



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**POSTES METÁLICOS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA:  
ANÁLISE DAS INSTALAÇÕES NA PREVENÇÃO  
CONTRA CHOQUE ELÉTRICO**

**Yasmim de Souza Guedes**

Brasília, novembro 2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**Yasmim de Souza Guedes**

**POSTES METÁLICOS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA:  
ANÁLISE DAS INSTALAÇÕES NA PREVENÇÃO  
CONTRA CHOQUE ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheira Eletricista.

**Orientador: Professor Alcides Leandro da Silva, Dr.**

Brasília, novembro 2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

GUEDES, YASMIM DE SOUZA.

POSTES METÁLICOS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA: ANÁLISE DAS INSTALAÇÕES NA PREVENÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO. [ Distrito Federal] 2020.

97 p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2020).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Postes metálicos

2. Choques elétricos

3. Sistemas de aterramento

4. Iluminação pública

I. ENE/FT/UnB

II. Postes metálicos na iluminação pública: Análise das instalações na prevenção contra choque elétrico.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Yasmim de Souza Guedes. Postes metálicos na iluminação pública: Análise das instalações na prevenção contra choque elétrico.

Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Yasmim de Souza Guedes

POSTES METÁLICOS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA: ANÁLISE DAS INSTALAÇÕES NA PREVENÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO:

GRAU/ANO: Graduação em Engenharia Elétrica/2020.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Nome do Aluno: Yasmim de Souza Guedes

Endereço: Casa do Estudante Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, Asa Norte, Brasília -

DF Email:yasmimsouza1818@gmail.com

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**POSTES METÁLICOS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA  
ANÁLISE DAS INSTALAÇÕES NA PREVENÇÃO CONTRA  
CHOQUE ELÉTRICO**

**Yasmim de Souza Guedes**

**Banca examinadora**

---

**Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ENE**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Franklin da Costa Silva, UnB/ENE**  
Examinador interno

---

**Engenheiro Edvaldo Lima Paniago**  
Examinador externo

Brasília, novembro 2020



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por toda proteção, força e sabedoria que tem me proporcionado.

Agradeço aos meus pais, Almira e Geovani, por todo empenho, dedicação, exemplo e amor no processo de formação da mulher que sou hoje. Sou e serei eternamente grata por todo esforço para me proporcionar uma boa educação e os melhores colégios possíveis.

Agradeço a toda minha família pelo carinho, pela força e pelo companheirismo. Em especial a minha madrinha Sebastiana e meus avôs Beijamim e Anizia, que diante das dificuldades financeiras sacrificaram o que tinham para investir na minha educação.

Agradeço ao professor Doutor Alcides Leandro, pela orientação, disponibilidade, empenho e paciência. Sempre lembrarei com carinho das muitas horas de reuniões e das balinhas para enganar o estômago.

Agradeço a minha namorada Beatriz, pela cumplicidade, pelas conversas, pelos abraços apertados e pelas revisões gramaticais e estruturais a este trabalho.

Agradeço ao Marco, funcionário da CEB, por ter sido tão solícito na retirada das minhas dúvidas.

Agradeço a meus amigos pelos dias de festa e pelo ombro nos dias de luta.

## RESUMO

### POSTES METÁLICOS NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA: ANÁLISE DAS INSTALAÇÕES NA PREVENÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO

A diversificação de equipamentos elétricos utilizados em meios urbanos, visando melhorias das condições de vida, desperta preocupação quanto à facilitação da exposição ao risco de choques elétricos. Neste cenário, destacam-se os postes metálicos utilizados na iluminação pública com alimentação de níveis de tensão da rede de distribuição, de 220V, 60 Hz, o que requer proteção contra choques elétricos no caso de energização acidental de partes acessíveis. No contexto de equipamento energizado e exposto à população, este trabalho buscou entender a situação atual das instalações elétricas da iluminação pública, as possibilidades de riscos de choque e as formas de redução dos potenciais elétricos, identificando os esquemas de aterramento aplicados em confronto com as normas vigentes. Os experimentos de campo com medições de tensão de toque e de resistência de aterramento confirmam o perigo e embasam as propostas de proteção contra choques elétricos para propiciar a segurança das pessoas. Resta comprovado que o aterramento adequado das partes metálicas, criando-se a equipotencialização, de um sistema elétrico reduz o potencial de toque e conseqüentemente os perigos de acidentes. Com os cálculos e análises, comprovou-se que o esquema de aterramento TN-C-S multiaterrado é seguro como meio de proteção supletiva por garantir tensão de toque e corrente de choque elétrico abaixo dos níveis prescritos pelas normas no tocante às reações fisiológicas graves.

**Palavras-chave:** Postes metálicos; Choques elétricos; Sistemas de aterramento; Iluminação pública.

**ABSTRACT****METAL POLES IN PUBLIC LIGHTING: ANALYSIS OF INSTALLATIONS IN PREVENTION  
AGAINST ELECTRIC SHOCK**

The diversification of electrical equipment used in urban environments to improve living conditions raises concerns about the facilitation of exposure to the risk of electric shocks. In this scenario, the metal poles used in public lighting with power supply voltage levels of 220V, 60 Hz stand out, which requires protection against electric shocks in case of accidental energization of accessible parts. In the context of energized equipment exposed to the population, this work sought to understand the actual situation of public lighting facilities, the possibilities of shock risks, and ways to reduce electrical potentials, identifying the grounding schemes applied in comparison with current standards. Field experiments with touch voltage and grounding resistance measurements confirm the danger and support proposals for protection against electric shock to provide safety for people. It remains proven that the proper grounding of the metallic parts, creating the equipotentialization, of an electrical system reduces the potential for touch and consequently the danger of accidents. With the calculations and analyzes, the multi-grounded TN-C-S earthing scheme was proved safe as a means of supplementary protection as it guarantees touch voltage and electric shock current below the levels prescribed by the standards regarding severe physiological reactions.

**Keywords:** Metal poles; Electric shocks; Grounding systems; Street lighting.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo . . . . .	2
1.2	Estrutura do trabalho . . . . .	2
<b>2</b>	<b>CHOQUES ELÉTRICOS</b>	<b>4</b>
2.1	Conceituação . . . . .	4
2.2	Tipos de choques elétricos . . . . .	4
2.3	Reações fisiológicas decorrentes do choque elétrico . . . . .	5
2.3.1	Contrações musculares e Tetanização . . . . .	5
2.3.2	Queimaduras e Necrose dos tecidos . . . . .	5
2.3.3	Fibrilação ventricular . . . . .	6
2.3.4	Parada cardíaca e respiratória . . . . .	6
2.4	Fatores influentes nos danos fisiológicos causados por choque elétrico . . . . .	6
2.4.1	Trajeto da corrente no corpo . . . . .	6
2.4.2	Espécie, intensidade e frequência da corrente do choque elétrico . . . . .	7
2.4.3	Tempo de duração do contato . . . . .	9
2.5	Resistência do corpo humano . . . . .	10
2.6	Proteção contra choques elétricos . . . . .	12
2.6.1	Categorias de proteções . . . . .	12
2.6.2	Dispositivos de manobra, proteção e comando . . . . .	13
<b>3</b>	<b>CONCEITOS E CARACTERIZAÇÕES DOS ELEMENTOS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA</b>	<b>14</b>
3.1	Postes metálicos . . . . .	14
3.1.1	Formato e material metálico . . . . .	14
3.1.2	Altura e fixação ao solo . . . . .	15
3.1.3	Furo de enfição e janela de inspeção . . . . .	17
3.2	Cabos de energia e eletrodutos . . . . .	18
3.3	Quadros de comando . . . . .	18
3.4	Relé fotoeletrônico . . . . .	20
3.5	Luminárias . . . . .	21
3.6	Situação dos postes metálicos . . . . .	22
<b>4</b>	<b>CONFIGURAÇÕES E CONCEITUAÇÃO DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO</b>	<b>25</b>
4.1	Resistividade dos solos . . . . .	25
4.1.1	Tipo de solo . . . . .	26

4.1.2	Umidade do solo . . . . .	27
4.1.3	Concentração e tipos de sais dissolvidos na água . . . . .	28
4.1.4	Compacidade do solo . . . . .	28
4.1.5	Granulometria do solo . . . . .	28
4.1.6	Temperatura do solo . . . . .	28
4.1.7	Estratificação . . . . .	29
4.1.8	Método de Wenner . . . . .	30
4.1.9	Procedimentos de estratificação do solo . . . . .	33
4.1.10	Resistividade aparente . . . . .	35
4.2	Esquemas de aterramento . . . . .	37
4.2.1	Esquema TN . . . . .	38
4.2.2	Esquema TT . . . . .	42
4.2.3	Esquema IT . . . . .	43
4.2.4	Condutor de proteção . . . . .	44
4.3	Geometria dos eletrodos . . . . .	45
4.3.1	Alteração no raio do eletrodo . . . . .	47
4.3.2	Alteração do comprimento do eletrodo . . . . .	48
4.3.3	Resistividade através do tratamento do solo . . . . .	48
4.3.4	Acréscimo de eletrodos em paralelo . . . . .	49
4.4	Corrente e tensões permissíveis para não causar fibrilação ventricular . . . . .	50
4.4.1	Limite de corrente de choque para não causar fibrilação . . . . .	50
4.4.2	Tensão de Passo . . . . .	51
4.4.3	Tensão de Toque . . . . .	53
4.4.4	Aumento do potencial de aterramento . . . . .	54
4.4.5	Camada superficial . . . . .	55
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E MEDIÇÕES EM CAMPO</b>	<b>56</b>
5.1	Resistência de aterramento . . . . .	56
5.1.1	Procedimento: Método da queda de potencial . . . . .	56
5.1.2	Experimento: Método da queda de potencial . . . . .	57
5.1.3	Análise do experimento: Método da queda de potencial . . . . .	61
5.2	Tensão de passo e tensão de toque no poste metálico de iluminação . . . . .	62
5.3	Poste com esquema de aterramento TT . . . . .	66

<b>6</b>	<b>PROPOSTAS DE PROTEÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO EM POSTES METÁLICOS DE ILUMINAÇÃO</b>	<b>71</b>
6.1	Propostas de proteção básica . . . . .	71
6.1.1	Eletrodutos rígidos . . . . .	71
6.1.2	Manutenções corretivas e preventivas . . . . .	71
6.2	Proposta de proteção supletiva . . . . .	71
6.2.1	Esquema de aterramento TN-C-S . . . . .	71
6.2.2	Barramento de equipotencialização . . . . .	72
6.2.3	Aterramento principal . . . . .	73
6.2.4	Aterramento múltiplo . . . . .	74
6.2.5	Seção do condutor de proteção . . . . .	78
6.2.6	Condição de proteção do esquema TN-C-S . . . . .	79
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>81</b>
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .	81

## Lista de Figuras

1	Percurso do Macro-choque . . . . .	6
2	Reações fisiológicas de acordo com a espécie e intensidade da corrente elétrica no corpo humano . . . . .	7
3	Relação entre corrente elétrica e frequência para uma mesma contração muscular	8
4	Relação entre intensidade e duração do fluxo corrente alternada entre mãos e pés do corpo humano . . . . .	9
5	Circuito equivalente para impedância do corpo humano . . . . .	11
6	Classificação de umidade da pele humana . . . . .	11
7	Resistência do corpo humano por classificação de condição da pele . . . . .	12
8	Espessura das chapas de aço para fabricação dos postes retos e curvos . . . . .	14
9	Formatos dos postes para iluminação pública . . . . .	15
10	Tipos de fixação de poste ao solo . . . . .	15
11	Altura útil e altura total . . . . .	16
12	Comprimento do engastamento em função da altura útil do poste . . . . .	17
13	Janela de inspeção e furo de enfição . . . . .	17
14	Detalhe do furo de enfição . . . . .	17
15	Característica dos eletrodutos de aço . . . . .	18
16	Diagrama unifilar dos quadros de comando IP1 e IP2 . . . . .	19
17	Principais componentes do quadro de IP . . . . .	19
18	Correntes nominais de fusíveis e disjuntores . . . . .	20
19	Relé fotoeletrônico instalado na luminária . . . . .	20
20	Características das luminárias LED por padrões de instalações . . . . .	21
21	Poste metálico para iluminação sem a tampa da janela de inspeção . . . . .	22
22	Poste metálico para iluminação com cabos elétricos de interligação expostos .	23
23	Poste metálico para iluminação com cabos em contato com o solo . . . . .	24
24	Horizontes de solo estratificado . . . . .	26
25	Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solos . . . . .	27
26	Relação entre umidade e resistividade . . . . .	27
27	Relação entre concentração percentual de sal e resistividade . . . . .	28
28	Relação entre temperatura e resistividade . . . . .	29
29	Relação entre estratificação e resistividade . . . . .	29
30	Método dos quatro eletrodos . . . . .	31
31	Método de Wenner . . . . .	31

32	Número mínimo de linhas de medição . . . . .	32
33	Curvas típicas de solos de duas camadas . . . . .	34
34	Curva $M_{(a=h)}$ versus $K_R$ . . . . .	35
35	Curva de resistividade aparente . . . . .	36
36	Símbolos dos condutores presentes nos esquemas de aterramento . . . . .	38
37	Esquema de aterramento TN-S . . . . .	38
38	Esquema de aterramento TN-C . . . . .	39
39	Esquema de aterramento TN-C-S . . . . .	39
40	Percurso da corrente de falta fase-massa em um esquema TN . . . . .	40
41	Esquema de aterramento TT . . . . .	42
42	Esquemas de aterramento IT . . . . .	43
43	Seção mínima para condutores de proteção . . . . .	44
44	Haste metálica cravada verticalmente ao solo . . . . .	45
45	Configurações típicas de hastes verticais associadas . . . . .	46
46	Efeitos da resistência aterramento em função do raio do eletrodo . . . . .	47
47	Efeitos da resistência aterramento em função do aumento do comprimento do eletrodo . . . . .	48
48	Resistência de aterramento em solos tratados e não tratados em função do tempo	49
49	Comportamento da resistência de aterramento com acréscimo de eletrodos em paralelo . . . . .	49
50	Corrente de largar de longa duração . . . . .	50
51	Tensão de passo . . . . .	52
52	Tensão de Toque . . . . .	53
53	Resistividade de materiais da camada superficial . . . . .	55
54	Método da queda de potencial aplicado a uma malha de aterramento . . . . .	56
55	Curva característica da resistência de aterramento . . . . .	57
56	Método da queda de potencial aplicado ao poste metálico . . . . .	58
57	Grupos de medições do método da queda de potencial aplicado ao poste metálico	58
58	Conexão entre terrômetro e poste metálico . . . . .	59
59	Materiais e equipamentos utilizados na medição de resistência . . . . .	60
60	Local de medição . . . . .	60
61	Resistência medida em função da distância entre eletrodos . . . . .	61
62	Curva característica de resistência do poste metálico para iluminação . . . . .	61
63	Kit limitador de corrente em funcionamento . . . . .	62
64	Circuito equivalente do Kit limitador de corrente . . . . .	63



65	Circuito equivalente do Kit limitador de corrente com poste metálico . . . . .	63
66	Medição da tensão de toque no poste metálico de iluminação . . . . .	64
67	Tensão de toque medida no poste . . . . .	64
68	Medição da tensão de passo no solo circunvizinho ao poste energizado . . . . .	65
69	Relação entre tensão de passo e corrente aplicada ao poste metálico . . . . .	66
70	Percurso da corrente de falta aplicada ao poste . . . . .	67
71	Circuito equivalente de falta fase-massa no poste com aterramento no esquema TT . . . . .	67
72	Curva de tensão de toque para poste com esquema de aterramento TT . . . . .	68
73	Corrente de choque para poste com esquema de aterramento TT . . . . .	69
74	Corrente de falta sem que ocorra desarme do disjuntor . . . . .	70
75	Valores máximos de resistência de aterramento em função da corrente de atuação do DR . . . . .	70
76	Quadro de comando com barramento de equipotencialização . . . . .	72
77	Parâmetros das hastes de aterramento . . . . .	73
78	Resistência de aterramento com configuração das hastes em triângulo e em paralelo . . . . .	73
79	Sistema de iluminação pública multi-aterrado com esquema TN-C-S . . . . .	75
80	Tensão de toque no sistema multi-aterrado com esquema TN-C-S . . . . .	76
81	Resistências presentes no percurso da corrente de falta ( $\Omega$ ) . . . . .	77
82	Corrente de choque elétrico no sistema multi-aterrado com esquema TN-C-S . . . . .	77
83	Circuito equivalente do sistema multi-aterrado com esquema TN-C-S . . . . .	78
84	Tensão de toque em poste TN-C-S multiaterrado em relação a seção do condutor de proteção . . . . .	79
85	Curva característica do disjuntor de 40A curva C . . . . .	80

**NOTA:** Todas as figuras não referenciadas são de autoria própria.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas

ABRACOPEL - Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade

CEB - Companhia energética de Brasília

DDP - Diferença de potencial

FAI - Falha de isolamento de alta impedância

HID - High Intensity Discharge

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LED - Diodo Emissor de Luz

NBR - Normas Brasileiras

NTD - Norma Técnica de Distribuição

UnB - Universidade de Brasília

# 1 INTRODUÇÃO

Os desenvolvimentos históricos, sociais e políticos são fortemente influenciados pela percepção visual humana. A descoberta do fogo, como fonte de energia conscientemente controlada, proporcionou o calor para aprimoramento dos costumes alimentares e a luz como auxílio de mobilidade noturna e proteção dos povos primitivos. Estudos indicam que os estímulos dos seres humanos são 75% visuais, reforçando a importância da corrida histórica das transformações dos meios de prover luz artificial, iniciados na pré história [1].

Com o surgimento das primeiras civilizações, as tochas foram substituídas por lâmpadas de argila ou metal com um compartimento para o combustível, proveniente de óleos animais e vegetais e o pavio para queima e produção de luz [2].

