



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PLÍNIO MATHEUS FERREIRA DE SOUZA LIMA

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SUBESTA-
ÇÕES DE ALTA TENSÃO: Estudo de caso em subestação de 138/34,5 kV**

Recife
2025

PLÍNIO MATHEUS FERREIRA DE SOUZA LIMA

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SUBESTA-
ÇÕES DE ALTA TENSÃO: Estudo de caso em subestação de 138/34,5 kV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Alexander Barros Lima

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Plínio Matheus Ferreira de Souza.

Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em subestações de alta tensão: estudo de caso em subestação de 138/34,5 kV / Plínio Matheus Ferreira de Souza Lima. - Recife, 2025.

95 p. : il., tab.

Orientador(a): Alexander Barros Lima

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Subestações. 2. Descargas atmosféricas. 3. SPDA. 4. Esfera Rolante. 5. Ângulo de Proteção. I. Lima, Alexander Barros. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

PLÍNIO MATHEUS FERREIRA DE SOUZA LIMA

SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO: Estudo de caso em subestação de 138/34,5 kV

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 20/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexander Barros Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo José Barboza (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família e a todos que de alguma forma contribuíram para esta construção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Evandro e Maria do Carmo, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por sempre acreditarem em mim ao longo da vida e em cada passo da minha jornada. Sou igualmente grato por serem meus maiores exemplos e por me ensinarem as lições mais valiosas que levarei para toda a vida.

Aos meus familiares, por todo o carinho, apoio e presença constante em minha vida. Em cada etapa dessa caminhada, tive o privilégio de contar com palavras de incentivo, gestos de cuidado e a confiança de vocês, mesmo diante dos momentos mais desafiadores. Sou profundamente grato por acreditarem em mim, independentemente das circunstâncias.

Agradeço à WATT Consultoria, por me proporcionar um crescimento tanto pessoal quanto profissional, pelas experiências ao longo do caminho e pelas pessoas incríveis que conheci nesse período.

Sou imensamente grato à equipe de eletromecânica da INTEREST Engenharia, por todas as oportunidades que me foram concedidas, pelo conhecimento compartilhado, por todo aprendizado adquirido ao longo desse período e pelas amizades que foram construídas.

Por fim, aos professores da Universidade Federal de Pernambuco, principalmente ao meu orientador Alexander Barros Lima.

A persistência é o caminho do êxito.
(Charles Chaplin)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo técnico sobre Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) aplicados a subestações de alta tensão, com foco em uma instalação coletora de 138/34,5 kV localizada na Bahia. Considerando a elevada incidência de raios no território brasileiro e os impactos críticos sobre o sistema elétrico, o estudo avalia a eficácia dos métodos de dimensionamento prescritos pela ABNT NBR 5419:2015 e pela IEEE Std 998:2012. A metodologia inclui a análise de risco da edificação principal, o dimensionamento do subsistema de captação pelos métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção, e a verificação da cobertura dos volumes de proteção nos setores de 138 kV e 34,5 kV. Os resultados mostram que, para o setor de 138 kV, o método da NBR 5419, com corrente de pico mínima de 2 kA, proporciona maior abrangência em comparação à abordagem da IEEE, que exige complementação com o método do ângulo. Já para o setor de 34,5 kV, ambas as metodologias se mostraram eficazes. A análise de risco da edificação "Casa de Comando" confirmou a adequação do SPDA Classe I, com os riscos calculados abaixo dos limites toleráveis. Conclui-se que a aplicação combinada dos métodos de proteção é essencial para garantir a proteção integral em subestações, e que o domínio técnico das normas vigentes é indispensável para a elaboração de projetos seguros e eficientes.

Palavras-chave: Subestações; Descargas atmosféricas; SPDA; Esfera Rolante; Ângulo de Proteção.

ABSTRACT

This paper presents a technical study on Lightning Protection Systems (LPS) applied to high-voltage substations, focusing on a 138/34.5 kV collection substation located in Bahia, Brazil. Considering the high incidence of lightning strikes across the Brazilian territory and their critical impacts on the power system, the study evaluates the effectiveness of the design methods prescribed by ABNT NBR 5419:2015 and IEEE Std 998:2012. The methodology includes risk assessment of the main building, design of the air termination system using the rolling sphere and protection angle methods, and verification of the protective coverage volumes in the 138 kV and 34.5 kV switchyard sections. Results indicate that, for the 138 kV section, the NBR 5419 method, assuming a minimum peak current of 2 kA, provides broader coverage compared to the IEEE approach, which requires supplementation with the protection angle method. For the 34.5 kV section, both methodologies proved effective. The risk assessment of the "Control House" building confirmed the adequacy of a Class I LPS, with calculated risks below the tolerable limits. It is concluded that the combined application of protection methods is essential to ensure comprehensive shielding in substations, and that a thorough technical understanding of the current standards is indispensable for developing safe and efficient designs.

Keywords: Substations; Lightning Discharges; Lightning Protection System (LPS); Rolling Sphere Method; Protection Angle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de descargas atmosféricas existentes.....	34
Figura 2 – Mapa da densidade de descargas atmosféricas.	46
Figura 3 – Método do ângulo de proteção pela NBR 5419:2015.....	51
Figura 4 - Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA.	52
Figura 5 – Método do ângulo de proteção pela IEEE Std 998:2012.....	53
Figura 6 – Representação do método da esfera rolante.	55
Figura 7 – Locação dos círculos.....	61
Figura 8 – Região adentrada pela esfera rolante.	61
Figura 9 - Volume de proteção pelo método das esferas rolantes.	62
Figura 10 - Volume de proteção pelo método do ângulo de proteção.....	63
Figura 11 - Volume de proteção para edificações.	65
Figura 12 - Malha superior e captos no telhado.	66
Figura 13 - Planta do setor de 138 kV.....	69
Figura 14 - Planta do setor de 34,5 kV.....	70
Figura 15 - Locação dos círculos na SE Bolívia.	71
Figura 16 - Ângulo de proteção do setor 138 kV.....	72
Figura 17 - Volume de proteção do corte A-A pela NBR 5419 para o 138 kV.....	73
Figura 18 – Volume de proteção do transformador no 138 kV pela NBR 5419.....	74
Figura 19 - Volume de proteção do corte A-A pela IEEE Std 998 para o 138 kV.....	75
Figura 20 - Volume de proteção do transformador no 138 kV pela IEEE Std 998.....	76
Figura 21 - Proteção contra descargas atmosféricas no setor 138 kV.	76
Figura 22 - Raios dos cones de proteção do setor 34,5 kV.....	77
Figura 23 - Volume de proteção do corte A-A pela NBR 5419 para o 34,5 kV.....	78
Figura 24 - Volume de proteção do corte B-B pela NBR 5419 para o 34,5 kV.....	79
Figura 25 - Volume de proteção do corte C-C pela NBR 5419 para o 34,5 kV.	79
Figura 26 - Volume de proteção do corte A-A pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.....	80
Figura 27 - Volume de proteção do corte B-B pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.....	81
Figura 28 - Volume de proteção do corte C-C pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV. ...	81
Figura 29 - Proteção contra descargas atmosféricas no setor 34,5 kV.	82
Figura 30 – Volume de proteção das metodologias empregadas no 138 kV.	83
Figura 31 - Volume de proteção das metodologias empregadas no 34,5 kV.	84

Figura 32 – Sistema de captação da casa de comando.....	89
Figura 33 – Casa de comando – Vista A.....	90
Figura 34 – Casa de comando – Vista B.....	90
Figura 35 – Volume de proteção – Vista A.....	92
Figura 36 – Volume de proteção – Vista B.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Linha do Tempo das Principais Edições da NBR 5419.	24
Tabela 2 – Comparativo das principais alterações técnicas no SPDA externo (2005 vs. 2015).	29
Tabela 3 – Evolução da proteção contra surtos (2005 vs. 2015).	30
Tabela 4 - Posição dos pontos de impacto das descargas atmosféricas.	39
Tabela 5 - Tipos de danos causados pelas descargas atmosféricas.	39
Tabela 6 - Tipos de perdas causadas pelas descargas atmosféricas.	39
Tabela 7 - Danos e perdas de acordo com o ponto de impacto.	40
Tabela 8 - Riscos ocasionados pelas descargas atmosféricas.	41
Tabela 9 - Valores típicos de riscos toleráveis.	41
Tabela 10 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe de SPDA.....	48
Tabela 11 – Distância entre os condutores de descida.	49
Tabela 12 – Dimensões da malha de proteção pelo Método das malhas.	54
Tabela 13 – Equações dos modelos eletrogeométricos.....	56
Tabela 14 – Raio da esfera segundo NBR 5419.	57
Tabela 15 - Seções mínimas dos condutores de captação, descida e aterramento.	64
Tabela 16 - Raio da esfera pela IEEE Std 998 para o 138 kV.....	74
Tabela 17 - Raio da esfera pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.....	80
Tabela 18 – Características da estrutura e do meio ambiente.	85
Tabela 19 – Características da linha de energia.	85
Tabela 20 – Características da linha de sinal.....	86
Tabela 21 – Fatores relevantes para a zona.	87
Tabela 22 – Comparação dos riscos obtidos.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
Hz	Hertz
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
kA	Quiloampères
km	Quilômetros
kV	Quilovolt
MV	Megavolt
m	Metro
mm	Milímetro
MPS	Medidas de Proteção Contra Surtos
ms	Milissegundo
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
Std	Standard
TWS	<i>Thunderstorm Warning Systems</i>
ZPR	Zona de Proteção Contra Raios
µs	Microssegundo
°C	Graus Celsius
°F	Graus Fahrenheit

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Topo do captor
B	Plano de referência
C_D	Fator de localização
C_{DJ}	Fator de localização de uma estrutura adjacente
C_E	Fator ambiental
C_I	Fator de instalação de uma linha
C_{LD}	Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolação da linha para descargas atmosféricas na linha
C_{LI}	Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolação da linha para descargas atmosféricas perto da linha
C_T	Fator de tipo de linha para um transformador AT/BT na linha
d	Altura do plano protegido
D1	Ferimentos a seres vivos por choque elétrico
D2	Danos físicos
D3	Falhas de sistemas eletroeletrônicos
hz	Fator de aumento de perda quando um perigo especial está presente
H	Altura da estrutura
h	Altura do mastro acima do plano de referência pela NBR 5419:2015
h	Altura do mastro acima do plano de referência pela IEEE Std 998:2012
I	Corrente de pico mínima sobre os condutores pela IEEE Std 998:2012
I	Corrente de pico mínima pela NBR 5419:2015
k	Coeficiente empírico estabelecido por Mousa
K_{S3}	Fator relevante às características do cabeamento interno
K_{S4}	Fator relevante à tensão suportável de impulso de um sistema
L	Comprimento da estrutura
L_L	Comprimento de uma seção da linha
L_F	Perda em uma estrutura devido a danos físicos
L_O	Perda em uma estrutura devido à falha de sistemas internos
L_T	Perda devido a ferimentos por choque elétrico
L_X	Perda consequente a danos relevantes à estrutura
L1	Perda de vida humana
L2	Perda de serviço ao público

L3	Perda de patrimônio cultural
L4	Perda de valor econômico
N_X	Número de eventos perigosos por ano
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra
P_A	Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura)
P_B	Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura)
P_C	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura)
P_{EB}	Probabilidade de reduzir P_U e P_V dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento quando EB (ligação equipotencial) é instalada
P_{LD}	Probabilidade de reduzir P_U , P_V e P_W dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas na linha conectada)
P_{LI}	Probabilidade de reduzir P_Z dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
P_{SPD}	Probabilidade de reduzir P_C , P_M , P_W e P_Z quando um sistema coordenado de DPS está instalado
P_{TA}	Probabilidade de reduzir P_A dependendo das medidas de proteção contra tensões de toque e passo
P_{TU}	Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas
P_U	Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
P_V	Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
P_W	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha conectada)
P_X	Probabilidade de danos relevantes à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura)
P_Z	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
r	Raio da esfera rolante pela NBR 5419:2015
rc	Raio do cone de proteção pela NBR 5419:2015
rf	Fator redutor de perda dependente do risco de incêndio
rp	Fator redutor de perda devido às precauções contra incêndio
rt	Fator de redução associado ao tipo de superfície do solo
R	Risco
R_A	Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na estrutura)

R_B	Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na estrutura)
R_C	Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na estrutura)
R_M	Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da estrutura)
R_S	Resistência da blindagem por unidade de comprimento de um cabo
R_T	Risco tolerável
R_U	Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na linha conectada)
R_V	Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na linha conectada)
R_W	Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na linha conectada)
R_X	Componente de risco para uma estrutura
R_Z	Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da linha)
R_1	Risco de perda de vida humana em uma estrutura
R_2	Risco de perda de serviço ao público em uma estrutura
R_3	Risco de perda de patrimônio cultural em uma estrutura
R_4	Risco de perda de valor econômico em uma estrutura
s	Distância entre os mastros
S	Raio da esfera em metros
S_1	Fonte de dano – descargas atmosféricas na estrutura
S_2	Fonte de dano – descargas atmosféricas perto da estrutura
S_3	Fonte de dano – descargas atmosféricas na linha
S_4	Fonte de dano – descargas atmosféricas perto da linha
T_D	Dias de tempestades por ano
U_w	Tensão suportável nominal de impulso de um sistema
W	Largura de estrutura
x	Raio do cone de proteção pela IEEE Std 998:2012
y	Distância entre plano protegido e topo do mastro
α	Ângulo de proteção pela NBR 5419:2015
α	Ângulo de proteção interno
β	Ângulo de proteção externo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Geral.....	20
1.1.2	Específicos	20
1.2	METODOLOGIA.....	21
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTOS TÉCNICOS DA PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	23
2.1	EVOLUÇÃO DA NORMA ABNT NBR 5419: UMA ANÁLISE TÉCNICA E HISTÓRICA DA PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO BRASIL.....	23
2.1.1	A Trajetória Histórica da NBR 5419: Das Primeiras Edições à Abordagem de 2005.....	24
2.1.2	A Revisão de 2015: Uma Mudança de Paradigma e a Harmonização com a IEC 62305... ..	26
2.1.3	Análise Técnica Comparativa: NBR 5419:2005 versus NBR 5419:2015	28
2.1.4	Impactos, Desafios e Aplicações Práticas da Norma Vigente	30
2.1.5	O Futuro da NBR 5419 e as Novas Fronteiras em Proteção.....	31
2.2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: NATUREZA E CLASSIFICAÇÃO	32
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO E DO FENÔMENO ATMOSFÉRICO	36
2.3.1	Definição e Tipologia de Subestações de Alta Tensão	36
2.3.1.1	<i>Tipos de Subestações</i>	36
2.3.2	Parâmetros Físicos das Descargas Atmosféricas	37
2.3.3	Análise de Impactos e Quantificação de Riscos Conforme NBR 5419-2	38
2.3.3.1	<i>Consequências</i>	38
2.3.3.2	<i>Gerenciamento de Riscos</i>	39
2.3.3.3	<i>Verificação da Necessidade de um SPDA</i>	45
2.4	ESTRATÉGIAS E MÉTODOS DE PROTEÇÃO	47
2.4.1	Conceito e Estrutura do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA).	47
2.4.2	Métodos de Dimensionamento do Subsistema de Captação	50
2.4.2.1	<i>Método do Ângulo de Proteção</i>	50
2.4.2.2	<i>Método das Malhas</i>	53
2.4.2.3	<i>Método da Esfera Rolante</i>	54
2.4.3	Aplicação Combinada dos Métodos de Proteção	57
2.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	58
3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO	60
3.1	SPDA EM PÁTIOS DE SUBESTAÇÕES	60

3.2 SPDA EM EDIFICAÇÕES DE SUBESTAÇÕES	64
4 APLICAÇÃO EM SUBESTAÇÃO DE 138/34,5 KV	67
4.1 PÁTIO DO SETOR 138 KV	71
4.1.1 Método do Ângulo de Proteção	71
4.1.2 Método da Esfera Rolante pela NBR 5419:2015.....	72
4.1.3 Método da Esfera Rolante pela IEEE Std 998:2012.....	74
4.2 PÁTIO DO SETOR 34,5 KV	77
4.2.1 Método do Ângulo de Proteção	77
4.2.2 Método da Esfera Rolante pela NBR 5419:2015.....	77
4.2.3 Método da Esfera Rolante pela IEEE Std 998:2012.....	80
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS.....	82
4.4 EDIFICAÇÕES CONTIDAS NA SUBESTAÇÃO	84
4.4.1 Subsistema de Captação	88
4.4.2 Subsistema de Descida.....	89
4.4.3 Subsistema de Aterramento	91
4.4.4 Volume de Proteção	91
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	93
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas, fenômenos elétricos de grande extensão e intensidade, originam-se do acúmulo de cargas na atmosfera, geralmente no interior de nuvens de tempestade. A sua ocorrência é deflagrada quando o campo elétrico gerado por essas cargas excede a rigidez dielétrica do ar, resultando numa rápida movimentação de elétrons entre regiões de polaridade oposta.

O Brasil, devido às suas características geográficas e climatológicas, está entre os países com maior incidência de raios no mundo, registrando aproximadamente 78 milhões de descargas atmosféricas anuais. Este cenário, monitorizado pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), resulta não apenas em riscos à vida, com uma média histórica superior a 100 fatalidades por ano, mas também em severos impactos sobre a infraestrutura elétrica do país [1].

Neste contexto, as subestações de energia, instalações essenciais que interligam os segmentos de geração, transmissão e distribuição do Sistema Interligado Nacional (SIN), tornam-se pontos de alta vulnerabilidade. Dados do INPE indicam que as descargas atmosféricas são responsáveis por uma parcela significativa das perturbações no sistema, incluindo cerca de 70% dos desligamentos em linhas de transmissão e 40% das avarias em transformadores de potência [2]. Tais eventos comprometem a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia, com consequências diretas para a sociedade e para a economia.

Diante da impossibilidade de impedir a ocorrência do fenômeno, a mitigação de seus efeitos adversos é realizada por meio da implementação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). O objetivo de um SPDA é interceptar a descarga e conduzir a sua corrente de forma segura até o solo, por meio de subsistemas de captação, descida e aterramento, minimizando os danos a estruturas, equipamentos e, fundamentalmente, a seres vivos. A correta aplicação e dimensionamento destes sistemas em ambientes complexos como as subestações são, portanto, de fundamental importância para a engenharia de sistemas de potência.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Avaliar a proteção contra descargas atmosféricas em uma subestação coletora de 138/34,5 kV, por meio da aplicação dos métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção, com base nas normas NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012, a fim de comparar os volumes de proteção resultantes e verificar a necessidade de uso combinado desses métodos.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Caracterizar os principais subsistemas e componentes que integram o SPDA aplicado a subestações de energia elétrica.
- Descrever os critérios normativos estabelecidos pelas normas NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012 para o dimensionamento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.
- Aplicar os métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção no dimensionamento do SPDA para os setores de 138 kV e 34,5 kV de uma subestação coletora.
- Comparar os volumes de proteção obtidos por meio das metodologias estabelecidas nas normas NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012.
- Avaliar a necessidade de adoção conjunta de diferentes métodos de proteção para assegurar a eficácia da blindagem atmosférica da subestação estudada.

1.2 Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste na aplicação dos procedimentos técnicos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012 a um estudo de caso prático de uma subestação coletora de 138/34,5 kV. O desenvolvimento segue uma sequência de processos de engenharia, iniciando pela análise de risco da casa de comando, conforme prescrito pela NBR 5419-2. Este processo envolve o levantamento das características da estrutura e das linhas conectadas para o cálculo dos componentes de risco (R) e sua comparação com os riscos toleráveis (R_T), validando a classe de proteção a ser adotada. Em seguida, para os pátios de 138 kV e 34,5 kV, realiza-se o dimensionamento do sistema de captação utilizando os métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção. Os raios da esfera são calculados segundo as premissas de ambas as normas, considerando as correntes de pico mínimas aplicáveis a cada setor. Por fim, os volumes de proteção resultantes são sobrepostos e comparados graficamente, em uma análise que permite avaliar a eficácia de cada metodologia e a necessidade da aplicação combinada dos métodos para assegurar a blindagem completa da instalação.

1.3 Organização do Trabalho

Com o intuito de atingir os objetivos propostos, o trabalho foi dividido em 5 capítulos, conforme estrutura a seguir:

No capítulo 1, é apresentada uma contextualização do estudo desenvolvido, destacando-se a relevância do tema, além da exposição dos objetivos do estudo.

No capítulo 2, será elaborada a fundamentação teórica, através da abordagem do conceito de descargas atmosféricas e dos danos associados a tal fenômeno, conceito de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas, gerenciamento de riscos, principais componentes de um SPDA e seus subsistemas, além dos métodos de proteção.

No capítulo 3, serão explicitadas as metodologias adotadas para projetos de SPDA em subestações. Serão abordados os métodos da esfera rolante, aplicado para o pátio e edificações contidas nas subestações, e o método do ângulo de proteção,

aplicado como garantia de proteção contra descargas laterais, no pátio das subestações.

No capítulo 4, será realizado um estudo de caso em uma subestação coletora, juntamente com a apresentação dos resultados obtidos. Será aplicado o método da esfera rolante para uma edificação contida na subestação e para o pátio da mesma, além do gerenciamento de riscos da edificação em questão. Além disso, será realizado um estudo comparativo entre as normas NBR 5419 e IEEE Std 998, além de uma aplicação conjunta dos métodos de proteção.

Por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões obtidas através do estudo realizado.

2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DA PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Evolução da Norma ABNT NBR 5419: Uma Análise Técnica e Histórica da Proteção Contra Descargas Atmosféricas no Brasil

A magnitude e a complexidade das descargas atmosféricas, fenômenos caracterizados por impulsos elétricos de alta energia e correntes de pico que atingem centenas de quiloampères (kA) [3], impõem um desafio contínuo à engenharia. No cenário brasileiro, a elevada densidade de ocorrências, monitorizada por instituições como o INPE, amplifica a relevância deste desafio, conferindo à proteção contra os seus efeitos uma importância crítica para a segurança de infraestruturas e de pessoas [4]. Os riscos associados não se restringem a danos físicos diretos, como destruição estrutural e incêndios, mas estendem-se a um espectro mais amplo de prejuízos, que incluem a interrupção de serviços essenciais, perdas econômicas e danos ao patrimônio.

É neste contexto de vulnerabilidade que a normalização técnica se estabelece como a principal ferramenta para a mitigação de riscos. A norma ABNT NBR 5419, "Proteção contra descargas atmosféricas", constitui o documento norteador fundamental para a engenharia de proteção no país. Elaborada e revista pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o seu objetivo é estabelecer critérios para o projeto, instalação e manutenção de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) [5].

É fundamental compreender que a NBR 5419 não se enquadra na categoria de uma norma de produto, cujo foco seria a especificação de características técnicas de componentes individuais, como cabos ou hastes. Em vez disso, ela é uma norma de aplicação e de critérios de engenharia, que atua como um guia metodológico para utilizar esses componentes na concepção de uma solução de proteção integrada, eficaz e adaptada ao perfil de risco de cada estrutura [6,7,8]. A sua observância, frequentemente compulsória por exigência de órgãos reguladores, torna-a um instrumento essencial para a segurança de seres vivos e para a proteção do patrimônio público e privado no Brasil.

Para a correta avaliação dos métodos de proteção que constituem o foco deste trabalho, é pertinente analisar a trajetória evolutiva da norma, de modo a contextualizar as suas premissas atuais. Esta seção, portanto, dedica-se a detalhar as transformações técnicas e conceptuais da NBR 5419, desde as suas primeiras edições até a estrutura vigente.

2.1.1 A Trajetória Histórica da NBR 5419: Das Primeiras Edições à Abordagem de 2005

A trajetória da ABNT NBR 5419 é marcada por um processo contínuo de revisões, refletindo o avanço do conhecimento científico e das inovações tecnológicas. A sua origem remonta à década de 1970, com uma norma precursora publicada em 1970, que foi oficialmente designada como NBR 5419 em 1977. Edições posteriores, como a de 1993 e a de 2001, já demonstravam um alinhamento crescente com padrões internacionais. Especificamente, a NBR 5419:2001 foi desenvolvida com base na norma da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), a IEC 61024 [9,10].

Essa influência internacional inseriu a engenharia de proteção brasileira no contexto global das melhores práticas. A IEC 61024, referência naquele período, concentrava-se predominantemente na proteção física das estruturas contra os efeitos diretos das descargas. Tecnicamente, ela já estabelecia os métodos de captação que se tornariam padrão, como o modelo eletrogeométrico (esfera rolante) e o método das malhas (Gaiola de Faraday), além dos princípios de equipotencialização na entrada da estrutura. O foco principal era a prevenção de danos estruturais, como incêndios, e a mitigação dos riscos imediatos à vida humana. A prioridade era garantir a integridade da "casca" do edifício, com menor ênfase nos efeitos indiretos. A Tabela 1 ilustra a evolução das principais edições da NBR 5419, destacando as suas respectivas normas internacionais de referência e o foco principal que caracterizou cada versão.

Tabela 1 – Linha do Tempo das Principais Edições da NBR 5419.

Ano da Edição da NBR	Norma Internacional de Referência	Foco Principal e Mudança Chave
1970	-	Publicação da primeira edição precursora da norma.

Ano da Edição da NBR	Norma Internacional de Referência	Foco Principal e Mudança Chave
1977	-	Publicação da nova edição, já com a designação oficial NBR 5419.
1993	-	Estabelecimento de critérios mais detalhados para a proteção.
2001	IEC 61024:1990	Marco no alinhamento com a norma internacional. Foco na proteção física contra efeitos diretos.
2005	IEC 61024 (Guias A e B)	Consolidação da análise de necessidade de SPDA via "Anexo B" (fatores de ponderação). Manteve o foco nos efeitos diretos.
2015	IEC 62305:2010	Reestruturação completa. Introdução da Gestão de Risco (Parte 2) e da proteção de sistemas internos (Parte 4), expandindo o escopo para os efeitos indiretos.

Fonte: Disponível em [9].

