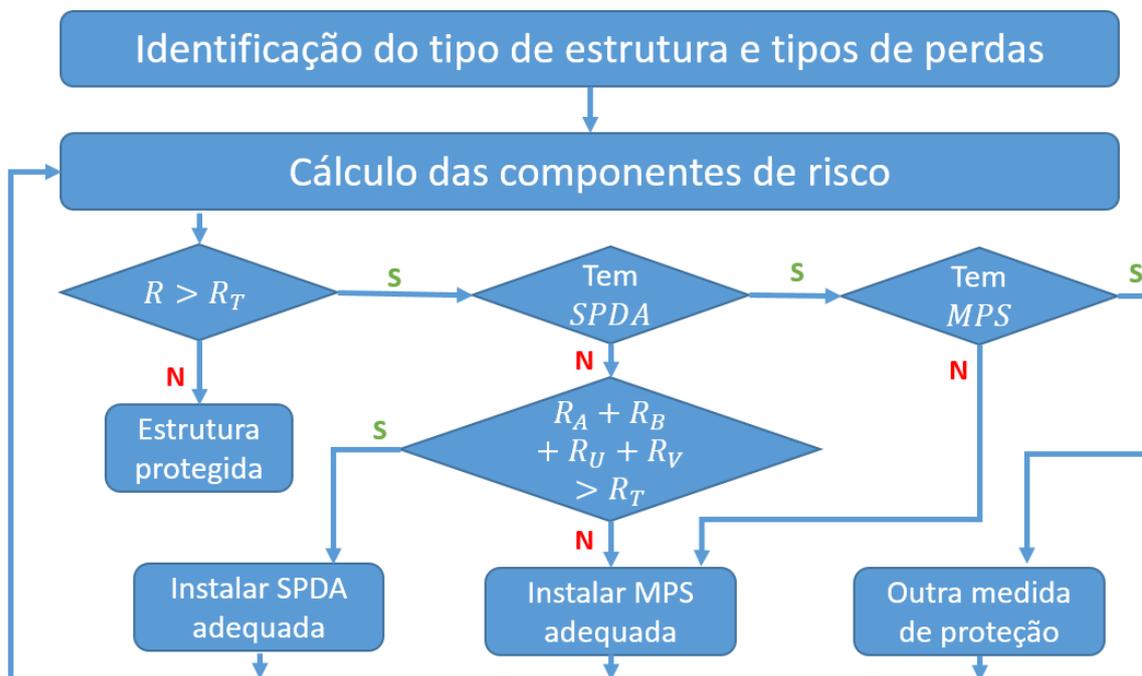


Fonte: O Autor, 2016

Na versão de 2015 da ABNT NBR 5419, o gerenciamento de risco passa a ser um cálculo iterativo que possibilita a definição do nível de proteção e as medidas de proteção necessárias para a garantia da efetividade da proteção a edificação, bem como das pessoas e instalações nela presente.

A versão do ano de 2015 da ABNT NBR 5419 requisita que o projetista realize a identificação do tipo da estrutura e seus tipos de perdas relevantes. O risco total, calculado a partir de ponderações dependente da estrutura e de seus elementos, é comparado ao risco tolerável que depende de cada tipo de perda, como é mostrado no Quadro 50. A aplicação dos métodos de proteção é implementada ao cálculo iterativo até o risco calculado ser menor que o risco tolerável, como é disposto no fluxograma da Figura 45.

Figura 45 – Fluxograma do cálculo iterativo do gerenciamento de risco da ABNT NBR 5419 de 2015.



Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2015

5.3 MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO

O método eletrogeométrico não alterou com a renovação da ABNT NBR 5419, pois os raios das esferas rolantes não foram alterados para os respectivos níveis de proteção.

5.4 MÉTODO DE FRANKLIN

O método Franklin teve alterações significativas quanto ao ângulo de proteção com a verificação da norma. O principal impacto desta alteração é a substituição de uma tabela com ângulos fixos para cada nível de proteção (Quadro 9) por curvas (Figura 40), onde o ângulo da haste de Franklin com sua geratriz varia de acordo com a altura da edificação e o seu respectivo nível de proteção. Esta alteração deve revitalizar comercialmente a utilização deste método para o sistema de captação do SPDA, já que estava sendo deixado de lado pela comunidade técnica em função da pouca flexibilidade na utilização dos ângulos de proteção.

5.5 MÉTODO DA GAIOLA DE FARADAY

A verificação da ABNT NBR 5419 também impactou no método de Faraday. Na versão de 2005 da norma, as larguras das malhas eram dispostas como no Quadro 9, e o comprimento da malha era limitado ao dobro da largura da mesma. Na versão vigente da ABNT NBR 5419, a largura da malha de captação e seu comprimento devem ter valores aproximados, formando quadrículas, o que ocasiona em uma diminuição significativa da área da malha para os níveis de proteção I, II e IV, como é mostrado no Quadro 64, para o caso em que as medidas da malha são extrapoladas.

Quadro 64 – Área da malha de Faraday ABNT NBR 5419 2005 x 2015.

Nível de Proteção	Área máxima da malha pela ABNT NBR 5419:2005 [m ²]	Área máxima da malha pela ABNT NBR 5419:2015 [m ²]
I	50	25
II	200	100
III	200	225
IV	800	400

Fonte: ABNT NBR 5419, 2005.

É facilmente percebido, pelo Quadro 64, que a quantidade de materiais para suprir as necessidades das malhas em uma cobertura de uma edificação aumenta para os níveis de proteção I, II e IV, pois a área da malha diminui para estes níveis com a renovação da norma.

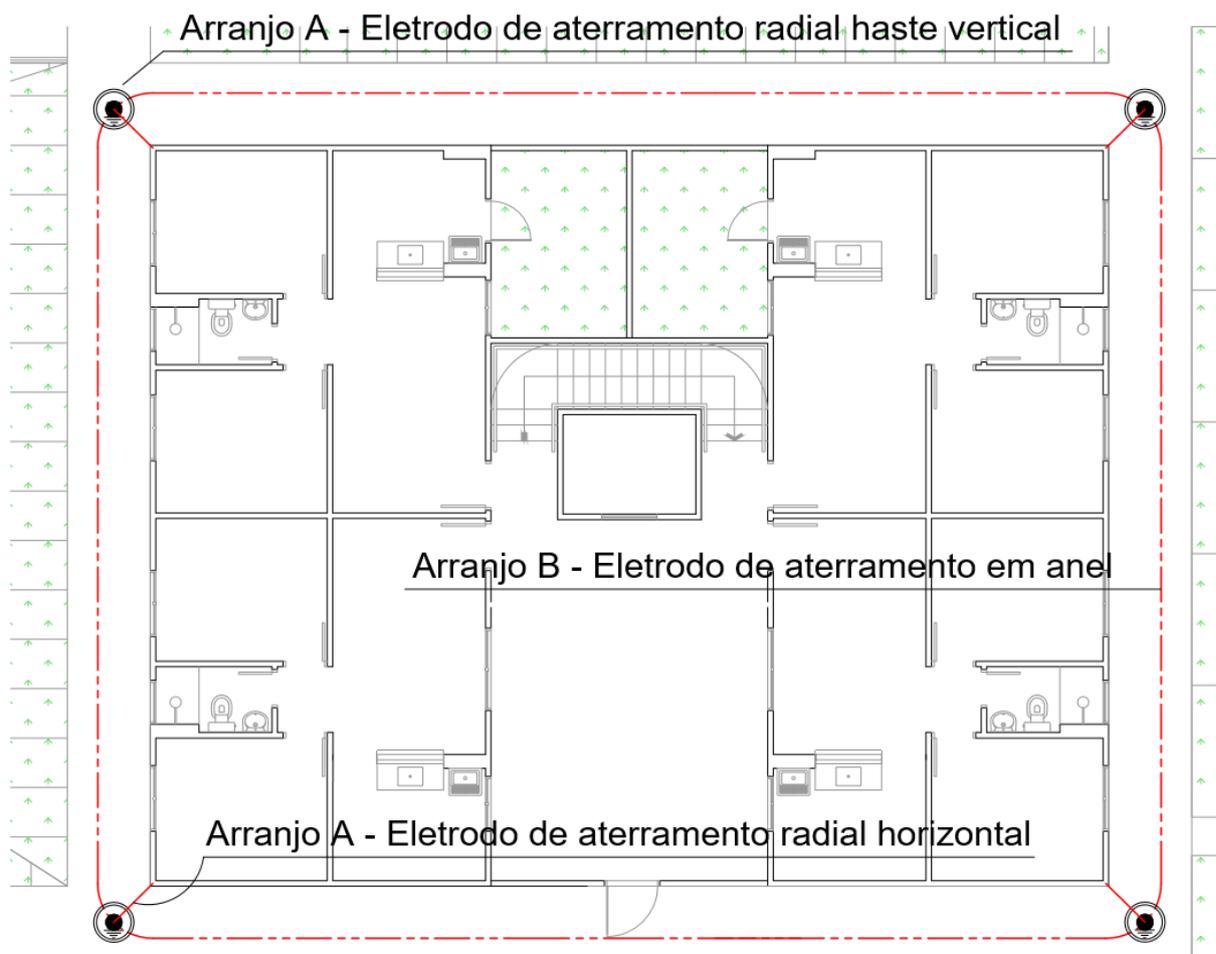
5.6 ELETRODOS DE ATERRAMENTO

A versão vigente da ABNT NBR 5419 não aceita o arranjo A, onde somente eletrodos radiais compunham o sistema de aterramento, requisitando que o subsistema de aterramento seja composto por pelo menos o Arranjo B, com eletrodos em anel.

