

SIMONE SCHUINDT MARTINS

CHOQUE ELÉTRICO POR TENSÃO DE PASSO E TOQUE DEVIDO FALTA DE
PROJETO DE SPDA

São Paulo

2022

SIMONE SCHUINDT MARTINS

CHOQUE ELÉTRICO POR TENSÃO DE PASSO E TOQUE DEVIDO FALTA DE
PROJETO DE SPDA

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Especialista em
Engenharia de Segurança do Trabalho

São Paulo
2022

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que, sem nenhuma obrigação, estiveram presentes e contribuíram para sua confecção. A todos os professores que em todos os momentos me auxiliou de forma tão afável. Sobretudo à minha família, amigos e em especial ao meu cônjuge por todo o suporte.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por me dar força de vontade para superar todos os desafios, por ter me proporcionado chegar até aqui, por ser a base da minha vida e das minhas conquistas e pelo dom da vida.

À minha família, principalmente aos meus pais, por tudo que já fizeram por mim, contribuindo para minha evolução e agradeço ainda pelo apoio, compreensão e principalmente, paciência durante todas as fases da minha vida.

Agradeço a todas as pessoas que passaram por mim e deixaram sua contribuição no meu processo de desenvolvimento pessoal e profissional e que coadjuvaram em meu amadurecimento.

Agradeço ainda aos colegas da pós-graduação, por toda paciência, ajuda e encorajamento e a todos os professores por compartilhar o conhecimento, a experiência e por estarem sempre dispostos a tirarem nossas dúvidas.

Por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho da Focus Engenharia Elétrica, que com entusiasmo, me apoiaram durante todo o período do curso e que por muitas vezes afrouxarem minha agenda para que conseguisse atender a carga horária da grade curricular do curso.

Em especial ao meu esposo, Adimilsom Gonçalves, por ser meu maior incentivador na dedicação aos estudos e a minha carreira profissional.

“A adversidade desperta em nós capacidades que, em circunstância favoráveis, teriam ficado adormecidas.”

(Horácio).

RESUMO

MARTINS, Simone Schuindt. **Choque elétrico por tensão de passo e toque devido a falta de projetos de SPDA.** 2022. 84f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Programa de Educação Continuada. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2022.

Sendo objeto de admiração e estudo há milhares de anos, as descargas atmosféricas são fenômenos naturais que ocorrem de forma aleatória e imprevisível, não sendo possível assim, impedir o seu acontecimento.

É uma descarga elétrica de grandes magnitudes, com correntes e tensão na ordem de quiloampères (kA) e megavolts (MV) e são formadas pelo acúmulo de cargas elétricas na atmosfera. Quando há uma diferença de polaridade entre as cargas acumuladas na nuvem e no solo, tende-se a formação da faísca que conhecemos como raio.

Devido sua alta intensidade, os estragos ocasionados pelo contato da descarga elétrica com o solo ou alguma superfície podem ser imensos, ocasionando desde percas patrimoniais, até mesmo a morte de pessoas e animais.

Há, no entanto, medidas de proteção de forma a mitigar os estragos ocasionados pela descarga atmosférica, evitando assim avarias e promovendo a segurança dos indivíduos. Para tanto, é imprescindível que locais públicos e de grande movimentação de pessoas adotem as medidas de segurança citadas nas normas regulamentadoras e técnicas.

Dessa forma, o presente estudo tem o intuito de demonstrar, através da ausência de documentação técnica, as condições de riscos de choque elétrico por tensão de passo e tensão de toque em que colaboradores de uma determinada empresa são submetidos.

No primeiro momento, foi verificado a existência do sistema de proteção contra descarga atmosférica e posteriormente, levantado os documentos de malha de aterramento e SPDA de forma a identificar as tratativas técnicas pertinentes ao tema. Visando ilustrar a carência de dados técnicos da documentação existente e avaliada, foi proposto exemplificar a forma correta na implementação do SPDA e malha de

aterramento, confrontando com a documentação de outra empresa que atende os requisitos de segurança da NR-10 e normas técnicas.

Para a realização das análises foi utilizado um acervo bibliográfico de normas regulamentadoras, normas técnicas vigentes, livros e artigos sobre o assunto com intuito de consolidar os argumentos ao tema proposto.

Palavras-chave: SPDA. Riscos elétricos. Descarga atmosférica. Tensão de passo. Tensão de toque. Malha de aterramento.

ABSTRACT

MARTINS, Simone Schuindt. **Electric shock by step and touch voltage due to lack of LPS projects.** 2022. 84f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Programa de Educação Continuada. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2022.

A subject of admiration and study for thousands of years, lightning discharges are natural phenomena that occur in a random and unpredictable way, so it is not possible to prevent them from happening.

It is an electrical discharge of large magnitudes, with currents and voltage on the order of kiloamps (kA) and megavolts (MV) and are formed by the accumulation of electrical charges in the atmosphere. When there is a difference in polarity between the charges accumulated in the cloud and on the ground, it tends to form the spark that we know as lightning.

Due to its high intensity, the damage caused by the contact of the electrical discharge with the ground or any surface can be immense, causing from property loss to the death of people and animals.

There are, however, protection measures in order to mitigate the damage caused by lightning discharge, thus avoiding damages and promoting the safety of individuals. To this end, it is essential that public places and places with large movements of people adopt the safety measures cited in regulatory and technical standards.

In this way, the present study aims to demonstrate, through the absence of technical documentation, the conditions of risk of electric shock by step voltage and touch voltage in which employees of a particular company are subjected.

In the first moment, the existence of the atmospheric discharge protection system was verified, and later, the grounding mesh and SPDA documents were surveyed in order to identify the relevant technical treatments for the theme.

In order to illustrate the lack of technical data of the existing and evaluated documentation, it was proposed to exemplify the correct way to implement the SPDA and grounding mesh, comparing it with the documentation of another company that meets the safety requirements of NR-10 and technical standards.

To carry out the analysis, a bibliographic collection of regulatory standards, current technical standards, books and articles on the subject was used in order to consolidate the arguments for the proposed theme.

Keywords: LPS. Electrical hazards. Atmospheric discharge. Step voltage. Touch voltage. Grounding grid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Movimento dos elétrons por um condutor	21
Figura 2 - Estrutura atômica (modelo de Rutherford)	22
Figura 3 – Corrente elétrica contínua constante.....	23
Figura 4 – Corrente elétrica contínua pulsante.....	23
Figura 5 – Corrente elétrica alternada.....	24
Figura 6 – Ciclo completo da CA.....	24
Figura 7 – Circuito característico corrente contínua x corrente alternada	25
Figura 8 – Esquema básico de um circuito elétrico	26
Figura 9 – Trajetória da corrente no corpo humano	29
Figura 10 – Mortes por tipo de acidente de origem elétrica em 2020.....	32
Figura 11 – Benjamin Franklin em seu experimento com pipa em 1752.....	33
Figura 12 – Característica da nuvem <i>Cumulonimbus</i>	34
Figura 13 – Formação da descarga atmosférica	35
Figura 14 – Descarga elétrica intranuvem.....	36
Figura 15 – Descargas elétrica internuvem	36
Figura 16 – Polaridade das descargas atmosféricas do tipo descendente	37
Figura 17 – Polaridade das descargas atmosféricas do tipo ascendentes.....	37
Figura 18 – Análise da tensão de passo através de uma descarga atmosférica.....	40
Figura 19 – Tensão de passo.....	42
Figura 20 – Caminho da corrente para o solo – tensão de passo	42
Figura 21 – Caminho da corrente para o solo – tensão de toque.....	43
Figura 22 – Análise da tensão de toque através de uma descarga atmosférica	44
Figura 23 – Sistema completo de SPDA	47
Figura 24 – Método do ângulo de proteção.....	48
Figura 25 – Captor tipo Franklin	48
Figura 26 – Método da esfera rolante	49
Figura 27 – Método das malhas	50
Figura 28 – Detalhe típico de montagem do método das malhas em telhado	50
Figura 29 – Detalhe típico de condutores de descidas.....	51
Figura 30 – Eletrodo de aterramento em anel	53
Figura 31 – Eletrodo de aterramento em anel.....	53

Figura 32 – Detalhe típico de uma equipotencialização elétrica.....	55
Figura 33 – Distância de segurança “s”.....	60
Figura 34 – Pastas do PIE.....	63
Figura 35 – Ferramenta de pesquisa rápida	63
Figura 36 – Layout software sistema de gerenciamento	65
Figura 37 – Nota do projeto de aterramento e SPDA.....	66
Figura 38 – Detalhes da execução do aterramento.....	67
Figura 39 – Projeto de SPDA empresa Caso B.....	68
Figura 40 – Método Wenner.....	69
Figura 41 – Medição de Resistividade do solo	70
Figura 42 – Gráfico da estratificação do solo	71
Figura 43 – Cálculo da seção do cabo	72
Figura 44 – Malha de aterramento - Croqui	72
Figura 45 – Potencial de passo da malha de aterramento	73
Figura 46 – Potencial de toque da malha de aterramento.....	74
Figura 47 – Legenda de cores.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intensidade da corrente x Dano causado no corpo	29
Tabela 2 – Porcentagem de corrente elétrica no coração.....	30
Tabela 3 – Chances de salvamento	31
Tabela 4 – Ordem de grandeza da resistividade dos materiais.....	41
Tabela 5 – Efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas	45
Tabela 6 – Lista de materiais	69
Tabela 7 – Resultado da estratificação do solo em camadas	70
Tabela 8 – Características SPDA Casa de Comando	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
AC	Alternating Current
As Built	Conforme construído
BEL	Barramento de Equipotencialização Local
BEP	Barramento de Equipotencialização Principal
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DC	Direct Current
ddp	Diferença de Potencial
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
DWG	Extensão de arquivos de desenho em 2D e 3D nativo do software AutoCAD
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
GIS	Tecnologia de Subestações Compactas
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MRT	Monofilar com Retorno por Terra
NBR	Norma Brasileira
NC	Não Conformidade
NR-10	Norma Regulamentadora 10
PDA	Proteção de descargas Atmosféricas
PIE	Prontuário das Instalações Elétricas
Pta	Probabilidade de uma descarga a uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque e de passo
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
std	Standard

LISTA DE SIMBOLOS

A	Ampère
a	Área
a.C	Antes de Cristo
C	Coulomb
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente contínua
cm	Centímetro
ddp	Diferença de potencial
dB	Decibéis
Δt	intervalo de tempo
e^-	Elétron
f	Frequênciа
°C	Grau Celsius
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
i	intensidade da corrente elétrica
If	Corrente de curto-circuito
J	Joule
kA	Quiloampère
Km	Quilometro
kV	Quilovolt
ℓ	Lado / aresta
m	Metro
mA	Miliampere
mm ²	Milímetro quadrado
MV	Megavolt
MVA	Megavoltampère
n	Nêutron
Ω	Ohm
$\Omega \cdot m$	Ohm metro
P	Potência elétrica

p ⁺	Próton
Q	carga elétrica
R	Resistência elétrica
s	segundo
“s”	Distância de Segurança contra centelhamento perigoso
t	Tempo
U	Tensão elétrica
V	Volts
W	Watt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO	18
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 CORRENTE ELÉTRICA	20
2.1.1 Corrente elétrica contínua.....	22
2.1.2 Corrente elétrica alternada.....	24
2.2 TENSÃO ELÉTRICA.....	26
2.3 CHOQUE ELÉTRICO	28
2.4 DESCARGA ATMOSFÉRICA	33
2.4.1 Intranuvem.....	35
2.4.2 Internuvens.....	36
2.4.3 Nuvem-Solo	37
2.5 TENSÃO DE PASSO	40
2.6 TENSÃO DE TOQUE.....	43
2.7 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTA DESCARGA ATMOSFÉRICA (SPDA).....	45
2.7.1 Subsistema de captação	47
2.7.2 Subsistema de descida	51
2.7.3 Subsistema de aterramento	52
3 METODOLOGIA	56
3.1 METODOLOGIA DE TRABALHO	56
3.1.1 Item 10.2.4.....	56
3.1.2 Item 10.2.4.b	57
3.1.3 Item 10.2.8.3.....	57
3.1.4 Item 10.3.4.....	58
3.1.5 Item 10.3.7.....	58
3.1.6 Item 10.3.8.....	59
3.1.7 Item 10.3.9.....	59
3.1.8 Item 10.4.1.....	60
3.2 ESTUDO DE CASO	61
3.3 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS	62

3.3.1 Referencial técnico	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1 EMPRESA CASO A.....	66
4.2 EMPRESA CASO B.....	68
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
5 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS.....	78
APÊNDICE A – ESQUEMAS DE ATERRAMENTO DE BAIXA TENSÃO	81
ANEXO A – CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO SPDA DE PÁTIO	82
ANEXO B – GERENCIAMENTO DE RISCO	84

1 INTRODUÇÃO

Recentemente foi divulgado na web um vídeo de câmeras de segurança onde mostra um grupo de 4 pessoas debaixo de uma árvore se abrigando da chuva, o vídeo mostra o momento em que ao cair um raio na árvore, um por um do grupo cai no chão. Esse vídeo viralizou entre aplicativos de conversas sendo repassado centenas de vezes. (YOUTUBE, 2021).

O fenômeno que causou a queda daquele grupo de pessoas existe há bilhões de anos, porém a explicação começou a ser estudada há pouco tempo e sua divulgação ficou limitada a um seletivo grupo de interessados no assunto. (ADNORMAS, 2018).

A premissa de não se abrigar debaixo ou próximo a árvores, em campos abertos ou próximo de grades/cercas metálicas durante uma tempestade se dá devido ao risco potencial de ser atingido por um fenômeno da natureza denominado como descarga atmosférica, o famoso raio. (AGÊNCIA BRASÍLIA, 2021).

A descarga atmosférica é uma descarga elétrica de grande intensidade que ocorre na atmosfera, são fenômenos que envolvem elevados níveis de corrente e tensão, em eventos de curta duração. Por estes motivos, os efeitos de uma descarga atmosférica podem ser extremamente graves. (ELAT, s.d.).

As sobretensões de origem atmosférica, causadas por descargas diretas ou indiretas, podem causar acidentes, como o que ocorreu no vídeo mencionado, através de um fenômeno da eletricidade chamada tensão de passo e toque. (MUNDO DA ELÉTRICA, 2017)

1.1 OBJETIVO

Esta monografia tem como objetivo apresentar os riscos de choque elétrico no setor industrial, ocasionados pelo fenômeno natural da descarga atmosférica devido à ausência de projetos de SPDA e a falta da memória de cálculo da malha de aterramento em subestações. Além de propor sugestões nas instalações com a finalidade de reduzir os riscos de acidentes elétricos aos trabalhadores.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido ao aumento significativo de acidentes de trabalho tendo a eletricidade como protagonista nos últimos anos — comercial, industrial e doméstico — e com o aumento da mídialização, as organizações públicas e privadas têm buscado uma maior fiscalização do ponto de vista de atendimento às normas regulamentadoras.

Conforme a NR-10, que é a norma que regulamenta a segurança em atividades envolvendo eletricidade, no item 10.2.4, diz que para todos os estabelecimentos cujo a carga instalada seja superior a 75kW deverão possuir o Prontuário de Instalações Elétricas (PIE), onde deverá ser mantido e atualizado um conjunto de documentos técnicos desenvolvidos para o estabelecimento.

A escolha do tema teve como principal motivação a falta de documentação, projetos, laudos, entre outras evidências técnicas, em especial envolvendo descargas atmosféricas que podem impossibilitar a segurança dos colaboradores pela falta de dados ou informações, visto que, uma das atividades desenvolvidas pela autora desta obra em seu ambiente profissional é justamente examinar e organizar a documentação que compõe o PIE.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CORRENTE ELÉTRICA

A corrente elétrica é uma grandeza física fundamental para o estilo de vida atual, sem ela somos incapazes de realizarmos as atividades mais simples do cotidiano doméstico, como acender um fogão ou lavar uma roupa. Dependemos dela para fazer funcionar, desde os equipamentos elétricos e eletrônicos mais usuais, como em grandes processos industriais.

Nos condutores elétricos como metais, solo, corpo humano, entre outros, existe naturalmente uma grande quantidade de elétrons livres que se movem por todo o corpo condutor de forma caótica, porém, quando os elétrons passam a se movimentar de modo ordenado pelo condutor (sólido ou soluções iônicas), esse fenômeno é denominado como corrente elétrica.

Para que haja um fluxo ordenado das cargas existentes no condutor, deve surgir uma diferença de potencial (ddp) entre dois pontos do corpo condutor, gerando assim uma tensão elétrica, que por sua vez força as cargas a se deslocarem ordenadamente.

A grandeza física corrente elétrica é representada pela letra “I” e unidade de medida que possibilita conhecer qual a quantidade de cargas que atravessa a secção do condutor num determinado tempo é o ampère (A).

É possível calcular a corrente elétrica de várias formas, dependendo das variáveis disponíveis. Por exemplo, pode-se conhecer a intensidade da corrente elétrica que circula em um determinado condutor através da fórmula abaixo.

$$i = \frac{|Q|}{\Delta t}$$

Onde:

i = intensidade da corrente elétrica (A);

Q = carga elétrica (C);

Δt = intervalo de tempo (s).