A versão de 2005 representou um estágio de consolidação, mantendo a prioridade na mitigação dos efeitos diretos. Com uma estrutura concisa de 42 páginas, a norma apresentava uma metodologia clara, ainda que simplificada. O ponto central para a tomada de decisão era o seu Anexo B, "Método de seleção do nível de proteção", que auxiliava na determinação da exigência de um SPDA e o seu nível adequado. A análise baseava-se em fatores de ponderação que consideravam características da estrutura e a utilização de um mapa isocerâunico, que estimava a densidade de descargas na região [11]. Embora a proteção contra sobretensões fosse mencionada na NBR 5419:2005, o seu tratamento era superficial. A responsabilidade por detalhar a proteção contra efeitos indiretos, como sobretensões propagadas pela rede elétrica, era, em grande parte, atribuída à ABNT NBR 5410 (instalações elétricas de baixa tensão). Essa segmentação normativa se tornaria uma das principais motivações para a profunda revisão na década seguinte [11].

A abordagem de 2005, embora funcional para a sua época, começou a evidenciar limitações diante da ampla disseminação de equipamentos eletrônicos. A proliferação de equipamentos eletroeletrônicos sensíveis em todos os setores expôs uma nova camada de vulnerabilidade. O cerne da norma estava nos efeitos diretos, que compunham a maior parte do seu conteúdo, enquanto os efeitos indiretos, como as sobretensões e o pulso eletromagnético (*Lightning Electromagnetic Pulse* - LEMP), recebiam atenção secundária. Essa lacuna mostrou-se significativa, pois são justamente esses efeitos os principais responsáveis por danos em equipamentos eletrônicos.

Embora a proteção da parte externa da edificação contra danos diretos permanesse um objetivo fundamental, a paralisação de um centro de dados, a queima de controladores numa linha de produção ou a perda de sistemas de comunicação representavam um risco econômico e operacional de magnitude comparável ou, em certos casos, superior. O principal fator que impulsionou a revisão de 2015 foi, portanto, a necessidade de responder a uma mudança no perfil de risco das edificações. A evolução tecnológica dos sistemas internos forçou a evolução da norma, que precisava migrar de um manual sobre "como instalar um para-raios" para um guia abrangente de "como gerir o risco eletromagnético" associado às descargas atmosféricas.

2.1.2 A Revisão de 2015: Uma Mudança de Paradigma e a Harmonização com a IEC 62305

A publicação da ABNT NBR 5419 em 2015 representou a mais abrangente revisão da norma, impulsionada pela necessidade de harmonização com a série internacional IEC 62305. Essa atualização foi um passo importante para alinhar as práticas de engenharia brasileiras às melhores práticas globais e, particularmente, para endereçar as lacunas da versão anterior na proteção de sistemas internos. O novo escopo foi elaborado para minimizar um espectro mais amplo de riscos, abordando de forma explícita e sistemática os danos a equipamentos eletrônicos sensíveis, refletindo a crescente dependência da sociedade de sistemas digitais.

A mudança mais evidente foi a expansão e reorganização do conteúdo. A NBR 5419 saltou de 42 para mais de 300 páginas, segmentadas em quatro partes distintas, espelhando a estrutura da IEC 62305 [5,6,7,8,12]:

- Parte 1 – Princípios Gerais: Estabelece a base conceptual, introduzindo terminologia, fontes de dano, tipos de perdas e critérios gerais, como os níveis de proteção e as Zonas de Proteção contra Raios (ZPR).
- Parte 2 – Gestão de Risco: Uma das principais inovações da nova norma, esta parte detalha a metodologia para a análise de risco. Através de um cálculo probabilístico, determina-se a real necessidade de proteção e as medidas adequadas para mitigar os riscos a um nível tolerável.

- Parte 3 – Danos Físicos a Estruturas e Perigo à Vida: Foca na proteção física, abordando o dimensionamento e a instalação do SPDA externo (captação, descida e aterramento), com atualizações técnicas significativas para otimizar a dispersão da corrente do raio.
- Parte 4 – Sistemas Elétricos e Eletrônicos Internos na Estrutura: Inteiramente nova, preenche a principal lacuna da versão de 2005. Trata das Medidas de Proteção contra Surtos (MPS), detalhando como proteger equipamentos sensíveis contra efeitos indiretos.

Essa organização em quatro partes reflete uma nova filosofia de projeto. A proteção deixa de ser a simples instalação de um SPDA físico para se tornar um processo integrado que se inicia com uma criteriosa análise de risco (Parte 2), abrange a proteção externa (Parte 3) e interna (Parte 4), e é fundamentada nos conceitos da Parte 1. Essa abordagem sistêmica orienta o projetista a adotar uma abordagem de engenharia de risco.

Embora baseada na IEC 62305, a NBR 5419:2015 não é uma tradução literal. A comissão técnica brasileira realizou um criterioso processo de adaptação das diretrizes internacionais para adequá-las à realidade nacional. Utilizando dados de instituições como o INPE e a USP, a comissão validou e ajustou as prescrições internacionais. Um exemplo notável é a especificação da seção mínima dos condutores de cobre para captação e descida, que foi estabelecida em 35 mm², em vez dos 50 mm² recomendados pela IEC, após estudos indicarem que essa bitola era suficiente e economicamente mais adequada para o Brasil, sem comprometer a segurança.

Outra adaptação fundamental foi a incorporação de mapas detalhados de densidade de descargas para a terra (N_G), específicos para o território brasileiro, fornecidos pelo INPE. Isso confere uma precisão significativamente maior à análise de risco. Em suma, esse processo de adaptação resultou numa norma mais eficiente e aderente às particularidades nacionais, representando um sinal da maturidade e competência técnica nacional.

2.1.3 Análise Técnica Comparativa: NBR 5419:2005 versus NBR 5419:2015

A diferença fundamental entre as versões reside na metodologia para determinar a necessidade de proteção. A versão de 2005 utilizava o método do Anexo B, uma abordagem simplificada baseada em fatores de ponderação e no antigo mapa de dias de trovoadas. A decisão era uma função quase direta da soma desses fatores.

A versão de 2015 substituiu essa abordagem pela Gestão de Risco (Parte 2). Este novo método é um cálculo probabilístico que avalia os riscos de quatro tipos de perdas, cada uma com um nível de risco tolerável (R_T) específico:

- L1: Perda de vida humana, que possui o nível de risco tolerável mais rigoroso ($R_T = 10^{-5}$ por ano por estrutura).
- L2: Perda de serviço ao público.
- L3: Perda de patrimônio cultural.
- L4: Perda de valor econômico.

A proteção só é exigida se o risco calculado (R) para qualquer perda exceder o risco tolerável ($R > R_T$). Essa abordagem modificou a questão fundamental do projeto, que deixou de ser uma simples decisão sobre a necessidade de um SPDA para se tornar uma análise quantitativa dos riscos envolvidos e da seleção de medidas de proteção com a melhor relação custo-benefício para atingir um nível de segurança aceitável. Isso transformou o projeto num exercício de engenharia de risco, cuja complexidade tornou o uso de ferramentas computacionais uma prática indispensável.

No que tange ao SPDA externo, a NBR 5419:2015 manteve os métodos de projeto (Ângulos, Malhas e Esfera Rolante), mas reviu significativamente os parâmetros. A redução do tamanho das malhas e dos espaçamentos entre descidas, por exemplo, visa não apenas captar o raio, mas gerir a sua corrente, dividindo-a em múltiplos caminhos para reduzir os campos eletromagnéticos induzidos.

A mudança conceitual mais significativa ocorreu no aterramento. O arranjo tipo A (hastes pontuais) foi removido, tornando obrigatório o arranjo tipo B (anel condutor contínuo). Adicionalmente, a recomendação de uma resistência inferior a 10Ω foi suprimida. Essa alteração reflete o entendimento de que, para os pulsos de alta frequência de um raio, a geometria e a equipotencialização do aterramento são mais importantes que um valor de resistência ôhmica. A premissa é a de que o anel cria um plano

de potencial aproximadamente uniforme, minimizando as perigosas tensões de passo e de toque. A Tabela 2 resume as principais mudanças técnicas no SPDA externo entre as versões de 2005 e 2015.

Tabela 2 – Comparativo das principais alterações técnicas no SPDA externo (2005 vs. 2015).

Parâmetro Técnico	Prescrição na NBR 5419:2005	Prescrição na NBR 5419:2015
Método das Malhas (Nível I)	Malha de 10 m × 20 m.	Malha de 5 m × 5 m (tamanhos reduzidos para todos os níveis).
Espaçamento de Descidas (Nível II)	Espaçamento máximo de 15 m.	Espaçamento máximo de 10 m (espaçamentos menores para todos os níveis).
Arranjo de Aterramento	Permitidos Arranjos A (pontual) ou B (anel).	Apenas o Arranjo B (anel contínuo) é permitido.
Resistência de Aterramento	Recomendado valor inferior a 10 Ω .	Requisito de valor ôhmico removido. Foco na geometria e equipotencialização.

Fonte: Feito pelo autor (2025).

A principal inovação da NBR 5419:2015 é a Parte 4, dedicada às Medidas de Proteção contra Surtos (MPS). Enquanto a versão de 2005 delegava o tema à NBR 5410, a nova versão estabelece uma metodologia estruturada para a proteção de sistemas internos, reconhecendo que um SPDA externo, por si só, é insuficiente. A Parte 4 introduz conceitos fundamentais:

- Zonas de Proteção contra Raios (ZPR): O volume da edificação é dividido em zonas com níveis decrescentes de exposição ao pulso eletromagnético (LEMP). Nas fronteiras entre as zonas (ZPR 0/1, ZPR 1/2, etc.), aplicam-se as MPS para atenuar o pulso a níveis seguros.
- Coordenação de DPS: A norma exige um sistema coordenado de Dispositivos de Proteção contra Surtos (associados aos Tipos 1, 2 e 3), instalados nas fronteiras das ZPRs para limitar as sobretensões em cascata.
- Outras Medidas: Detalha a importância da blindagem magnética, do correto roteamento de cabos para evitar laços de indução e do uso de interfaces isolantes.

A integração da Parte 4 transformou a NBR 5419 numa norma completa, que protege não apenas a estrutura física, mas também os sistemas eletrônicos no seu interior. A Tabela 3 sintetiza a evolução da abordagem de proteção contra sobreensões entre as duas normas.

Tabela 3 – Evolução da proteção contra surtos (2005 vs. 2015).

Conceito de Proteção Interna	NBR 5419:2005	NBR 5419:2015 - Parte 4
Abordagem Geral	Menção pontual e dispersa. Foco na equipotencialização na entrada.	Metodologia integrada e sistemática de MPS, tratando os efeitos indiretos de forma abrangente.
Conceito Estruturante	Inexistente. Referência à NBR 5410.	Introdução formal das Zonas de Proteção contra Raios (ZPR) como princípio organizacional.
Dispositivos (DPS)	Uso mencionado no contexto da equipotencialização.	Exige um sistema coordenado de DPS (Tipos 1, 2 e 3) nas fronteiras das ZPRs.
Coordenação e Medidas Adicionais	Não detalhava.	Estabelece requisitos explícitos para coordenação energética, blindagem, roteamento de cabos e interfaces isolantes.

Fonte: Feito pelo autor (2025).

2.1.4 Impactos, Desafios e Aplicações Práticas da Norma Vigente

A implementação da NBR 5419:2015 aumentou o nível de exigência técnica para os profissionais da área. A complexidade da análise de risco inviabilizou projetos padronizados, demandando um estudo aprofundado para cada edificação. Consequentemente, a necessidade de capacitação aumentou, exigindo que os projetistas dominem os cálculos de risco (Parte 2) e as diretrizes de proteção interna (Parte 4). A documentação associada aos projetos também se tornou mais robusta, com memoriais de cálculo detalhados e a devida Anotação de Responsabilidade Técnica (ART).

Apesar da maior complexidade, a prática tem demonstrado que a aplicação da norma resulta em sistemas mais eficazes e economicamente otimizados, pois a análise de risco direciona os investimentos para as medidas que realmente oferecem a maior redução de perdas. Além disso, a norma aprimorou as diretrizes de manutenção e inspeção, garantindo a longevidade do sistema. Um dos principais desafios é a adequação das edificações já construídas. A recomendação técnica para esses casos é clara: o ponto de partida deve ser uma análise de risco completa conforme a Parte 2 da norma vigente. Essa análise funciona como um diagnóstico detalhado que serve

de base para o planejamento e a priorização das adequações necessárias com o melhor custo-benefício. Vale ressaltar que, em reformas ou ampliações significativas, a adequação completa torna-se obrigatória por lei. A aplicação da metodologia pode ser ilustrada pelo seguinte processo passo a passo:

1. Levantamento de Dados: Coleta de todas as características da estrutura (dimensões, construção, ocupação, valor, etc.) e do ambiente (N_G da região).
2. Cálculo dos Riscos Iniciais: Utilizando as equações da Parte 2, calculam-se os riscos (R_1 , R_2 , etc.) antes de qualquer medida de proteção.
3. Comparação e Decisão: Os riscos calculados (R) são comparados aos toleráveis (R_T). Se $R > R_T$, a proteção é necessária.
4. Seleção de Medidas: O projetista seleciona as medidas de proteção (SPDA, DPS, blindagem, etc.).
5. Recálculo e Validação: O risco é recalculado com as medidas propostas. O processo é iterativo até que o risco final seja menor ou igual ao tolerável ($R \leq R_T$).

Este processo transforma a decisão de engenharia num procedimento transparente, rastreável e tecnicamente embasado, otimizando a solução de proteção.

2.1.5 O Futuro da NBR 5419 e as Novas Fronteiras em Proteção

Normas técnicas são documentos dinâmicos. A ABNT NBR 5419 já está em processo de análise para futuras revisões, buscando refinar pontos controversos e incorporar avanços recentes. A própria norma internacional de referência, a IEC 62305, foi atualizada em 2024, servindo como um indicativo das tendências que influenciarão a versão brasileira.

A precisão da gestão de risco depende da qualidade dos dados de entrada, sendo a densidade de descargas (N_G) um parâmetro crítico. O aprimoramento contínuo dos sistemas de monitoramento do INPE tende a fornecer mapas cada vez mais precisos, o que pode levar a futuras atualizações nos anexos da norma, refinando os cálculos de risco. Adicionalmente, a evolução da norma IEC aponta para uma mudança conceitual. A nova IEC 62305-2:2024, por exemplo, propõe a substituição do

NG pela densidade de pontos de impacto no solo (NSG), uma métrica mais precisa. Adicionalmente, a norma internacional passa a integrar formalmente os Sistemas de Alerta de Tempestades (*Thunderstorm Warning Systems* - TWS) na análise de risco. Isso sinaliza uma transição de um modelo de proteção puramente passivo para um que incorpora elementos dinâmicos e preditivos. A introdução de um TWS, que monitora as condições atmosféricas em tempo real, permite a adoção de medidas ativas e procedimentais, como a evacuação de áreas abertas ou o desligamento programado de sistemas não críticos. O futuro da proteção contra raios tende a ser um sistema de gestão de risco em tempo real, que combina a proteção física (SPDA e MPS) com a proteção operacional, acionada por tecnologias de previsão avançadas [13].

2.2 Descargas Atmosféricas: Natureza e Classificação

As descargas atmosféricas consistem em fenômenos eletromagnéticos de alta energia, caracterizados por trajetórias de grande extensão — que podem alcançar vários quilômetros — e por elevadas tensões, frequentemente da ordem de centenas de quilovolts. Esses eventos resultam do acúmulo e separação de cargas elétricas na atmosfera, especialmente no interior de nuvens de tempestade do tipo *cumulonimbus*, reconhecidas por sua notável extensão vertical, a qual pode ultrapassar 20 km de altitude [14,15].

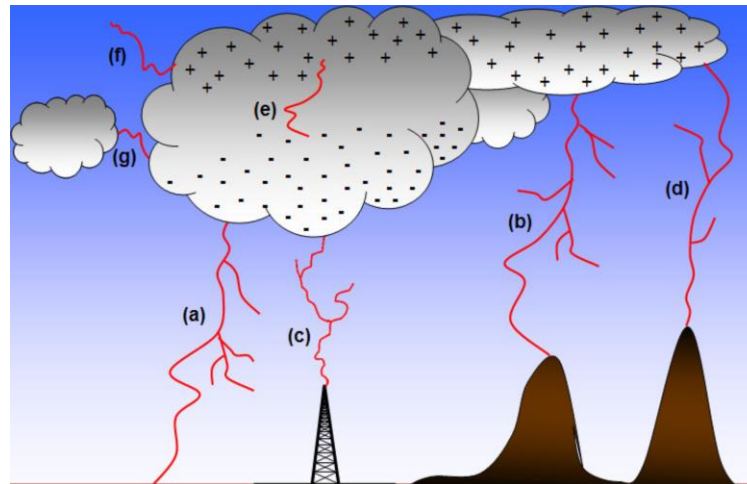
Embora a maior parte das descargas se origine em tempestades associadas a *cumulonimbus*, fenômenos similares também podem ocorrer em outras condições atmosféricas extremas, como tempestades de neve, tempestades de areia e nuvens geradas por atividades vulcânicas. A formação da descarga elétrica se dá quando o campo elétrico gerado pela separação de cargas excede o valor crítico da rigidez dielétrica do ar — cerca de 3 megavolts por metro (MV/m) — provocando a ruptura do meio isolante. Essa ruptura desencadeia uma propagação acelerada de elétrons livres, estabelecendo uma corrente entre regiões de polaridade oposta, seja no interior da nuvem, entre nuvem e solo ou entre nuvens distintas.

A Figura 1 ilustra as diferentes categorias de descargas atmosféricas, que apresentam a seguinte classificação:

- a) Descarga nuvem-solo negativa (*negative cloud-to-ground lightning*): ocorre quando cargas negativas são transferidas da base da nuvem para o solo, sendo o tipo mais comum de raio.
- b) Descarga nuvem-solo positiva (*positive cloud-to-ground lightning*): consiste na transferência de cargas positivas da nuvem para o solo, ou, de forma equivalente, de elétrons do solo para a nuvem. Esse tipo de descarga, menos frequente, costuma ocorrer em regiões elevadas, como o topo de montanhas.
- c) Descarga solo-nuvem negativa (*negative ground-to-cloud lightning*): caracteriza-se pela iniciação no solo e deslocamento de cargas negativas em direção à nuvem.
- d) Descarga solo-nuvem positiva (*positive ground-to-cloud lightning*): inicia-se no solo, promovendo a transferência de elétrons para a nuvem, equivalente ao transporte de cargas positivas da nuvem para a terra.
- e) Descarga intranuvem (*intra-cloud lightning*): ocorre exclusivamente dentro de uma mesma nuvem, entre regiões de cargas opostas.
- f) Descarga nuvem-ar (*cloud-to-air lightning*): conecta a nuvem a uma região isolada da atmosfera, sem envolvimento do solo ou de outra nuvem.
- g) Descarga entre nuvens (*cloud-to-cloud lightning*): estabelece um caminho de corrente elétrica entre duas nuvens distintas.

As descargas intranuvem são estatisticamente as mais recorrentes. Isso se deve, em parte, à menor distância entre as regiões de cargas opostas e à redução da densidade do ar em altitudes elevadas, o que diminui a rigidez dielétrica e facilita a ocorrência da ruptura elétrica. Apesar disso, os raios — nome comumente atribuído às descargas que atingem o solo — representam cerca de 30% dos eventos totais e estão associados aos efeitos mais severos e potencialmente destrutivos sobre infraestruturas, sistemas elétricos e seres vivos [15].

Figura 1 – Tipos de descargas atmosféricas existentes.



Fonte: Retirado de [16].

Nos estudos de sobretensões induzidas por descargas atmosféricas e análise dos campos eletromagnéticos irradiados em linhas de distribuição, o foco é prioritariamente voltado para as descargas do tipo nuvem-solo. Isso ocorre porque, na maioria dos cenários realistas de indução em linhas aéreas, apenas as descargas ocorridas a distâncias relativamente curtas (tipicamente inferiores a 200 metros) são capazes de gerar sobretensões suficientemente elevadas para provocar fenômenos disruptivos nos isoladores ou equipamentos sensíveis. Dentre os tipos de descargas nuvem-solo, aquelas de polaridade negativa são as mais comuns, representando aproximadamente 90% dos casos ocorridos, enquanto as descargas positivas respondem pelos 10% restantes [16].

A formação de uma descarga negativa envolve diversas fases. O processo inicial, denominado período de quebra de rigidez preliminar, é caracterizado por ionizações de baixa intensidade no interior da nuvem, em altitudes variando de 3 km a 5 km, com duração entre 10 ms e 100 ms. Superada essa etapa, inicia-se a propagação de um canal fracamente ionizado que avança em saltos em direção ao solo, conhecido como líder escalonado (*stepped leader*). Esse líder avança de maneira segmentada e tortuosa a uma velocidade da ordem de 400.000 km/h, com cada segmento percorrendo de 30 m a 100 m e apresentando pausas de aproximadamente 50 μ s entre os avanços [16,17]. O diâmetro típico do canal é de cerca de 1 metro, e a corrente média durante essa fase alcança centenas de ampères, com picos de até 1 kA por etapa.

Durante sua aproximação ao solo, o campo elétrico gerado pelas cargas acumuladas no canal do líder escalonado, torna-se suficientemente intenso para ionizar o ar próximo à superfície terrestre, originando uma ou mais descargas ascendentes denominadas líderes conectantes. A distância entre o líder descendente e a descarga ascendente varia de 10 m a 200 m. O ponto de encontro entre ambos é chamado de *attachment* e marca o início da fase de descarga de retorno (*return stroke*), etapa de maior interesse para a engenharia de proteção de sistemas elétricos.

A descarga de retorno é caracterizada por uma corrente de alta intensidade que se propaga do ponto de conexão até o topo do canal com velocidade que pode variar entre 1×10^8 m/s e $1,5 \times 10^8$, velocidades essas próximas a da luz [18]. Essa propagação é responsável pela iluminação do canal e de suas ramificações, gerando o que visualmente é identificado como raio. A velocidade da descarga de retorno é maior nas regiões próximas ao solo, podendo reduzir-se em até 50% conforme se aproxima da base da nuvem. Essa fase possui tempo de subida entre 2 μ s e 10 μ s, com duração total de aproximadamente 100 μ s [17].

O canal por onde a corrente circula atinge temperaturas elevadíssimas, da ordem de 28.000 °C (50.000 °F), valor cerca de cinco vezes superior à temperatura da superfície solar. Essa temperatura induz uma expansão abrupta do ar ao redor do canal, gerando a onda de choque que se propaga como som audível (trovão). A maior parte da energia dissipada, contudo, se manifesta na forma de ondas supersônicas, sendo que apenas cerca de 1% se converte em som audível, cuja faixa de maior intensidade situa-se entre 50 Hz e 100 Hz.

Os valores de pico da corrente associada à descarga de retorno têm média entre 30 kA e 40 kA, com dispersão significativa. Picos superiores a 200 kA são raros e representam menos de 0,1% dos casos [16]. Quando a descarga se encerra após um único pulso de retorno, ela é denominada descarga simples, o que ocorre em cerca de 20% das descargas negativas nuvem-solo. Mais comumente, após um intervalo de 40 ms a 90 ms, ocorrem novos pulsos de retorno subsequentes, formando uma descarga múltipla. Essas descargas subsequentes (*subsequent Strokes*) têm valores médios mais baixos, em torno de 10 kA, e tempos de subida mais rápidos, da ordem de 1 μ s [14,16].

2.3 Caracterização do Objeto de Estudo e do Fenômeno Atmosférico

2.3.1 Definição e Tipologia de Subestações de Alta Tensão

O sistema elétrico é composto por três principais segmentos, são eles: geração, transmissão e distribuição. Para que a energia elétrica gerada seja de fato fornecida ao consumidor, faz-se necessária a existência de subestações em cada segmento, sendo elas capazes de elevar e reduzir os níveis de tensão.

Uma subestação pode ser definida como uma instalação que atua como ponto de convergência para linhas de transmissão e/ou distribuição. Essa instalação abriga sistemas de medição, proteção, controle e transformação, entre outros, com o objetivo de garantir a segurança das pessoas e dos equipamentos envolvidos no processo. Além disso, visa assegurar a qualidade da energia elétrica, por meio do controle dos níveis de corrente, tensão e potência reativa. A subestação também exerce função essencial na interligação do sistema elétrico, permitindo o direcionamento do fluxo de energia entre as fontes e as cargas [19].

2.3.1.1 Tipos de Subestações

Segundo [20], as subestações podem ser divididas de acordo com a função que irão exercer no sistema em que operarão. Os principais tipos que podem ser encontrados no sistema elétrico são:

- Subestação Elevadora: responsável por elevar o nível de tensão gerado por uma fonte de energia elétrica, desse modo, fazendo com que a potência associada seja distribuída para as linhas de transmissão com uma tensão mais elevada que a de origem.
- Subestação Abaixadora: é aquela que reduz o nível de tensão gerado por uma fonte de energia elétrica, assim, distribuindo a potência associada para as redes de distribuição e alimentando subestações com menor nível de tensão.
- Subestação de Manobra: se destina ao chaveamento de linhas de transmissão de 230 kV a 750 kV, em geral, são subestações pertencentes à

Rede Básica. Contudo, existem algumas que podem operar em níveis de tensão de 138 kV, 88 kV ou 69 kV.

- Subestação Conversora: é um tipo específico de subestação, normalmente pertencente ao sistema de corrente contínua e que pode ser retificadora ou inversora.
- Subestação de Distribuição: responsável por reduzir o nível de tensão a fim de atender às necessidades das áreas de concessão de determinada região ou estado.
- Subestação Industrial: é suprida por um ou mais alimentadores de uma rede de distribuição, ou por uma ou mais linhas de transmissão, reduzindo o nível de tensão a valores compatíveis com a utilização industrial.
- Subestação Móvel: é aquela montada sobre um veículo motorizado ou não, e tem por objetivo atender a situações emergenciais.

2.3.2 Parâmetros Físicos das Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica consiste em um ou mais impulsos de corrente elétrica que possuem intensidades típicas da ordem de dezenas de milhares de ampères. Tal fenômeno pode ocorrer entre uma nuvem e o solo, entre as nuvens ou dentro das nuvens. Para que este fenômeno ocorra, é preciso que dois pontos da atmosfera possuam cargas opostas, criando, assim, uma diferença de potencial capaz de superar a rigidez dielétrica do ar. Após o rompimento do meio dielétrico, ocorre a transferência de elétrons da região menos polarizada para a região mais polarizada.