A versão de 2015 da ABNT NBR 5419 também cortou o limite da resistência de aterramento de seus requisitos, orientando que o projetista execute o sistema de aterramento visando a menor resistência possível deste.

Os arranjos propostos pela ABNT NBR 5419 de 2015 estão ilustrados na Figura 46.

Figura 46 – Arranjos de aterramento conforme a ABNT NBR 5419.



Fonte: O Autor, 2016.

6 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso aqui proposto é desenvolvido no projeto de proteção contra descargas atmosféricas para uma obra civil pertencente a empresa gaúcha CMPC Celulose Riograndense, baseando-se na versão predecessora e na versão vigente da ABNT NBR 5419.

A edificação em questão trata-se de um centro de referência de assistência social localizada na zona sul do município de Guaíba no Rio Grande do Sul, com uma área construída de 764,66 metros quadrados em um terreno de 3.812,76 metros quadrados.

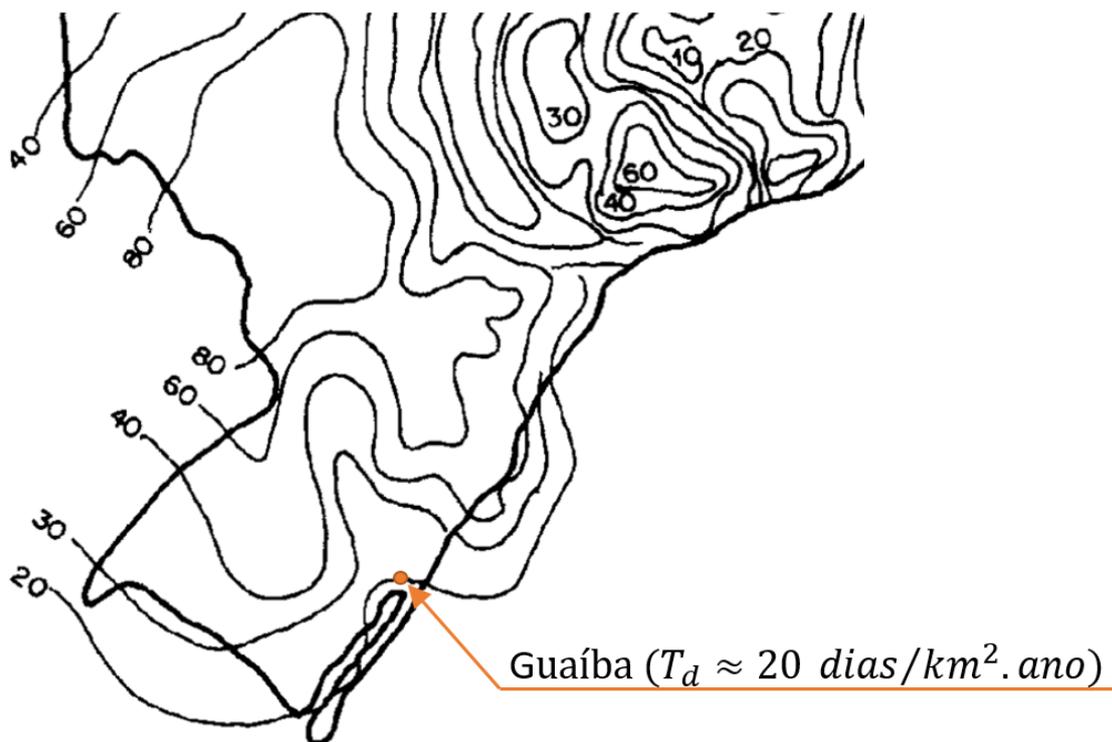
6.1 PROJETO DE PDA CONFORME A ABNT NBR 5419 DE 2005

Primeiramente, conforme a ABNT NBR 5419 de 2005, para a realização do projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, deve ser analisado o método de seleção do nível de proteção do SPDA. Assim, conforme o Quadro 1 e os dados gerais desta estrutura, identifica-se que a mesma se trata de uma estrutura comum com risco de danos às instalações elétricas e possibilidade de pânico, bem como falha do sistema de alarme contra incêndios instalado no local, causando atraso no socorro. Portanto o nível de proteção desta estrutura é o NP II.

Conforme a ABNT NBR 5419 de 2005, antes da realização do projeto de proteção contra descargas atmosféricas, deve-se verificar a necessidade da instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas baseado nas características da estrutura e do terreno a qual está construída.

Para a realização do cálculo do número de descargas atmosféricas por ano por quilômetro quadrado na região da estrutura, o primeiro dado a ser obtido é o índice ceráunico da região da estrutura. A Figura 47 apresenta a região onde está alocada a estrutura e seu índice ceráunico.

Figura 47 – Índice ceráunico na região da estrutura.

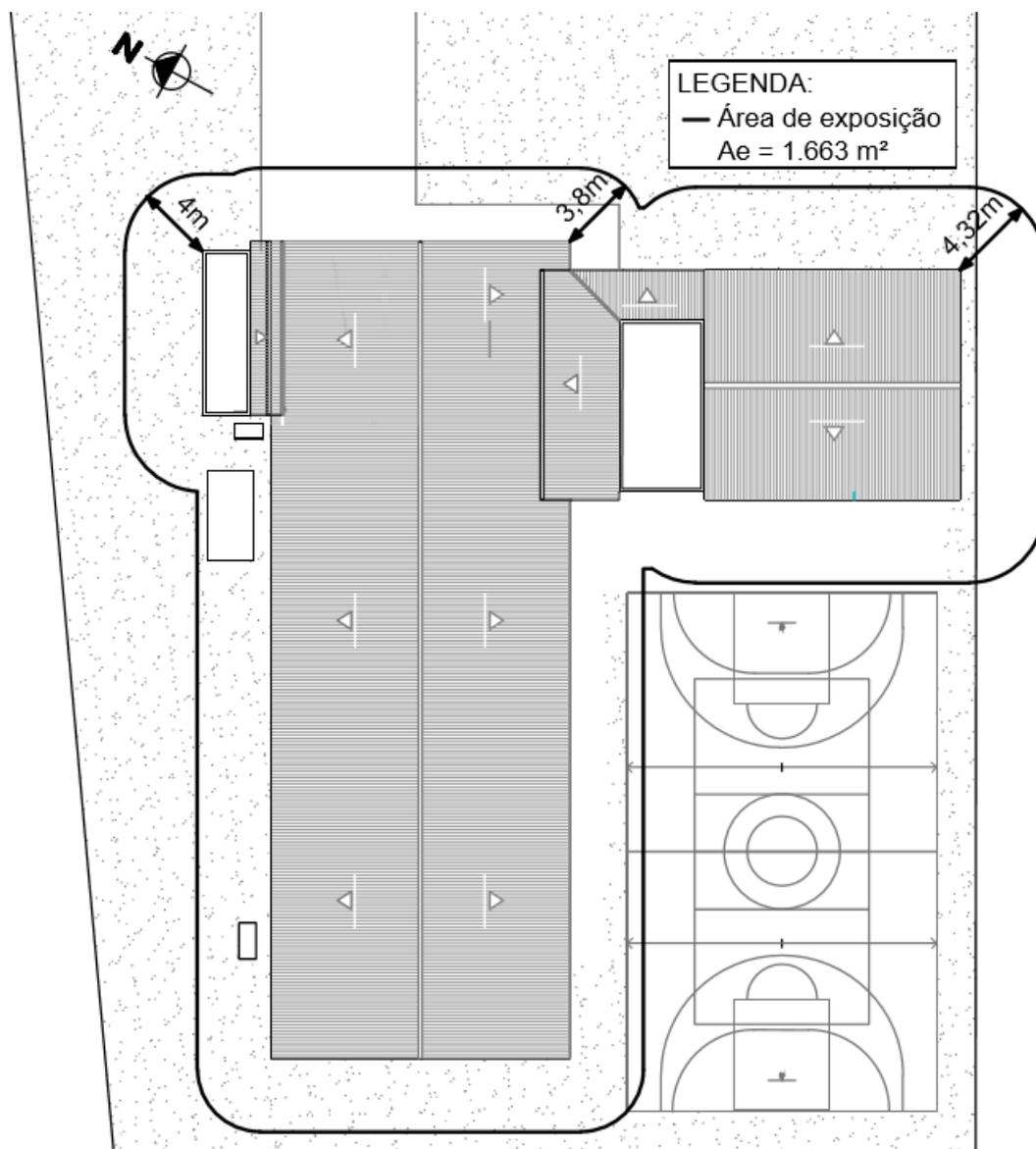


Adaptada de: ABNT NBR 5419, 2005.