Ou ainda, a partir da “Lei de Ohm” pode-se conhecer a corrente elétrica de um circuito elétrico/eletônico, como mostrado na fórmula a seguir.

$$I = \frac{U}{R}$$

Onde:

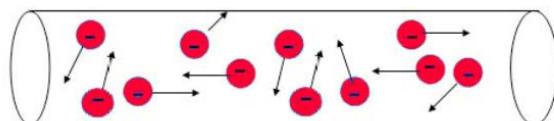
I = corrente elétrica (A);

U = Tensão elétrica (V);

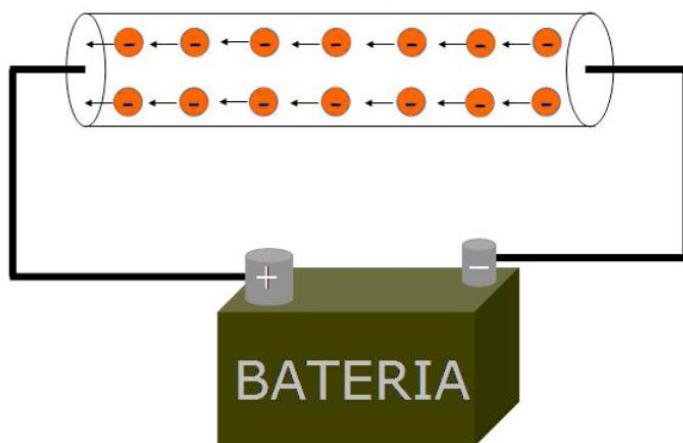
R = resistência elétrica (Ω).

Figura 1 - Movimento dos elétrons por um condutor

Movimento desordenado



Movimento ordenado



Fonte: Ensinando Eletricidade (2016)

Para uma melhor compreensão da definição de corrente elétrica se faz necessário entender outros conceitos igualmente importantes.

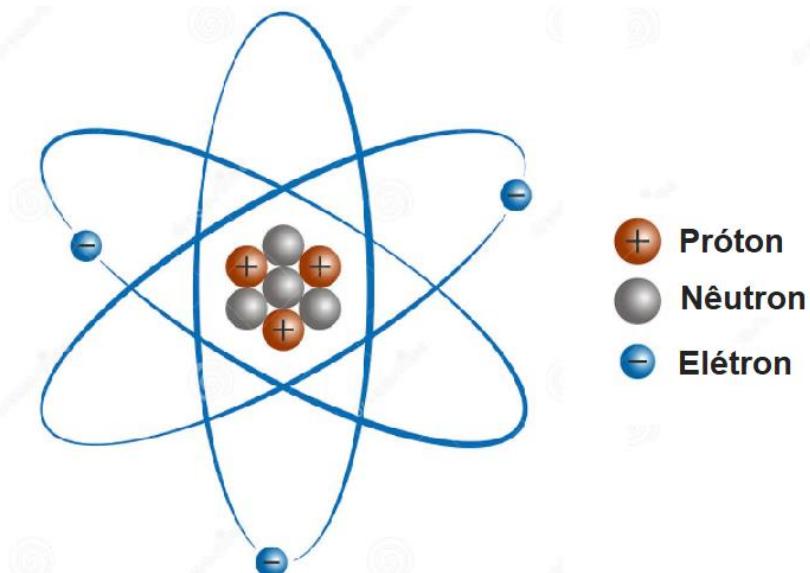
A propriedade das partículas fundamentais que compõem o átomo, denominada como cargas elétricas são os prótons, os nêutrons e os elétrons. A unidade de grandeza de carga elétrica é o Coulomb (C).

Os prótons (p^+) possuem carga elétrica positiva e os nêutrons (n) não possuem cargas e é formado por duas partículas menores chamadas de Quarks Downs e uma partícula

Quark Up. Juntos, formam o núcleo do átomo (parte central, densa, compacta e maciça) e propiciam a estabilidade do átomo.

Os elétrons (e^-) são partículas de carga negativa que constituem o átomo orbitando ao redor do núcleo através da eletrosfera (região perimetral ao redor do núcleo).

Figura 2 - Estrutura atômica (modelo de Rutherford)



Fonte: Dreanstime (2020)

Para tanto, apesar de corrente elétrica ser definida como a movimentação ordenada da carga elétrica, existem dois tipos de corrente elétrica, a corrente contínua e corrente alternada onde a direção dos elétrons não muda, mas os movimentos são fundamentalmente diferentes e depende das condições de utilização, dependendo da forma de movimentação dos elétrons.

2.1.1 CORRENTE ELÉTRICA CONTÍNUA

A corrente elétrica contínua (CC ou DC para “*Direct Current*” em inglês) é a corrente no qual os elétrons se deslocam em apenas uma direção, ou seja, sempre em uma única polaridade. Por não ter variação de sentido, possui como principal característica

a conservação da carga, que permanece sempre a mesma devido o fluxo de elétrons não mudar de direção.

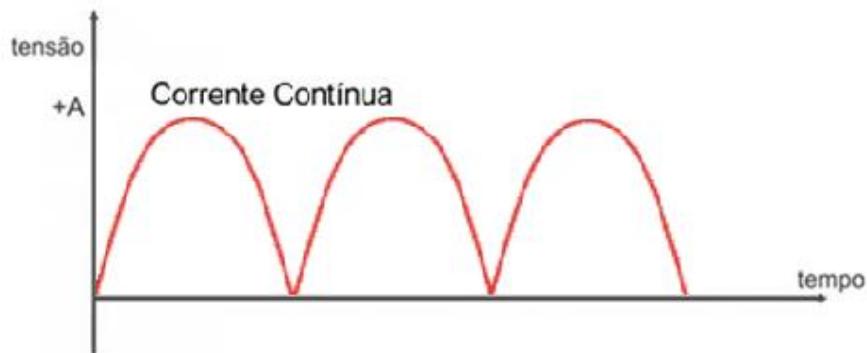
Figura 3 – Corrente elétrica contínua constante



Fonte: Adaptado de Portal Solar (2021)

Embora os elétrons sejam forçados a se deslocar por um sentido único, a corrente contínua pode possuir o perfil constante ou pulsante e mesmo que oscile, porém, permanece contínua se o fluxo de elétrons não alternar.

Figura 4 – Corrente elétrica contínua pulsante



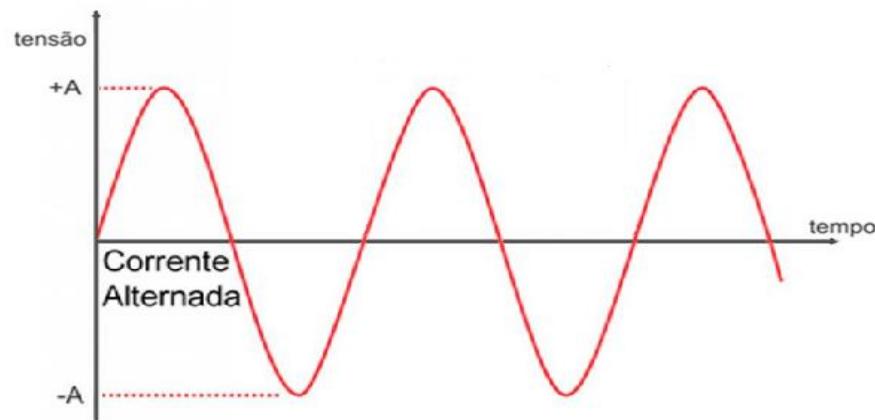
Fonte: Adaptado de Alfa Conecction (2020)

A corrente contínua é empregada em pilhas, baterias, na geração de energia fotovoltaica, entre outros.

2.1.2 CORRENTE ELÉTRICA ALTERNADA

A corrente elétrica alternada (CA ou AC para “*Alternating Current*” em inglês) é a corrente do qual os elétrons variam sua direção de forma alternada, se deslocando em duas direções sendo uma positiva e outra negativa.

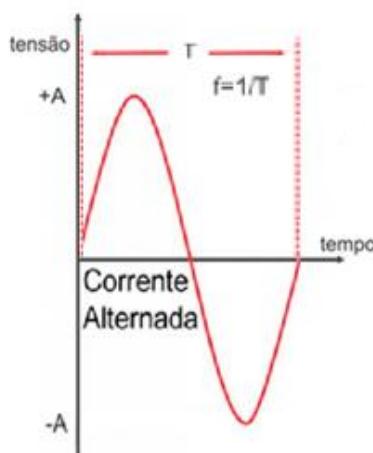
Figura 5 – Corrente elétrica alternada



Fonte: Portal Solar (2021)

Esse deslocamento da corrente entre o sentido positivo e o negativo corresponde a um ciclo, ou oscilações de ondas, e o número de ciclos a cada 1 segundo recebe o nome de frequência (f) cujo unidade de medida é o Hertz (Hz).

Figura 6 – Ciclo completo da CA



Fonte: Adaptado de Canal EET, 2016

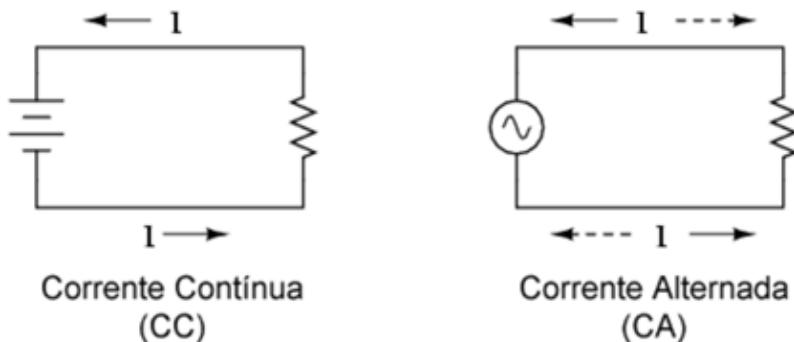
Ou seja, a quantidade de ciclos por segundos de corrente alternada determina qual a frequência da rede elétrica, por exemplo, no Brasil a frequência é de 60 Hz (60 ciclos por segundo) já na Europa é usada uma frequência de 50 Hz.

Essa variação permite que a corrente alternada seja transportada por longas distâncias e possui facilidade de alteração de sua tensão por meio do uso de transformadores. Dessa forma, é mais aplicada em grandes potências, como, por exemplo, usinas elétricas, geradores de energia, linhas de transmissão, inversores de energia, etc.

De modo geral, a corrente contínua e a corrente alternada se diferem pelas seguintes características:

- Distância percorrida pela corrente;
- Perdas de energia;
- Sentido da corrente.

Figura 7 – Circuito característico corrente contínua x corrente alternada



Fonte: Citi Systems (2018)

Sendo que a corrente alternada é mais eficaz para transmissão de energia elétrica e corrente contínua mais utilizada no campo da eletroeletrônica.

2.2 TENSÃO ELÉTRICA

A tensão elétrica ou diferença de potencial (ddp) é a grandeza física correspondente ao trabalho feito para deslocar cargas elétricas entre dois pontos, ou seja, mede a diferença do potencial elétrico produzida ou, de forma simplificada, a energia gerada para movimentar uma determinada carga elétrica.

A tensão é a fonte que alimenta o circuito elétrico promovendo o deslocamento sistemático dos elétrons gerando assim a corrente elétrica e consequentemente, o funcionamento dos equipamentos, dispositivos, ferramentas, etc.

A tensão elétrica, cuja grandeza é representada pela letra U é medida em Volt (V) e pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$U = R \cdot I$$

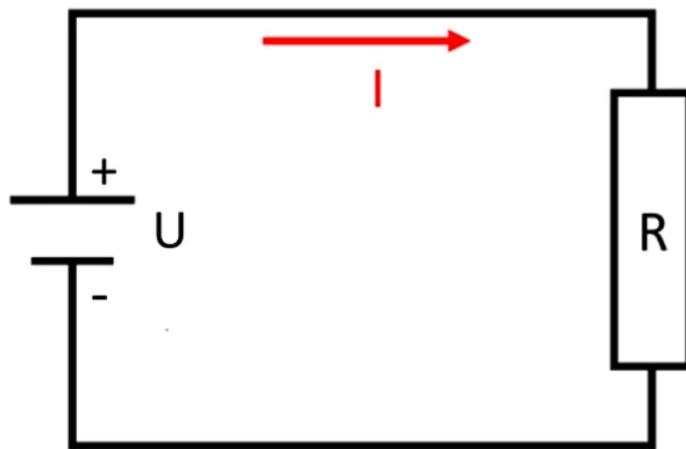
Onde:

U = tensão elétrica (V);

R = resistência elétrica (Ω);

I = corrente elétrica (A).

Figura 8 – Esquema básico de um circuito elétrico



Fonte: Toda Matéria (2020)

Ou ainda através do uso da potência elétrica (P), sendo a quantidade de energia elétrica consumida num circuito por um determinado tempo, onde sua unidade de medida é o Watt (W).

$$U = \frac{P}{I}$$

Onde:

U = tensão elétrica (V);

P = potência elétrica (W);

I = corrente elétrica (A).

Nota: Resistência elétrica, mencionado nos itens 2.1 e 2.2, refere-se à capacidade que o corpo tem a se opor à passagem da corrente, ou seja, quando os elétrons são submetidos a uma diferença de potencial e passam a movimentar-se pelo condutor gerando um número de colisões entre os elétrons e o material condutor e quanto mais colisões, maior a resistência medida em Ohm (Ω).

2.3 CHOQUE ELÉTRICO

Choque elétrico é a resposta do organismo ao evento da passagem de corrente elétrica através do corpo humano ou animal e seus efeitos variam em função da intensidade da corrente e o tempo que ela circula pelo corpo.

Embora as funções normais do corpo humano funcionam através de impulsos elétricos, quando ocorre o contato (na maioria das vezes acidental) com uma fonte de energia elétrica a corrente circula por todo o corpo em direção a terra. Isso ocorre quando surge uma diferença de potencial (ddp) suficiente para extrapolar o valor da resistência imposta pelo corpo que culmina num caminho para a corrente à terra.

A resistência do corpo humano à passagem de corrente está quase exclusivamente na camada externa da pele (epiderme) e varia de pessoa para pessoa, tendo um adulto em média, uma resistência de $250\text{ k}\Omega$ quando a pele está seca podendo chegar a $100\text{ }\Omega$ com a pele úmida.

O choque elétrico é um dos maiores traumas impostos ao organismo e os efeitos sentidos podem ser formigamentos, dores, espasmos ou contrações musculares, parada cardiorrespiratória e as consequências podem ser desde pequenas queimaduras superficiais até mesmo a morte.

Os efeitos causados pelo choque elétrico podem ser caracterizados por:

- Lesões não térmicas;
- Quedas e batidas contra;
- Contrações violentas dos músculos;
- Lesões térmicas;
- Fibrilação ventricular do coração;
- Óbito.

Correntes inferiores a 1 mA não são facilmente percebidas quando passam pelo corpo humano, porém as correntes acima de 20 mA são altamente perigosas, sendo que as correntes da ordem de 80 mA são normalmente fatais, de acordo com José Henrique Rodas Durán em seu livro Biofísica: Fundamentos e Aplicações (2003, p.177-178):

Os efeitos biológicos no corpo humano dependem da intensidade da corrente externa aplicada. Para correntes:

- até $0,5\text{ mA}$: nenhum efeito importante;

- de 0,5 mA até 2,0 mA: limiar de sensibilidade;
- de 2 mA até 10 mA: dor, contrações musculares;
- de 10 mA até 20 mA: aumento dos efeitos musculares, alguns danos em volta dos 16 mA;
- de 20 mA até 100 mA: parada respiratória;
- de 100 mA até 3 A: fibrilação ventricular que pode ser fatal;
- acima de 3 A: parada cardíaca; queimaduras muito sérias.

A tabela abaixo apresenta, simplificadamente, os danos causados dependendo dos valores de corrente:

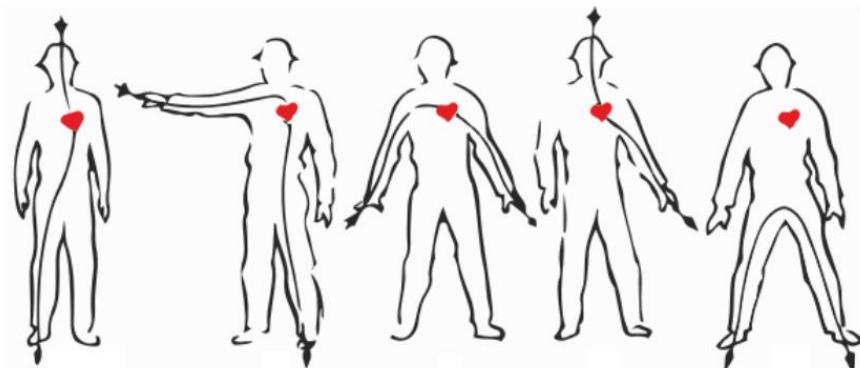
Tabela 1 - Intensidade da corrente x Dano causado no corpo

Corrente elétrica	Dano fisiológico
1 mA a 10 mA	apenas formigamento
10 mA a 20 mA	dor e forte formigamento
20 mA a 100 mA	convulsões e parada respiratória
100 mA a 200 mA	Fibrilação ventricular
Acima de 200 mA	queimaduras e parada cardíaca

Fonte: Adaptado de Brasil Escola (s.d)

A proporção do dano depende quase que unicamente da intensidade da corrente, mas outros fatores biológicos também podem influenciar, como o sexo, massa corporal, idade, influências externas (álcool, suor, etc.) e a trajetória da corrente pelo corpo, no entanto, a ausência de queimaduras ou lesões externas não implica na inexistência de danos elétricos internos graves.

Figura 9 – Trajetória da corrente no corpo humano



Fonte: Cone de Mach (2017)

Os choques mais perigosos, devido aos danos causados, acontecem quando a corrente elétrica transita pelo coração, pois altera o ritmo cardíaco. Como observado na figura acima, a corrente elétrica pode percorrer o corpo humano por vários caminhos e cada trajeto expõe o coração a um percentual de corrente elétrica, como podemos observar na tabela abaixo.

Tabela 2 – Porcentagem de corrente elétrica no coração

Trajeto	Percentagem da Corrente no Coração
Da cabeça para o pé direito	9,7 %
Da mão direita para o pé esquerdo	7,9 %
Da mão direita para a mão esquerda	1,8 %
Da cabeça para a mão esquerda	1,8 %
Entre os pés	0%

Fonte: Cone de Mach (2017)

Se a natureza da corrente que atravessa o corpo for alternada, o coração pode sofrer uma condição de fibrilação, ou seja, deixa de pulsar e passa a “flutuar” sendo incapaz de bombear o sangue para os órgãos vitais, enquanto que a corrente contínua pode fazer com que o coração apenas pare, promovendo uma maior possibilidade de recuperação. A fibrilação ventricular é o efeito mais grave causado pelo choque elétrico, como apresentado pela CPN-SP (2005, p.19):

“A fibrilação ventricular do coração ocorrerá se houver intensidades de corrente da ordem de 15mA que circulem por períodos de tempo superiores a um quarto de segundo. A fibrilação ventricular é a contração disritimada do coração que, não possibilitando desta forma a circulação do sangue pelo corpo, resulta na falta de oxigênio nos tecidos do corpo e no cérebro. O coração raramente se recupera por si só da fibrilação ventricular.

