

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU**

GABRIEL FERNANDES DE MOURA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO PARA PROJETO DE SPDA
EM ESTRUTURAS ESFÉRICAS COMPLEXAS**

**BAURU
2024**

GABRIEL FERNANDES DE MOURA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO PARA PROJETO DE SPDA
EM ESTRUTURAS ESFÉRICAS COMPLEXAS**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Orientador: Prof. Dr. Fábio Isaac Ferreira

**BAURU
2024**

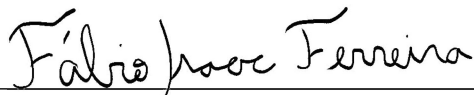
M929a	<p>Moura, Gabriel</p> <p>APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO PARA PROJETO DE SPDA EM ESTRUTURAS ESFÉRICAS COMPLEXAS / Gabriel Moura. -- Bauru, 2024</p> <p>66 p.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru</p> <p>Orientador: Fábio Ferreira</p> <p>1. Sistema de Proteção. 2. SPDA. 3. Rolamento de esferas. 4. Descarga atmosférica. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE APROVAÇÃO

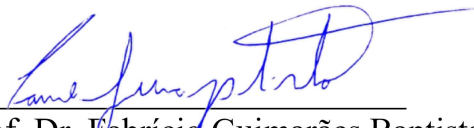
Aluno: Gabriel Fernandes de Moura

Título: Aplicação do Método Eletrogeométrico para Projetos de SPDA em Estruturas Esféricas Complexas

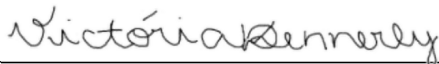
Trabalho de Graduação defendido e aprovado em 03/12/2024, com MÉDIA 10 (Dez), pela comissão julgadora:



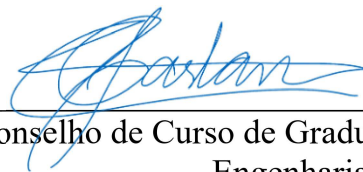
Prof. Dr. Fábio Isaac Ferreira (Orientador)
Faculdade de Engenharia de Bauru/DEE/UNESP



Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista
Faculdade de Engenharia de Bauru/DEE/UNESP



Profa. Bela. Victoria Dutra Kennerly
Faculdade de Engenharia de Bauru/DEE/UNESP



Coordenador do Conselho de Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica

RESUMO

As descargas atmosféricas, popularmente conhecidas como raios, são fenômenos naturais caracterizados pela rápida descarga de eletricidade entre uma nuvem e a superfície da Terra. Essas descargas podem ocorrer com uma intensidade significativa, representando riscos potenciais para pessoas, estruturas e equipamentos. A imprevisibilidade e a violência desses eventos tornam essencial a adoção de medidas de proteção adequadas para mitigar os danos causados. O impacto das descargas atmosféricas pode variar desde danos materiais, como incêndios e destruição de equipamentos elétricos, até situações mais graves, que envolvem riscos à vida humana, especialmente em áreas de alta concentração populacional e infraestrutura crítica. Dessa forma, a proteção contra raios é uma preocupação crescente em projetos de engenharia, principalmente em edificações e instalações industriais, que podem ser alvos frequentes dessas ocorrências. O SPDA é uma solução essencial para garantir a segurança de estruturas e a integridade de seus sistemas elétricos. Um projeto bem executado é fundamental para assegurar não apenas a proteção das pessoas e do patrimônio, mas também a conformidade com as normas técnicas vigentes. Este trabalho tem como objetivo explorar a aplicação do Método Eletrogeométrico no projeto de SPDA para estruturas esféricas. Este método, também conhecido como Método das Esferas Rolantes, destaca-se por sua capacidade de identificar com precisão as áreas de risco em torno da estrutura, proporcionando uma cobertura abrangente contra a incidência de raios. Para a elaboração deste projeto, utilizou-se o aplicativo AutoCAD para a modelagem da estrutura esférica, além de outros aplicativos auxiliares compatíveis com o AutoCAD para a comprovação dos cálculos. Dessa forma, conclui-se que a aplicação do Método Eletrogeométrico no dimensionamento do SPDA para estruturas esféricas mostrou-se altamente eficaz. O método não só cobriu todos os pontos críticos suscetíveis à incidência de descargas, mas também ofereceu uma solução mais eficiente e segura em comparação com os demais métodos de proteção existentes.

Palavras-chave – Método Eletrogeométrico; Método das Esferas Rolantes; SPDA; Descargas atmosféricas; Sistema de proteção; Segurança da estrutura; Normas técnicas.

ABSTRACT

Atmospheric discharges, commonly known as lightning, are natural phenomena characterized by the rapid discharge of electricity between a cloud and the Earth's surface. These discharges can occur with significant intensity, posing potential risks to people, structures, and equipment. The unpredictability and severity of these events make it essential to adopt effective protective measures to mitigate the damage caused. The impact of atmospheric discharges can range from material damage, such as fires and the destruction of electrical equipment, to more severe situations, involving risks to human life, particularly in areas with high population density and critical infrastructure. Therefore, lightning protection has become an increasing concern in engineering projects, especially for buildings and industrial facilities, which are frequent targets of these events. The SPDA is an essential solution to ensure the safety of structures and the integrity of their electrical systems. A well-executed project is vital not only for protecting people and property but also for ensuring compliance with current technical standards. This work aims to explore the application of the Electrogeometric Method in the design of SPDA for spherical structures. This method, also known as the Rolling Sphere Method, stands out due to its ability to accurately identify risk areas around the structure, providing comprehensive coverage against lightning strikes. To develop this project, the AutoCAD application was used to model the spherical structure, alongside other compatible auxiliary applications to validate the calculations. Thus, it is concluded that the Electrogeometric Method proves to be highly effective in the design of SPDA for spherical structures. The method not only covers all critical points susceptible to discharges but also offers a more efficient and safer solution compared to other existing protection methods.

Keywords - Electrogeometric Method; Rolling Spheres Method; SPDA; Atmospheric discharges; Protection system; Structure safety; Technical standards.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Distribuição das cargas elétricas em uma nuvem.	18
Figura 2 - Transferência de cargas através de colisões.....	19
Figura 3 - Etapas de progressão da descarga piloto.....	20
Figura 4 - ZPR definidas por um SPDA.....	25
Figura 5 - Procedimento para decisão da necessidade de proteção	29
Figura 6 - Projeto do subsistema de captação utilizando o método da esfera rolante	30
Figura 7 - Estrutura interna e externa do planetário	36
Figura 8 - Vista lateral do planetário	37
Figura 9 - Vista frontal do planetário.....	37
Figura 10 - Planta Baixa	37
Figura 11 - Realização do Método Eletrogeométrico na vista lateral	38
Figura 12 - Alocação dos primeiros captores na vista lateral	39
Figura 13 – Etapa 2 do Método Eletrogeométrico na vista lateral	39
Figura 14 - Realocação dos captores na vista lateral.....	40
Figura 15 – Etapa 3 do Método Eletrogeométrico na vista lateral	40
Figura 16 - Alocação do captor principal na vista lateral	41
Figura 17 – Alocação resultante dos captores na vista lateral	41
Figura 18 - Verificação do posicionamento dos captores na vista lateral.....	42
Figura 19 - Realização do Método Eletrogeométrico na vista frontal.....	42
Figura 20 - Alocação dos captores na vista frontal.....	43
Figura 21 – Alocação resultante dos captores na vista frontal	44
Figura 22 - Verificação do posicionamento dos captores na vista frontal	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de perdas resultantes dos tipos de danos e os riscos correspondentes	23
Tabela 2 - Valores típicos de risco tolerável R_T	26
Tabela 3 - Valores do raio (r) da esfera.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD – Desenho Assistido por Computador

EB – Equipotencialização para Descargas Atmosféricas

NBR – Norma Brasileira

SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosférica

RT – Risco Tolerável

ZPR – Zonas de Proteção contra as descargas atmosféricas (Raio)

LISTA SÍMBOLOS

Ad – Área de exposição equivalente da estrutura (m^2)

Ai – Área de exposição próxima da linha de energia (m^2)

Ait – Área de exposição próxima da linha de sinal (m^2)

Al – Área de exposição da linha de energia (m^2)

Alt – Área de exposição da linha de sinal (m^2)

Am – Área de influência para descargas próximas à estrutura (m^2)

Cd – Fator de localização da estrutura, ajustado conforme presença de estruturas mais altas ao redor

Ce – Fator ambiental da linha de energia, ajustado conforme o ambiente (urbano com edifícios mais altos que 20 m)

Cet – Fator ambiental da linha de sinal, ajustado conforme o ambiente (urbano com edifícios mais altos que 20 m)

Ci – Fator de instalação da linha de energia, conforme tipo de linha (Aéreo)

Cit – Fator de instalação da linha de sinal, conforme tipo de linha (Aéreo)

Cli – Fator de linha de energia interligada (não interligada ao barramento de equipotencialização)

Clit – Fator de linha de sinal interligada (não interligada ao barramento de equipotencialização)

Cld – Fator do tipo de linha externa de energia, conforme blindagem e interligação

Cldt – Fator do tipo de linha externa de sinal, conforme blindagem e interligação

Ct – Fator do tipo de linha de energia (Alta Tensão)

Ctt – Fator do tipo de linha de sinal

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

H – Altura da estrutura (m)

hz – Fator de perigo especial para a estrutura

Ks1 – Fator de eficiência da blindagem da estrutura conforme largura de malha $Wm1$

Ks2 – Fator de blindagem interna para a estrutura

Ks3 – Fiação interna de energia conforme roteamento e laços

Ks3t – Fiação interna de sinal conforme roteamento e laços

Ks4 – Fator de tensão suportável de impulso para o sistema de energia

Ks4t – Fator de tensão suportável de impulso para o sistema de sinal

L1 – Perda de vida humana incluindo ferimentos permanentes

L2 – Perda inaceitável de serviço ao público

L3 – Perda inaceitável de patrimônio cultural

L4 – Perda econômica

L – Comprimento da estrutura (m)

La – Probabilidade associada ao tempo de presença em área perigosa (descargas)

Lb – Perda econômica com medidas de proteção contra incêndios

Lc – Probabilidade associada a perdas de vida em caso de falhas internas

Le – Probabilidade de exposição fora da estrutura

Lf – Danos físicos em locais de entretenimento público

Lo – Falhas de sistemas internos

Lt – Perda de vida humana incluindo ferimentos permanentes

Lu – Probabilidade associada ao tempo de presença em área perigosa

Lv – Probabilidade de perda econômica

Ll – Comprimento da linha de energia (m)

Llt – Comprimento da linha de sinal (m)

Lw – Largura da estrutura (m)

Lm, Lw, Lz – Probabilidades genéricas de perda em caso de falha

Ng – Densidade média anual de descargas atmosféricas que atingem o solo na região (Descargas/km²/ano)

Nd – Número anual de descargas diretas esperadas na estrutura (descargas/ano)

Ni – Número médio anual de eventos perigosos perto da linha de energia (eventos/ano)

Nl – Número médio anual de eventos perigosos na linha de energia (eventos/ano)

Nlt – Número médio anual de eventos perigosos na linha de sinal (eventos/ano)

Nm – Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas próximas à estrutura (eventos/ano)

nt – Número total de pessoas na estrutura

Nx – Número de eventos perigosos por ano

nz – Número de pessoas na zona interna da edificação

Pa – Probabilidade de descarga na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque

Pb – Proteção da estrutura, ajuste conforme SPDA (Classe II)

Peb – Nível de proteção de DPS (Classe II)

Pli – Probabilidade de descarga na linha de energia causar falha

Plit – Probabilidade de descarga na linha de sinal causar falha

Pld – Fator de roteamento e blindagem da linha de energia, conforme interligação

Pldt – Fator de roteamento e blindagem da linha de sinal, conforme interligação

Pms – Probabilidade de descarga próxima da estrutura causar danos em sistemas internos (energia)

Pmst – Probabilidade de descarga próxima da estrutura causar danos em sistemas internos (sinal)

Pspd – Nível de proteção de DPS para energia (sem sistema coordenado)

Pspdt – Nível de proteção de DPS para sinal (sem sistema coordenado)

Pta – Medidas de proteção contra descargas na estrutura (equipotencialização do solo)

Pu – Probabilidade de descarga na linha de energia causar ferimentos a seres vivos por choque

Put – Probabilidade de descarga na linha de sinal causar ferimentos a seres vivos por choque

Pv – Probabilidade de descarga na linha de energia causar danos físicos

Pvt – Probabilidade de descarga na linha de sinal causar danos físicos

Pw – Probabilidade de descarga na linha de energia causar falha em sistemas internos

Pwt – Probabilidade de descarga na linha de sinal causar falha em sistemas internos

P_x – Probabilidade de dano à estrutura

Pz – Probabilidade de descarga perto da linha de energia causar falha em sistemas internos

Pzt – Probabilidade de descarga perto da linha de sinal causar falha em sistemas internos

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 de fora da estrutura: L1 para seres humanos e L4 para o caso de estrutura com animais

R_A – Componente gerada devido a tensões de passo e de toque em distâncias de até 3 m do lado

Ra – Risco associado à descarga direta na estrutura

R_B – Componente relacionado com os danos físicos causados por possíveis centelhamentos que podem iniciar explosões. Podem ocorrer para todos os tipos de perdas: L1, L2, L3 e L4

R_b – Risco associado à descarga indireta na estrutura

R_C – Componente gerada devido à falha de sistemas internos causados por LEMPs (pulsos eletromagnéticos provenientes dos raios). Podem ocorrer perdas L2 e L4 em todos os casos e L1 quando há risco de explosões, ou em hospitais e estruturas que possuem os mesmos riscos

r_f – Fator de risco de incêndio ou explosão na estrutura

R_M – Falha de sistemas internos causada por LEMP

r_p – Fator de redução para prevenir incêndios

r_t – Fator de redução conforme o tipo de superfície do solo

R_U – Relacionado a ferimentos por tensão de toque e passo dentro da estrutura

R_u – Risco associado à descarga direta na linha de energia

R_{ut} – Risco associado à descarga direta na linha de sinal

R_v – Danos físicos por incêndio ou explosão devido ao centelhamento

R_w – Falhas de sistemas internos por sobretensões que são induzidas nas linhas que alimentam a parte interna da estrutura

R_z – Falhas de sistemas internos por sobretensões que são induzidas nas linhas que alimentam a parte interna da estrutura com risco de explosão ou hospitais e outras estruturas com riscos de vida por falha de sistemas internos

S1 – descargas atmosféricas na estrutura

S2 – descargas atmosféricas próximas à estrutura

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

t_e – Tempo de presença de pessoas em locais perigosos fora da estrutura (h/ano)

t_z – Tempo de presença de pessoas na zona interna (h/ano)

U_w – Tensão suportável nominal de impulso do sistema de energia (kV)

U_{wt} – Tensão suportável nominal de impulso do sistema de sinal (kV)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	17
2.1.1	TEORIA DA PRECIPITAÇÃO.....	19
2.2	SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA).....	21
2.2.1	PRINCÍPIOS GERAIS	21
2.2.2	CRITÉRIOS PARA A PROTEÇÃO DAS ESTRUTURAS	23
2.2.3	GERENCIAMENTO DE RISCOS	26
2.3	MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO	30
2.4	SOFTWARES PARA PROJETO	31
2.4.1	AUTOCAD.....	31
2.4.2	PRÓ-ELÉTRICA.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PARA O ESTUDO	33
3.2	IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE AUTOCAD	33
3.3	PROJETO DE SPDA.....	34
3.4	MATERIAIS UTILIZADOS	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas, ou raios, são fenômenos naturais resultantes da diferença de potencial elétrico entre nuvens ou entre uma nuvem e o solo, rompendo a rigidez dielétrica do ar e gerando uma descarga elétrica. Caracterizadas por efeitos marcantes, como o som do trovão, a luminosidade do relâmpago e a velocidade com que atingem o solo, essas descargas representam riscos significativos à vida humana e animal, além de causarem danos a estruturas, equipamentos eletrônicos, redes elétricas e instalações. Podem ainda desencadear incêndios florestais, acidentes aeronáuticos e problemas em áreas urbanas, onde fatores como a poluição atmosférica e as ilhas de calor intensificam sua ocorrência (Reis, 2005).

Pesquisas anteriores contribuíram significativamente para o entendimento dos raios e de seus mecanismos de atuação, possibilitando o desenvolvimento de técnicas avançadas de detecção (Betz, Schumann e Laroche, 2009). Fenômenos associados às descargas atmosféricas são estudados por diversas instituições e acredita-se que ocorram desde tempos remotos, possivelmente antes do surgimento da vida humana. Em culturas antigas, os raios frequentemente inspiraram mitologias e foram associados a divindades, como Zeus, o pai dos deuses e governante do Monte Olimpo na mitologia grega, consolidando seu simbolismo em diversas tradições culturais (Rakov e Uman, 2005).

Benjamin Franklin, um dos mais renomados cientistas, inventores e estadistas do século XVIII, destacou-se por suas contribuições à ciência, especialmente no campo da eletricidade. Sua pesquisa sobre descargas atmosféricas em meados do século XVIII trouxe avanços significativos ao entendimento desse fenômeno. Em 1750, Franklin propôs a possibilidade de drenar a eletricidade presente em uma nuvem utilizando um mastro metálico isolado do solo, com um fio aterrado em uma de suas extremidades. Ele postulou que, caso uma faísca saltasse do mastro para o fio quando uma nuvem eletrificada estivesse próxima, isso confirmaria que as nuvens contêm eletricidade, provando que os relâmpagos são fenômenos elétricos. Dois anos depois, Thomas François D'Alibard, físico francês que contribuiu para a validação dessa teoria, realizou experimentos que comprovaram as ideias de Franklin. Para reforçar a teoria, foi realizada outra experiência, desta vez utilizando uma pipa ao invés do mastro, alcançando altitudes maiores e eliminando a necessidade de um ponto fixo. Os resultados foram novamente promissores, com faíscas saltando da extremidade do fio preso à pipa, onde uma chave servia como condutor para a energia acumulada nas nuvens (Elat, 2011; Krider, 2006; Cooray, 2010).

Desde a descoberta de Franklin, as descargas atmosféricas passaram a ser reconhecidas como fenômenos de natureza elétrica, o que impulsionou inúmeros estudos sobre o tema, especialmente focados em mitigar os desastres causados por elas. Pesquisadores dedicaram-se ao desenvolvimento de métodos para prever essas descargas e criar ferramentas que minimizem seus impactos. Entre essas inovações, destacaram-se os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), cuja eficácia foi comprovada por diversos experimentos ao longo do tempo. Desde a sua concepção na década de 1750, os SPDA foram continuamente aprimorados de maneira empírica, com base na análise de falhas observadas, buscando otimizar o posicionamento dos captosres. O objetivo principal é interceptar descargas atmosféricas diretas, conduzi-las com segurança até o solo e dispersar sua energia de forma controlada, reduzindo os riscos associados (Rison, 2004).

Logo, tornou-se evidente a necessidade e a importância de instalar um SPDA, visando prevenir acidentes ou catástrofes causadas pelas descargas atmosféricas. Uma das metodologias mais utilizadas para o dimensionamento desses sistemas é o método eletrogeométrico, também conhecido como método das esferas rolantes, que se baseia em conceitos geométricos para determinar as regiões de proteção oferecidas por captosres. Esse método considera uma esfera fictícia de raio definido, representando o alcance de uma descarga, que é rolada sobre a superfície da estrutura e ao redor dos elementos de proteção. Qualquer ponto da estrutura que não seja tangenciado pela esfera está protegido contra descargas diretas, permitindo o posicionamento otimizado dos captosres. Essa abordagem mostrou-se eficiente em projetos arquitetônicos complexos, incluindo aqueles com formas irregulares, como estruturas esféricas, garantindo maior segurança e confiabilidade ao SPDA (Visacro, 2005).

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi aplicar o método eletrogeométrico como uma abordagem alternativa para o desenvolvimento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em estruturas esféricas, com foco na determinação do posicionamento ideal dos subsistemas de captosres. Para isso, utilizou-se como base a norma técnica ABNT NBR 5419:2015, parte 1 a 4, que estabeleceu diretrizes para garantir a máxima eficácia na proteção contra descargas elétricas. Adicionalmente, empregaram-se os softwares AutoCAD e PRO-Elétrica: o AutoCAD para o desenvolvimento da modelagem da estrutura esférica e o PRO-Elétrica para a execução dos cálculos necessários à análise da distribuição dos campos elétricos e potenciais de descarga. O propósito foi assegurar que o sistema de proteção não só garantisse a integridade da edificação,

mas também a segurança das pessoas presentes e dos sistemas elétricos em caso de incidência de raios, proporcionando um ambiente seguro e protegido contra os riscos associados a esses fenômenos naturais.

1.2 JUSTIFICATIVA

A variabilidade das descargas atmosféricas e a necessidade de garantir a segurança das edificações e das pessoas que nelas se encontram tornam essencial a utilização de métodos eficazes para o desenvolvimento de sistemas de proteção contra raios. Com o avanço tecnológico e a crescente complexidade dos projetos arquitetônicos, a estruturação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) se torna cada vez mais desafiadora, principalmente quando se considera o uso de métodos tradicionais como o Método das Malhas, Franklin e Eletrogeométrico. Estes dois primeiros são mais comumente aplicados em edificações de formas retangulares ou verticais, o que dificulta a adaptação desses métodos para estruturas com geometrias mais complexas, como as esféricas.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de explorar novas abordagens para o SPDA, especificamente o Método Eletrogeométrico (ou Método das Esferas Rolantes), devido à sua maior facilidade de aplicação em estruturas irregulares, como as de formato esférico, o método apresenta vantagens significativas ao garantir uma proteção eficiente e abrangente, adaptando-se às peculiaridades geométricas da edificação., a fim de aumentar a eficácia, a segurança e a efetividade dos sistemas de proteção em estruturas esféricas. Com o uso dessa técnica, busca-se contribuir para a evolução dos projetos de proteção contra descargas atmosféricas, proporcionando uma solução eficiente e adequada às necessidades das construções modernas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar o objetivo proposto, o trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 contextualiza a pesquisa, com base em análises de estudos anteriores, e apresenta teorias relevantes sobre o tema em questão. No Capítulo 3, são descritos detalhadamente os métodos utilizados na pesquisa, incluindo os softwares e materiais empregados para o desenvolvimento do estudo. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos durante a implementação do trabalho, subdividido nas etapas necessárias para o desenvolvimento do projeto. Por fim, o Capítulo 5 contém a conclusão, onde são discutidas as implicações e os aprendizados adquiridos ao longo da elaboração do estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, será discutido o método Eletrogeométrico, também conhecido como método das esferas rolantes, e sua aplicação em estruturas esféricas para o desenvolvimento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. O Método Eletrogeométrico foi uma abordagem que modela o comportamento das descargas atmosféricas, focando na maneira como as cargas elétricas se distribuem e interagem com as estruturas. Essa técnica se baseia em uma representação geométrica simplificada das estruturas, que permite o cálculo do posicionamento ideal de captosres e a otimização do sistema de proteção.

Além de abordar o fenômeno natural que gera as descargas atmosféricas, este capítulo também discutirá a estruturação do SPDA, incluindo os sistemas de aterramento e condutores de descida, conforme as normas da ABNT NBR 5419 - Parte 1, 2, 3 e 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), que orientam o projeto e a execução desses sistemas.