O número de eventos perigosos para a terra na região da estrutura por ano é calculado a partir da Equação 44. Para tanto, considerando um índice ceráunico de 20 dias de trovoadas por quilômetros quadrados ao ano, pela equação 4, tem-se a densidade de descargas atmosféricas igual a 1,69 descargas atmosféricas por quilômetro quadrado ao ano. E a área de exposição da estrutura a ser protegida está disposta na Figura 48 e foi obtida por método gráfico, com o software Autocad.

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6} = 2,81 \cdot 10^{-3} \text{ raios/km}^2 \cdot \text{ano} \quad (44)$$

Figura 48 – Área de exposição conforme a ABNT NBR 5419 de 2005.



Fonte: O Autor, 2016.

O enquadramento da estrutura na necessidade de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas pela versão de 2005 da ABNT NBR 5419 depende da ponderação dos fatores correspondentes às características da estrutura a ser protegida, que estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores para a verificação da necessidade de SPDA conforme ABNT NBR 5419 de 2005.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade	Referência
Índice Cerâmico	T_d	20	1/ano.km ²	Figura 47
Densidade de descargas atmosféricas	N_g	1,69	1/ano.km ²	Equação 4
Área de exposição	A_e	1.663	m ²	Figura 48
Fator A – Semelhante a escola	F_A	1,7	–	Quadro 2
Fator B – Estrutura de alvenaria com cobertura de fibrocimento	F_B	1	–	Quadro 3
Fator C – Semelhante a escola	F_C	1,7	–	Quadro 4
Fator D – Estrutura localizada em área com poucas árvores e estruturas baixas	F_D	1	–	Quadro 5
Fator E – Planície	F_E	0,3	–	Quadro 6
Raios que atingem a estrutura por ano	N_{dc}	2,43.10 ⁻³	1/ano	Equação 6

Fonte: O Autor, 2016.

O valor já ponderado de eventos perigosos na estrutura ao ano (N_{dc}) é superior a 10⁻³, como descrito na Tabela 1, configurando assim a necessidade da instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para a edificação a ser protegida.

Considerando as características da estrutura e o nível de proteção da mesma, a Tabela 2 descreve os requisitos para a utilização do método eletrogeométrico a fim de determinar o volume a ser protegido pelo subsistema de captação.

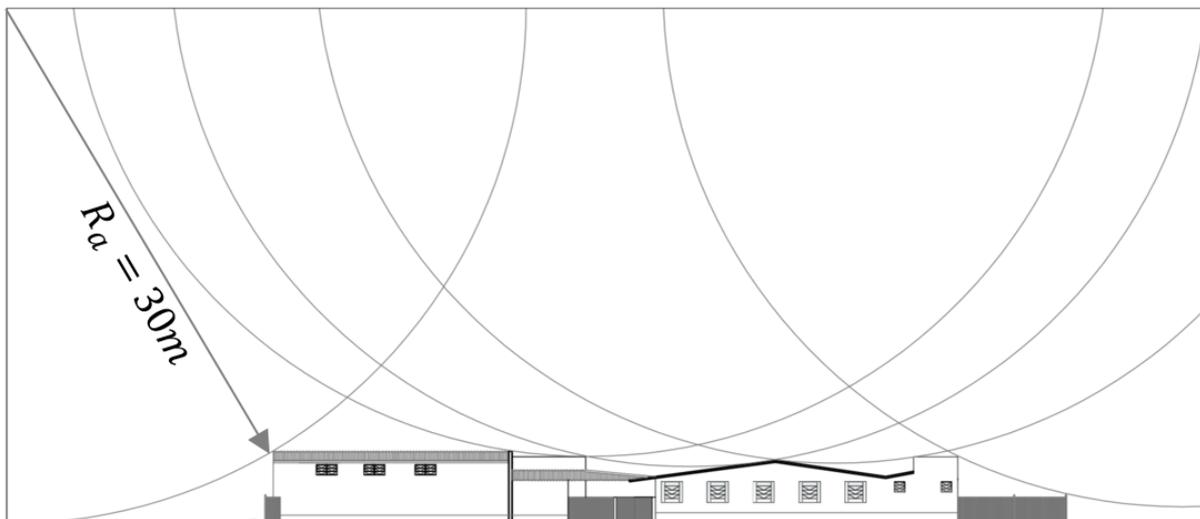
Tabela 2 – Valores para os modelos de SPDA de acordo com o nível de proteção.

	Esfera rolante	Método Franklin	Gaiola de Faraday
NP	Raio da esfera	Ângulo de proteção	Largura da malha
II	30m	35°	10m

Fonte: O Autor, 2016.

A verificação dos pontos vulneráveis da estrutura a partir do método das esferas rolantes está disposta na Figura 49.

Figura 49 – Método das esferas rolantes para a estrutura a ser protegida.



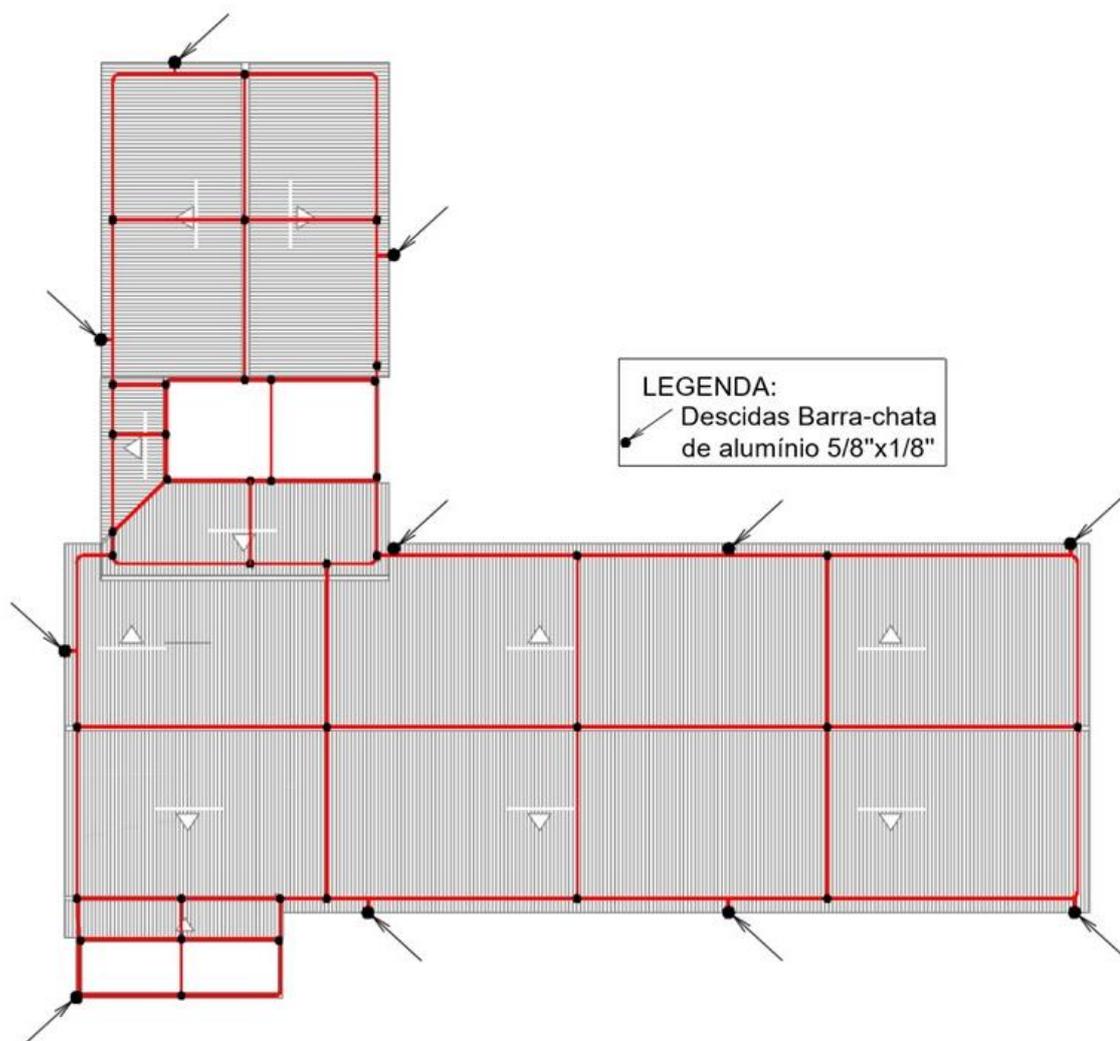
Fonte: O Autor, 2016.