As lesões térmicas (ou queimaduras) causadas pelos choques elétricos são resultados da passagem da corrente elétrica pela pele através do efeito Joule, ou seja, a quantidade de energia elétrica do qual é convertida em energia térmica (calor). A equação a seguir apresenta como é calculada a potência térmica.

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

Onde:

Q = energia dissipada (J);

R = resistência elétrica (Ω);

I = intensidade da corrente elétrica (A);

t = tempo (s).

Quanto maior a intensidade da corrente elétrica e maior o tempo de exposição do corpo a esta corrente, maior será a potência térmica gerada no ponto de contato.

O tempo de exposição ao choque elétrico também é fator decisivo para o sucesso no salvamento da vítima de eletrocussão.

Tabela 3 – Chances de salvamento

Chances de salvamento	
Tempo após o choque para iniciar respiração artificial	Chances de reanimação da vítima
1 minuto	95%
2 minutos	90%
3 minutos	75%
4 minutos	50%
5 minutos	25%
6 minutos	1%
8 minutos	0,5%

Fonte: PROMINP-PCI (2013)

O óbito pode ocorrer por parada respiratória, parada cardíaca, queimaduras severas e até mesmo por queda, quando o contato causa a repulsa do corpo, muitas vezes pelo contato com a rede aérea de alta tensão¹.

Quando a intensidade da corrente do choque elétrico for superior a 30 mA o diafragma contrai de tal forma a perder sua função no auxílio da respiração natural ocasionando o óbito por asfixia.

¹ Tensão superior a 1.000V em CA ou 1.500V em CC. (Fonte: NR-10, 2019)

A ABRACOPEL, Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade, expõe em seus anuários dados estatísticos relacionados a acidentes envolvendo eletricidade e a preocupação com o número expressivo apresentado em seu anuário estatístico ABRACOPEL 2021 ano base de 2020 (2021, p.21):

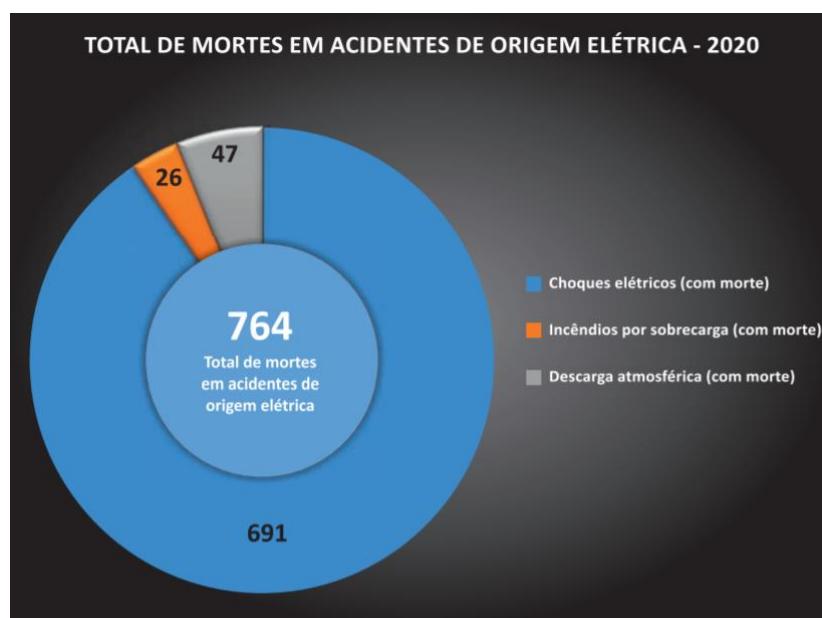
“O choque elétrico é, infelizmente um dos grandes motivos de perda de vidas. A negligência, o desconhecimento dos riscos, ou mesmo o descaso levam profissionais ou pessoas leigas em eletricidade a se aventurarem, e consequentemente, ao acidente, muitas vezes fatais.” . (ABRACOPEL, 2021).

Após a análise de uma série de anuários publicados entre 2013 a 2020, observou-se que mais da metade dos acidentes envolvendo eletricidade no Brasil são provocados por choque elétrico:

- 57% dos acidentes são por choque elétrico;
- 35% são incêndios por curto-circuito e sobrecarga;
- 8% por raios.

E que durante este período houveram mais de 4,5 mil acidentes fatais, tendo aproximadamente 700 mortes só no ano de 2020.

Figura 10 – Mortes por tipo de acidente de origem elétrica em 2020



Fonte: ABRACOPEL (2021)

2.4 DESCARGA ATMOSFÉRICA

Descargas atmosféricas são acontecimentos naturais que possui uma das manifestações mais extraordinárias e violentas da natureza. É um fenômeno de caráter elétrico que ocorre entre as nuvens ou entre a nuvem e a terra de forma imprevisível e aleatório.

Chamado popularmente de raio, é um dos fenômenos mais notáveis da natureza, tendo a primeira explicação de caráter científico escrita pelo filósofo grego Aristóteles², no século III a.C., onde atribui aos raios a possibilidade de provocar incêndios e sugeriu que as trovoadas eram colisões entre nuvens.

No entanto, foi só a partir do século XVIII que passou a ser estudada, quando William Wall associou o relâmpago a uma faísca produzida por um pedaço de âmbar carregado eletricamente, em 1708. Entretanto, o nome atribuído a descoberta desse fenômeno é o de Benjamin Franklin, pois ao tentar provar a natureza elétrica do relâmpago, foi o primeiro a projetar um experimento científico propondo que a eletricidade da nuvem poderia ser drenada de um mastro metálico até a terra.

Figura 11 – Benjamin Franklin em seu experimento com pipa em 1752



Fonte: Museu WEG (2017)

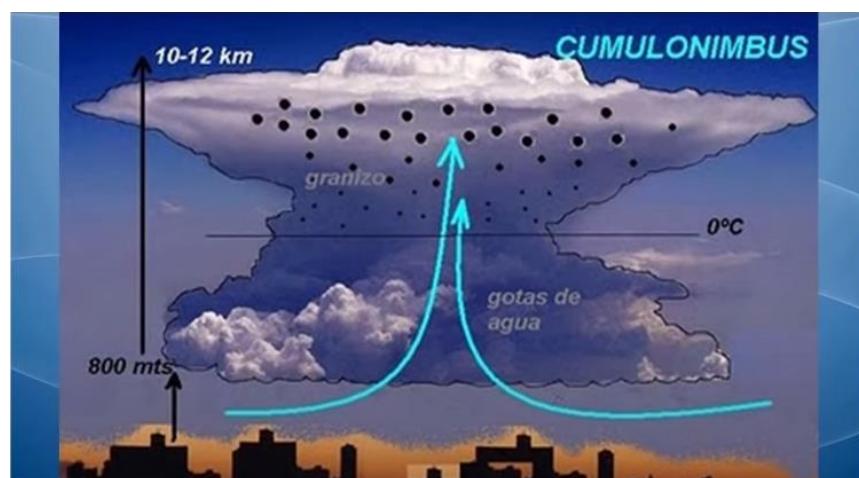
² Aristóteles foi um filósofo grego que viveu entre 384 a.C e 322 a.C., foi fundador da escola peripatética durante o período clássico da Grécia e domina áreas como a lógica, metafísica, ética, governo, linguística entre tantas outras. Foi aluno de nada menos que Platão e teve nomes como o de Alexandre, o Grande como seu pupilo. Assina inúmeras obras utilizadas como referências na atualidade e ostenta o título, juntamente com Platão e Sócrates como os edificadores da filosofia ocidental.

Descargas atmosféricas são descargas elétricas que ocorrem na atmosfera devido ao acúmulo de cargas elétricas. São manifestações de grande intensidade e curta duração (em média meio segundo), possuem elevados níveis de corrente (da ordem de centenas de kA) e tensão (da ordem de MV), podendo abranger grandes extensões territoriais. As propriedades elétricas da carga produzida por esse fenômeno podem chegar a:

- 120 milhões a 1 bilhão de Volts;
- 30 mil a 400 mil Ampères;
- 30.000 °C.

A formação de uma descarga atmosférica ocorre normalmente em nuvens do tipo cúmulos-nimbo (em latim “*Cumulonimbus*”), resultante do excesso de calor e alta umidade do ar na atmosfera, popularmente chamada como formato de bigorna, possui como característica seu grande desenvolvimento vertical.

Figura 12 – Característica da nuvem *Cumulonimbus*



Fonte: Climatempo (2015)

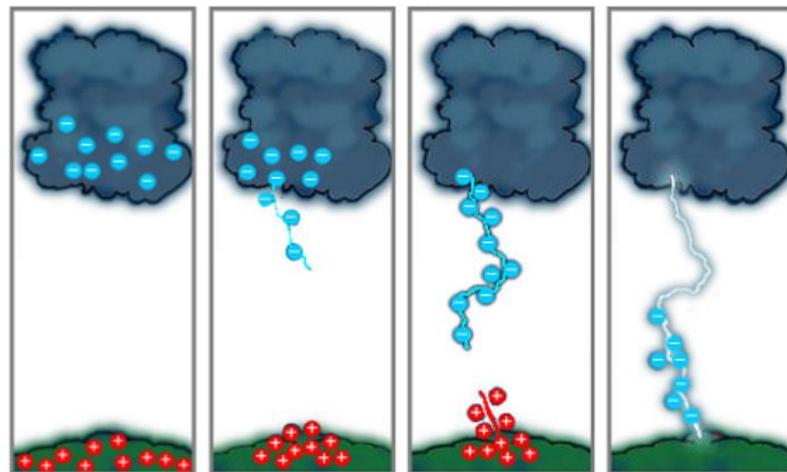
A eletrificação da nuvem ocorre no seu interior em razão da existência de diferentes partículas de gelo, que ao se colidirem incontavelmente, formam as cargas elétricas. Quando há o excesso dessas cargas elétricas entre dois meios, provoca uma intensa

atração pelas cargas opostas, gerando um campo elétrico suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar em uma determinada região na atmosfera.

A rigidez dielétrica é a capacidade de isolação que o ar possui naturalmente em resistir às regiões eletricamente carregadas. Uma vez a isoliação quebrada, tem início a uma movimentação rápida de elétrons de uma região com cargas negativas para uma região com cargas positivas, desencadeando assim a descarga atmosférica.

Essa movimentação rápida dos elétrons de um lugar para o outro no ar faz com que seu entorno se ilumine e aqueça, sendo que este clarão seja conhecido como relâmpago, resultando em uma onda de choque sonora, denominada como trovão.

Figura 13 – Formação da descarga atmosférica



Fonte: InfoEnem (2015)

As descargas atmosféricas podem ocorrer intranuvem, internuvens ou nuvem-solo, tanto do solo para a nuvem quanto da nuvem para o solo e são classificadas de acordo com o local de sua origem e onde se dissipam. Os principais tipos são:

2.4.1 INTRANUVEM

Correspondendo a aproximadamente 70% das descargas atmosféricas, são o tipo mais comum de descargas elétricas. Ocorrem no interior de uma nuvem entre cargas opostas e são geralmente visíveis como apenas um clarão no céu.

Figura 14 – Descarga elétrica intranuvem



Fonte: Adaptado de ELAT (s.d)

É possível também que, descargas fora do limite da nuvem ocorram, o que possibilita a observação de ramificações de descarga elétrica do tipo nuvem-atmosfera.

2.4.2 INTERNUVENS

Ocorrem entre nuvens distintas há uma determinada distância uma da outra quando há cargas elétricas opostas entre si não havendo contato com o solo. Também são denominadas como descargas entre nuvem-nuvem.

Figura 15 – Descargas elétrica internuvem



Fonte: Adaptado de ELAT (s.d)

2.4.3 NUVEM-SOLO

São descargas elétricas que transcorrem entre uma nuvem e a terra, isto é, ocorre uma transferência de cargas elétricas entre a nuvem e o solo. Ocorrem com uma menor frequência, mas devido seu alto poder destrutivo reflete em um perigo maior para as pessoas, seja por contato direto ou indireto.

As descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo podem ser divididas em dois grupos conforme sua polaridade, ou seja, em função da carga transportada, sendo cargas negativas e cargas positivas.

A maioria das descargas do tipo nuvem-solo tem descargas descendentes, ou seja, ocorrem no sentido das nuvens para a terra, porém o contrário também é possível, as descargas ascendentes, quando ocorrem da terra para as nuvens.

Figura 16 – Polaridade das descargas atmosféricas do tipo descendente



Fonte: Adaptado de ELAT (s.d)

Figura 17 – Polaridade das descargas atmosféricas do tipo ascendentes



Fonte: Adaptado de ELAT (s.d)

Cerca de 90% das descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo transferem as cargas negativas de uma região carregada negativamente da nuvem para o solo.

Além das descargas elétricas que comumente vemos (ou ouvimos), também ocorrem descargas elétricas na parte superior das nuvens cúmulos-nimbo em direção à ionosfera, por ser uma região com uma considerável concentração de íons negativos, íons positivos e elétrons livres cujo transforma essa atmosfera em um condutor razoável. A nuvem-ionosfera foi identificada a partir da década de 1980 e está entre 80 a 500 km acima da cúmulos-nimbo.

Para melhor entender o fenômeno da descarga atmosférica alguns conceitos devem ser compreendidos:

- Raio: nome popularmente atribuído às descargas atmosféricas que se conectam ao solo.
- Relâmpagos: refere-se a energia visível das descargas elétricas geradas pelas nuvens das tempestades, que se conectam ou não ao solo.
- Trovão: som da descarga atmosférica originado em consequência da expansão do ar e o rápido aquecimento na região por onde a corrente elétrica percorre. O trovão pode produzir um som com intensidade de até 120 dB, porém, não oferece perigo.

Devido ser o maior país da zona tropical no planeta, o Brasil é o país campeão mundial em incidência de descargas atmosféricas com o expressivo número de 77,8 milhões de incidências durante o ano. O clima quente e úmido é mais favorável à formação de tempestades, conforme explicado pelo especialista em descargas elétricas atmosféricas e professor-pesquisador da Universidade Federal de Minas Gerais, Doutor Silverio Visacro para o blog do grupo de seguros SURA (2020):

A distribuição geográfica das descargas nuvem-terra está muito ligada à orografia e à dinâmica local das tempestades. No entanto, as regiões tropicais são caracterizadas por uma frequência mais alta de descargas descendentes, enquanto nas zonas extratropicais com temperaturas mais baixas há mais descargas ascendentes do que nos trópicos.

Por ano, morrem em torno de 130 pessoas no Brasil em acidentes com raios, de acordo com dados divulgados pelo Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Os acidentes com descargas elétricas representam 8% dos acidentes no Brasil

(conforme mencionado no item 2.3) e pode ser por descarga direta ou em consequência de descargas indiretas, segundo os esclarecimentos da Biblioteca Virtual da Saúde do Ministério da Saúde (2014):

Raio é uma descarga elétrica muito intensa, que ocorre em certos tipos de nuvens e pode atingir o solo, causando prejuízos e ferindo pessoas ou animais. Ao atingir uma pessoa, o raio pode causar sérias queimaduras e outros danos ao coração, pulmões, sistema nervoso central e outras partes do corpo, através do aquecimento e de uma variedade de reações eletroquímicas. A chance de sobreviver é de apenas 2%. As pessoas também podem ser atingidas por correntes elétricas que se propagam no solo, a partir do ponto que o raio atingiu. São as chamadas descargas laterais.

No entanto, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) lista uma série de precauções que podem ser tomadas para manter a segurança das pessoas ou preservar a vítima: “O choque elétrico provocado por um raio pode ser fatal. No entanto, a carga elétrica não permanece no corpo da vítima, permitindo que ela seja socorrida com total segurança. [...]” (2019).

Em termos práticos, não há como impedir que uma descarga atmosférica caia numa determinada região e as soluções aplicadas nas indústrias e zonas urbanas buscam apenas mitigar os efeitos violentos da queda do raio, de forma a proteger pessoas e bens materiais, fornecendo à descarga elétrica uma direção segura para a terra.

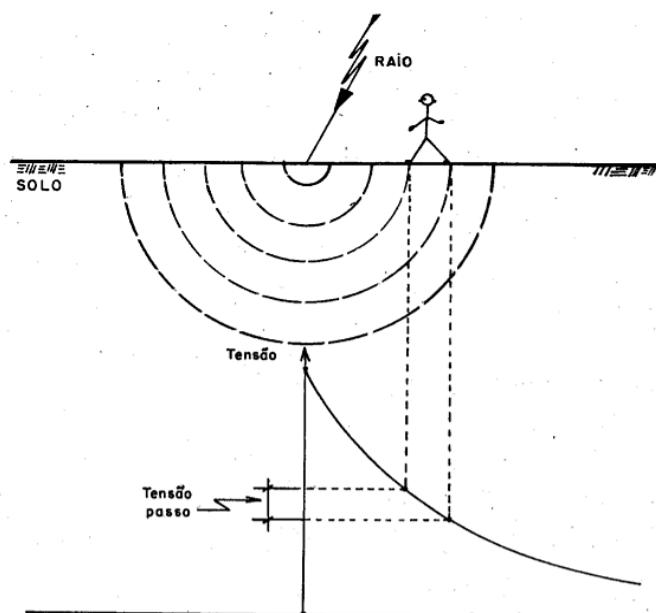
2.5 TENSÃO DE PASSO

Quando falamos em descargas atmosféricas um dos efeitos mais importantes envolvendo esse fenômeno é a tensão de passo.