O conceito de iluminação pública, como serviço destinado a fornecer luz ou claridade artificial aos locais públicos no período noturno, tem como provável origem a Inglaterra no ano de 1415 para oferecer segurança aos comerciantes devido a ocorrência de crimes [3; 4]. Contudo, a Revolução Industrial foi a responsável pelo crescimento populacional urbano que impulsionou, em 1790, o avanço da iluminação dentro dos lares e a expansão da iluminação pública baseada na queima de gases. A demanda por esta tecnologia alavancou o surgimento da empresa The Gas Light and Coke Company em 1812, com objetivo de abastecer Londres com carvão natural e operar as primeiras usinas públicas de gás do mundo [2].

No Brasil, a origem da iluminação pública teve início em 1794 quando a cidade do Rio de Janeiro recebeu cerca de 100 postes com luminárias a óleo de azeite como substituição das luminárias fixadas nas ombreiras das residências e oratórios [4]. A transição para as luminárias a gás só ocorreu em 1854 com a criação da Companhia de Iluminação e a instalação de 637 postes e luminárias espaçadas entre 33 e 44 metros [2].

À medida que o sistema de luz artificial a gás se difundia pelas ruas do mundo, a ciência moderna vivia o marco da guerra das correntes. De um lado Thomas Edison, empreendedor e defensor da corrente contínua, de outro, Nikola Tesla, cientista empenhado em demonstrar as vantagens da corrente alternada. Após diversos experimentos e difamações, Tesla provou o melhor custo e benefício do sistema de corrente alternada após iluminar a Exposição Mundial da Columbia em 1893 [5].

Com a corrente alternada como padrão de transmissão de energia, o sistema a gás foi substituído pela eletricidade. O padrão das lâmpadas elétricas em todo o mundo foi sofrendo alterações tecnológicas, desde lâmpadas a arco voltaico, incandescentes, de alta pressão (HID) até as lâmpadas de LED em atual ascensão.

Diante das transformações das tecnologias e o crescimento das cidades, a iluminação pública além de oferecer segurança, também gera o embelezamento das áreas urbanas e aproveitamento dos espaços de lazer. No entanto, existem perigos associados a equipamentos elétricos dispostos em locais com fluxo de pessoas. Segundo a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (Abracopel), no Anuário estatístico sobre acidentes de origem elétrica de 2020, com ano base de 2019, as mortes por choque elétrico em áreas urbanas como postes, ruas e avenidas totalizaram 54 vítimas, representando 7,8% das mortes causadas por choques elétricos. A percentagem se destaca em terceiro lugar, atrás apenas das mortes em rede aérea de distribuição e residências [6].

No último ano, no Distrito Federal, a cidade de Taguatinga registrou o caso de um jovem de 18 anos que faleceu eletrocutado ao tocar no alambrado de uma quadra de esportes no dia 12 de Junho de 2019. Imagens gravadas por testemunhas evidenciam o contato de um poste de iluminação com o alambrado [7]. Outro caso ocorreu na região cidade de Samambaia no dia 12 de Janeiro de 2020, no qual uma criança de 9 anos sofreu um descarga elétrica ao encostar em poste metálico de iluminação. Vizinhos relatam que foi possível realizar a ligação de uma lâmpada ao gerar contato entre o poste e a grade do portão ao lado [8].

Diante da importância da iluminação artificial na qualidade de vida e dos números consideráveis de mortes e acidentes em áreas urbanas brasileiras, torna-se indispensável o estudo sobre as causas destas fatalidades, as possibilidades de redução dos perigos e a garantia de segurança contra choques elétricos.

## **1.1 Objetivo**

Este estudo tem como objetivo analisar a situação atual das instalações elétricas de postes metálicos de iluminação pública e propor soluções técnicas por meio de sistemas de aterramento que garantam a segurança dos usuários contra choques elétricos.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é composto por 7 capítulos. O capítulo 2 apresenta o conceito de choque elétrico, sua causas e possibilidades de proteção.

No capítulo 3, são analisadas a normalização dos postes metálicos e as situações das instalações elétricas.

A estruturação teórica dos sistemas de aterramento, abordando definições e características são detalhadas no capítulo 4.

O capítulo 5 retrata um ensaio de medição da resistência de aterramento dos postes metálicos de iluminação para embasar a proposta de um modelo de aterramento.

O capítulo 6 traz as propostas de proteção para garantir a segurança das pessoas contra choques elétricos.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as considerações finais sobre o cenário atual, a projeção no que tange a segurança contra choques elétricos em postes metálicos e trabalhos futuros.

## 2 CHOQUES ELÉTRICOS

### 2.1 Conceituação

Os organismos vivos possuem atividades biológicas originadas de impulsos de correntes elétricas, resultante de uma diferença de potencial entre as membranas de todas as células do corpo. Por exemplo, o coração humano, responsável por bombear sangue, é composto por um gerador elétrico, denominado de Nódulo Sino Atrial que, quimicamente, processa íons de Sódio ( $Na^+$ ) e Potássio ( $K^+$ ) alternando e emitindo pulso elétrico [9].

O choque elétrico, entendido como a passagem de uma corrente elétrica através de um organismo vivo, modifica de forma não controlada, os impulsos fisiológicos internos, deixando o sistema biológico propenso a alterações das funções vitais, causando desde sensação de formigamento até paradas cardíacas e respiratórias.

O choque pode ocorrer pelo contato direto, por meio do toque em partes naturalmente energizadas de um circuito (fios, cabos e componentes eletrônicos) ou por contato indireto, diante do toque em massas acidentalmente energizadas (elemento/parte condutiva) devido a falha de conexão e isolamento.

Tanto no contato direto como no contato indireto há uma diferença de potencial (DDP) entre a parte elétrica e a vítima. A DDP pode surgir por falha de isolamento de alta impedância (FAI) que gera a corrente de fuga ou falha por baixa impedância que é o curto circuito [10].

### 2.2 Tipos de choques elétricos

O Choque elétrico pode ser de três tipos:

- Estático
- Dinâmico
- Atmosférico

O choque estático é proveniente do efeito capacitivo (armazenamento de cargas) e, conseqüentemente, do escoamento de cargas para uma região de menor potencial através de um organismo vivo [11]. Neste caso, conforme a equação 1, a corrente decai exponencialmente com a constante de tempo do circuito.

$$v_{(t)} = v_0 * e^{\left(\frac{-t}{C * R}\right)} \quad (1)$$

Onde:

$v_0$ : Tensão inicial acumulada no capacitor (V);

$v(t)$ : Tensão de choque elétrico (V)

$C$ : Capacitância (F);

$t$ : Tempo (s);

O choque Dinâmico ocorre pelo contato direto com elemento energizado da rede elétrica, que é mantido energizado até que ocorra a abertura do circuito [11].

O choque Atmosférico é oriundo das descargas atmosféricas proveniente das regiões eletricamente carregadas entre nuvens ou entre nuvens e terra [11]. Em termos gerais, este também é um choque estático proporcionado por um enorme capacitor natural tendo o ar como dielétrico.

## **2.3 Reações fisiológicas decorrentes do choque elétrico**

### **2.3.1 Contrações musculares e Tetanização**

Os músculos do corpo humano sofrem contrações naturais devido aos impulsos elétricos comandados pelo sistema nervoso central por meio dos neurônios sensoriais até as fibras musculares, gerando potenciais eletroquímicos que causam a movimentação muscular [9].

Quando uma corrente elétrica externa percorre os músculos, as contrações se tornam intensas, involuntárias e descontroladas. Com a interrupção da corrente, os músculos tendem a voltar ao estado natural, entretanto quando a contração devido ao choque elétrico causa a paralisação muscular, o efeito é denominado de Tetanização [11].

### **2.3.2 Queimaduras e Necrose dos tecidos**

O Efeito Joule, calor produzido com a passagem da corrente elétrica, é responsável pelas danos aos tecidos do corpo humano causando queimaduras. O grau da queimadura depende do tempo e da densidade de corrente; quanto menor a área de contato, maior é a densidade de corrente e mais graves serão as consequências do choque elétrico [10].

A necrose, como consequência da queimadura, é caracterizada pela morte de um grupo de células em um organismo vivo [10].

### 2.3.3 Fibrilação ventricular

A fibrilação ventricular é caracterizada pelo movimento rápido e desordenado das fibras musculares do coração. Nesta reação fisiológica, o órgão perde a capacidade de circular o sangue causando parada respiratória, danos nas células cerebrais e parada cardíaca [11]. O fenômeno pode ser causado por doença cardíaca, doença circulatória ou choque elétrico.

A intensidade de corrente elétrica que causa fibrilação ventricular é referência para projetos de proteção contra choques elétricos devido ao alto grau de fatalidade.

### 2.3.4 Parada cardíaca e respiratória

A parada cardíaca pode ser consequência da fibrilação ventricular ou da tetanização dos músculos do coração. A reação é caracterizada pela incapacidade do coração em bombear sangue, acarretando perda da consciência, falta de ar e de pressão arterial [11].

De forma análoga a parada cardíaca, a parada respiratória devido ao choque elétrico pode ocorrer como consequência da fibrilação ventricular ou como tetanização do diafragma, músculo responsável por auxiliar os movimentos de inspiração e de expiração [11].

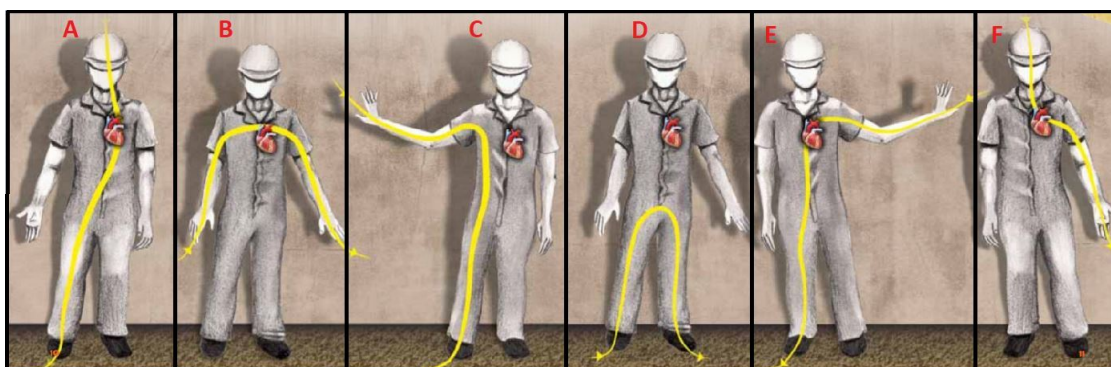
Em ambos os casos, os primeiros socorros devem ser realizado de imediato, por meio de massagem cardíaca e respiração artificial.

## 2.4 Fatores influentes nos danos fisiológicos causados por choque elétrico

### 2.4.1 Trajeto da corrente no corpo

O percurso da corrente diferencia o choque elétrico entre micro choque, em que a corrente ocorre apenas no interior do corpo devido a defeitos em equipamentos medico-hospitalares e o macro choque em que a corrente entra pela pele, percorre o corpo e sai através da pele, seguindo diferentes trajetos como mostrado na Figura 1 [12].

**Figura 1:** Percurso do Macro-choque [12]





Em função da composição biológica das partes do corpo, a resistência elétrica é diferente em cada região, acarretando diferentes densidades de cargas, isto é, uma distribuição diferenciada da corrente, ao qual é denominado espriamento. Contudo, a maior probabilidade de fibrilação ventricular será no percurso A, em que 9,7% da corrente circula pelo coração. Nos trajetos C e D, o coração não faz parte do caminho da corrente [11].

#### 2.4.2 Espécie, intensidade e frequência da corrente do choque elétrico

A corrente mínima que causa um estímulo percebido pelo cérebro é dita como limiar de percepção. Durante o choque elétrico, a intensidade de corrente entre a percepção e a resposta muscular de soltar o objeto energizado é denominada de corrente de largar. Em oposição, a corrente de não largar é o limite mínimo da corrente que acarreta perda total do comando cerebral, ou seja, a impossibilidade de soltar o condutor energizado.

As reações fisiológicas devido a intensidade são vinculadas a espécie da corrente. A Figura 2 apresenta os distúrbios relacionados a corrente alternada senoidal (CA) e corrente contínua (CC).

**Figura 2:** Reações fisiológicas de acordo com a espécie e intensidade da corrente elétrica no corpo humano [11]

I (mA)		Reação fisiológica
CA	CC	
< 25	< 80	- Sensação de formigamento - Contração muscular
25 a 80	80 a 300	- Contrações violentas - Asfixia
> 80	> 300	- Asfixia imediata - Fibrilação ventricular - Alterações musculares - Queimaduras
Corrente da ordem de ampéres		- Queimaduras - Necrose dos tecidos - Fibrilação ventricular - Asfixia imediata

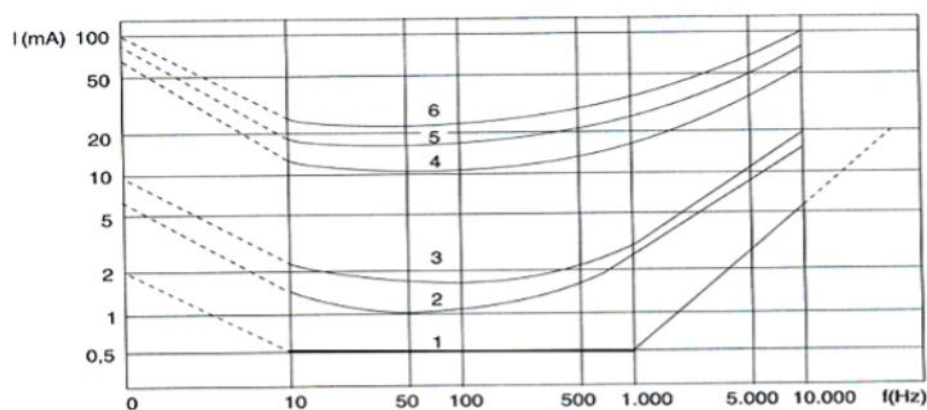
A corrente alternada induz reações fisiológicas mais graves para uma menor magnitude de corrente. Por exemplo, a fibrilação ventricular, pode ocorrer para um corrente alternada

maior que 80 mA enquanto esta mesma reação é provável de acontecer para correntes contínuas maiores que 300 mA. Essa distinção é significativa devido a utilização abrangente de tensão alternada em casas, comércios, indústrias e áreas públicas.

Para corrente alternada em altas frequências as cargas elétricas tendem a fluir na superfície dos condutores causando o denominado Efeito Pelicular. No corpo humano, esse fenômeno físico causa um fluxo de corrente na derme, sem que esta afete os órgãos internos e por consequência, os danos fisiológicos do choque elétrico diminuem com o aumento da frequência. Entretanto, a redução da área de condução acarreta uma elevação na resistência elétrica de modo a aumentar o aquecimento que tende a gerar queimaduras no corpo [13].

A Figura 3 mostra os limites de percepção da contração muscular em função da intensidade e frequência da corrente alternada senoidal.

**Figura 3:** Relação entre corrente elétrica e frequência para uma mesma contração muscular [14]



Sendo:

Curva 1: Limite da corrente elétrica que não provoca nenhuma percepção.

Curva 2: Início da percepção em 50% das pessoas.

Curva 3: Início da percepção para 99,5% das pessoas.

Curva 4: Corrente de largar para 99,5% das pessoas.

Curva 5: Corrente de largar para 50% das pessoas.

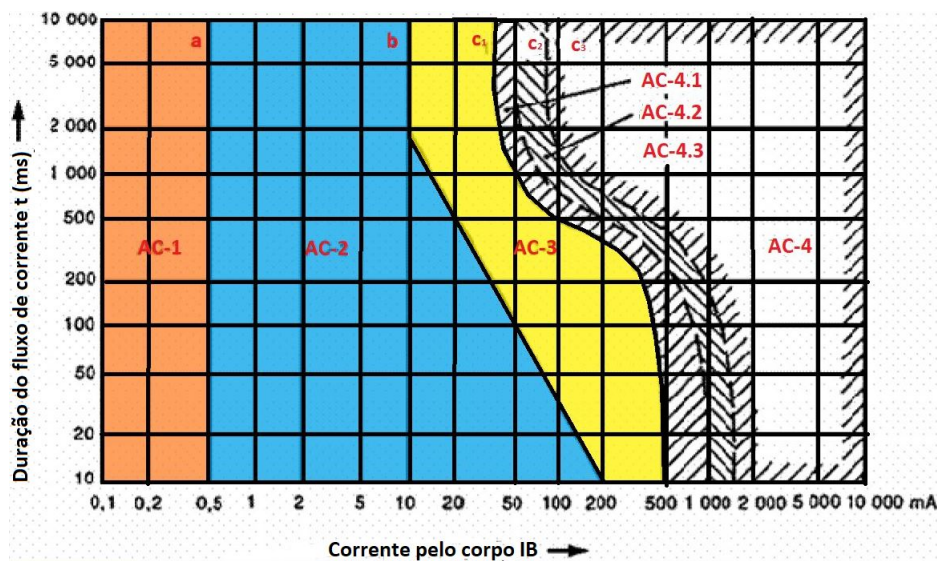
Curva 6: Corrente de não largar para 99,5% das pessoas.

Analisando as curvas pode-se concluir que para frequências entre 50 e 100 Hz a intensidade de corrente para o limite de cada sensação é menor do que para outras faixas de frequências, ressaltando os perigos associados ao padrão de frequência de 50 ou 60Hz do sistema elétrico.

### 2.4.3 Tempo de duração do contato

O tempo em que a corrente atravessa o corpo caracteriza as reações fisiológicas decorrentes do choque elétrico. A Figura 4 traz a relação entre a corrente alternada com frequências entre 15 e 100Hz e a duração do fluxo de corrente para o percurso entre as mãos e os pés.