Como a cobertura da edificação em questão não é de material condutor, foi aderido para o subsistema de captação a utilização de um SPDA não natural por malhas compostas por barras chatas de alumínio de dimensões 7/8"x1/8", respeitando os requisitos mínimos estabelecidos nos Quadros 10 e 11. As malhas do subsistema de captação do SPDA foram distribuídas uniformemente sobre cobertura sem problemas contra riscos de incêndio ou explosão pois o material da cobertura da edificação não é inflamável, configurando um SPDA não isolado e atendendo uma largura máxima de 10 metros para a malha conforme a Tabela 2. Uma distância máxima dos elementos metálicos do SPDA de 50 centímetros da borda da cobertura também foi atendida, embora não se trate de uma estrutura com altura superior a 10 metros.

A estrutura a ser protegida tem 165 metros de perímetro, portanto, considerando as medidas estabelecidas para distanciamento de descidas no Quadro 12, foram projetadas 11 descidas uniformemente distribuídas no perímetro da estrutura com barras chatas de alumínio de 5/8"x1/8", respeitando os critérios de dimensionamento estabelecidos no Quadro 15 para estruturas com altura inferiores a 20 metros. As descidas se encontram posicionadas sobre a parede, pois a mesma é construída de alvenaria portante, impossibilitando o corte dos blocos de alvenaria. A

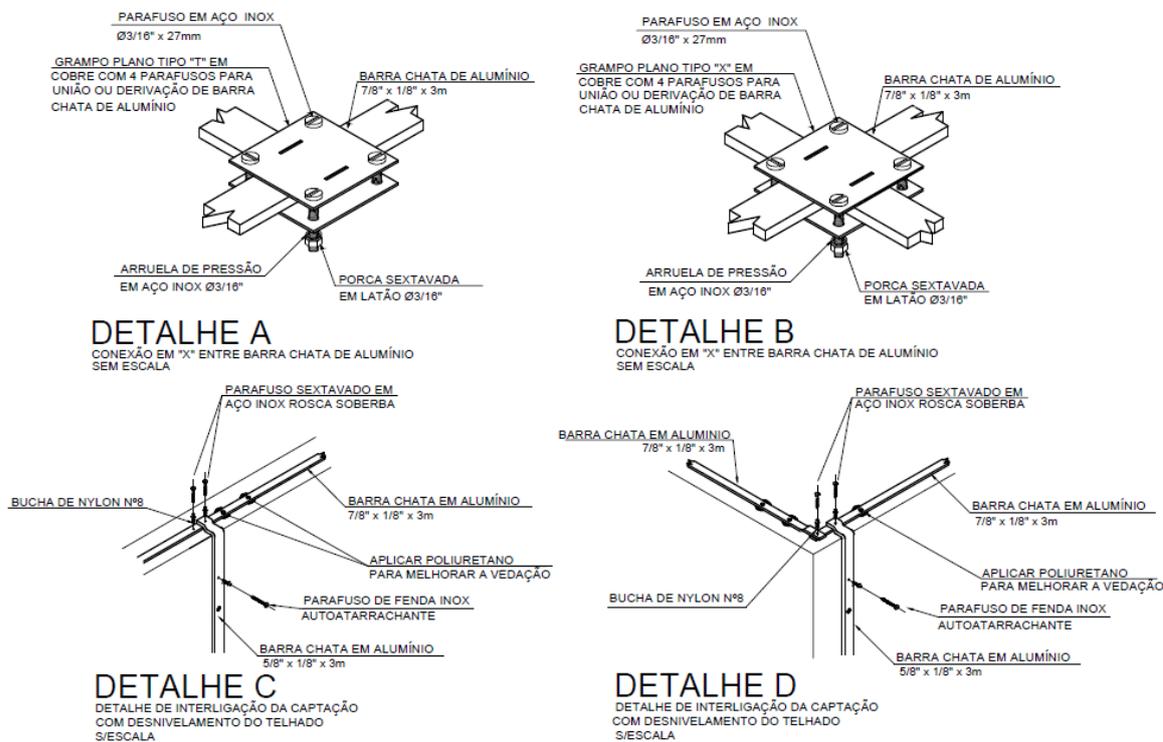
planta baixa do SPDA está representada na Figura 50 e suas indicações estão ilustradas na Figura 51.

Figura 50 – Projeto de SPDA centro de referência de assistência social conforme ABNT NBR 5419:05.



Fonte: O autor, 2016.

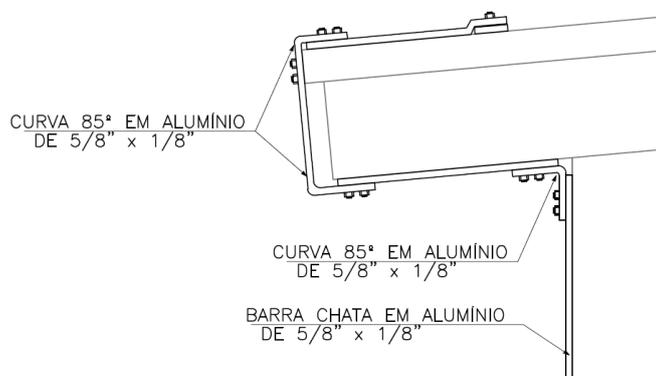
Figura 51 – Detalhamento das conexões do SPDA.



Fonte: O autor, 2016.

Os condutores de descida devem ser retílineos e verticais, porém, para este projeto, todas as descidas são impossibilitadas de perfurar a telha de fibrocimento, necessitando o contorno desta, conforme a Figura 52.

Figura 52 – Transição da barra chata de alumínio para o subsistema de descidas.



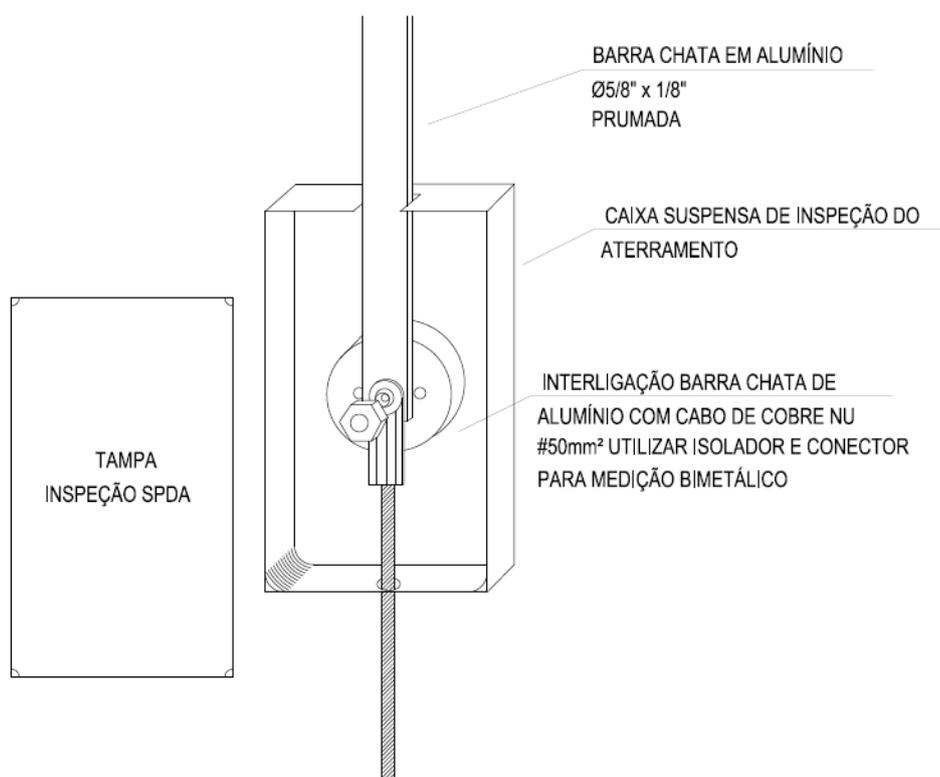
Fonte: O autor, 2016.