Durante a fase inicial de uma descarga atmosférica do tipo nuvem-solo, ocorre o deslocamento de um líder escalonado (descarga descendente), que se propaga da nuvem em direção ao solo, formando um canal ionizado e ramificado no ar. À medida que esse líder se aproxima do solo, estruturas elevadas na superfície terrestre podem emitir uma descarga ascendente (*streamer*), também constituída por cargas positivas. Quando essas descargas se conectam, estabelece-se um canal condutor entre a nuvem e a terra, pelo qual ocorre a chamada descarga de retorno (*return stroke*), caracterizada por uma corrente de alta intensidade que percorre rapidamente o canal da

terra para a nuvem, provocando aquecimento do ar e gerando o som conhecido como trovão [21].

As descargas atmosféricas que ocorrem no interior das nuvens são, estatisticamente, mais frequentes do que aquelas entre nuvem e solo. No entanto, as descargas do tipo nuvem-solo são mais estudadas devido ao seu elevado potencial destrutivo, uma vez que representam riscos diretos à vida humana, além de causarem danos significativos a edificações, equipamentos e redes elétricas [22].

2.3.3 Análise de Impactos e Quantificação de Riscos Conforme NBR 5419-2

A compreensão dos parâmetros físicos da descarga atmosférica é o ponto de partida para avaliar as suas consequências sobre as instalações elétricas. As sobretensões e correntes de alta magnitude geradas pelo fenômeno podem causar uma série de danos, cuja avaliação é o objetivo da metodologia de gestão de riscos estabelecida pela NBR 5419-2. Esta abordagem visa quantificar as perdas potenciais e determinar a necessidade de medidas de proteção.

2.3.3.1 Consequências

Segundo o INPE, as descargas atmosféricas são responsáveis por um grande número de desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil. As sobretensões geradas por esse fenômeno, apesar de sua curta duração, podem provocar diversos tipos de danos, como a queima de equipamentos, falhas em linhas de transmissão e distribuição, além de prejuízos a edificações e outras estruturas. Tais eventos resultam em interferências e danos nas redes de transmissão e distribuição, afetando diretamente as subestações interligadas e contribuindo para o agravamento de indicadores negativos relacionados à qualidade do fornecimento de energia elétrica [23].

Além dos impactos técnicos, as descargas atmosféricas também representam riscos à integridade física das pessoas, devido à exposição a tensões de passo e de

toque, que podem causar acidentes graves. Ademais, equipamentos e sistemas internos estão sujeitos a falhas ocasionadas pelas ondas eletromagnéticas induzidas durante o evento de descarga [24].

2.3.3.2 Gerenciamento de Riscos

A norma NBR 5419-2:2015 estabelece diretrizes para o gerenciamento de riscos associados a descargas atmosféricas, incluindo a classificação dos tipos de danos e perdas potenciais, conforme o ponto de impacto da descarga. Essas informações estão organizadas na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 4 - Posição dos pontos de impacto das descargas atmosféricas.

S1	Descargas atmosféricas na estrutura.
S2	Descargas atmosféricas próximas às estruturas.
S3	Descargas atmosféricas sobre as linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura.
S4	Descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura.

Fonte: Adaptado de [5].

Tabela 5 - Tipos de danos causados pelas descargas atmosféricas.

D1	Danos às pessoas devido a choque elétrico.
D2	Danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica, liberação de produtos químicos) devido aos efeitos das correntes das descargas atmosféricas, inclusive centelhamento.
D3	Falhas de sistemas internos devido a LEMP.

Fonte: Adaptado de [5].

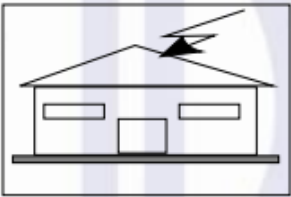
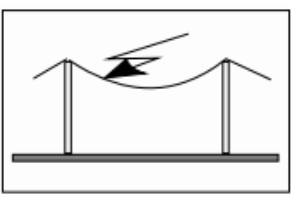
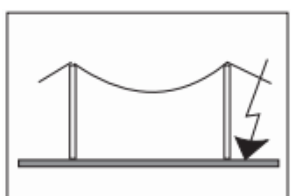
Tabela 6 - Tipos de perdas causadas pelas descargas atmosféricas.

L1	Perda de vida humana (incluindo-se danos permanentes).
L2	Perda de serviço ao público.
L3	Perda de patrimônio cultural.
L4	Perda de valor econômico (estrutura e seu conteúdo, assim como interrupções de atividades).

Fonte: Adaptado de [5].

A norma traz ainda, uma correlação entre as fontes de danos, tipos de danos e tipos de perdas, conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Danos e perdas de acordo com o ponto de impacto.

Descarga atmosférica		Estrutura	
Ponto de impacto	Fonte de danos	Tipo de danos	Tipo de perdas
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S4	D3	L1 ^b , L2, L4
^a somente para propriedades onde animais possam ser perdidos. ^b somente para estruturas com risco de explosão ou para hospitais ou outras estruturas onde falhas dos sistemas internos podem imediatamente colocar em perigo a vida humana.			

Fonte: Adaptado de [5].

De acordo com a NBR 5419-2:2015, o Risco (R) é definido como a provável perda média anual em uma estrutura devido a descargas atmosféricas, e está sujeito ao número anual de descargas atmosféricas que afetam a estrutura, à probabilidade

de dano causado por uma dessas descargas atmosféricas e a média das perdas causadas. Para a implementação de um SPDA, é necessário avaliar o risco de acordo com os tipos de perdas associadas, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Riscos ocasionados pelas descargas atmosféricas.

R₁	Risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas.
R₂	Risco de perdas de serviços ao público.
R₃	Risco de perdas do patrimônio cultural.
R₄	Risco de perdas de valor econômico.

Fonte: Adaptado de [6].

Após a identificação dos riscos totais, é necessário verificar se os valores calculados excedem os limites de risco tolerável (R_T) estabelecidos pela norma, conforme apresentado na Tabela 9. Caso os níveis de risco estejam acima desses limites, devem ser adotadas medidas de proteção visando sua redução. Ressalta-se que os critérios de risco tolerável se aplicam, principalmente, a cenários envolvendo perdas de vidas humanas ou de valores com relevância social e cultural.

Tabela 9 - Valores típicos de riscos toleráveis.

Tipo de perda		$R_T (y^{-1})$
L1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes.	10^{-5}
L2	Perda de serviço ao público.	10^{-3}
L3	Perda de patrimônio cultural.	10^{-4}

Fonte: Adaptado de [6].

Cada risco, denotado por R , é composto pela soma de seus respectivos componentes parciais. Para o correto cálculo, esses componentes devem ser agrupados de acordo com as fontes de risco e os tipos de danos considerados. Segundo a NBR

5419-2:2015, para o caso de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre a estrutura, os componentes de risco são definidos como R_A , R_B e R_C descritos a seguir:

- R_A : componente associado a ferimentos em seres vivos, causados por choque elétrico devido às tensões de toque e de passo, tanto no interior da estrutura quanto nas zonas externas localizadas até 3 metros ao redor dos condutores de descida. Inclui perdas do tipo L1 e, no caso de estruturas que abrigam animais vivos, também pode abranger perdas do tipo L4, relacionadas à mortalidade de animais;
- R_B : componente relacionado a danos físicos resultantes de centelhamentos perigosos dentro da estrutura, com potencial para iniciar incêndios ou explosões, podendo ainda representar riscos ao meio ambiente. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem ser afetados por esse componente;
- R_C : componente correspondente a falhas de sistemas internos, ocasionadas por surtos eletromagnéticos resultantes de descargas atmosféricas (LEMP). As perdas típicas são dos tipos L2 e L4, podendo incluir também L1 nos casos de estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras instalações em que falhas dos sistemas internos possam, imediatamente, colocar em risco a vida humana.

O componente de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto da estrutura é denotado R_M , sendo:

- R_M : componente relacionado a falhas de sistemas internos provocadas por surtos eletromagnéticos (LEMP), induzidos por descargas atmosféricas nas proximidades da estrutura. As perdas associadas a esse componente são, predominantemente, dos tipos L2 e L4, podendo incluir também perdas do tipo L1 em casos específicos, como estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras instalações onde falhas internas possam, imediatamente, colocar vidas humanas em perigo.

Os componentes de risco para uma estrutura, associados a descargas atmosféricas em linhas conectadas à edificação, são denotados por R_U , R_V e R_W , sendo definidos a seguir. Neste contexto, as linhas dizem respeito a condutores externos conectados à estrutura, como linhas de energia elétrica, de sinal ou de telecomunicação, que podem conduzir correntes de descarga atmosférica ou sofrer indução de sobre-tensões:

- R_U : componente associado a ferimentos em seres vivos, causados por choque elétrico devido às tensões de toque e de passo no interior da estrutura. Inclui perdas do tipo L1 e, em propriedades agrícolas, também perdas do tipo L4, relacionadas à morte de animais;
- R_V : componente associado a danos físicos, como incêndios ou explosões, resultantes de centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas da estrutura, geralmente localizadas no ponto de entrada das linhas. Esses centelhamentos são especificamente provocados por correntes de descarga atmosférica que percorrem as linhas externas conectadas à estrutura. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem ocorrer;
- R_W : componente relativo a falhas de sistemas internos, causadas por sobre-tensões induzidas nas linhas externas, as quais são transmitidas para o interior da estrutura e afetam seus sistemas elétricos e eletrônicos. As perdas associadas são, predominantemente, dos tipos L2 e L4, podendo incluir também perdas do tipo L1 em casos de estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras instalações onde falhas internas possam, de forma imediata, colocar vidas humanas em perigo.

O componente de risco para uma estrutura, associado a descargas atmosféricas nas proximidades de uma linha conectada à edificação, é denotado por R_Z , definido da seguinte forma. Neste contexto, linhas tem o mesmo significado previamente adotado, referindo-se a condutores externos conectados à estrutura, como linhas de energia elétrica, de sinal ou de telecomunicação:

- R_z : componente relacionado a falhas de sistemas internos, causadas por sobretensões induzidas nas linhas devido à incidência de descargas atmosféricas próximas a essas linhas. Essas sobretensões são posteriormente transmitidas para o interior da estrutura, afetando seus sistemas elétricos e eletrônicos. As perdas mais frequentes são dos tipos L2 e L4, podendo incluir também perdas do tipo L1 em casos críticos, como estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras instalações onde falhas internas possam, de forma imediata, colocar vidas humanas em perigo.

Após a identificação dos componentes de risco, a norma NBR 5419-2:2015 estabelece a forma de combinação desses componentes para a obtenção dos riscos globais associados a cada tipo de perda. Esses riscos são classificados em quatro categorias principais: perda de vida humana, perdas de serviço ao público, perdas de patrimônio cultural e perdas de valor econômico. Cada uma dessas categorias de perda é representada por uma equação específica, que corresponde à soma dos componentes de risco relevantes, considerando as fontes de perigo e os tipos de danos potenciais. As expressões que modelam as perdas são apresentadas a seguir:

- Risco de perda de vida humana:

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}^* + R_{M1}^* + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1}^* + R_{Z1}^* \quad (1)$$

** Somente para estruturas com risco de explosão e para hospitais com equipamentos elétricos para salvar vidas ou outras estruturas quando a falha dos sistemas internos imediatamente possa pôr em perigo a vida humana.*

- Risco de perdas de serviço ao público:

$$R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2} \quad (2)$$

- Risco de perdas de patrimônio cultural:

$$R_3 = R_{B3} + R_{V3} \quad (3)$$

- Risco de perdas de valor econômico:

$$R_4 = R_{A4}^* + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4}^* + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4} \quad (4)$$

** Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos.*

2.3.3.3 Verificação da Necessidade de um SPDA

Para a análise da necessidade de instalação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), a norma NBR 5419-2:2015 estabelece o cálculo do risco parcial para cada tipo de perda por meio da seguinte expressão:

$$R_X = N_X * P_X * L_X \quad (5)$$

Onde, N_X é o número de eventos perigosos por ano, P_X é a probabilidade de dano à estrutura, L_X é a perda consequente.

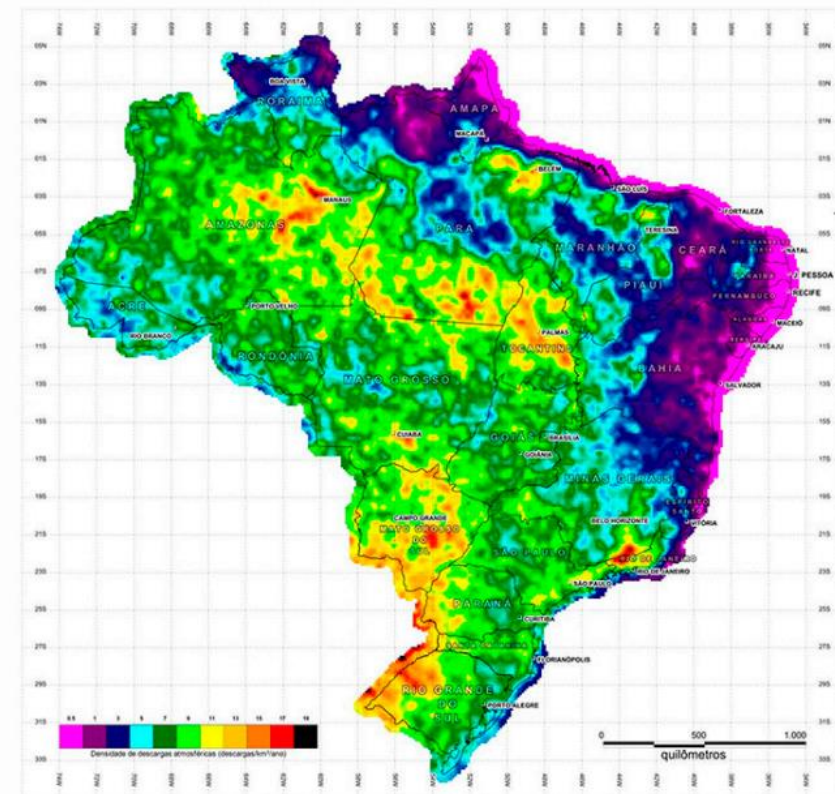
O número N_X de eventos perigosos é diretamente afetado pela densidade de descargas atmosféricas para a terra (N_G) e pelas características físicas da estrutura a ser protegida, sua vizinhança, linhas conectadas e o solo. Para o cálculo de N_X , é preciso multiplicar a densidade de descargas atmosféricas para a terra N_G pela área de exposição equivalente da estrutura, levando em conta os fatores de correção para as características físicas da estrutura.

A densidade N_G deve ser observada no mapa apresentado no Anexo F da norma NBR 5419-2:2015, conforme Figura 2. Na ausência deste mapa, o valor de N_G pode ser estimado a partir da equação (6):

$$N_G \approx 0,1 * T_D \quad (6)$$

Onde T_D é o número de dias de tempestade por ano, que pode ser obtido através de mapas isocerânicos.

Figura 2 – Mapa da densidade de descargas atmosféricas.



Fonte: Retirado de [6].

A partir da análise do mapa, é possível observar que regiões com cores mais quentes, apresentam maior incidência de raios.

A probabilidade de dano à estrutura P_x é impactada pelas características da estrutura a ser protegida, pelas medidas de proteção existentes e pelas linhas conectadas às estruturas. Já em relação à perda consequente L_x , a mesma é impactada pelo uso para o qual a estrutura a ser protegida foi projetada, a frequência das pessoas, o tipo de serviço fornecido ao público, o valor dos bens afetados pelos danos e as medidas providenciadas para limitar a quantidade de perdas.

Os cálculos das variáveis apresentadas podem ser observados nos Anexos B e C da NBR 5419-2:2015, além disso, todos os cálculos associados à verificação da necessidade de instalação de um SPDA serão realizados no estudo de caso.

2.4 Estratégias e Métodos de Proteção

2.4.1 Conceito e Estrutura do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

As descargas atmosféricas são fenômenos cuja ocorrência é inerente às condições atmosféricas, mas seus impactos podem ser mitigados por meio da adoção de medidas de proteção adequadas. Nesse contexto, torna-se evidente a importância da implementação de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), especialmente em subestações de energia elétrica, que, na ausência dessa proteção, ficam expostas a riscos operacionais e perdas significativas.

O principal objetivo do SPDA é reduzir os danos causados por descargas atmosféricas a pessoas, equipamentos e estruturas, além de minimizar a ocorrência de manutenções corretivas decorrentes desses eventos. De forma geral, o sistema atua interceptando as descargas e conduzindo a corrente elétrica de maneira segura até o solo, através de caminhos condutores projetados conforme as características específicas da estrutura a ser protegida.

A classe de proteção a ser aplicada para um SPDA está relacionada com as características da estrutura a ser protegida, além do nível de proteção considerado para descargas atmosféricas. Essencialmente, a classe do SPDA indica o nível de proteção para o qual o sistema está sendo projetado.

A Tabela 10 apresenta as quatro classes de SPDA presentes na norma NBR 5419-3:2015, correspondentes aos níveis de proteção para descargas atmosféricas definidos na NBR 5419-1:2015. O nível I apresenta uma maior proteção, enquanto o nível IV, apresenta uma menor proteção, logo, quanto maior o nível de proteção adotado, menor será a probabilidade de a estrutura sofrer danos oriundos das descargas atmosféricas. De acordo com a classe adotada, parâmetros específicos como o volume de proteção, distâncias entre condutores, distâncias de segurança e quantidade de descidas de condutores, também serão definidos.

Tabela 10 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe de SPDA.

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

Fonte: Retirado de [7].

Para que um SPDA atenda aos requisitos de sua classe de proteção, sua implementação física é dividida em três subsistemas fundamentais e interdependentes. Atuando de forma coordenada, o subsistema de captação intercepta a descarga, o subsistema de descida a conduz de forma segura e o subsistema de aterramento a dispersa no solo. A seguir, detalha-se a função específica de cada um.

▪ **Subsistema de Captação**

É composto por elementos que ficam expostos ao contato direto com as descargas atmosféricas e tem como objetivo interceptar estas descargas, impedindo que atinjam de fato a estrutura e evitando eventuais riscos e danos. Este subsistema é instalado nos pontos mais altos da estrutura e é constituído por condutores suspensos, condutores em malha, e hastes [7].

Os elementos do subsistema de captação devem ser posicionados em pontas, cantos salientes e nas beiradas localizadas na parte superior das estruturas. O volume de proteção é o volume proveniente do subsistema de captação, no qual é preciso conter toda estrutura. Portanto, o posicionamento correto do subsistema de captação está fundamentalmente relacionado ao volume de proteção. Existem diferentes métodos para a determinação da localização dos elementos do subsistema de captação, como o método da esfera rolante, método das malhas e o método do ângulo de proteção.

▪ **Subsistema de Descida**

Tem como objetivo conduzir a corrente elétrica oriunda da descarga atmosférica, do subsistema de captação, até o subsistema de aterramento, dessa forma, minimizando os riscos e promovendo o escoamento da corrente de forma segura. Os condutores de descida devem ser dispostos de modo a proporcionar diferentes caminhos para a corrente, garantir a equipotencialização com as partes condutoras da estrutura e fornecer os menores comprimentos de caminho para a corrente [7].

A NBR 5419-3:2015, determina valores típicos para a distância entre os condutores de descida, de acordo com a classe de SPDA.

Tabela 11 – Distância entre os condutores de descida.

Classe do SPDA	Distâncias (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20
NOTA: É aceitável que o espaçamento dos condutores de descidas tenha no máximo 20% além dos valores acima.	

Fonte: Adaptado de [7].

▪ **Subsistema de Aterramento**

A principal função do subsistema de aterramento é dispersar, no solo, a corrente elétrica advinda da descarga atmosférica, a qual foi direcionada pelo subsistema de descida [7]. Para que seja possível realizar a dissipação da corrente elétrica no solo, de maneira efetiva, é necessário manter a resistência de aterramento a menor possível, levando em consideração alguns fatores, como: arranjo correto dos eletrodos, resistividade do solo e topologia do local.

Para o caso das subestações, é preferível a utilização da malha de aterramento presente na subestação para a composição do subsistema de aterramento, sendo necessário apenas, a conexão da malha com os condutores utilizados no subsistema de descida.

2.4.2 Métodos de Dimensionamento do Subsistema de Captação

O dimensionamento do subsistema de captação, que é a parte do SPDA responsável por interceptar diretamente a descarga atmosférica, é realizado com base em modelos geométricos normalizados. Cada método define um volume de proteção, e a escolha ou combinação entre eles depende da geometria da estrutura e do nível de proteção requerido. As normas NBR 5419 e IEEE 998 preveem três métodos principais, que serão detalhados a seguir: o método do ângulo de proteção, o método das malhas e o método da esfera rolante.

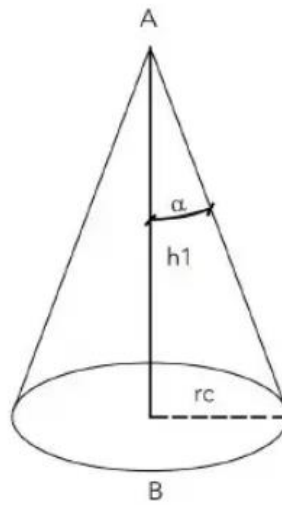
2.4.2.1 Método do Ângulo de Proteção

Também conhecido como método de Franklin, o método do ângulo de proteção consiste no cálculo de ângulos para a definição da altura e posicionamento dos elementos do subsistema de captação. O volume de proteção é determinado em função da altura do captor e do ângulo de proteção α , gerando um cone fictício cujo vértice está posicionado na extremidade superior do captor, como mostra a Figura 3. Para que a estrutura esteja protegida, é preciso que esteja inteiramente contida dentro do cone. As normas NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012 trazem abordagens ligeiramente distintas para o método do ângulo de proteção, contudo, vale ressaltar que ambas são comumente utilizadas nos projetos de SPDA.

▪ Método do Ângulo de Proteção segundo a NBR 5419:2015

De acordo com a NBR 5419:2015, este método é adequado para edificações de formato simples, e é limitado pela altura dos captores. Ou seja, o ângulo de proteção é definido em função da altura e da classe de SPDA, conforme Figura 4.

Figura 3 – Método do ângulo de proteção pela NBR 5419:2015.



Fonte: Retirado de [24].

Em que:

A: topo do captor;

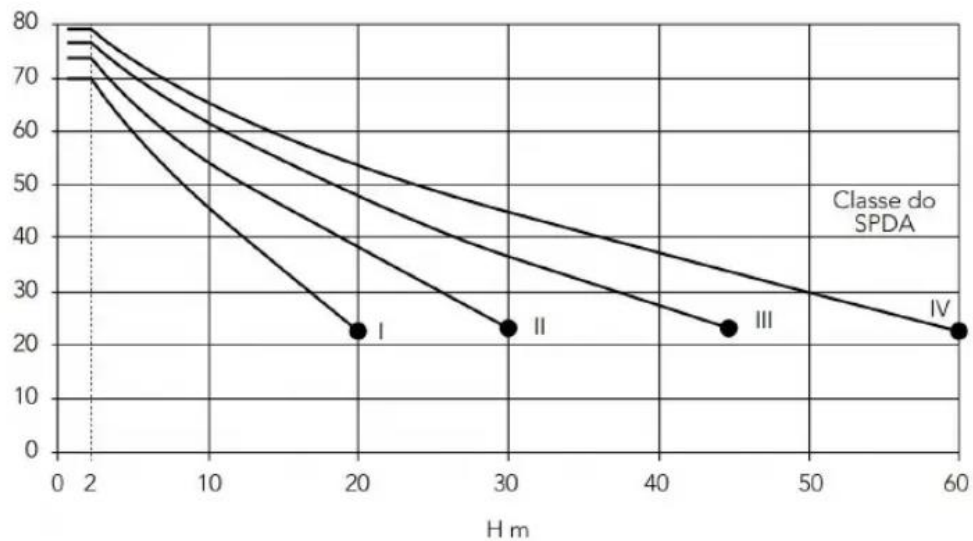
B: plano de referência;

rc: raio do cone de proteção;

h: altura do mastro acima do plano de referência;

α : ângulo de proteção.

Figura 4 - Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA.



Fonte: Retirado de [24].

▪ Método do Ângulo de Proteção segundo a IEEE Std 998:2012

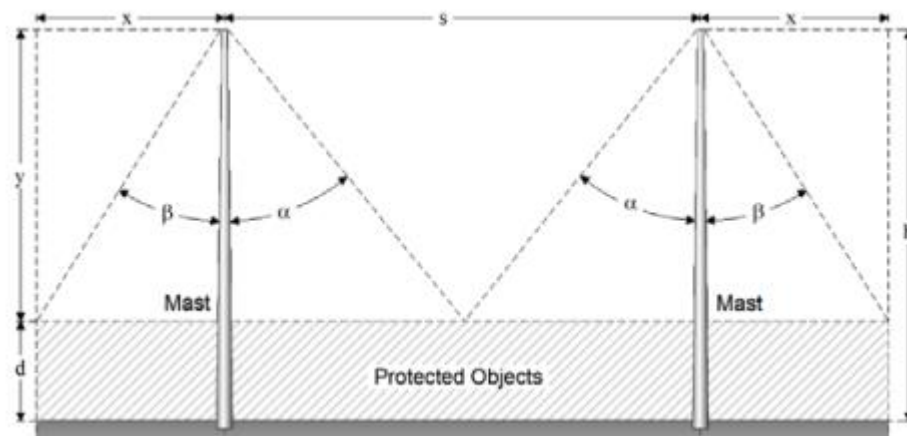
A norma IEEE Std 998:2012 apresenta uma versão do método do ângulo de proteção, nomeada de método dos ângulos fixos, que consiste na adoção de ângulos de proteção a partir da altura do captor, conforme pode ser visto na Figura 5.

Segundo a norma, são usualmente utilizados valores de 30° e 45° para o ângulo β , e 45° para o ângulo α . Contudo, para um maior nível de segurança, a norma sugere valores para os ângulos de proteção, de 40° a 45° para alturas de até 15 metros, 30° para alturas entre 15 e 25 metros, e menos de 20° para alturas de até 50 metros.