**Figura 4:** Relação entre intensidade e duração do fluxo corrente alternada entre mãos e pés do corpo humano [15]



**Zona AC-1:** Até curva a.

- No geral não provoca nenhuma reação.
- Área abaixo do limiar de percepção.

**Zona AC-2:** Entre curva a e curva b.

- Prováveis contrações musculares involuntárias.
- Nenhum efeito fisiológico perigoso.

**Área AC-3:** Entre curva b e curva c.

- Fortes contrações musculares involuntárias.
- Dificuldades respiratórias.
- Perturbações reversíveis das funções cardíacas

**Zona AC-4:** Após curva  $c_1$ .

- Efeitos patológicos com alto nível de gravidade dependendo da duração e intensidade da corrente.
- Riscos de paradas cardíacas e respiratórias.
- Queimaduras.

**Zona AC-4.1:** Entre curva  $c_1$  e curva  $c_2$ .

- A probabilidade de fibrilação ventricular de até aproximadamente 5%.

**Zona AC-4.2:** Entre curva  $c_2$  e curva  $c_3$ .

- Probabilidade de até 50% de ocorrer fibrilação ventricular.

**Zona AC-4.3:** Após curva  $c_3$ .

- Probabilidade de mais de 50% causar fibrilação ventricular.

Diate das zonas apresentadas observa-se que para corrente maiores que 0,5mA quanto maior o tempo de contato, mais graves serão as consequências do choque elétrico no corpo humano.

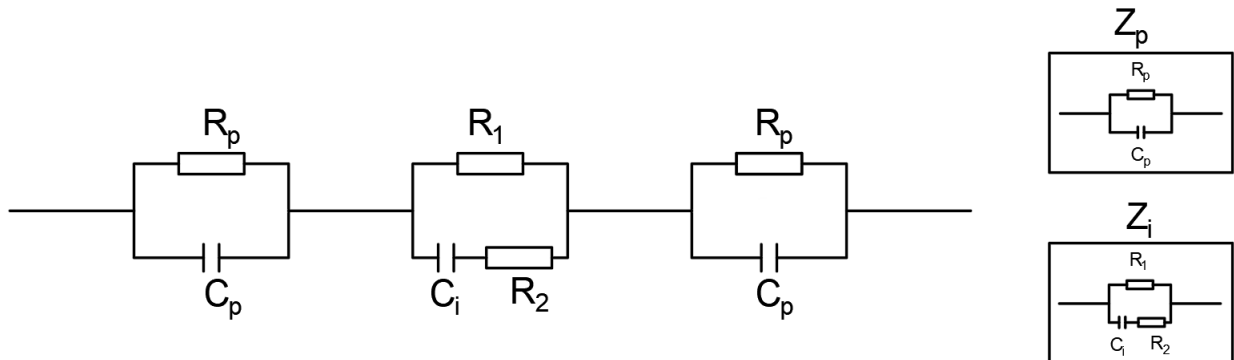
## 2.5 Resistência do corpo humano

O corpo humano é uma massa eletrolítica, constituída de órgãos presos por músculos fixados na estrutura óssea e envoltos pela pele [11]. Como apresentado na Figura 1, a corrente de choque, que percorre o corpo advinda do ambiente externo, realiza entrada e saída por meio da pele, traçando o caminho pela parte interna do corpo.

A pele é composta pela epiderme, constituída de glândulas e pelos, e a derme de vasos e nervos. Devido a composição estrutural, esses tecidos são ditos, respectivamente, mau condutor e bom condutor para altas frequências resultando em uma estrutura composta de camadas semicondutoras [11].

Contudo, o circuito equivalente para a impedância total do corpo humano é dado pela impedância interna do corpo e da pele, como representado pela Figura 5.

**Figura 5:** Circuito equivalente para impedância do corpo humano [16]



Onde:

$Z_p$ : Impedância da pele ( $\Omega$ );

$Z_i$ : Impedância interna do corpo ( $\Omega$ );

$R_p$ : Resistência da pele ( $\Omega$ );

$C_p$ : Capacitância da pele (F);

$R_1$ : Resistência interna do corpo ( $\Omega$ );

$C_i$ : Capacitância interna do corpo (F);

A condição da pele humana é um fator limitante para a corrente de choque. A NBR 5410:2004 classifica a pele humana em relação ao grau de umidade, conforme Figura 6.

**Figura 6:** Classificação de umidade da pele humana [17]

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BB1	Alta	Condições secas	Circunstâncias nas quais a pele está seca (nenhuma umidade, inclusive suor)
BB2	Normal	Condições úmidas	Passagem da corrente elétrica de uma mão à outra ou de uma mão a um pé, com a pele úmida de suor, sendo a superfície de contato significativa.
BB3	Fraca	Condições molhadas	Passagem da corrente elétrica entre as duas mãos e os dois pés, estando as pessoas com os pés molhados ao ponto de se poder desprezar a resistência da pele e dos pés.
BB4	Muito fraca	Condições imersas	Pessoas imersas na água, por exemplo em banheiras e piscinas.

Na Figura 7, são apresentadas as resistências e corrente de choque no corpo humano em função do grau de umidade e da tensões aplicadas.

**Figura 7:** Resistência do corpo humano por classificação de condição da pele [11]

Tensões de choque (V)	BB1		BB2		BB3		BB4	
	R ( $\Omega$ )	I (mA)	R ( $\Omega$ )	I (mA)	R ( $\Omega$ )	I (mA)	R ( $\Omega$ )	I (mA)
10	6500	1,6	3200	3	1200	8	500	20
25	5000	5	2500	10	1000	25	400	50
50	4000	12	2000	25	875	57	300	165
100	2200	45	1500	70	730	140	260	307
250	1000	230	1000	230	650	500	200	1000

Analisando a Figura 7 é possível observar que para diferentes condições da pele a resistência do corpo diminui a medida que a umidade aumenta. Para uma mesma condição de umidade, é possível notar que a elevação da tensão de choque causa uma diminuição da resistência do corpo humano e conseqüentemente o aumento na corrente, agravando o risco das reações fisiológicas expostas na Figura 2.

De modo geral, se a pele estiver em condições imersas, a resistência entre mão e pés, conforme Figura 1B, será em torno de 5 a 13 vezes menor do que se a pele estiver em condições secas.

Este trabalho irá considerar a situação padrão como a pele em condições úmidas (BB2) e uma tensão de choque de 250V, isto é, a resistência do corpo será tida como 1000  $\Omega$ .

## 2.6 Proteção contra choques elétricos

### 2.6.1 Categorias de proteções

As proteções contra choques elétricos podem ser divididas em três categorias [17], são elas:

- Proteção básica: Meio cujo objetivo é impedir o contato direto com partes energizadas em condições normais, como barreiras, obstáculos e isolamento dos condutores.
- Proteção supletiva: Meio destinado a garantir a proteção quando massas ou partes condutivas se tornam acidentalmente energizadas. O seccionamento automático da alimentação é a principal medida de proteção supletiva contra contato indireto.

- Proteção adicional: Aplicada em situações com alto risco em que as medidas normalmente aplicadas são difíceis de serem atendidas. A equipotencialização suplementar é um exemplo de proteção adicional [17].

## **2.6.2 Dispositivos de manobra, proteção e comando**

- **Dispositivo diferencial residual (DR)**

Os dispositivos DR atuam por meio da detecção da soma fasorial aproximadamente não nula das correntes que percorrem os condutores vivos de um circuito, isto é, dado uma fuga de corrente o dispositivo irá interromper a alimentação do circuito. Para a detecção da corrente diferencial residual, o dispositivo deve envolver a fase e o neutro da instalação. O DR é considerado o dispositivo mais eficiente na proteção das pessoas contra choques elétricos[10].

- **Disjuntores de baixa tensão**

Os disjuntores são dispositivos de manobra e proteção que têm por função promover a proteção dos circuitos, comandar circuitos ou equipamentos e promover o seccionamento dos circuitos. Para baixas tensões os disjuntores mais comuns são os termomagnéticos que atuam na a proteção contra sobrecorrentes pequenas através de disparadores térmicos e contra sobrecorrentes elevadas, por meio dos disparadores magnéticos [10]. As faixas de atuação dos disjuntores em curto circuito são divididas em três:

- Curva B: Atuam de forma instantânea do disparador entre 3 e 5 vezes a corrente nominal. Não indicado para equipamentos com altas correntes de partida ou correntes transitória [10].
- Curva C: Atuação instantânea para correntes entre 5 a 10 vezes a corrente nominal. Indicados para circuitos elétricos em geral [10].
- Curva D: Atuação instantânea para correntes entre 10 a 20 vezes a corrente nominal [10].

As faixas de atuação de maneira mais precisa são encontradas nas curvas características tempo-corrente definidas por cada fabricante.

De modo geral, os disjuntores não asseguram a proteção contra choques elétricos e faltas de baixa intensidade. Apenas em situações específicas, respeitando as condições impostas pela NBR 5410:2004, é permitida a utilização de disjuntores contra contatos indiretos em instalações com esquema de aterramento TN, que serão apresentadas no capítulo 4.

### 3 CONCEITOS E CARACTERIZAÇÕES DOS ELEMENTOS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Este capítulo apresenta conceitos teóricos sobre postes metálicos, quadros de comando, relé fotoeletrônico e luminárias para iluminação pública especificados pela Norma Brasileira - NBR 14744:2001 e pela Norma técnica de distribuição - NTD 3.09:2013 da Companhia Energética de Brasília (CEB).

O levantamento técnico sobre postes trazem respaldo teórico para analisar a segurança contra choques elétricos em vias públicas.

#### 3.1 Postes metálicos

##### 3.1.1 Formato e material metálico

Define-se como poste para iluminação a estrutura capaz de suportar uma ou mais luminárias podendo ser constituído de partes como coluna, braço e/ou ponteira. A coluna é o elemento de eixo reto e vertical, o braço tem como objetivo suportar a luminária a uma distância do eixo da coluna e a ponteira é a união da extremidade da coluna e do braço [18; 19].

Quando o poste é composto apenas pela coluna mantendo o eixo vertical, classifica-se como poste reto. Se a estrutura é constituída por coluna, braço e ponteira, causando um desvio na direção do eixo, denomina-se como poste curvo [18; 19].

As colunas e os braços devem ser fabricados em aço carbono SAE 1010 a 1020, composto de carbono, fósforo, enxofre e grandes quantidades de manganês [20]. A espessura da chapa de aço varia conforme altura útil do poste, atendendo a relação presente na Figura 8

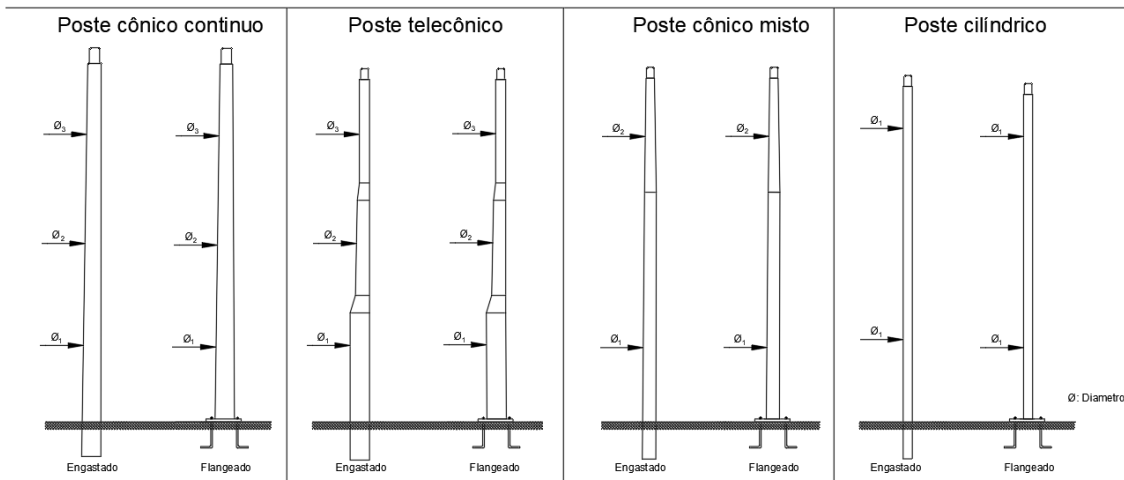
**Figura 8:** Espessura das chapas de aço para fabricação dos postes retos e curvos [18]

Altura útil (m)	5,0	7,5	9,6	10	12	13,8	20,1
Espessura mínima (mm)	2,65	3		3,35		6,3	

Os postes para iluminação pública podem apresentar diversos formatos, de acordo com a configuração geométrica da coluna, como na Figura 9.



**Figura 9:** Formatos dos postes para iluminação pública [19]



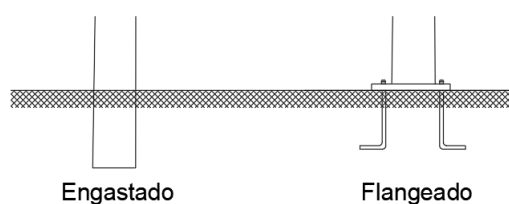
- **Cônico contínuo** - Formato de um tronco-cônico da base ao topo seção circular ou poligonal, isento de emenda e seção na coluna.
- **Telecônico** - Formato cilíndrico com diâmetros que diminuem em direção ao topo.
- **Cônico misto** - Conjunto de formato tronco-cônico e cilíndrico.
- **Cilíndrico** - Formato cilíndrico da base ao topo

No geral, as colunas devem possuir o formato cônico contínuo, exceto em casos especiais especificados em projeto [18].

### 3.1.2 Altura e fixação ao solo

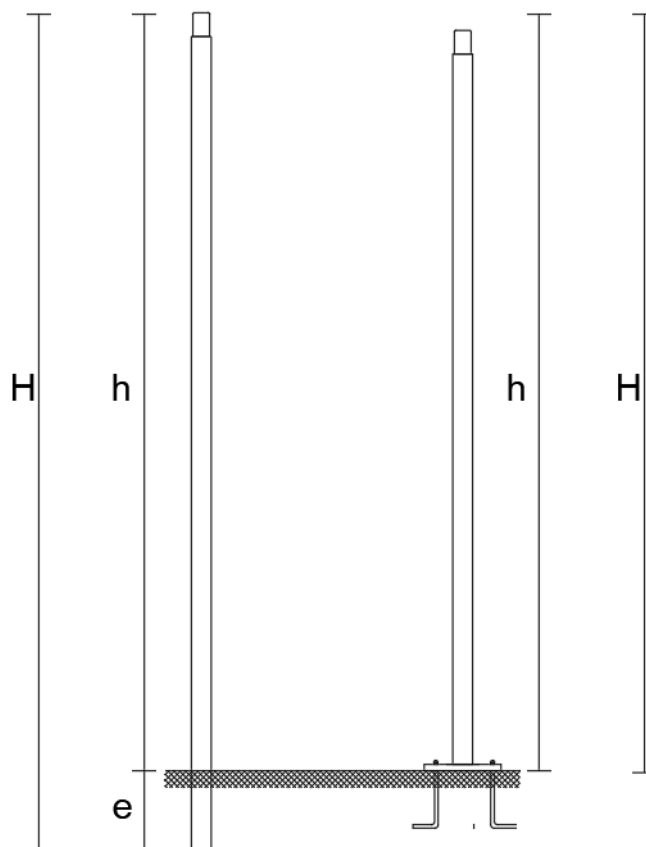
A fixação do poste pode ser realizada de duas formas distintas, a primeira através do engastamento ao solo ou a estrutura, denominado de poste engastado, e a segunda através de parafusos e/ou chumbadores ao qual e denominado de poste flangeado, como se observa na Figura 10.

**Figura 10:** Tipos de fixação de poste ao solo [18]



A altura de um poste pode ser dividida em duas categorias. A altura total ( $H$ ) é dita como a distância entre o topo e a base enquanto a altura útil ( $h$ ) é caracterizada pela distância entre o topo e a superfície do solo.

**Figura 11:** Altura útil e altura total [18]



Onde:

$H$ : altura total;

$h$ : altura útil;

$e$ : Profundidade de engastamento;

Para postes flangeados a altura total é igual a altura útil. No poste engastado a altura total é a soma entre a altura útil ( $h$ ) e o comprimento do engastamento ( $e$ ).

A dimensão mínima da profundidade do engastamento depende da altura útil ( $h$ ) do poste podendo variar para estruturas até 20,1m de altura, conforme Figura 12 [18].

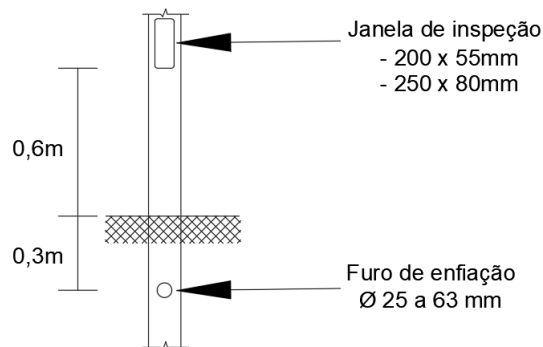
**Figura 12:** Comprimento do engastamento em função da altura útil do poste [18]

<b>Altura útil (m)</b>	5,0	7,5	9,6	10	12	13,8	20,1
<b>e (m)</b>	1,0	1,4	1,5		2,2		2,9

### 3.1.3 Furo de enfição e janela de inspeção

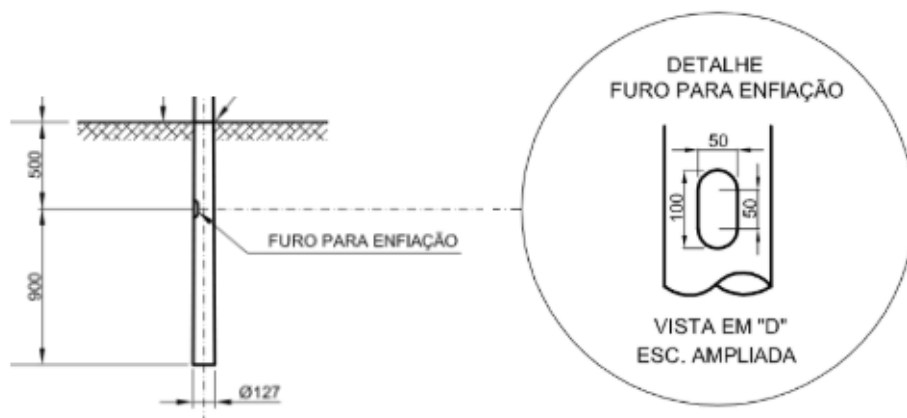
A NBR 14744:2001 prevê que o furo de enfição deve situar-se a 0,3m do solo com diâmetro de 25 a 63 mm, enquanto a janela de inspeção, conforme a Figura 13, deve ter início em 0,6m do solo com dimensões de 200 x 55mm ou 250 x 80mm.