Uma configuração como a da Figura 52 deve ser evitada, porém quando não for possível, deve-se efetuar uma eficiente ligação equipotencial para se evitar centelhamento perigoso.

No projeto de SPDA foi previsto um barramento de ligação equipotencial próximo do quadro geral de força do empreendimento. Todos elementos metálicos da estrutura, assim como todas as linhas de energia ou sinal que fazem parte da estrutura devem ser conectados no barramento de equipotencialização, direta ou indiretamente por condutores de dimensões mínimas conforme o Quadro 16.

Cada condutor de descida é provido de uma conexão de medição instalada próximo ao ponto do eletrodo de aterramento. Tal conexão é ilustrada na Figura 53.

Figura 53 – Caixa de conexão de medição com tampa desmontável por meio de ferramenta.



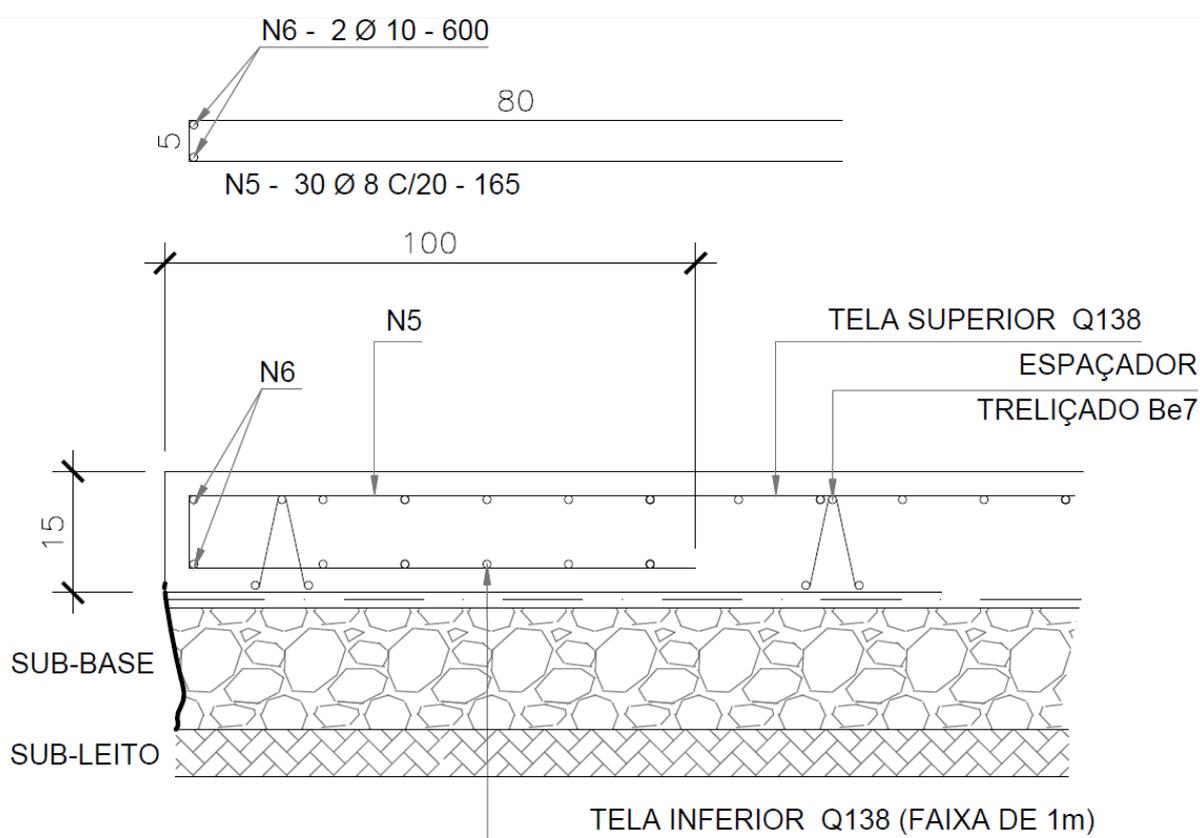
Fonte: O autor, 2016.

Para os eletrodos de aterramento serão utilizadas as armaduras de aço embutida nas fundações da estrutura como elemento natural do SPDA. Para tal, deve-se observar se mais de pelo menos a metade dos cruzamentos das armaduras da

fundação são fortemente amarradas com arame recozido e se as barras horizontais são sobrepostas por no mínimo 20 vezes o seu diâmetro.

Pelo detalhamento do projeto estrutural da fundação representado na Figura 54, as barras horizontais apresentam um diâmetro de 8 milímetros e são sobrepostas a cada 20 centímetros.

Figura 54 – Detalhamento da armadura de aço.



Fonte: O Autor, 2016.

O eletrodo de aterramento natural é conectado ao barramento de equipotencialização principal por uma barra de aço de diâmetro de 8 milímetros, finalizando a equipotencialização de todo o sistema.

A eficiência total do SPDA para o nível de proteção II e o número de eventos perigosos ponderados pelas características da edificação utilizando a ABNT NBR 5419 do ano de 2005 é de 95%. A eficiência de um sistema de proteção leva em

consideração a relação entre o número de descargas atmosféricas recebidas pelo subsistema captor e não produzem danos a ela e o número médio esperado de descargas atmosféricas sobre a área de exposição da estrutura.

6.2 PROJETO DE PDA CONFORME A ABNT NBR 5419 DE 2015

A principal alteração da nova versão da ABNT NBR 5419 é a utilização do gerenciamento de risco como um parâmetro de entrada para a avaliação de risco. A avaliação do risco de uma estrutura passa a ser determinado a partir de um cálculo iterativo envolvendo todos os fatores que influenciam a probabilidade de danos em uma estrutura por descarga atmosférica.

Uma avaliação dos tipos de perdas para a estrutura em questão foi realizada. Para este tipo de edificação foi considerada apenas a perda de vida humana ou ferimentos permanentes. Para tanto o risco tolerável para este tipo de perda é 10^{-5} .

As áreas de exposição estão dispostas na Tabela 3.