Após a definição da altura do plano protegido, torna-se possível determinar o volume de proteção a partir do ângulo adotado.

Esta abordagem também pode ser utilizada para a definição de ângulos de proteção em casos onde apenas cabos para-raios estejam instalados em subestações.

Figura 5 – Método do ângulo de proteção pela IEEE Std 998:2012.



Fonte: Adaptado de [25].

Em que:

s : distância entre os mastros;

x : raio do cone de proteção;

h : altura do mastro acima do plano de referência;

y : distância entre plano protegido e topo do mastro;

d : altura do plano protegido;

α : ângulo de proteção interno;

β : ângulo de proteção externo.

2.4.2.2 Método das Malhas

O método das malhas, também conhecido Gaiola de Faraday, consiste essencialmente em uma malha captora com os condutores espaçados entre si na distância correspondente ao nível de proteção escolhido, conforme Tabela 12. A malha em questão, é responsável por captar, conduzir e distribuir a corrente provinda da descarga atmosférica, dessa forma, minimizando os danos à estrutura.

Este método é indicado para uso em superfícies planas com altura relativamente baixa e com geometria simples, além de estruturas de grande área horizontal, com telhados horizontais e inclinados sem curvatura, bem como superfícies laterais planas.

Tabela 12 – Dimensões da malha de proteção pelo Método das malhas.

Classe do SPDA	Máximo afastamento dos condutores da malha (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Fonte: Adaptado de [7].

Segundo a NBR 5419-3:2015, para que a malha de condutores seja efetiva e possa de fato ser utilizada, é preciso que os seguintes requisitos sejam cumpridos:

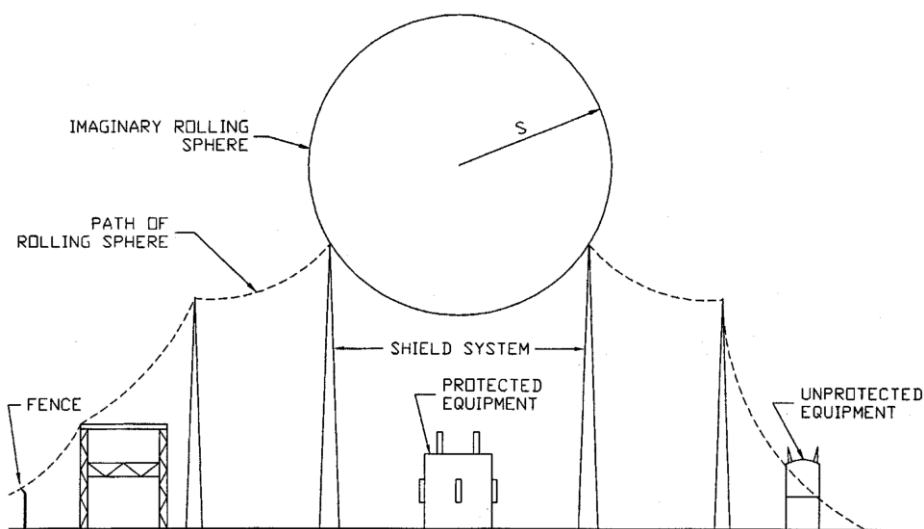
- Os condutores captadores devem ser instalados na periferia e nas saliências da cobertura da estrutura;
- As dimensões da malha não podem superar os valores apresentados na Tabela 12;
- O conjunto de condutores do subsistema de captação deve ser projetado de forma que a corrente elétrica sempre tenha, pelo menos, dois caminhos distintos para o subsistema de aterramento;
- Os condutores da malha devem seguir o caminho mais curto e retilíneo possível da instalação;
- Os condutores da malha devem seguir o caminho mais curto e retilíneo possível da instalação.
- Deve-se garantir que nenhum elemento metálico, que por suas características não possa assumir a condição de elemento captor, ultrapasse para fora o volume protegido pela malha de proteção.

2.4.2.3 Método da Esfera Rolante

O método da esfera rolante, também conhecido como modelo eletrogeométrico, considerado uma evolução do método de Franklin, é o método mais utilizado em estruturas com alturas elevadas ou com formas complexas, sendo assim, um método

muito indicado para proteção de linhas de transmissão e subestações de energia elétrica. O método consiste em fazer rolar uma esfera fictícia, de raio predefinido, ao longo da superfície e cada ponto tocado por ela representa os pontos expostos ao impacto de uma descarga atmosférica, a região que fica abaixo da esfera e que não seja tocada pela mesma, é denominada zona de proteção.

Figura 6 – Representação do método da esfera rolante.



Fonte: Retirado de [25].

A seguir, serão apresentadas as metodologias para o cálculo do raio da esfera rolante, seguindo a NBR 5419:2015 e a IEEE Std 998:2012.

▪ Método da Esfera Rolante segundo a IEEE Std 998:2012:

Nesta norma técnica, o raio da esfera é definido através de uma equação que relaciona a distância final de impacto com a magnitude da corrente de retorno. A norma apresenta ainda, as principais equações desenvolvidas ao longo do tempo e que buscam determinar a distância do impacto da descarga atmosférica, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 – Equações dos modelos eletrogeométricos.

Equação	Autor	Nº Equação
$S = 2I + 30 \left(1 - e^{-\frac{1}{6,8}} \right)$	Darveniza	(7)
$S = 10I^{0,65}$	Love	(8)
$S = 9,4I^{\frac{2}{3}}$	Whitehead	(9)
$S = 8I^{0,65}$	IEEE	(10)
$S = 3,3I^{0,78}$	Suzuki	(11)

Fonte: Adaptado de [25].

Onde:

S: Raio da esfera em metros;

I: Corrente de pico mínima sobre os condutores, em kA.

Inicialmente, a aplicação do modelo eletrogeométrico era voltada para linhas de transmissão, contudo, a partir do método de Mousa, a aplicação deste modelo foi estendida às subestações [25]. Para tal, são considerados o uso de fatores para diferentes distâncias de impacto de uma descarga atmosférica em uma haste, cabo para-raios e solo, como mostra a Equação (12).

$$S = k * 8 * I^{0,65} \quad (12)$$

Onde:

S: Raio da esfera em metros;

I: Corrente de pico mínima sobre os condutores, em kA;

k: Coeficiente empírico estabelecido por Mousa, sendo igual a 1 para cabos e solo e 1,2 para hastes.

▪ Método da Esfera Rolante segundo a NBR 5419:2015

A norma NBR 5419-3:2015 estabelece os raios das esferas bem como os valores mínimos de amplitudes das correntes das descargas atmosféricas (corrente de pico mínima em kA), de acordo com o nível de proteção utilizado, conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Raio da esfera segundo NBR 5419.

Classe do SPDA	Raio da esfera (m)	Corrente de pico mínima (kA)
I	20	3
II	30	6
III	45	11
IV	60	16

Fonte: Adaptado de [7].

A Equação (13) é utilizada para determinar o valor do raio da esfera. Esta metodologia de cálculo é apresentada na NBR 5419-1:2015 e refere-se à equação A.1 descrita na página 32.

$$r = 10 * I^{0,65} \quad (13)$$

Onde:

r : Raio da esfera rolante;

I : Corrente de pico (kA).

2.4.3 Aplicação Combinada dos Métodos de Proteção

A aplicação conjunta dos métodos da esfera rolante, do ângulo de proteção e da malha constitui uma prática que viabiliza uma abordagem mais abrangente, segura e tecnicamente robusta no dimensionamento do SPDA. Embora cada método possua fundamentos teóricos distintos e seja mais adequado a determinadas situações, sua

integração permite compensar as limitações individuais e aumentar a eficácia do sistema de proteção como um todo. A utilização combinada dessas metodologias contribui para o aumento da confiabilidade do subsistema de captação, assegurando a cobertura integral da estrutura, além de possibilitar a adaptação do projeto a diferentes tipologias construtivas e configurações de equipamentos, otimizando o volume de proteção em função da criticidade dos ativos. Além disso, essa abordagem favorece o incremento da segurança de pessoas e instalações, ao proporcionar uma proteção redundante e tecnicamente validada.

2.5 Conclusão do Capítulo

A evolução da ABNT NBR 5419 reflete o desenvolvimento tecnológico da sociedade e o amadurecimento da engenharia de proteção no Brasil, demonstrando uma transição de um enfoque prescritivo, centrado na proteção física, para um paradigma de gestão de riscos abrangente e integrado. A revisão de 2015, impulsionada pela necessidade de harmonização com a IEC 62305 e pela crescente vulnerabilidade dos sistemas eletrônicos, representa o marco mais significativo dessa trajetória. Ao introduzir a Gestão de Risco (Parte 2) como ponto de partida e detalhar as Medidas de Proteção contra Surtos (Parte 4), a norma passou a oferecer uma metodologia abrangente.

As adaptações nacionais consolidam a NBR 5419:2015 como um documento técnico adaptado e aderente à realidade brasileira. Embora a sua aplicação exija maior complexidade técnica, o resultado é um aumento significativo na eficácia e na economicidade dos sistemas de proteção, garantindo um nível de segurança mais elevado para vidas, patrimônio e serviços essenciais. As tendências futuras indicam que essa evolução continuará movendo-se em direção a sistemas de proteção cada vez mais dinâmicos e preditivos, consolidando este campo do conhecimento em constante aprimoramento.

Este capítulo apresentou os fundamentos teóricos e normativos necessários para o entendimento do fenômeno das descargas atmosféricas e das estratégias de proteção adotadas em subestações de energia elétrica. Foram abordados os concei-

tos relacionados à origem e aos impactos das descargas, os critérios de gerenciamento de riscos conforme a NBR 5419, bem como a estrutura e os subsistemas que compõem um SPDA. Além disso, detalhou-se a aplicação dos principais métodos normativos de dimensionamento, com destaque para os métodos da esfera rolante, do ângulo de proteção e das malhas.

A fundamentação aqui consolidada fornece suporte técnico e conceitual para o dimensionamento prático do sistema de proteção. Assim, os próximos capítulos se dedicam à aplicação direta dessas metodologias em uma subestação real, iniciando-se pelo desenvolvimento das soluções técnicas de proteção e culminando na análise dos resultados obtidos no estudo de caso.

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

O objetivo deste capítulo, é apresentar de forma sucinta, as metodologias aplicadas para o correto dimensionamento dos projetos de SPDA para o pátio e as edificações de subestações de alta tensão, utilizando-se o método da esfera rolante e o método do ângulo de proteção.

3.1 SPDA em Pátios de Subestações

Para a realização do projeto de SPDA em pátios de subestações, é preciso apresentar o volume de proteção proporcionado pela instalação dos cabos para-raios e das hastes, no topo das estruturas, a fim de verificar que todos os equipamentos instalados no pátio, estarão contidos neste volume de proteção.

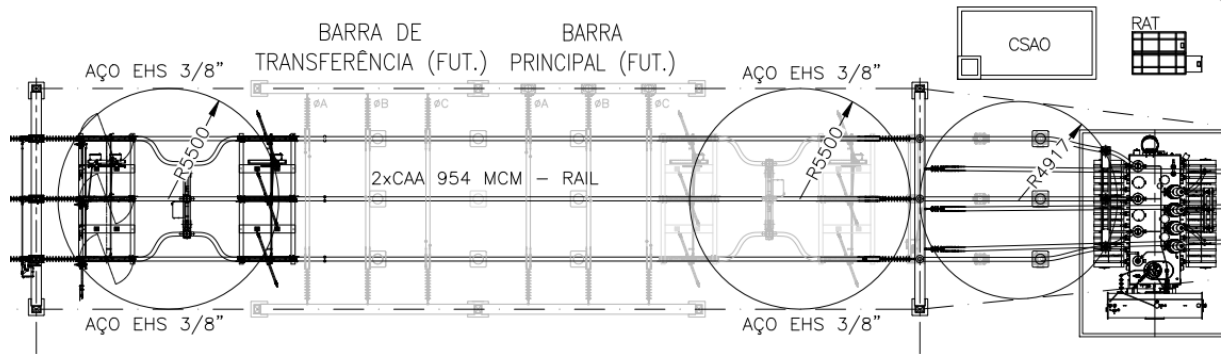
Por se tratar de uma norma brasileira, elaborada pela ABNT e, portanto, a referência oficial a ser seguida, o dimensionamento do SPDA em pátios de subestações no Brasil deve seguir as diretrizes da ABNT NBR 5419:2015, que detalha a análise de riscos e os métodos de proteção. Para o estudo de caso proposto neste trabalho, a norma IEEE Std 998:2012 será utilizada como referência técnica internacional, permitindo uma análise comparativa entre as metodologias de cálculo do raio da esfera rolante e os volumes de proteção resultantes, conforme definido nos objetivos.

Inicialmente, deve ser escolhida a metodologia para o cálculo do raio da esfera rolante, ou seja, deve-se escolher entre o método da esfera rolante segundo a IEEE Std 998:2012, através da Equação (12), ou segundo a NBR 5419:2015, através da Equação (13). Em seguida, devem ser desenhados círculos entre os vãos dos cabos para-raios instalados, dessa forma, analisando os espaços críticos e o valor do raio dos círculos. Esta análise é necessária para garantir que os equipamentos estejam dentro do volume de proteção e não sejam tocados pela esfera.

Cada círculo traçado, representa o quanto a esfera rolante adentra o vão entre os cabos. Portanto, é preciso que os raios dos círculos sejam menores que o valor calculado para o raio da esfera rolante. Logo, quanto menor o raio do círculo, menos a esfera rolante adentrará o local. Na Figura 7 é apresentada uma subestação com os círculos já traçados. Os círculos são dimensionados a partir de pontos tangentes aos

cabos para-raios instalados no local, dessa forma, os raios dos círculos dependem da disposição dos cabos.

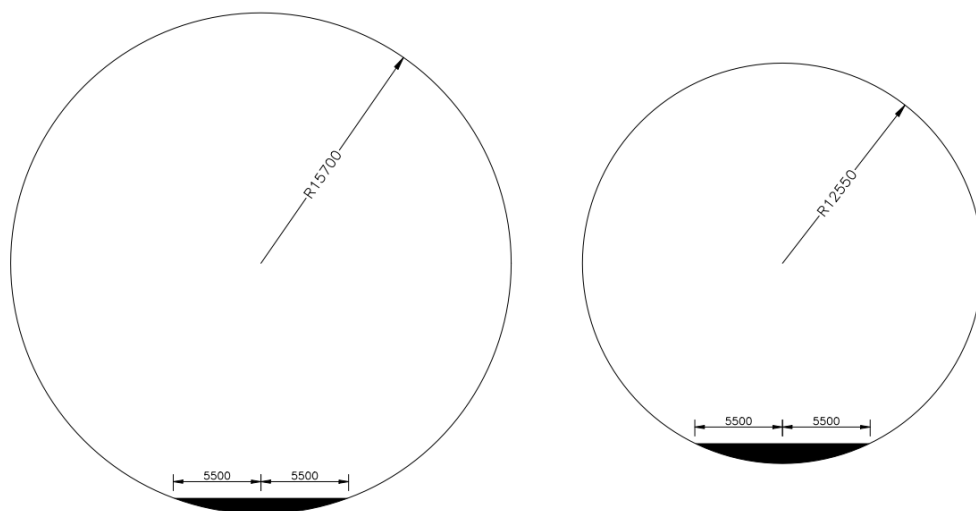
Figura 7 – Locação dos círculos.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

A esfera rolante com raio obtido através da equação da norma escolhida adentrará os vãos entre os cabos de acordo com o valor do raio encontrado para cada círculo desenhado da Figura 7. Na Figura 8 pode ser observado o quanto a esfera rolante adentrou a região analisada.

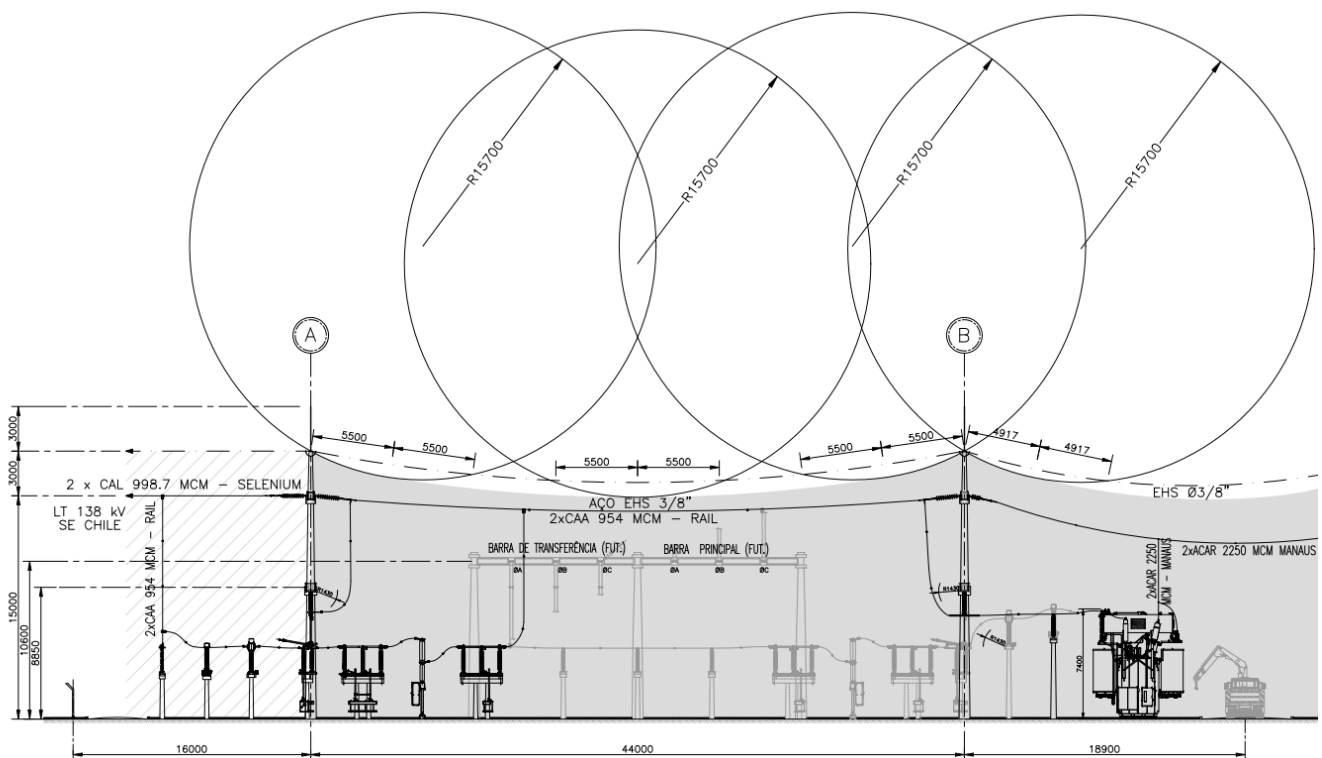
Figura 8 – Região adentrada pela esfera rolante.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Após a determinação do raio dos círculos, para garantir o correto posicionamento do subsistema de captação do pátio da subestação, deve-se rolar a esfera pelos cabos para-raios, avaliando o volume de proteção gerado em cada trecho. Visando uma melhor análise da profundidade de penetração da esfera, deve-se observar cada região do pátio por meio de cortes, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Volume de proteção pelo método das esferas rolantes.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

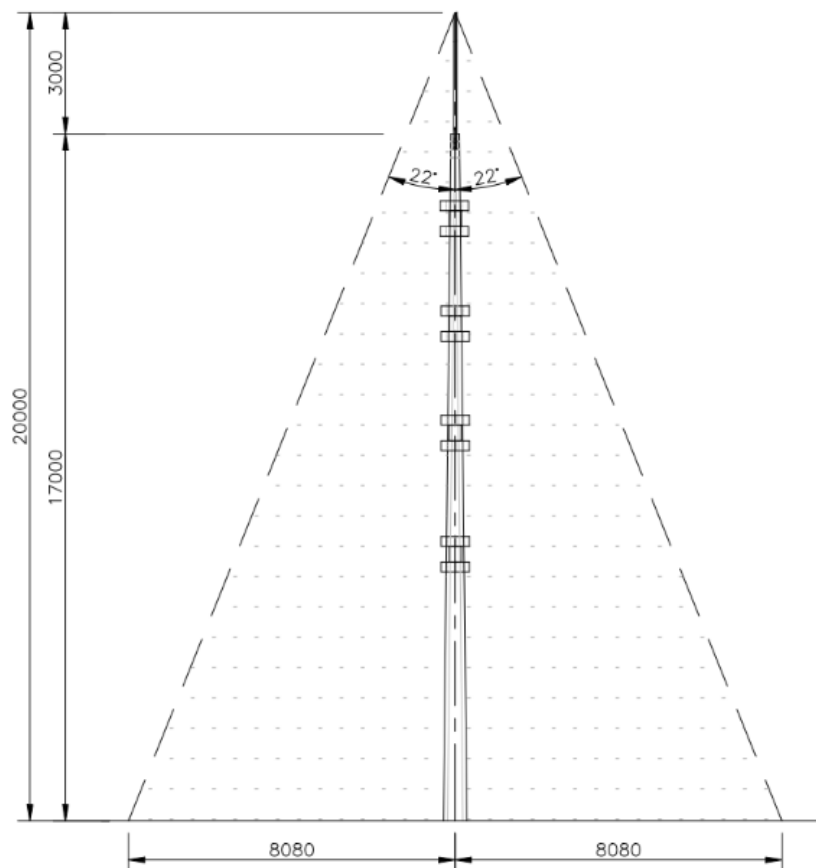
Após a determinação do volume protegido fornecido através do método das esferas rolantes, o próximo passo é definir o volume protegido, fornecido pelo método do ângulo de proteção.

As normas NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012 trazem abordagens distintas para este método. Levando em conta que a metodologia apresentada pela IEEE Std 998:2012 para o método dos ângulos fixos se baseia em um modelo puramente empírico, não possuindo um embasamento teórico concreto, para o estudo de caso apresentado no Capítulo 4, será adotada a metodologia estabelecida pela norma NBR 5419:2015.

Considerando que segundo a NBR 5419:2015 a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas na fachada de estruturas com altura inferior a 60 metros é desprezível, o método do ângulo de proteção deve ser aplicado como garantia de blindagem atmosférica em casos onde equipamentos ou condutores não estejam totalmente contidos no volume de proteção obtido através do método da esfera rolante, assegurando que a estrutura, os equipamentos instalados e os condutores estarão totalmente protegidos.

Para a aplicação deste método, deve ser observada a altura total das estruturas da subestação, também levando em consideração a altura da haste instalada, além da altura dos equipamentos. A partir disso, deve ser definido o ângulo de proteção de acordo com a altura da estrutura e a classe do SPDA, conforme Figura 4. A Figura 10 apresenta um exemplo da aplicação do método onde a estrutura possui altura total igual a 20 metros.

Figura 10 - Volume de proteção pelo método do ângulo de proteção.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

3.2 SPDA em Edificações de Subestações

Assim como no pátio, visando a redução dos riscos advindos das descargas atmosféricas, também devem ser desenvolvidos projetos de SPDA para as edificações presentes em uma subestação. Usualmente, utiliza-se o método da esfera rolante para este tipo de projeto, onde a metodologia aplicada para o cálculo do raio da esfera será semelhante à utilizada no pátio.

Inicialmente, é preciso realizar o gerenciamento de riscos, conforme NBR 5419-2:2015, buscando reduzir os riscos a níveis toleráveis. Para isso, será necessário observar as características da estrutura, o índice de descargas atmosféricas no local e a probabilidade de dano causado por uma dessas descargas.

Em seguida, deve-se realizar o cálculo da esfera rolante utilizando uma metodologia semelhante à aplicada para o pátio, distribuir os captores no telhado da edificação e realizar a interligação destes captores através de uma malha, normalmente composta por cabos condutores de cobre nu. É preciso respeitar o espaçamento entre os condutores conforme apresentado na Tabela 12, de acordo com a classe do SPDA definida.

Além disso, também devem ser previstas descidas para a conexão com a malha de aterramento da subestação, sendo assim, devem ser consultadas as distâncias máximas entre os condutores de descida conforme Tabela 11.

A NBR 5419-3:2015 determina as seções mínimas dos condutores de captação, bem como as dimensões mínimas dos eletrodos de aterramento. Considerando que serão utilizados cabos de cobre nu encordoados para os subsistemas de captação, descida e aterramento. As seções mínimas dos condutores indicadas pela norma podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Seções mínimas dos condutores de captação, descida e aterramento.

Área de seção mínima dos condutores de captação e descidas		
Material	Configuração	Seção mínima
Cobre	Encordoado	35 mm ²

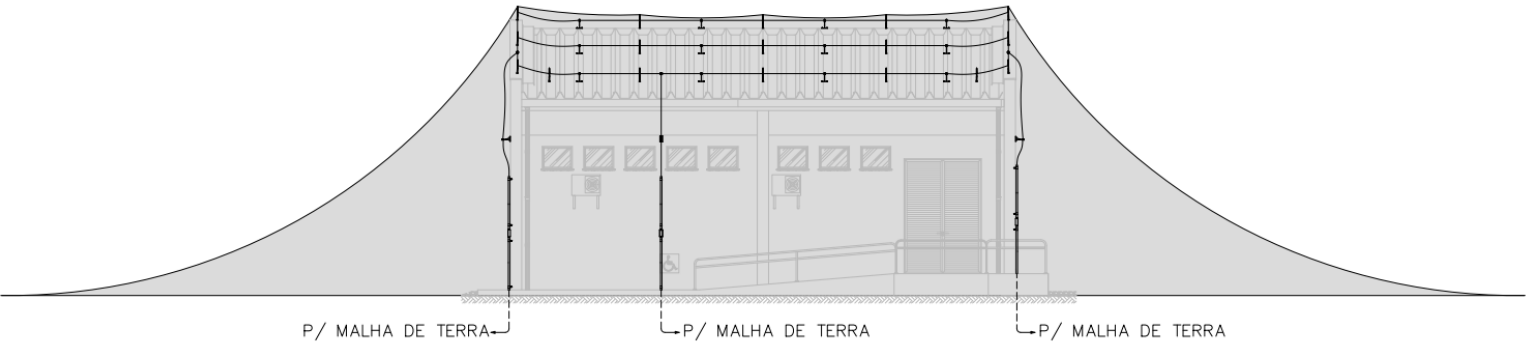
Área de seção mínima dos eletrodos de aterramento		
Material	Configuração	Dimensão mínima
Cobre	Encordoado	50 mm ²

Fonte: Adaptado de [7].