A partir dos conceitos fundamentados nas normas e do método Eletrogeométrico, será possível projetar sistemas de proteção mais eficazes para estruturas esféricas, que, devido à sua geometria específica, exigem abordagens diferenciadas se comparadas com estruturas convencionais, como as retangulares ou verticais.

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

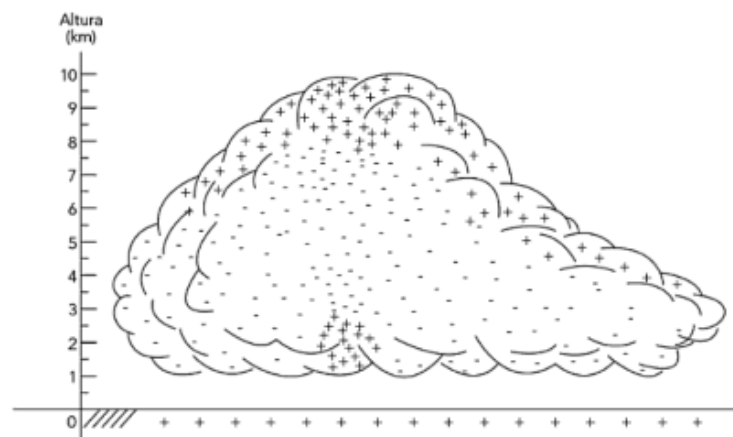
Uma descarga atmosférica ocorre quando há o rompimento da isolação do ar entre duas superfícies carregadas eletricamente, com polaridade oposta (positivo e negativo). Esse fenômeno, amplamente conhecido como raio, trovão ou relâmpago, pode acontecer tanto entre nuvens como entre uma nuvem e o solo. Os primeiros estudos científicos sobre as descargas atmosféricas foram desenvolvidos por Benjamin Franklin (1706-1790), um dos pioneiros na prova da natureza elétrica desses fenômenos. Franklin realizou diversos experimentos que demonstraram a existência de cargas elétricas nas nuvens, incluindo um famoso experimento com uma chave amarrada a uma pipa durante uma tempestade, onde, ao detectar sinais de eletricidade na chave, provava-se a presença de cargas nas nuvens.

Além de suas investigações sobre as descargas atmosféricas, Franklin conduziu experimentos com uma haste metálica aterrada sob nuvens carregadas. Ao se aproximar da nuvem, a haste metálica ofereceu um caminho para o transporte da energia elétrica da nuvem para o solo. Esse método foi fundamental para os primeiros passos na compreensão das

descargas atmosféricas e a fundamentação teórica sobre o funcionamento dos para-raios. Em 1752, o cientista francês Thomas François D'Alibard (1709-1799) validou as descobertas de Franklin com um experimento semelhante, utilizando um mastro de ferro aterrando-o com fios. Quando o mastro apontado para as nuvens carregadas gerou fagulhas em sua extremidade, a teoria de Franklin foi confirmada, estabelecendo as bases para os estudos dos para-raios.

Esses experimentos iniciais conduziram ao desenvolvimento de modelos sobre a distribuição das cargas elétricas dentro das nuvens. Inicialmente, acreditava-se que as nuvens possuíam dois polos elétricos, um positivo e outro negativo, formando o modelo de dipolo elétrico. Contudo, com o avanço dos estudos sobre a eletricidade atmosférica, surgiu a teoria tripolar, que propôs que as nuvens possuíam três centros principais de cargas elétricas: dois polos positivos localizados na parte superior e inferior da nuvem, e um polo negativo no centro, conforme Figura 1. (Rakov & Uman, 2006; Cooray, 2010; Souza, 2020)

Figura 1- Distribuição das cargas elétricas em uma nuvem.



Fonte: Souza, 2020.

Logo, conforme ilustrado pela imagem, pode-se observar uma grande concentração de cargas positivas na parte inferior da nuvem, ao redor das quais se encontram cargas negativas. Quando essas cargas se opõem, ocorre uma interação repulsiva, o que induz a movimentação dessas cargas em direção ao solo.

É importante salientar que existem diversas abordagens sobre a formação dessas cargas elétricas, e nenhuma delas fornece uma explicação totalmente conclusiva sobre o processo. Por esse motivo, mais investigações e estudos aprofundados foram necessários para o entendimento completo e o desenvolvimento de uma teoria unificada. Este trabalho, no entanto, não aborda os fundamentos dessas teorias mais complexas. Assim, nas próximas etapas, foi adotado o modelo mais amplamente aceito entre os pesquisadores, o qual foi conhecido como a Teoria da Precipitação.

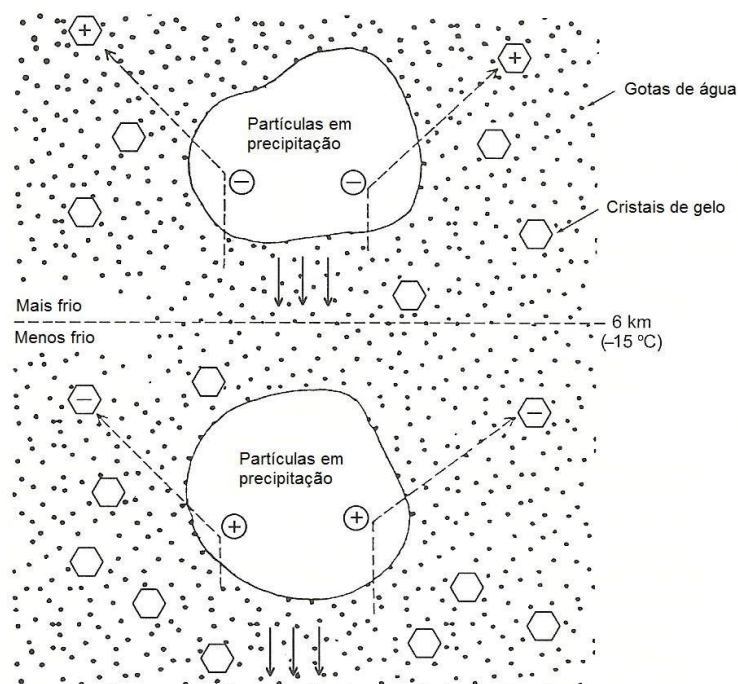
Este modelo, amplamente discutido e suportado, baseou-se na distribuição das cargas e nas interações observadas nas descargas atmosféricas (Rakov e Uman, 2006; Souza, 2020).

2.1.1 TEORIA DA PRECIPITAÇÃO

A metodologia proposta considera que a nuvem é composta por três regiões distintas, cada uma com diferentes cargas elétricas. A região superior da nuvem, que possui cargas positivas, foi carregada pelos ventos ascendentes que deslocaram as partículas mais leves, como os cristais de gelo, para essa área. A região central da nuvem, ou região negativa, se forma por meio da mistura de partículas suspensas que se acumularam devido às condições atmosféricas. Já a parte inferior da nuvem, que contém cargas positivas, se formou pela queda das partículas maiores e mais pesadas de água, que resultaram da colisão entre os cristais de gelo e as gotículas de água dentro da nuvem.

Esse processo cria uma separação de cargas dentro da nuvem, que é a base para a ocorrência das descargas atmosféricas. Quando essas cargas se opõem de maneira suficiente, ocorre a indução de uma descarga elétrica, também conhecida como raio. Uma ilustração simplificada desse mecanismo foi mostrada na Figura 2, que representa a distribuição das cargas em uma nuvem de tempestade, como sugerido por Rakov e Uman (2006) e outros autores que estudaram os fenômenos atmosféricos.

Figura 2 - Transferência de cargas através de colisões.

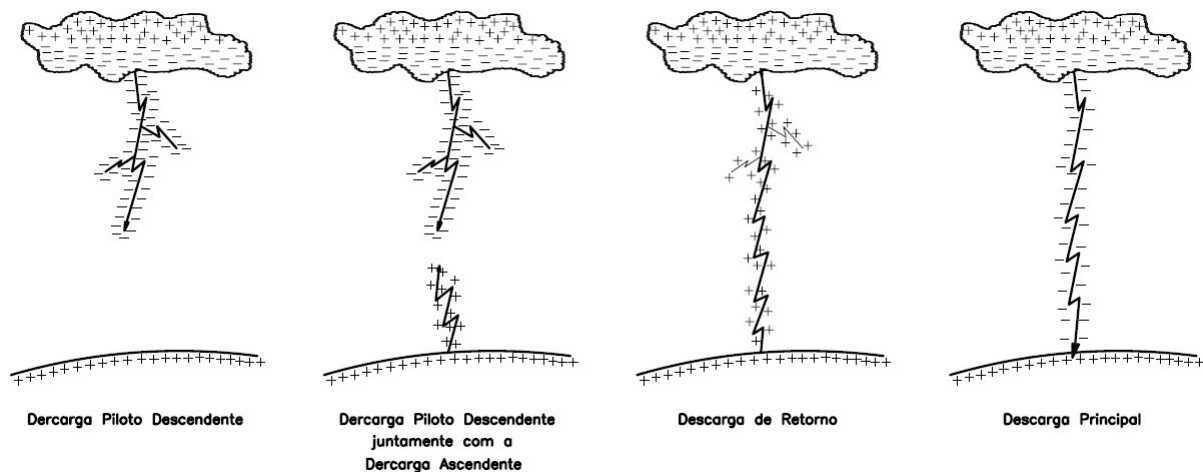


Fonte: Rakov e Uman (2003).

O processo de formação de uma descarga atmosférica inicia-se com a chamada descarga piloto. Essa descarga preliminar ocorre quando uma carga negativa da nuvem se aproxima do solo, criando um caminho condutor. Em resposta, o solo emite uma carga positiva que vai se dirigindo até a nuvem. Este processo resulta na formação de uma corrente de retorno quando a descarga piloto atinge o solo, permitindo que a carga da nuvem seja liberada para a terra.

A Figura 3, que ilustra esse fenômeno, mostra como a descarga piloto, com seu fluxo inicial, é seguida pela corrente de retorno, que é mais intensa e responsável pelo impacto final da descarga. A descarga piloto é uma descarga de baixa intensidade, enquanto a corrente de retorno é muito mais forte e é a responsável pela maior parte da energia liberada durante o raio.

Figura 3 - Etapas de progressão da descarga piloto.



Fonte: Filho, (2017).

A corrente de retorno, que é a descarga de alta intensidade que segue a descarga piloto, é caracterizada por uma luminosidade excessiva. Quando essa corrente atinge novamente a nuvem, ela provoca uma diferença de potencial elétrico no interior da nuvem, entre o centro de cargas e outros pontos, desencadeando uma nova descarga. Esse processo de múltiplas descargas pode ter ocorrido várias vezes, gerando múltiplos flashes de raios, mas só pôde ser observado com equipamentos adequados devido à rapidez e à intensidade das correntes de retorno. As características do processo de múltiplas descargas foram abordadas por Cooray (2010), que explorou a física dos raios e suas implicações para os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

2.2 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) tem a finalidade de proteger não apenas a estrutura física do edifício, mas também os equipamentos elétricos e eletrônicos, e mais importante ainda, garantir a segurança das pessoas dentro da edificação. O principal objetivo de um SPDA é reduzir os impactos causados pelas descargas atmosféricas, minimizando danos à estrutura, evitando falhas nos sistemas internos e mitigando os riscos associados aos sistemas elétricos.

A eficiência do SPDA está relacionada à sua capacidade de neutralizar a atração das cargas elétricas geradas pela diferença de potencial entre o solo e as nuvens. Ele deve captar essas cargas e direcioná-las de maneira segura para o solo, através de um caminho de baixa impedância, minimizando o risco de danos.

O SPDA foi dividido em dois sistemas principais: sistema externo e sistema interno. O sistema externo tem a função de proteger a estrutura física contra a descarga direta, e é composto por captadores, condutores de descida e sistemas de aterramento. Já o sistema interno visa proteger os equipamentos eletrônicos e os circuitos elétricos, reduzindo os efeitos de correntes elétricas e magnéticas nas instalações internas.

Para garantir que os projetos de SPDA atendam aos requisitos necessários, foram estabelecidas as normas da ABNT NBR 5419, que estão divididas em quatro partes essenciais:

- Parte 1: Princípios gerais (ABNT NBR 5419-1);
- Parte 2: Gerenciamento de riscos (ABNT NBR 5419-2);
- Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida (ABNT NBR 5419-3);
- Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura (ABNT NBR 5419-4).

Embora este trabalho não se proponha a detalhar todas as normas da ABNT NBR 5419, é importante que o leitor se familiarize com elas antes da execução de projetos, já que serão discutidos alguns aspectos cruciais relacionados a essas normas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

2.2.1 PRINCÍPIOS GERAIS

Conforme discutido anteriormente, as descargas atmosféricas podem causar danos significativos às estruturas, e esses danos não necessitam ocorrer diretamente com o impacto do raio. Eles podem ser provocados por diversos fatores associados à propagação de correntes

elétricas e campos magnéticos gerados pelas descargas. Por essa razão, é fundamental realizar uma avaliação detalhada dos riscos envolvidos e adotar métodos adequados de proteção. Conforme NBR 5419 – Parte 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), as situações de risco podem ser classificadas em:

- S1: descargas atmosféricas na estrutura;
- S2: descargas atmosféricas próximas à estrutura;
- 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.

Além disso, os danos podem ser classificados como:

- 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.

Sendo assim, cada dano pode produzir, em sequência, alguma perda. De acordo com a NBR 5419 – Parte 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), as perdas podem ser classificadas como:

- 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).

Com base nessa análise, a Tabela 1 fornece uma visão geral dos tipos de perdas resultantes dos danos causados pelas descargas atmosféricas, assim como os riscos associados a cada tipo de dano.

Tabela 1 - Tipos de perdas resultantes dos tipos de danos e os riscos correspondentes

Ponto de impacto	Fonte de dano	Tipo de dano	Tipo de perda
Estrutura	S1	D1	L1, L4 ^a
		D2	L1, L2, L3, L4
		D3	L1 ^b , L2, L4
Nas proximidades de uma estrutura	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
Linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas à estrutura	S3	D1	L1, L4 ^a
		D2	L1, L2, L3, L4
		D3	L1 ^b , L2, L4
Proximidades de uma linha elétrica ou tubulação metálica	S4	D3	L1 ^b , L2, L4
<p>a. Somente para propriedades onde pode haver perdas de animais</p> <p>b. Somente para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas nas quais falhas em sistemas internos colocam a vida humana diretamente em perigo.</p>			

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 5419: – Parte 1, (2015).

Conforme a NBR 5419 – Parte 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), o primeiro passo para o desenvolvimento de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas é realizar a análise de riscos. Nesse contexto, são definidos quatro tipos de riscos que devem ser avaliados para garantir a segurança da edificação e de seus ocupantes. Esses riscos são classificados da seguinte forma:

- 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.

Essas categorias ajudam a priorizar a implementação de medidas de proteção, dependendo do impacto potencial de cada tipo de risco para a edificação e suas funções.

2.2.2 CRITÉRIOS PARA A PROTEÇÃO DAS ESTRUTURAS

Conforme a NBR 5419:2015 – Parte 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), após a análise dos riscos associados à edificação, é necessário realizar uma análise mais detalhada para determinar a classe de proteção do sistema, que pode variar de I a IV. A classe I representa o nível mais alto de proteção, com maiores especificações, enquanto a classe IV é a mais básica, oferecendo um grau mínimo de proteção. Com base na classe de

proteção definida, os sistemas de proteção são escolhidos, podendo incluir:

- Subsistema de captação: Responsável pela coleta das descargas atmosféricas.
- Subsistema de descida: Conduz a energia captada até o sistema de aterramento.
- Subsistema de aterramento: Realiza a dispersão da energia no solo.
- Equipotencialização para descargas atmosféricas (EB): Garante que todos os pontos da edificação estejam no mesmo potencial elétrico, evitando diferenças de potencial.
- Isolação elétrica: Determina as distâncias de segurança necessárias para evitar o risco de choque elétrico.

Esses sistemas trabalham em conjunto para criar uma blindagem completa para a edificação, garantindo que as descargas atmosféricas sejam conduzidas de forma segura para o solo. A escolha e a combinação desses subsistemas dependem da classe de proteção da estrutura, e devem ser adaptados conforme as necessidades específicas do projeto.

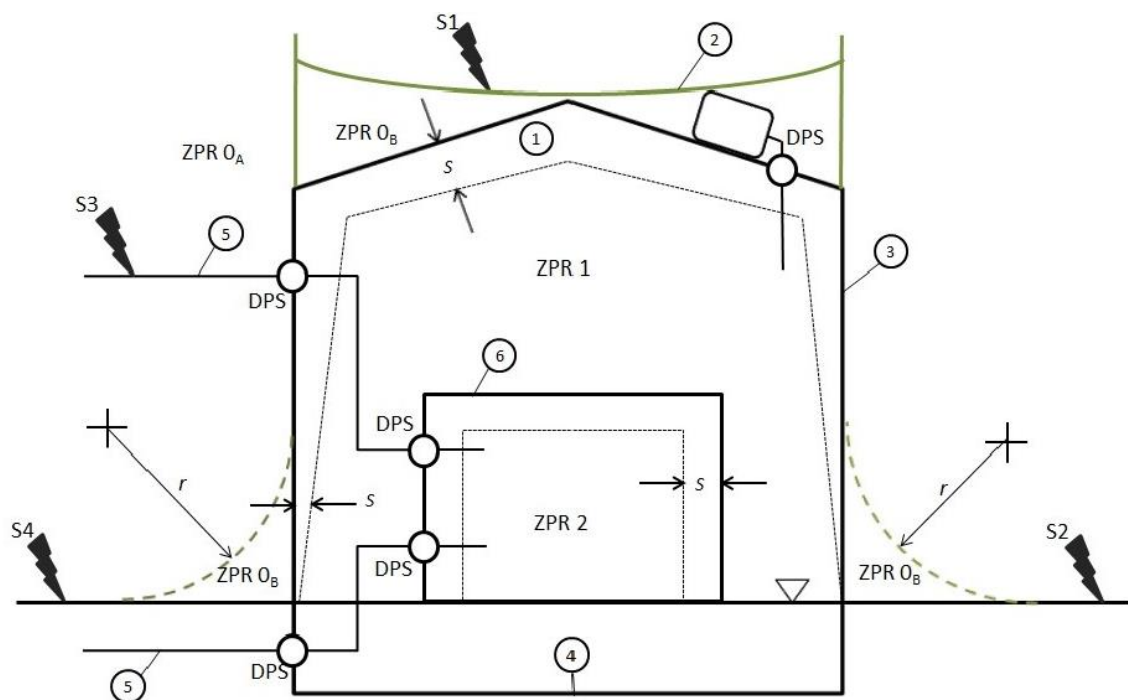
As medidas de proteção contra descargas atmosféricas (raios) são organizadas em zonas de proteção, conforme estabelecido pela NBR 5419 – Parte 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Essas zonas têm a função de delimitar as áreas onde os sistemas de proteção devem ser aplicados para mitigar os efeitos das descargas elétricas. As zonas são classificadas da seguinte maneira:

- ZPR 0_A: Zona onde a ameaça é provocada tanto pela queda direta do raio quanto pelo campo eletromagnético da descarga atmosférica. Os sistemas internos podem ser afetados pela corrente total ou parcial da descarga.
- ZPR 0_B: Zona protegida contra queda direta do raio, mas onde a ameaça é o campo eletromagnético. Os sistemas internos podem estar sujeitos a uma corrente parcial da descarga.
- ZPR 1: Zona onde a corrente de surto é limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pelo uso de interfaces isolantes e/ou Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) nas fronteiras. A blindagem espacial pode reduzir o impacto do campo eletromagnético.

- ZPR 2, ..., n: Zona onde a corrente de surto pode ser ainda mais limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de mais interfaces isolantes ou DPS. Uma blindagem adicional pode ser utilizada para atenuar ainda mais o campo eletromagnético.

Essas zonas são essenciais para o planejamento do sistema de proteção, determinando a extensão da blindagem e a necessidade de dispositivos adicionais, como DPS, em áreas mais vulneráveis. A Figura 4 pode ilustrar as zonas de proteção detalhadamente.

Figura 4 - ZPR definidas por um SPDA



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 5419 – Parte 1, (2015).

Em que:

- | | |
|---|---|
| 1 – Estrutura | S1 – descargas atmosféricas na estrutura |
| 2 – Subsistema de captação | S2 – descargas atmosféricas perto da estrutura |
| 3 – Subsistema de descida | S3 – descargas atmosféricas em linha ou tubulações que adentram na estrutura |
| 4 – Subsistema de aterramento | S4 – descargas atmosféricas perto de linhas ou tubulações que adentram na estrutura |
| 5 – Linhas e tubulações que adentram na estrutura | r – raio da esfera rolante |
| 6 – Recinto (Blindagem da ZPR2) | s – distância de segurança contra centelhamento perigoso |

○ – Ligação equipotencial por meio de DPS

▽ – Nível do piso

Um aspecto importante a ser destacado é que a ZPR 1 não está diretamente conectada ao sistema de proteção. Isso ocorre devido à distância de segurança contra centelhamento perigoso, que garante uma margem de segurança necessária para evitar o risco de falhas ou danos, como os centelhamentos.

Além disso, a figura demonstra claramente a divisão entre os sistemas externo e interno do SPDA, conforme discutido anteriormente. O sistema externo é responsável pela captação e direcionamento das descargas atmosféricas para o solo, enquanto o sistema interno visa proteger os circuitos elétricos e equipamentos eletrônicos contra as correntes induzidas e os campos eletromagnéticos gerados pelas descargas.

2.2.3 GERENCIAMENTO DE RISCOS

Conforme mencionado na seção 2.2.1, os riscos relacionados às descargas atmosféricas podem ser interpretados como valores médios de possíveis perdas anuais, medidos pela frequência e gravidade dos incidentes ocorridos nesse período. Esses riscos são determinados pela soma de seus componentes, agrupados de acordo com as fontes de dano e os tipos de perdas associadas.

De acordo com a NBR 5419 – Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Além dos quatro principais riscos já discutidos, destaca-se o conceito de Risco Tolerável. Esse parâmetro refere-se ao nível aceitável de risco, considerando a proteção contra perdas humanas, sociais ou culturais. Esses valores de referência são apresentados e categorizados conforme a Tabela 2, que serve como base para análises comparativas e decisões de projeto na aplicação do SPDA.

Tabela 2 - Valores típicos de risco tolerável R_T

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 da ABNT NBR 5419 – Parte 2, (2015).

Como mencionado anteriormente, os riscos são calculados pela soma das variantes que estes possuem, de acordo com a de acordo com a NBR 5419 – Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). O risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas, R_1 , pode ser calculado pela Equação 1.

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

O nível 1 (R_{C1}^1 , R_{M1}^1 , R_{W1}^1 , R_{Z1}^1) é utilizado exclusivamente em estruturas que apresentam risco de explosão, hospitais com dispositivos elétricos essenciais para salvar vidas, ou em outras edificações onde a falha imediata dos sistemas internos possa comprometer diretamente a segurança de vidas humanas.

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

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

$$R_4 = R_{A4}^2 + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4}^2 + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4} \quad (4)$$

Os níveis R_{A4}^2 e R_{U4}^2 são aplicados exclusivamente em propriedades onde a perda de animais pode ocorrer, garantindo proteção específica para evitar danos em situações que comprometam a segurança desses seres vivos.