**Figura 13:** Janela de inspeção e furo de enfição [19]



A NTD 3.09:2013 define que o furo para enfição, conforme figura 14, deve situar-se a 0,5m abaixo do solo, possuir formato oblongo com dimensões de 100 x 50 mm e não possuir janela de inspeção.

**Figura 14:** Detalhe do furo de enfição [18]



### 3.2 Cabos de energia e eletrodutos

O poste deve contemplar os condutores de alimentação elétrica posicionados no interior da estrutura até atingir as luminárias. Os cabos de energia devem ser multipolar, possuir isolamento PVC ou HEPR e classe de tensão 0,6/1kV [18].

Os condutores de alimentação são enterrados ao solo sem o uso de eletrodutos, exceto em casos que não é possível alterar a superfície, como por exemplo, condutores sob ruas asfaltadas e jardins.

Os eletrodutos destinados ao revestimento e condução dos cabos elétricos devem ser fabricados em aço e possuir seção circular com rosca em ambas extremidades com características de diâmetro, espessura e comprimento descritos na Figura 15 [19].

**Figura 15:** Característica dos eletrodutos de aço [18]

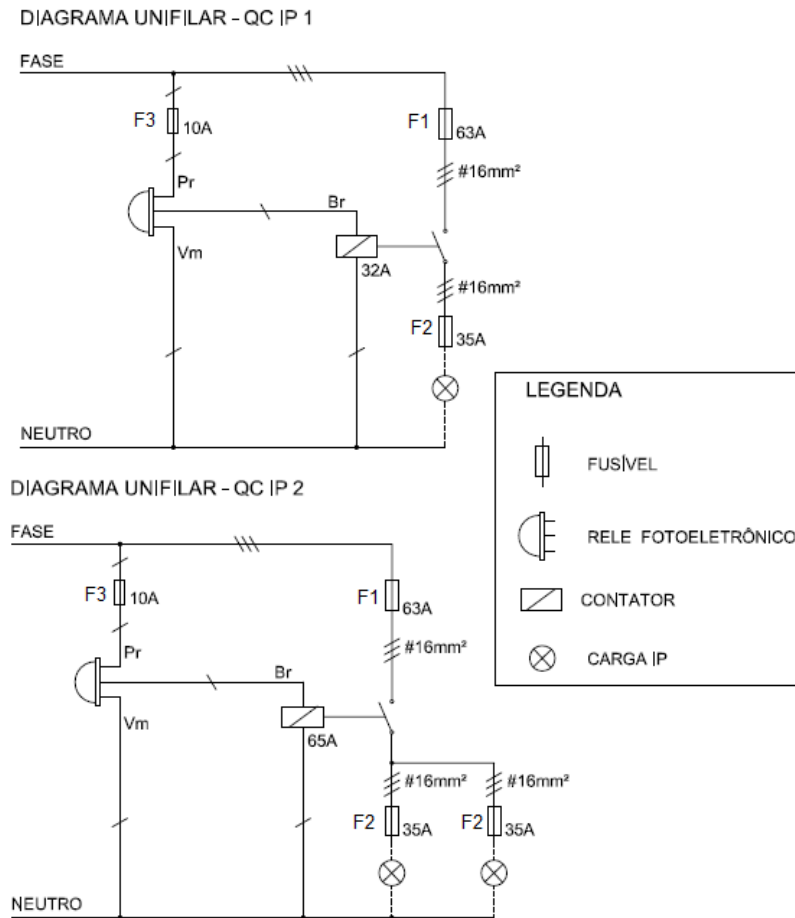
Diâmetro nominal (DN)	Referência da rosca (pol.)	Diâmetro externo (mm)	Espessura da parede (mm)	Comprimento (mm)
50	2"	60,3	3,35	3000

### 3.3 Quadros de comando

Os circuitos que alimentam as luminárias devem ser providos de equipamentos de seccionamentos instalados em quadro de comando. Os quadros devem possuir fusíveis nos circuitos de entrada, saída e comando, assim como contator com condutor de cobre devidamente dimensionado na entrada e na saída de acordo com o tipo de quadro [18].

Os tipos de quadro, tido por IP0, IP1, IP2, IP3, IP4 e IP5, são definidos de acordo com o tamanho da caixa e capacidade dos equipamentos de proteção e condução. Como exemplo, os diagramas unifilares dos quadros IP1 e IP2 estão representados na Figura 16.

**Figura 16:** Diagrama unifilar dos quadros de comando IP1 e IP2 [18]



Na Figura 17, os valores mínimos associados aos elementos de composição do quadro de comando são apresentados.

**Figura 17:** Principais componentes do quadro de IP [18]

Tipo de quadro	Proteção (A)			Contator (A)	Condutor (mm <sup>2</sup> )	
	F1	F2	F3		Entrada Contator	Saída Contator
IP-0	63	25	10	25	10	10
IP-1	63	35	10	32	16	16
IP-2	63	35	10	65	16	16
IP-3	80	35	10	80	35	16
IP-4	100	35	10	95	35	16

Os fusíveis dos quadros de comando devem ser do tipo D (diazed) ou substituídos por disjuntores termomagnéticos monopolares de caixa moldada com capacidade de interrupção

mínima de 4,5kA no sistema de distribuição aéreo. Os valores de corrente nominal associados a estes componentes estão descritos na Figura 18 [18].

**Figura 18:** Correntes nominais de fusíveis e disjuntores [18]

Fusível (A)	10	25	35	63	80	100
Disjuntor (A)	10	32	40	80	100	100

Na prática, os quadros de comando instalados pela CEB utilizam disjuntores termomagnéticos monopolares de caixa moldada com curva de atuação C.

### 3.4 Relé fotoeletrônico

O Relé fotoeletrônico, dos diagramas unifilares da Figura 19, é um dispositivo que comanda uma carga pela variação do fluxo luminoso incidente em seu sensor [21]. O relé pode ser instalado por comando em grupo, preso ao quadro de comando, comutando o circuito para um conjunto de luminárias ou operando de modo individual, como na Figura 19, comutando o circuito apenas para a luminária no qual ele está instalado.

**Figura 19:** Relé fotoeletrônico instalado na luminária



A ligação em grupo tem sido cada vez menos utilizada nas instalações pois dado um defeito no relé, um grupo de luminárias ficará desligado causando a falta de iluminação e consequentemente insegurança em toda via pública ao qual estão instaladas. Enquanto na ligação individual, caso o relé falhe, apenas uma luminária será afetada.

Entretanto, na ligação individual o circuito é seccionado próximo a luminária, resultando em cabos energizados em toda a coluna do poste independente do estado da luminária. Contudo, o risco de energização do poste por cabos danificados está presente em qualquer momento do dia.

### 3.5 Luminárias

A atual ascensão da tecnologia LED impacta fortemente a iluminação pública. A eficiência energética associada a longa vida útil e baixo custo de manutenção têm sido o atrativo para o aumento da demanda de luminárias LED. No Distrito Federal, de acordo com a Companhia Energética de Brasília, foram substituídas 5360 luminárias de vapor de sódio por LED, no primeiro semestre de 2019 [22].

As luminárias LED instaladas na rede de iluminação pública com tensão nominal de 127VAC a 220VAC, 60Hz deverão ter fator de potência mínimo de 0,92 e possuir dispositivo protetor de surto de tensão classe II [21; 23]. A Figura 20 indica as especificações exigidas para cada padrão de instalação.

**Figura 20:** Características das luminárias LED por padrões de instalações [23]

Potência máxima (W)	Largura da via (m)	Altura útil (m)	Distância entre postes (m)	Ângulo (°)	Avanço (m)
60	6	5	20	25	0
80	7	7,5	30	18	1
120	7	8	40	15	1,3
120	8	7,5	30	18	1
120	11	8	40	15	1,3
160	11	8	40	15	1,3
200	11	10	35	12	1
240	11	10	35	12	1
280	11	13,8	40	18	-0,5
280	11	10	35	12	1
325	11	13,8	40	18	-0,5

As especificações padrões são definidas de modo a manter uma iluminação eficiente nas vias, isto é, proporcionar visibilidade adequada em função da largura das vias, altura de

montagem, ângulo, potência e distância transversal entre o meio fio e a projeção do centro de luz aparente da luminária.

### 3.6 Situação dos postes metálicos

A falta de manutenção regular, associada ao vandalismo e a degradação natural dos postes produzem situações de risco de choque elétrico a seres humanos e animais. Os casos mais perceptíveis, coletados por observações nos logradouros de Brasília, são os de falta de isolamento das partes vivas das instalações elétricas dos postes. Na figura 21 é apresentado o caso em que os cabos estão sendo expostos devido a perda da tampa da janela de inspeção.

**Figura 21:** Poste metálico para iluminação sem a tampa da janela de inspeção



Nessa situação, além do risco de choque através da energização do poste pela fase, ainda existe o risco de, principalmente crianças e animais, tocarem diretamente na fase do circuito de alimentação da luminária.

A interligação elétrica entre o quadro de comando e os postes também pode apresentar risco. Na figura 22, é possível observar parte dos cabos que não estão enterrados.



**Figura 22:** Poste metálico para iluminação com cabos elétricos de interligação expostos



Casos como estes são mais comuns nos meses de chuva intensa que acaba por mover a terra. Inicialmente a isolação dos cabos funciona como proteção básica mas a circulação de pessoas pelo local pode ocasionar alguma ruptura e conseqüentemente o choque elétrico.

Assim com a Figura 21, a Figura 23, apresenta um poste sem a tampa da janela de inspeção. De forma análoga, esta situação apresenta risco de contato direto com a fase, de contato indireto com o poste energizado acrescentando um maior risco de tensão de passo devido ao condutor em contato com a terra da proximidade.

**Figura 23:** Poste metálico para iluminação com cabos em contato com o solo



Mesmo quando a situação não é visível, postes em locais de fluxo de público podem oferecer riscos. A falha na isolação dos cabos de alimentação além da janela de inspeção e luminárias quebradas podem energizar qualquer parte da coluna e braço.

O contato direto da fase com a estrutura metálica pode proporcionar altas correntes de modo que o dispositivo de sobrecorrente desarme. Entretanto, casos em que a fase encosta ocasionalmente no poste, devido a vento e/ou chuva, pode não sensibilizar o dispositivo de sobrecorrente devido a baixa intensidade ou curto tempo de fuga da corrente.

## 4 CONFIGURAÇÕES E CONCEITUAÇÃO DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Aterramento elétrico consiste na ligação intencional de um sistema eletricamente condutivo à terra, através de condutores elétricos, com a finalidade de garantir a segurança dos usuários, proteção e desempenho dos equipamentos [24; 16]. O sistema de aterramento pode ser definido como funcional, quando a ligação à terra consiste em proporcionar o funcionamento correto, seguro e confiável da instalação ou aterramento de proteção quando o objetivo é a proteção contra choques elétricos. O sistema funcional e de proteção é denominado sistema de aterramento combinado [10].

A conexão com a terra apresenta impedância com componentes resistivas, capacitivas e indutivas. No entanto, para correntes e frequências baixas, a impedância se comporta praticamente como uma resistência linear.

Um sistema de aterramento, dado pelo conjunto de eletrodos, condutores de aterramento e partes metálicas, interligados ou não entre si é eficiente quando possui configuração que possibilite o controle do gradiente de potencial e baixa resistência, de modo a proporcionar o caminho mais viável para o escoamento de correntes de falta, descargas atmosféricas e cargas estáticas [24; 25].

A oposição a passagem de corrente elétrica pode ser definida em função das resistências dos eletrodos, que possuem valores reduzidos devido a alta condutividade dos materiais metálicos empregados, da resistência de contato entre o eletrodo e a terra, sendo desprezível dada a ausência de coberturas isolantes, e da resistência do solo ao redor dos eletrodos de aterramento [16]. Deste modo, a resistência de terra circunvizinha ao sistema de aterramento depende da resistividade do solo, distribuição da corrente e geometria dos eletrodos.

### 4.1 Resistividade dos solos

A resistividade do solo ( $\rho$ ) pode ser definida como a oposição ao fluxo de corrente elétrica medida entre as faces opostas de um cubo com aresta de 1m e área de 1m<sup>2</sup> preenchido com solo [16].

$$\rho = R * \frac{A}{L} \Omega.m \quad (2)$$

Onde,

$\rho$  : Resistividade solo ( $\Omega.m$ )

$R$  : Resistência elétrica ( $\Omega$ )

$A$  : Área da faces do cubo ( $m^2$ )

$L$  : Aresta do cubo (m)

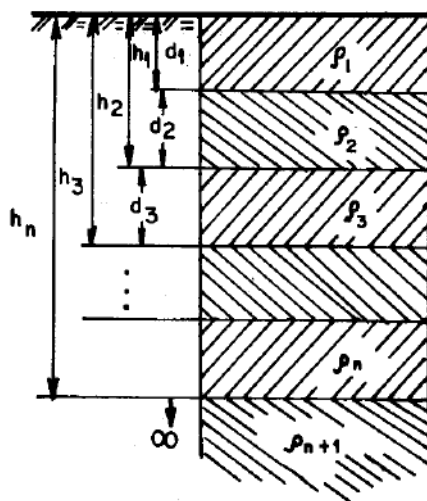
A resistividade do solo varia de acordo com o ambiente e com os horizontes em função de fatores como: tipo de solo, umidade, concentração de sais, compactidade, granulometria, temperatura e estrutura geológica [16].

#### 4.1.1 Tipo de solo

O intemperismo é o processo físico e químico que as rochas sofrem na superfície da Terra, devido às interações com a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera. O clima, o relevo, a fauna, a flora, a rocha parental e o tempo podem ser entendidos como variáveis do processo de modificação da crosta terrestre, que tem como resultado as rochas alteradas e o solo.

O solo pode ser dividido em diversas camadas, devido a características morfológicas e atributos físicos, químicos e mineralógicos, ao qual são chamadas de horizontes, mostrado na figura 24.

Figura 24: Horizontes de solo estratificado [25]



Os solos são sistemas heterogêneos com horizontes de difíceis definições. Com isso, determina-se faixas de valores característicos para cada tipo de solo conforme Figura 25.

**Figura 25:** Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solos [26]

Tipo de solos	Ra( $\Omega.m$ )
Água do mar	menor que 10
Húmus	10 a 150
Argilas	300 a 5000
Calcário	500 a 5000
Areia	1000 a 8000
Granito	1500 a 10000

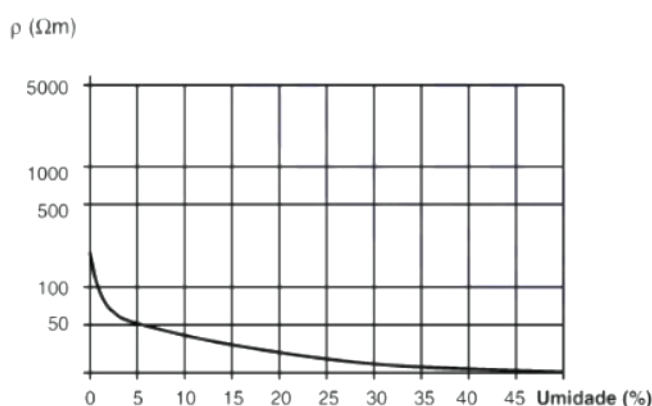
A região Centro-Oeste do Brasil, principalmente o Distrito Federal, apresenta solos com comportamento laterítico finos argiloso [27]. De acordo com a Figura 25, a resistividade elétrica de solos argilosos está entre 300 a 5000 $\Omega.m$ .

#### 4.1.2 Umidade do solo

Em baixas frequências, a água e os sais existentes no solo fornecem íons que possibilitam a condução por meio de eletrólise. Portanto, a resistividade não se limita apenas a quantidade de água presente no solo mas na quantidade de sais dissolvidos [16].

A resistividade possui maior variação para valores de umidade entre 5% e 25% apontando uma tendência de decréscimo a medida que ocorre o aumento da umidade, conforme figura 26. Em estado natural raramente os solos possuem umidade maior que 40% [16].

**Figura 26:** Relação entre umidade e resistividade [26]

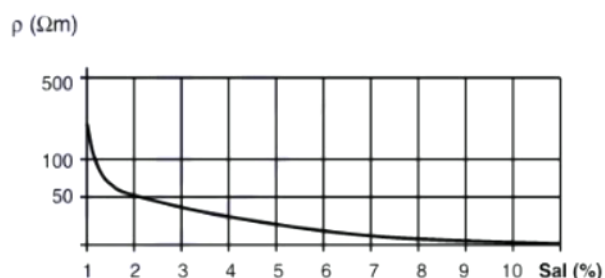


### 4.1.3 Concentração e tipos de sais dissolvidos na água

A quantidade e os tipos de sais influenciam diretamente no mecanismo eletrolítico. Determinados sais são mais propícios a liberação de íons devido as suas características químicas [25; 16].