Após a instalação dos captores, da malha superior e dos condutores de descida, é necessário realizar a representação da esfera rolando por toda a edificação afim de obter o volume de proteção. Caso a edificação esteja totalmente contida neste volume, é possível afirmar que o SPDA foi dimensionado corretamente.

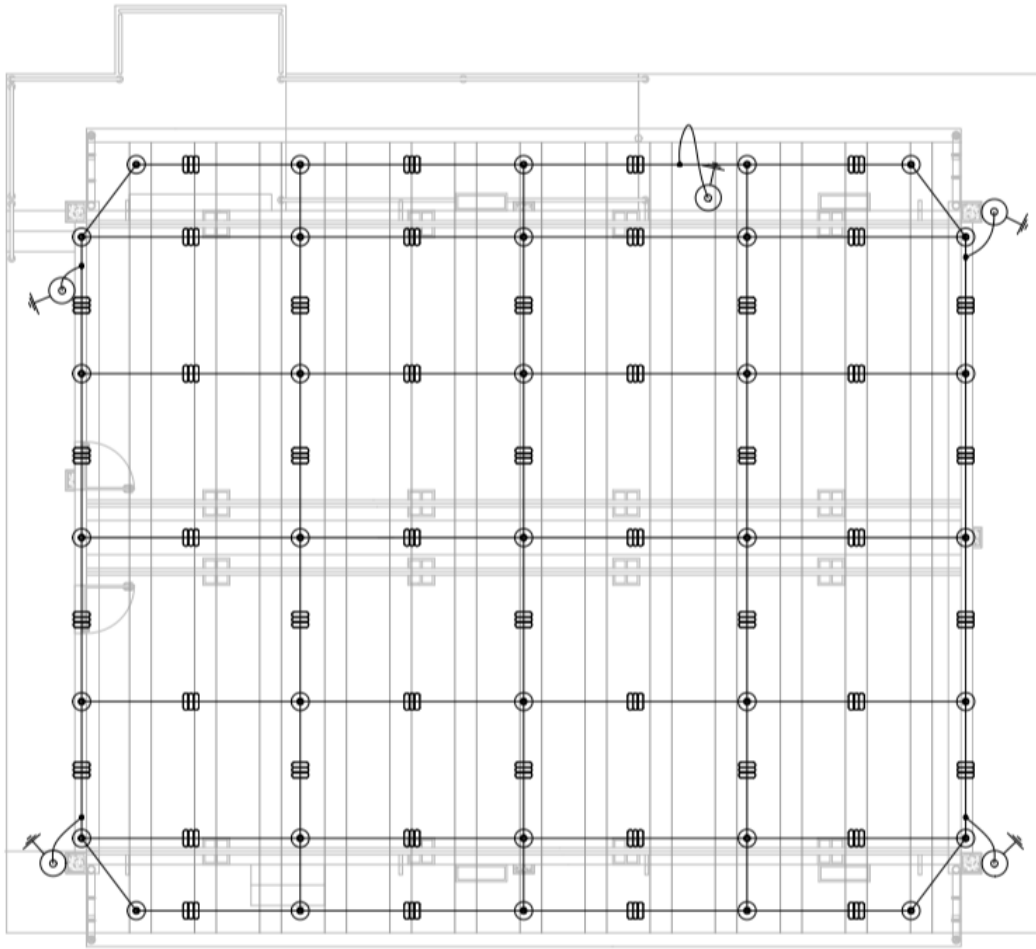
A malha superior instalada no telhado da edificação, bem como o volume de proteção obtido através do método da esfera rolante podem ser observados na Figura 11 e na Figura 12.

Figura 11 - Volume de proteção para edificações.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 12 - Malha superior e captadores no telhado.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4 APLICAÇÃO EM SUBESTAÇÃO DE 138/34,5 kV

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o sistema de proteção contra descargas atmosféricas desenvolvido para uma subestação coletora, responsável por coletar a energia gerada por usinas solares ou eólicas na média tensão, elevar seu nível de tensão e em seguida transmiti-la a outra subestação, com o objetivo de integrá-la à rede elétrica para posterior distribuição.

Serão abordadas diferentes metodologias para a aplicação do método da esfera rolante com o intuito de realizar a blindagem atmosférica do pátio dos setores de 138 e 34,5 kV, seguido por um estudo comparativo dos resultados obtidos. Além disso, será realizado o dimensionamento do sistema SPDA de uma edificação presente na subestação.

A seguir, serão apresentados os dados referentes à subestação Bolívia:

- Subestação Coletora, localizada na zona rural da Bahia;
- Pelo fato de ser uma instalação que pode provocar interrupções inaceitáveis em serviços públicos essenciais, será admitido Nível de Proteção I;
- Nível de tensão da subestação: 138 kV / 34,5 kV;

A proteção contra descargas atmosféricas no pátio energizado da subestação será realizada através da instalação de cabos de aço EHS 3/8" e utilização de hastes captoras com altura igual a 3 metros, instaladas no topo das estruturas de concreto, para o setor de 138 kV. Para o setor de 34,5 kV, serão utilizadas apenas as hastes captoras instaladas nas estruturas de concreto presentes neste setor.

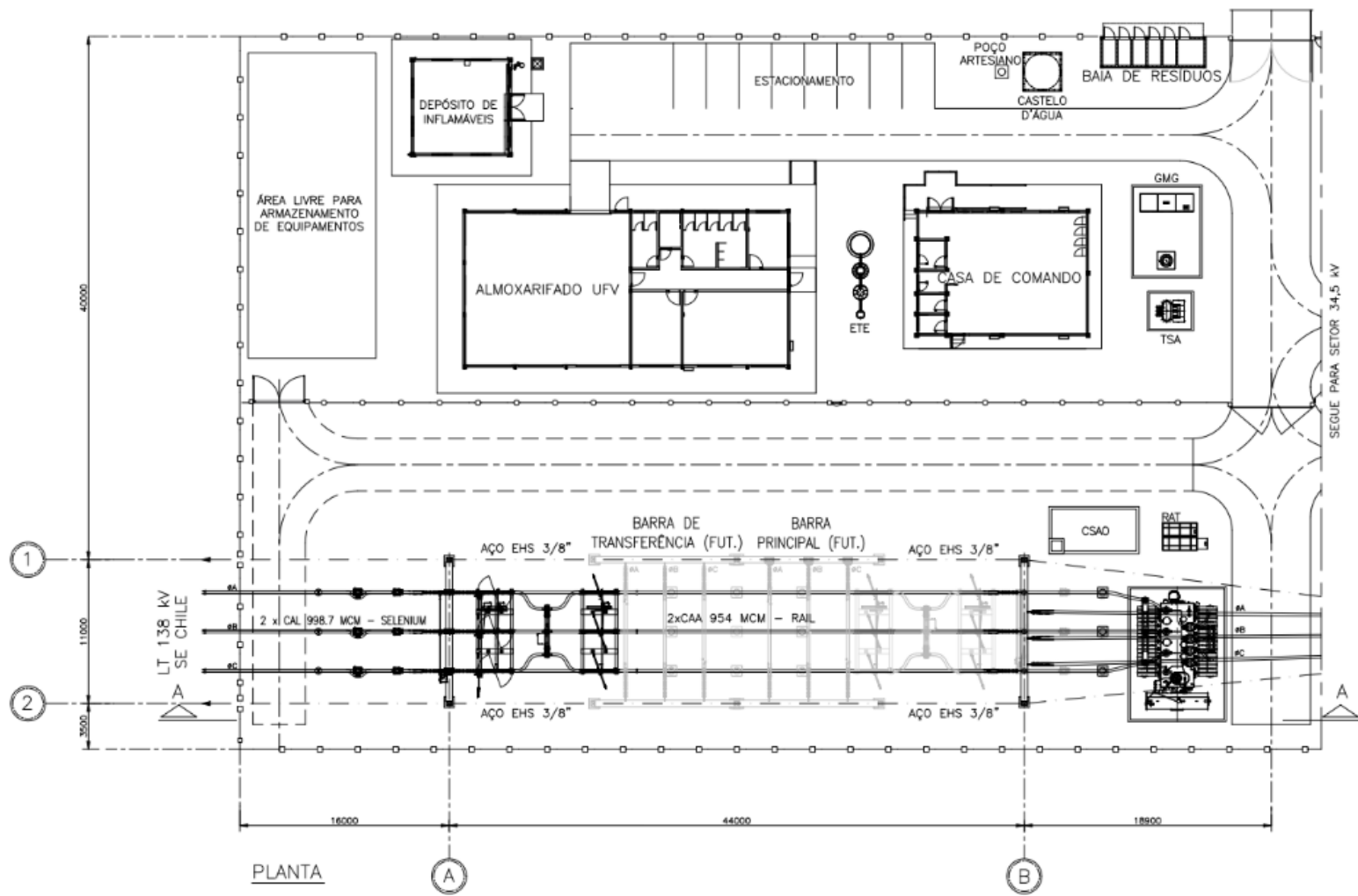
O dimensionamento do raio da esfera rolante será efetuado de acordo com as prescrições das normas NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012, além disso, ainda que por conta de seu nível de tensão, a subestação em questão não faça parte da Rede Básica, o dimensionamento da esfera rolante para o setor de 138 kV será realizado em conformidade com o Submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede do ONS, o qual deverá assegurar que não haja falha da blindagem atmosférica das instalações para correntes superiores a 2 kA [26]. Já para o setor de 34,5 kV será considerada uma corrente de 3 kA, conforme indicado na Tabela 14 e visto que segundo o item 6.3.6

da IEEE Std 998:2012, a probabilidade de ocorrer uma descarga atmosférica com corrente inferior a 3 kA é menor que 0,5%. Essa diferenciação de critérios se justifica pela maior criticidade do setor de 138 kV, diretamente conectado ao sistema de transmissão e sujeito aos requisitos do Operador Nacional do Sistema, enquanto o setor de 34,5 kV segue as recomendações gerais das normas para um nível de proteção elevado.

A proteção contra descargas laterais em ambos os setores será realizada através do método do ângulo de proteção, conforme NBR 5419:2015. No setor de 138 kV, o volume de proteção será obtido através da altura em que foram instalados os cabos para-raios, já no setor de 34,5 kV, será definido através da altura total da estrutura com a haste captora, sendo a altura da haste igual a 3 metros em todas as estruturas dos pátios da subestação.

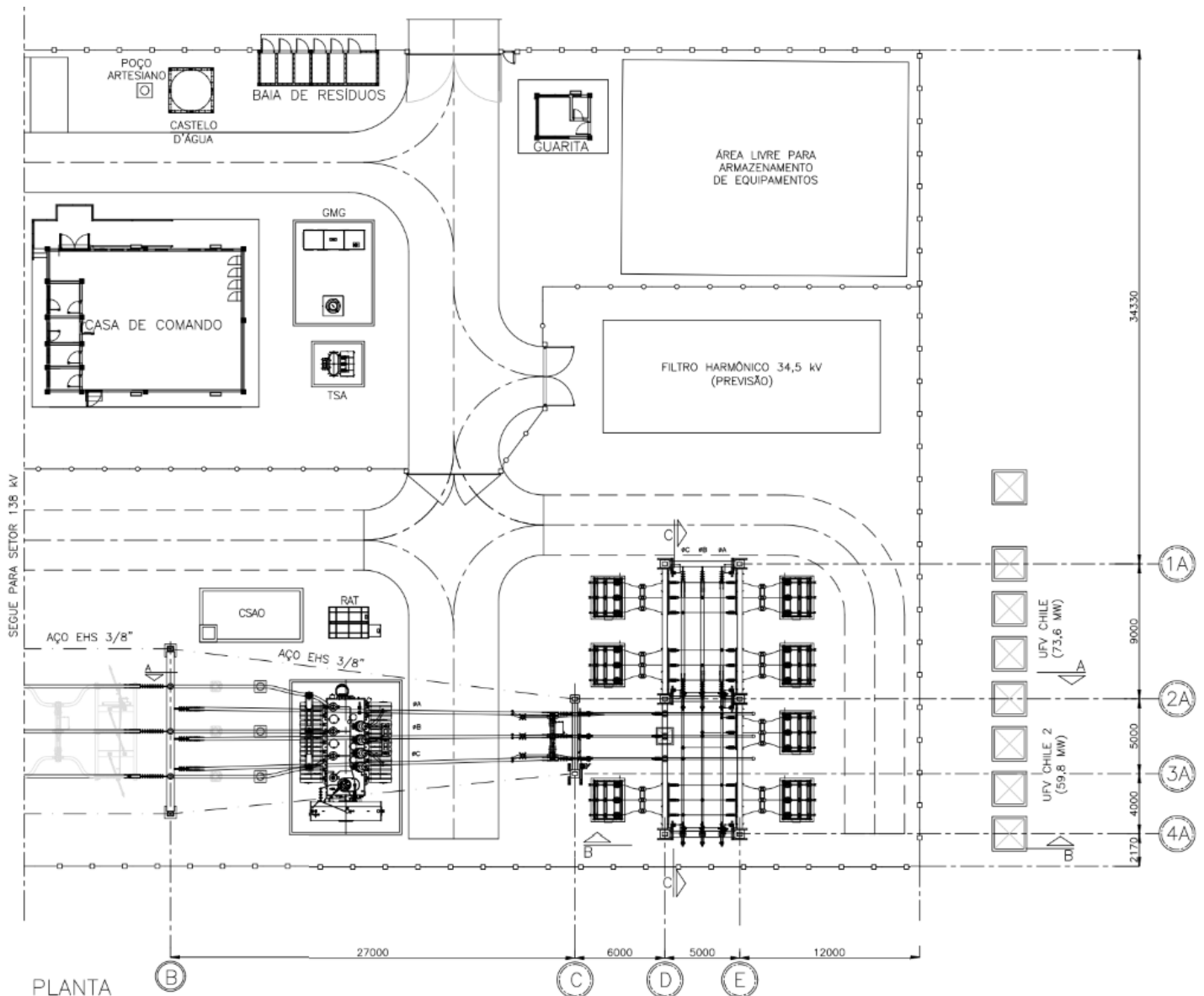
As plantas dos setores de 138 kV e 34,5 kV da subestação Bolívia são apresentadas na Figura 13 e na Figura 14.

Figura 13 - Planta do setor de 138 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 14 - Planta do setor de 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

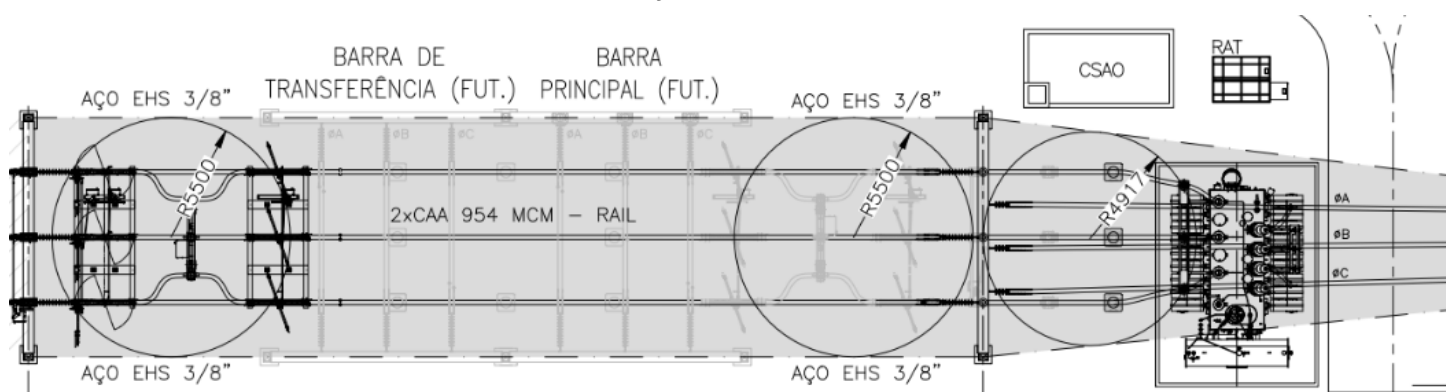
Seguindo a especificação técnica vigente da concessionária responsável pela subestação e em concordância com [27], serão adotados dois condutores de descida do tipo nu, instalados nas estruturas a cada 1,50 metro, com seção de 70 mm². A subestação terá como principal componente do subsistema de aterramento uma malha de terra construída sob toda a área energizada. Dessa forma, todos os componentes do SPDA serão interligados à malha de aterramento por meio de dois condutores de cobre nu, com seção de 70 mm², nos setores de 138 kV e 34,5 kV. Um dos condutores será conectado à malha de aterramento por meio de uma haste de aterramento

com 3 metros de comprimento, enquanto o outro condutor, será conectado através de solda exotérmica, sendo estas conexões realizadas em pontos distintos da quadrícula.

Após a instalação dos cabos para-raios e das hastes, é necessário delimitar o volume de proteção gerado por esses elementos, a fim de garantir que todos os equipamentos e condutores estejam posicionados dentro da zona de proteção da esfera.

A Figura 15 apresenta os resultados da análise feita do quanto cada esfera adentra nas regiões do pátio. Ademais, como não haverá modificações na disposição desses elementos, as abordagens utilizadas para o desenvolvimento do projeto SPDA utilizarão os valores dispostos na figura.

Figura 15 - Locação dos círculos na SE Bolívia.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4.1 Pátio do Setor 138 kV

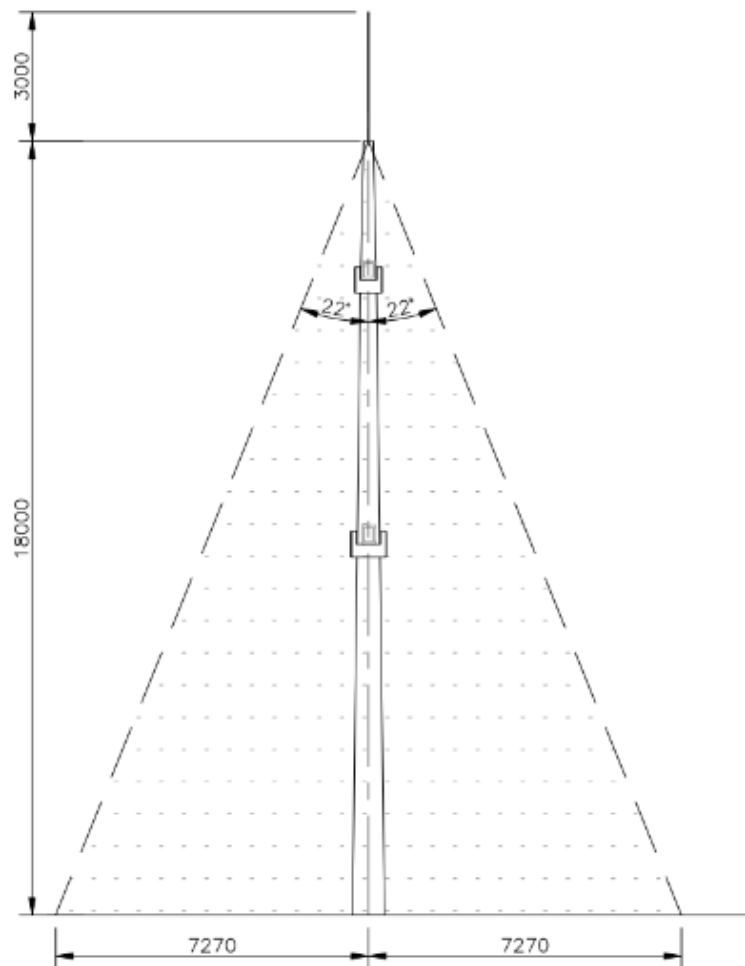
4.1.1 Método do Ângulo de Proteção

A metodologia aplicada para a definição do ângulo de proteção será baseada na NBR 5419-3:2015 em conformidade com as informações presentes na Figura 4. As estruturas presentes no pátio energizado do setor de 138 kV, possuem altura igual a 18 metros e possuem hastes captoras de 3 metros instaladas em seus topos.

Para a definição do ângulo de proteção, será considerada a altura de instalação dos cabos para-raios, localizados no topo da estrutura, ou seja, a 18 metros do nível

do terreno. Dessa forma, analisando a Figura 4, é possível determinar um ângulo de proteção com valor aproximado de 22° .

Figura 16 - Ângulo de proteção do setor 138 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4.1.2 Método da Esfera Rolante pela NBR 5419:2015

Como apresentado na Tabela 14, para o nível de proteção I, é indicado um raio máximo de 20 metros, em função da corrente de pico mínima de 3 kA. Entretanto, buscando um valor mais conservador e considerando o Submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede do ONS [26], o raio da esfera será determinado para uma corrente de pico mínima de 2 kA. Portanto, conforme a Equação (13), o raio da esfera rolante será de:

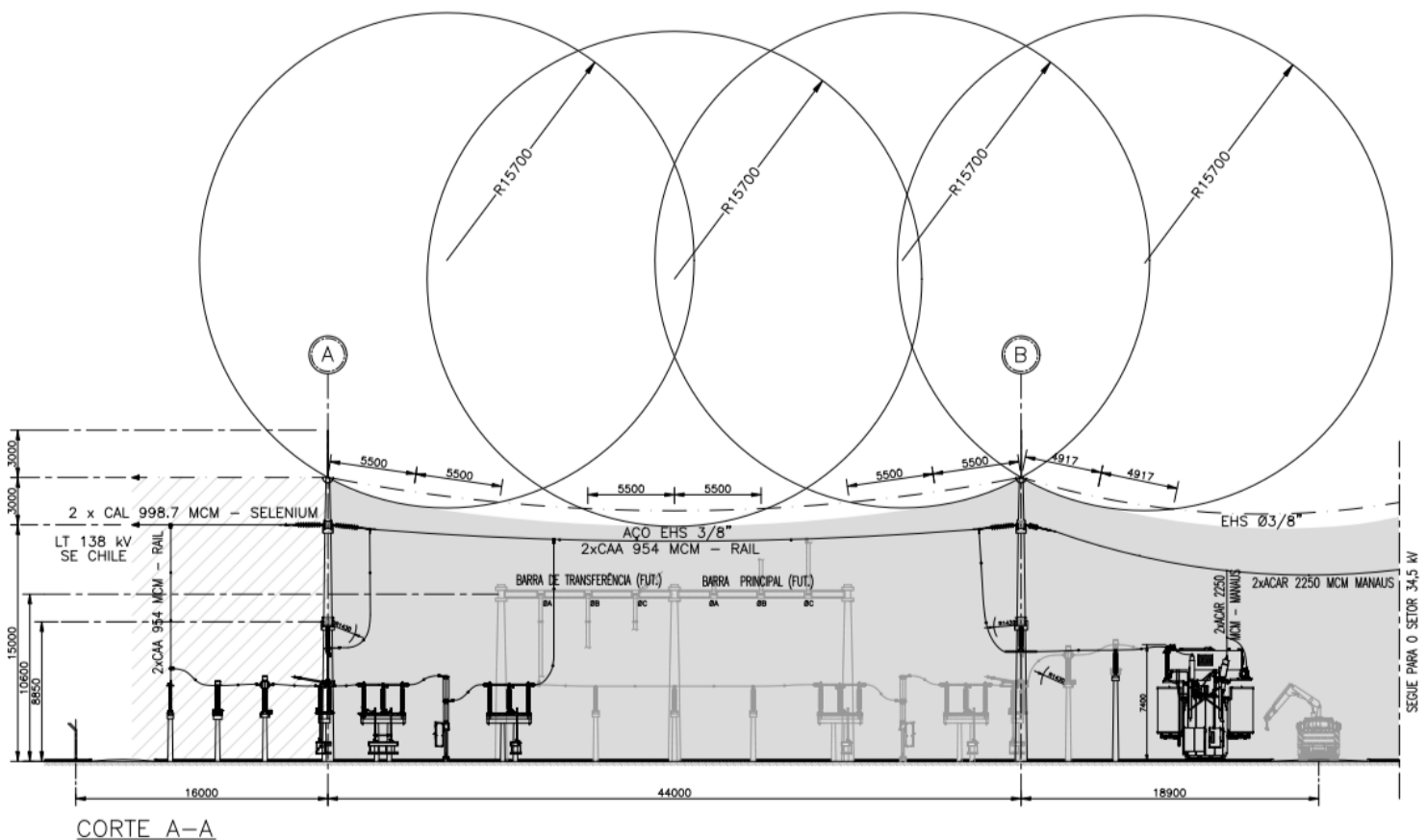
$$r = 10 * 2^{0,65} = 15,70 \text{ m} \quad (14)$$

Segundo a NBR 5419-3:2015, para o correto posicionamento do subsistema de captação, é preciso que nenhum ponto da estrutura a ser protegida entre em contato com a esfera fictícia que está rolando no topo e ao redor da estrutura.

Logo, para verificar se o posicionamento do subsistema de captação está adequado, será observado o comportamento da esfera por meio do corte A-A, adotando o valor do raio obtido através da Equação (14). Considerando esta premissa, é necessário rolar a esfera por todo o pátio e verificar o volume de proteção delimitado por ela.