As definições das variáveis relacionadas aos riscos de descargas atmosféricas, conforme descrito na NBR 5419 – Parte 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), são as seguintes:

- R_A – Componente gerada devido a tensões de passo e de toque em distâncias de até 3 m do lado de fora da estrutura: L1 para seres humanos e L4 para o caso de estrutura com animais;
- R_B – Componente relacionado com os danos físicos causados por possíveis centelhamentos que podem iniciar explosões. Podem ocorrer para todos os tipos de perdas: L1, L2, L3 e L4;
- R_C – Componente gerada devido à falha de sistemas internos causados por LEMPs (pulsos eletromagnéticos provenientes dos raios). Podem ocorrer perdas L2 e L4 em todos os casos e L1 quando há risco de explosões, ou em hospitais e estruturas que possuem os mesmos riscos;
- R_M – Falha de sistemas internos causada por LEMP;
- R_U – Relacionado a ferimentos por tensão de toque e passo dentro da estrutura;
- R_V – Danos físicos por incêndio ou explosão devido ao centelhamento;
- R_W – Falhas de sistemas internos por sobretensões que são induzidas nas linhas que alimentam a parte interna da estrutura;

- RZ – Falhas de sistemas internos por sobretensões que são induzidas nas linhas que alimentam a parte interna da estrutura com risco de explosão ou hospitais e outras estruturas com riscos de vida por falha de sistemas internos.

De acordo com a NBR 5419 – Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), cada componente de risco R_A , R_B , R_C , R_M , R_U , R_V , R_W e R_Z , pode ser expressa de acordo com a Equação 5.

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

Em que:

N_X : número de eventos perigosos por ano (ver Anexo A da NBR 5419:2015 – Parte 2);

P_X : probabilidade de dano à estrutura (ver Anexo B da NBR 5419:2015 – Parte 2);

L_X : perda consequente (ver Anexo C da NBR 5419:2015 – Parte 2).

O número de eventos perigosos relacionados a descargas atmosféricas depende de fatores como a densidade de descargas atmosféricas provenientes da nuvem para a terra, as características físicas da estrutura a ser protegida, e outros elementos relacionados ao ambiente. A probabilidade de dano à estrutura é influenciada pela natureza da edificação, pelas medidas de proteção existentes, e pela proximidade de linhas de transmissão. Já as perdas consequentes variam conforme o uso da estrutura, frequência de ocupação, tipo de serviço, e o valor dos bens protegidos.

Conforme a NBR 5419 – Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), a escolha das medidas de proteção deve considerar a contribuição de cada componente de risco no risco total e também os aspectos técnicos e econômicos:

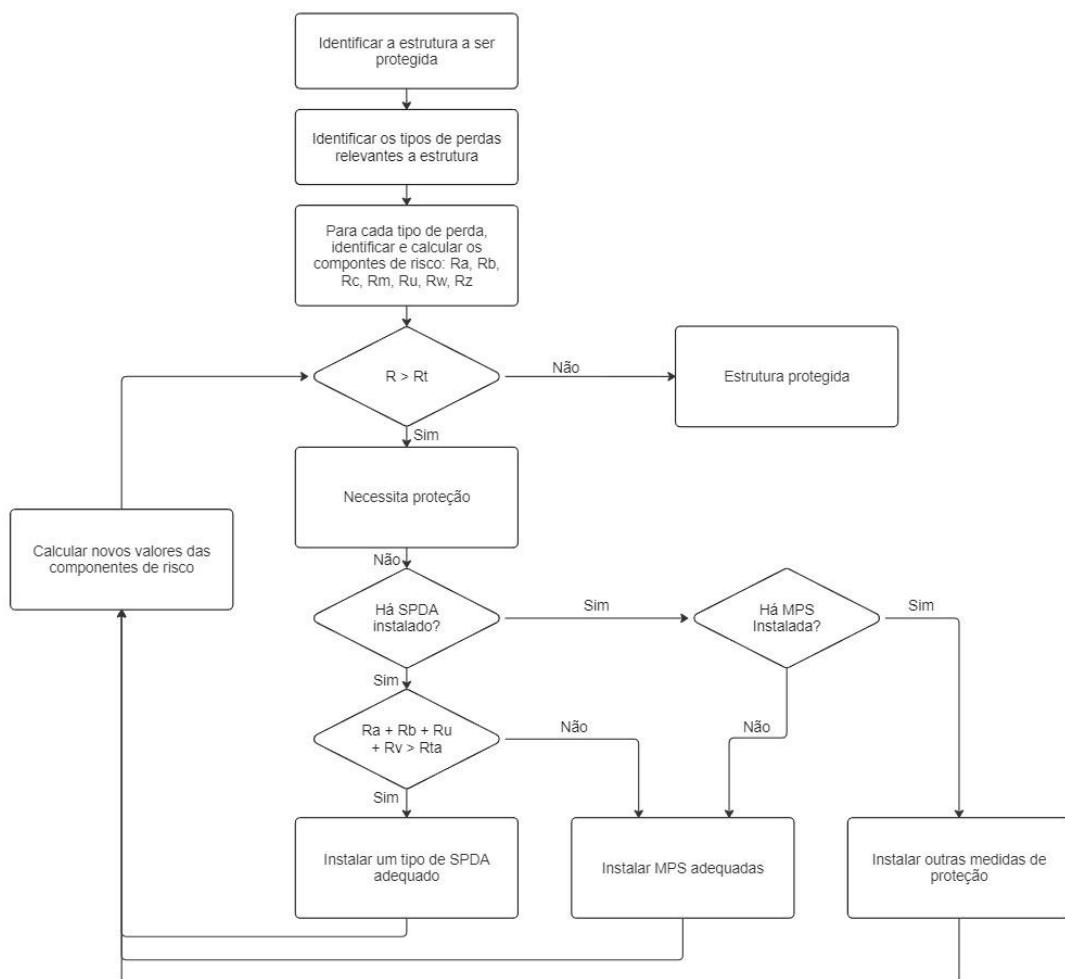
A seleção da maioria das medidas de proteção adequadas deve ser feita pelo projetista de acordo com a participação de cada componente de risco no risco total R e de acordo com aspectos técnicos e econômicos das diferentes medidas de proteção. NBR 5419 – Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015, p. 24).

Através dos parâmetros discutidos, a análise da necessidade de proteção é fundamental para determinar as medidas mais adequadas para cada estrutura. O diagrama mostrado na Figura 5, ilustra um procedimento simplificado que ajuda na avaliação dos riscos e nas decisões sobre a inclusão ou não de medidas de proteção. Esse diagrama orienta o projetista a seguir um fluxo de análise conforme o tipo e as características da edificação, garantindo que as medidas

adotadas sejam adequadas para mitigar os riscos de descargas atmosféricas e outros fatores envolvidos.

Esse procedimento assegura que as etapas de análise, de acordo com as especificidades de cada projeto, resultem em uma solução eficiente e ajustada às necessidades de proteção da estrutura.

Figura 5 - Procedimento para decisão da necessidade de proteção



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 5419 – Parte 2, (2015).

Ademais, para realizar a avaliação dos componentes de risco, deve-se considerar o número de eventos perigosos (N) e a probabilidade de danos (P). Esses parâmetros são detalhados no Anexo A e Anexo B da NBR 5419 – Parte 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), respectivamente. A escolha de um maior número de parâmetros permite uma análise mais precisa e aperfeiçoada do risco. Além disso, é necessário avaliar os componentes de risco para cada tipo de descarga, como S1, S2, S3 e S4, conforme orientações presentes na mesma norma.

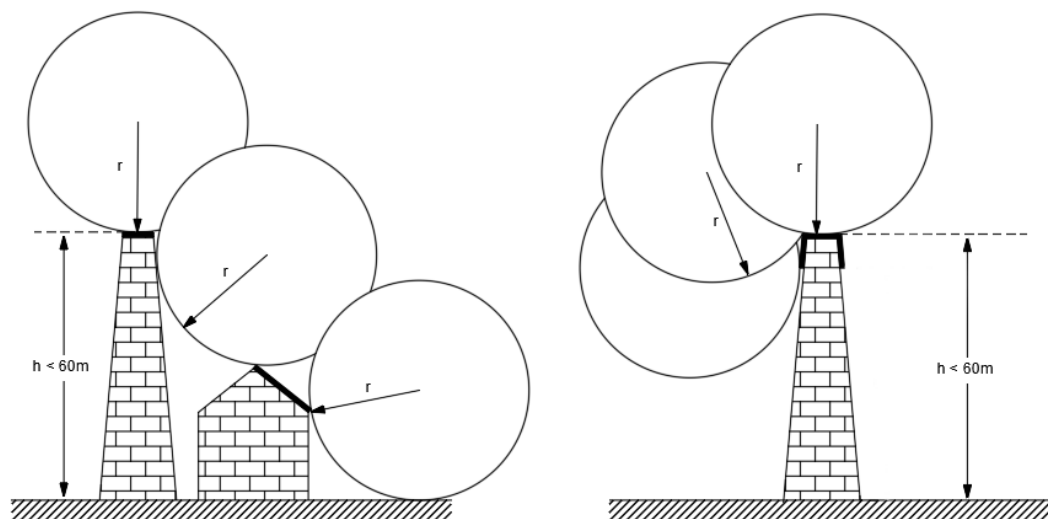
As medidas de proteção devem ser adotadas para reduzir o risco de danos, sendo consideradas efetivas quando atendem aos requisitos das normas NBR 5419 – Parte 3 e 4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), que tratam das especificações para a proteção contra descargas atmosféricas e as condições para a proteção dos sistemas internos e externos das edificações.

2.3 MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO

Esse método de posicionamento do subsistema de captação é baseado na utilização de uma esfera fictícia que "rola" sobre a estrutura. O conceito é garantir que todos os pontos tocados por essa esfera, que tem um raio r , sejam adequadamente protegidos pelo sistema de captação. O valor do raio r é determinado conforme a Tabela 3 da NBR 5419 – Parte 3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Essa técnica é fundamental para garantir que a estrutura esteja completamente protegida contra descargas atmosféricas, considerando os diferentes níveis de proteção exigidos para cada tipo de construção.

Esse processo é uma aplicação prática que assegura que todas as partes vulneráveis da edificação, especialmente aquelas mais suscetíveis a danos de descargas diretas, sejam protegidas adequadamente, conforme as normas de segurança estabelecidas.

Figura 6 - Projeto do subsistema de captação utilizando o método da esfera rolante



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 5419 – Parte 3, (2015).

Tabela 3 - Valores do raio (r) da esfera

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

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 5419 – Parte 3, (2015).

Conforme mostrado na Figura 6, a análise do posicionamento do subsistema de captação deve considerar os pontos de impacto direto possíveis, onde a esfera toca a superfície da estrutura. Na estrutura da esquerda, isso resulta em três pontos de captação, enquanto na estrutura da direita, o raio de 60 metros ainda permite que a esfera toque as laterais, indicando que essas áreas também necessitam de proteção.

Esses pontos são cruciais para garantir que todas as áreas vulneráveis sejam adequadamente protegidas contra descargas atmosféricas. O estudo de cada estrutura deve ser feito de maneira personalizada, considerando as dimensões e características específicas da edificação. Dessa forma, a localização e a quantidade de pontos de captação devem ser ajustadas de acordo com os parâmetros do SPDA e o risco de impacto direto, sempre buscando a cobertura completa da estrutura.

2.4 SOFTWARES PARA PROJETO

Os *softwares* de projeto desempenham um papel crucial na elaboração e execução de projetos elétricos, incluindo os SPDA. Entre as opções mais utilizadas, destacam-se o PRÓ-Elétrica e o AutoCAD, ambos essenciais para garantir que os projetos atendam às normas técnicas vigentes, como a ABNT NBR 5419.

2.4.1 AUTOCAD

O AutoCAD, criado pela Autodesk, é um *software* amplamente utilizado para a implementação de projetos de design 2D e 3D. Ele é fundamental para a criação de desenhos técnicos, sendo amplamente adotado para garantir precisão nas dimensões e nas modelagens, seja para arquitetura, engenharia ou design de produtos. Entre suas funcionalidades, destacam-se a possibilidade de mover, copiar, espelhar e esticar elementos, além de permitir a criação e a utilização de blocos para otimizar o desenho. O AutoCAD também permite importar bibliotecas externas e realizar anotações, medições de dimensões e até mesmo inserir tabelas. Outro ponto

forte do *software* é sua alta compatibilidade com diversos formatos de arquivos, como DWG, DXF e PDF.

A flexibilidade do AutoCAD para criar desenhos tanto em duas dimensões (2D) quanto em três dimensões (3D) o torna uma das principais escolhas, especialmente pela variedade de ferramentas e pela longa trajetória no mercado. Sua capacidade de gerar múltiplas vistas e a compatibilidade com diversas plataformas e formatos de arquivos reforçam sua posição como uma das melhores alternativas para o desenvolvimento de projetos complexos.

2.4.2 PRÓ-ELÉTRICA

PRÓ-Elétrica é um *software* da Multiplus desenvolvido para facilitar a elaboração de projetos elétricos, incluindo os de SPDA. Ele oferece ferramentas que garantem conformidade com as normas brasileiras, como a NBR 5410 e a NBR 5419, entre outras, fundamentais para a segurança e qualidade do projeto. O *software* opera no ambiente CAD, o que permite a integração com os desenhos arquitetônicos existentes, proporcionando uma maneira mais eficiente e precisa de compatibilizar os projetos elétricos com os demais elementos da construção. Esse processo contribui para um fluxo de trabalho otimizado, tornando a elaboração dos projetos mais eficaz.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os processos, aplicativos e materiais utilizados para o desenvolvimento do projeto. Serão detalhadas as ferramentas tecnológicas aplicadas, como o uso de *softwares* específicos, e os materiais empregados para garantir a conformidade com as normas e a eficácia do projeto.

3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PARA O ESTUDO

Primeiramente, foi feita a escolha de uma estrutura esférica como a base do projeto de SPDA. Para isso, foi necessário realizar um estudo das estruturas existentes no Estado de São Paulo, sendo que, após esse levantamento, optou-se por uma edificação pública parcialmente pronta, o que permitiu obter os projetos arquitetônicos necessários para o desenvolvimento do trabalho. A edificação selecionada está localizada na Avenida Elísio Teixeira Leite, na cidade de São Paulo, um local estrategicamente escolhido por sua relevância urbana e por ser uma área em pleno desenvolvimento.

Ademais, a escolha desse local se deu pela sua visibilidade e acessibilidade, aspectos fundamentais para a execução do projeto e para a implementação de um sistema de proteção eficaz. A área também apresenta um terreno com características que possibilitam um estudo mais profundo sobre os desníveis, o que contribui para a definição do melhor posicionamento do SPDA. Outro ponto importante foi que a estrutura está situada em um ponto alto da cidade onde há alta concentração de edificações, portanto, um risco maior de descargas atmosféricas, o que tornou ainda mais necessário o desenvolvimento de um projeto de SPDA eficiente. Além disso, a proximidade com outras estruturas públicas e comerciais permitiu a análise do impacto do sistema de proteção na segurança geral da região, garantindo que o projeto estivesse alinhado com as normas e diretrizes para áreas urbanas de alto tráfego.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE AUTOCAD

Após a escolha do local e da estrutura, a edificação foi implementada no software AutoCAD, o que possibilitou a obtenção do desenho e dos cortes do projeto, auxiliando na criação do projeto elétrico. Com o uso do AutoCAD, foi possível visualizar a estrutura a partir de diferentes vistas e perspectivas, proporcionando um entendimento mais completo de seu layout. Durante essa etapa, foi realizada toda a adequação do projeto às medidas reais, o que

garantiu a precisão do projeto arquitetônico final. Este, por sua vez, foi utilizado como base para a construção do projeto de SPDA, assegurando que todos os parâmetros do sistema de proteção estivessem de acordo com as especificações e necessidades da edificação.

3.3 PROJETO DE SPDA

Para a construção do projeto de SPDA, foi realizada a análise da estrutura, utilizando o método Eletrogeométrico, que é adequado para o tipo esférico da edificação em questão. Este método foi escolhido por sua capacidade de lidar com a geometria complexa de estruturas esféricas, que não permite a aplicação de métodos convencionais. Utilizando os cortes da estrutura, o método Eletrogeométrico foi empregado para projetar uma esfera fictícia de raio de 30 metros (correspondente à Classe II de proteção), "rolando" por cima da edificação. A interação entre a esfera e a estrutura foi mapeada, com todos os pontos de contato identificados como locais de possível impacto direto das descargas atmosféricas.

Esses pontos de encontro foram fundamentais para determinar onde foram posicionados os captosres, responsáveis por captar a descarga atmosférica. A altura e a localização de cada captor foram definidas com base na análise da área de cada ponto, podendo variar conforme as características específicas de cada seção da edificação. Essa abordagem permitiu otimizar a proteção da estrutura, garantindo a eficiência do sistema de SPDA e a minimização dos riscos associados a descargas atmosféricas.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a execução do projeto, foi realizado um levantamento detalhado da estrutura, utilizando uma combinação de ferramentas de medição precisas. O levantamento in loco foi feito com trenas a laser, que permitiram a obtenção de medidas precisas da edificação. Além disso, foram utilizados outros instrumentos como réguas, receptores, níveis a laser e piquetes para garantir a exatidão do mapeamento. Também foi necessária a análise do solo, utilizando os materiais adequados para verificar as condições do terreno e garantir que as fundações do sistema de SPDA fossem projetadas de forma segura e eficaz.

Nas etapas subsequentes, foi utilizado um computador capaz de executar os softwares, cujas configurações são:

Processador: AMD Ryzen 7 2700X Eight-Core Processor – 3.70 GHz

Placa de vídeo: NVIDIA GeForce GTX 1060 – 6GB

Memória RAM: 2x Corsair CL16 – DDR4

Placa mãe: X470 Aorus Ultra Gaming

Fonte: Corsair CX500 – 500W

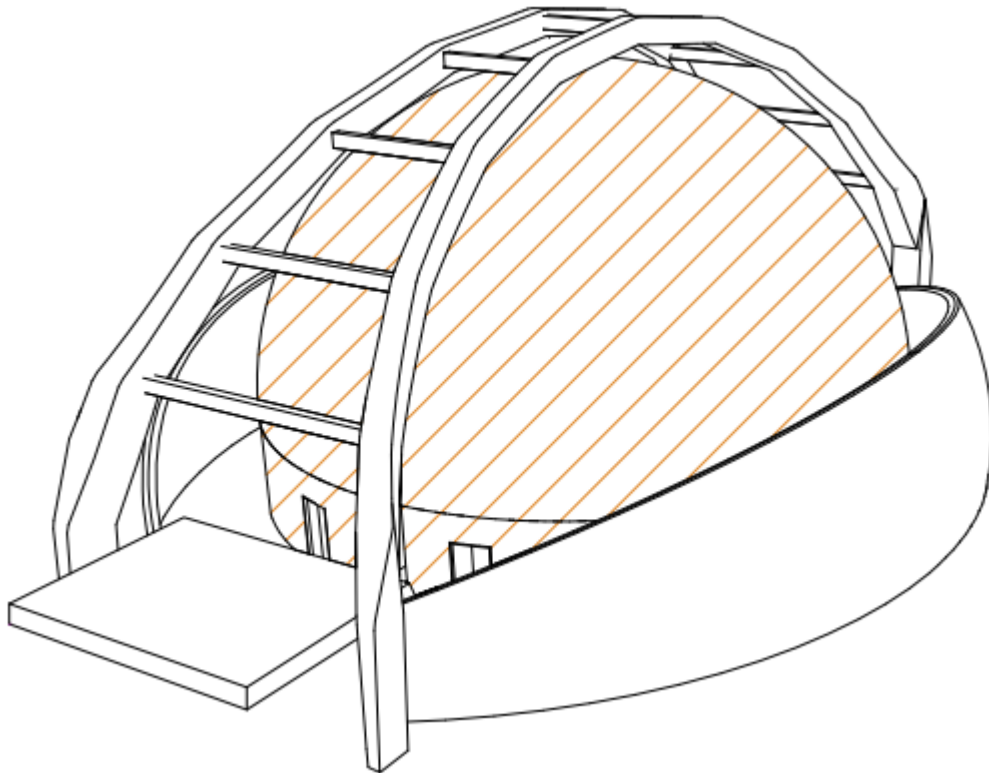
Armazenamento: Kingston SA1000M8240G – 240GB

Estes softwares foram utilizados para desenhar e ajustar a estrutura de acordo com as necessidades técnicas e de segurança, facilitando a integração dos dados coletados no levantamento com as ferramentas de projeto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do modelo da estrutura esférica, verificou-se que esta é composta por duas partes distintas: uma parte externa, representada pela superfície branca, e uma parte interna, com acabamento chanfrado. A parte externa foi construída em concreto, enquanto a parte interna é formada por uma estrutura metálica revestida com lona tensionada. Dessa forma, a proteção contra descargas atmosféricas foi projetada para cobrir a parte externa, que funciona como um envoltório para a parte interna. Essa divisão e o posicionamento das partes podem ser visualizados na Figura 7.

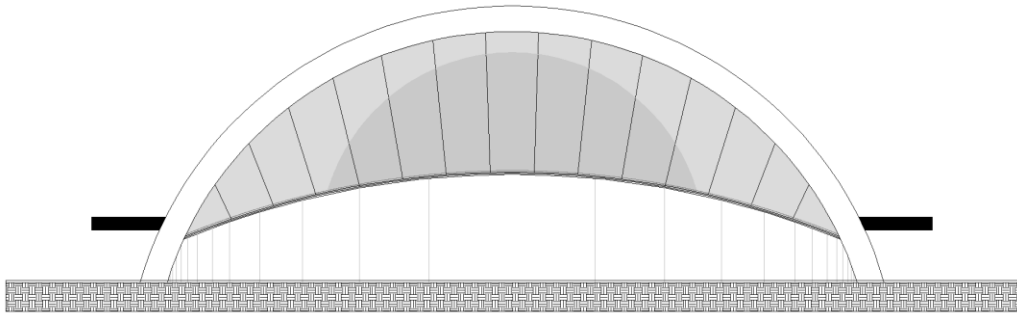
Figura 7 - Estrutura interna e externa do planetário



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

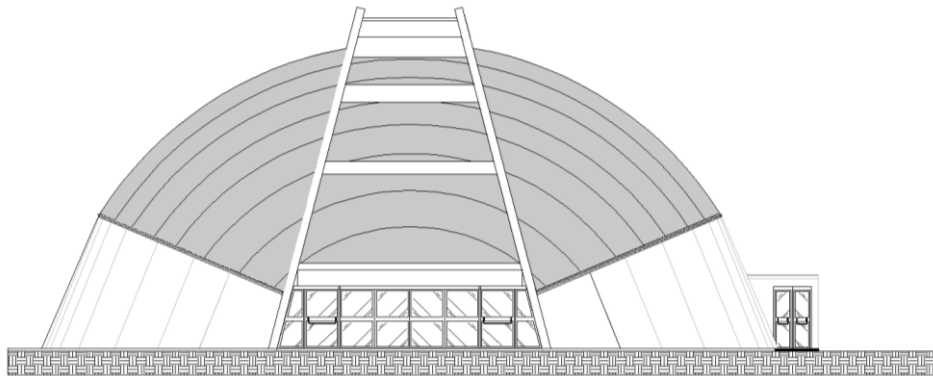
A partir da análise da imagem, foi possível criar uma perspectiva detalhada de ambos os lados da estrutura. A Figura 8 apresenta a vista lateral, enquanto a Figura 9 retrata a vista frontal. Essas representações permitem uma melhor visualização das características arquitetônicas e estruturais da edificação, proporcionando uma base sólida para o planejamento e a execução das etapas subsequentes do projeto.