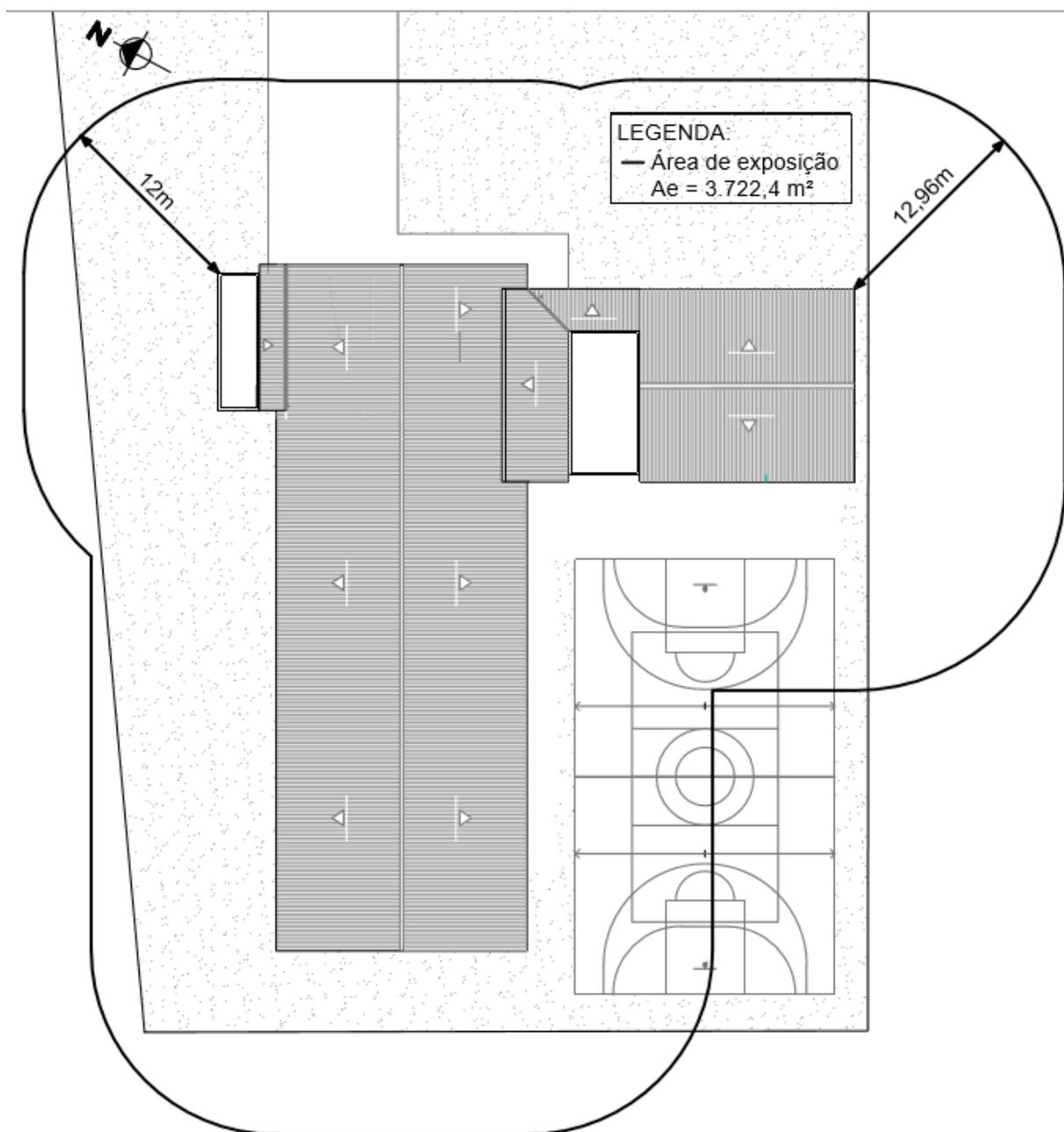
Tabela 3 – Áreas de exposição para gerenciamento de risco.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Referência
Área de exposição da estrutura	A_D	3722,4	Figura 55
Área de exposição da linha de energia	$A_{L/P}$	400	-
Área de exposição para descargas próxima à linha de energia	$A_{I/P}$	40000	-
Área de exposição da linha de sinal	$A_{L/T}$	400	-
Área de exposição para descargas próxima à linha de sinal	$A_{I/T}$	40000	-

Fonte: O Autor, 2016.

A área de exposição da estrutura foi aumentada em relação área calculada pela versão anterior da norma, e foi obtida por método gráfico, como disposto na Figura 55, pelo software Autocad, pois a estrutura em questão é complexa. As áreas de exposição das linhas são utilizadas para o cálculo da probabilidade de danos à estrutura para eventuais descargas atmosféricas na linha ou nas proximidades da linha.

Figura 55 – Área de exposição conforme a ABNT NBR 5419 de 2015.



Fonte: O Autor, 2016.

Os fatores relevantes para a estrutura e as linhas de energia e sinal que adentram a edificação em questão, estão dispostos na Tabela 4.

Os fatores relevantes dependentes da estrutura a ser protegida e das linhas que adentram a edificação, estão dispostos na Tabela 4, enquanto o número de eventos perigosos esperados para a estrutura e as linhas que a adentram, estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 4 – Fatores relevantes da estrutura e linhas.

Parâmetro de entrada	Comentário	Símbolo	Valor	Referência
Densidade de descargas atmosféricas [1/km ² .ano]	-	N_g	7,1	Site INPE
Fator localização da estrutura	Cercada por objetos de mesma altura	C_D	0,5	Quadro 29
Fator de instalação da linha	Enterrado	C_I	0,5	Quadro 30
Fator tipo da linha	Linha BT e sinal	C_T	1	Quadro 31
Fator ambiental	Suburbano	C_E	0,5	Quadro 32

Fonte: O Autor, 2016.

Tabela 5 –Número anual de eventos perigosos esperados.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Referência
Eventos perigosos à estrutura	N_D	$1,32 \cdot 10^{-2}$	Equação 12
Eventos perigosos para descargas na linha de energia	$N_{L/P}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	Equação 17
Eventos perigosos para descargas próximo a linha de energia	$N_{I/P}$	$7,1 \cdot 10^{-1}$	Equação 18
Eventos perigosos para descargas na linha de sinal	$N_{L/T}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	Equação 17
Eventos perigosos para descargas próximo a linha de sinal	$N_{I/T}$	$7,1 \cdot 10^{-1}$	Equação 18

Fonte: O Autor, 2016.

Foi realizada uma análise de quantidade de perda em função de riscos de incêndio, providências tomadas pelo projeto de proteção contra incêndio, material do piso e valores típicos de perdas médias. Os fatores de redução e aumento, bem como as perdas médias típicas estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 –Fatores relevantes de risco de incêndio ou explosão.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Referência
Todos os tipos	L_T	0,01	Quadro 42
Escola	L_F	0,1	Quadro 42
-	L_O	0	Quadro 42
Superfície de concreto	r_t	0,01	Quadro 43
Extintores, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape	r_p	0,5	Quadro 44
Risco de incêndio normal	r_f	0,01	Quadro 45
Sem perigo especial	h_z	1	Quadro 46

Fonte: O Autor, 2016.

Inicialmente, considerando a estrutura completamente desprovida de proteção contra descargas atmosféricas, as probabilidades de perda de vida humana por choque ou por danos físicos na estrutura, estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Probabilidades de danos.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Referência
Nenhuma medida de proteção adicional	P_{TA}	1	Quadro 33
Estrutura sem SPDA	P_B	1	Quadro 34
Sem medida de proteção adicional contra tensões de toque perigosas	P_{TU}	1	Quadro 38
Nenhum DPS instalado	P_{EB}	1	Quadro 39
Linha enterrada sem blindagem	P_{LD}	1	Quadro 40

Fonte: O Autor, 2016.

Considerando os valores dispostos nas Tabelas 3 a 7, os valores das componentes de risco, bem como o risco do tipo R_1 total, estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Riscos avaliados para estrutura.

Tipo de Dano	Símbolo	Equação	Valor
D_1 – Ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na estrutura	R_A	$R_A = N_D \cdot P_A \cdot L_A$	$1,32 \cdot 10^{-6}$
D_1 – Ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na linha de energia	$R_{U/P}$	$R_{U/P} = N_{L/P} \cdot P_U \cdot L_U$	$7,1 \cdot 10^{-7}$
D_1 – Ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na linha de sinal	$R_{U/T}$	$R_{U/T} = N_{L/T} \cdot P_U \cdot L_U$	$7,1 \cdot 10^{-7}$
D_2 – Ferimentos a seres vivos por danos físicos – descargas na estrutura	R_B	$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B$	$6,61 \cdot 10^{-7}$
D_2 – Ferimentos a seres vivos por danos físicos – descargas na linha de energia	$R_{V/P}$	$R_{V/P} = N_{L/P} \cdot P_V \cdot L_V$	$3,55 \cdot 10^{-6}$
D_2 – Ferimentos a seres vivos por danos físicos – descargas na linha de sinal	$R_{V/T}$	$R_{V/T} = N_{L/T} \cdot P_V \cdot L_V$	$3,55 \cdot 10^{-6}$
Risco total	R_1	$R_1 = \sum R_i$	$1,64 \cdot 10^{-5}$

Fonte: O Autor, 2016.

Como o risco calculado foi superior ao risco tolerável para o tipo de perda de vida humana, foi optado pela instalação de um SPDA classe II, realizando uma equipotencialização efetiva do solo e interligando as linhas de energia e sinal ao barramento de equipotencialização principal do empreendimento. Para tal, os valores

das probabilidades de danos dependendo das medidas de proteção tomadas foram alterados, sendo dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Probabilidades de danos.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Referência
Equipotencialização efetiva do solo	P_{TA}	0,01	Quadro 33
SPDA classe II	P_B	0,05	Quadro 34
Sem medida de proteção adicional contra tensões de toque perigosas	P_{TU}	1	Quadro 38
Nenhum DPS instalado	P_{EB}	1	Quadro 39
Linha enterrada de energia ou sinal blindada e interligada ao BEP	P_{LD}	0,6	Quadro 40

Fonte: O Autor, 2016.

Com a aplicação das medidas de proteção, os riscos avaliados para a estrutura alteraram-se, como está disposto na Tabela 10.

Tabela 10 – Estudo de caso: Riscos avaliadas para estrutura.