A resistividade possui grande variação para concentração de sal em torno de 2% a 8%, apresentada na Figura 27. A partir desta faixa de valores o aumento de sal tem pouco efeito na resistividade.

**Figura 27:** Relação entre concentração percentual de sal e resistividade [26]



### 4.1.4 Compacidade do solo

Os solos são sistemas granulares com variações na distribuição de suas partículas de diversos tamanhos. Contudo, a proporção de sólidos contidos em um volume de material granuloso determinará a continuidade física e conseqüentemente a resistividade. Quanto maior a compacidade menor a resistividade [16].

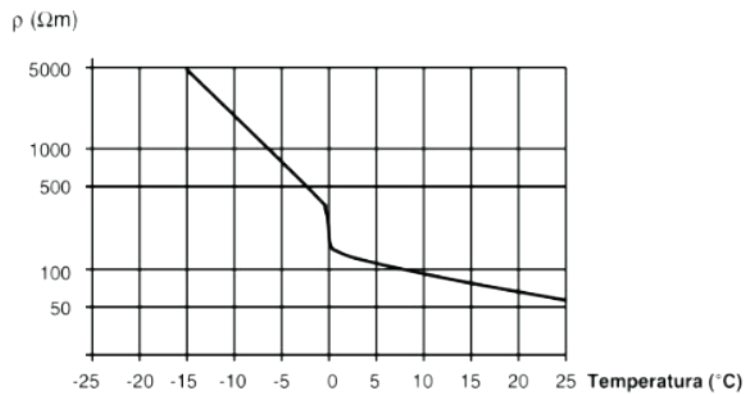
### 4.1.5 Granulometria do solo

A presença de grãos influenciam tanto na compacidade do solo quanto na retenção de água nos horizontes. Quanto maior o grão menor a capacidade de reter água e maior a resistividade [16].

### 4.1.6 Temperatura do solo

O aumento da temperatura causa evaporação da água diminuindo a umidade e aumentando a resistividade. Por outro lado, a baixa temperatura conduz a água ao estado sólido, dificultando a movimentação iônica e, conseqüentemente, elevando a resistividade. A relação entre resistividade e temperatura é apresentada na Figura 28.

**Figura 28:** Relação entre temperatura e resistividade [26]

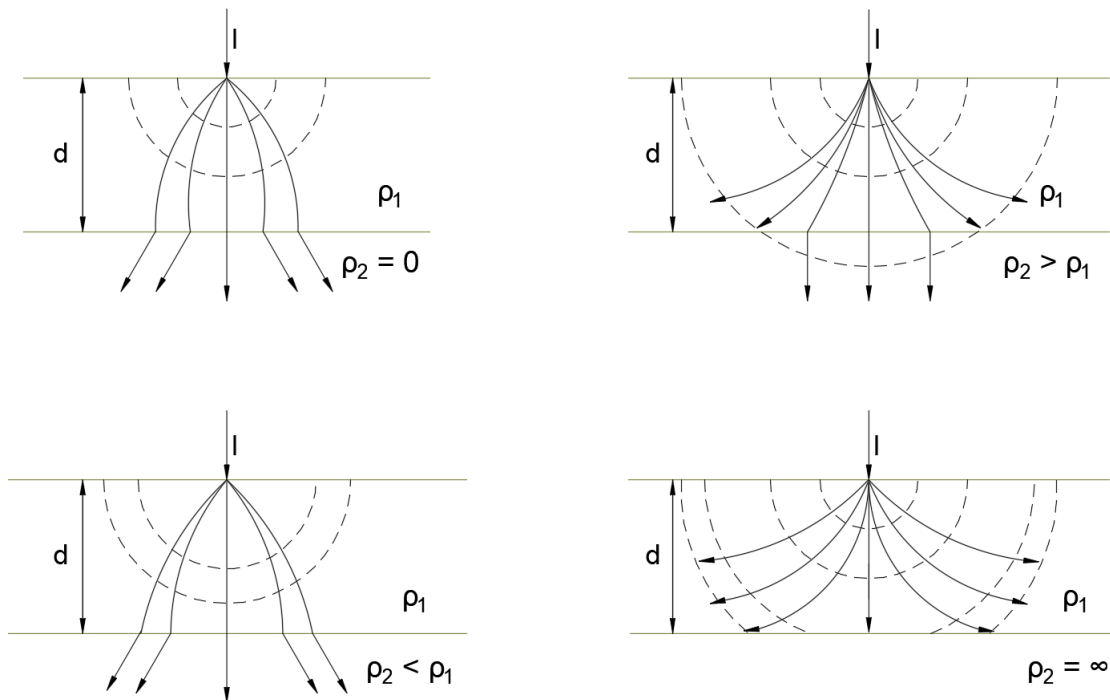


#### 4.1.7 Estratificação

As formações geológicas, no geral, causam as estratificações dos solos e determinam que solos mais antigos possuem menor resistividade devido a alta compactidade adquirida durante os anos[25; 16].

Com a variação da resistividade em função dos horizontes, a corrente aplicada em torno de um aterramento possui um fluxo de dispersão característico, como demonstrado na Figura 29.

**Figura 29:** Relação entre estratificação e resistividade [25]



Onde:

I: corrente (A);

$\rho_1$ : Resistividade da primeira camada ( $\Omega.m$ );

$\rho_2$ : Resistividade da segunda camada ( $\Omega.m$ );

d: Profundidade da primeira camada (m);

As linhas pontilhadas são as superfícies equipotenciais enquanto as linhas cheias são as correntes elétricas fluindo no solo.

Devido a variação da resistividade proveniente das diversas camadas que constituem o solo, define-se que a resistividade média é o valor representativo das características do solo proveniente de medições de resistividade do solo para uma profundidade determinada [26].

#### **4.1.8 Método de Wenner**

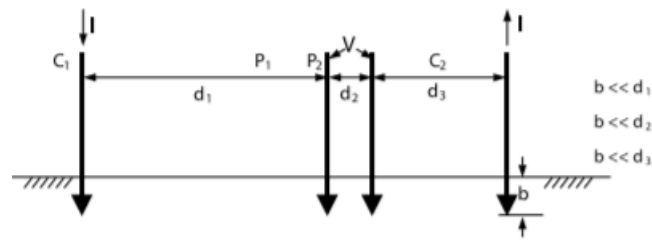
As medições de resistividade podem ser realizadas através de diversas metodologias descritas na NBR 7117 - Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, são elas:

- 1) Amostragem física do solo;
- 2) Método da variação de profundidade;
- 3) Método dos dois eletrodos;
- 4) Métodos dos quatro eletrodos, com seguintes arranjos:
  - a) Arranjo do eletrodo central;
  - b) Arranjo de Lee;
  - c) Arranjo de Wenner;
  - d) Arranjo Schlumberger-Palmer;

O método dos quatro eletrodos é o mais utilizado para medição de resistividade média de grandes volumes de terra, representado pela Figura 30. O método, de forma geral, consiste em cravar ao solo 4 estacas metálicas em linha reta, com espaçamentos variados aplicando uma corrente de ensaio nos dois eletrodos das extremidades e realizando a medição da diferença de potencial nos dois eletrodos internos [26].



**Figura 30:** Método dos quatro eletrodos [26]

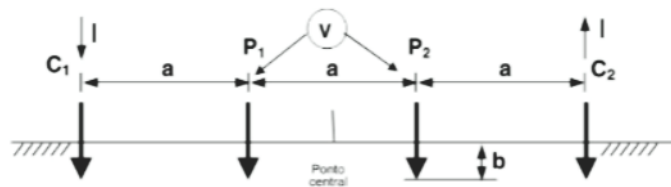


Onde:

- I - Corrente entre os eletrodos de corrente C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>;
- V - Diferença de potencial entre os eletrodos P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>;
- d<sub>1</sub> - Distância entre os eletrodos C<sub>1</sub> e P<sub>1</sub>;
- d<sub>2</sub> - Distância entre os eletrodos P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>;
- d<sub>3</sub> - Distância entre os eletrodos C<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>;
- b - Profundidade de cravação dos eletrodos.

O método de Wenner, embasado no método geral, define que os eletrodos são igualmente espaçados, ou seja,  $d_1 = d_2 = d_3 = a$ .

**Figura 31:** Método de Wenner [26]



Fonte: ABNT NBR 7117:2012

A resistividade é obtida em função da distância entre os eletrodos adjacentes, a profundidade de cravação (b) e a relação entre corrente aplicada e tensão obtida.

$$K = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (3)$$

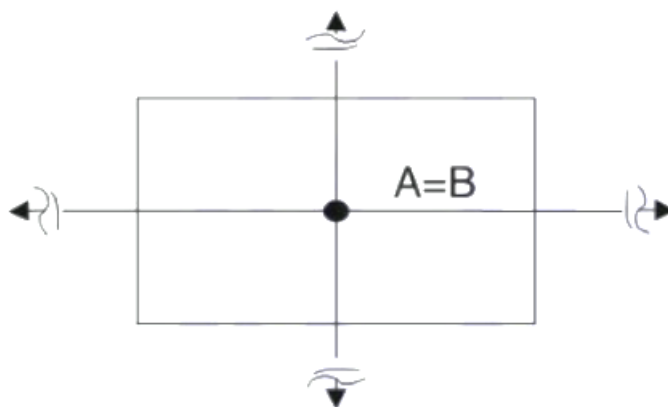
$$\rho(a) = KR \quad (4)$$

O método considera que 58% da distribuição de corrente que passa entre as hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes. Portanto, considera-se

que o valor da resistência elétrica lida no aparelho é relativa a uma profundidade "b" do solo [25].

Para obter resultados apurados é necessário realizar um conjunto de leituras variando o espaçamento (a) entre as hastes em relação a geometria das áreas e características locais. A NBR 7117 estabelece que para terrenos com área menor que 1000 m<sup>2</sup> são necessárias no mínimo 2 linhas de medição, mostrado pela Figura 32.

**Figura 32:** Número mínimo de linhas de medição [26]



Na realização das medições de resistividade do solo deve-se considerar as características estruturais do solo assim como a sazonalidade climática. Como a temperatura e a umidade são variáveis que afetam diretamente os valores de resistividade é imprescindível que as aplicações dos métodos sejam realizadas com fatores críticos, isto é, períodos de máxima seca e altas temperaturas.

A validade dos resultados obtidos se dá através da análise do desvio padrão. O cálculo da média aritmética dos valores de resistividade elétrica para cada espaçamento é dado pela seguinte equação:

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad (5)$$

$$\forall j = 1, q$$

$$\forall i = 1, n$$

Onde:

$\rho_M(a_j)$ - Resistividade média para o respectivo espaçamento  $a_j$ ;

n - Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento  $a_j$ ;

$\rho(a_j)$  - Valor da i-ésima medição da resistividade com espaçamento  $a_j$ ;

q = Número de espaçamentos empregados;

Procedendo o cálculo do desvio de cada medida em relação ao valor médio como segue:

$$\frac{\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)}{\rho_M(a_j)} * 100 \quad (6)$$

Se o valor de resistividade tiver o desvio abaixo de 50% o valor será aceito como representativo. Se o desvio for maior que 50% deve-se descartar o dado e realizar a média sem os valores descartados [25].

#### 4.1.9 Procedimentos de estratificação do solo

A modelagem do solo em camadas estratificadas é de extrema importância para desenvolvimento dos sistemas de aterramento, tendo em vista que os valores das resistividades dos solos são parâmetros básicos para determinações dos potenciais de passo e toque [26].

Diante dos dados das resistividades medidas em função dos espaçamentos por meio do método de Wenner, o procedimentos de estratificação é contemplado por diversos métodos, entre os quais:

1. Método de estratificação de duas camadas:
  - a) Método de duas camadas usando curvas;
  - b) Método de duas camadas usando técnicas de otimização;
  - c) Método simplificado para estratificação do solo de duas camadas;
2. Método de Pirson;
3. Método gráfico;

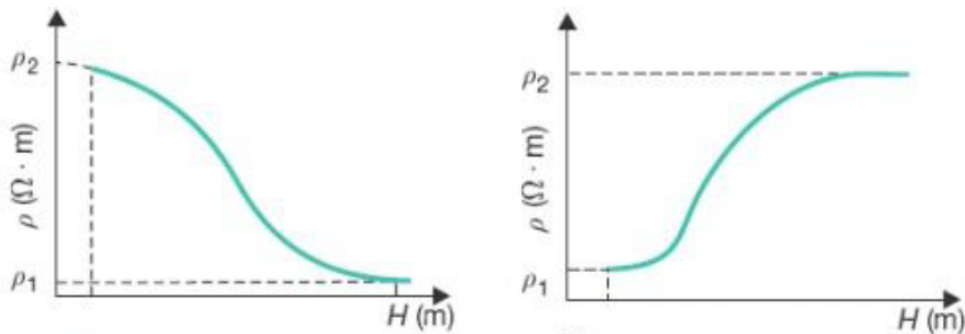
A escolha do método depende da finalidade da medição. Para o desenvolvimento de grandes subestações são indicados os métodos mais precisos, que com o auxílio de programas computacionais resultam na estratificação do solo em várias camadas. Entretanto o método simplificado para estratificação do solo em duas camadas, embora menos complexo, oferece resultados satisfatórios.

- **Método simplificado para estratificação do solo em duas camadas**

O método simplificado pode ser aplicado em 7 passos, como segue.

**1º passo:** Traçar a curva entre resistividade medida  $\rho(a)$  e validada, usando método de Wenner em função dos espaçamentos(a). As aparências típicas resultantes são apresentadas na figura 33.

**Figura 33:** Curvas típicas de solos de duas camadas [26]



Observa-se a tendência de saturação assintótica a medida que espaçamentos maiores são aplicados, representando a penetração da corrente na segunda camada [25].

**2º passo:** Prolongar a curva  $\rho(a)$  x a, até interceptar o eixo das ordenadas. O valor da intersecção é tido como o valor da resistividade da primeira camada do solo ( $\rho_1$ ) [26].

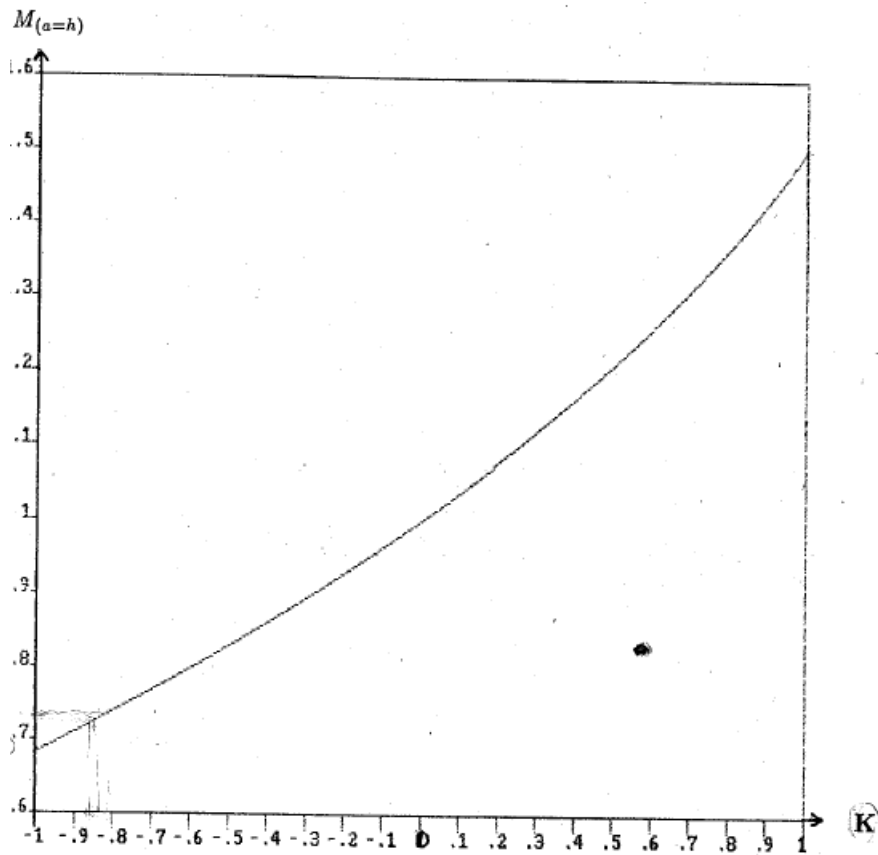
**3º passo:** Traçar a assíntota no final da curva e prolongá-la até o eixo das ordenadas. O valor da intersecção será a resistividade da segunda camada ( $\rho_2$ ).

**4º passo:** Calcular o coeficiente de reflexão  $K_r$ , dado por:

$$K_r = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (7)$$

**5º passo:** Na curva da Figura 34, determinar o valor de  $M_{a=h}$  em função do  $K_r$  calculado.

**Figura 34:** Curva  $M_{(a=h)}$  versus  $K_r$  [25]



**6º passo:** Calcular  $\rho_{(a=h)}$ , dado na Equação 8.

$$\rho_{(a=h)} = \rho_1 * M_{(a=h)} \quad (8)$$

**7º passo:** Com o valor  $\rho_{(a=h)}$ , voltar na curva  $\rho(a)$  x  $a$  e determinar a profundidade  $h$  da primeira camada do solo em que  $h=a$ .

#### 4.1.10 Resistividade aparente

A resistividade aparente, valor utilizado para cálculo da resistência de aterramento, é definida como a resistividade vista por um sistema de aterramento, considerando a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas [25; 26].