Figura 8 - Vista lateral do planetário



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

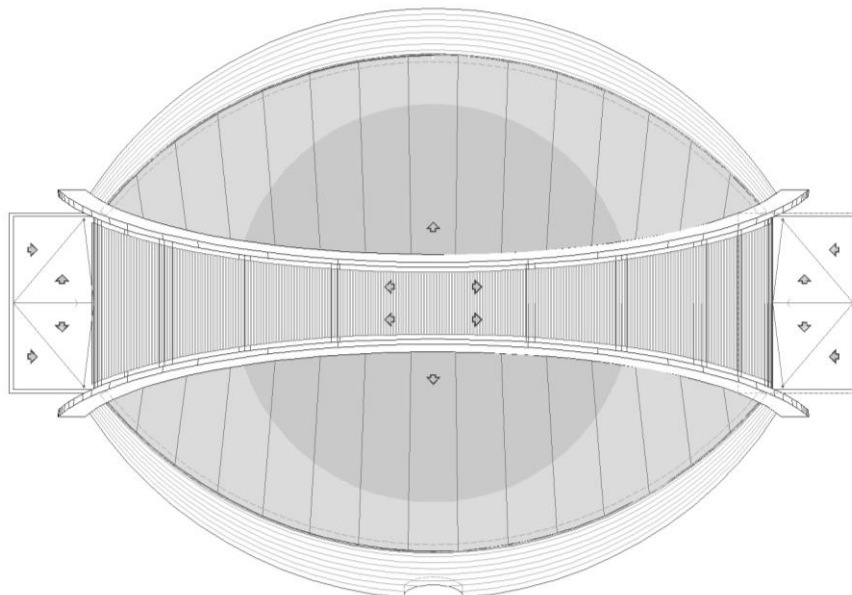
Figura 9 - Vista frontal do planetário



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Também, foi possível criar a planta baixa, vista 2D do projeto, conforme representado na Figura 10.

Figura 10 - Planta Baixa

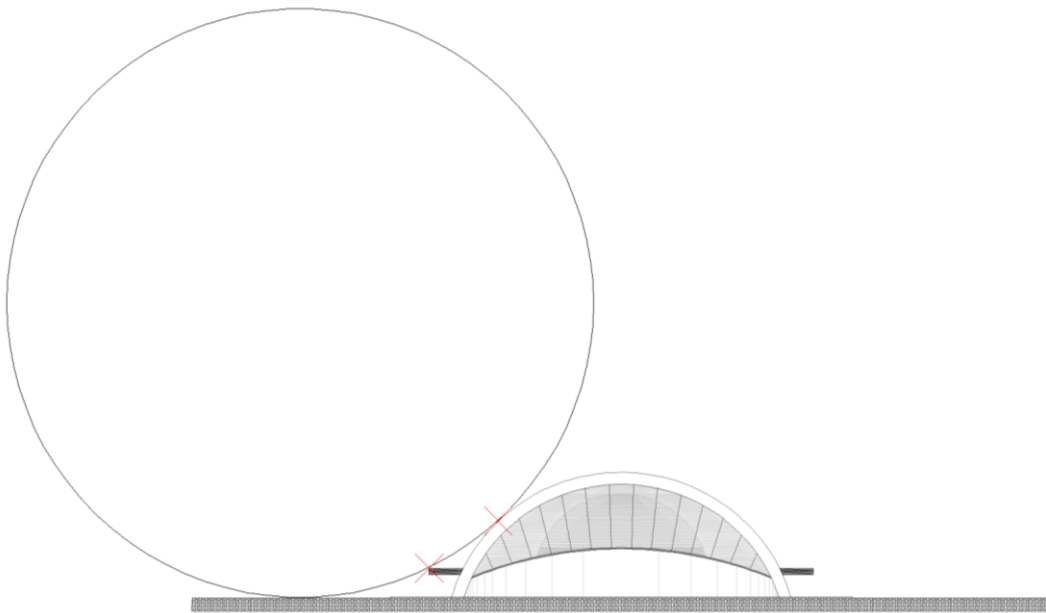


Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Com base nessas duas perspectivas, aplicou-se o método Eletrogeométrico, utilizando esferas fictícias com raio de 30 metros, em conformidade com a Classe II da estrutura (analisada anteriormente na Tabela 3). A escolha pela Classe II foi fundamentada no fato de que essa classificação atende adequadamente às características e riscos associados à estrutura em questão, considerando sua função, localização, os critérios de proteção necessários para garantir a segurança contra descargas atmosféricas e que não apresentam risco extremo de explosão, mas que ainda precisam de proteção robusta.

As esferas foram projetadas considerando a relação entre a edificação e o solo, o que permitiu identificar os pontos de contato entre as esferas fictícias e a estrutura. Esses pontos indicam as áreas críticas que demandam a instalação de captores ou mini captores, garantindo a proteção eficaz contra descargas atmosféricas. O resultado da projeção da primeira esfera está ilustrado na Figura 11, evidenciando as áreas específicas de atenção na estrutura.

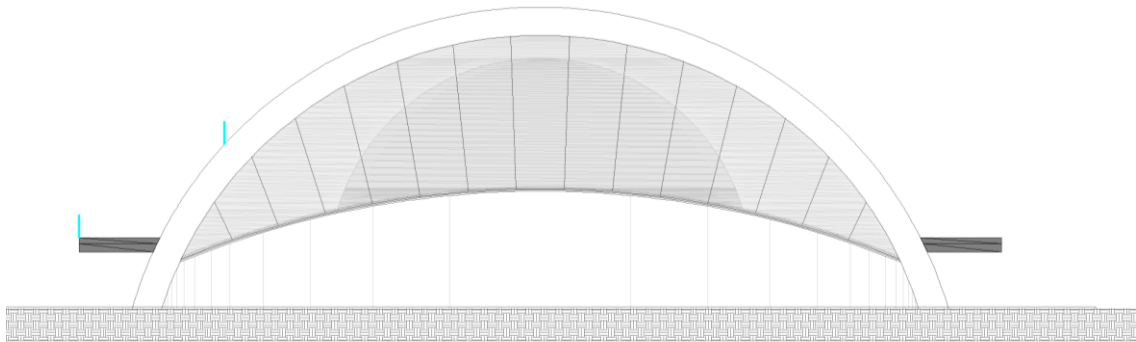
Figura 11 - Realização do Método Eletrogeométrico na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Com base nos pontos de contato identificados entre as esferas fictícias e a estrutura, determinou-se a proteção adequada utilizando Captores e/ou Mini Captores. Esses dispositivos foram distribuídos estrategicamente nos locais onde a esfera toca a estrutura, cobrindo todos os pontos críticos. Na Figura 12, apresenta-se a disposição resultante, onde os captores estão indicados em azul, com dimensões de aproximadamente 1 metro na escala real, sendo escolhidos pela praticidade na instalação. Essa distribuição visa assegurar a cobertura total das áreas vulneráveis, garantindo a proteção eficiente da edificação contra descargas atmosféricas.

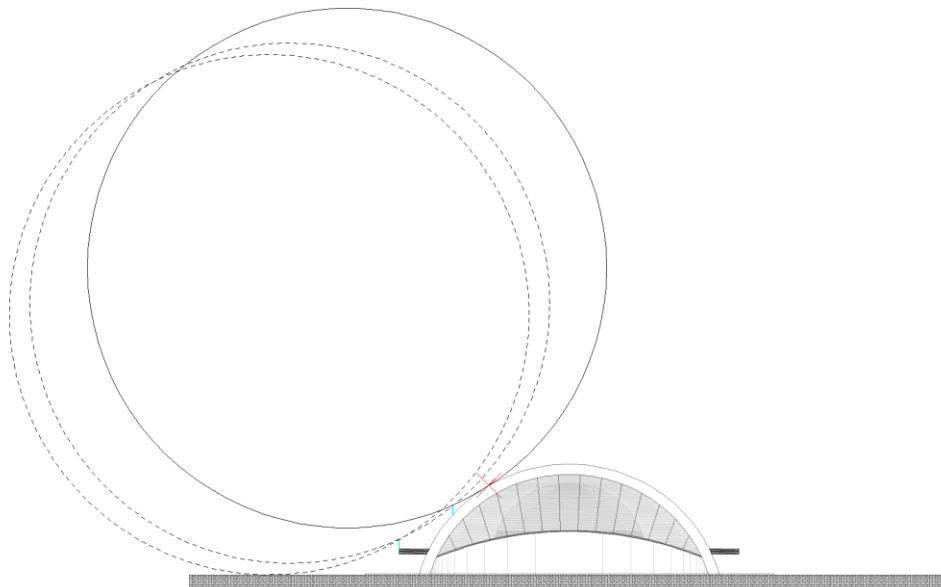
Figura 12 - Alocação dos primeiros captosres na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Com base na posição dos primeiros captosres já determinados, foi possível projetar a próxima esfera fictícia. Essa nova projeção foi ajustada considerando os pontos de encontro adicionais entre a esfera e a estrutura, de forma a identificar novas áreas que requerem proteção. O resultado dessa projeção está ilustrado na Figura 13, onde a nova área de contato foi marcada para indicar o local que demanda a instalação de captor ou mini captor, garantindo uma cobertura completa e eficaz da edificação contra descargas atmosféricas.

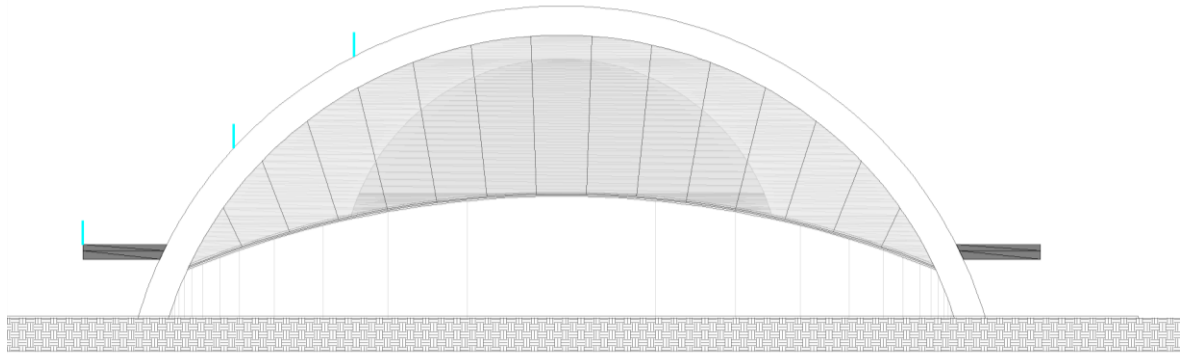
Figura 13 – Etapa 2 do Método Eletrogeométrico na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Com esse novo ponto de deslocamento da esfera, uma nova área de contato foi identificada entre a esfera e a estrutura, exigindo a instalação de mais um captor para garantir a cobertura completa. A distribuição dos captosres foi ajustada conforme esses novos pontos de encontro, resultando na configuração mostrada na Figura 14, onde o novo captor é adicionado na área de contato adicional.

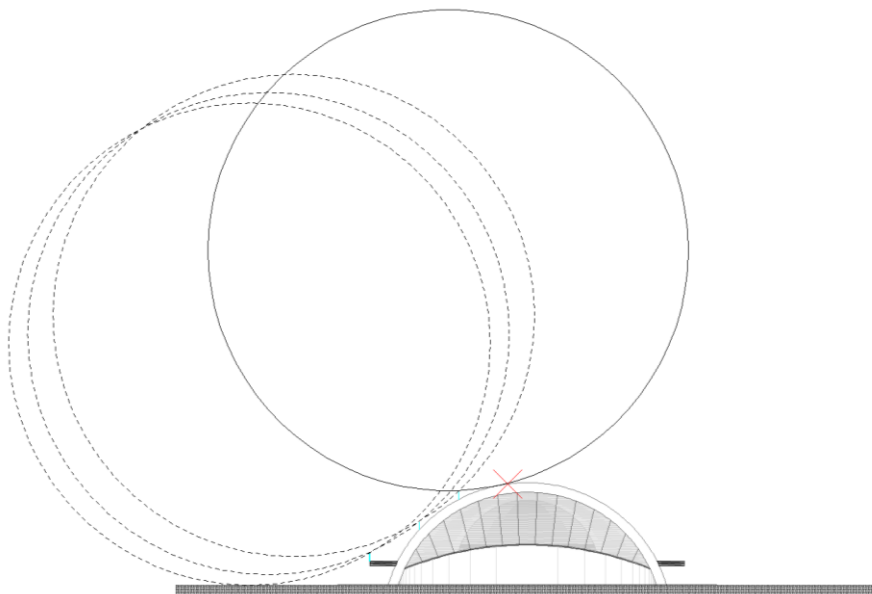
Figura 14 - Realocação dos captores na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Seguindo com a projeção da esfera, o próximo ponto de contato identificado ocorre próximo ao topo da estrutura, conforme apresentado na Figura 15. Este ponto de contato exige a colocação de mais um captor, para garantir a continuidade da proteção da edificação contra descargas atmosféricas. Dessa forma, a distribuição dos captores foi ajustada para cobrir todos os pontos críticos da estrutura, assegurando a eficiência do sistema de SPDA.

Figura 15 – Etapa 3 do Método Eletrogeométrico na vista lateral

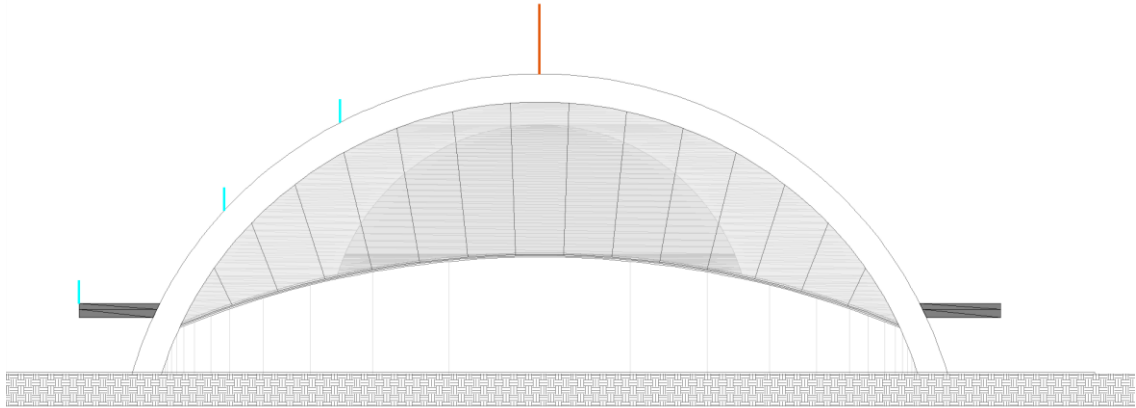


Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Devido à proximidade com o topo da estrutura e à necessidade de maior cobertura nesse ponto, em virtude de sua posição elevada, utilizou-se um captor de maior altura. Este captor, com 3 metros na escala real, foi selecionado com base nas dimensões comerciais disponíveis. Sua altura elevada se justifica por ser o ponto mais alto da estrutura, local de maior atração das descargas atmosféricas. Assim, garantiu-se uma proteção mais abrangente, e, por ser mais alto, o captor atrai um maior número de descargas, desempenhando o papel de captor principal da

estrutura. A posição desse captor pode ser observada na Figura 16, onde ele está devidamente posicionado para cobrir a área crítica da edificação.

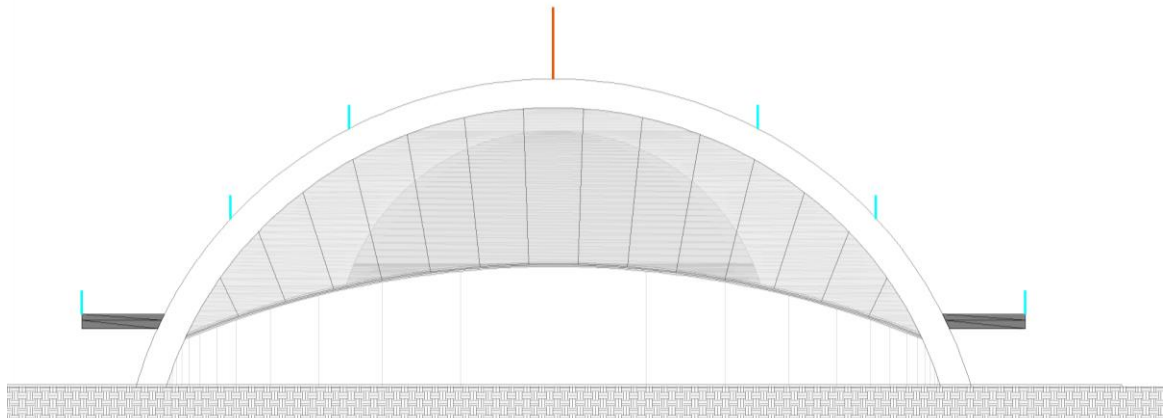
Figura 16 - Alocação do captor principal na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Por se tratar de uma estrutura esférica, foi possível espelhar a posição dos captores para o outro lado, aproveitando a simetria da forma. Essa abordagem foi viável devido à particularidade da estrutura, que permite a duplicação das posições dos captores, mantendo a mesma proteção para ambos os lados.

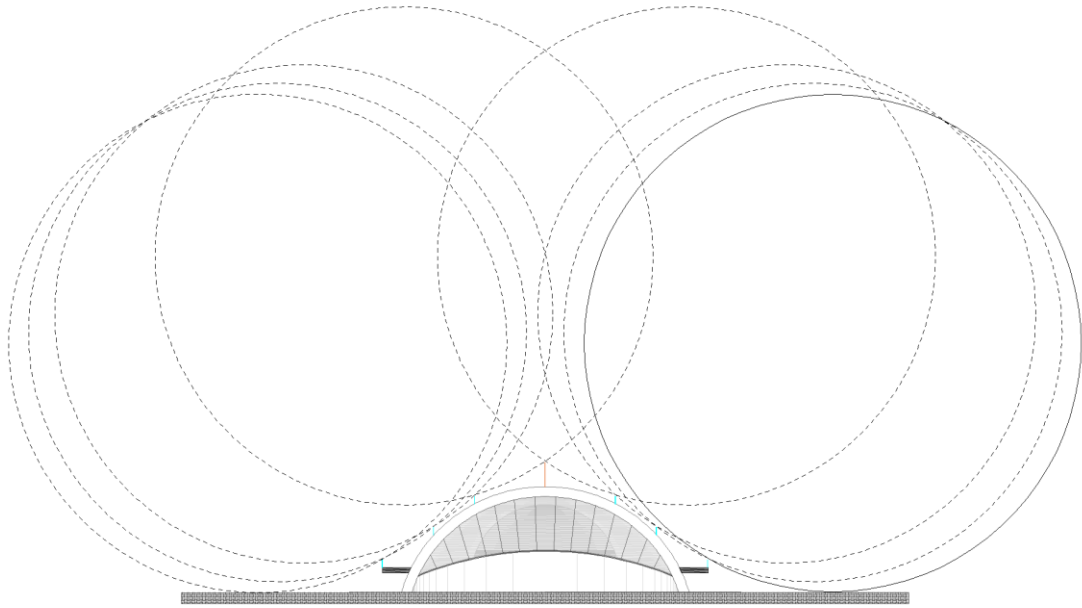
Figura 17 – Alocação resultante dos captores na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Após a alocação dos captores, foi necessário realizar uma nova projeção das esferas para garantir que todos os pontos de contato entre a esfera e a estrutura fossem adequadamente cobertos. Esse processo assegura que a distribuição dos captores seja eficaz e que não existam áreas desprotegidas, mantendo a segurança contra descargas atmosféricas. O resultado final, após essa revisão, pode ser visualizado na Figura 18, onde se evidencia a cobertura completa da estrutura pelos captores, ajustada de acordo com as projeções das esferas.

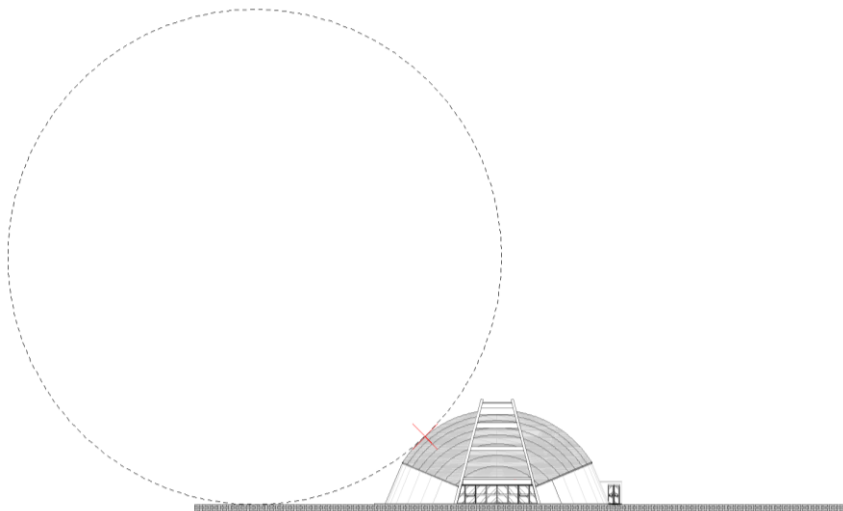
Figura 18 - Verificação do posicionamento dos captosres na vista lateral



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Esse passo foi crucial para validar o sistema de proteção, garantindo que todos os pontos críticos fossem devidamente protegidos. Para a perspectiva frontal, seguiram-se as mesmas etapas de projeção das esferas, de modo que se obteve o primeiro ponto de intersecção entre a esfera e a estrutura. Esse ponto foi crucial, pois definiu a necessidade de instalação de captosres para a proteção da área. A localização do primeiro ponto de intersecção está ilustrada na Figura 19, onde é possível visualizar o posicionamento inicial dos captosres conforme a projeção da esfera sobre a estrutura, garantindo uma cobertura eficaz para o SPDA.