A tensão de passo é o dos acidentes elétricos mais comuns, resultante das descargas elétricas e pode ocorrer tanto em seres humanos como em animais, devido à diferença de potencial gerada entre os pés ou patas, ao estar em contato com uma superfície energizada.

Quando uma descarga elétrica cai no solo, a corrente elétrica flui pelo solo gerando tensões e quanto maior a corrente, maior o risco, pois altos níveis de tensão é capaz de romper o dielétrico³ do solo.

Figura 18 – Análise da tensão de passo através de uma descarga atmosférica



Fonte: Aterramentos elétricos. Kindermann; Campagnolo (1995)

A terra é um péssimo condutor elétrico e quando seco comporta-se como um material isolante devido a sua alta resistividade. Nos solos mais comuns possui de 5 a 20.000 $\Omega \cdot m$, enquanto para materiais condutores a resistividade é da ordem de $10^{-8} \Omega \cdot m$, como mostra a tabela abaixo:

³ Dielétrico são materiais ou substâncias isolantes elétricas com a capacidade de se ionizarem, tornando-se condutores elétricos ao sofrerem forte atuação de um campo elétrico, superior ao limite de sua rigidez dielétrica.

Tabela 4 – Ordem de grandeza da resistividade dos materiais

MATERIAL	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot m$)
Prata	$1,6 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,4 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$
Chumbo	$2,2 \times 10^{-7}$
Vidro	$1 \times 10^{10} \text{ a } 1 \times 10^{14}$
Borracha	$\approx 10^{13}$

Fonte: Prepara Enem (s.d)

Resistividade do solo é a medida do quanto o solo consegue resistir a um fluxo elétrico sendo calculada medindo a resistência elétrica de um cubo preenchidas com este solo, conforme a fórmula abaixo:

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

Onde:

ρ = resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

R = resistência elétrica (Ω);

l = aresta de 1m;

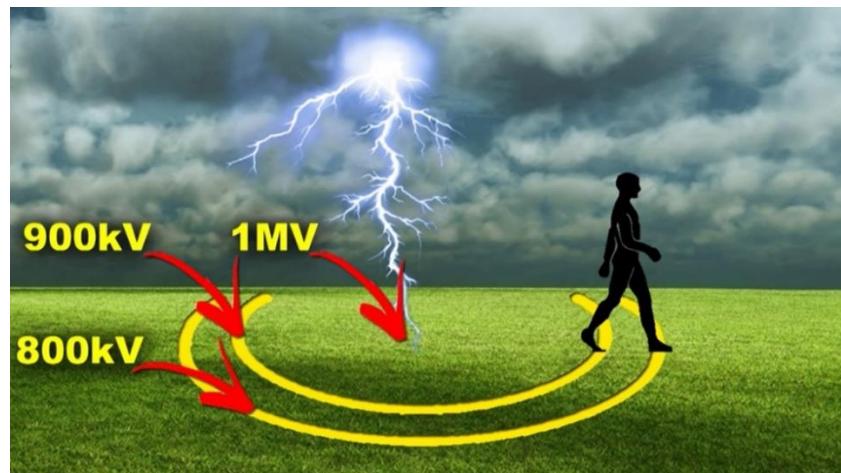
A = área das faces A de 1m^2 .

O solo desempenha um importante papel para a tensão de passo, pois a característica das camadas bem como sua resistividade pode ampliar significativamente o valor da tensão aumentando os potenciais de passo.

O potencial de passo é maior no ponto de contato entre a descarga atmosférica com o solo e diminuirá gradualmente ao redor deste ponto à medida que nos distanciamos da zona de impacto em efeito Doppler⁴, promovendo tensões diferentes em várias partes do terreno. A ocorrência do choque elétrico se dá quando uma pessoa em pé ou um animal quadrúpede gera em seus pés diferentes potenciais, como é possível observar na figura abaixo.

⁴ Efeito Doppler é o fenômeno físico observado nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento com relação ao observador.

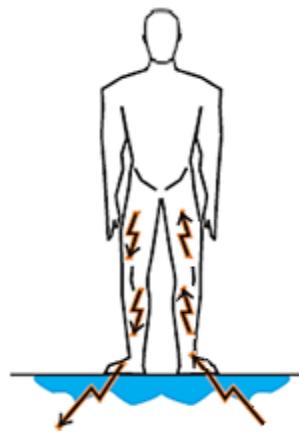
Figura 19 – Tensão de passo



Fonte: Adaptado de Mundo da Elétrica (2018)

O choque decorrente da tensão de passo tem a mesma explicação de causa que os outros acidentes com choques elétricos, já explicado no item 2.3, porém, em grandes proporções, em virtude da intensidade da fonte causadora e em razão da corrente elétrica tender a ir do maior potencial para o menor. Visto que, devido à própria resistência elétrica imposta pelo corpo humano torna-o um facilitador para que a corrente elétrica caminhe em direção ao potencial menor.

Figura 20 – Caminho da corrente para o solo – tensão de passo



Fonte: Adaptado de GROST-Manual do Trabalho Seguro (2014)

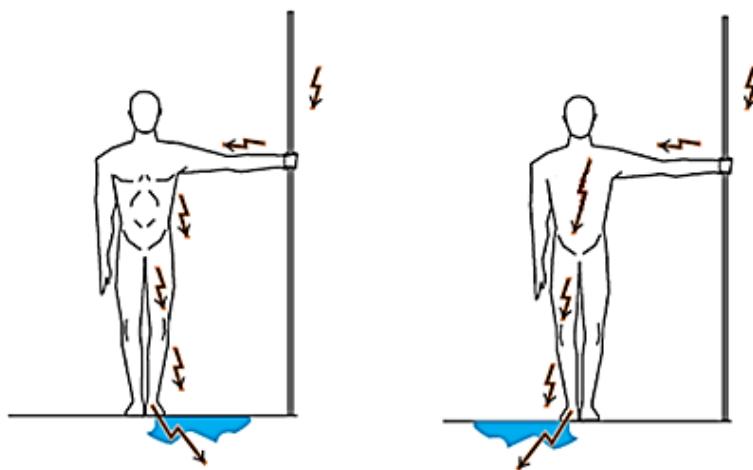
Quanto maior for a distância entre as pernas, maior será a diferença de potencial, por isso para os animais quadrúpedes a tensão de passo é mais perigosa.

2.6 TENSÃO DE TOQUE

A tensão de toque também ocorre pelos mesmos motivos que a tensão de passo, porém, mais perigosa decorrente do percurso que a corrente elétrica faz, já que aumenta o risco de fibrilação ventricular.

Como o próprio nome diz, tensão de toque é o acidente provocado pelo contato de uma pessoa a uma superfície energizada e a tensão elétrica transita no indivíduo através dos membros superiores e inferiores, até se dissipar num potencial menor. Dessa forma, podemos entender que tensão de toque é a diferença de potencial entre o ponto ao alcance de contato e o piso, servindo então de caminho à corrente para ser drenada no solo através do corpo. A gravidade do acidente está condicionada a intensidade da corrente e o tempo de contato.

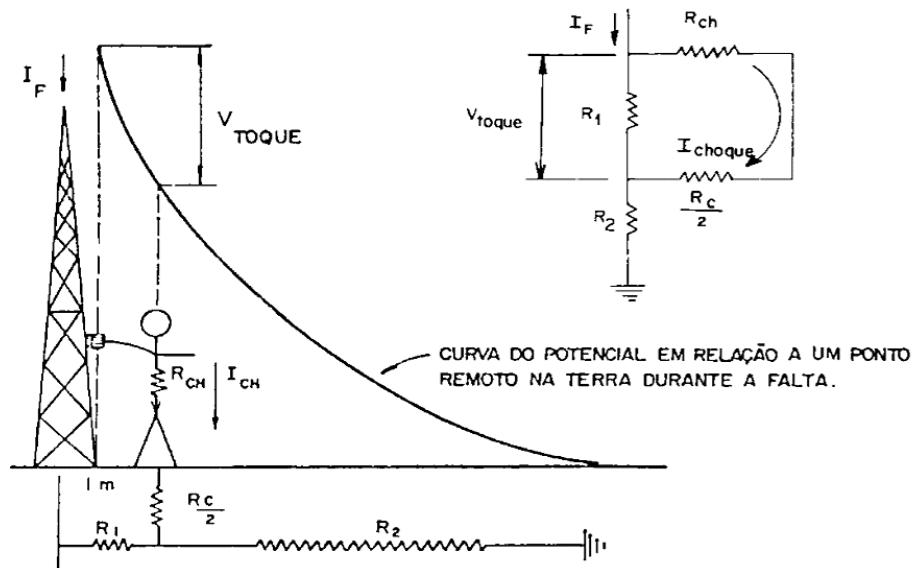
Figura 21 – Caminho da corrente para o solo – tensão de toque



Fonte: Adaptado de GROST-Manual do Trabalho Seguro (2014)

Quando uma edificação ou superfície contendo partes metálicas é atingida por uma descarga atmosférica, como, por exemplo, uma torre de transmissão de energia, a corrente flui do ponto de impacto em direção à terra. Se um indivíduo toca em algum objeto próximo, principalmente na superfície atingida, estará sujeito a essas tensões, como mostra a figura a seguir:

Figura 22 – Análise da tensão de toque através de uma descarga atmosférica



Fonte: Aterramentos elétricos. Kindermann; Campagnolo (1995)

Assim como a tensão de passo, a tensão de toque também é provocada pela descarga atmosférica, no entanto, não é a única fonte causadora desse tipo de acidente. Pode ocorrer acidentes por tensão de toque devido a falhas em equipamentos elétricos, com o rompimento de cabos energizando em contato com partes metálicas, e essa corrente de curto-circuito pode fluir por toda a estrutura até que ocorra o contato de uma pessoa.

2.7 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGA ATMOSFÉRICA (SPDA)

O SPDA (Sistema de proteção contra descarga atmosférica) é um conjunto de dispositivos instalados para a proteção de edifícios e pessoas contra as descargas atmosféricas, evitando ou minimizando os efeitos do impacto sobre uma determinada estrutura.

O raio ao atingir uma edificação pode romper o concreto, causando trincas preocupantes ou fissuras nos elementos estruturais, até mesmo quebrar partes da estrutura, podendo inclusive arremessar a distâncias consideráveis aqueles fragmentos.

A importância do SPDA, vai além da proteção do patrimônio, dependendo do ponto de impacto, já que as descargas elétricas podem causar incêndios, danos às instalações elétricas, falhas em sistemas dependentes da energia elétrica (por exemplo, em hospitais), prejuízos financeiros (com a morte de animais de manejo) e também acidentes com seres humanos, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 5 – Efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas

Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade e/ou conteúdo	Efeitos das descargas atmosféricas
Casa de moradia	<p>Perfuração da isolação das instalações elétricas, incêndio e danos materiais.</p> <p>Danos normalmente limitados a objetos expostos ao ponto de impacto ou no caminho da corrente da descarga atmosférica.</p> <p>Falha de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos instalados (exemplos: aparelhos de TV, computadores, modems, telefones etc.).</p>
Edificação em zona rural	<p>Risco maior de incêndio e tensões de passo perigosas, assim como danos materiais.</p> <p>Risco secundário devido à perda de energia elétrica e risco de vida dos animais de criação devido à falha de sistemas de controle eletrônicos de ventilação e suprimento de alimentos etc.</p>
Teatro ou cinema Hotel Escola <i>Shopping centers</i> Áreas de esportes	<p>Danos em instalações elétricas que tendem a causar pânico (por exemplo, iluminação elétrica)</p> <p>Falhas em sistemas de alarme de incêndio, resultando em atrasos nas ações de combate a incêndio.</p>
Banco Empresa de seguros Estabelecimento comercial etc.	Conforme acima, adicionando-se problemas resultantes da perda de comunicação, falha de computadores e perda de dados.

Tabela 5 (continuação)

Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade e/ou conteúdo	Efeitos das descargas atmosféricas
Hospital Casa de tratamento médico Casa para idosos Creche Prisão	Conforme acima, adicionando-se os problemas relacionados a pessoas em tratamento médico intensivo e a dificuldade de resgatar pessoas incapazes de se mover.
Indústria	Efeitos adicionais dependendo do conteúdo das fábricas, que vão desde os menos graves até danos inaceitáveis e perda de produção.
Museu e sítio arqueológico Igreja	Perda de patrimônio cultural insubstituível.
Estação de telecomunicações Estação de geração e transmissão de energia elétrica	Interrupções inaceitáveis de serviços ao público.
Fábrica de fogos de artifícios Trabalhos com munição	Incêndio e explosão com consequências à planta e arredores.
Indústria química Refinaria Usina nuclear Indústria e laboratório de bioquímica	Incêndio e mau funcionamento da planta com consequências prejudiciais ao meio ambiente local e global.

Fonte: ABNT NBR 5419-1 (2015)

Para a instalação de um SPDA em uma estrutura depende de uma série de fatores. Em estabelecimentos possuindo potência acima de 75 kW, a NR-10 obriga possuir e manter um prontuário das instalações elétricas onde deverá conter a documentação referente ao sistema. Para edifícios com altura superior a 30 m, com mais de 1500 m² de área construída ou em áreas destinadas ao armazenamento de materiais inflamáveis a exigência parte do corpo de bombeiros.

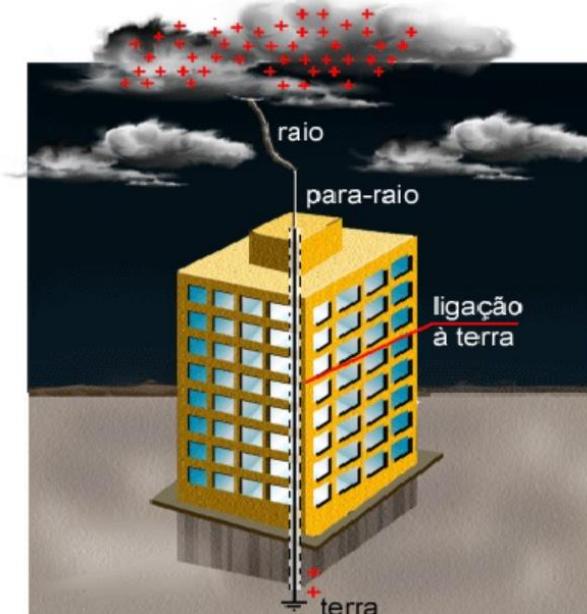
É importante entender que as descargas atmosféricas são fenômenos naturais e a instalação de um conjunto de SPDA não irá impedir sua incidência, não neutralizará, nem repelir e muito menos atrair o raio, como muitos pensam. São episódios imprevisíveis e impossíveis de serem anuladas.

O SPDA deve ser feito em cumprimento aos critérios de construção e segurança mencionados na norma técnica brasileira ABNT NBR 5419, conforme o ano vigente da norma. A norma técnica ABNT NBR 5419:2015, descreve que a composição de um SPDA é dividida por três subsistemas, sendo eles:

- Subsistema de captação;
- Subsistema de descida;
- Subsistema de aterrramento;

Cada subsistema desempenha um papel fundamental no direcionamento da descarga elétrica, através de um caminho seguro, de forma a dissipar aquela perigosa corrente elétrica (correntes de alta intensidade) para a terra.

Figura 23 – Sistema completo de SPDA



Fonte: Energia inteligente UFJF (2019)

2.7.1 SUBSISTEMA DE CAPTAÇÃO

Podemos entender o subsistema de captação como sendo a recepção da descarga elétrica sendo instalado no topo (telhado ou cobertura) da edificação ou próximo à edificação a ser protegida, dependendo do método utilizado.

Segundo a ABNT NBR 5419:2015, são aceitos três métodos de cálculo como subsistema de captação descritos no item 5.2.2 na parte 3 da norma. São eles:

- Método do ângulo de proteção;

- Método da esfera rolante;
- Método das malhas.

O método do ângulo de proteção é o método que cria um ângulo de proteção em formato de cone circular onde o ápice do volume está posicionado no captor. Conhecido também por método Franklin, e se restringe ao limite de altura dos captores, pois o ângulo de proteção varia em função a altura do captor e do nível de proteção, portanto é mais adequado para edificações de formato mais simplificados.

Figura 24 – Método do ângulo de proteção



Fonte: ELETROJR (2020)

O captor Franklin também, conhecido popularmente como para-raios, recebeu esse nome em homenagem ao físico Benjamin Franklin.

Figura 25 – Captor tipo Franklin



Fonte: SANTIL, s.d

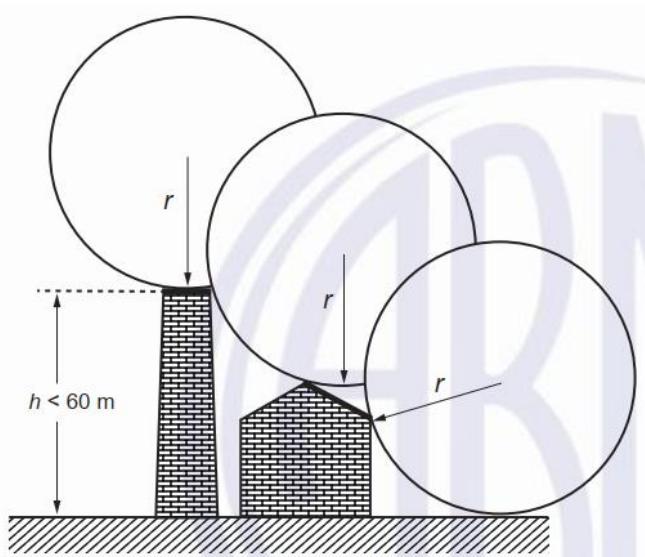
Devido seu formato, há um acúmulo de cargas elétricas na superfície mais pontiaguda, formando um campo elétrico na superfície do condutor maior do que os objetos mais próximos, sendo mais provável que o raio ultrapasse a capacidade dielétrica do ar em direção ao captor.