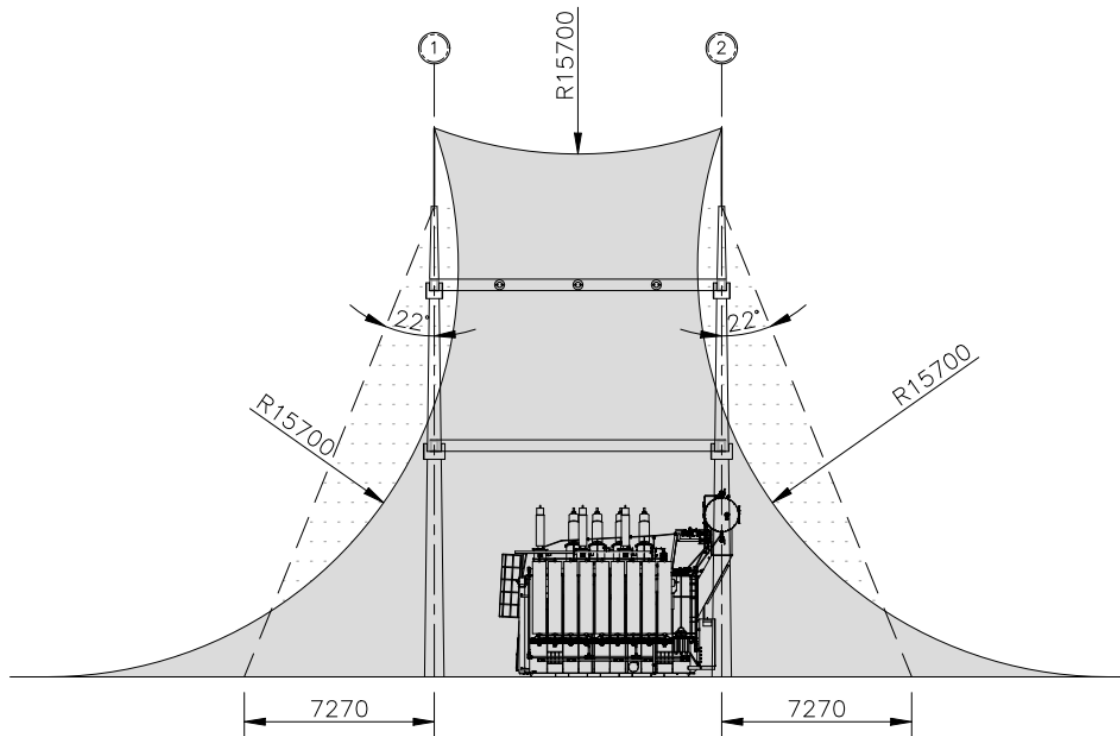
O volume de proteção obtido após rolar a esfera pelo pátio do setor de 138 kV, pode ser observado na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 - Volume de proteção do corte A-A pela NBR 5419 para o 138 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 18 – Volume de proteção do transformador no 138 kV pela NBR 5419.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4.1.3 Método da Esfera Rolante pela IEEE Std 998:2012

A metodologia utilizada para o cálculo do volume de proteção proporcionado por hastes e cabos para-raios, com base no método eletrogeométrico estabelecido pela norma IEEE Std 998:2012, fundamenta-se na aplicação de uma esfera com raio S , definido pela Equação (12). Através dessa equação, é calculado o raio da esfera que dará origem à superfície sob a qual estará o volume de proteção. Na Tabela 16 encontram-se valores obtidos dos raios da esfera rolante para hastes e cabos guarda. Novamente será utilizada uma corrente de pico mínima igual a 2 kA, conforme valor estabelecido como requisito pelo ONS.

Tabela 16 - Raio da esfera pela IEEE Std 998 para o 138 kV.

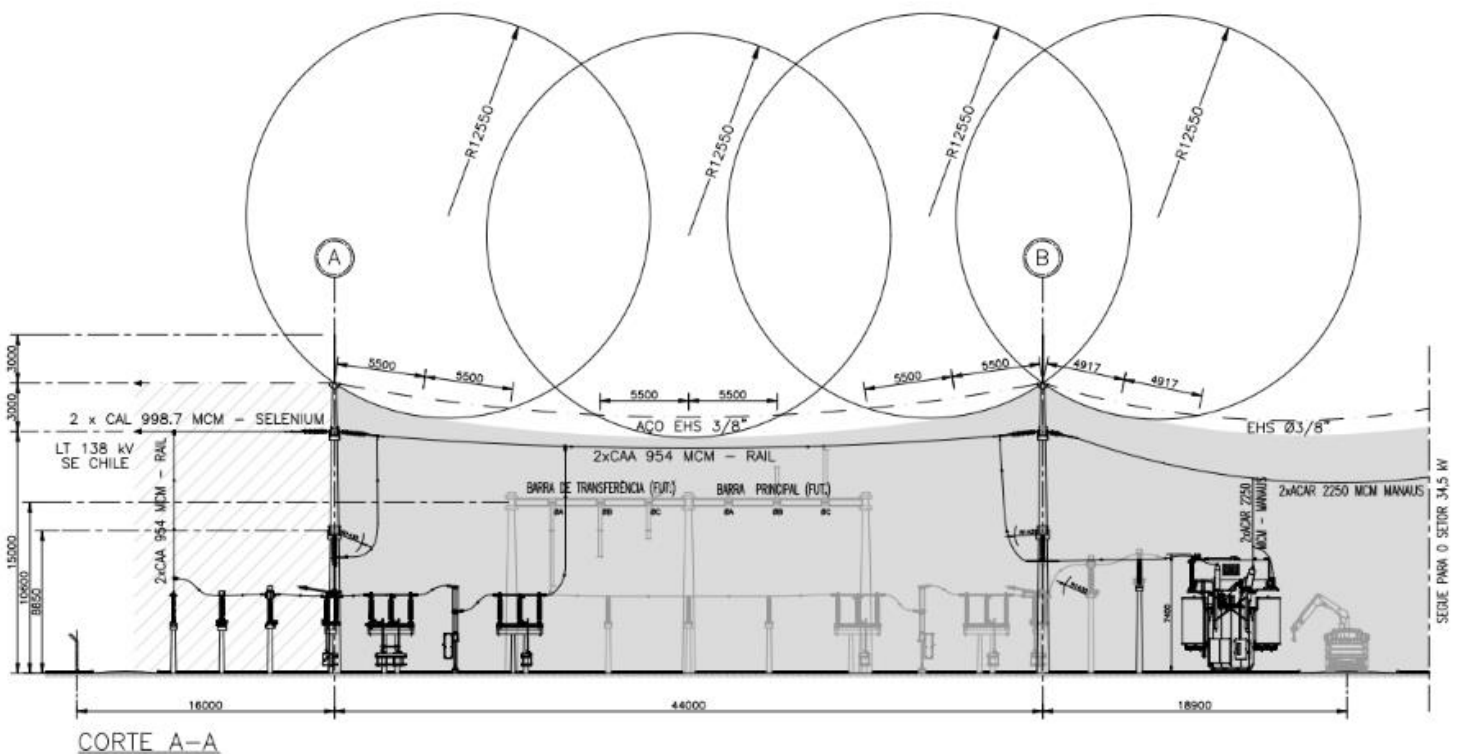
	Coefficiente k	Raio (m)
Cabo guarda	1,0	12,55
Haste	1,2	15,06

Fonte: Adaptado de [25].

Diante dos valores obtidos, será utilizada a esfera com menor raio para a verificação do volume de proteção, ou seja, será utilizado o coeficiente relativo ao cabo guarda, visto que este valor corresponde à situação mais conservadora.

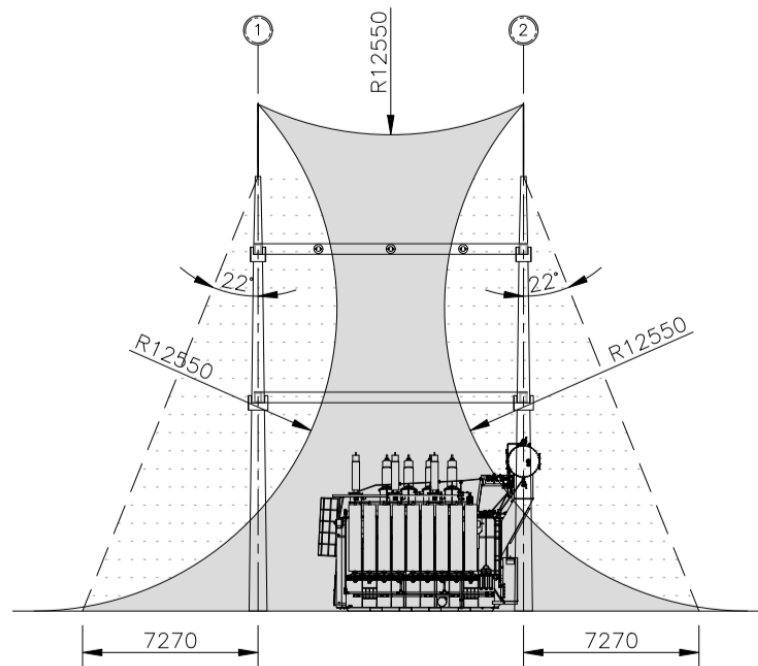
O método para determinação do volume de proteção é semelhante ao aplicado anteriormente, onde deve-se rolar a esfera pelas hastes e cabos para-raios da subestação, de modo que todas as estruturas fiquem contidas no volume de proteção formado abaixo da esfera. O volume de proteção obtido através da aplicação da IEEE Std 998:2012 pode ser observado na Figura 19 e na Figura 20.

Figura 19 - Volume de proteção do corte A-A pela IEEE Std 998 para o 138 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

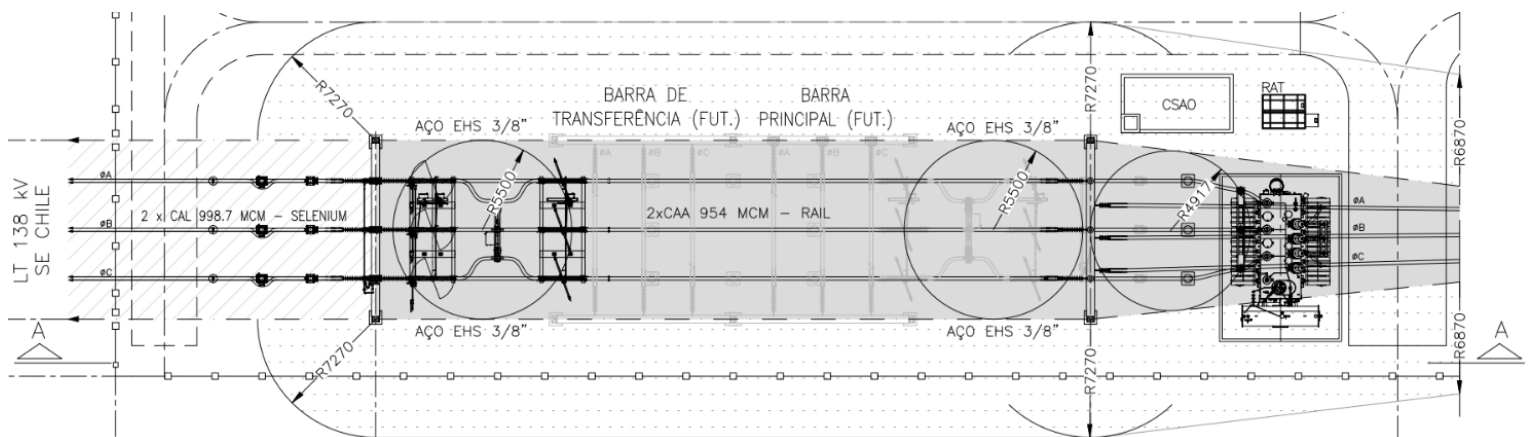
Figura 20 - Volume de proteção do transformador no 138 kV pela IEEE Std 998.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Dessa forma, a representação da proteção contra descargas atmosféricas no pátio do setor de 138 kV a partir da aplicação conjunta dos métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção, pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 - Proteção contra descargas atmosféricas no setor 138 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

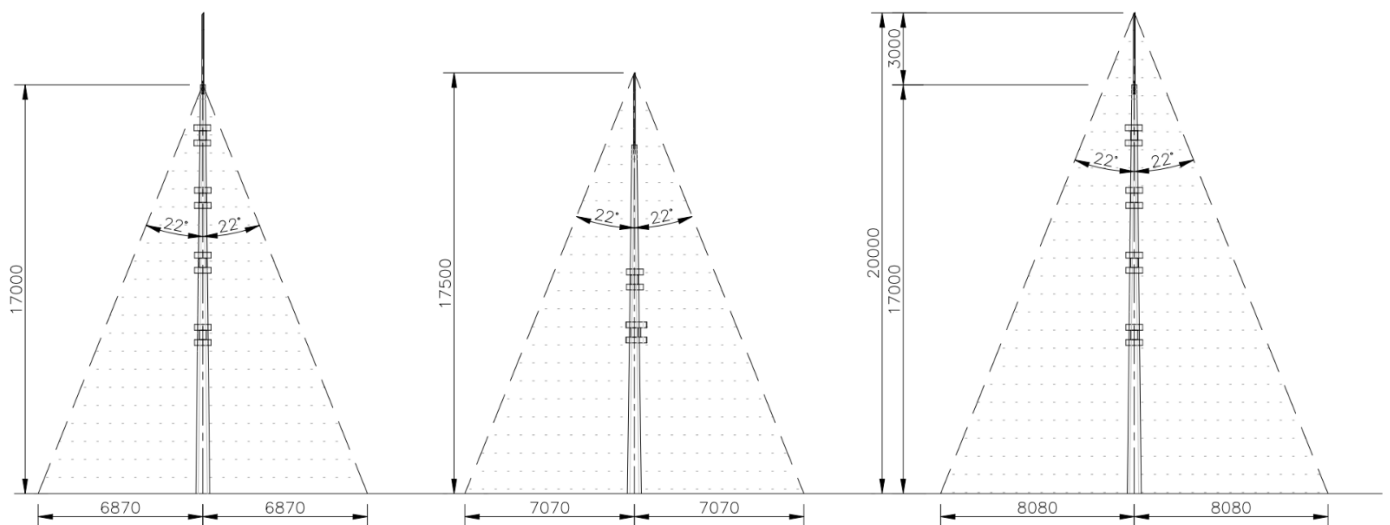
4.2 Pátio do Setor 34,5 kV

4.2.1 Método do Ângulo de Proteção

Para a definição do ângulo de proteção, será considerada a altura total das estruturas com as hastes instaladas em seus topos, exceto pela estrutura que recebe os cabos para-raios do setor de alta tensão, nessa estrutura, será considerada a altura do cabo guarda instalado. Dessa forma, analisando a Figura 4, é possível determinar novamente, um ângulo de proteção com valor aproximado de 22° .

O setor de 34,5 kV possui estruturas com diferentes alturas, sendo assim, o raio do cone de proteção referente a cada estrutura pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 - Raios dos cones de proteção do setor 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4.2.2 Método da Esfera Rolante pela NBR 5419:2015

A metodologia aplicada para o setor de média tensão será semelhante à utilizada no setor de alta tensão, sendo a adoção da corrente de pico mínima igual a 3 kA a principal diferença entre os setores. Pelo fato do nível de tensão deste setor ser con-

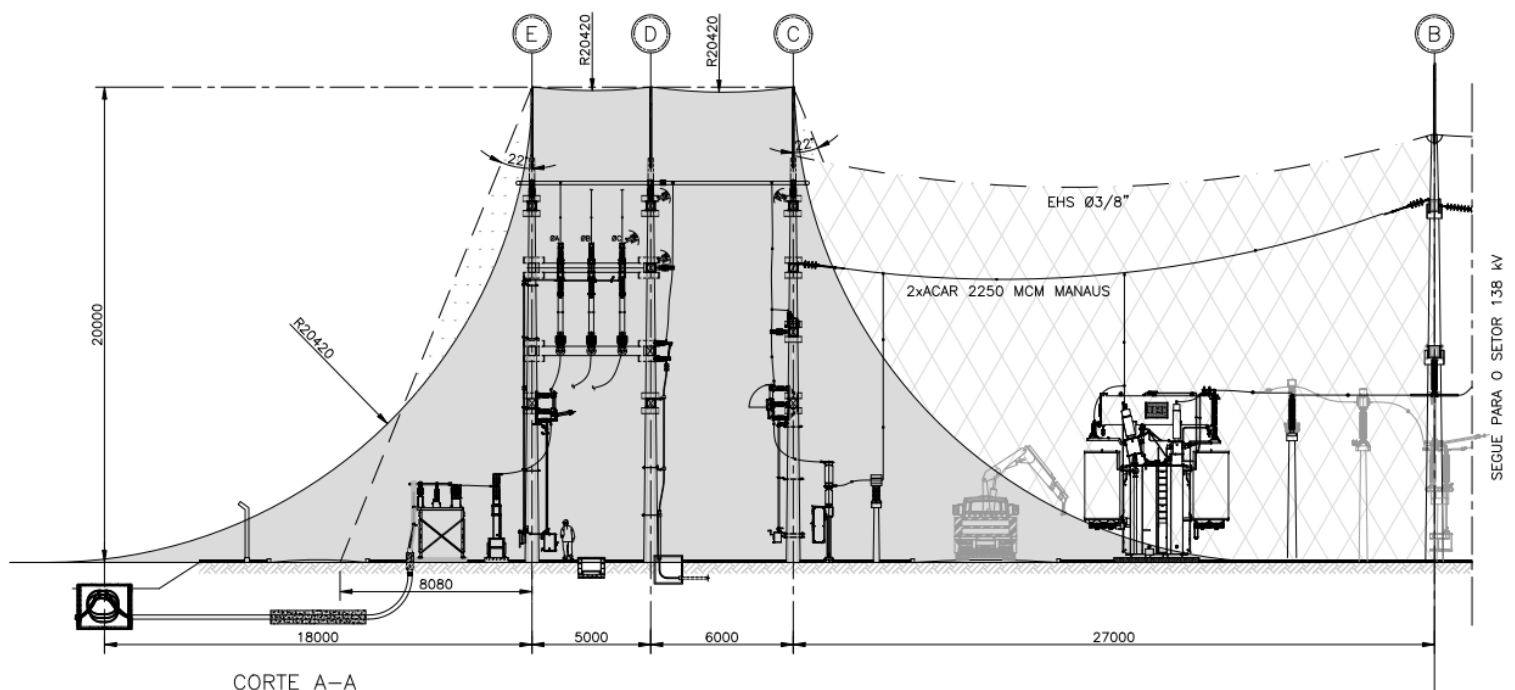
sideravelmente menor se comparado ao anterior e considerando o embasamento técnico fornecido por ambas as normas, não se faz necessária a adoção da corrente de 2kA.

Para o cálculo do raio da esfera rolante, será utilizada a Equação (13), obtendo, assim, o seguinte valor:

$$r = 10 * 3^{0,65} = 20,42 \text{ m} \quad (15)$$

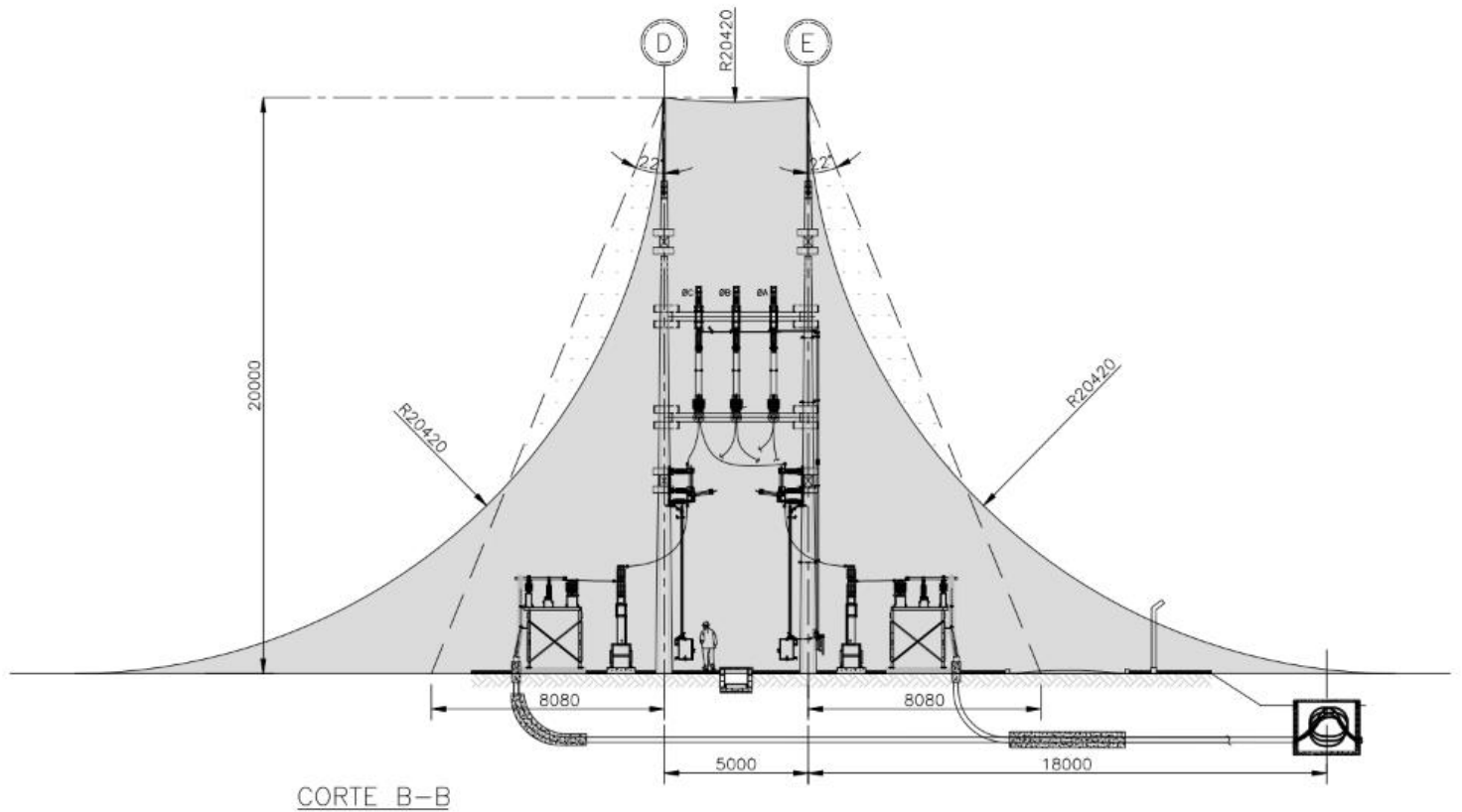
Assim como no setor de 138 kV, será necessário rolar a esfera pelo pátio de modo a garantir que as estruturas, condutores e equipamentos estejam devidamente contidos no volume protegido. Além disso, será utilizado o método do ângulo de proteção como garantia de blindagem para trechos de condutores ou equipamentos que não estejam inteiramente contidos no volume proporcionado pela esfera, e contra possíveis descargas laterais. Portanto, rolando a esfera pelas hastes instaladas no topo das estruturas e aplicando a zona de segurança fornecida pelo ângulo de proteção, obtém-se o volume protegido, conforme apresentado na Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

Figura 23 - Volume de proteção do corte A-A pela NBR 5419 para o 34,5 kV.



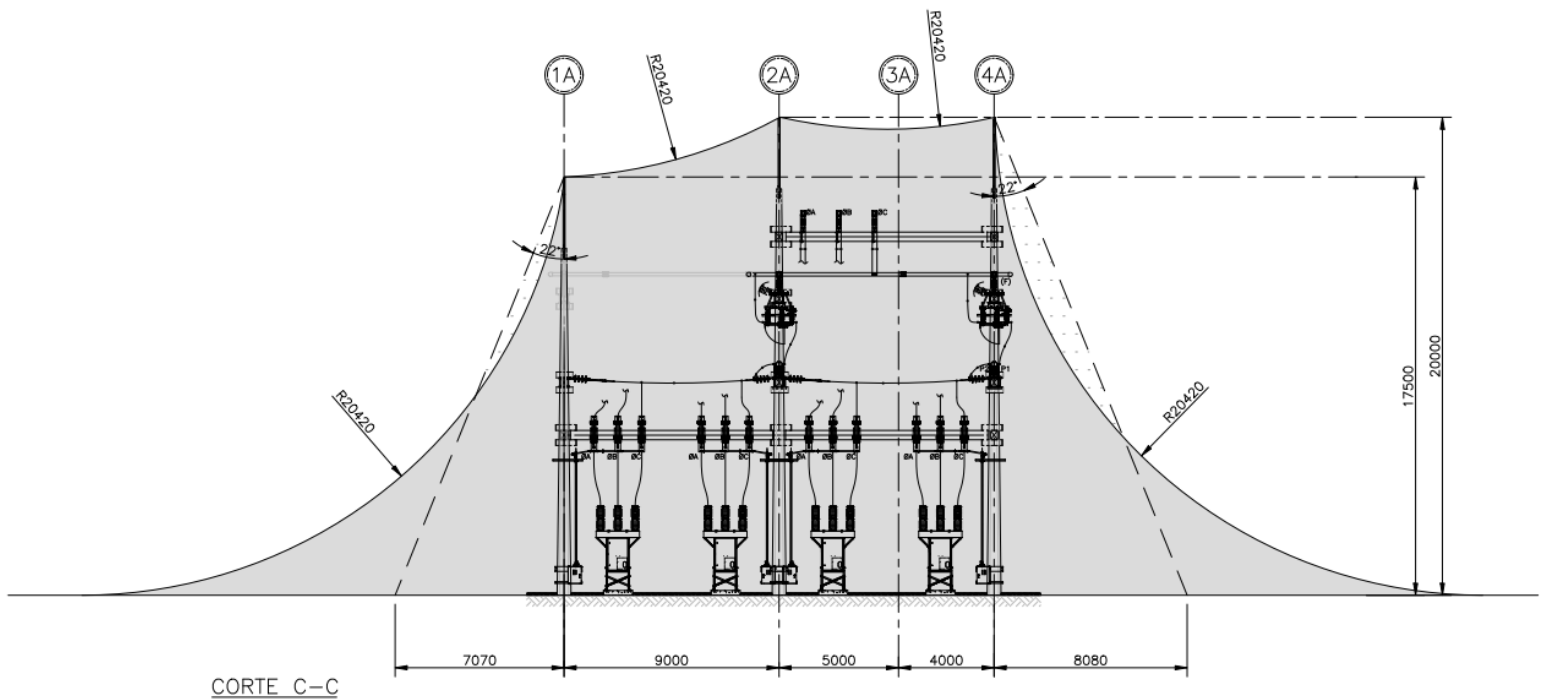
Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 24 - Volume de proteção do corte B-B pela NBR 5419 para o 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 25 - Volume de proteção do corte C-C pela NBR 5419 para o 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4.2.3 Método da Esfera Rolante pela IEEE Std 998:2012

Analogamente, será adotada uma corrente de pico mínima igual a 3 kA e será aplicada a mesma metodologia do item anterior. Contudo, por não serem utilizados cabos guarda no setor da média tensão, será considerado o coeficiente relativo às hastes.