Figura 19 - Realização do Método Eletrogeométrico na vista frontal

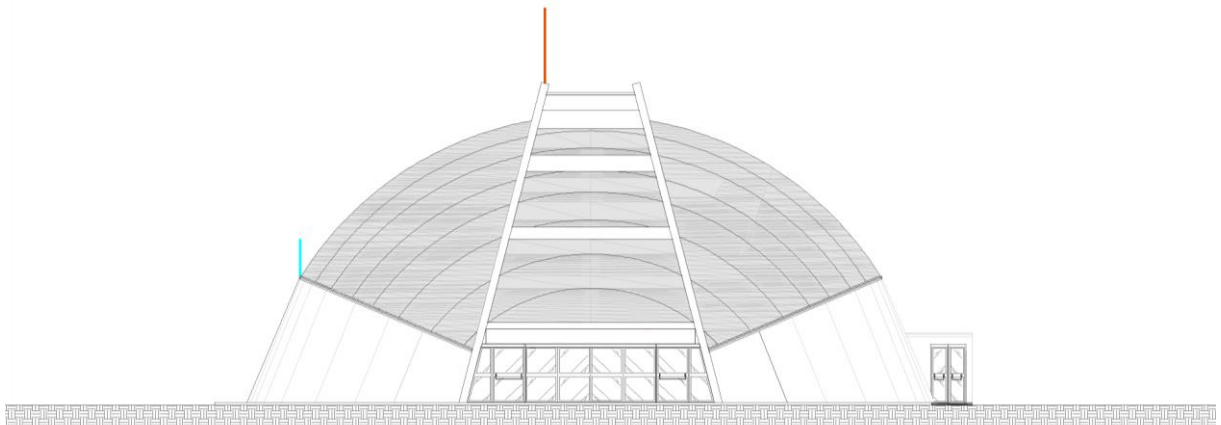


Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

A estrutura em questão apresentou uma particularidade importante relacionada ao uso de lona tensionada em sua construção. Nesse caso, o ponto de encontro da esfera e da estrutura coincidiu com uma área onde não foi possível fixar um captor devido à natureza do material. Por conta disso, a alocação do captor foi transferida para um ponto anterior, onde há a presença de concreto, permitindo a fixação adequada do dispositivo. O posicionamento resultante foi ajustado para garantir a eficácia da proteção, conforme demonstrado na Figura 19. Ademais, na vista frontal, os captores indicados em azul possuem dimensões aproximadas de 1,5 metros na escala real. Essa dimensão foi definida considerando a localização de instalação, permitindo uma cobertura mais ampla. A escolha dessa altura visou cobrir integralmente a área da lona tensionada, garantindo a proteção completa e eficaz contra descargas atmosféricas.

Além disso, vale ressaltar que já foi feita a alocação de um captor no topo da estrutura, conforme o estudo anterior, observado na Figura 16. Esse captor deverá ser considerado na análise final, garantindo uma proteção integral. Também, devido à mesma restrição da lona tensionada, a instalação de captores no centro da estrutura não foi viável. Para contornar isso, o captor mais alto foi reposicionado em uma área do concreto, onde a fixação foi possível, e os novos posicionamentos de captor foram ajustados conforme as possibilidades de fixação e a viabilidade de instalação, como mostrado na Figura 19.

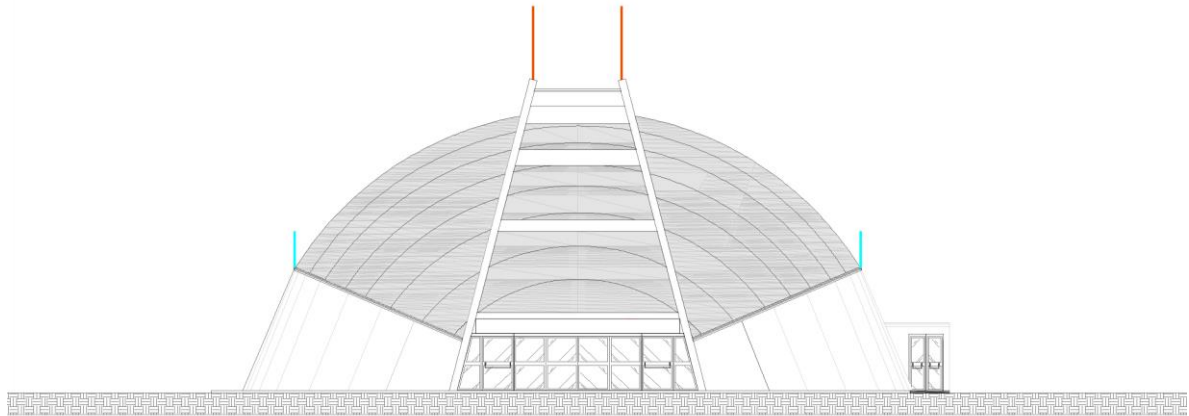
Figura 20 - Alocação dos captores na vista frontal



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Como a estrutura esférica possui a particularidade de ser simétrica, aplicou-se o espelhamento das posições dos captores para o lado oposto. Esse espelhamento permitiu a otimização da proteção, assegurando que a cobertura contra descargas atmosféricas fosse efetiva e igual em todos os pontos críticos. O posicionamento final dos captores no lado oposto seguiu as mesmas diretrizes estabelecidas no lado inicial, conforme observado na Figura 20.

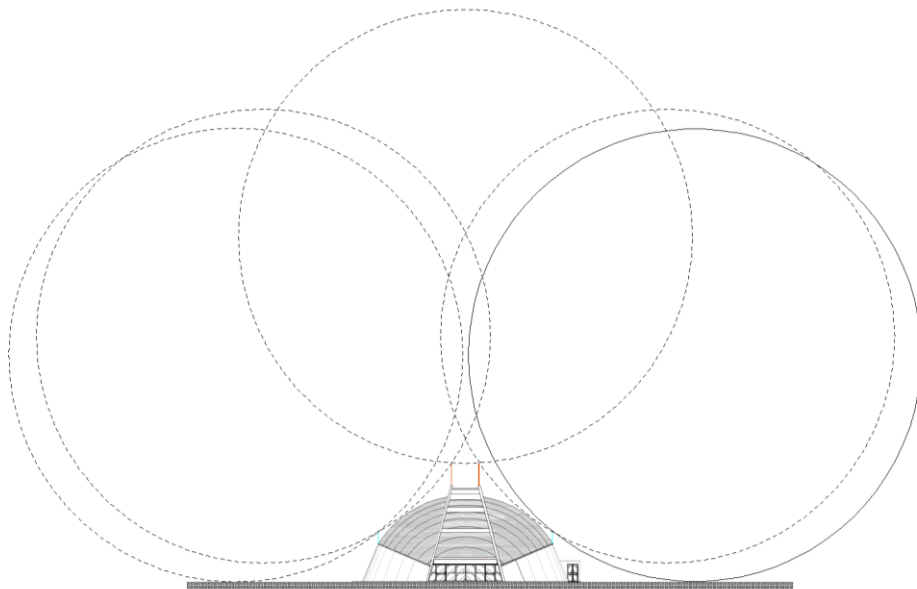
Figura 21 – Alocação resultante dos captores na vista frontal



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Agora, para garantir que toda a estrutura fosse adequadamente protegida, foi necessário verificar se o posicionamento dos captores, conforme a projeção das esferas, abrangeu todas as áreas críticas. Com base nessa análise, obteve-se o resultado conforme ilustrado na Figura 21. Esse procedimento assegurou que todas as áreas de risco da estrutura estivessem cobertas, e que os captores estivessem posicionados de maneira eficiente para garantir a proteção contra descargas atmosféricas, levando em conta os pontos de interseção das esferas com a edificação.

Figura 22 - Verificação do posicionamento dos captores na vista frontal



Fonte: adaptado de Prefeitura de São Paulo, (2024).

Com o subsistema de captação definido por meio do Método das Esferas Rolantes, o próximo passo para a conclusão do sistema de proteção contra descargas atmosféricas foi o cálculo e a definição dos subsistemas de descida e de aterramento. Para realizar esses cálculos, foi possível optar por métodos manuais ou utilizar softwares especializados, sendo que, para

este projeto, foi escolhido o software PRÓ-Elétrica, desenvolvido pela Multiplus. O PRÓ-Elétrica facilitou a obtenção de resultados detalhados, levando em consideração todos os fatores que impactaram o cálculo das variáveis necessárias para a determinação do sistema de aterramento e de descida da estrutura.

Dessa forma, o software gerou um relatório de cálculos que incluiu os parâmetros fundamentais, como resistividade do solo, a distribuição das descidas, o dimensionamento do aterramento e a eficiência dos componentes do sistema, garantindo que o projeto estivesse conforme as normas e exigências técnicas. Portanto, segue o relatório gerado pelo software, que incluiu o cálculo dos sistemas de aterramento e de descida, além de confirmar que a estrutura estava adequadamente protegida com os pontos de alocação dos captos definidos.

A) Para o cálculo da Densidade e descargas atmosféricas para a terra [Ng], foi necessário considerar a média anual de descargas na região da estrutura. No caso da estrutura em questão, que está localizada na cidade de São Paulo, o valor de Ng pôde ser obtido a partir de estudos regionais sobre a ocorrência de raios, como dados fornecidos por institutos meteorológicos e estudos específicos para a área de atuação do SPDA.

$$Ng = 10 [Descargas / km^2/ano]$$

Esse valor de Ng foi utilizado nos cálculos do sistema de proteção para garantir que o projeto levasse em conta a quantidade esperada de descargas elétricas, adequando a necessidade de captos, descidas e aterramentos de acordo com a intensidade de descargas na área.

B) Na etapa de cálculo da geometria da estrutura, foi necessário determinar as dimensões da edificação para calcular a área de exposição às descargas atmosféricas, essencial para o cálculo da área equivalente de exposição (Ad).

$$\text{Comprimento } [L] = 10,8 \text{ m}$$

$$\text{Largura } [W] = 35,8 \text{ m}$$

$$\text{Altura } [H] = 15 \text{ m}$$

Estas informações foram utilizadas para calcular a área equivalente de exposição (Ad), um parâmetro fundamental para o dimensionamento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

C) Ad - Área de exposição equivalente [em m²]

$$Ad = (L \times W) + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 \quad (6)$$

Substituindo na Equação 6 os valores, tem-se o seguinte resultado:

$$Ad = (10,8 \times 35,8) + 2 \times (3 \times 15) \times (10,8 + 35,8) + \pi \times (3 \times 15)^2$$

$$Ad = 10.942,37 \text{ m}^2$$

D) Fatores de Ponderação

D.I) Para determinar o Fator de Localização da Estrutura (C_d), foi fundamental avaliar a presença de estruturas ao redor que possam ser mais altas que a edificação em questão. A presença de tais estruturas diminui a probabilidade de descargas diretas na edificação, pois elas podem atuar como obstáculos naturais que atraem as descargas atmosféricas.

Estrutura cercada por objetos mais altos:

$$C_d = 0,25$$

Quando a estrutura está cercada por objetos mais altos, a probabilidade de descargas diretas na edificação é reduzida, o que pode resultar em um fator de localização (C_d) menor.

Os fatores para o cálculo da proteção contra descargas atmosféricas são ajustados com base nas tabelas normativas, levando em consideração vários parâmetros que podem influenciar a necessidade e o nível de proteção a ser adotado. Esses fatores podem incluir, por exemplo, o tipo de linha ou instalação, o ambiente normativo (urbano ou rural), as características da estrutura a ser protegida e o risco associado a diferentes condições, como a proximidade de áreas mais altas. Para esta obra, os seguintes parâmetros foram adotados:

D.II) Comprimento da Linha de Energia – L_l

$$L_l = 1.000 [m]$$

D.III) Fator de Instalação da Linha de Energia – C_i

Linhas do tipo: Aéreo

$$C_i = 1,0$$

D.IV) Fator do Tipo de Linha Energia – C_t

Linha de Energia em Alta Tensão (com transformador Alta Tensão/Baixa Tensão)

$$C_t = 0,2$$

D.V) Fator Ambiental da Linha de Energia – C_e

Urbano com edifícios mais altos que 20m

$$C_e = 0,01$$

D.VI) Comprimento da Linha de Sinal

$$L_{lt} = 1000 [m]$$

D.VII) Fator de Instalação da Linha de Sinal – C_{it}

Linhas do tipo: Aéreo

$$C_{it} = 1,0$$

D.VIII) Fator do Tipo de Linha de Sinal – C_{tt}

Linha de Energia ou Sinal

$$C_{tt} = 1,0$$

D.IX) Fator Ambiental da Linha de Sinal – C_{et}

Urbano com edifícios mais altos que 20m

$$C_{et} = 0,01$$

D.X) Com base nos dados coletados e analisados, foi possível calcular o número de eventos perigosos para a estrutura, também conhecido como o número de descargas diretas esperadas na estrutura por ano (N_d). Este cálculo leva em consideração diversos parâmetros, como a densidade de descargas atmosféricas para a terra, as características geométricas da estrutura, o fator de localização da edificação, a presença de estruturas adjacentes mais altas e outros fatores que influenciam a probabilidade de ocorrência de uma descarga direta.

$$N_d = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (7)$$

Logo, substituindo na Equação 7, obtém-se o resultado do número de descargas diretas esperadas na estrutura por ano.

$$N_d = 0,02736$$

D.XI) Para calcular os eventos próximos à estrutura, deve-se considerar a área de influência, ou seja, a região ao redor da edificação onde os efeitos das descargas atmosféricas podem afetar a estrutura, mas não necessariamente causar um impacto direto. Esse cálculo envolve a consideração do número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas em áreas adjacentes à estrutura, conhecido como N_m .

$$N_d = N_g \times A_m \times 10^{-6} \quad (8)$$

Sendo A_m dado pela seguinte equação:

$$A_m = 2 \times 500 \times (L + W) + \pi * 500^2 \quad (9)$$

Logo, obtém-se o resultado para A_m e N_m ao substituir os valores nas Equações 8 e 9.

$$A_m = 831.998,16$$

$$N_m = 8,31998$$

D.XII) Para calcular o Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas na linha de energia, conhecido como N_l , é necessário considerar a proximidade da estrutura com linhas de transmissão de energia, além de outros fatores como a tensão da linha e o tipo de instalação elétrica. Esse cálculo é fundamental para avaliar os riscos adicionais que as linhas de energia podem representar para a segurança da edificação em relação aos impactos de descargas atmosféricas.

$$N_l = N_g \times A_l \times C_i \times C_e \times C_t \times 10^{-6} \quad (10)$$

Onde A_l é dado por:

$$A_l = 40 \times L_1 \quad (11)$$

Obtém-se então, o seguinte resultado quando os valores são aplicados nas Equações 10 e 11.

$$Al = 40.000$$

$$Nl = 0,0008$$

Para os próximos números de eventos, o processo segue uma abordagem semelhante, levando em consideração diferentes fontes de risco que podem impactar a estrutura de maneira direta ou indireta. Cada novo cálculo ou estimativa é baseado em fatores específicos, como a proximidade de linhas de transmissão de energia, a existência de outras estruturas que possam influenciar a densidade de descargas, ou mesmo a localização da edificação em relação a áreas de maior atividade atmosférica.

D.XIII) N_i - Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas perto da linha de Energia [por ano]

$$N_i = N_g \times A_i \times C_i \times C_e \times C_t \times 10^{-6} \quad (12)$$

Onde A_i é dado por:

$$A_i = 4.000 \times L1 \quad (13)$$

Logo, aplicando nas Equações 12 e 13, obtém-se o seguinte resultado de A_i e N_i

$$A_i = 4.000.000$$

$$N_i = 0,08$$

D.XIV) N_{lt} - Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas na linha de Sinal [por ano]

$$N_{lt} = N_g \times A_i \times C_{it} \times C_{et} \times C_{tt} \times 10^{-6} \quad (14)$$

Onde A_{lt} é dado por:

$$A_{lt} = 40 \times L1 \quad (15)$$

Então, substituindo na equação 14 e 15.

$$A_{lt} = 40.000$$

$$N_{lt} = 0,004$$

D.XV) N_{it} - Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas atmosféricas perto da linha de sinal [por ano]

$$N_{it} = N_g \times A_{it} \times C_{it} \times C_{et} \times C_{tt} \times 10^{-6} \quad (16)$$

Onde A_{it} é dado por:

$$A_{it} = 4000 \times L1t \quad (17)$$

Obtém-se então, o seguinte resultado quando os valores são aplicados nas Equações 18 e 17.

$$Ait = 4.000.000$$

$$Nit = 0,4$$

Agora, apresentam-se alguns dos dados que foram tabelados e que serão essenciais para os cálculos subsequentes como, por exemplo, a proteção da estrutura, o tipo de linha de transmissão, entre outros fatores relevantes. Essas tabelas incluem informações que indicam os níveis de risco associados a diferentes tipos de linhas e estruturas, bem como os parâmetros necessários para calcular a densidade de descargas atmosféricas e a probabilidade de ocorrência de eventos perigosos.

D.XVI) Proteção da Estrutura – Pb

Estrutura protegida por SPDA - Classe II

$$Pb = 0,05$$

D.XVII) Tipo de linha externa de Energia – Cld e Cli

Linha aérea blindada (energia ou sinal)

Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento

$$Cld = 1$$

$$Cli = 0,1$$

D.XVIII) Tipo de linha externa de sinal – Cldt e Clit

Linha aérea blindada (energia ou sinal)

Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento

$$Cldt = 1$$

$$Clit = 0,1$$

D.XIX) Para o fator Ks1, considera-se a eficiência da blindagem por malha da estrutura, incluindo o SPDA ou outra blindagem na interface ZPR 0/1 (Zona de Proteção 0/1). Dentro de uma ZPR, existe uma distância de segurança entre o limite da malha e a estrutura protegida, que deve ser, no mínimo, igual à largura da malha (Wm). Essa distância é crucial para assegurar a eficiência da blindagem e evitar a penetração de correntes induzidas pelas descargas atmosféricas.

O valor do Ks1 foi determinado levando em conta a configuração do SPDA ou malha espacial instalada, que tem a função de desviar ou absorver a carga da descarga atmosférica. Da mesma forma, para o Ks2, que se aplica a blindagens adicionais ou ao cálculo da proteção em

ambientes com maior risco, deve-se também avaliar as características do sistema e as propriedades da malha espacial.

$$Ks1 = 0,12 \times Wm1 \quad (18)$$

Aplicando os valores na Equação 18.

$$Ks1 = 1$$

D.XX) U_w Energia, onde U_w é dado como a tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido, expressa em quilovolts (kV).

$$U_w = 2,5$$

D.XXI) $Ks4$ Energia, onde $Ks4$ considera a tensão suportável de impulso do sistema a ser protegido.

$$Ks4 = \frac{1}{U_w} \quad (19)$$

Através da Equação 19, aplicando os valores necessários encontramos o resultado da tensão suportável de impulso do sistema a ser protegido $Ks4$

$$Ks4 = 0,4$$

D.XXII) Tensão suportável nominal de impulso do sistema de sinal – U_{wt} Sinal

$$U_{wt} = 1,5$$

D.XXIII) Fator de tensão suportável de impulso para o sistema de sinal – $Ks4t$ Sinal

$$Ks4t = 0,67$$

D.XXIV) Nível de Proteção NP – Peb

DPS Classe II

$$Peb = 0,02$$

D.XXV) Roteamento, blindagem e interligação da Energia – Pld

Blindada aérea ou enterrada cuja blindagem está interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento [$R_s \leq 1$ ohms/Km] ($U_w = 2,5$)

$$Pld = 0,2$$

D.XXVI) Roteamento, blindagem e interligação do Sinal – $Pldt$

Blindada aérea ou enterrada cuja blindagem está interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento [$R_s \leq 1$ ohms/Km] ($U_w = 1,5$)

$$Pldt = 0,4$$

D.XXVII) P_v - Probabilidade de Descarga na linha de Energia Causar danos físicos

$$P_v = Peb \times Pld \times Cld \quad (20)$$

Substituindo os valores na Equação 20, encontra-se a probabilidade de descarga na linha de energia causar danos físicos.

$$Pv = 0,004$$

D.XXVIII) Pvt - Probabilidade de Descarga na linha de Sinal Causar danos físicos

$$Pvt = Peb \times Pldt \times Cl dt \quad (21)$$

Aplicando na Equação 21, obtém-se o seguinte resultado:

$$Pvt = 0,008$$

E) Zonas da Edificação

Nesta etapa, deve-se separar as zonas, primeiramente, dividindo por zona interna e externa, de forma que a zona interna é a zona com maior permanência das pessoas, desta forma, devemos classifica-la através do número de ocupantes, tempo que essas pessoas estarão presentes naquele espaço, fatores de segurança que essa zona possui, desta forma, temos os seguintes parâmetros:

E.I) Zona: Zona 1 (Interna)

E.I.a) Número de pessoas na Zona

$$nz = 60$$

E.I.b) Número total de pessoas na Estrutura

$$nt = 130$$

E.I.c) Tempo de presença das pessoas na Zona (h/ano)

$$tz = 2.226$$

E.I.d) Tempo de presença das pessoas em locais perigosos fora da estrutura (h/ano)

$$te = 1.110$$

E.I.e) L1 - Perda de vida humana incluindo ferimento permanente

Considerar

E.I.f) L2 - Perda inaceitável de serviço ao público

Desprezar

E.I.g) L3 - Perda inaceitável de patrimônio cultural

Desprezar

E.I.h) L4 - Perda econômica

Desprezar

E.I.i) Risco de Explosão / Hospitais

Não

E.I.j) Medidas de Proteção (descargas na linha) – Ptu
 Não aplicável (área externa)

$$Ptu = 0$$

E.I.k) Ks2

$$Ks2 = 1$$

E.I.l) Nível de Proteção NP da Energia – Pspd
 Nenhum sistema de DPS coordenado

$$Pspd = 1$$

E.I.m) Fiação Interna de Energia – Ks3

Cabo não blindado - sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços
 Condutores em laço com diferentes roteamentos em grandes edifícios
 (Área do laço da ordem de 50 m²)

$$Ks3 = 1$$

E.I.n) Nível de Proteção NP do Sinal – Pspdt

Nenhum sistema de DPS coordenado

$$Pspdt = 1$$

E.I.o) Fiação Interna do Sinal – Ks3t

Cabo não blindado - sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços
 Condutores em laço com diferentes roteamentos em grandes edifícios
 (Área do laço da ordem de 50 m²)

$$Ks3t = 1$$

E.I.p) Pc - Probabilidade de Descarga na Estrutura causar Danos em sistemas internos

Para o cálculo da probabilidade de descarga na estrutura causar algum dano nos sistemas elétricos internos do edifício que será equivalente a razão entre o nível de proteção com a classificação da linha, logo, temos a seguinte equação:

$$Pc = Pspd \times Cld \quad (22)$$

Logo, aplicando na Equação 22, tem-se o seguinte resultado para a probabilidade de que se a descarga atinja a estrutura causar algum dano nos sistemas:

$$Pc = 1$$

E.I.q) Pct - Probabilidade de Descarga na Estrutura causar Danos em sistemas internos de sinal

$$Pct = Pspdt \times Cldt \quad (23)$$

Substituindo na Equação 23, obtém-se a probabilidade de descarga na estrutura causar danos em sistemas internos de sinal

$$Pct = 1$$

E.I.r) Pms - Probabilidade de descarga próximo da estrutura causar danos nos sistemas internos – energia

$$Pms = (Ks1 \times Ks2 \times Ks3 \times Ks4)^2 \quad (24)$$

Substituindo na Equação 24, obtém-se que Pms é igual a:

$$Pms = 0,16$$

E.I.s) Pmst - Probabilidade de descarga próximo da estrutura causar danos nos sistemas internos – sinal

$$Pmst = (Ks1t \times Ks2t \times Ks3t \times Ks4t)^2 \quad (25)$$

Obtém-se então, o seguinte resultado quando os valores são aplicados na Equações 25.

$$Pmst = 0,4489$$

E.I.t) Pu - Probabilidade de Descarga na linha causar ferimentos a seres vivos por choque - energia

$$Pu = Pt_u \times Pe_b \times Pl_d \times Cl_d \quad (26)$$

Logo, aplicando na Equação 26, obtém-se:

$$Pu = 0$$

E.I.u) Put - Probabilidade de Descarga na linha causar ferimentos a seres vivos por choque - sinal

$$Put = Pt_u \times Pe_b \times Pl_{dt} \times Cl_{dt} \quad (27)$$

Substituindo na Equação 27.

$$Put = 0$$

E.I.v) Pw - Probabilidade de Descarga na linha Causar falha de sistemas internos

$$Pw = Psp_d \times Pl_d \times Cl_d \quad (28)$$

Então, aplicando os valores de cada variável na Equação 28, obtém-se o valor de Pw.

$$Pw = 0,2$$

E.I.w) Pwt - Probabilidade de Descarga na linha Causar falha de sistemas internos do Sinal

$$Pwt = Psp_{dt} \times Pl_{dt} \times Cl_{dt} \quad (29)$$

Aplicando na Equação 29, obtém-se o seguinte resultado:

$$Pwt = 0,4$$

E.I.x) P_{li} - Probabilidade de descarga na linha de energia causar falha

Para uma Tensão suportável de impulso $U_w = 2,5$ kV, obtém-se o seguinte P_{li} :

$$P_{li} = 0,3$$

E.I.y) P_{lit} - Probabilidade de descarga na linha de sinal causar falha

Para uma Tensão suportável de impulso $U_{wt} = 1,5$ kV, obtém-se o seguinte P_{lit} :

$$P_{lit} = 0,5$$

E.I.z) P_z - Probabilidade de Descarga perto da linha causar falha nos sistemas internos de energia

$$P_z = P_{spd} \times P_{li} \times C_{li} \quad (30)$$

Então, aplicando os valores de cada variável na Equação 30, obtém-se o seguinte valor para a probabilidade de descarga perto da linha causar falhas no sistema interno de energia.

$$P_z = 0,03$$

E.I.aa) P_{zt} - Probabilidade de Descarga perto da linha causar falha nos sistemas internos - sinal

$$P_{zt} = P_{spdt} \times P_{lit} \times C_{lit} \quad (31)$$

Substituindo na Equação 31, obtém-se o seguinte P_{wt} .

$$P_{zt} = 0,05$$

Para a continuidade da análise e cálculo do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, foi necessário considerar o tipo de solo onde a estrutura seria instalada. Esse fator é crucial, pois o tipo de solo influencia diretamente os cálculos relacionados ao aterramento e ao comportamento da corrente elétrica no solo, impactando a eficiência do sistema de proteção. Com as informações sobre a composição e características do solo local, foi possível determinar os parâmetros necessários, como a resistividade elétrica do solo, o qual é um dos fatores que determinam a eficácia do aterramento.