O método da esfera rolante, conhecido também como método eletrogeométrico, utiliza um elemento captor criando uma ideia fictícia de esferas rolando por todas as partes da edificação ou do objeto a ser protegido.

A orientação do comportamento desse método pode ser demonstrada a partir da seguinte explicação: “Esta esfera tem seu raio (R) uma projeção estimada da distância entre o ponto de partida do líder ascendente (terra – nuvem) e a extremidade do líder descendente (nuvem – terra) que formam a descarga atmosférica”. (O setor elétrico, 2018).

A esfera tem seu raio definido de acordo com o nível de proteção calculado, é o método mais recente adicionado à NBR 5419:2015 e o método é adequado a todos os casos.

Figura 26 – Método da esfera rolante



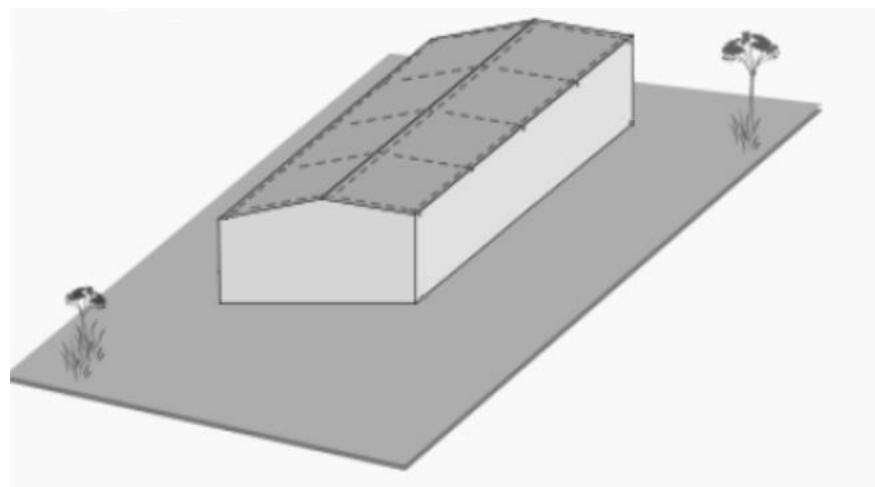
Fonte: ABNT NBR 5419-3 (2015)

Mais conhecido como Gaiola de Faraday, o método das malhas também é adequado para todos os casos sendo considerado um bom método para superfícies planas. Consiste em um conjunto de hastes captoras conectadas a uma malha de condutores

instalados na cobertura da edificação, tendo as dimensões definidas segundo o nível de proteção calculado.

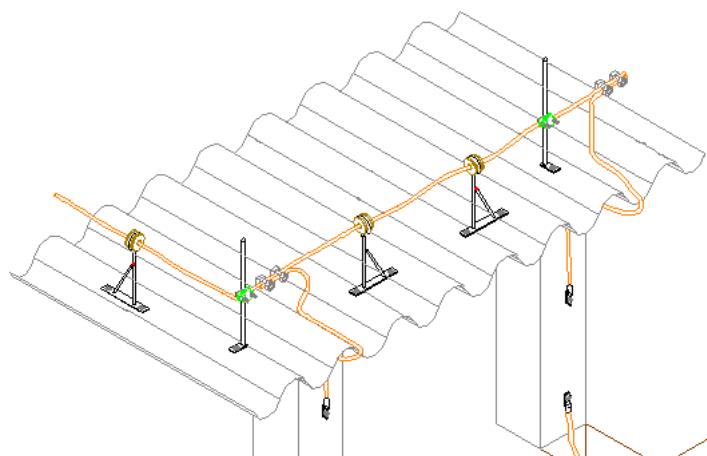
É o método mais conhecido e utilizado, com uma boa performance na proteção contra descarga atmosférica, embora seja o método com o custo mais alto para instalação e manutenção.

Figura 27 – Método das malhas



Fonte: Adaptado de Caldeira Elétrica Wordpress (2014)

Figura 28 – Detalhe típico de montagem do método das malhas em telhado



Fonte: Arquivo pessoal (2019)

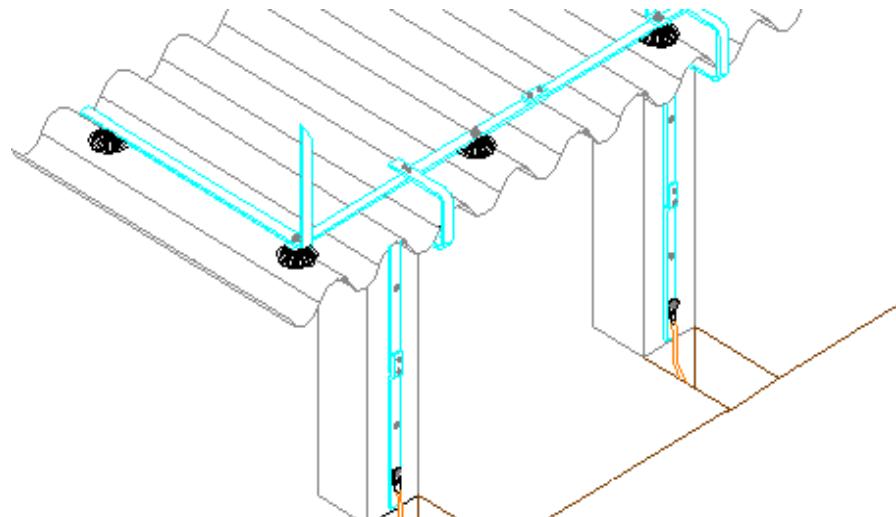
2.7.2 SUBSISTEMA DE DESCIDA

O próprio nome do sistema nos induz a uma ideia do que se trata esse método. O subsistema de descida interliga o subsistema captor à malha terra, de modo a conduzir a corrente da descarga atmosférica por elementos condutores, formando um caminho seguro até o aterramento, onde essa corrente se dissipará.

É necessário que uma edificação possua mais do que um condutor de descida de maneira a promover a divisão dessa corrente perigosa, mitigando assim o impacto dessa corrente elevada no material condutor.

Os condutores de descidas podem ser externos (sistema convencional) ou internos (embutidos na estrutura) e devem ser distribuídos ao longo de toda a edificação, cumprindo distâncias de segurança (calculada no gerenciamento de risco), dimensões dos condutores e quantidade de descidas (em acordo com o nível de proteção), conforme determina a norma técnica NBR 5419:2015.

Figura 29 – Detalhe típico de condutores de descidas



Fonte: Arquivo pessoal (2019)

Os elementos condutores devem ser firmemente fixados de forma que as forças mecânicas accidentais ou eletrodinâmicas geradas pelas descargas elétricas não culmine no afrouxamento do condutor, ou ainda, sua quebra.

2.7.3 SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO

O aterramento é o subsistema que tem como principal função conduzir e dispersar a corrente da descarga atmosférica para a terra, de modo a minimizar as sobretensões que são potencialmente perigosas.

Além de servir para o escoamento das descargas atmosféricas na terra, o aterramento também tem outras funções, além de ser parte do sistema de SPDA, como os exemplos citados abaixo:

- Manter dentro dos limites de segurança os potenciais produzidos pela corrente de falta;
- Obter uma baixa resistência de aterramento para filtrar correntes de falta à terra;
- Sensibilizar rapidamente os equipamentos de proteção, como relés, o isolamento às falhas à terra;
- Usar a terra em sistemas MRT⁵ com retorno de corrente;
- Drenar as cargas estáticas geradas em carcaças de equipamentos para o aterramento.

Para que um SPDA desempenhe corretamente sua função de garantir a segurança da edificação, do sistema elétrico e das pessoas no local é fundamental que o aterramento seja realizado com os critérios exigidos pelas normas técnicas.

O eletrodo de aterramento deve possuir um valor de resistência ôhmica o menor possível, porém, deve ser realizada em função dos resultados de ensaios de estratificação do solo, para tanto é imprescindível durante a elaboração do projeto estudar as características do solo, sobretudo a resistividade elétrica.

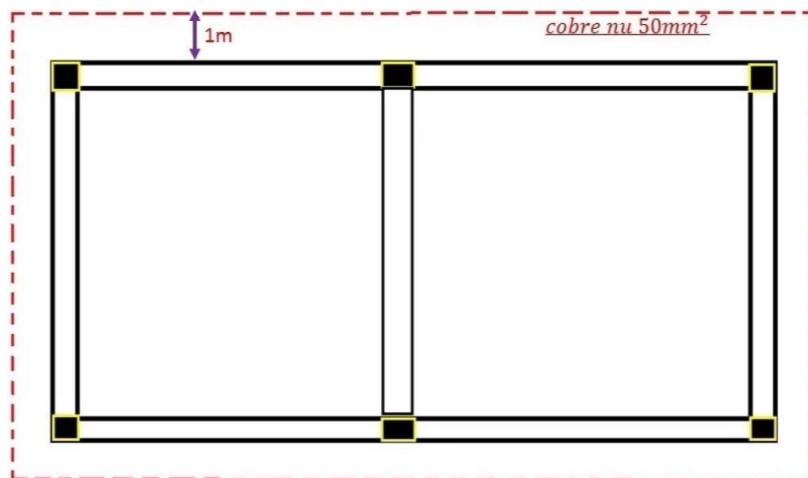
A partir dessa propriedade será calculada a configuração do aterramento, a seção dos eletrodos enterrados e o material condutor, de forma a evitar a deterioração precoce do sistema.

O eletrodo de aterramento é a parte do subsistema que está em contato direto com o solo e pode ser do tipo malha ou em anel.

⁵ Sistema MRT ou Monofilar com Retorno por Terra é o circuito elétrico usado na distribuição de energia utilizando apenas um único fio, sendo o retorno (neutro) realizado através da haste aterrada.

O aterramento em formato de anel dispõe de um eletrodo fechado circundante à edificação, alojado a 1 m de distância das paredes externas ao redor da estrutura e com profundidade mínima de 0,5 m. Este modelo deve ser instalado para todos os sistemas de SPDA classes III e IV e independe da resistividade do solo.

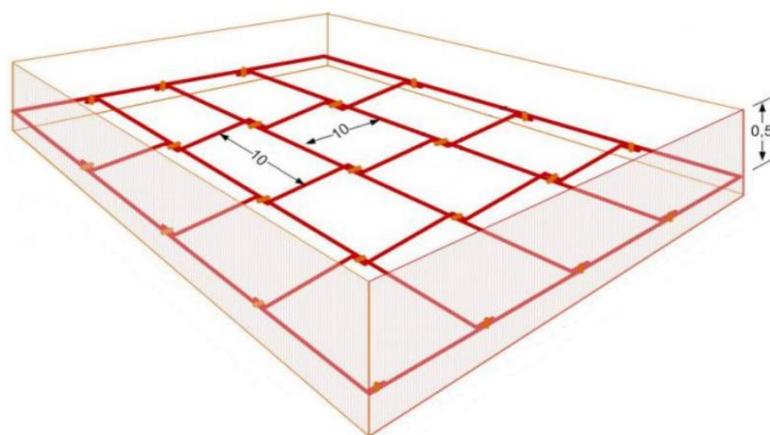
Figura 30 – Eletrodo de aterramento em anel



Fonte: Adaptado de Pergunte ao especialista (2020)

Já a malha terra é o tipo de aterramento onde um entrancado de cabos formam pequenos quadrantes, com tamanhos pré-determinados, sendo interligados por juntas mecânicas ou soldas, são enterradas horizontalmente, conectadas a hastes metálicas cravadas na vertical.

Figura 31 – Eletrodo de aterramento em anel



Fonte: Adaptado de CPE (s.d)

Cada quadrante da malha é denominado *Mesh*, seu tamanho é determinado em acordo com a classe do SPDA calculado, sendo este modelo utilizado para classes de proteção I e II. Para o dimensionamento correto da malha é necessária a estratificação do solo para o dimensionamento do eletrodo de aterramento, para isso, se faz indispensável a análise da resistividade do solo segundo a norma técnica da ABNT NBR 7117-1:2020.

Em subestações o sistema deve ainda suportar correntes intensas provenientes de curto-circuito, surtos por chaveamento, correntes harmônicas, além da descarga atmosférica, escoando efetivamente a energia para o solo.

Para determinar o tamanho do *Mesh* da malha de aterramento em subestações se faz necessário uma série de informações, como calcular a resistência do solo, tamanho do terreno, calcular a resistência da malha aos potenciais perigosos, etc. Para isso, pode-se contar com inúmeras ferramentas para o dimensionamento confiável de malhas de terra.

A malha de aterramento também deve ser capaz de reduzir os níveis de tensões de passo e toque a valores inferiores ao permitido.

Uma forma de garantir a eficiência do SPDA, sistemas elétricos internos e partes condutivas externas é fundamental, como forma de proteção adicional, a ligação equipotencial ou equipotencialização.

Ligação equipotencial é o ato de fornecer medidas de modo a deixar diferença de potencial elétrico entre dois ou mais condutores de eletricidade o menor admissível, ou seja, equipotencialização é a equalização de potencial através de múltiplas conexões entre as massas e elementos condutores, conforme esclarecido no item 3.23 da ABNT NBR 5419-3 (2015, p. 4):

equipotencialização para descargas atmosféricas

equipotencialização

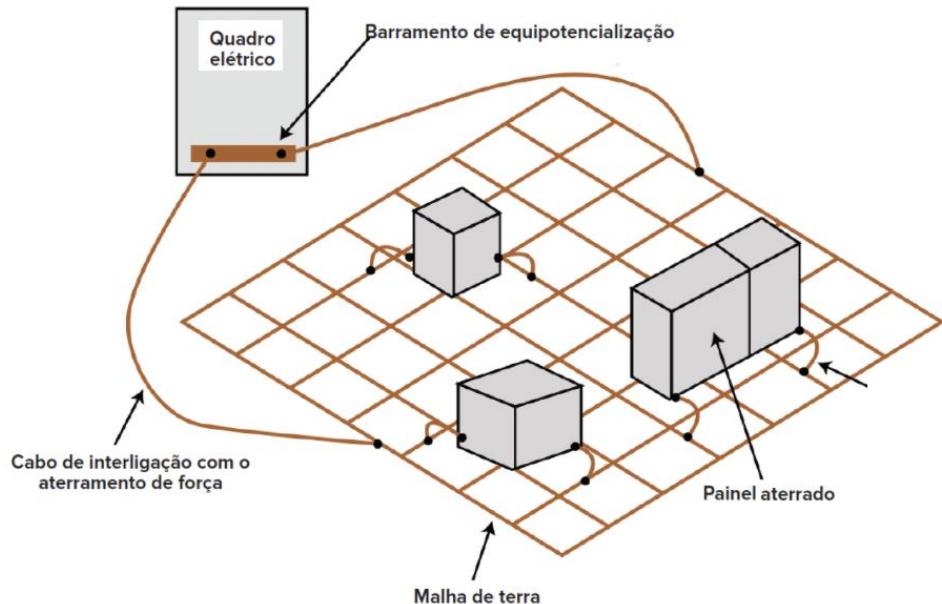
EB (Equipotential Bonding)

ligação ao SPDA de partes condutoras separadas, por conexões diretas ou via dispositivos de proteção contra surto (DPS), para reduzir diferenças de potencial causadas pela corrente da descarga atmosférica (...) De uma forma geral, é desejável a instalação do maior número possível de cabos que interliguem o eletrodo de aterramento aos elementos a serem aterrados e que estes tenham o menor comprimento possível.

Convém ressaltar que, por tratar-se de fenômenos impulsivos, tal prática não garante a eliminação das tensões resultantes, principalmente quando não forem observadas as recomendações de proximidades já mencionadas.

Os condutores de equipotencialização são elementos que interligam as partes condutoras, como grades e tubulações metálicas ao SPDA, e devem ser instalados de tal forma a promover o menor potencial evitando assim o centelhamento perigoso.

Figura 32 – Detalhe típico de uma equipotencialização elétrica



Fonte: Adaptado de ALEMETEC (2019)

3 METODOLOGIA

Para a construção dessa monografia foi adotada o processo de análise de prontuários de instalações elétricas em diferentes ramos industriais, seguindo os requisitos exigidos na alínea b do item 10.2.4 da Norma Regulamentadora NR-10, de forma a identificar a existência de documentos relacionados ao SPDA e malha de aterramento. A NR-10 é uma das 37 disposições complementares ao capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) relativo à Segurança e da Medicina do Trabalho (Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977).

As normas regulamentadoras fornecem orientações sobre os procedimentos obrigatórios relacionados à segurança e saúde do trabalhador, obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores visando garantir o trabalho seguro evitando acidentes de trabalho e sadio prevenindo a ocorrência de doenças ocupacionais.

3.1 METODOLOGIA DE TRABALHO

Foi empregado o critério de constatar o atendimento dos requisitos legais referentes aos itens e alíneas da Norma Regulamentadora NR-10, relativa à segurança em instalações e serviços em eletricidade.

Foram considerados, em sequência, os seguintes tópicos da NR-10 para o processo de análise:

3.1.1 ITEM 10.2.4

“Os estabelecimentos com carga instalada superior a 75 kW devem constituir e manter o prontuário de instalações elétricas, contendo, além do disposto no subitem 10.2.3, no mínimo: [...]” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.1).

A primeira iniciativa é entender onde buscar os documentos necessários para dar início a análise. Essa etapa consiste em identificar se a empresa em questão necessita

em possuir o prontuário de instalações elétricas (PIE). O PIE é um conjunto de documentos e informações relativo às instalações elétricas da empresa e deve permanecer à disposição dos trabalhadores e demais envolvidos com a instalação elétrica e serviços envolvendo eletricidade.

O mesmo pode estar disposto de forma organizada em pastas de forma física ou eletrônica e deve ser atualizado sempre que houver qualquer intervenção que gere uma alteração no sistema elétrico.

3.1.2 ITEM 10.2.4.b

“Documentação das inspeções e medições do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e aterramentos elétricos” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.1).

Essa alínea refere-se a análise dos documentos ou dados existentes (ou não) referentes ao sistema de aterramento e SPDA. A documentação relacionada ao SPDA é de responsabilidade dos profissionais da área elétrica.