Tipo de Dano	Símbolo	Equação	Valor
D_1 – Ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na estrutura	R_A	$R_A = N_D \cdot P_A \cdot L_A$	$6,61 \cdot 10^{-10}$
D_1 – Ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na linha de energia	$R_{U/P}$	$R_{U/P} = N_{L/P} \cdot P_U \cdot L_U$	$4,26 \cdot 10^{-7}$
D_1 – Ferimentos a seres vivos por choque elétrico – descargas na linha de sinal	$R_{U/T}$	$R_{U/T} = N_{L/T} \cdot P_U \cdot L_U$	$4,26 \cdot 10^{-7}$
D_2 – Ferimentos a seres vivos por danos físicos – descargas na estrutura	R_B	$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
D_2 – Ferimentos a seres vivos por danos físicos – descargas na linha de energia	$R_{V/P}$	$R_{V/P} = N_{L/P} \cdot P_V \cdot L_V$	$2,13 \cdot 10^{-7}$
D_2 – Ferimentos a seres vivos por danos físicos – descargas na linha de sinal	$R_{V/T}$	$R_{V/T} = N_{L/T} \cdot P_V \cdot L_V$	$2,13 \cdot 10^{-7}$
Risco total	R_1	$R_1 = \sum R_i$	$5,44 \cdot 10^{-6}$

Fonte: O Autor, 2016.

Como o risco calculado com as novas medidas de proteção tomadas no projeto é inferior ao risco tolerável, as medidas são consideradas suficientes para proteger a estrutura.

Considerando que a estrutura a ser protegida é baixa, porém com grandes dimensões horizontais, o método de sistema de proteção utilizado para o subsistema de captação foi apenas o método das malhas. Como descrito no Quadro 55, as malhas

para o nível de proteção II devem ter largura máxima de 10 metros e comprimento semelhante a largura, portanto aumentou-se o número de malhas para o subsistema de captação. Os materiais utilizados para o subsistema de captação não alteraram em relação ao projeto de SPDA baseado na versão de 2005 da norma por estarem de acordo com o Quadro 53.

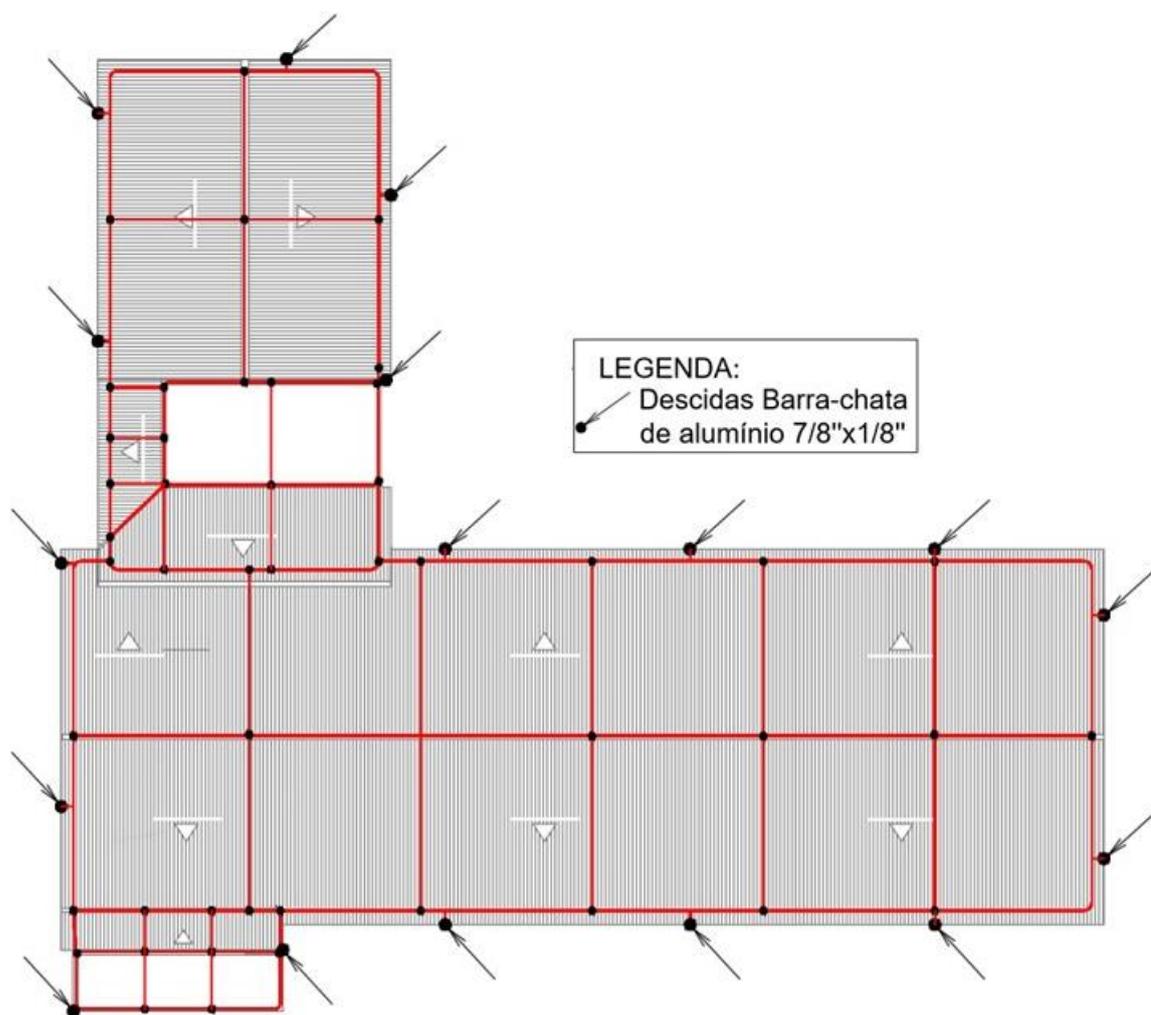
A quantidade de condutores de descida do subsistema de descidas deve respeitar o máximo afastamento entre condutores de descida para o nível de proteção II conforme o Quadro 57, portanto, como a estrutura tem um perímetro de 165 a proteger, foram previstas 17 descidas compostas por barras chatas de alumínio com 7/8"x1/8", conforme o Quadro 53. Ao se comparar com o projeto realizado para o mesmo empreendimento conforme a versão anterior da ABNT NBR 5419, percebe-se uma elevação significativa no número de descidas aumentando a eficiência da blindagem deste subsistema, e um aumento da seção transversal do material condutor do subsistema de descidas, o que causa uma diminuição na impedância do subsistema de descidas, ocasionando um melhor fluxo de corrente para corrente elétrica de uma eventual descarga atmosférica, e conseqüentemente uma diminuição na probabilidade de danos por centelhamento.

Cada condutor de descida é provido de uma conexão de medição, conforme a Figura 57, instalada próximo ao ponto do eletrodo de aterramento. De cada caixa de medição derivar-se-á um condutor de cobre de seção 50 milímetros quadrados que interligará o subsistema de descida no eletrodo de aterramento.

As armaduras de aço da fundação serão utilizadas como eletrodos de aterramento, pois as mesmas configuram um elemento natural do SPDA de acordo com os requisitos da ABNT NBR 5419 de 2015.

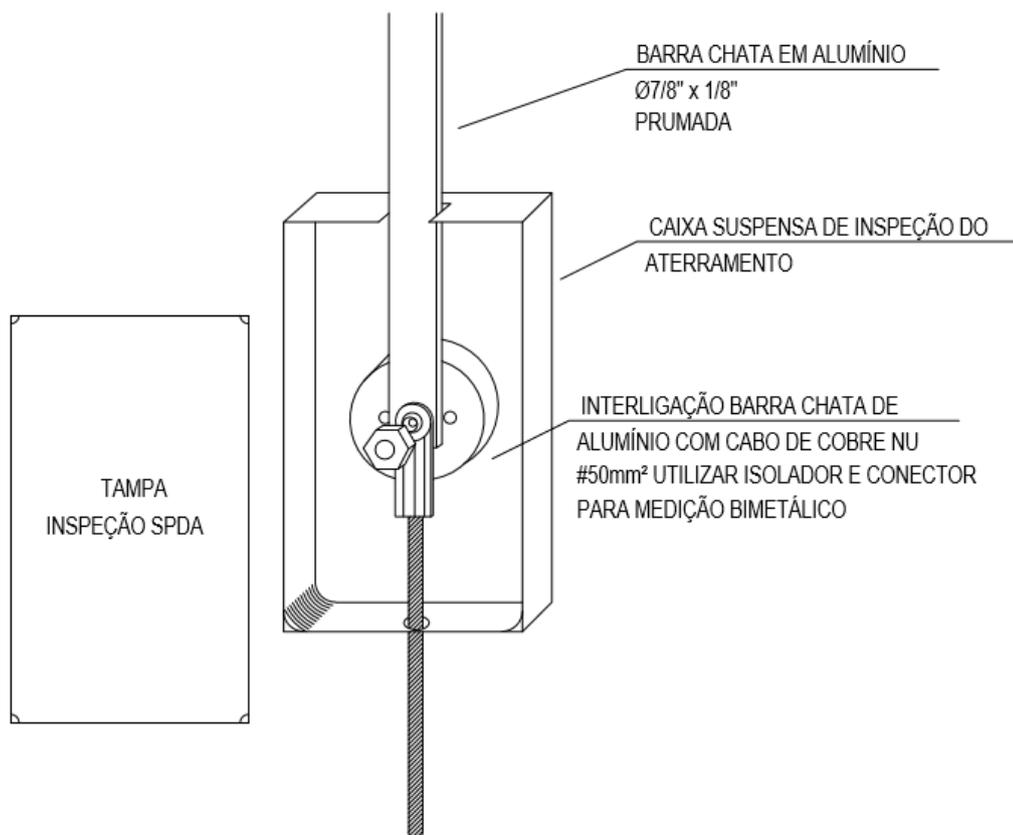
A planta baixa do projeto de SPDA da edificação está disposta na Figura 56. Não houve alteração das conexões mecânicas por compressão dos elementos do subsistema de captação, portanto este detalhamento está disposto na Figura 52, e o detalhe da interligação entre o subsistema de captação e o de descida está disposto na Figura 58.