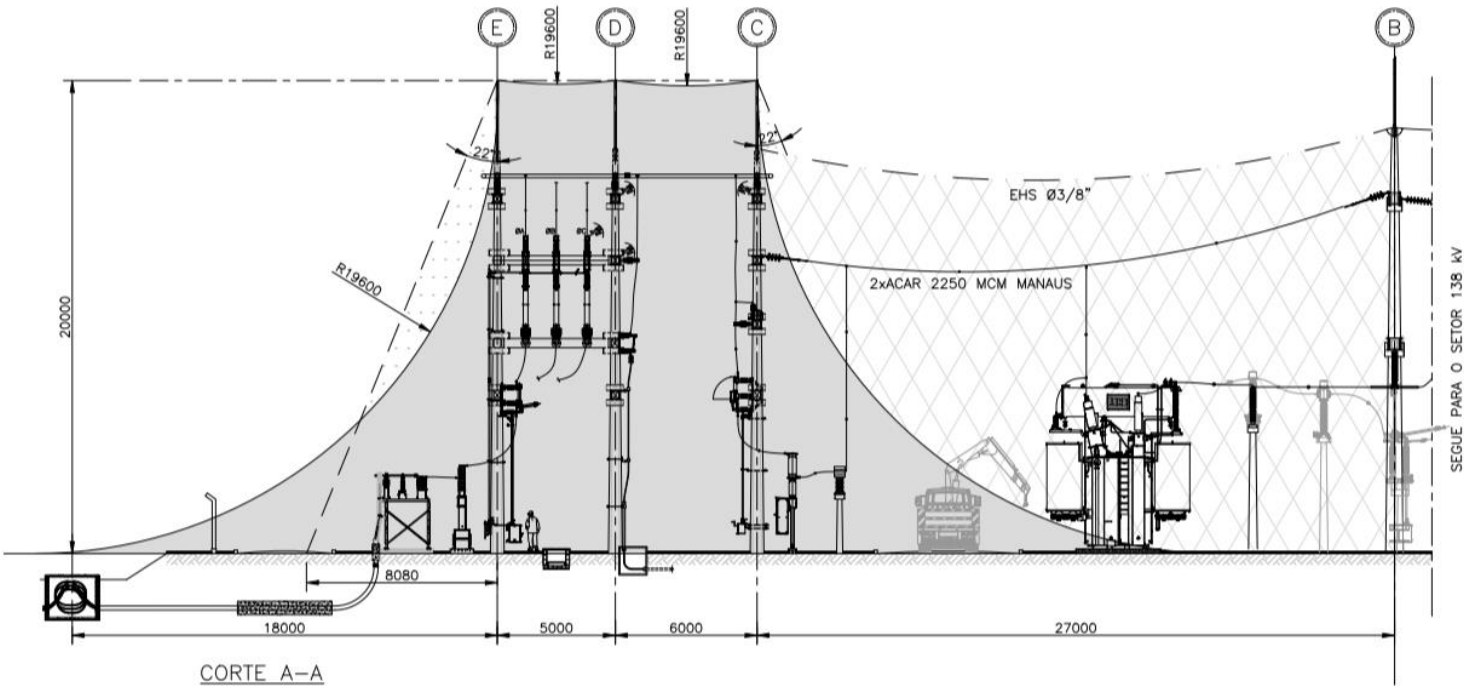
Tabela 17 - Raio da esfera pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.

	Coeficiente k	Raio (m)
Cabo guarda	1,0	16,34
Haste	1,2	19,60

Fonte: Adaptado de [25].

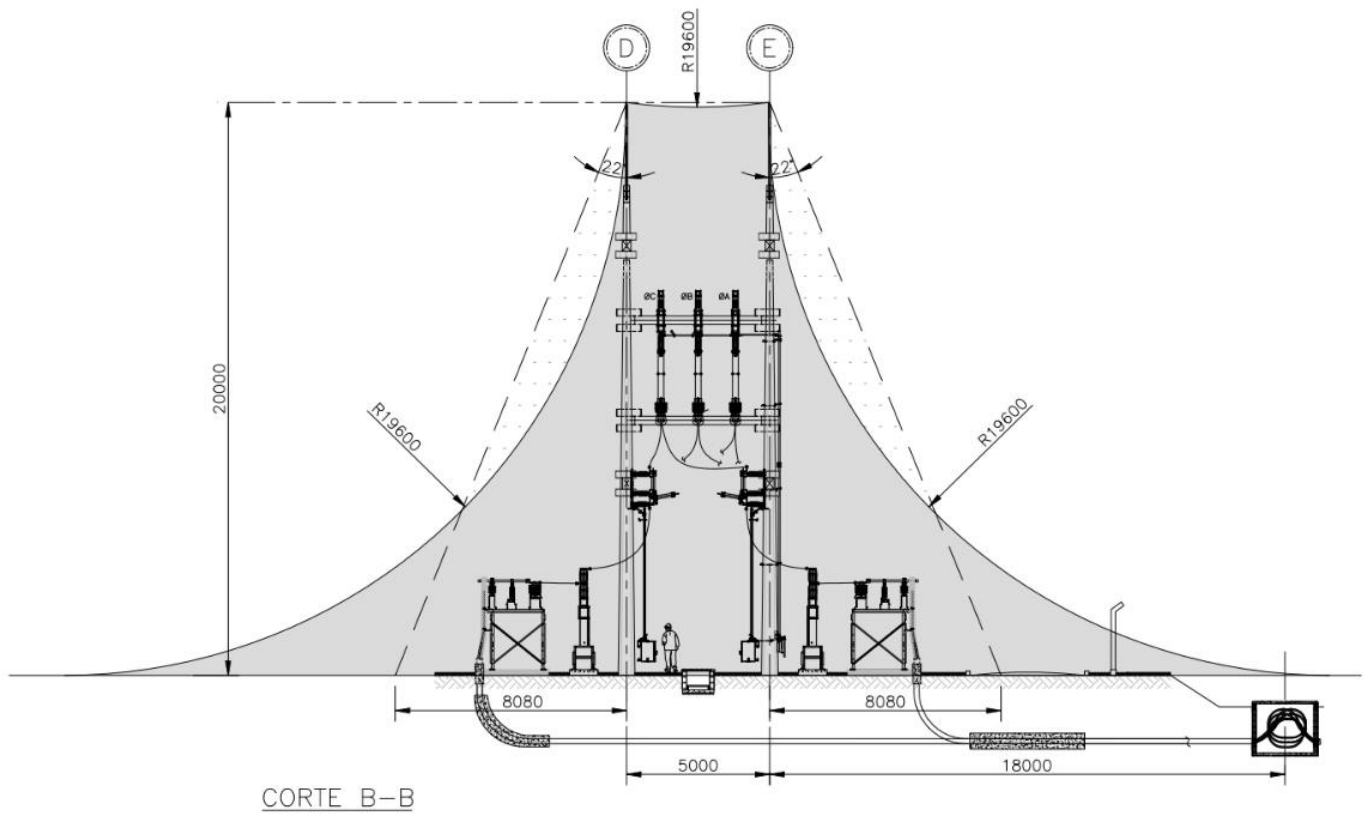
O volume de proteção obtido através da esfera rolante e do ângulo de proteção, pode ser observado nas figuras Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

Figura 26 - Volume de proteção do corte A-A pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.



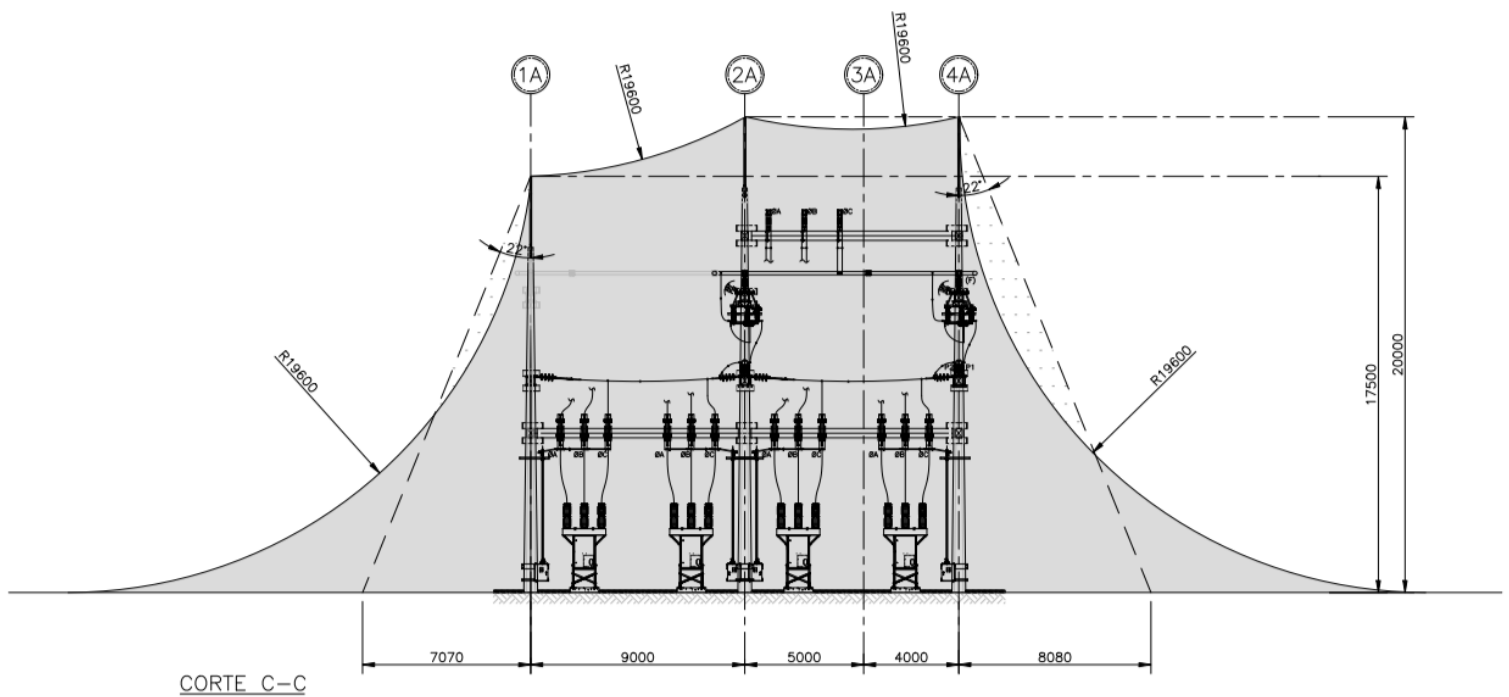
Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 27 - Volume de proteção do corte B-B pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

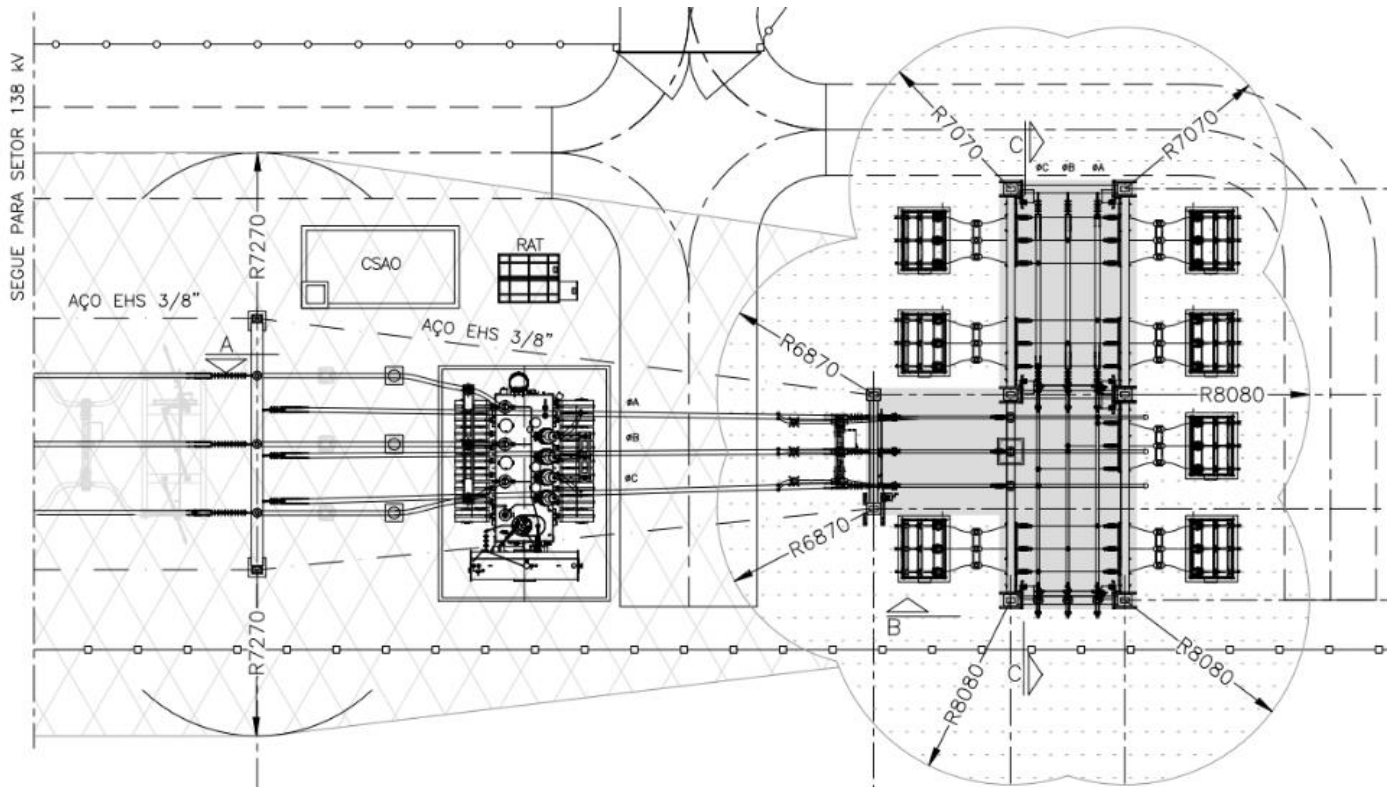
Figura 28 - Volume de proteção do corte C-C pela IEEE Std 998 para o 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

A partir dos dados obtidos, a representação da proteção contra descargas atmosféricas no pátio do setor de 34,5 kV a partir da aplicação conjunta dos métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção, pode ser observada na Figura 29.

Figura 29 - Proteção contra descargas atmosféricas no setor 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

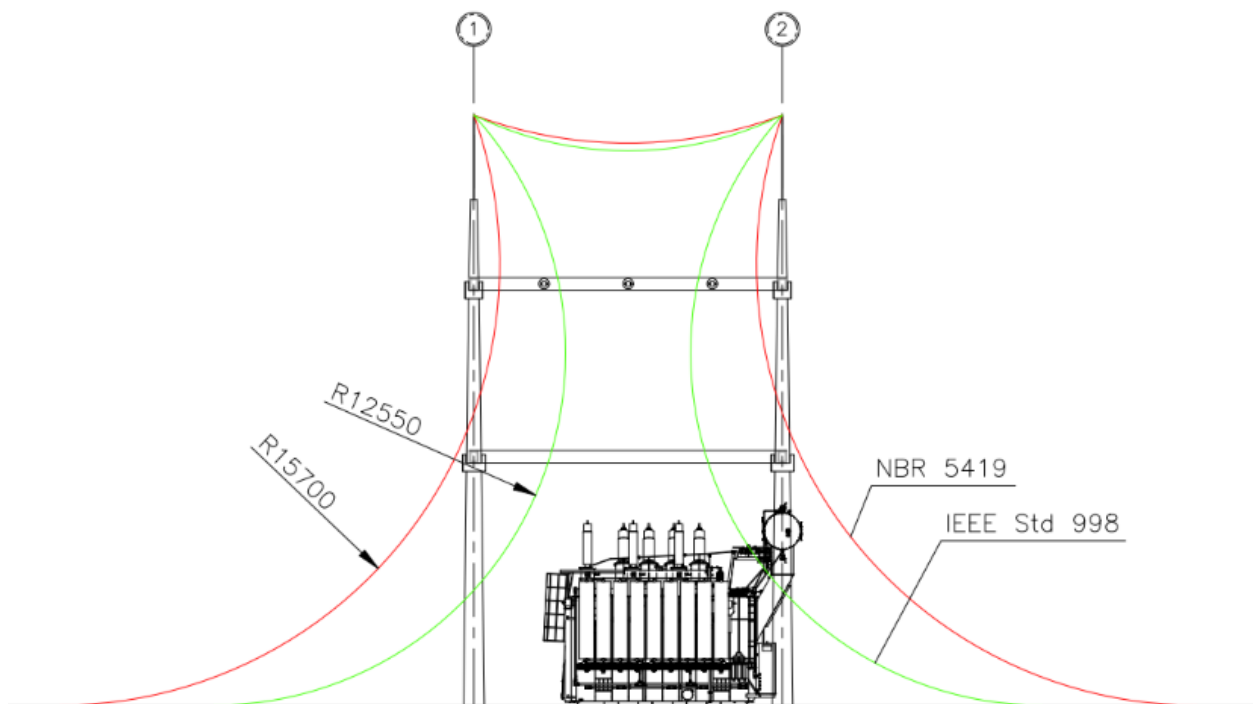
4.3 Análise Comparativa das Metodologias Empregadas

Conforme evidenciado na Figura 30 e na Figura 31, que apresentam o volume de proteção resultante da aplicação das metodologias utilizadas (NBR 5419 e IEEE Std 998), para o setor do 34,5 kV, considerando uma corrente de pico mínima no valor de 3 kA, ambas as abordagens de cálculo do raio da esfera rolante revelam-se adequadas e eficazes para assegurar a proteção dos condutores e equipamentos do pátio, de forma que a aplicação do método do ângulo de proteção praticamente não se faz necessária.

No entanto, para o setor de 138 kV, a adoção da corrente de pico mínima de 2 kA levou a resultados distintos entre as metodologias. O cálculo pela NBR 5419 gerou

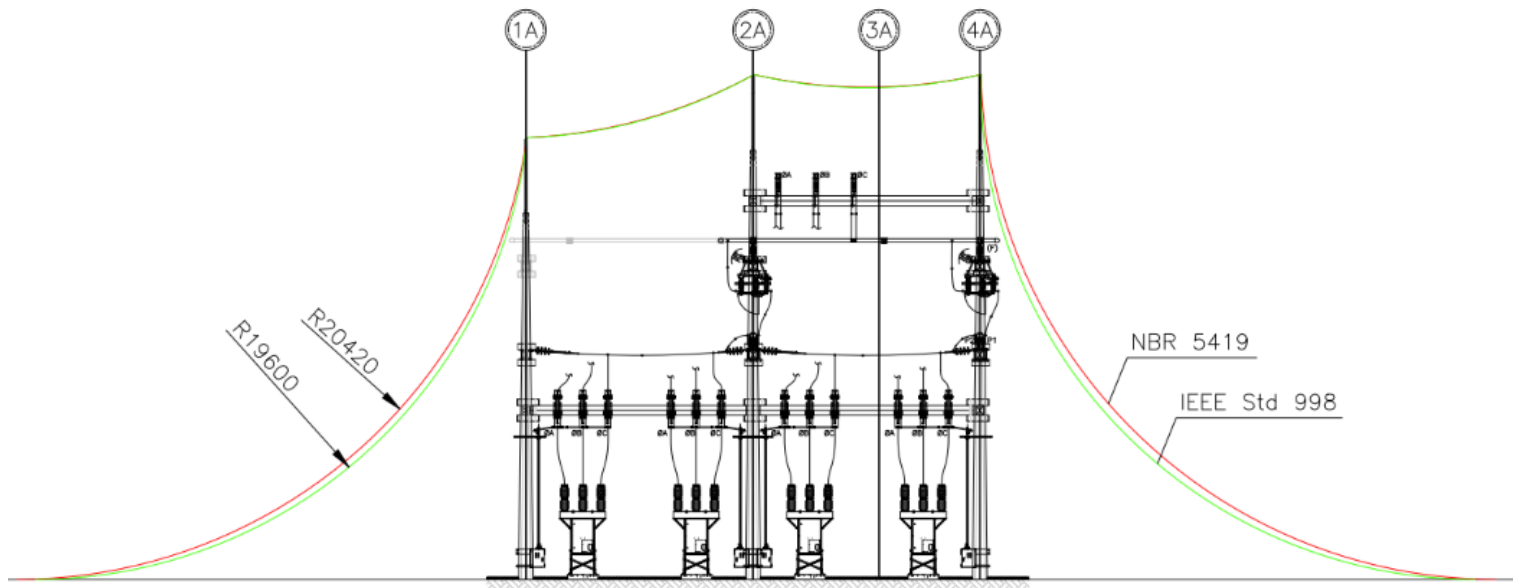
um volume de proteção mais abrangente (raio de 15,70 m), que se mostrou suficiente para a blindagem da maioria dos equipamentos, exigindo uma aplicação apenas complementar do método do ângulo de proteção. Em contrapartida, a abordagem da IEEE Std 998 resultou num volume mais restrito (raio de 12,55 m), tornando a aplicação do método do ângulo essencial para cobrir as zonas de sombra e garantir a proteção completa. Essa análise evidencia, portanto, que as premissas de cada norma impactam diretamente o volume de proteção e a complexidade do projeto final. Embora ambas busquem o mesmo objetivo, para a prática da engenharia no Brasil, a ABNT NBR 5419 é a referência mandatória, e sua aplicação deve sempre visar garantir que os riscos se mantenham abaixo dos limites toleráveis.

Figura 30 – Volume de proteção das metodologias empregadas no 138 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 31 - Volume de proteção das metodologias empregadas no 34,5 kV.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

4.4 Edificações Contidas na Subestação

De acordo com a NBR 5419:2015, para o Nível de Proteção I, é adotado um raio máximo de 20 metros para a esfera rolante, considerando uma corrente de pico mínima de 3 kA. No entanto, em atendimento ao requisito estabelecido no Submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede, o dimensionamento deve considerar uma corrente de pico mínima de 2 kA [26]. Assim, conforme a Equação (13), o raio da esfera rolante passa a ser de 15,7 metros, valor que será utilizado para o dimensionamento do sub-sistema de captação do SPDA das edificações contidas na subestação.

Tendo como objeto de estudo a edificação “Casa de Comando” da Subestação Bolívia, serão adotados os critérios estabelecidos na NBR 5419-2:2015 para a realização do gerenciamento de risco. O objetivo desse processo é avaliar a necessidade de implementação de medidas de proteção, analisando os riscos totais (R_1 , R_2 e R_3) associados a cada tipo de perda, e verificar se esses valores estão abaixo dos limites toleráveis definidos pela norma.

A Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20 e a Tabela 21 apresentam as considerações gerais e os valores dos componentes de risco determinados para o objeto de estudo.

A coluna “Referência” indica as tabelas correspondentes localizadas nos anexos da NBR 5419-2:2015.

Tabela 18 – Características da estrutura e do meio ambiente.

Parâmetros de Entrada	Considerações	Símbolo	Valor	Referência
Densidade de descargas atmosféricas para a terra (1/km ² /ano)	Mapa de densidade de descargas atmosféricas - Brasil	N_G	1,00	ABNT – NBR 5419-2
Dimensões da estrutura (m)	Estrutura	$L; W; H$	13,20; 11,39; 7,50.	Arquitetura
Fator de localização da estrutura	Estrutura cercada por objetos mais altos	C_D	0,25	Tabela A.1
SPDA	Classe de SPDA I	P_B	0,02	Tabela B.2
Ligação equipotencial	Classe de SPDA I	P_{EB}	0,01	Tabela B.7

Fonte: Feito pelo autor (2025).

Tabela 19 – Características da linha de energia.

Parâmetros de Entrada	Considerações	Símbolo	Valor	Referência
Comprimento (m)	Comprimento da linha de energia	L_L	1000	
Fator de instalação	Aérea	C_I	1	Tabela A.2
Fator tipo de linha	Linha de energia AT	C_T	0,20	Tabela A.3
Fator ambiental	Rural	C_E	1	Tabela A.4
Blindagem da linha (Ω/km)	Não blindada	R_S	-	Tabela B.8
Blindagem, aterramento, isolamento	Nenhuma	C_{LD}	1	Tabela B.4
		C_{LI}	1	

Parâmetros de Entrada	Considerações	Símbolo	Valor	Referência
Fator de localização da estrutura adjacente	Estrutura cercada por objetos mais altos	C_{DJ}	0,25	Tabela A.1
Tensão suportável dos sistemas internos (kV)	Parâmetros em kV	U_W	6	Tabela B.8
	Parâmetros resultantes	K_{S4}	0,16667	1/ U_W
		P_{LD}	1	Tabela B.8
		P_{LI}	0,1	Tabela B.9

Fonte: Feito pelo autor (2025).

Tabela 20 – Características da linha de sinal.

Parâmetros de Entrada	Considerações	Símbolo	Valor	Referência
Comprimento (m)	Comprimento da linha de sinal	L_L	1000	
Fator de instalação	Aérea	C_i	1	Tabela A.2
Fator tipo de linha	Linha de sinal	C_T	1	Tabela A.3
Fator ambiental	Rural	C_E	1	Tabela A.4
Blindagem da linha (Ω/km)	Não blindada	R_S	-	Tabela B.8
Blindagem, aterramento, isolamento	Nenhuma	C_{LD}	1	Tabela B.4
Fator de localização da estrutura adjacente	Estrutura cercada por objetos mais altos	C_{DJ}	0,25	Tabela A.1
Tensão suportável dos sistemas internos (kV)	Parâmetros em kV	U_W	6	Tabela B.8
	Parâmetros resultantes	K_{S4}	0,16667	1/ U_W
		P_{LD}	1	Tabela B.8
		P_{LI}	0,04	Tabela B.9

Fonte: Feito pelo autor (2025).

Tabela 21 – Fatores relevantes para a zona.