A documentação deve exibir a frequência ou periodicidade, natureza e método das inspeções e deve ser executada conforme determinado pela norma técnica ABNT NBR 5419 (ano vigente) por um profissional legalmente habilitado em acordo com suas atribuições profissionais, conforme estabelecido em legislação específica dos respectivos conselhos de classe

3.1.3 ITEM 10.2.8.3

“O aterramento das instalações elétricas deve ser executado conforme regulamentação estabelecida pelos órgãos competentes e, na ausência desta, deve atender às Normas Internacionais vigentes.” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.2).

Em outras palavras, a verificação do atendimento a esse item refere-se aos esquemas de aterramento elétrico em atendimento a norma técnica ABNT NBR 5410 (ano vigente), que consistem da forma como os circuitos elétricos se relacionam com o

potencial de terra, do tipo TN, TT ou IT (verificar o Apêndice A, pág. 81). Este item é importante pois, o aterramento elétrico deve ser uma ligação elétrica efetiva adequada à terra, sendo confiável como massa condutora com potencial elétrico, convencionalmente, igual a zero.

Já para garantir a operação confiável das instalações e equipamentos elétricos, existem outros usos do sistema de aterramento com finalidades funcionais e de proteção, como o subsistema de aterramento do SPDA.

3.1.4 ITEM 10.3.4

“O projeto deve definir a configuração do esquema de aterramento, a obrigatoriedade ou não da interligação entre o condutor neutro e o de proteção e a conexão à terra das partes condutoras não destinadas à condução da eletricidade.” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.3).

É importante haver no projeto elétrico a definição do esquema de aterramento como condição de proteção adicional. Esse esquema deve ser evidenciado e de fácil entendimento e a conexão entre o neutro e o condutor de proteção, quando exigida (esquema TN), deve ser definido em projeto.

O esquema de aterramento também é relevante para as medidas de proteção do circuito elétrico promovendo a coordenação entre dispositivos de seccionamento, dispositivos elétricos de proteção, como relé ou DPS e o sistema de aterramento adotado, quando as massas são efetivamente ligadas a um condutor de proteção.

A equipotencialização das massas também é medida de proteção adicional que deverá compor o projeto.

3.1.5 ITEM 10.3.7

“O projeto das instalações elétricas deve ficar à disposição dos trabalhadores autorizados, das autoridades competentes e de outras pessoas autorizadas pela empresa e deve ser mantido atualizado.” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.3).

A avaliação desse item refere-se a disponibilidade dos projetos para consulta ou orientação dos envolvidos com a instalação elétrica.

É importante que todos os projetos estejam organizados de forma que permita fácil recuperação e visualização, mantendo-os atualizados evitando assim imprevistos ou operações indesejadas.

3.1.6 ITEM 10.3.8

“O projeto elétrico deve atender ao que dispõem as Normas Regulamentadoras de Saúde e Segurança no Trabalho, as regulamentações técnicas oficiais estabelecidas, e ser assinado por profissional legalmente habilitado.” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.3).

O objetivo de avaliar esse item é averiguar o atendimento de todos os requisitos técnicos dos projetos, laudos e documentação de modo geral. Mais importante do que ter a documentação é atender as exigências regulamentares e especificações técnicas para sua elaboração. Além do atendimento às normas de segurança e medicina do trabalho (NRs), também tem o atendimento das NBRs, corpo de bombeiros e normas técnicas estaduais ou municipais estabelecidas por órgãos competentes, quando na ausência de normas específicas, o atendimento de normas internacionais cabíveis, conforme ressalta o item 10.1.2 da NR-10.

3.1.7 ITEM 10.3.9

“O memorial descritivo do projeto deve conter, no mínimo, os seguintes itens de 4 segurança: [...]” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.3).

O memorial descritivo é o documento que contém as informações construtivas do projeto. A necessidade de avaliar este item é verificar o atendimento das alíneas a) e c), onde determina que um projeto deva conter, no mínimo a especificação das características relativas à proteção, descrição e identificação dos circuitos e equipamentos elétricos, incluindo estruturas e componentes físicos instalados.

O memorial garante que a edificação ou instalação foi concebida com a preocupação em adoção dos aspectos técnicos e atendimento das normas desde o início.

Para o SPDA, que é o objetivo de estudo dessa monografia, o memorial descritivo tem por objetivo estabelecer critérios e orientações quanto à execução do projeto e o demonstrativo dos cálculos adotados.

A identificação nesse aspecto, pode ser quanto a distância de segurança de condutores de descida, de modo a evitar contato acidental durante uma tempestade (como demonstrado na imagem abaixo) ou outros riscos adicionais.

Figura 33 – Distância de segurança “s”



Fonte: Arquivo Pessoal (2018)

3.1.8 ITEM 10.4.1

“As instalações elétricas devem ser (...) inspecionadas de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores e dos usuários, e serem supervisionadas por profissional autorizado [...]” (NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2019, p.4).

Esse item reafirma a obrigatoriedade da fiscalização e inspeções das instalações elétricas, no que diz respeito à segurança dos trabalhadores e usuários.

Adjunto à NR-10, pode-se admitir os itens 4.7.4, 4.7.5 e 4.7.7 da norma técnica ABNT NBR 16384 para auxílio na aplicabilidade da análise quanto as especificações técnicas do PDA, os registros de inspeção, relatórios de vistorias, quanto a sinalização e advertências e principalmente a alínea f) do item 4.7.5 que trata especificamente dos relatórios dos sistemas de aterramento, equipotencialização e potenciais permissíveis.

3.2 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consistiu em identificar e analisar o cumprimento dos requisitos legais impostos na NR-10 no que tange a existência da documentação necessária para a proteção das pessoas quanto prevenção da tensão de passo e toque, atendendo todos os requisitos técnicos exigidos pelas NBRs associadas.

Para isso, foram analisadas duas situações distintas:

- a) o Prontuário das Instalações Elétricas de uma indústria de equipamentos elétricos.
- b) a documentação necessária para a instalação dos mecanismos de segurança devidamente calculada.

No caso a) o Prontuário das Instalações Elétricas a ser avaliado é pertencente a uma indústria de fabricação e manutenção de motores elétricos pertencente ao grupo de uma grande multinacional americana do ramo de equipamentos elétricos.

A unidade está localizada em uma cidade do interior do estado de São Paulo e conta com um corpo produtivo de aproximadamente 600 funcionários divididos em turnos.

A planta conta com sua própria subestação de Alta Tensão de Consumidor com tensão de entrada de 138 kV de forma a fornecer energia para toda a indústria.

A análise dos documentos relacionados ao tema, tem como principal objetivo apontar os riscos em que os trabalhadores, sejam da manutenção elétrica ou qualquer outro colaborador da unidade, estão expostos quanto aos riscos de choque elétrico durante tempestades ou até mesmo falhas elétricas que eleve o potencial do solo.

Já no caso b) essa comparação será feita através do projeto executivo eletromecânico apresentado para a construção de uma subestação de subtransmissão de uma distribuidora de energia, localizada na região noroeste do estado de São Paulo. Neste caso em específico a exposição aos riscos está relacionada a localização, por se tratar de uma subestação urbana, responsável em suprir a distribuição de energia aos consumidores.

Por motivos de confidencialidade, não serão expostos a razão social das empresas mencionadas acima, para tanto, identificaremos apenas como caso A e caso B.

3.3 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS

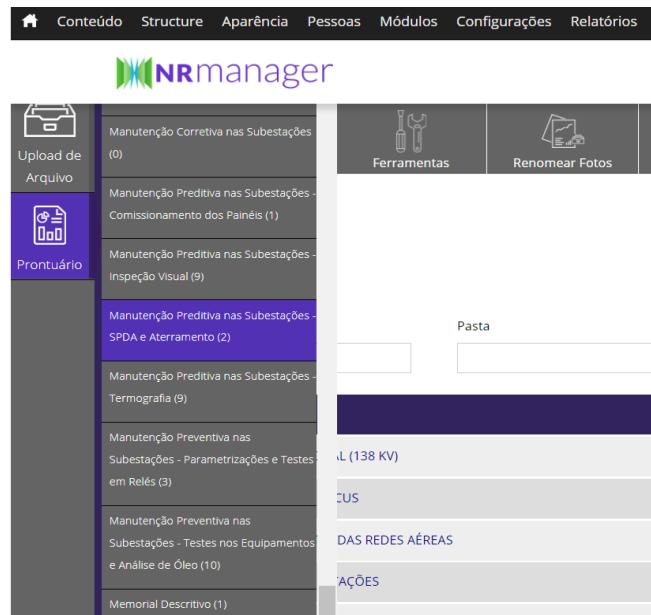
Após estabelecer o propósito dessa dissertação, os dados foram coletados com o intuito de exibir o cenário do caso A e do caso B.

Primeiramente, para o caso A, foi realizado uma pesquisa no Prontuário das Instalações Elétricas em busca das documentações existentes da empresa, essa documentação refere-se a tudo que for pertinente ao tema, como memorial de cálculo da malha de aterramento, laudo de SPDA, projeto de SPDA, entre outras evidências. O gerenciamento do prontuário elétrico implementado na empresa do caso A é realizado através de um “*software online*” do qual é capaz de monitorar o avanço no atendimento à NR-10.

Ao acessar o *link* do subdomínio da empresa (<http://casoa.piesis.com.br>) e inserir os dados de login cadastrado individualmente para cada usuário, de acordo com suas habilitações e atribuições, é visualizado o perfil da empresa, conforme pode-se observar na figura 36 da pág. 63.

Através do botão lateral (abaixo do logotipo do *software*) é possível acessar de forma escalonada dos subconjuntos de documentos que foi aquisitado pela ferramenta, o número que conta entre parênteses é a quantidade de documentos existentes na plataforma referente ao tema da pasta, como observado na figura abaixo, cujo a subpasta encontra-se selecionada e destacada na cor roxa.

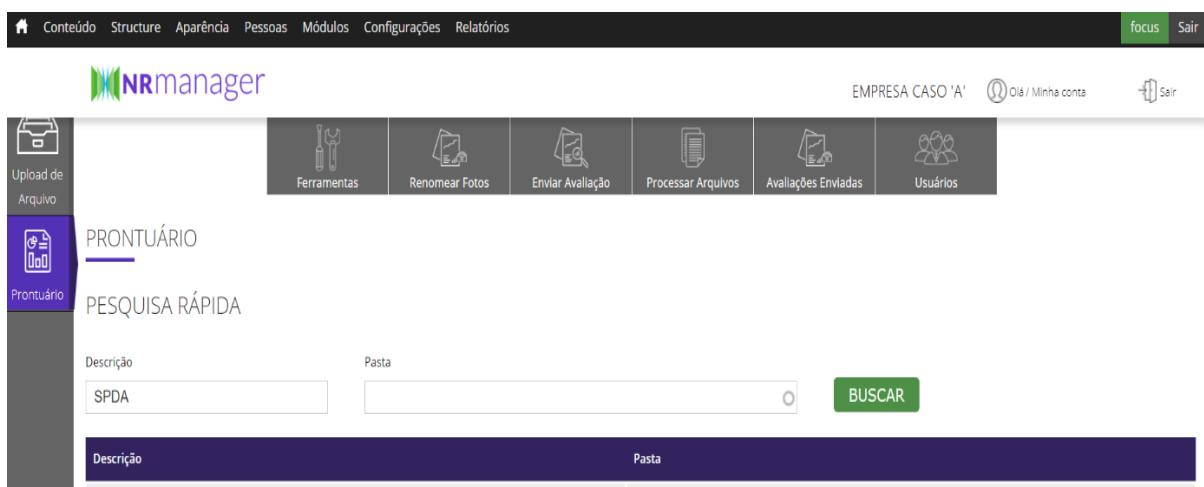
Figura 34 – Pastas do PIE



Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

Outra forma de acessar os documentos, é realizar a busca na caixa de pesquisa rápida, podendo filtrar pela descrição do documento ou pela pasta onde o mesmo se encontra. Essa segunda opção visa facilitar a pesquisa de documentos específicos, seja para consulta ou em auditorias.

Figura 35 – Ferramenta de pesquisa rápida



Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

Para agilizar a análise dos documentos, foi realizado a busca de todos os documentos relacionados ao SPDA, malha de aterramento e subestações, e os registros encontrados e examinados foram:

- Projeto de aterramento e SPDA - Subestação;
- Projeto de aterramento - Implantação;
- SPDA - Pontos de medições;
- Relatório de inspeção SPDA;
- Relatório de inspeção completa do SPDA;
- Relatório do SPDA.

Já para a empresa do caso B, foi apresentado uma série de documentos em formato de mídia digital, referentes a todas as etapas da elaboração dos cálculos necessários na concepção da malha de aterramento e a implantação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, tanto para áreas abertas (pátio) quanto para edificações. A partir deles, pode ser feita a análise e interpretação dos dados declarados.

Os documentos listados abaixo pertencem ao conjunto documental entregue pela empresa do caso B:

- Malha de aterramento - Planta;
- Malha de aterramento - Detalhes;
- Aterramento GIS⁶ 138kV - Implementação;
- SPDA - Pátio da subestação - Planta e cortes;
- SPDA - Pátio da subestação – Detalhes de fixação;
- Edifício de comando - SPDA;
- Lista de materiais - Malha de aterramento;
- Lista de materiais - SPDA;
- Modelagem da resistividade do solo - Memória de cálculo;
- Malha de aterramento e SPDA - Memória de cálculo.

⁶ GIS é a abreviação do termo em inglês para “Gas Insulated metal-enclosed Switchgear” e traduzindo para o português significa “Chave isolada a gás com invólucro de metal”.

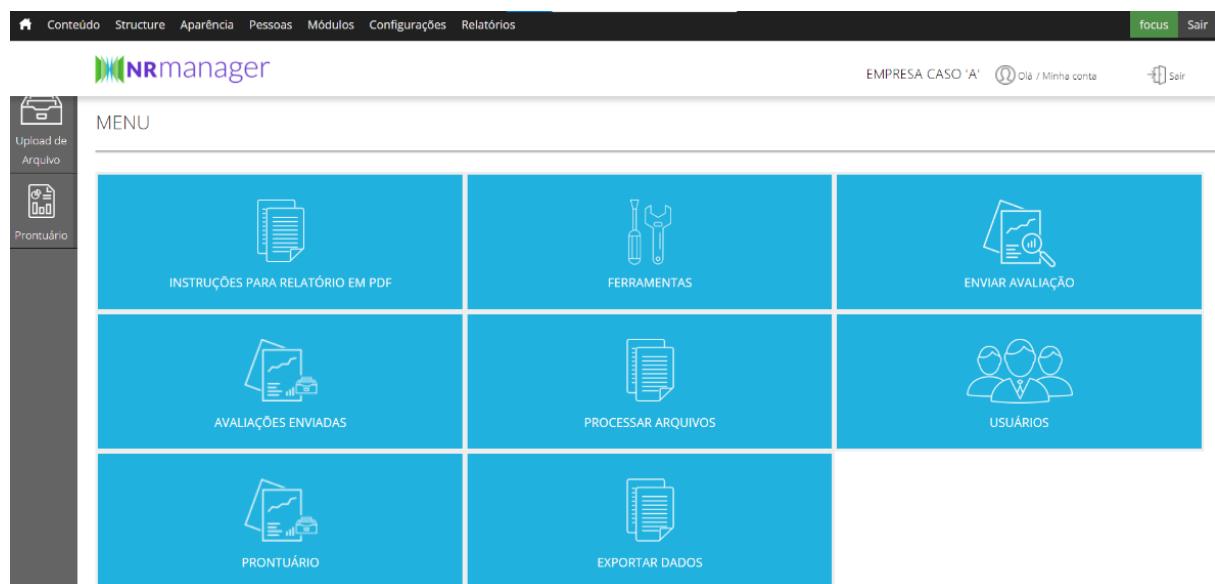
3.3.1 REFERENCIAL TÉCNICO

A ferramenta utilizada para a gestão do PIE referido é o NR Manager, uma plataforma *online* com a finalidade de armazenar em um único lugar, todos os documentos e informações exigidas pela norma regulamentadora.

O NR Manager é um sistema de gerenciamento automatizado de propriedade intelectual da Focus Engenharia Elétrica Ltda e possibilita o monitoramento dos documentos do Prontuário da NR-10, controle dos documentos vencidos e gerar de forma automática o plano de ação, do qual a partir deste documento é possível verificar a evolução das tratativas das não conformidades encontradas durante a análise documental em atendimento à NR-10.

O sistema possui a funcionalidade de atribuir aos profissionais competentes e escolhidos pelo responsável do PIE, a responsabilidade do tratamento das NC geradas no plano de ação, bem como a atualização do status da NC, sendo possível editar o item para a anexar documentos pertinentes ou acrescentar detalhes. A imagem abaixo apresenta o *layout* do software.

Figura 36 – Layout software sistema de gerenciamento



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante de todas as informações obtidas e apresentadas referente as empresas Caso A e Caso B, pode-se proceder à análise dos elementos de cada documento com o intuito de averiguar se os itens adicionados no PIE da empresa do caso A atendem a norma e realizar um comparativo com a documentação entregue pela empresa do caso B, visto que o objetivo da análise é apenas confrontar a forma que os sistemas de SPDA e malhas de aterramento foram realizadas em cada caso, através dos dados obtidos, tendo como propósito evidenciar as diferenças entre as mesmas.

4.1 EMPRESA CASO A

Os documentos “Projeto de aterramento e SPDA – Subestação” e “Projeto de aterramento – Implantação” referem-se aos desenhos “As Built” da malha de aterramento das subestações ou centros de cargas da unidade e o desenho das conexões entre as malhas, no formato DWG e datam de 2009.

A empresa que elaborou os desenhos do aterramento das subestações não apresentou o memorial de cálculo do projeto, portanto as subestações não possuem a análise de tensões de passo e toque.