E.I.bb) Medidas de Proteção (descargas na estrutura) – P_{ta}

Equipotencialização efetiva do solo

$$P_{ta} = 0,01$$

E.I.cc) Tipo de superfície do solo ou piso – Fator de redução r_t

Agricultura, concreto (Resistência de contato ≤ 1 ohm)

$$r_t = 0,01$$

E.I.dd) Providências para reduzir consequências de incêndio – Fator de redução r_p

Uma das seguintes providências: extintores, instalações fixas operadas manualmente, instalações de alarme manuais, hidrantes. Compartimentos à prova de fogo, rotas de escape

$$r_p = 0,5$$

E.I. ee) Risco de incêndio ou explosão na estrutura – Fator de redução rf

Incêndio: Risco Baixo

$$rf = 0,001$$

E.I. ff) Perigo Especial – Fator hz

Sem perigo especial

$$hz = 1$$

E.I. gg) P_a - Probabilidade de Descarga na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque

$$P_a = P_{ta} \times P_b \quad (32)$$

Então, aplicando os valores de cada variável na Equação 32.

$$P_a = 0,0005$$

E.I. hh) Agora, tratando-se de Perda de vida humana incluindo ferimento permanente (L1), deve-se considerar os seguintes fatores:

E.I. hh. i) Perda de vida humana incluindo ferimento permanente – L_t

$$L_t = 0,01$$

E.I. hh. ii) D2 – Danos Físicos – L_f

Entretenimento público, igreja, museu

$$L_f = 0,05$$

E.I. hh. iii) D3 – Falhas de sistemas internos – L_o

Não aplicável

$$L_o = 0$$

E.I. hh. iv) Probabilidade associada ao tempo de presença em área perigosa (descargas) – L_a

$$L_a = r_t \times L_t \times \left(\frac{nz}{nt}\right) \times \left(\frac{tz}{8.760}\right) \quad (33)$$

Então, substituindo na Equação 33, o valor para cada variável, obtém-se o valor de L_a .

$$L_a = 0,01173 \times 10^{-3}$$

E.I. hh. v) Probabilidade associada ao tempo de presença em área perigosa – L_u

$$L_u = L_a = 0,01173 \times 10^{-3}$$

E.I. hh. vi) Probabilidade de exposição fora da estrutura – L_e

$$L_e = 1 \times \left(\frac{te}{8760}\right) \quad (34)$$

Substituindo na Equação 34.

$$L_e = 0,12671$$

E.I.hh.vii) Perda econômica baseada em medidas de proteção contra incêndios – Lb

$$Lb = rb \times rf \times hz \times (Lf + Le) \times \left(\frac{nz}{nt}\right) \times \left(\frac{tz}{8.760}\right) \quad (35)$$

Então, substituindo na Equação 35, obtém-se o valor de Lb.

$$Lb = 0,01036 \times 10^{-3}$$

E.I.hh.viii) Probabilidade de perda econômica – Lv

Devido ao fato da perda econômica ser desconsiderada, então Lv será igual Lb, logo, tem-se que:

$$Lv = Lb = 0,01036 \times 10^{-3}$$

E.I.hh.ix) Probabilidade associada a perdas de vida em caso de falhas internas – Lc

$$Lc = Lo \times \left(\frac{nz}{nt}\right) \times \left(\frac{tz}{8.760}\right) \quad (36)$$

Então, com a Equação 36, trocando os valores das variáveis para os valores do projeto.

$$Lc = 0$$

E.I.hh.x) Probabilidade de perda em caso de falha (genérico) – Lm, Lw: Probabilidade de perda (genérico), Lz: Probabilidade de perda (genérico)

$$Lm = Lw = Lz = Lc = 0$$

E.I.ii) Riscos [R1] da Zona [Zona 1 (Interna)]

Nesta etapa, a análise será feita através da Zona Interna novamente, onde serão analisados os riscos relacionados a perda de vida humana, descargas atmosféricas na estrutura, sendo esses os fatores bases para o cálculo do risco total, tem-se então:

E.I.ii.i) Ra – Risco associado à descarga direta na estrutura

$$Ra = Nd \times Pa \times La \quad (37)$$

Substituindo as variáveis na Equação 37.

$$Ra = 0,02736 \times 0,0005 \times 0,01173 \times 10^{-3}$$

$$Ra = 0,01604 \times 10^{-8}$$

E.I.ii.ii) Rb – Risco associado à descarga indireta na estrutura

$$Rb = Nd \times Pb \times Lb \quad (38)$$

Então, aplicando os valores de cada variável na Equação 38.

$$Rb = 0,02736 \times 0,05 \times 0,01036 \times 10^{-3}$$

$$Rb = 0,01417 \times 10^{-6}$$

E.I.ii.iii) Ru – Risco associado à descarga direta na linha de energia

$$Ru = (Nl \times Ndj) \times Pu \times Lu \quad (39)$$

Substituindo na Equação 39, obtém-se o valor de Ru .

$$Ru = (0,0008 + 0) \times 0 \times 0,01173 \times 10^{-3}$$

$$Ru = 0$$

E.I.ii.iv) Rut – Risco associado à descarga direta na linha de sinal

$$Rut = (Nlt \times Ndj1) \times Put \times Lu \quad (40)$$

Ao substituir os valores na Equação 40, o seguinte resultado é obtido:

$$Rut = (0,004 + 0) \times 0 \times 0,01173 \times 10^{-3}$$

$$Rut = 0$$

E.I.ii.v) Rv – Risco associado à descarga indireta na linha de energia

$$Rv = (N1 \times Ndj) \times Pv \times Lv \quad (41)$$

Então, aplicando os valores de cada variável na Equação 41, obtém-se o seguinte valor para o risco associado à descarga indireta na linha de energia.

$$Rut = (0,0008 + 0) \times 0,004 \times 0,01036 \times 10^{-3}$$

$$Rut = 0,03316 \times 10^{-9}$$

E.I.ii.vi) Rvt – Risco associado à descarga indireta na linha de sinal

$$Rvt = (Nlt \times Ndj1) \times Pvt \times Lv \quad (42)$$

Substituindo na Equação 42, obtém-se o risco Rvt .

$$Rut = (0,004 + 0) \times 0,008 \times 0,01036 \times 10^{-3}$$

$$Rut = 0,03316 \times 10^{-8}$$

E.I.ii.vii) $R1z$ – Risco total de uma zona específica dentro de uma estrutura

$$R1z = Ra + Rb + Ru + Rv + Rut + Rvt \quad (43)$$

Substituindo os valores encontrados anteriormente na Equação 42, obtém-se o risco total de uma zona dentro da estrutura

$$R1z = 0,01604 \times 10^{-8} + 0,01417 \times 10^{-6} + 0 + 0,03316 \times 10^{-9} + 0 + 0,03316 \times 10^{-8}$$

$$R1z = 0,00147 \times 10^{-5}$$

F) Risco Total

Nesta etapa, realiza-se uma análise detalhada dos riscos associados à estrutura, com o objetivo de avaliar se a proteção fornecida é suficiente para garantir a segurança da edificação.

F.I) $R1z$ – Risco de perda de vida humana ou ferimentos graves

A soma dos componentes Ra e Rb indica os riscos de choque e incêndio, sendo essencial considerar o somatório desses dois fatores para a análise geral dos riscos.

$$Ra + Rb = 0,00143 \times 10^{-5}$$

Com o Risco total encontrado, temos então o risco tolerável ($Rt1$) estabelecido por norma, que representa o valor máximo aceitável de risco para que a estrutura seja considerada segura, logo, para a análise, precisa-se determinar que $R1z$ seja menor ou igual a $Rt1$.

$$Rt1 = 1 \times 10^{-5}$$

$$R1z \leq Rt1 \text{ e } (Ra + Rb) \leq Rt1$$

Com base nos cálculos realizados, pode-se concluir que o risco total encontrado está abaixo do risco tolerável, indicando que a estrutura está adequadamente protegida conforme os requisitos de segurança da norma. Portanto, não serão necessárias novas medidas de proteção.

F.II) Verificação da Estrutura

Na verificação da estrutura, a condição a ser verificada é se $R1z$ for menor ou igual a $Rt1$. Caso essa condição seja atendida, a estrutura estará protegida de acordo com as normas. Caso contrário, será necessário adotar medidas adicionais de proteção para garantir a segurança.

$$R1z \leq Rt1$$

G) Nível de Proteção adotada: II – Classe II

H) Método Utilizado

H.I) Método Eletrogeométrico

Raio da Esfera Rolante [Nível de Proteção II]

$$R = 30 \text{ m}$$

I) Cálculo do Número de descidas [N]

Para o cálculo do número de descidas, deve-se considerar a área, a altura, o perímetro e a quantidade de cantos salientes da estrutura. Já o cálculo do nível de proteção deve ser definido conforme as especificações de cada projeto, com a classificação feita de acordo com a Tabela 3. Vale destacar que a escolha da Classe 2 se baseou no fato de que essa classificação atende de maneira adequada às características e riscos associados à estrutura em questão. Considerando sua função e localização, a Classe 2 é capaz de proporcionar a proteção necessária contra descargas atmosféricas, levando em conta que, embora a estrutura não esteja sujeita a riscos extremos de explosão, ela ainda requer uma proteção robusta.

$$\text{Área} = 386,64 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura} = 15 \text{ m}$$

$$\text{Perímetro} = 93,2 \text{ m}$$

$$\text{Cantos Salientes da Estrutura} = 0$$

$$\text{Para o Nível de Proteção II: Espaçamento médio} = 10 \text{ m}$$

$$N = \frac{\text{Perímetro}}{\text{Espaçamento}} + (\text{número de cantos salientes}) \quad (44)$$

Logo, aplicando na Equação 44, encontra-se então, o número de descidas para a primeira condição.

$$N = \frac{\text{Perímetro}}{10m} + (\text{número de cantos salientes})$$

$$N = \frac{93,32}{10 m} + 0$$

$$N = 9, \text{ para Nível de Proteção: II}$$

Agora, deve-se calcular para altura, sendo escolhido então o maior valor de número de descidas entre essas duas opções.

$$N = \frac{\text{Altura}}{\text{Espaçamento}} + (\text{número de cantos salientes}) \quad (45)$$

Aplicando os valores na Equação 45.

$$N = \frac{\text{Altura}}{10 m} + (\text{número de cantos salientes})$$

$$N = \frac{15}{10} + 0$$

$$N = 1,5 \cong 2$$

A norma também estabelece que, para descidas não naturais, ou seja, aquelas descidas específicas instaladas para proteção, o valor de N deve ser maior ou igual a 2

$$N \geq 2 \text{ (Para descidas não naturais)}$$

Contudo, o valor obtido a partir do cálculo do perímetro (Equação 44) já atende a essa exigência. Sendo assim, a quantidade mínima de descidas deve ser de 9, distribuídas uniformemente ao longo da estrutura do edifício, garantindo assim que o nível de proteção desejado seja alcançado. Dessa forma, assegura-se que a proteção contra descargas atmosféricas atenda ao Nível de Proteção II para a estrutura em questão.

$$N = 9 \text{ descidas}$$

J) Cálculo do Comprimento do Condutor enterrado horizontalmente

Para o cálculo do condutor enterrado horizontalmente, é essencial compreender que a resistividade do solo, obtida a partir das características do material que compõe o solo no local da edificação, deve ser considerada. Além disso, é necessário que a resistividade de aterramento do solo tenha um valor máximo de 10 Ohms para que o sistema de aterramento seja considerado eficiente.

$r = 100 \text{ ohms.m}$ [resistividade do solo]

$R = 10 \text{ ohms}$ [Resistência de aterramento]

$L =$ Comprimento do Condutor Horizontal enterrado em (m)

$$L = \frac{2 \times r}{R} \quad (46)$$

Substituindo os valores bases na Equação 46, obtém se o comprimento.

$$L = \frac{2 \times 100}{10}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

Para garantir a eficiência de um sistema de aterramento, é fundamental que o comprimento mínimo (L) do condutor enterrado seja de 5 metros. Contudo, ao adotar um valor de L = 20 metros, asseguramos que essa exigência mínima é atendida, proporcionando uma maior eficiência no sistema. Além disso, foi necessário calcular o raio médio da área abrangida pelos eletrodos (Re). Este valor tem como objetivo estimar a área ao redor do sistema de aterramento que é coberta pelo campo elétrico gerado pelos eletrodos.

$$Re = \sqrt{\frac{L \times r}{\pi \times R}} \quad (47)$$

Substituindo na equação 47, obtém-se então, o raio médio da área abrangida pelos eletrodos.

$$Re = \sqrt{\frac{20 \text{ m} \times 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}}{\pi \times 10 \text{ } \Omega}}$$

$$Re = 14,83 \text{ m}$$

Comprimento Adicional [$Re \geq L1(\text{min})$] [OK]

Como o valor de Re é maior ou igual ao comprimento mínimo L1(min), foi possível confirmar que a área abrangida pelo sistema de aterramento atende aos requisitos estabelecidos, garantindo que o sistema esteja adequado para proporcionar a proteção necessária à estrutura contra descargas atmosféricas.

K) Anéis horizontais de interligação das descidas

Para a projeção de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) em estruturas altas, a análise da necessidade de anéis horizontais foi essencial. Esses anéis desempenham a função de interligar as descidas de forma eficaz, criando um caminho seguro para a corrente elétrica no caso de uma descarga atmosférica. Sua principal função é garantir

que a corrente seja dispersa uniformemente pelo solo, evitando concentrações de energia que poderiam comprometer a integridade do sistema e da estrutura protegida.

Além disso, os anéis horizontais ajudam a aumentar a área de aterramento, reduzindo a resistência do sistema e aumentando sua eficiência.

$$Na = \frac{H}{h} \quad (48)$$

Onde:

$H = 15$ [*Altura da estrutura (em metros)*]

$h = 10$ [*Altura máxima entre anéis horizontais (em metros)*]

Neste caso, os 10 metros foram adotados de acordo com a norma. Substituindo então, na Equação 48.

$$Na = \frac{15}{10} = 1,5$$

Logo, deverá ser instalado um anel horizontal de aterramento enterrado e um anel horizontal intermediário, posicionado a aproximadamente 7,5 metros do solo, totalizando assim dois anéis horizontais na estrutura. Estes anéis serão responsáveis por garantir uma dispersão eficiente da corrente elétrica no solo durante uma descarga atmosférica.

Considerando todos os elementos que compõem o SPDA e os cálculos realizados, foi elaborado o desenho técnico da planta baixa, apresentado no Anexo A deste trabalho. Um ponto crucial foi que todos os objetos e/ou estruturas metálicas foram devidamente aterrados e integrados à malha de aterramento do sistema. Isso foi fundamental para garantir que esses elementos possuíssem o mesmo valor de resistência de aterramento, evitando a formação de diferenças de potencial que poderiam comprometer a segurança do sistema e das pessoas que utilizam a estrutura.

Essa abordagem assegurou que toda a estrutura, bem como os componentes metálicos, estivesse igualmente protegida contra descargas atmosféricas, minimizando os riscos de danos materiais e pessoais.

Adicionalmente, foi fundamental que o sistema de proteção contra descargas atmosféricas fosse projetado e instalado com sinalização apropriada. Essa sinalização deveria alertar sobre a necessidade de distanciamento seguro durante tempestades ou temporais, prevenindo acidentes causados pelas descargas elétricas. As recomendações para a instalação de sinalização foram implementadas em conformidade com as normas técnicas vigentes, garantindo a eficiência e a segurança do projeto.

O projeto também contemplou todos os detalhes necessários para a montagem dos componentes que faziam parte da estrutura de aterramento, do sistema de descida e do sistema de captação. Esses detalhes foram essenciais para assegurar que a execução da obra fosse realizada de acordo com os padrões técnicos e de segurança estabelecidos. Além disso, a inclusão desses elementos facilitou a compreensão do projeto como um todo, permitindo uma visualização clara e precisa de como as instalações deveriam ser realizadas e como estariam quando finalizadas.

Esses detalhes foram organizados e apresentados no Anexo B, proporcionando uma referência visual e técnica que facilitou tanto a execução prática quanto a validação do projeto pelos responsáveis técnicos. Isso garantiu que todos os aspectos do projeto fossem seguidos corretamente, contribuindo para a segurança e o sucesso da instalação.

5 CONCLUSÃO

Dada a complexidade e a imprevisibilidade das descargas atmosféricas, é imprescindível a adoção de medidas eficazes de proteção. Esses fenômenos naturais podem ocorrer de forma repentina e com intensidades variadas, o que torna essencial a implementação de sistemas de proteção adequados. A intensidade e a frequência das descargas reforçam a necessidade de que tais sistemas sejam projetados e executados de acordo com as normas técnicas vigentes, como a NBR 5419. Um sistema bem-dimensionado é fundamental para garantir a segurança da estrutura, dos equipamentos e, especialmente, das pessoas, evitando riscos de danos materiais ou ameaças à vida humana.

A instalação de sistemas de captação de raios é uma etapa crucial nesse processo. Para tanto, é necessário que se realizem estudos aprofundados sobre os métodos existentes, com destaque para o Método Eletrogeométrico ou Método da Esfera Rolante. Este método se destaca por sua eficácia em determinar as áreas de risco e garantir uma proteção abrangente, especialmente em estruturas de formatos irregulares ou esféricas. Sua principal vantagem está na capacidade de identificar, com precisão, as zonas vulneráveis e proporcionar uma cobertura eficiente contra as descargas, minimizando os danos à edificação e às pessoas.

A aplicação do Método Eletrogeométrico exige um estudo detalhado, no qual as esferas de proteção devem ser projetadas de acordo com o raio definido pela classe de proteção do sistema. Isso garante que todas as direções ao redor da estrutura sejam contempladas, identificando os pontos que necessitam de proteção. Para estruturas com formas complexas, como as esféricas, este método é fundamental, visto que alternativas como o Método das Malhas ou o Método de Franklin apresentam limitações que comprometem sua eficácia nesses casos.

No entanto, embora o Método Eletrogeométrico seja altamente eficaz em várias situações, ele também apresenta algumas limitações. Sua aplicação requer um alto grau de especialização e um estudo detalhado, o que pode demandar tempo e custos adicionais em projetos mais complexos. Além disso, a necessidade de realizar cálculos especializados ou utilizar softwares específicos pode representar uma barreira para a sua implementação em locais onde tais recursos não estão facilmente disponíveis. Outro ponto negativo é que o método depende de uma modelagem precisa do terreno e das características da estrutura, o que pode ser desafiador em áreas com características geológicas ou topográficas irregulares, comprometendo a exatidão do cálculo.

Apesar desses desafios, os resultados deste trabalho confirmam que o Método da Esfera Rolante é a abordagem mais eficiente para o dimensionamento de sistemas de captação,

especialmente em projetos com estruturas geométricas complexas. A aplicação desse método, aliada ao cálculo adequado do sistema de descida e aterramento, é essencial para garantir que a descarga atmosférica seja conduzida de forma segura até o solo. Para isso, é fundamental a utilização de cálculos especializados ou o auxílio de softwares específicos, que otimizam a definição da configuração do sistema.

Por fim, é fundamental ressaltar que o estudo detalhado das normas NBR 5419 – Partes 1 a 4 é indispensável para o desenvolvimento de um projeto eficaz e seguro. Essas normas fornecem as diretrizes necessárias para garantir que o sistema de proteção atenda aos requisitos de segurança, assegurando tanto a durabilidade das instalações quanto a proteção eficiente contra os danos causados por descargas atmosféricas. O cumprimento rigoroso dessas orientações contribui para a confiabilidade do sistema e a segurança das pessoas e estruturas protegidas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1: Princípios gerais.** Rio de Janeiro, 2015a. 67 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-2: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de risco.** Rio de Janeiro, 2015b. 104 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-3: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida.** Rio de Janeiro, 2015c. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-4: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.** Rio de Janeiro, 2015d. 87 p.

CHESTERSILVA. **Descargas atmosféricas e a importância de um sistema de proteção.** Disponível em: <https://www.innova-energy.com.br/post/descargas-atmosf%C3%A9ricas-e-a-import%C3%A2ncia-de-um-sistema-de-prote%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 30 maio 2024.

COORAY, V.; INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY. **Lightning protection.** London: Institution Of Engineering And Technology, 2010.

DE MELLO FERNANDES, F. **Estudo de caso para a implementação da norma NBR 5419:2015 nos blocos 3, 4, 5 e 8 do campus Asa Norte do Uniceub.** [S.l: s.n.].

DE MOURA MARTINS, F. **Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas.** [S.l: s.n.].

ELAT - **Grupo de Eletricidade Atmosférica.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/eletricidade.atmosferica/historia.php>. Acesso em: 30 maio 2024.

ENG; GUERRA, L. **Aplicações de aterramento e proteção de sistemas elétricos.** London: 7. ed., 2015.