Parâmetros de Entrada		Considerações	Símbolo	Valor	Referência
Tipo de piso		Cerâmica	rt	0,001	Tabela C.3
Proteção contra choque (descarga atmosférica na estrutura)		Equipotencialização efetiva do solo	P_{TA}	0,01	Tabela B.1
Proteção contra choque (descarga atmosférica na linha)		Isolação elétrica	P_{TU}	0,01	Tabela B.6
Risco de incêndio		Normal	rf	0,01	Tabela C.5
Proteção contra incêndio		Instalação de extintores	rp	0,5	Tabela C.4
Energia	Fiação interna	Não blindada (sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços)	K_{S3}	1	Tabela B.5
	DPS coordenados	NP I	P_{SPD}	0,01	Tabela B.3
Telecom	Fiação interna	Não blindada (sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços)	K_{S3}	0,01	Tabela B.5
	DPS coordenados	NP I	P_{SPD}	0,01	Tabela B.3
L1: perda de vida humana		Perigo especial: nenhum	hz	1	Tabela C.6
		Todos os tipos	L_T	0,01	Tabela C.2
		Outros	L_F	0,01	
L1: perda ao serviço público		Gás, água, fornecimento de energia	L_F	0,1	Tabela C.8
			L_O	0,01	

Fonte: Feito pelo autor (2025).

Com base nos dados apresentados e em conformidade com os valores e critérios estabelecidos pela NBR 5419-2:2015, foram calculados os riscos de perdas, considerando os parâmetros da instalação do SPDA, Classe I. Os resultados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Comparação dos riscos obtidos.

RISCO	TOLERÁVEL	RT	RX
Perda de vida humana	$R_1 < R_T$	10^{-5}	5,27E-09
Perda de serviço ao público	$R_2 < R_T$	10^{-3}	3,82E-05

Fonte: Feito pelo autor (2025).

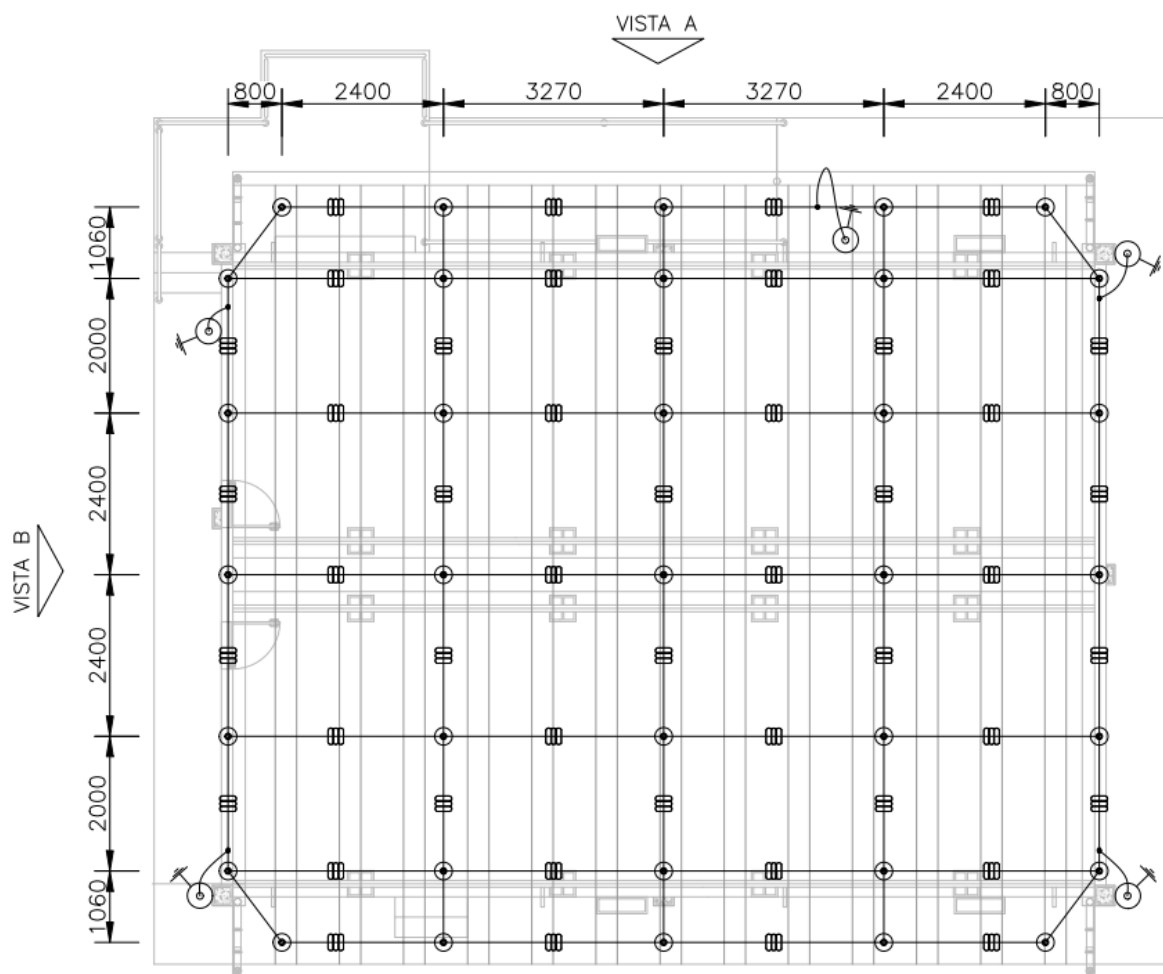
Conforme apresentado na Tabela 22, os valores de risco calculados estão abaixo dos limites de risco tolerável estabelecidos. Dessa forma, verifica-se que a adoção do SPDA Classe I é adequada para atender aos níveis de tolerância definidos pela norma. Os riscos R_3 e R_4 não foram considerados, uma vez que a estrutura não possui valor cultural relevante, e a não implementação do SPDA não proporciona vantagem econômica diante do alto valor econômico do objeto de estudo.

4.4.1 Subsistema de Captação

De acordo com a NBR 5419, os subsistemas de captação podem ser constituídos por qualquer combinação entre hastes, condutores suspensos e condutores em malha.

Na edificação “Casa de Comando”, serão utilizados condutores de cobre nu de 35 mm², dispostos em forma de malha na cobertura da estrutura, além de hastes de 300 mm, posicionadas nos pontos onde são definidos os centros das esferas para determinação do volume protegido. Como o SPDA da edificação é classificado como Classe I, o afastamento máximo permitido entre os condutores da malha é de cinco metros. A Figura 32 apresenta a representação do subsistema de captação instalado na cobertura da edificação.

Figura 32 – Sistema de captação da casa de comando.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

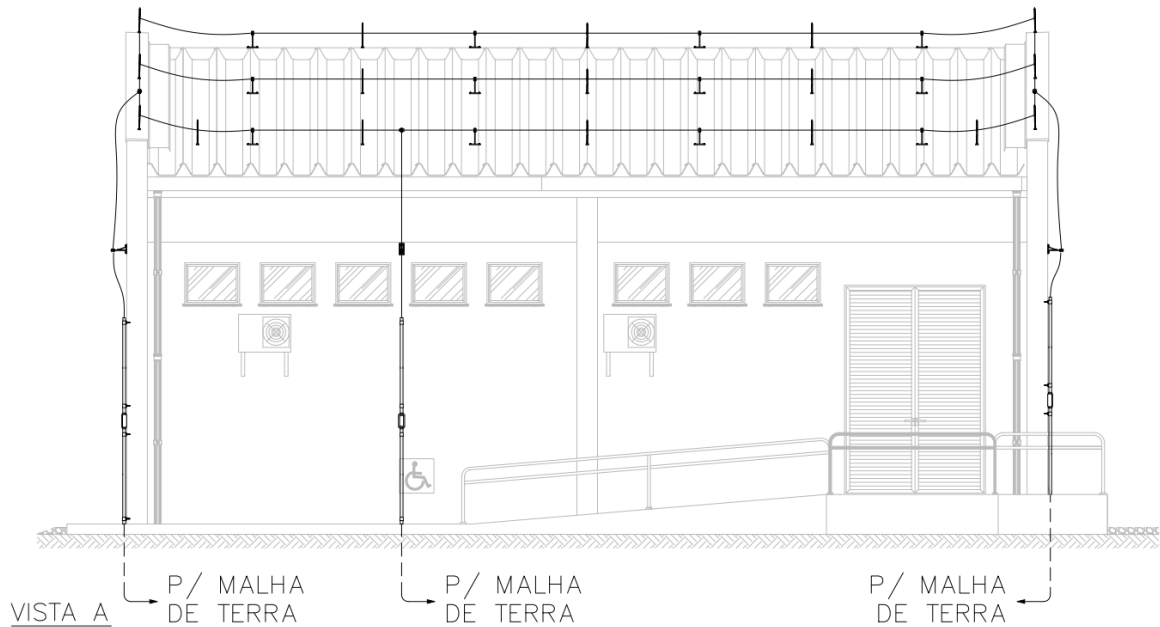
4.4.2 Subsistema de Descida

De acordo com a NBR 5419, os condutores de descida devem ser dispostos de forma a minimizar a probabilidade de danos causados pela corrente de descarga atmosférica. Para o projeto do SPDA, serão utilizados condutores de cobre nu de 35 mm², conectados à malha superior por meio de conectores apropriados.

Conforme a Tabela 11, foram previstas cinco descidas, cada uma protegida por eletroduto de PVC rígido com 3 metros de comprimento, até a entrada no solo. No centro do eletroduto, deve ser instalada uma caixa de inspeção contendo um conector de medição, responsável por receber o condutor de cobre nu de 35 mm² proveniente da malha superior e interligá-lo ao condutor de 50 mm² que segue em direção à malha

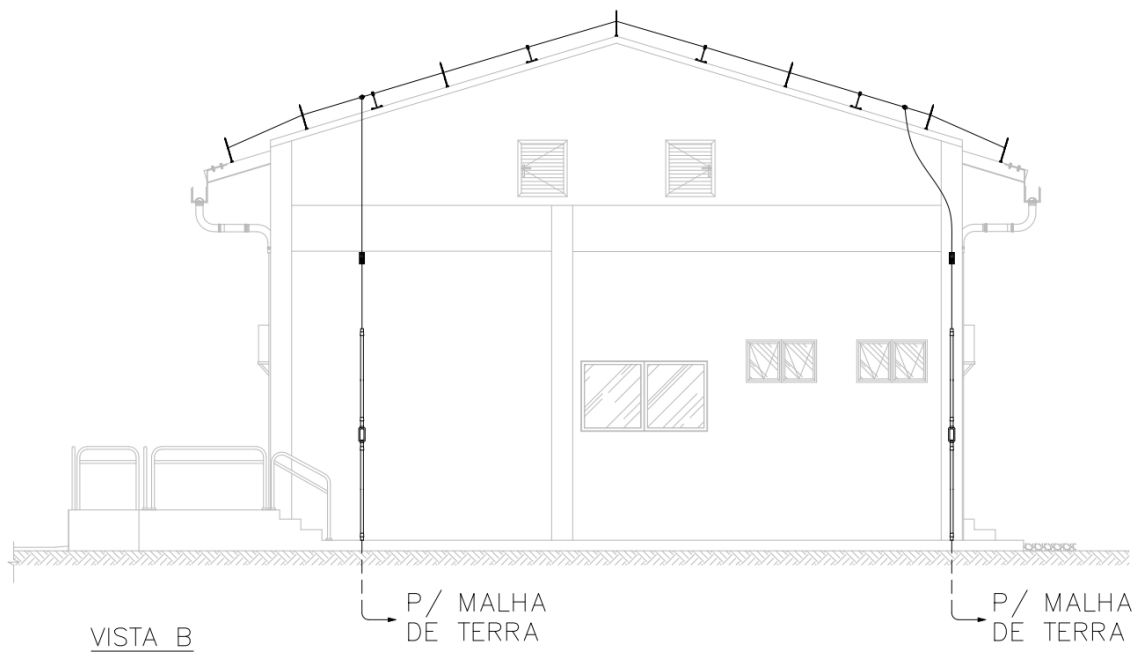
de aterramento da subestação. A Figura 33 e a Figura 34, ilustram os subsistemas de captação e de descida, além de representar as descidas instaladas.

Figura 33 – Casa de comando – Vista A.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 34 – Casa de comando – Vista B.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

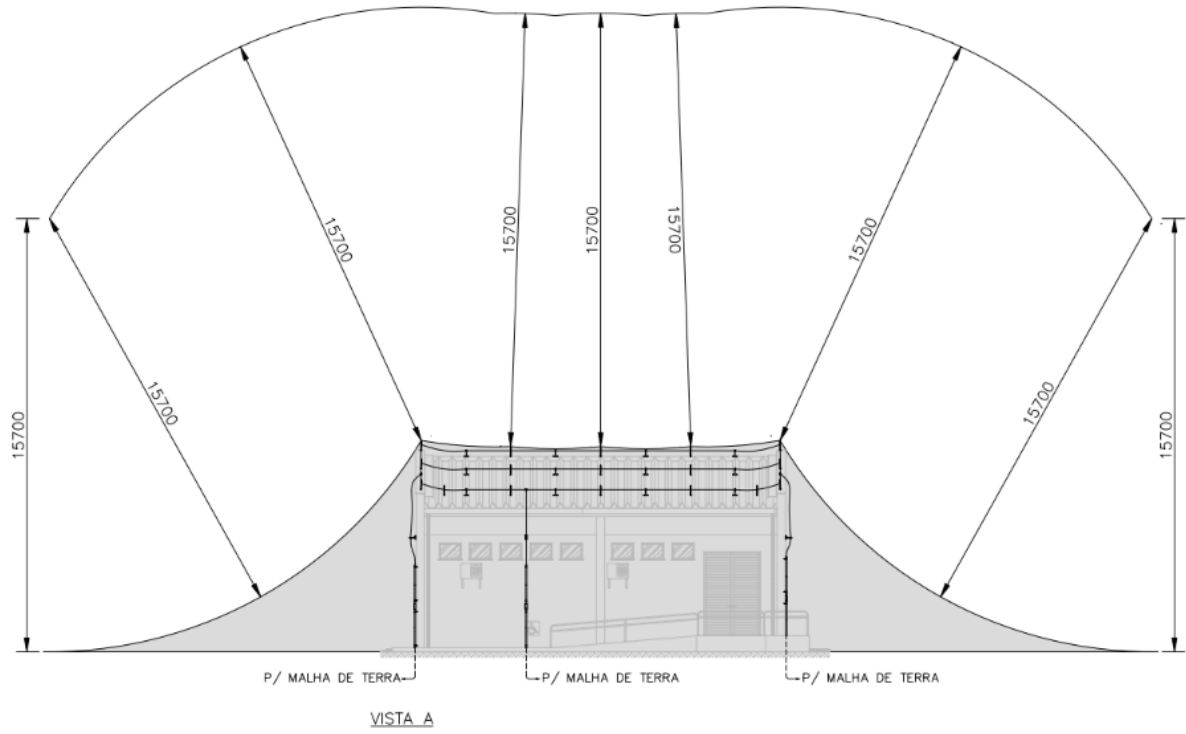
4.4.3 Subsistema de Aterramento

De acordo com a NBR 5419-3:2015, é recomendável a utilização de uma única infraestrutura de aterramento que atenda simultaneamente à proteção contra descargas atmosféricas, aos sistemas de energia elétrica e aos sistemas de sinal. Dessa forma, todos os componentes do SPDA da edificação devem ser interligados à malha de terra geral da subestação.

4.4.4 Volume de Proteção

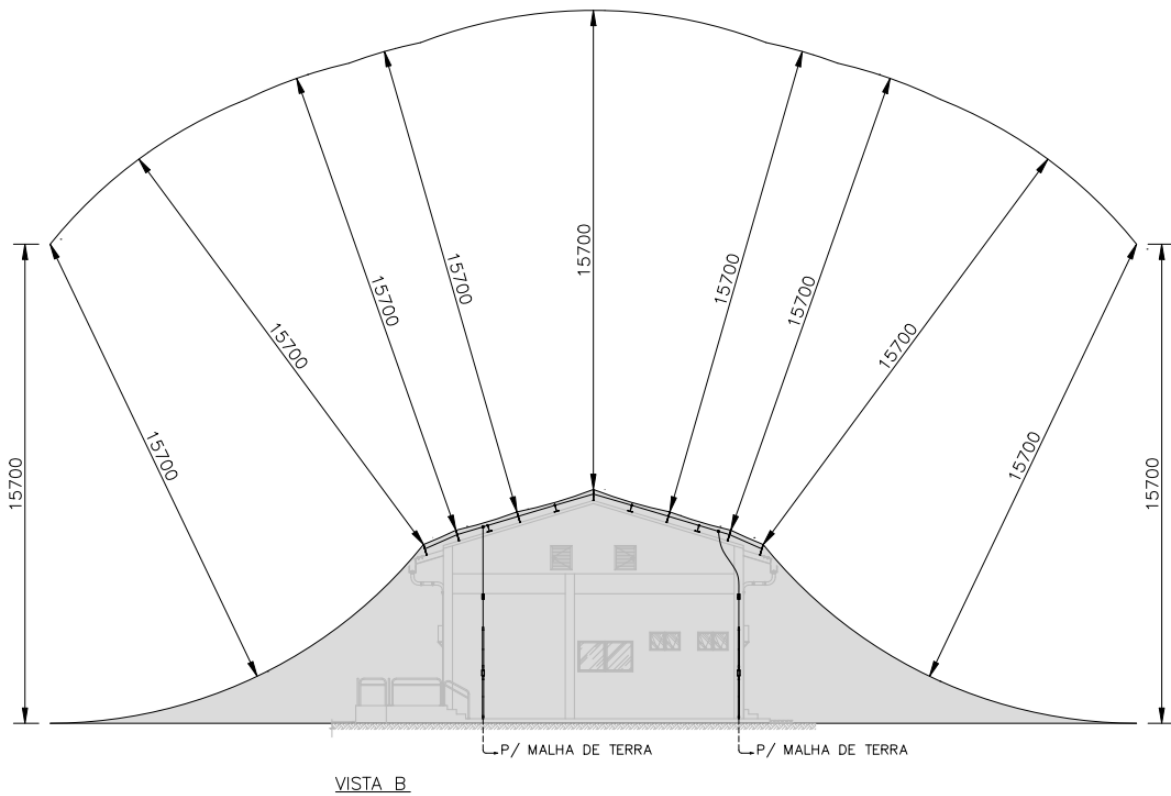
Considerando a edificação “Casa de Comando”, localizada na Subestação Bolívia, e com base nas diretrizes estabelecidas pela NBR 5419, bem como nos critérios definidos pelos Procedimentos de Rede, constatou-se que, ao aplicar o método da esfera rolante para determinação do volume de proteção, todos os elementos da estrutura encontram-se abaixo da superfície da esfera. Isso indica que a edificação está integralmente protegida contra descargas atmosféricas. O volume protegido pode ser visualizado na Figura 35 e na Figura 36.

Figura 35 – Volume de proteção – Vista A.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

Figura 36 – Volume de proteção – Vista B.



Fonte: Feito pelo autor (2025).

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em uma subestação de 138/34,5 kV, utilizando como ferramentas os métodos de dimensionamento prescritos pelas normas ABNT NBR 5419:2015 e IEEE Std 998:2012. A análise, realizada por meio de um estudo de caso, buscou comparar os volumes de proteção resultantes de cada metodologia e verificar a necessidade de uma abordagem combinada para assegurar a blindagem completa da instalação. A fundamentação teórica demonstrou que a proteção contra descargas atmosféricas é um campo da engenharia em constante evolução. A trajetória da NBR 5419, desde suas primeiras edições até a abrangente revisão de 2015, reflete uma mudança de paradigma: de um enfoque puramente na proteção física da estrutura para uma gestão de riscos integrada, que considera a crescente vulnerabilidade dos sistemas eletrônicos e a necessidade de garantir a continuidade operacional.

A aplicação prática das metodologias no estudo de caso permitiu alcançar os objetivos específicos propostos. A caracterização dos subsistemas do SPDA e a descrição dos critérios normativos foram realizadas no Capítulo 2. A aplicação dos métodos no estudo de caso (Capítulo 4) levou às seguintes conclusões principais:

1. **Análise Comparativa dos Métodos:** A comparação entre as normas evidenciou que, embora ambas busquem o mesmo fim, suas premissas de cálculo levam a resultados de dimensionamento distintos. Para o setor de 34,5 kV, ambas as abordagens se mostraram eficazes. Contudo, para o setor de 138 kV, ao se adotar a corrente de pico mínima de 2 kA, a metodologia da NBR 5419 resultou em um volume de proteção mais abrangente (raio de 15,70 m), simplificando a verificação da blindagem. A abordagem da IEEE Std 998, por sua vez, gerou um volume mais restrito (raio de 12,55 m), o que tornou a aplicação do método do ângulo de proteção não apenas complementar, mas essencial para a cobertura das zonas de sombra.
2. **Necessidade de Aplicação Combinada:** O estudo confirmou a relevância da aplicação conjunta dos métodos da esfera rolante e do ângulo de proteção. A análise demonstrou que, especialmente em geometrias complexas como a de um pátio de subestação, o método da esfera rolante pode não garantir, isoladamente, a proteção de todos os equipamentos de menor altura, tornando a

verificação complementar com o método do ângulo uma prática de engenharia indispensável para assegurar uma blindagem completa e eficaz.

3. Gerenciamento de Risco para Edificações: A análise de risco da Casa de Comando, realizada conforme a NBR 5419-2, validou a eficácia do SPDA de Classe I, uma vez que os riscos calculados para perda de vida humana (R_1) e perda de serviço ao público (R_2) se mantiveram abaixo dos limites toleráveis definidos pela norma.

Portanto, conclui-se que a implementação de projetos de SPDA, baseada em uma análise criteriosa e na correta aplicação dos métodos normativos, é um elemento fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade de instalações críticas como as subestações de energia elétrica. Este trabalho demonstrou que a escolha dos parâmetros de entrada e da metodologia de cálculo impacta diretamente a complexidade e a eficácia do sistema de proteção, reforçando a importância do domínio técnico das normas vigentes por parte dos profissionais da área.

Como proposta de continuidade para futuras pesquisas, sugere-se o desenvolvimento de um estudo aprofundado sobre os impactos das descargas atmosféricas na malha de aterramento de subestações. Tal investigação poderia abordar, com maior detalhe, a ocorrência de sobretensões transitórias, os danos físicos aos elementos da malha e, principalmente, a elevação das tensões de passo e toque, que representam um risco direto à segurança das equipes de operação e manutenção.

REFERÊNCIAS

1. ELAT- GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. Mortes por raios - Infográfico, 2020. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/mortes.por.raios.-.infografico.php>>. Acesso em: 12 abril 2025.
2. INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>>. Acesso em: 12 abril 2025.
3. SOUZA, D. F. D.; SUETA, H. E. Registrado no Brasil um Super Raio de 249 kA. **O Setor Elétrico**. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/ESPA%C3%87O5419/!%20ED%20159_ESPA%C3%87O%205419_abr2019_revCase.pdf>.
4. INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Levantamento inédito sobre mortes por raios no Brasil resulta em segunda melhor matéria de divulgação científica em 2020. **INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 16 de abr 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5770>. Acesso em: 10 julho 2025.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5419-1. **Proteção contra descargas atmosféricas Parte 1: Princípios gerais**, Rio de Janeiro, 2015.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5419-2. **Proteção contra descargas atmosféricas Parte 2: Gerenciamento de risco**, Rio de Janeiro, 2015.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5419-3. **Proteção contra descargas atmosféricas Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida**, Rio de Janeiro, 2015.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5419-4. **Proteção contra descargas atmosféricas Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**, Rio de Janeiro, 2015.
9. TARGET NORMAS. NBR5419 DE 05/2015: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. **Target Normas**. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5320/abnt-nbr5419-protecao-de-estruturas-contradescargas-atmosfericas>>.
10. IEC 61024. Protection of structures against lightning, Geneva, 1990.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5419. **Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**, Rio de Janeiro, 2005.
12. IEC 62305. Protection against lightning, Geneva, 2010.
13. IEC 62305-2. Protection against lightning - Part 2: Risk management, Geneva, 2024.
14. SILVA, L. A. D. **Comparação de características visíveis de relâmpagos nuvem-solo negativos para diferentes dias de tempestade no sudeste do Brasil, observados por uma rede de câmeras de alta velocidade**. Dissertação de Mestrado. Pós-

- Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE. [S.l.]. 2014.
15. SHIGIHARA, M. **Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (USP). [S.l.]. 2005.
 16. ROMERO, F. **Avaliação do Comportamento dos Campos Eletromagnéticos Gerados por Descargas Atmosféricas Nuvem - Terra**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (USP). [S.l.]. 2007.
 17. UMAN, M. A. Natural lightning. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 3, p. 785-790, may 1994.
 18. RAKOV, V. A. **Lightning parameters important for lightning protection**. VI SIPDA. Santos/Brazil: [s.n.]. nov. 2001.
 19. CAMPOS, L. F. G. D.; ESTEVAM, G. P. A atuação das subestações no Sistema Elétrico. **Revista eSALENG – Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO**.
 20. FILHO, J. M. Subestações de Alta Tensão, Rio de Janeiro, n. 1, 2021.
 21. FILHO, J. M. Instalações Elétricas Industriais, Rio de Janeiro, n. 8, 2012.
 22. RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. New York, NY: Cambridge University Press, 2005. 700 p.
 23. SOUZA, A. A. D. **Metodologia para elaboração de projetos de SPDA aplicado à subestação de concessionárias de energia elétrica: Estudo de caso comparativo entre NBR-5419 e IEEE 998(2012)**. Niterói: Trabalho de conclusão de curso - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense., 2021.
 24. SOUZA, A. N. D. **SPDA - Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica - Teoria, Prática e Legislação**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2020. 216 p.
 25. IEEE 998-2012. Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, New York, p. 227, 2012.
 26. ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. **ONS**, 2022.
 27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15751. Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos, Rio de Janeiro, 2013.
 28. INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. O que são descargas atmosféricas. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>>. Acesso em: 12 abril 2025.
 29. INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Origem. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/origem.php>>. Acesso em: 12 abril 2025.