O coeficiente de penetração ( $\alpha$ ) indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente, conforme equação 9.

$$\alpha = \frac{r}{h} \quad (9)$$

Onde:

$r$ : Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado;

$h$ : Profundidade da primeira camada;

O raio do anel equivalente para hastes alinhadas e igualmente espaçadas é dada por:

$$r = \frac{(n-1)}{2} * e \quad (10)$$

Onde:

$n$ : Número de hastes cravadas verticalmente no solo;

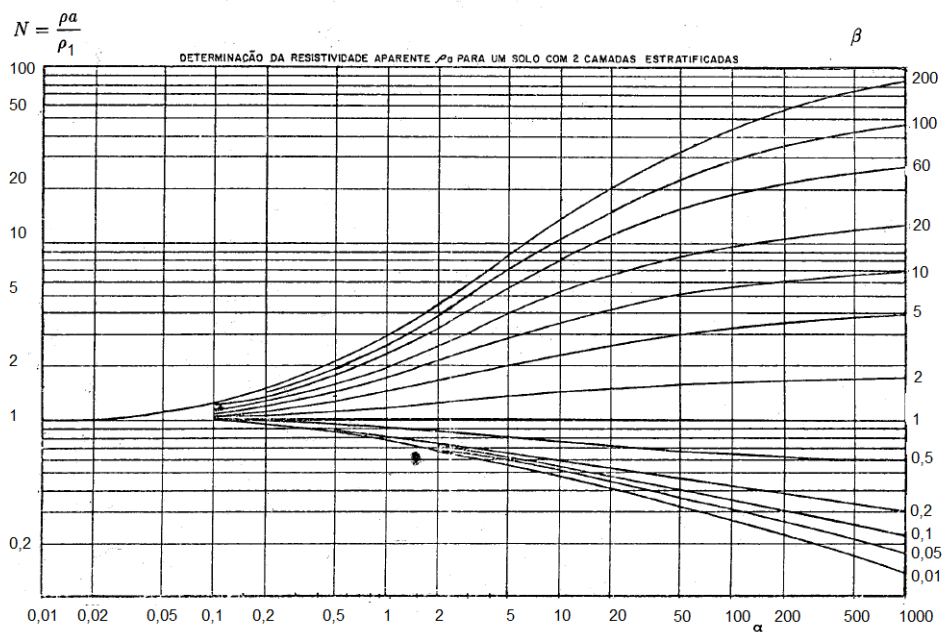
$e$ : Espaçamento entre as hastes;

O coeficiente de divergência ( $\beta$ ) é definido pela relação entre a resistividade da segunda e da primeira camada, como na equação 11.

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (11)$$

A curva da Figura 35 expressa  $N$  em função do coeficiente de penetração ( $\alpha$ ) presente no eixo das abscissas e do coeficiente de divergência ( $\beta$ ) como a curva correspondente ao calculado.

**Figura 35:** Curva de resistividade aparente [25]



Por fim, a resistividade aparente( $\rho_a$ ) é dada por:

$$\rho_a = N * \rho_1 \quad (12)$$

Tendo em vista a impossibilidade de aplicação do método de Wenner nas regiões citadas por este trabalho, considera-se que pelas características de solo apresentadas para o a região central do Brasil e levando em consideração que os valores de resistividade do solo variam de acordo com os parâmetros apresentados, optou-se por considerar que a resistividade aparente do solo é 1000  $\Omega$ .m. Por simplificação, as resistividade aparente ( $\rho_a$ ) apresentada nos próximos capítulos será dita como resistividade do solo ( $\rho$ ).

## 4.2 Esquemas de aterramento

A NBR 5410/2004 define equipotencialização e proteção por seccionamento automático da alimentação como a principal medida de proteção contra choques elétricos [17]. Essa medida de proteção se baseia na utilização de dispositivos apropriados e na existência de percurso para corrente de falta, através da ligação de todas as massas da instalação em um sistema de aterramento [10].

O modo como as massas e a alimentação são conectadas ao sistema de aterramento definem os diversos tipos de esquema de aterramento com objetivo de delimitar o percurso das correntes de falta. O esquema de aterramento adequado depende de fatores intrínsecos a instalação, como tipo de alimentação, equipamentos utilizados, natureza dos locais e continuidade da alimentação [10]

Os esquemas de aterramento funcional e de proteção designados pela NBR 5410/2004 seguem a seguinte simbologia:

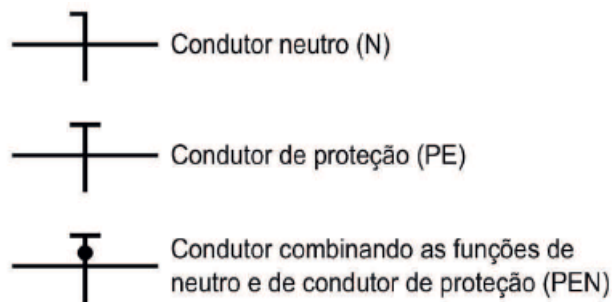
- Primeira letra - Indica a situação da alimentação em relação ao terra:
  - T** - Um ponto diretamente aterrado;
  - I** - Nenhum ponto aterrado ou aterramento de um ponto por meio de impedâncias;
- Segunda letra - Indica a situação das massas da instalação elétrica em relação à terra:
  - T** - Massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto da alimentação;
  - N** - Massas ligadas ao ponto da alimentação aterrado;
- Outras letras: Indicam a forma do aterramento da massa e na situação de utilização do aterramento da fonte de alimentação:

S - Funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos;

C - Funções de neutro e de proteção comum a um condutor (PEN).

Nos esquemas apresentados abaixo, serão utilizados os símbolos dos condutores de neutro (N), proteção (PE) e associação entre neutro e proteção (PEN), conforme Figura 36.

**Figura 36:** Símbolos dos condutores presentes nos esquemas de aterramento [17]



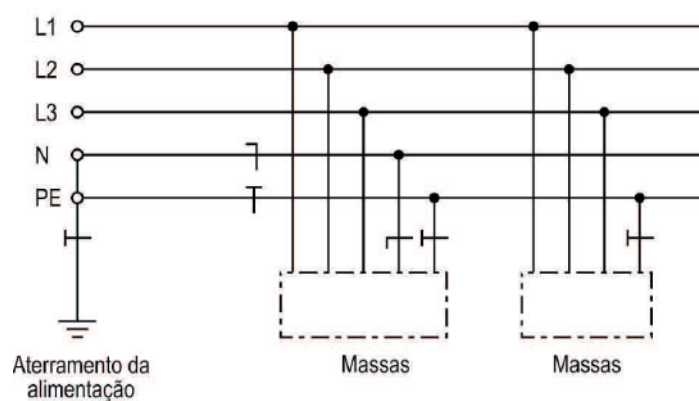
#### 4.2.1 Esquema TN

O esquema TN possui um ponto de alimentação diretamente aterrado com as massas ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção. Em uma situação de falta fase-massa, a baixa impedância dos elementos metálicos como fios, cabos e barramentos presentes no circuito fará com que a corrente de falta seja uma corrente de curto-circuito [17; 10].

A disposição do condutor neutro e do condutor de proteção divide o esquema TN em TN-S, TN-C e TN-C-S.

- Esquema TN-S: Condutores neutro e de proteção são aterrados na alimentação e separados em toda a extensão do circuito, conforme Figura 37;

**Figura 37:** Esquema de aterramento TN-S [17]

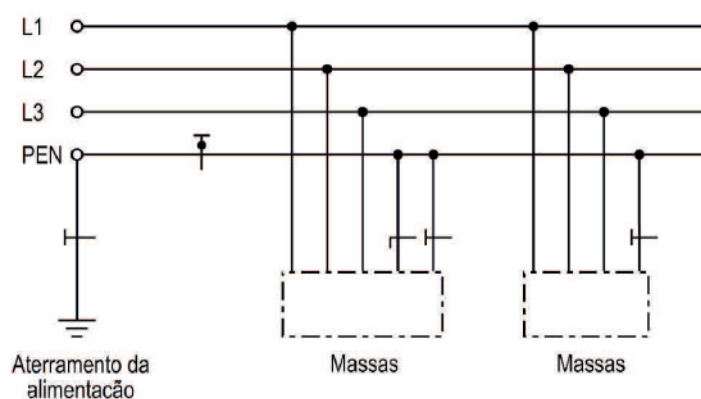




Para o esquema TN-S é permitido o uso de dispositivos DR e não existem restrições relacionadas as dimensões dos condutores e característica de mobilidade das massas.

- Esquema TN-C: Combinação entre as funções de neutro e proteção em um único condutor, na totalidade do esquema. O esquema TN-C é apresentado na Figura 38

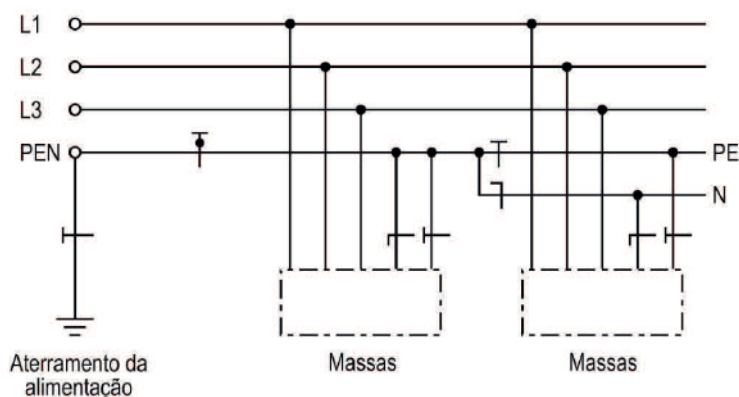
**Figura 38:** Esquema de aterramento TN-C [17]



O esquema TN-C só é admissível em instalações fixas com a utilização de condutores de seção mínima de 10 mm<sup>2</sup> em cobre, e 16 mm<sup>2</sup> em alumínio. É vedado o uso de dispositivos DR, devido ao funcionamento inadequado causado pelas características de instalação.

- Esquema TN-C-S: Combinação entre as funções de neutro e proteção em um único condutor em parte da instalação e separados em outra parte, como mostrado na Figura 39.

**Figura 39:** Esquema de aterramento TN-C-S [17]

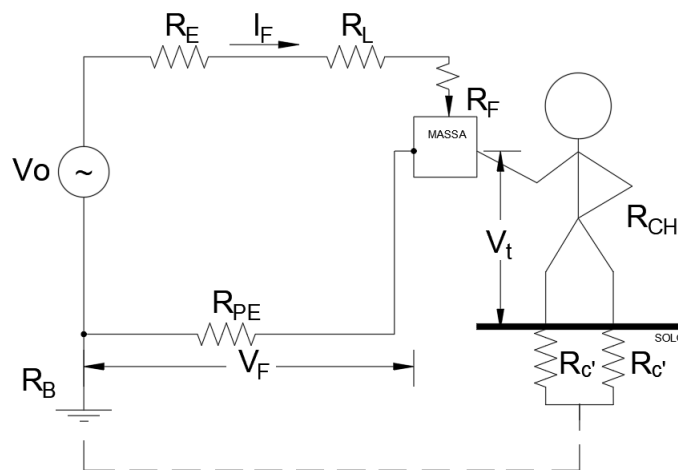


Após a separação dos condutores neutro e de proteção, não é admissível a conexão entre eles novamente [17].

### Condição de proteção do esquema TN

Considerando uma falta fase-massa conforme indicado na Figura 40.

**Figura 40:** Percurso da corrente de falta fase-massa em um esquema TN [10]



Onde:

$R_B$ : Resistência de aterramento do secundário do transformador;

$R_E$ : Resistência do secundário do transformador;

$R_L$ : Resistência dos condutores de fase;

$R_{PE}$ : Resistência dos condutores de aterramento;

$R_F$ : Resistência de falta;

$R_{CH}$ : Resistência do corpo humano;

$R_c$ : Resistência de contato entre o pé e o solo.

$V_O$ : Tensão nominal entre fase e neutro, valor eficaz em corrente alternada (V).

$V_t$ : Tensão de toque (V).

$V_F$ : Tensão de falta (V).

A condição necessária para empregar o esquema TN, admitindo falta direta fase-massa é:

$$Z_s \cdot I_a \leq V_O \quad (13)$$

Onde:

$Z_s$ : Impedância do percurso da corrente de falta, composto pelo condutor vivo até o ponto de ocorrência da falta, e pelo condutor de proteção, do ponto de ocorrência da falta até a fonte ( $\Omega$ ).

$I_a$ : Corrente que assegura atuação do dispositivo de proteção em tempo máximo especificado (A).

$V_O$ : Tensão nominal entre fase e neutro, valor eficaz em corrente alternada (V).

A corrente  $I_a$  é obtida na curva característica do dispositivo em função do tempo de seccionamento máximo no esquema TN. Para uma tensão nominal entre fase e neutro de 220V, alimentando apenas equipamentos fixos e considerando as situações em que a pele humana está em condições secas ou úmidas (BB1 e BB2 - Figura 6), o tempo máximo de seccionamento é 5s.

Se a condição não for cumprida para dispositivos de proteção contra sobrecorrente, deve-se assegurar proteção utilizando dispositivos DR ou executando ligação equipotencial suplementar.

- **Aplicação prática da condição de proteção do esquema TN**

Para obter a validade da condição expressa na Equação 13, é necessário conhecer a impedância de todo o percurso da corrente de falta, dada pela impedância dos condutores vivos e de proteção, o que na realidade se torna impraticável, devido a falta de informações sobre caminho desde o secundário do transformador até o ponto de falta.

Para tornar possível o conhecimento do valor de  $Z_s$  deve-se considerar um ponto de referência, obtido através de uma ligação equipotencial local no nível do quadro de distribuição, de onde se origina o circuito terminal que alimenta a massa considerada, de modo que a tensão falta-massa permaneça sensivelmente igual ao potencial local onde esta situada [17; 10].

A tensão de contato presumida pode ser calculada aplicando um fator de correção (c), como na Equação 14, que leva em consideração a impedância do percurso a montante do ponto de referência [10].

$$V_t = cV_O \frac{R_{PE}}{R_L + R_{PE}} \quad (14)$$

O fator de correção da impedância (c) pode variar entre 0,6 e 1, respectivamente, para circuitos muito distantes da fonte ou próximos à fonte.

Para os circuito terminais, o comprimento máximo ( $L_{m\acute{a}x}$ ) em que o dispositivo de proteção de sobrecorrente assegura a proteção contra contatos indiretos é dado por:

$$L_{\text{máx}} \leq \frac{cV_0}{\rho_m I_a \left(1 + \frac{R_{PE}}{R_L}\right)} \quad (15)$$

A Equação 15 só é válida para os casos em que exista um ponto de referência no nível de origem do circuito e o condutor de proteção esteja contido na mesma linha elétrica dos condutores vivos [10].

- **Aterramento múltiplo do condutor de proteção**

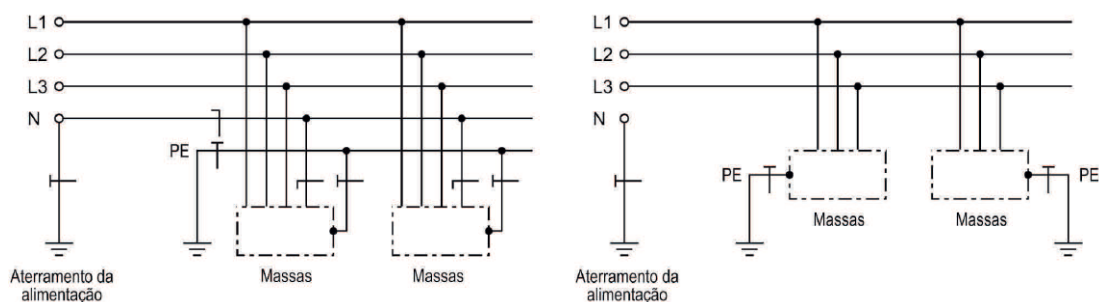
Com a finalidade de reduzir a tensão de contato ao longo da instalação devido a uma corrente de falta, é recomendado que o condutor de proteção seja aterrado em diversos pontos com intervalos regulares ao longo da instalação [17; 10].

O aterramento múltiplo, embora eficiente na redução da tensão de toque, pode introduzir potenciais indesejados através de correntes de curto circuito de outros circuitos devido a baixa impedância do caminho.

#### 4.2.2 Esquema TT

O esquema TT possui alimentação e massas diretamente e separadamente aterradas, como apresentado na Figura 41.

**Figura 41:** Esquema de aterramento TT [17]



No esquema TT, a elevada impedância, devido a inclusão da terra no percurso, limita a corrente de falta. No entanto, mesmo que a corrente seja limitada ainda é possível o aparecimento de tensões de toque e passo perigosas [10].

Neste esquema, a proteção contra contatos indiretos deve ser obrigatória por meio do dispositivo DR. A condição de proteção é dada por:

$$R_A \cdot I_{\Delta N} \leq V_L \quad (16)$$

onde:

$R_A$ : Resistência de aterramento das massas ( $\Omega$ ).