DOMINGOS. **Projetos de instalações elétricas prediais.** São Paulo: Saraiva Educação S.A., [s.d.].

FERGÜTZ, M. **Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas – SPDA Danos Físicos a Estrutura e Perigos à Vida.** [S.l: s.n.]. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/9731/spda3_v5_19_15641593611725_9731.pdf.

FRADE, T. C.; CAMPOS, G. L.; DE MELO, N. R. **Modelagem de aterramentos elétricos solicitados por descargas atmosféricas.** RCT - Revista de Ciência e Tecnologia, v. 7, p. 13-2021.

HANS DIETER BETZ et al. **Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.

IEEE. **Electromagnetic Compatibility International Symposium.** 2004. p. 300-305.

MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**. [S.l.: s.n.].

MEUNIER, G. **The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling**. [S.l.] John Wiley & Sons, 2010.

NUNES, A. et al. **SPDA - Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas**. [S.l.] Saraiva Educação S.A., [s.d.].

PINHEIRO NACCARATO, K. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. [S.l.: s.n.].

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Diário Oficial Eletrônico**. Disponível em: https://diariooficial.prefeitura.sp.gov.br/md_epubli_visualizar.php?objOT44mz39ca_2G2LdKegRi-TLdD7GUuGQBiu4oYeGkUTsw8lxx9MJmGyv7MJSwui7L_8bDEh4hTZsLOfFgMd-E-Olu-WD9WV6vn-9REtV9uOdxFX57RLPF9pIxAliY. Acesso em: 15 nov. 2024.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press, 2006.

RISON, W.; MOORE, C. B.; AULICH, G. D. **Lightning Air Terminals - Is Shape Important?** [S.l.: s.n.].

ROBERTO. **Instalações elétricas e o projeto de arquitetura**. [S.l.] Editora Blucher, 2023.

SOUZA, et al. **SPDA – Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Teoria, Prática e Legislação**. [S.l.] Saraiva Educação S.A., 2020.

VINÍCIUS DA SILVA, M. **Análise comparativa entre os métodos eletrogeométrico e dos elementos finitos no projeto de SPDA**. [S.l.: s.n.].

VISACRO FILHO, S. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**. Artliber Editora Ltda, 2005.

Anexo A - Desenho técnico da Planta Baixa

Neste anexo, é apresentada a planta baixa que foi desenvolvida com o objetivo de detalhar a implementação do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) no projeto arquitetônico. A planta contempla a disposição dos componentes principais do sistema, como captosres, condutores de descida e a malha de aterramento, considerando as características específicas do edifício e os requisitos normativos aplicáveis.

NOTAS

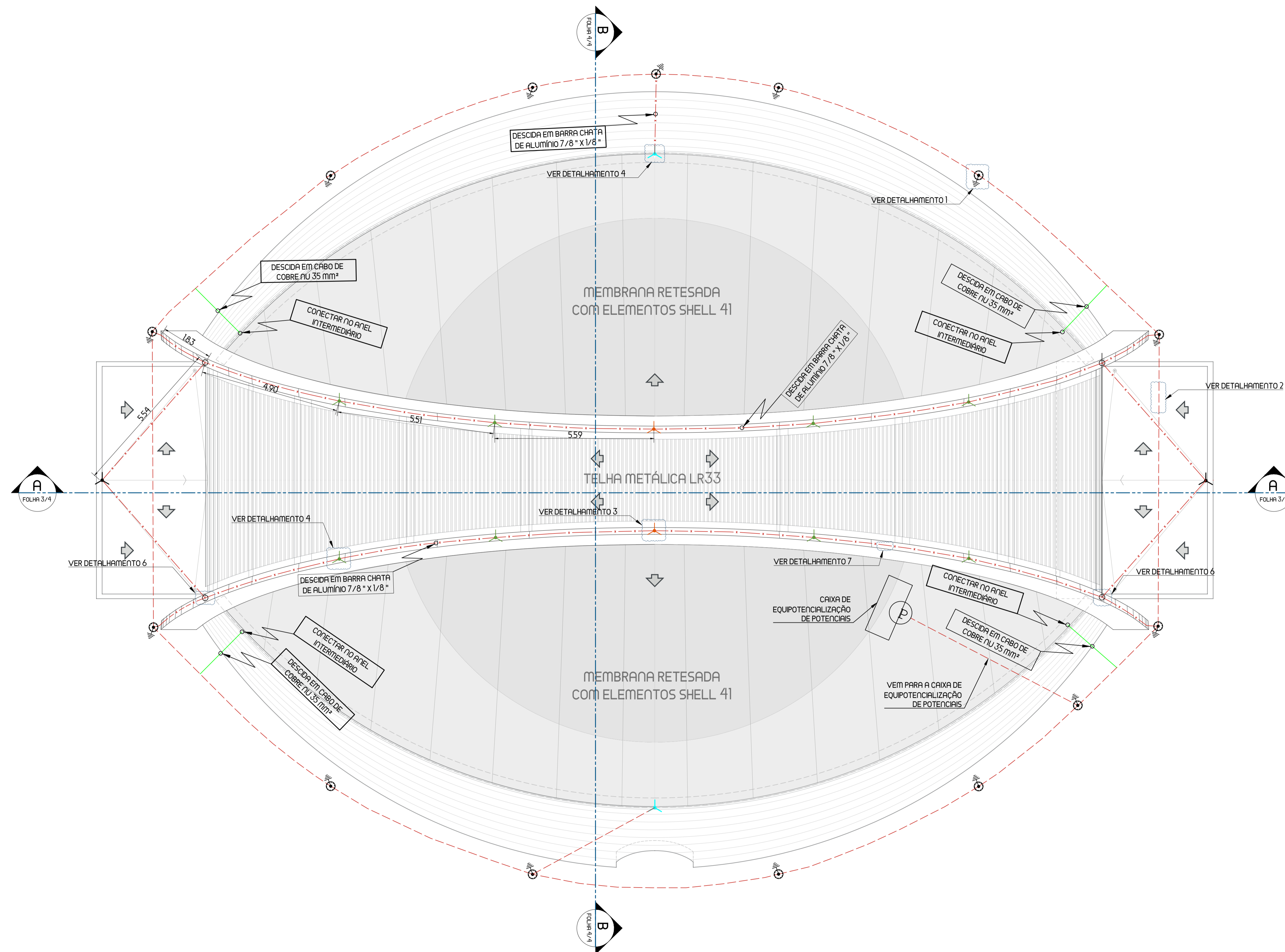
1. MEDIDAS EM METROS;
2. CONFIRMAR TODAS AS MEDIDAS NA OBRA;
3. TODOS OS PONTOS QUE FOREM FURADOS DA SUPERFÍCIE E/OU EXISTENTES PARA FIXAÇÃO DOS MASTROS DEVERÃO SER IMPERMEABILIZADOS;
4. A BARRA DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO LOCAL ESTARÁ NA SALA DE CONTROLE, NA MESMA PAREDE ONDE SERÃO INSTALADOS OS QUADROS ELÉTRICOS;
5. AS PARTES METÁLICAS DO PLANETÁRIO DEVERÁ SER DEVIDAMENTE ATERRADA CONFORME AS NORMAS VIGENTES;
6. A EMPRESA RESPONSÁVEL PELA INSTALAÇÃO DEVERÁ EXECUTAR A CONEXÃO ENTRE AS MALHAS DE ATERRAMENTO (NOVA E EXISTENTE);
7. DEVERÁ SER INSTALADO AS PLACAS DE SINALIZAÇÃO PARA TODO O SISTEMA DE SPDA, ESTA DEVERÁ SER INSTALADA DIRETAMENTE NA ESTRUTURA, DE FORMA A ALERTAR O PÚBLICO.

DESENHOS DE REFERÊNCIA
SE-PL-01-5E-00-302

DOCUMENTOS EXTERNOS DE REFERÊNCIA
NBR 5419/2015-1
NBR 5419/2015-2
NBR 5419/2015-3
NBR 5419/2015-4

TÍTULO
PLANTA.BAIXA

ESCALA VERIFICAR.DESENHOS



PLANTA DE COBERTURA

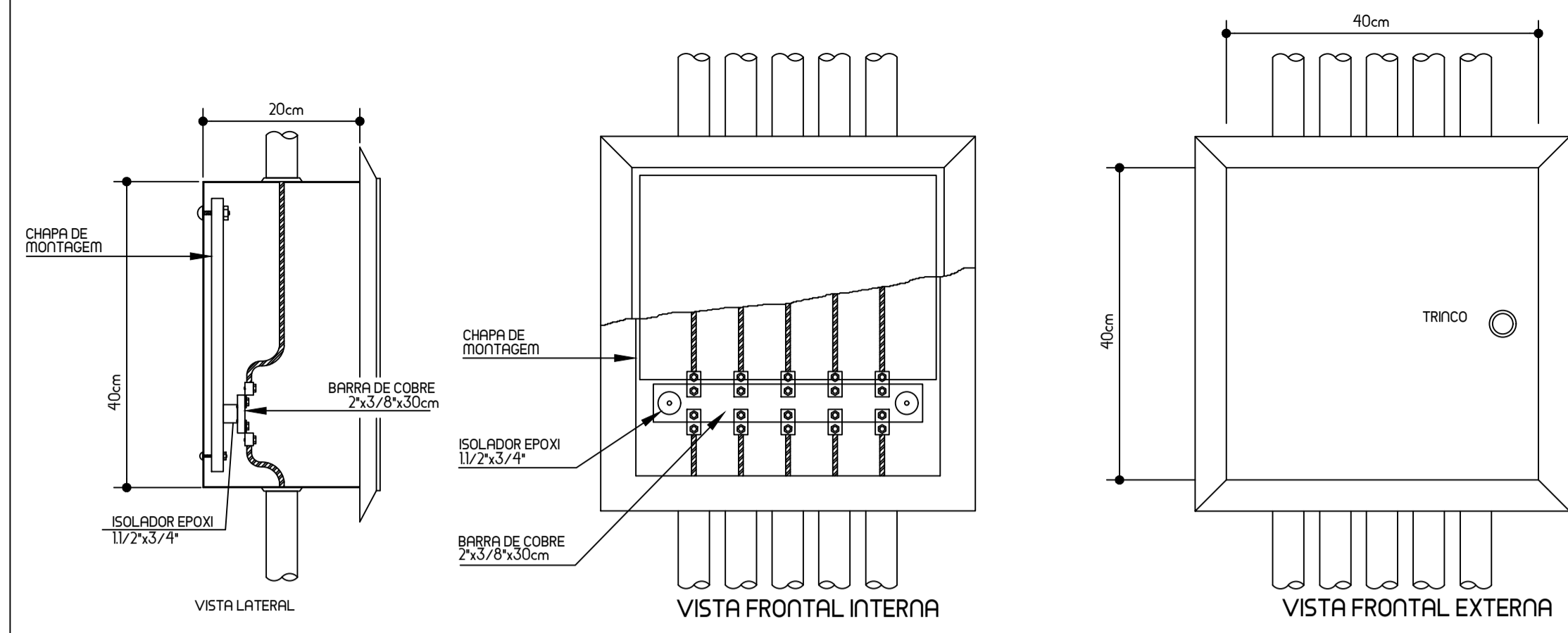
ESCALA SPDA 1:75

LEGENDA

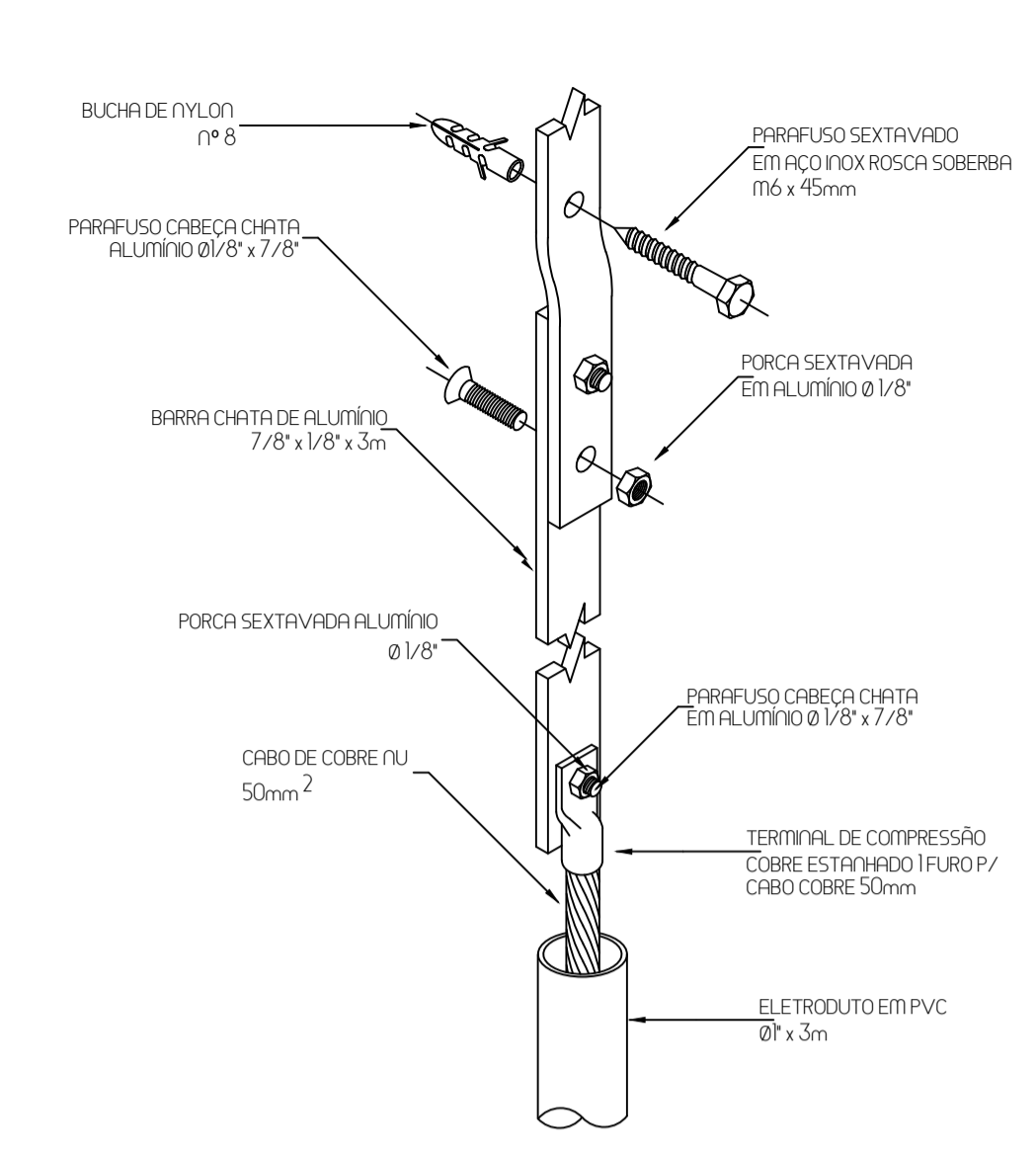
	CABO DE COBRE NU 50 mm ² ENTERRADO A 0,50m DE PROFUNDIDADE		CONECTOR EM 'X' OU EM 'T' ENTRE BARRA CHATA
	BARRA CHATA DE ALUMÍNIO 7/8"x1/8"x6m		CAPTOR EM AÇO GALVANIZADO A FOGO H = 1 METRO
	CABO DE COBRE NU 35 mm ² ENTERRADO A 0,50m DE PROFUNDIDADE		CAPTOR EM AÇO GALVANIZADO A FOGO H = 1,5 METRO
	CAIXA COM HASTE DE ATERRAMENTO COOPERWELD Ø5/8"x 240cm, COM CAIXA DE INSPEÇÃO		CAPTOR TIPO FRANKLIN DE AÇO INOXIDÁVEL C/ MASTRO E BASE ALTURA = 3 METRO
	CAIXA DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO DE POTENCIAIS		INDICAÇÃO DE DESCE

Anexo B - Desenho técnico dos Detalhamentos

Neste anexo, são apresentados os detalhamentos de montagem dos principais componentes do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), incluindo captosres, malha de aterramento e demais elementos descritos na planta baixa. Cada item é abordado com informações específicas sobre suas características, materiais utilizados e métodos de instalação, visando garantir a conformidade com as normas técnicas e a eficiência do sistema.



DETALHE DO LAP TAP DE EQUIPOTENCIALIDADE COM BARRAMENTO
DIMENSÕES: (40x40x20) cm



DET. DE FIXAÇÃO DE BARRA CHATA COM DERIVAÇÃO PARA CABO DE COBRE

LEGENDA

- CABO DE COBRE NU 50 mm² ENTERRADO A 0,50m DE PROFUNDIDADE
- BARRA CHATA DE ALUMÍNIO 7/8"x1/8"x6m
- CABO DE COBRE NU 35 mm² ENTERRADO A 0,50m DE PROFUNDIDADE
- CAIXA COM HASTE DE ATERRAMENTO COOPERWELD Ø5/8"x 240cm, COM CAIXA DE INSPEÇÃO
- CAIXA DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO DE POTENCIAIS
- CONECTOR EM 'X' OU EM 'T' ENTRE BARRA CHATA
- CAPTOR EM AÇO GALVANIZADO A FOGO H = 1 METRO
- CAPTOR EM AÇO GALVANIZADO A FOGO H = 1,5 METRO
- CAPTOR TIPO FRANKLIN DE AÇO INOXIDÁVEL C/ MASTRO E BASE ALTURA = 3 METRO
- INDICAÇÃO DE DESCE

— SPDA —

Quant.	Und.	Dimensão	Descrição
609,91	m	7/8"x1/8"	Barra chata de Alumínio 70mm ² - 7/8"x1/8"
289,97	m	50mm	Cabo Cobre Nu 50mm ² - Piso
69,56	m	1"	Eletroduto PVC Rígido
34	pc		Caixa com Aterramento 1 Haste c/ Tampa de FF
34	pc		Haste de Cobre Nu 35mm ² de 3 metros
1	pc		Caixa de equalização de potenciais
21	pc		Captor Tipo Franklin de Aço Inoxidável c/ Mastro e Base Altura = 1 Metro
4	pc		Captor Tipo Franklin de Aço Inoxidável c/ Mastro e Base Altura = 3 Metro
14	pc		Conexão em 'T' entre Barra Chata
2	pc		Conexão em 'X' entre Barra Chata

ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS
ANEXO B
SPDA 02/02

LEGENDA
VER NO PROJETO

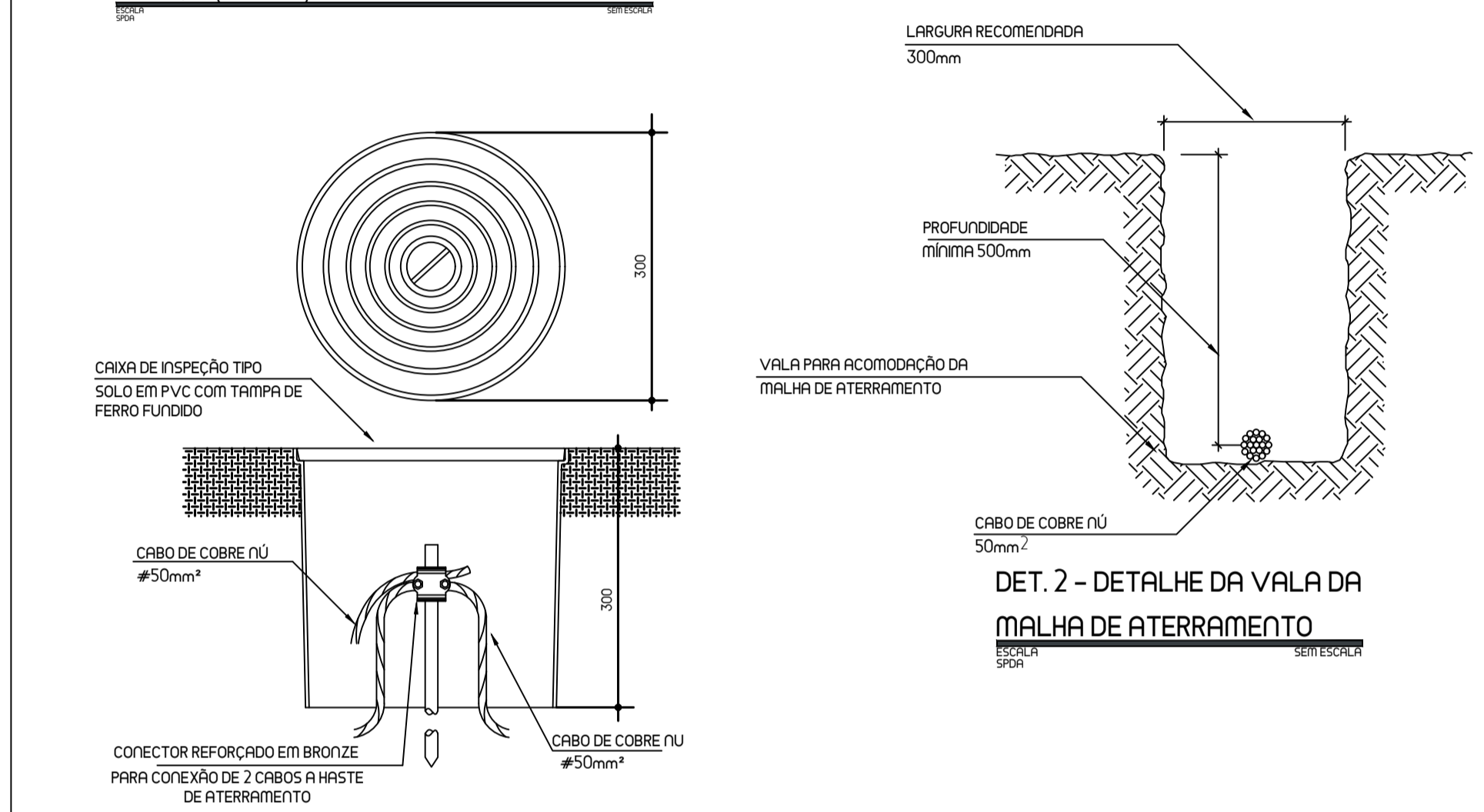
- NOTAS**
- MEDIDAS EM METROS;
 - CONFIRMAR TODAS AS MEDIDAS NA OBRA;
 - TODOS OS PONTOS QUE FOREM FURADOS DA SUPERFÍCIE E/OU EXISTENTES PARA FIXAÇÃO DOS MASTROS DEVERÃO SER IMPERMEABILIZADOS;
 - A BARRA DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO LOCAL ESTARÁ NA SALA DE CONTROLE, NA MESMA PAREDE ONDE SERÃO INSTALADOS OS QUADROS ELÉTRICOS;
 - AS PARTES METÁLICAS DO PLANETÁRIO DEVERÁ SER DEVIDAMENTE ATERRADA CONFORME AS NORMAS VIGENTES;
 - A EMPRESA RESPONSÁVEL PELA INSTALAÇÃO DEVERÁ EXECUTAR A CONEXÃO ENTRE AS MALHAS DE ATERRAMENTO (NOVA E EXISTENTE);
 - DEVERÁ SER INSTALADO AS PLACAS DE SINALIZAÇÃO PARA TODO O SISTEMA DE SPDA, ESTA DEVERÁ SER INSTALADA DIRETAMENTE NA ESTRUTURA, DE FORMA A ALERTAR O PÚBLICO.