Os projetos foram elaborados com referência a norma ABNT NBR 5419:2005 e apresentam apenas uma nota contendo algumas informações quanto a sua execução e detalhes genéricos quanto a instalação do aterramento, porém não foi apresentado o método ou o cálculo adotado.

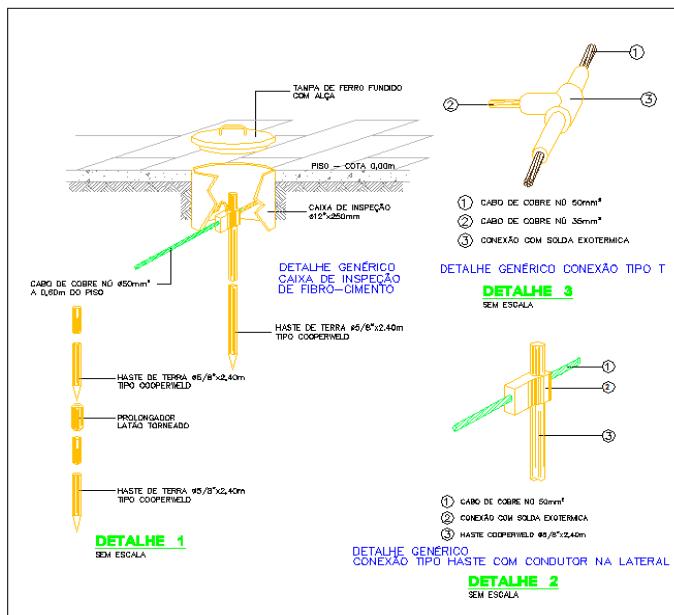
Figura 37 – Nota do projeto de aterramento e SPDA

NOTAS

1. – Toda execução do Sistema de Aterramento deverá ser com conectores apropriados e soldas exotérmicas.
2. – Para ser considerada capilar natural a telha metálica de cobertura deverá ter espessura mínima de 0.5mm, conf. NBR-5419.
3. – Os condutores do SPDA devem ser esticado o máximo possível.
4. – Esta instalação deve ser acompanhada pelo Engenheiro Responsável pela Construção Civil da edificação.
5. – Após a instalação, a resistência de terra não deve superar 10ohms em qualquer época do ano e deverá ser efetuada manutenção anual preventiva.
6. – O Sistema proposto não garante a proteção de equipamentos elétricos/ eletrônicos dentro do edifício a ser protegido.

Fonte: Arquivo Pessoal (2009)

Figura 38 – Detalhes da execução do aterramento



Fonte: Arquivo Pessoal (2009)

Os arquivos “SPDA – Pontos de medições” são desenhos das plantas baixas em formato DWG e possui as demarcações de pontos com condutores, no entanto não informa se são condutores de descidas, destinados às medições de continuidade⁷ do sistema de proteção contra descarga atmosférica, se são pontos de equipotencializações ou pontos contendo BEPs ou BELs. Os documentos não possuem referências de datas ou quaisquer outras informações adicionais.

O relatório de inspeção do SPDA refere-se ao laudo técnico das condições do SPDA, quanto a conformidade do sistema e continuidade elétrica dos subsistemas. O laudo é realizado com uma periodicidade a cada 3 anos para áreas comuns ou anual para áreas classificadas. O documento apresentado “Relatório de inspeção SPDA” é referente a inspeção de equipotencialização do pátio da subestação principal e o “Relatório completo de Inspeção do SPDA” conta com a inspeção de todos os condutores de descidas, caixa de inspeção de aterramento e equipotencialização de conexão metálica, como gradil, vigas, etc. Cada relatório conta com a avaliação dos subsistemas e suas recomendações cabíveis.

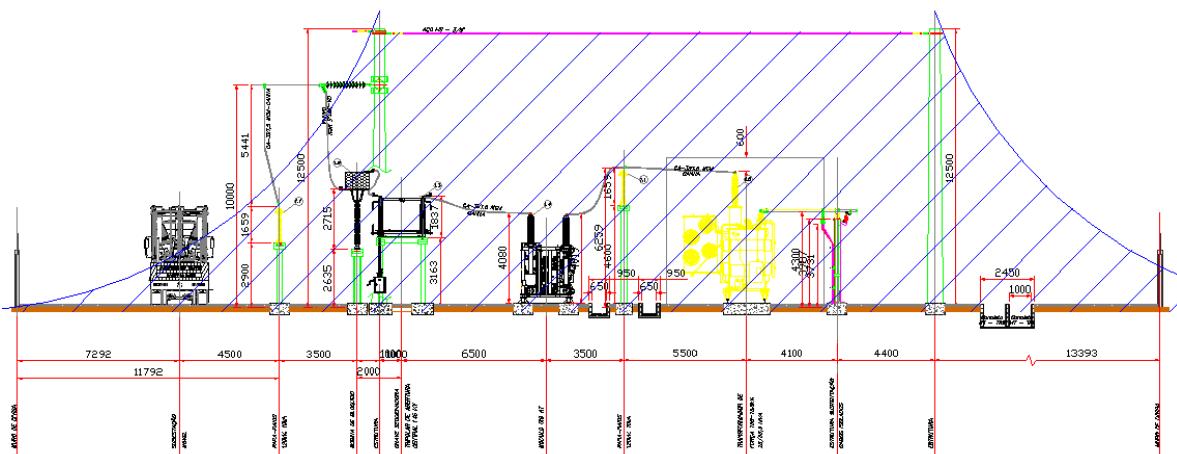
⁷ Para garantir que o sistema esteja operando em condições aceitáveis é necessário medir a continuidade elétrica entre os subsistemas de forma a garantir que a corrente elétrica da descarga atmosférica flua ininterruptamente em direção à terra. Quando apresentado um resultado alto, pode indicar que os condutores estão danificados ou rompidos.

O “Relatório do SPDA” refere-se ao projeto apresentado pertencente a uma edificação específica da unidade. Apresenta o nível de proteção adotado, porém não demonstra sua determinação calculada através do gerenciamento de risco, conforme parte 2 da ABNT NBR 5419:2015, embora contenha no relatório as fórmulas para tais cálculos. No relatório há a menção da componente Pta, que é a probabilidade de uma descarga atmosférica causar choque por tensões de passo e toque ao cair em uma estrutura, mas não há a aplicação da componente em cálculo.

4.2 EMPRESA CASO B

Os seis primeiros documentos mencionados referem-se ao detalhamento dos projetos de malha de aterramento e SPDA em formato DWG. Os desenhos possuem riqueza em detalhe, quanto aos subsistemas, execução, conexões, matérias, fixação e instalação. Os documentos encontram-se em conformidade com as normas pertinentes. A figura abaixo refere-se ao SPDA do pátio da subestação, os cálculos utilizados para a determinação do método e nível de proteção adotado no memorial de cálculo foi demonstrado no Anexo A (pág. 82).

Figura 39 – Projeto de SPDA empresa Caso B



Fonte: Arquivo Pessoal (2018)

As listas de materiais fornecem uma tabela com todas as peças, bem como a quantidade de cada material e sua referência em frente ao fornecedor, para não haver

erros no pedido de compra ou a compra equivocada, como pode ser observado no exemplo abaixo.

Tabela 6 – Lista de materiais

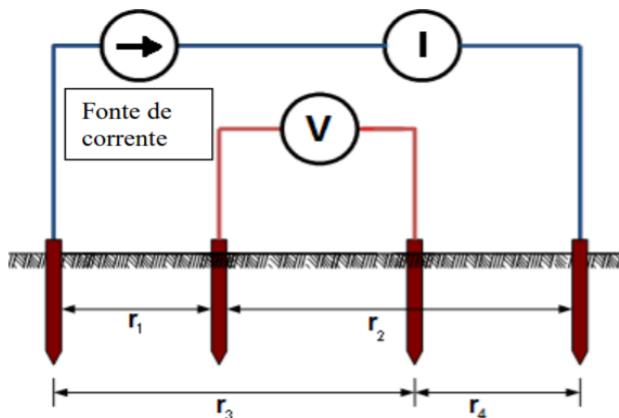
ITEM	DESCRÍÇÃO	UN.	COD	QTD.	OBSERVAÇÃO	FORNECIMENTO
1	Cabo nu de aço cobreado #70,00mm ² - IAC40% Ref: CS-70	Mts	30465	270	Intelli	CONTRATADA
2	Conector derivação em cruz para cabos de 10 A 70mm ² Ref: GG-100	Pç		03	Delta Star	CONTRATADA
3	Conector Split-Bolt Latão - 70mm ² Ref: -	Pç		60	Intelli	CONTRATADA

Fonte: Modificado de arquivo pessoal (2018)

Os documentos memórias de cálculos tem o objetivo de descrever detalhadamente todos os cálculos realizados para chegar ao resultado final e contém todas as informações técnicas necessárias, de forma clara e precisa, para a execução da malha de aterramento e SPDA, conforme o desenho apresentado.

Para a modelagem da resistividade do solo, o memorial de cálculo apresentou os resultados das medições de resistividade do solo e apresentou a estratificação do solo em camadas. A resistividade do solo foi realizada no local da construção utilizando um terrômetro digital através do método de Wenner, cujo consiste na aplicação de 4 hastes condutoras distanciadas igualmente a uma profundidade de 0,5 m, conforme a imagem abaixo:

Figura 40 – Método Wenner



Fonte: Apostila Curso de Instalações elétricas internas Procobre (s.d)

Abaixo, segue registro fotográfico da medição de resistividade do solo como exemplificação.

Figura 41 – Medição de Resistividade do solo



Fonte: Arquivo Pessoal (2017)

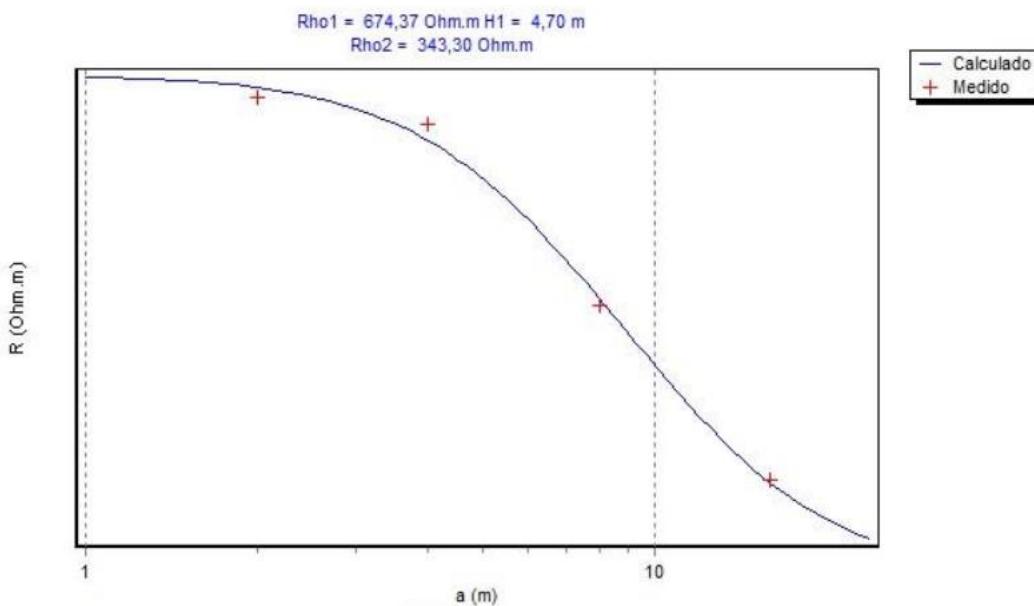
A partir das medições de resistividade do solo, os cálculos foram efetuados a partir do software TecAt Plus versão 5.2 para a estratificação do solo em camadas para a subestação utilizando os valores médios para cada espaçamento obtido, apresentando os seguintes resultados:

Tabela 7 – Resultado da estratificação do solo em camadas

Camada	Resistividade (Ω.m)	Profundidade (m)
1	674,37	4,70
2	343,30	Infinito

Fonte: Modificado de arquivo pessoal (2022)

Figura 42 – Gráfico da estratificação do solo



Fonte: Arquivo Pessoal (2018)

A memória de cálculo da malha de aterramento e SPDA visa o dimensionamento correto dos subsistemas na subestação.

Uma das recomendações para a construção da subestação refere-se ao terreno, pois o mesmo deve estar nivelado e terraplanado, com terra livre de areia, pedregulho e restos de construção, de modo a não prejudicar as características elétricas do solo, visto que a malha a terra é responsável pela dispersão das correntes de falha para a terra.

A seção do cabo principal do sistema de aterramento deve suportar o efeito térmico produzido pela corrente de curto-circuito nos pontos calculados, a imagem abaixo pertence à seção do documento que apresenta os resultados obtidos para as características da malha, como equipotencialização e seção dos cabos, através do seguinte cálculo, conforme a IEEE Std. 80-2000:

Figura 43 – Cálculo da seção do cabo

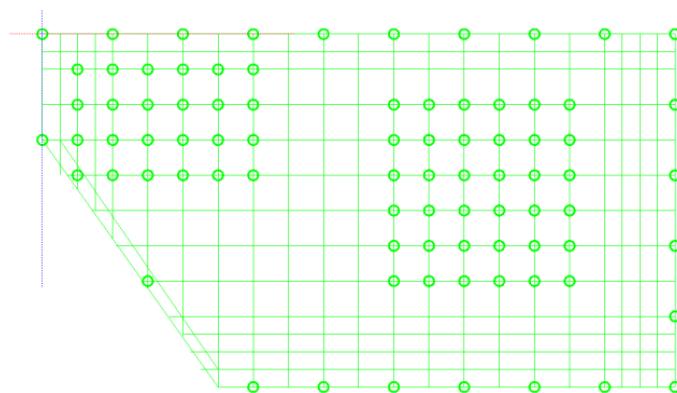
$S = If \sqrt{\frac{t * ar * \rho t * 10^4}{TCAP * In * \frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}}}$	
Onde:	
S Área da seção transversal do condutor [mm ²];	
If Corrente de curto-circuito [kA];	
t Duração do curto-circuito [S];	
ar Coeficiente térmico de resistividade do condutor a t °C [°C-1];	
ρ Resistividade do condutor de aterramento [μΩ.cm];	
TCAP Capacidade térmica por unidade de volume [J/ (cm ³ .°C)];	
T _m Temperatura máxima admissível, [°C];	
T _a Temperatura ambiente [°C];	
k ₀ (1/ar) ou (1/αr) – Coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0°C;	
Os valores utilizados foram:	
If 12	TCAP 3,422
t 0,5	T _m 1084
ar 0,00381	T _a 35
ρ 1,777	k ₀ 242,131

Fonte: Arquivo Pessoal (2018)

Dessa forma, a resistência da malha calculado é de 2,72 Ω e a seção mínima do cabo da malha de aterramento deve ser de 70 mm², calculado conforme os itens da figura 42, ou seja, devendo suportar os efeitos térmicos produzidos pela corrente suportável nominal de curta duração (If) de 12 kA, correspondente ao curto-circuito fase-terra máximo para dois transformadores de força de potência igual a 33,3 MVA e tensão de 13,8 kV (no secundário), portanto, o resultado obtido para tensões de passo e toque não deve ser maior que 13,8 kV.

A partir dos dados verificados através dos cálculos acima, a malha de aterramento pode ser arquitetada e o croqui apresentado (Fig. 43), conforme a disposição do terreno e parâmetros do solo.

Figura 44 – Malha de aterramento - Croqui



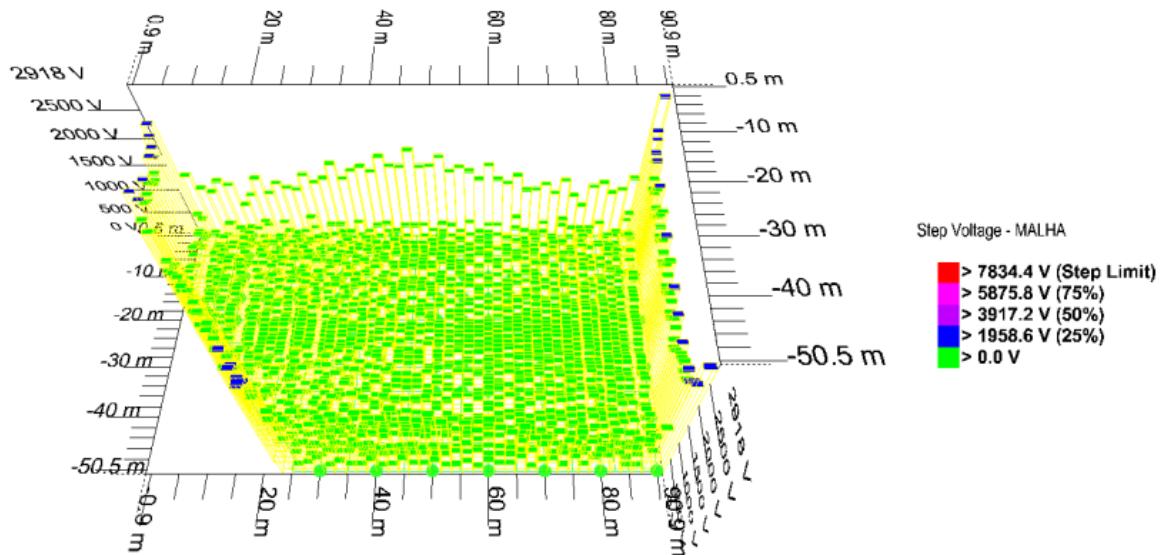
Fonte: Arquivo Pessoal (2019)

Os resultados para as máximas⁸ admissíveis de tensão de passo e toque suportáveis para uma pessoa de aproximadamente 70 kg foram:

- Resistividade = 3000 $\Omega \cdot m$;
- Espessura da camada de brita= 15 cm;
- Tensão de passo máxima suportável = 7834,36 V;
- Tensão de toque máxima suportável = 2330,95 V;
- Potencial da malha: 30366,3 V.