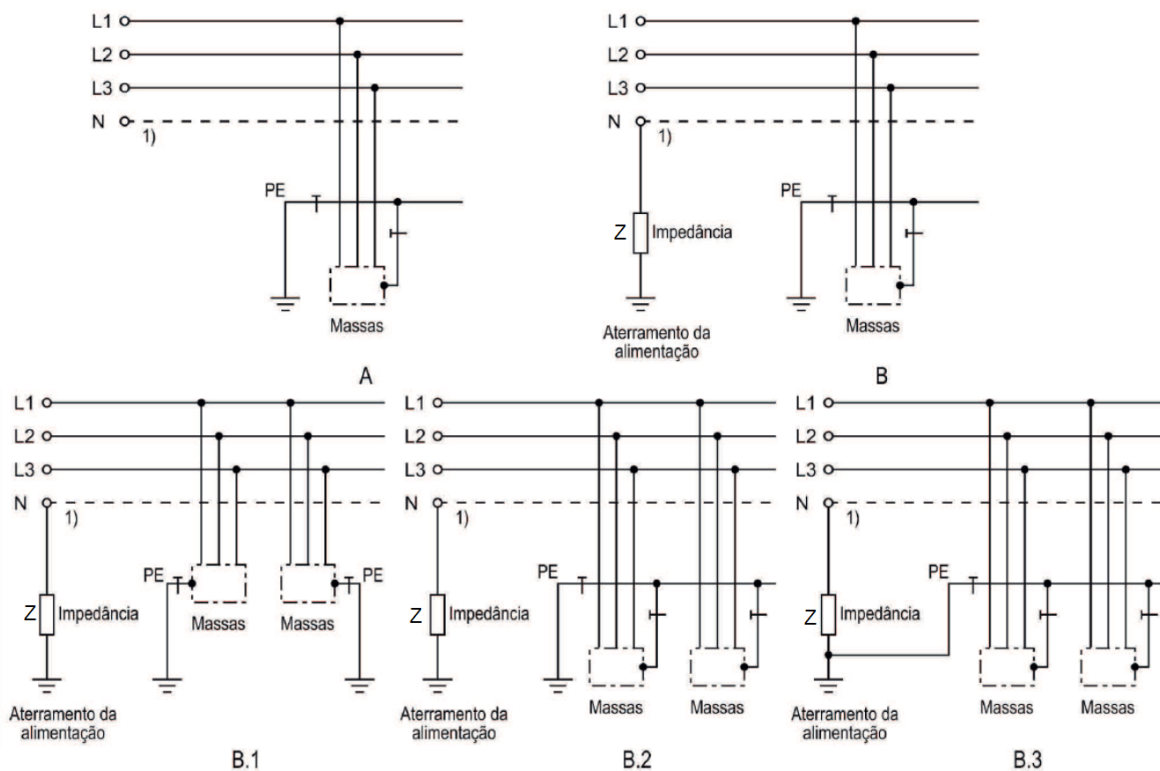
$I_{\Delta N}$ : Corrente diferencial-residual nominal de atuação do dispositivo.

$V_L$ : Tensão de contato limite (V).

### 4.2.3 Esquema IT

No esquema IT as massas devem ser diretamente aterradas e o ponto de alimentação, pode ser isolada da terra ou aterrado por meio de impedância ( $Z$ ). Na Figura 42 são apresentadas as diversas variações do esquema IT.

**Figura 42:** Esquemas de aterramento IT [17]



Na Figura 42A, não ocorre o aterramento da alimentação, isto é, a instalação é isolada da terra. Na Figura 42B a alimentação é aterrada através de impedâncias, o que possibilita a

realização de outras três configurações.

Na Figura 42B.1 as massas são aterradas separadamente e independente do aterramento da alimentação, enquanto na Figura 42B.2 as massas aterradas coletiva e independentemente do aterramento da alimentação, a falta fase-massa é limitada pelas resistências de aterramento dos dois eletrodos. Na Figura 42B.3 as massas são coletivamente aterradas no mesmo aterramento da alimentação. Neste caso a limitação da corrente é feita apenas pela impedância  $Z$  [17][25]. No geral, a impedância  $Z$  é adotada respeitando a equação:

$$5\sqrt{3}V_O \leq Z \leq 6\sqrt{3}V_O \quad (17)$$

Onde:

$Z$ : Impedância de aterramento ( $\Omega$ ).

$V_O$ : Tensão nominal da rede (V).

Considerando uma primeira falta sem que haja obrigatoriedade de seccionamento automático, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$R_A * I_F \leq V_L \quad (18)$$

Onde:

$R_A$ : Resistência de aterramento das massa ( $\Omega$ ).

$I_F$ : corrente de falta direta entre um condutor de fase e uma massa.

O seccionamento automático da alimentação devido a uma segunda falta deve seguir as condições definidas para o esquema TN ou TT, dependendo de como as massas estão aterradas.

#### 4.2.4 Condutor de proteção

Os condutores de proteção devem fazer parte da mesma linha elétrica do circuito e sua seção deve ser definida de modo a suportar a corrente de falta presumida. A NBR 5410:2004 apresenta a Figura 43 para determinação da seção mínima dos condutores de proteção.

**Figura 43:** Seção mínima para condutores de proteção [17]

Seção dos condutores de fase S (mm <sup>2</sup> )	Seção mínima do condutor de proteção correspondente (mm <sup>2</sup> )
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

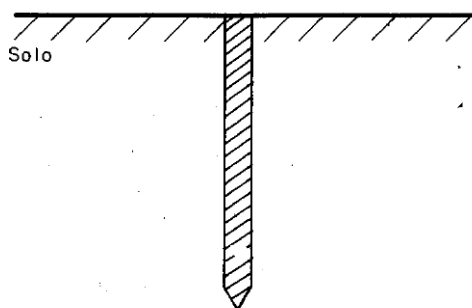
O condutor de proteção deve ser identificado de acordo com sua função, quando identificado por cor, deverá adotar a coloração verde-amarelo ou verde. Veias de cabos multipolares, condutores isolados, cabos unipolares, condutores nus, armações, coberturas metálicas e condutores metálicos podem ser usados como condutores de proteção desde que sejam asseguradas as continuidades por características construtivas ou conexões adequadas [17].

### 4.3 Geometria dos eletrodos

A resistência de contato entre o eletrodo e o solo adjacente, e a condutividade dos materiais empregados são parcelas desprezíveis da resistividade de aterramento devido a facilidade de controle com a utilização de bons condutores de eletricidade. No geral, materiais metálicos, inertes a corrosão e com resistência mecânica compatível a movimentação do solo [25].

A geometria, como uma componente fundamental da resistência elétrica de um sistema de aterramento, depende do local de aplicação desejado. A geometria mais utilizada, principalmente em residências, é a haste metálica cravada verticalmente ao solo, apresentada na Figura 44 [28].

**Figura 44:** Haste metálica cravada verticalmente ao solo [25]



Considerando um eletrodo vertical, cravado em solo homogêneo de resistividade conhecida, comprimento e seção circular constantes, a resistência de aterramento é dada pela Equação 19 [28; 25].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{a} \quad (19)$$

Onde:

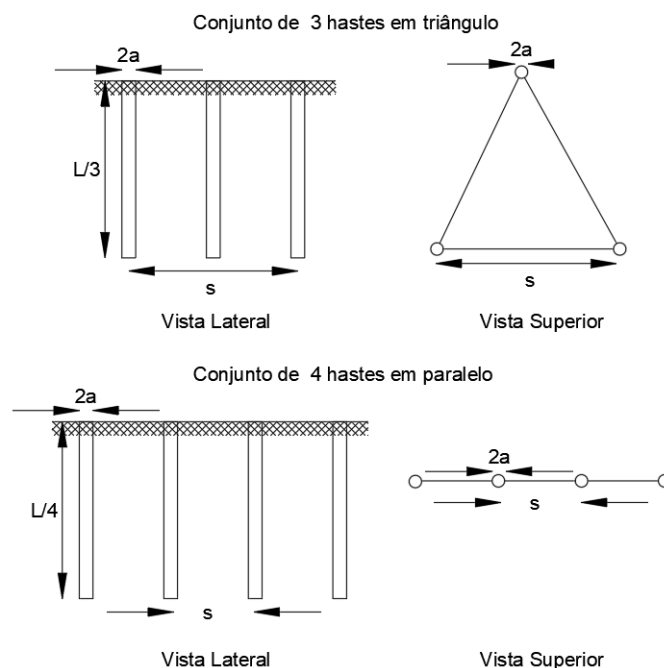
$\rho$ : Resistividade do solo ( $\Omega \cdot m$ )

$l$ : Comprimento do eletrodo (m)

$a$ : Raio do círculo equivalente à área da seção transversal do eletrodo (m)

Em sistemas de aterramentos maiores é comum a associação de várias hastes verticais. As configurações típicas são: conjunto de 3 hastes interligadas formando um triângulo equilátero, conjunto de 4 hastes interligadas em paralelo, apresentadas na Figura 45 e malha com  $n$  hastes verticais, bastante empregada em aterramento de subestações.

**Figura 45:** Configurações típicas de hastes verticais associadas [29]



Onde:

$s$ : Distância entre as hastes;

$L$ : Comprimento da haste;

$a$ : Raio da haste;

A resistência de aterramento do conjunto de três hastes interligadas formando um triângulo equilátero é dada por [29]:

$$R = \frac{3\rho}{2\pi L} * \left[ \ln\left(\frac{4L}{3a}\right) - 1 \right] * \left( \frac{1 + 2\alpha}{3} \right)$$

$$\alpha = \frac{L}{3s * \left[ \ln\left(\frac{4L}{3a}\right) - 1 \right]} \quad (20)$$

A resistência de aterramento do conjunto de quatro hastes interligadas em paralelo é



dada por [29]:

$$R = \frac{2\rho}{2\pi L} * [\ln(\frac{L}{a}) - 1] * (\frac{12 + 16\alpha + 21\alpha^2}{48 - 40\alpha})$$

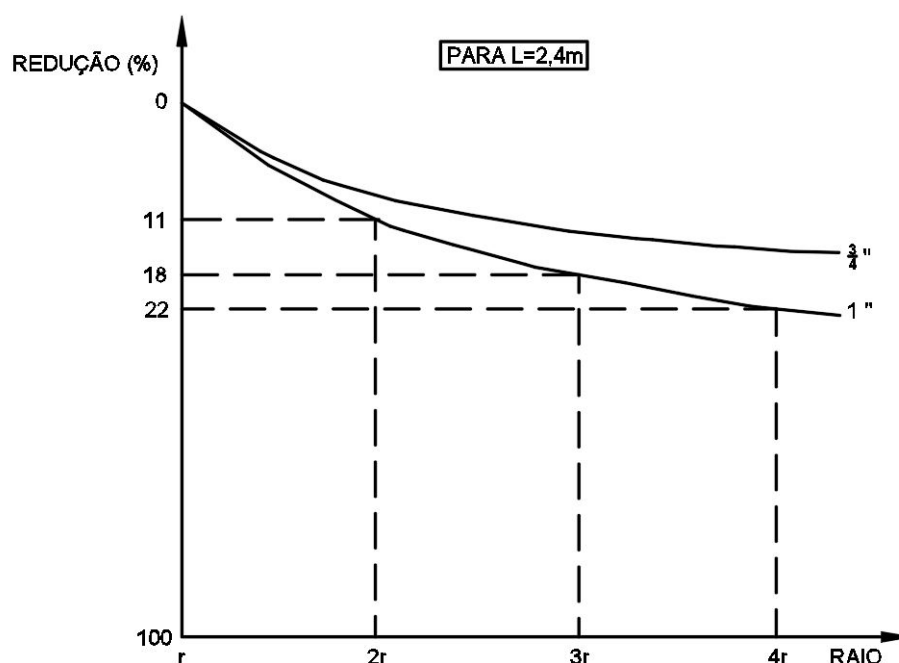
$$\alpha = \frac{L}{4s * [\ln(\frac{L}{a}) - 1]} \quad (21)$$

Através das equações de resistências apresentadas, deduz-se que a resistência de aterramento depende da resistividade do solo, raio e comprimento do eletrodo. Contudo, é fundamental destacar as influências destes parâmetros na resistência de aterramento do eletrodo.

### 4.3.1 Alteração no raio do eletrodo

A partir da Equação 19 é possível notar que o aumento do raio do eletrodo causa uma redução não-linear na resistência. A Figura 46 apresenta a porcentagem de redução para aumento do raio de um eletrodo de comprimento de 2,4m e diâmetros iniciais de 3/4" e 1".

**Figura 46:** Efeitos da resistência aterramento em função do raio do eletrodo [25]



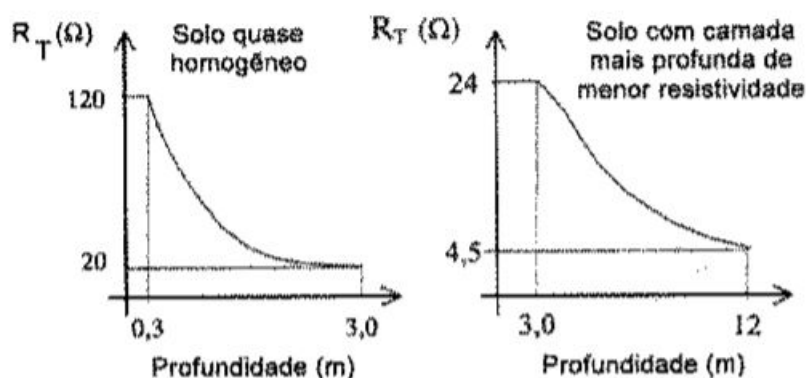
No gráfico da Figura 46, observa-se que quanto maior o raio, menor o percentual de redução. Entretanto, o aumento do raio acima de 4 vezes o raio inicial, mantendo um mesmo comprimento, acarreta a saturação na redução da resistência de aterramento [25].

Contudo, o aumento do raio não é vantajoso devido a relação custo/benefício em consequência dos altos preços de hastes mais robustas e o nível de saturação na redução da resistência. No geral, a seção do eletrodo é projetada visando uma boa resistência mecânica no processo de cravação e movimentação natural do solo [16].

#### 4.3.2 Alteração do comprimento do eletrodo

Novamente, analisando a Equação 19 é possível notar que o comprimento da haste causa a redução da resistência de forma indiretamente proporcional. A Figura 47 apresenta a resistência da haste em função da profundidade para solos homogêneos e heterogêneos.

**Figura 47:** Efeitos da resistência aterramento em função do aumento do comprimento do eletrodo [16]



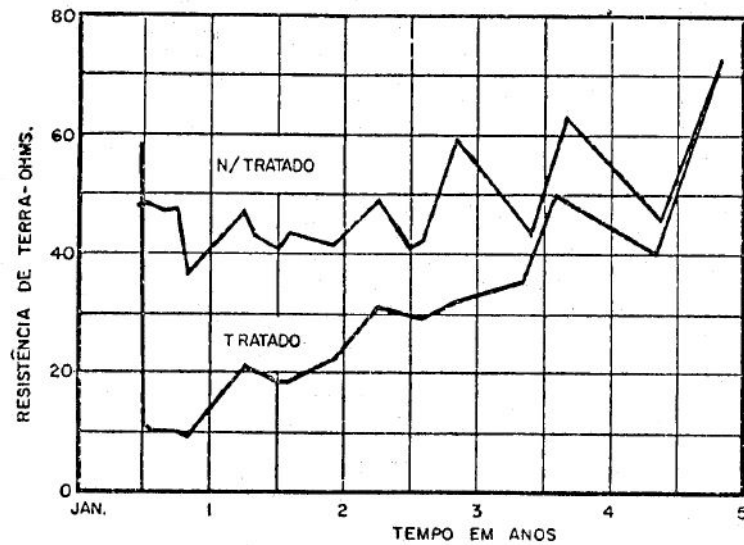
A prática é viável e se torna mais eficiente quando aplicada em solos com camadas mais profundas de menor resistividade.

#### 4.3.3 Resistividade através do tratamento do solo

Dado que a resistividade do solo é um dos fatores mais significativos da eficiência de um aterramento, o tratamento do solo de modo a aumentar a condutividade do terreno vizinho aos eletrodos se torna uma opção para reduzir a resistência do aterramento. Produtos como bentonita, earthron e gel constituído de mistura de sais são amplamente utilizados por possuírem propriedade condutiva e normalmente não corrosiva [25].

O emprego deste método deve ser dado como última solução tendo em vista que a eficiência para o processo se perde em poucos anos, como mostrado na Figura 48.

**Figura 48:** Resistência de aterramento em solos tratados e não tratados em função do tempo [16]

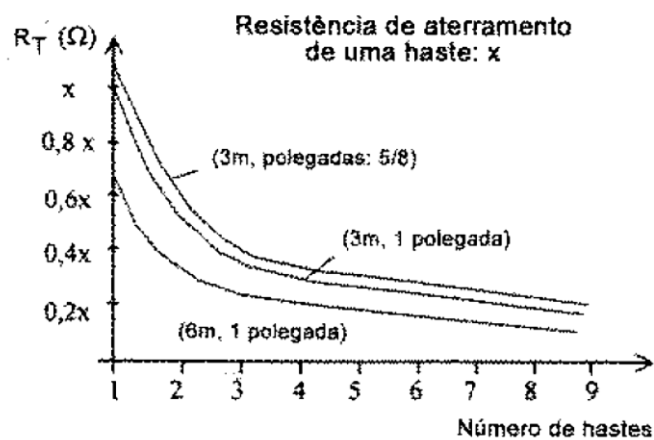


Em torno de 5 anos o as propriedades adquiridas através do produtos se perdem e a resistência de aterramento se equivale a resistência de aterramento do solo não tratado.

#### 4.3.4 Acréscimo de eletrodos em paralelo

O método mais empregado para a redução da resistência do sistema de aterramento é o acréscimo de eletrodos em paralelo. Na Figura 49 é apresentado o comportamento da resistência para acréscimo de eletrodos iguais em paralelo.

**Figura 49:** Comportamento da resistência de aterramento com acréscimo de eletrodos em paralelo [16]



A distância entre as hastes deve ser de pelo menos 2,2 vezes o comprimento, para minimizar a interferência entre elas e otimizar o efeito do paralelismo [29].

Contudo, a faixa de redução da resistência passa a ser pouca após o acréscimo de um certo número de eletrodos. Caso seja necessário reduzir mais a resistência, é aconselhável a combinação das várias técnicas apresentadas.

#### **4.4 Corrente e tensões permissíveis para não causar fibrilação ventricular**

Para que um sistema de aterramento seja considerado eficiente e satisfaça os requisitos de segurança das pessoas, é preciso definir níveis de toleráveis de tensões em função do tempo de eliminação da falta e da resistividade da camada superficial do solo [30]. O tempo de duração de choque limitado pela atuação das proteções deve ser escolhido de forma conservativa, de acordo com os padrões dos equipamentos de proteção a serem empregados nas instalações. A seguir são apresentados os limites de corrente de choque elétrico e a máxima tensão de passo e de toque para não causar fibrilação ventricular.