DESENHOS DE REFERÊNCIA
SE-PL-01-SE-00-301

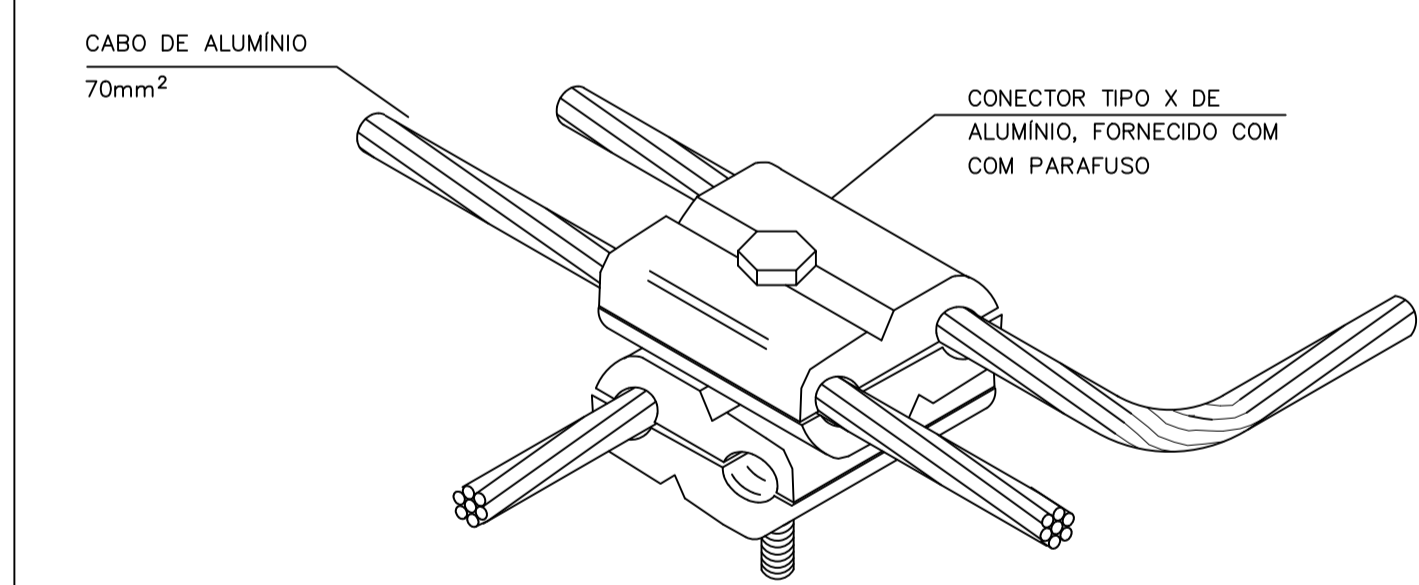
DOCUMENTOS EXTERNOS DE REFERÊNCIA
NBR 5419/2015-1
NBR 5419/2015-2
NBR 5419/2015-3
NBR 5419/2015-4

TÍTULO
DETALHAMENTO.SPDA

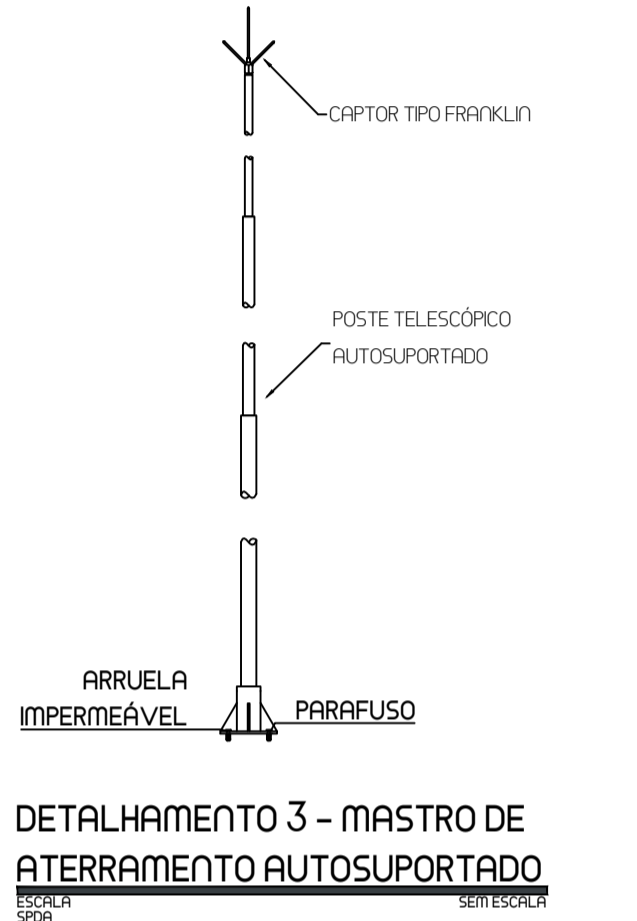
ESCALA VERIFICAR.DESENHOS



DET. 1 - DETALHE DE INSTALAÇÃO DE CAIXA DE INSPEÇÃO TIPO SOLO



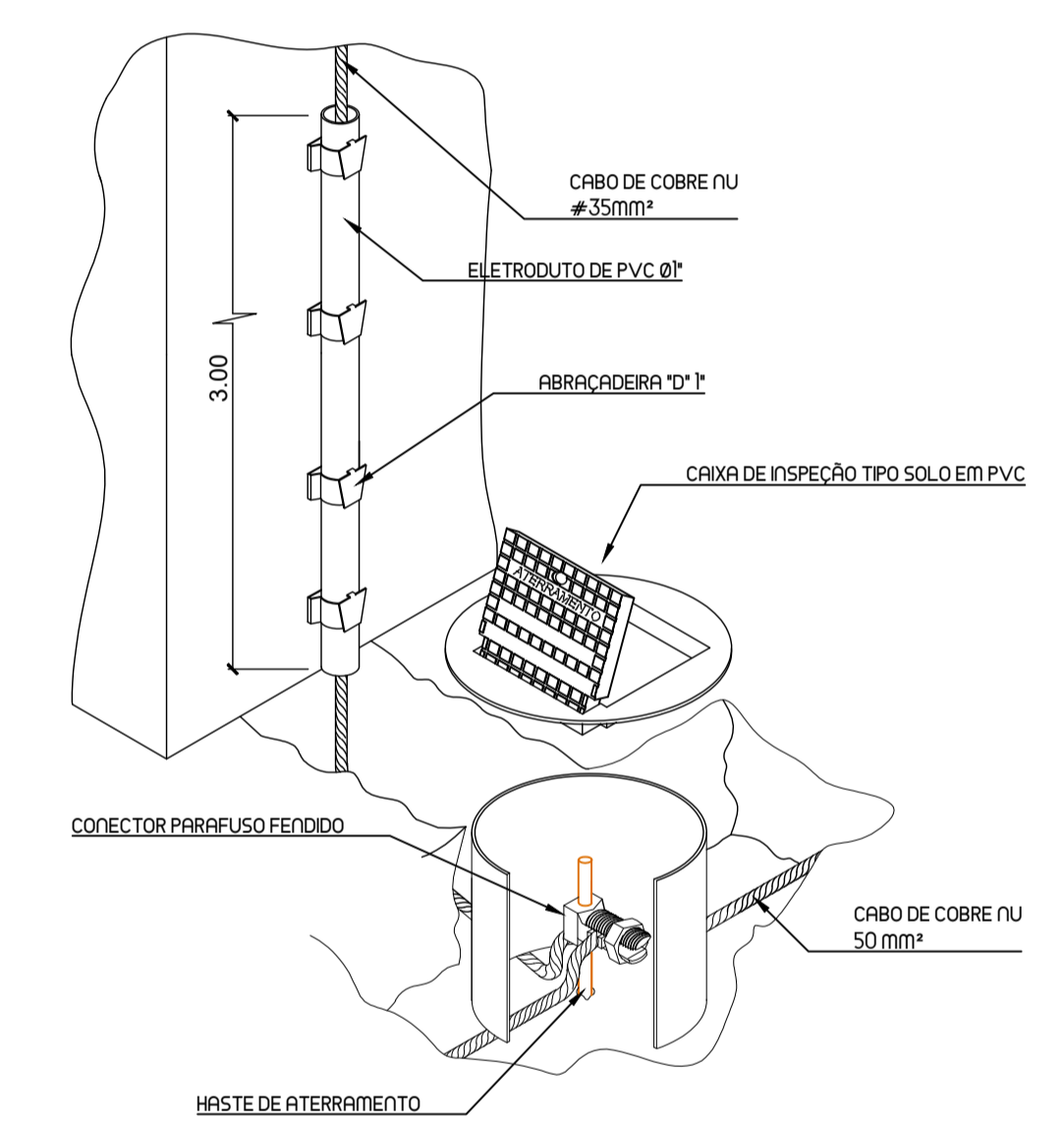
DETALHE - CONEXÃO DA MALHA COM SAÍDA PARA O SISTEMA DE ATERRAMENTO



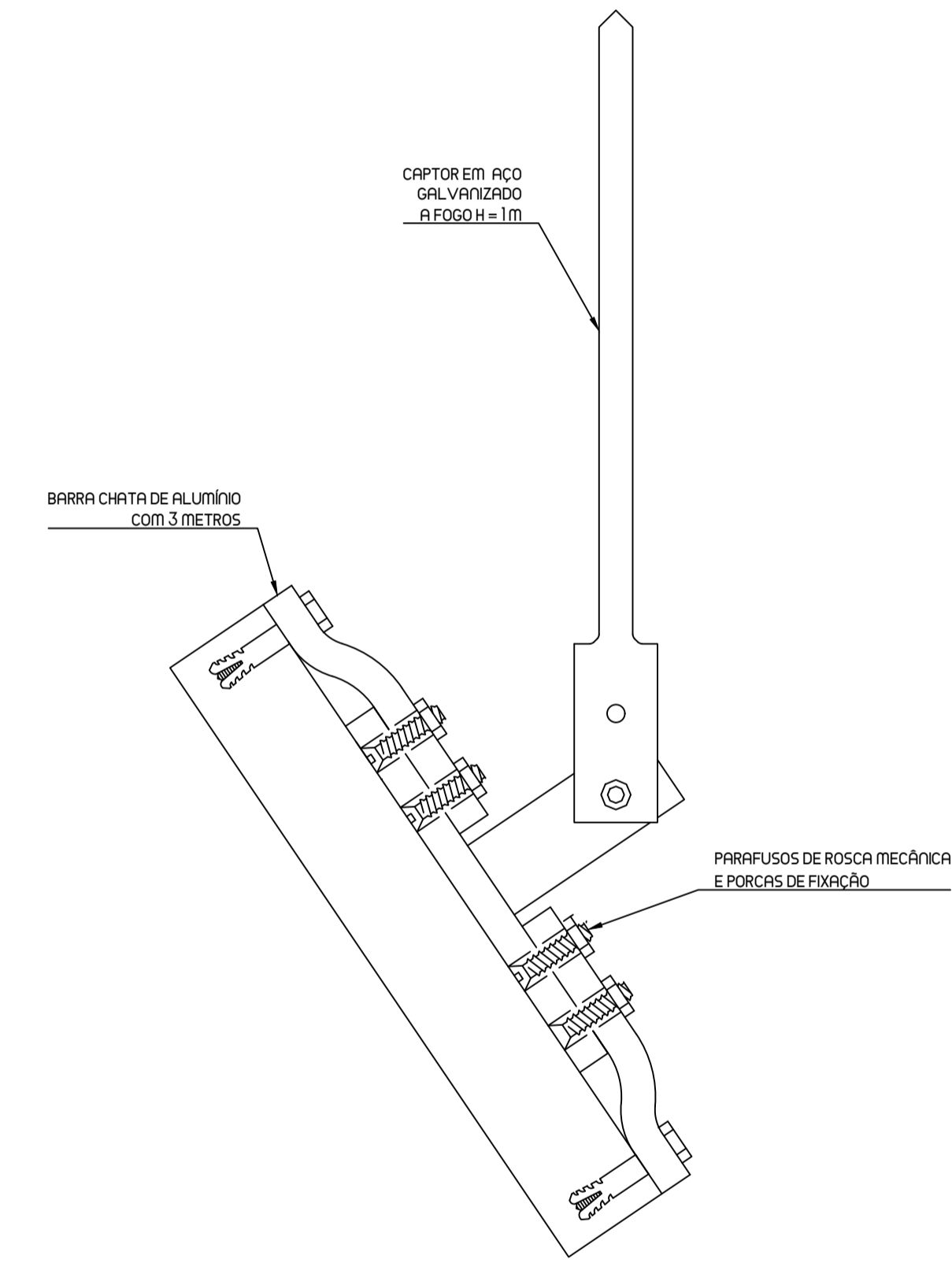
DETALHAMENTO 3 - MASTRO DE ATERRAMENTO AUTOSUPOSTADO



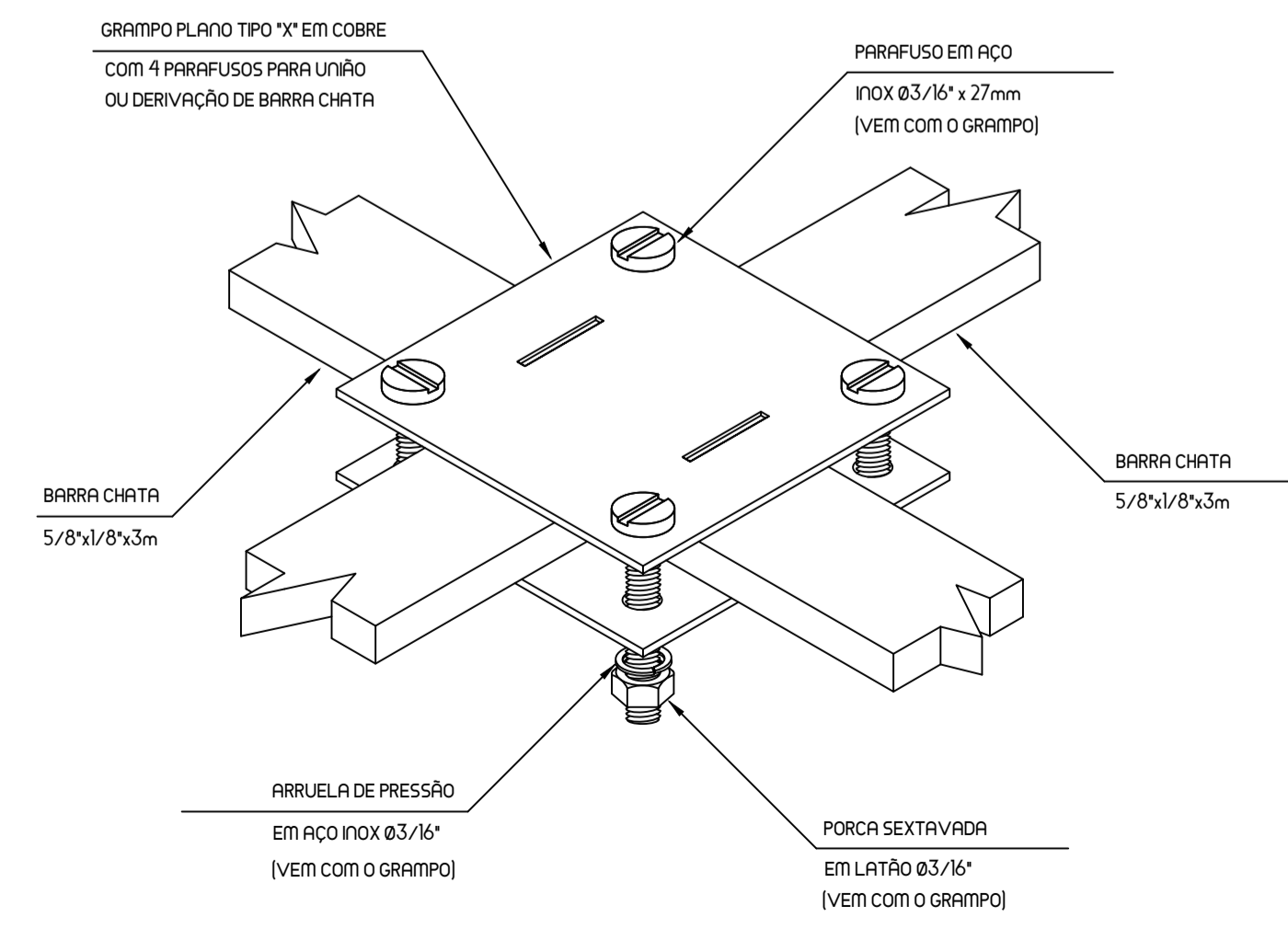
DETALHE - PLACA DE SINALIZAÇÃO DO SPDA



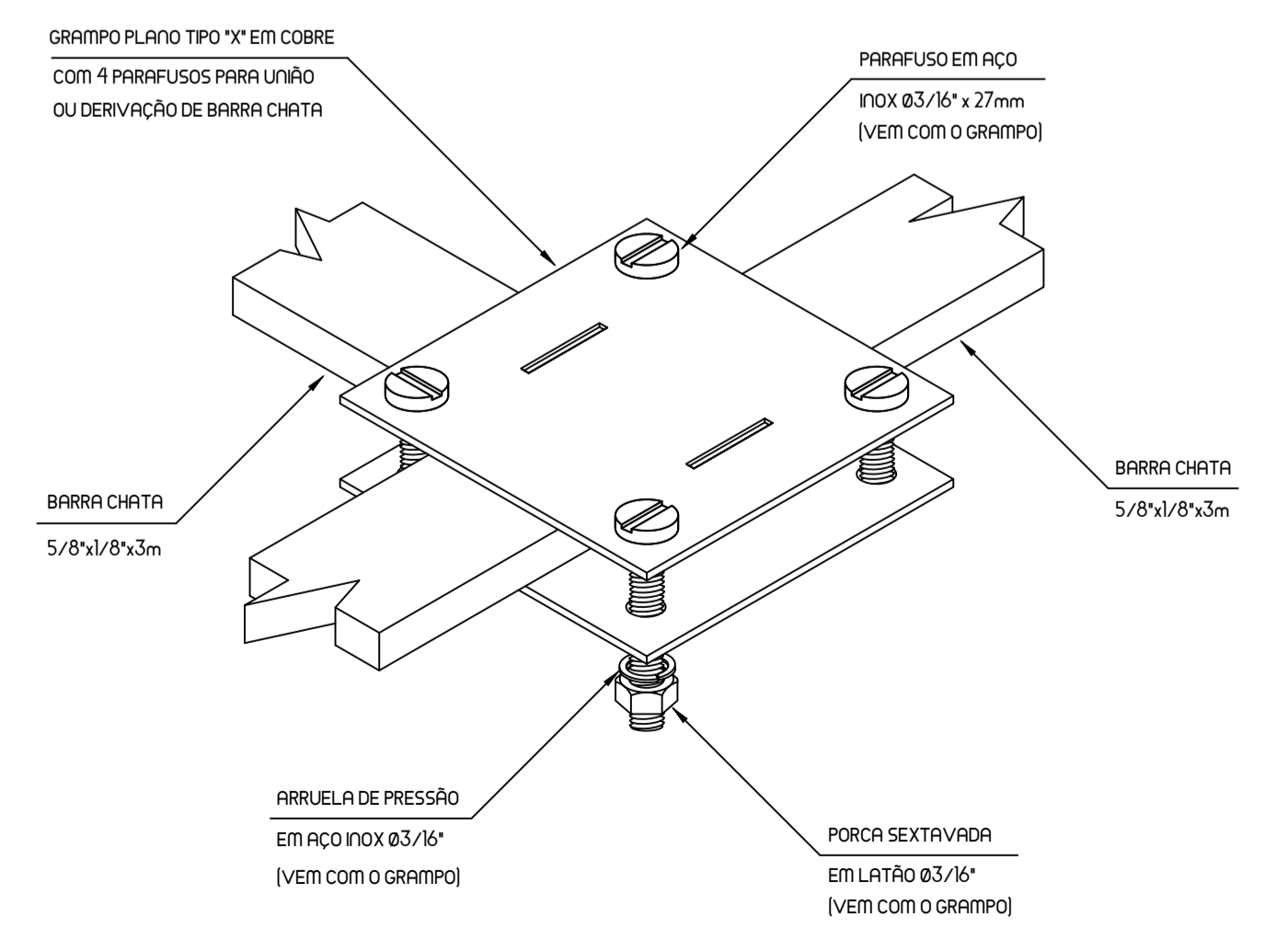
DETALHE DESCIDA CABO NU DE COBRE COM LIGAÇÃO NO ATERRAMENTO



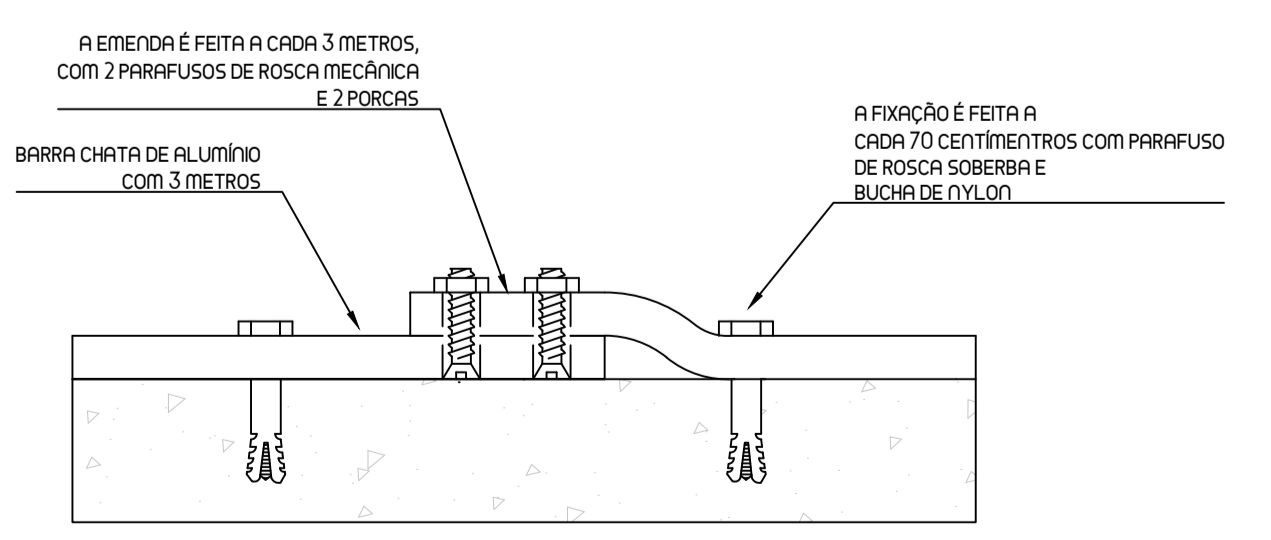
DET. 4 - INSTALAÇÃO DO CAPTOR/MASTRO EM DESNÍVEL



DET. 5 - DE CONEXÃO EM 'X' ENTRE BARRA CHATA



DET. 6 - CONEXÃO EM 'T' ENTRE BARRA CHATA



DET. 7 - EMENDA ENTRE AS BARRAS CHATAS DE ALUMÍNIO