Os gráficos a seguir, foram calculados pelo software GroundMat e apresentados no memorial para demonstrar a simulação do potencial da malha para tensões de passo e toque.

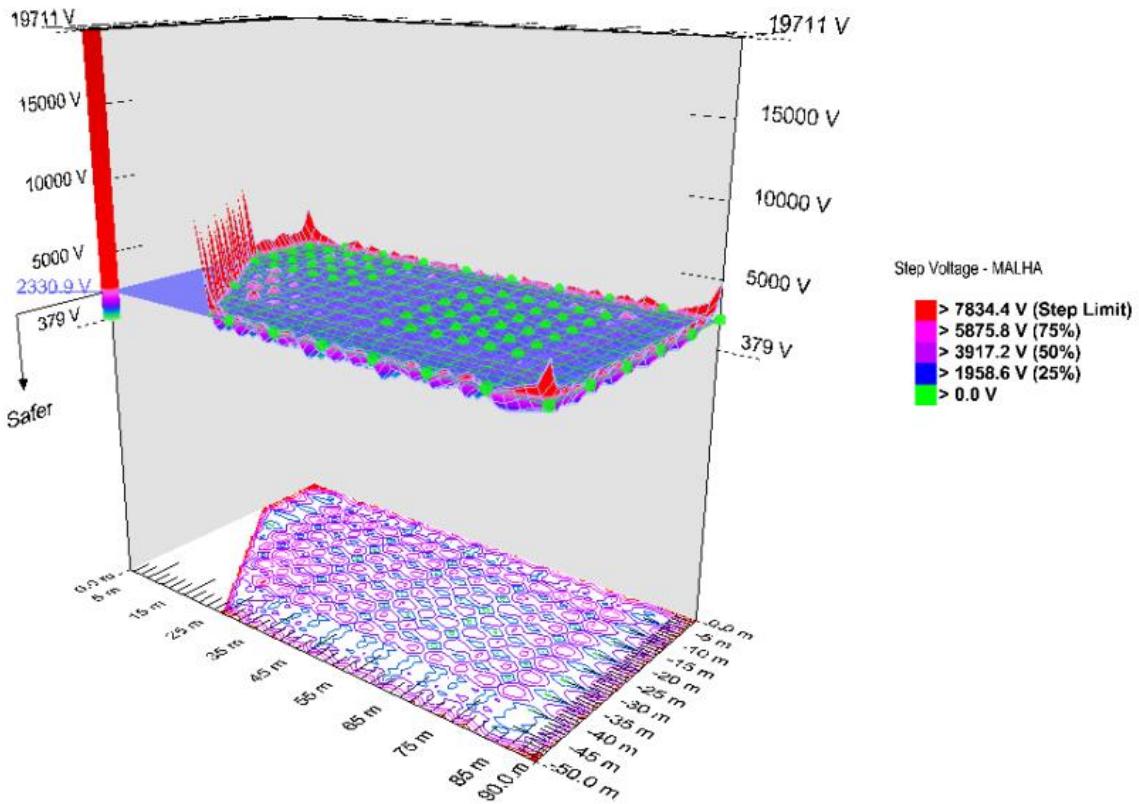
Figura 45 – Potencial de passo da malha de aterramento



Fonte: Arquivo pessoal (2019)

⁸ Considerando uma corrente de falta de 12 kA com duração de 1 s.

Figura 46 – Potencial de toque da malha de aterramento



Fonte: Arquivo pessoal (2019)

As cores utilizadas nos gráficos indicam os limites, indicando os pontos seguros e os pontos com o aumento de potencial, como mostra a legenda abaixo:

Figura 47 – Legenda de cores



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

O texto ressalta ainda, as seguintes recomendações sobre as tensões máximas, para melhorar as condições frente às tensões de passo e toque e visando evitar problemas relativos ao potencial de transferência:

- I. A distância da malha em relação à abertura da porta deve ter no mínimo 1 m;
- II. Os cabos da malha devem ser instalados a uma profundidade de 0,70 m em relação ao piso;
- III. Os cabos da malha de aterramento devem ser interligados às ferragens das armaduras;
- IV. As partes metálicas deverão estar conectadas ao sistema de aterramento.

Para o SPDA, o memorial de cálculo apresenta os cálculos para a determinação do SPDA para a proteção do pátio e o nível de proteção da Casa de Comando através do gerenciamento de risco (Anexo B, pág. 84), conforme parte 2 da ABNT NBR 5419-2015.

O dimensionamento do SPDA para o pátio tem o objetivo de calcular o raio da corona (RC), impedância de surtos de condutores (Zs), corrente de descarga admissível (Is) e o cálculo da esfera rolante, método de captação adotado para áreas abertas. Os cálculos podem ser consultados no Anexo A.

Para a casa de comando, a proteção calculada para a instalação do SPDA é a classe IV e possui as seguintes características:

Tabela 8 – Características SPDA Casa de Comando

SUBSISTEMA	CAPTAÇÃO	DESCIDA
MÉTODO	Malhas	SPDA não isolado
MATERIAL	Cabo de Cobre	Cabo de Cobre
ESTRUTURA DO MATERIAL	Encordoado	Encordoado
SEÇÃO DOS CONDUTORES	70 mm ²	70 mm ²
AFASTAMENTO DOS CONDUTORES	05 x 05 m	05 m
QUANTIDADE	Ao Ar Livre	12

Fonte: Modificado de arquivo pessoal (2018)

O subsistema de aterramento para o atendimento do SPDA deverá ser o mesmo que foi calculado para o sistema de aterramento do pátio.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após compilado todos os documentos que foram localizados no PIE da empresa do caso A, posteriormente a busca dos títulos relativos ao tema, foi realizado a análise do conteúdo dos documentos individualmente, de forma a identificar os cálculos para a determinação da malha de aterramento e tensão de passo e toque, ou ainda, elementos relevantes na especificação do nível de proteção do SPDA. Todas as considerações foram feitas, em seguida, no capítulo 4.1 deste trabalho acadêmico. Com base no conjunto de documentos viabilizados pela empresa do caso B e ponderado no capítulo 4.2, é possível constatar a existência dos cálculos empregados para estabelecer os limites de segurança para tensão de passo, para a resistência de aterramento e *layout* da malha de aterramento e a riqueza nos detalhes para a determinação do nível de proteção do SPDA.

O intuito das avaliações não foi apontar não conformidades quanto à aderência normativas nas instalações elétricas das empresas citadas nessa dissertação, mas sim, realizar um comparativo técnico em relação aos cálculos de componentes altamente relevantes à segurança física de forma geral.

Acidentes dessa natureza normalmente permanecem em sigilo pelas indústrias até que se tenha um parecer final do legista informando a causa da morte, porém, o desconhecimento do que levou ao óbito não impede a comunicação do acidente ao CAT que ocorre sempre imediatamente após o acidente.

Informações como laudo de equipotencialização, memorial de cálculo apresentando os valores de tensão de passo e toque, projeto e laudo de SPDA cooperaram na resolução da causa do falecimento do indivíduo, sendo que a ausência ou omissão de tais documentos demonstra desvios graves na instalação, o que pode incriminar os responsáveis pelas indústrias ou estabelecimentos.

Dessa forma, a empresa do caso A, preocupada com a segurança de seus colaboradores, vem trabalhando na elaboração dos documentos necessários para a adequação das instalações.

5 CONCLUSÕES

Partindo pelo pressuposto teórico evidenciado nos documentos da empresa do caso B, respeitando todos os itens regulamentados perante as normativas existentes. Em contrapartida, a empresa do caso A, cujo apresentou uma documentação deficiente, onde os cálculos para a determinação dos itens mais relevantes para a segurança das pessoas e do sistema elétrico não foram elaborados.

Diante desse quadro, foi proposto a empresa do caso A, no decorrer das pesquisas realizadas em seu prontuário elétrico, realizar a adequar das documentações de forma a atender a legislação Brasileira e posteriormente, se necessário, corrigir os subsistemas nas instalações.

Sendo assim, conclui-se, portanto, que o objetivo desta monografia, ao contrapor os documentos nas diferentes formas de apresentação, sendo uma de forma inadequada e outra de forma precisa, foi alcançado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE. **Anuário estatístico Brasileiro dos acidentes de origem elétrica.** São Paulo/SP: ABRACOPEL, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE. Estatísticas. **Abracopel.** Disponível em: <<http://abracopel.org/estatisticas/>>. Acesso em: 12 Janeiro 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT, 2013.

BRASIL, MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Norma Regulamentadora Nº10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade.** 2019.

CPN-SP, C. T. P. D. N. D. S. E. N. E. D. S. P. **Segurança em instalações e serviços em eletricidade.** 2005.

ESCOLA SENAI “PROF. DR. EURYCLIDES DE JESUS ZERBINI”. **Eletricidade.** Campinas: Senai/Sp, 2002. 224 p. Volume 1.

FOCUS ENGENHARIA ELÉTRICA LTDA (Santa Bárbara D'Oeste). **NR-Manager.** 2017. Disponível em: <https://nrmanager.com.br/>. Acesso em: 31 jan. 2022.

MENDES, Filomena. **EletRICIDADE BÁSICA.** Cuiabá: e-Tec Brasil, 2010. 67 p. EdUFMT/UFMT.

INSTITUTO POLITÉCNICO DE ENSINO A DISTÂNCIA. **Instalações Elétricas Residenciais.** iPED, 2018.132p.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA (Seropédica). UFRRJ. **Riscos do choque elétrico.** Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/electric.htm>. Acesso em: 07 jan. 2022.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. **Aterramento Elétrico.** 3. ed. Porto Alegre: Sagra- D.C. Luzzatto, 1995. 214 p.

LEITE, Carlos M.; F., Mário L. Pereira. **Malhas de Terra:** técnicas de aterramentos elétricos. São Paulo: Officina de Mydia, 2007. 257 p.

LEMES, Prof. Andryos da Silva. **Apostila de EletrICIDADE BÁSICA.** Presidente Epitácio: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, . Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/4/47/ApostilaEB2.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

LUMIÈRE ELECTRIC. São Paulo: Editora Lumière, fev. 2015. Edição 202: Proteção Contra Raios.

MODENA, Jobson; SUETA, Hélio. Projeto de eletrodo de aterramento (malhas) de subestações de energia elétrica: cálculos de tensões permissíveis, correntes de choque elétrico, tensões de passo e toque. **O Setor Elétrico:** MODENA, Jobson; SUETA, Hélio. MODENA, Jobson; SUETA, Hélio. Projeto de eletrodo de aterramento (malhas) de subestações de energia elétrica: cálculos de tensões permissíveis, correntes de choque elétrico, tensões de passo e toque. São Paulo: O Setor Elétrico, Capítulo III, 2011. O Setor Elétrico, São Paulo, v. 63, n. 6, p. 46-51, abr. 2011., São Paulo, v. 62, n. 6, p. 52-58, mar. 2011. Cap. III.

MODENA, Jobson; SUETA, Hélio. MODENA, Jobson; SUETA, Hélio. Projeto de eletrodo de aterramento (malhas) de subestações de energia elétrica: cálculos de tensões permissíveis, correntes de choque elétrico, tensões de passo e toque. São Paulo: O Setor Elétrico, Capítulo III, 2011. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 63, n. 6, p. 46-51, abr. 2011. Cap. IV.

SÃO JOÉ DOS CAMPOS. Elat - Grupo de Eletrecidade Atmosférica. Inpe - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (org.). **Eletrecidade Atmosférica**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. Acesso em: 28 jan. 2022.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica Programa de Educação Continuada. **Legislação e Normas técnicas**. Epusp- EAD/ PECE, 2018a. 217p.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos Elétricos**: Conceitos básicos, Técnicas de medição e instrumentação, Filosofia de aterramento. 5. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2019. 159 p.

APÊNDICE A – ESQUEMAS DE ATERRAMENTO DE BAIXA TENSÃO

Segundo a ABNT NBR-5410:2008, é possível classificar o sistema de aterramento de uma instalação elétrica de baixa tensão em três tipos:

- Esquema TN;
- Esquema TT;
- Esquema IT.

Para que possamos compreender como cada esquema funciona, é preciso entender o significado de cada letra, onde a primeira letra significa a situação da alimentação em relação à terra e a segunda letra a situação das massas da instalação elétrica em relação à terra, dessa forma, pode-se definir:

1. Primeira letra

T = um ponto diretamente aterrado;

I = isolação de todas as partes vivas em relação à terra ou o aterramento de um ponto através da impedância.

2. Segunda letra

T = massas diretamente aterradas, independente do aterramento casual de um ponto da alimentação;

I = massas ligadas ao ponto da alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o neutro).

O esquema TN pode, ainda, ser realizado de três formas diferentes, sendo:

- TN-S, onde o condutor neutro e de proteção são distintos;
- TN-C, onde os condutores neutro e de proteção são combinados como um único condutor (PEN);
- TN-C-S, onde o condutor neutro e de proteção são combinados em uma parte da instalação e separados em outra parte.

ANEXO A – CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DO SPDA DE PÁTIO

- RAIO DA CORONA (Rc)

O raio da corona é determinado através da fórmula abaixo:

$$Rc * \ln \left(2 * \frac{h}{Rc} \right) - \frac{NBI}{Eo} = 0$$

Onde:

Rc:	Raio da corona (m)
h:	Altura média dos barramentos condutores (m)
NBI:	650kV
Eo:	Gradiente limite para corona, fixado em 1500kV/m

Resolução da equação:

$$Rc = \frac{0,4333333333333333}{\ln \left(2 * \frac{6,5}{Rc} \right)}$$

E chegamos ao valor de raio da corona em **0,08645 m.**

- IMPEDÂNCIA DE SURTO DOS CONDUTORES (Zs)

A impedância de surto para um determinado barramento é dada pela seguinte fórmula:

$$Zs = 60 * \sqrt{\ln * \left(2 * \frac{h}{Rc} \right) * \ln \left(\left(2 * \frac{h}{r} \right) \right)} \quad Zs = 361,80 \Omega.$$

Onde:

Zs:	Impedância de surto (Ω)
h:	Altura média dos barramentos condutores (m)
Rc:	Raio da corona (m)
r:	Raio metálico do condutor em metros (m)

A partir das características altura média dos condutores (h), raio da corona (Rc) e raio do condutor (r).

- CORRENTE DE DESCARGA ADMISSÍVEL (I_s)

O nível de corrente de descarga é obtido através do cálculo a seguir:

$$I_s = \frac{(2,2 * NBI)}{Z_s} \quad ou \quad I_s = \frac{(2,068 * CFO)}{Z_s}$$

Onde:

- | | |
|------|--|
| Is: | Corrente permissível de descarga (kA) |
| NBI: | Nível básico de impulso atmosférico (kV) |
| Zs: | Impedância de surto (Ω) |

O sistema em questão possui as seguintes características:

NBI: 650kV

Zs: 361,81 Ω

E através da equação chegamos ao valor de Corrente permissível de descarga de **3,95 kA**.

- CÁLCULO DO RAIO DA ESFERA ROLANTE PARA 138KV

O raio da esfera é calculado pela seguinte equação:

$$S = 8 * k * i^{0,65}$$

Onde:

- | | |
|----|--|
| S: | Distância de atração em (m) |
| k: | Coeficiente de distância de atração de hastes e cabos-guarda (m)
Sendo valor 1,0 para cabos guarda, e de 1,2 para hastes. |
| i: | Corrente da descarga de retorno (kA) |

E através da equação chegamos do raio da esfera para cabos guarda de **19,53 m**.

E para as hastes **23,44 m**.

ANEXO B – GERENCIAMENTO DE RISCO

Projeto:	CASO A
Dimensões da estrutura	
Zona:	Interna
Área de exposição equivalente A_D [m ²]	4987
Influências ambientais	
Localização (cd):	Estrutura cercada por objetos de mesma altura ou mais baixos
Frequência de descarga para terra N_g [1/km ² /ano]:	7,4
Tipo de solo:	Agrícola, concreto
Tipo de estrutura:	Locais onde falhas de sistemas internos não causam perdas de vidas humanas
Risco de incêndio (r_f):	Incêndio Alto ou explosão (zonas 1, 21)
Perigo especial (h_z):	Sem perigo especial
Número de pessoas na zona:	10
Serviços conectados:	
Largura da blindagem ou distância entre as descidas w_1 [m]	8,3333
Largura da blindagem ou distância entre as descidas w_2 [m]	8,3333
Medidas de proteção	
Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA):	Classe do SPDA IV
Meios para restringir as consequências de incêndio (r_p):	Extintores manuais, alarmes manuais, hidrantes, rotas de fuga protegidas ou compartimentos à prova de fogo
Contra tensão de toque ou passo na estrutura (P_{TA}):	Equipotencialização efetiva do solo
Contra tensão de toque ou passo na linha (P_{TA}):	Nenhuma medida de proteção
Atributos da linha conectada:	
Linha de energia	
Fator ambiental da linha:	Suburbano
Fiação interna:	Blindado ou instalado em eletrod. metálicos
Tensão suportável de impulso atmosférico no sistema [kV]	2,5kV
Dispositivo de proteção contra Surto DPS (Pspd):	Sem proteção coordenada com DPS
Modo de instalação da linha (Ci):	Enterrado
Linha de telecomunicação	
Fator ambiental da linha:	Rural
Fiação interna:	Não blindado- precaução para evitar laços
Tensão suportável de impulso atmosférico no sistema [kV]	1,5kV
Dispositivo de proteção contra Surto DPS (Pspd):	Sem proteção coordenada com DPS
Modo de instalação da linha (Ci):	Enterrado
Resultado	
Perda de vida humana R_1	2,4411E-07
Avaliação de risco:	Tolerável
Perda de serviço público R_2	2,0610E-04
Avaliação de risco:	Tolerável
Perda econômica R_4	3,7698E-06

Avaliação de risco:	Tolerável
Projeto avaliado por:	XXXXXXXX
Data da avaliação:	14/09/2017
Total:	
Perda de vida humana R₁	2,4411E-07
Perda de serviço público R₂	2,0610E-04
Perda econômica R₄	3,7698E-06