Figura 56 – Projeto de SPDA centro de referência de assistência social conforme ABNT NBR 5419:05.



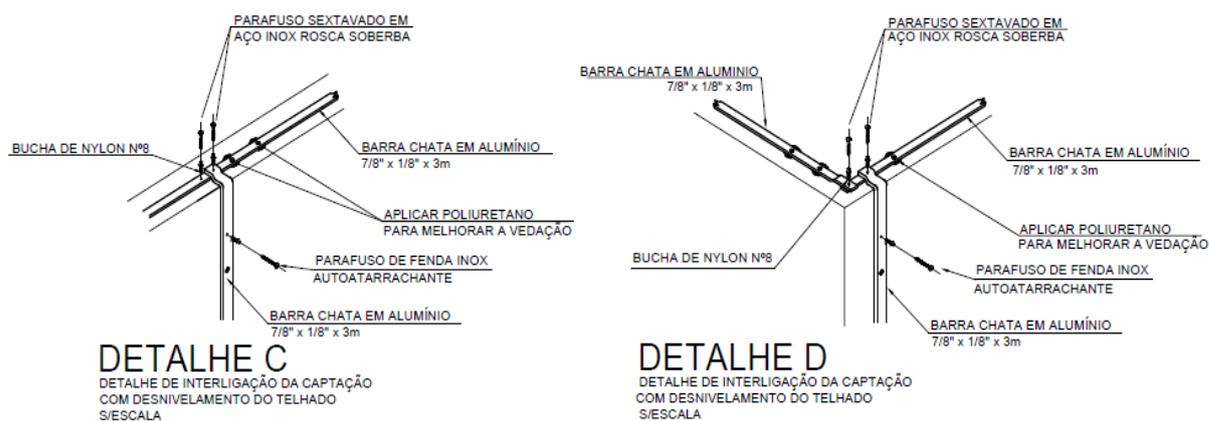
Fonte: O Autor, 2016.

Figura 57 - Caixa de conexão de medição com tampa desmontável por meio de ferramenta.



Fonte: O Autor, 2016.

Figura 58 – Detalhamento das conexões do SPDA.



Fonte: O Autor, 2016.

No projeto de SPDA foi previsto um barramento de ligação equipotencial próximo do quadro geral de força do empreendimento. Todos elementos metálicos da estrutura, assim como todas as linhas de energia ou sinal que fazem parte da estrutura

devem ser conectados no barramento de equipotencialização por um condutor de cobre e seção reta de 6 milímetros quadrados, conforme o Quadro 63. O barramento equipotencial deve ser conectado ao eletrodo de aterramento por um condutor de cobre de 50 milímetros quadrados, conforme o Quadro 61.

A eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, quando projetado baseado na ABNT NBR 5419 de 2015, é equivalente a probabilidade de os valores dos parâmetros da corrente da descarga atmosférica estarem dentro dos valores citados nos Quadros 18 e 19, assim, a eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas realizado no estudo de caso é de 98% em relação aos raios que atingem o sistema de captação e não são prejudiciais para o volume protegido, e os raios que atingem a área de exposição da estrutura.

7 CONCLUSÕES

Neste projeto de diplomação foram verificados os parâmetros de descargas atmosféricas relevantes considerados para a realização de um projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Foram revisados os critérios de projeto da versão do ano de 2005 da ABNT NBR 5419, considerando-se todas as etapas para um projeto de SPDA. Posteriormente foi realizado um estudo na nova versão da ABNT NBR 5419, que entrou em vigor no ano de 2015.

Considerando a enorme abrangência de um projeto de SPDA, pois o mesmo demonstra diversas particularidades dependendo de cada elemento de uma edificação, decidiu-se realizar um estudo de caso baseado em um projeto de proteção contra descargas atmosféricas para uma estrutura que será construída no município de Guaíba no Rio Grande do Sul, utilizando-se como referência a versão do ano 2005 da ABNT NBR 5419, e, posteriormente, a versão do ano de 2015 da mesma, visando obter as diferenças entre ambas as versões.

A nova versão da ABNT NBR 5419 apresentou um aumento significativo no quantitativo do projeto. Uma elevação de 41,6% da quantidade de descidas no subsistema de descidas foi apresentada, juntamente com um aumento na seção transversal dos condutores de descida. A eficiência do sistema de proteção, com os requisitos da ABNT NBR 5419 de 2015, também teve um aumento de 3,15% 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 iterativa 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 os resultados do estudo de caso e a dificuldade de obtenção de dados confiáveis e coerentes para a realização deste, as diferenças resultantes entre os projetos atenderam os objetivos iniciais da verificação da ABNT NBR 5419.

REFERÊNCIAS

STÉFANI, Rodrigo Verardino. **Metodologia de projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas para edifício residencial**. 2011. 54 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia Elétrica, São Carlos, 2011.

AVILA, Carlos Eduardo Silveira. **DPS – Dispositivos de proteção contra surtos e suas aplicações em CFTV e em telecomunicações**. 2010. 63f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Universidade de São Francisco. Curso de Engenharia Elétrica. Modalidade Eletrônica da Universidade de São Francisco, Itatiba, 2010.

OLIVEIRA, Valéria Rocha. **Método para determinação de parâmetros de impulsos atmosféricos plenos**. 1997. 61 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 1997.

SILVA, Marcos Vinícius. **Análise comparativa entre os métodos eletrogeométrico e dos elementos finitos no projeto de SPDA**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SHIGIHARA, Miltom. **Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas**. 2005. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Instituto de Física, Faculdade de Economia, Administração e Ciências Contábeis, Escola Politécnica, Instituto de Eletrotécnica e Energia. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, São Paulo, 2005.

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 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008. 209 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.

FILHO, S. V. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

FILHO, S. V. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos técnicas de medição e instrumentação filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber, 2002.

KINDERMANN, G. **Descargas atmosféricas**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.

BAZELYAN, E. M.; RAIZER, Y. P. **Lightning physics and lightning protection**. London: IOP Publishing Ltd, 2000.

RICH, K. **Lightning protection for engineers**. 1. ed. Louisville Colorado: National Lightning Safety Institute, 2004.

RICH, K. **Lightning protection for engineers**. 2. ed. Louisville Colorado: National Lightning Safety Institute, 2005

PORTAL O SETOR ELÉTRICO. **Nova norma para SPDA sai em 2015**. Disponível em:

<<http://www.osetoelettrico.com.br/web/a-empresa/1502-nova-norma-para-spda-sai-em-2015.html>>. Acesso em: 03 mar. 2016.

ELAT GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. **Corrente elétrica do raio**. Disponível em:

<<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/caracteristicas.da.corrente.eletrica.php>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

ELAT GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. **Monitoramento**. Disponível em:
<<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/servicos/contrato.monitoramento.php>>.
Acesso em: 05 abr. 2016.

ALTO QI. **NBR 5419: principais mudanças e impacto em projetos de SPDA**.
Disponível em:
<<http://maisengenharia.altoqi.com.br/eletrico/nbr-5419-principais-mudancas-impacto-projetos-spda/>>. Acesso em: 18 jun. 2016.