##### **4.4.1 Limite de corrente de choque para não causar fibrilação**

O limite de corrente para não causar fibrilação pode ser dividido em dois casos:

###### **1. Corrente de choque de longa duração**

A corrente limite permissível é aplicada a defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção e em caso de choque para que não cause fibrilação. O máximo valor de corrente de largar de longa duração é apresentada na Figura 50, com distinção entre homens e mulheres [30].

**Figura 50:** Corrente de largar de longa duração [30]

Porcentagem da população que suporta (%)	Corrente limite de largar de longa duração (mA)	
	Homens	Mulheres
99,5	9	6
50	16	10,6

Através dos valores padronizados de limite de corrente de choque para longas duração é possível enfatizar que mulheres são mais suscetíveis aos efeitos fisiológicos associados

ao choque elétrico, isto é, o limite de corrente para os homens é 50% maior do que para mulheres.

## 2. Corrente de choque de curta duração

A corrente de choque de curta duração está associada aos defeitos de longa duração limitados pelo dispositivos de proteção. Através de pesquisas experimentais, Charles Danziel definiu a corrente máxima de curta duração para não causar fibrilação em 99,5% das pessoas em função da massa corporal. Para pessoas de 50kg, a corrente limite de curta duração é dada por [30; 14]:

$$I_{cq50} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (22)$$

Para corpos de 70kg ou mais a corrente limite é dada por:

$$I_{cq70} = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (23)$$

Onde:

$I_{cq}$ : Máxima corrente que não causa fibrilação ventricular do coração humano;

$t$ : Tempo de duração do choque ( $0,03s \leq t \leq 3s$ );

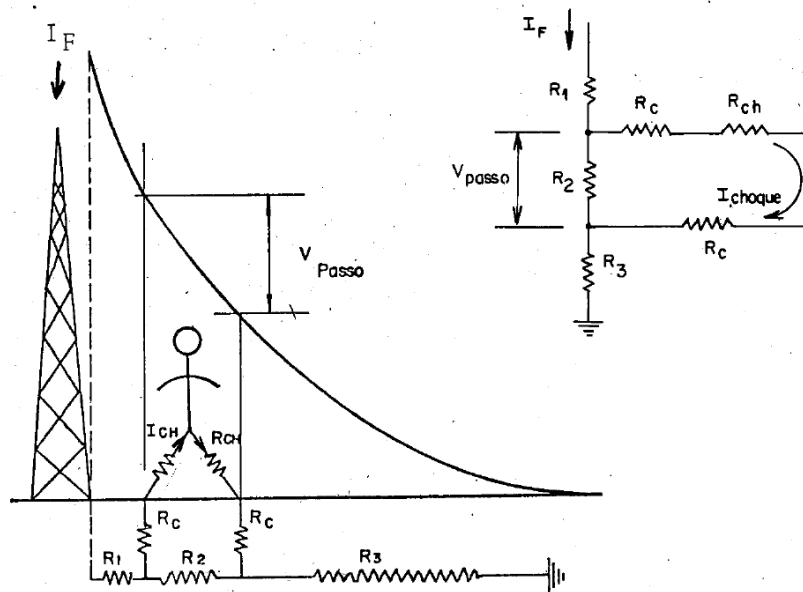
É importante ressaltar às equações para corrente de curta duração são para o tempo de choque limitado pela atuação da proteção que deve ocorrer entre 30 e 3000ms.

### 4.4.2 Tensão de Passo

Tensão de passo é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados na superfície do solo a um distanciamento arbitrário, devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra [30; 25].

O circuito proveniente da tensão de passo pode ser modelado como na Figura 51, onde é definido a resistência do corpo humano e a resistência de contato, isto é, a resistência proveniente do contato entre a sola do pé e o solo, para os dois pés.

**Figura 51:** Tensão de passo [25]



A distância entre os pés humanos é convencionalmente em 1m. Animais quadrúpedes estão sujeitos a tensão de passo maior devido a distância entre as patas ser superior.

Aplicado a lei de Ohms ao circuito, temos que:

$$V_p = (R_{ch} + 2R_c)I_{cq} \quad (24)$$

Onde:

$V_p$ : Tensão de passo (V);

$R_{ch}$ : Resistência do corpo humano, definida no capítulo 2 como  $1000\Omega$ ;

$R_c$ : Resistência de contato dos pés com o solo ( $\Omega$ );

$I_{cq}$ : Corrente de choque elétrico (A).

$R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ : Resistências dos trechos de solos considerados ( $\Omega$ ).

Segundo recomendações da IEEE-80, temos que:

$$R_c = 3\rho_s \quad (25)$$

Onde:

$\rho_s$ : Resistividade da primeira camada da estratificação do solo;

Substituindo  $R_c$  na Equação 24 :

$$V_p = (1000 + 6\rho_s)I_{cq} \quad (26)$$

Para o desenvolvimento das equações será considerado o limite de corrente dado a um corpo de 70kg ou mais, entretanto, para corpos de 50kg o procedimento é análogo. Substituindo Equação 23 na Equação 26, temos:

$$V_{p(m\acute{a}x)} = (1000 + 6\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (27)$$

Simplificando,

$$V_{p(m\acute{a}x)} = \frac{157 + 0,942\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (28)$$

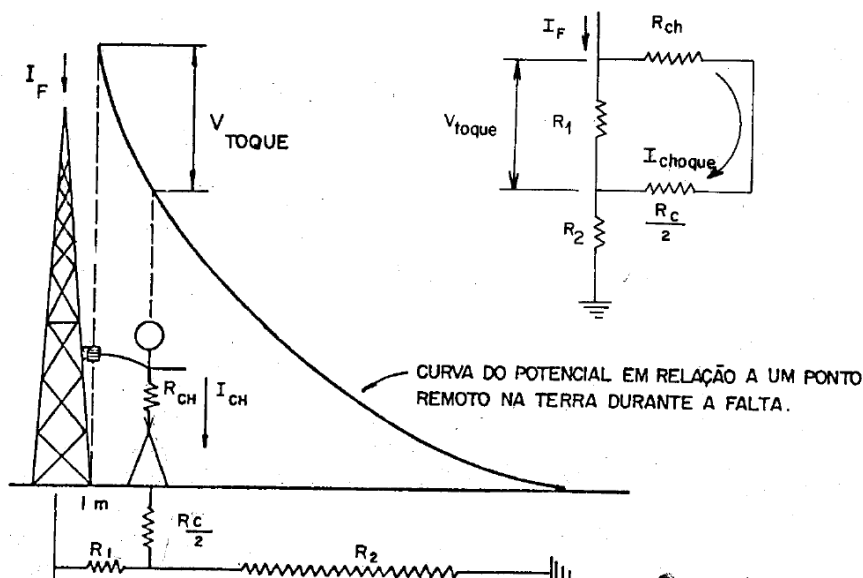
A tensão de passo máxima é dada em função da resistividade do solo e do tempo de duração do choque, para valores entre 0,03s e 3s.

#### 4.4.3 Tensão de Toque

Tensão de toque é a diferença de potencial entre o ponto de contato, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a distância, convencionada, de 1m do elemento energizado [30; 25].

O circuito proveniente da tensão de toque pode ser modelado como na Figura 52.

**Figura 52:** Tensão de Toque [25]



Aplicado a lei de Ohms ao circuito, temos que:

$$V_t = (R_{ch} + \frac{R_c}{2}) I_{cq} \quad (29)$$

Onde:

$V_t$ : Tensão de toque (V);

$R_{ch}$ : Resistência do corpo humano ( $\Omega$ );

$R_c$ : Resistência de contato dos pés com o solo ( $\Omega$ );

$I_{cq}$ : Corrente de choque elétrico (A).

$R_1$  e  $R_2$ : Resistência do trecho de solo considerado ( $\Omega$ ).

Substituindo a Equação 25 na Equação 29:

$$V_t = (1000 + 1,5\rho_s) I_{cq} \quad (30)$$

Análogo a máxima tensão de passo, a máxima tensão de toque ( $V_{t(máx)}$ ) tolerável é limitada pela máxima corrente que não causa fibrilação ventricular do coração humano. Substituindo Equação 23 na Equação 30, temos:

$$V_t = (1000 + 1,5\rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (31)$$

Resolvendo,

$$V_{t(máx)} = \frac{157 + 0,471\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (32)$$

Assim como a tensão de passo máxima, a tensão de toque máxima é dada em função da resistividade do solo e do tempo de duração do choque, para valores entre 0,03s e 3s.

Nas mesmas condições a tensão de passo máxima é maior que a tensão de toque máxima embora a tensão de toque tende a se associar a reações fisiológicas mais graves por possuir o coração no percurso da corrente.

#### 4.4.4 Aumento do potencial de aterramento

O aumento do potencial de aterramento (Ground Potential Rise - GPR) é o potencial elétrico máximo que uma rede de aterramento pode atingir em relação a um ponto de aterramento distante, assumido como o potencial de aterramento remoto.



#### 4.4.5 Camada superficial

As equações para tensão de passo e tensão de toque foram desenvolvidas considerando o solo como o material de contato dos pés. Entretanto, materiais como brita, concreto e outros, podem formar camadas com alta resistividade, aumentando a resistência de contato entre o solo e os pés e, conseqüentemente diminuindo a corrente de falta que flui pela pessoa. A Figura 53 apresenta faixas de valores típicos para resistividade de materiais da camada superficial.

**Figura 53:** Resistividade de materiais da camada superficial [30]

Descrição do material	Resistividade (ohm.m)	
	Seco	Molhado
Brita nº 1, 2 ou 3	-	$3 \cdot 10^3$
Concreto	$1,2 \times 10^3$ a $280 \times 10^3$	21 a 100
Asfalto	$2 \times 10^6$ a $30 \cdot 10^6$	$10 \times 10^3$ a $6 \times 10^6$

A resistência efetiva de contato do pé com a camada superficial é dada através do fator de redução da Equação 33.

$$C_S = 1 - \frac{0,106 * (1 - \frac{\rho}{\rho_m})}{2h_m + 0,106} \quad (33)$$

Onde:

$C_S$ : Fator de redução da camada superficial;

$\rho$ : Resistividade do solo ( $\Omega.m$ );

$\rho_m$ : Resistividade do material da camada superficial ( $\Omega.m$ );

$h_m$ : Espessura da camada superficial (m);

Para cálculo de tensão de passo e tensão de toque máxima permitida, temos que:

$$\rho = C_S * \rho_m \quad (34)$$

Em alguns projetos de aterramento para subestação a brita como camada superficial é intencionalmente aplicada ao solo acarretando uma otimização do sistema de aterramento.

## 5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E MEDIÇÕES EM CAMPO

### 5.1 Resistência de aterramento

Os postes metálicos destinados a iluminação pública não possuem eletrodo de aterramento de modo a dispersar correntes de fuga. Entretanto, em postes engastados, a altura do engastamento ( $e$ ), com o objetivo inicial de suportar tensões mecânicas, tende a se comportar como eletrodo natural de aterramento.

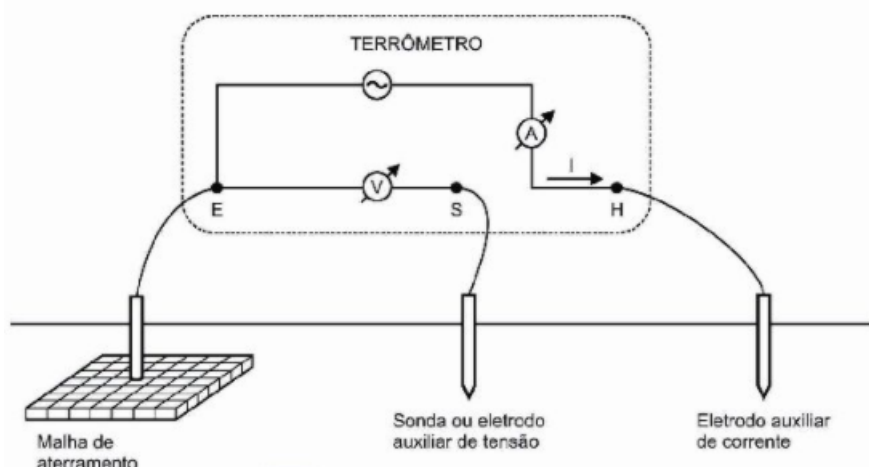
O eletrodo natural de aterramento é definido como o condutor ligado diretamente a terra cuja finalidade não é de aterramento, mas que se comporta naturalmente como eletrodo de aterramento [24].

Buscando verificar a resistência de aterramento do eletrodo natural do poste, foram realizadas medições em campo, embasadas e adaptadas dos procedimentos apresentados pela norma NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.

#### 5.1.1 Procedimento: Método da queda de potencial

O método da queda de potencial é caracterizado por aplicar uma corrente, proveniente de um terrômetro, entre a malha de aterramento e um eletrodo auxiliar de corrente (H), possibilitando a medição de tensão entre eles através de um eletrodo auxiliar de tensão (S), como mostrado na Figura 54 [24]:

**Figura 54:** Método da queda de potencial aplicado a uma malha de aterramento [24]

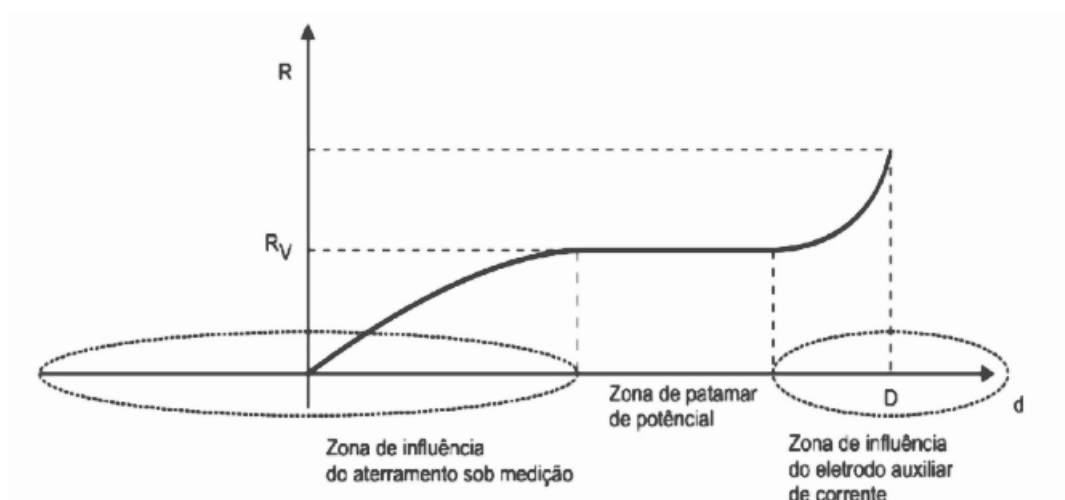


A distância ( $D$ ) entre o eletrodo de referência (E) e eletrodo auxiliar de corrente (H) deve

ser pelo menos três vezes a maior dimensão do sistema de aterramento. O eletrodo auxiliar de tensão (S) deve ser deslocado em intervalos regulares iguais a 5% de do espaçamento D [24].

Obtida a resistência em função do deslocamento do eletrodo S no espaçamento entre o sistema de aterramento e o eletrodo H, espera-se que a curva característica do resistência de aterramento seja como na Figura 55 [24].

**Figura 55:** Curva característica da resistência de aterramento [24]



Onde:

$R$ : Resistência ao longo do deslocamento em  $D$ ;

$R_V$ : Resistência verdadeira do aterramento;

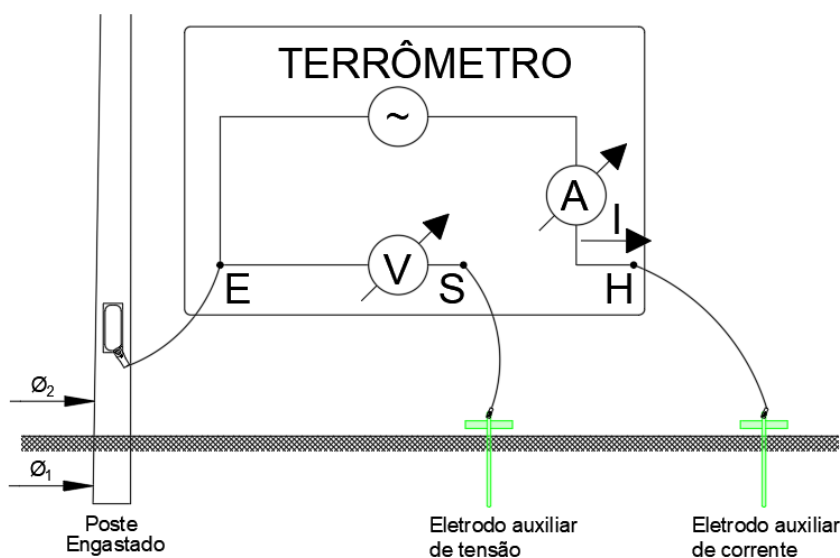
A curva característica apresenta três zonas ao longo da distância  $D$ . A primeira zona se refere a influência do aterramento sob medição, a segunda zona denominada de patamar de potencial, expressa o valor verdadeiro da resistência de aterramento e a terceira zona caracteriza a influência do eletrodo auxiliar de corrente.

### 5.1.2 Experimento: Método da queda de potencial

O terrômetro digital utilizado foi o modelo MTD 20kWe da empresa Megabras. O equipamento injeta uma corrente estabilizada eletronicamente, e mede com alta precisão a tensão que aparece no terreno pela circulação dessa corrente através da resistência de difusão do aterramento. A leitura de  $R$  é lida diretamente no display [31].

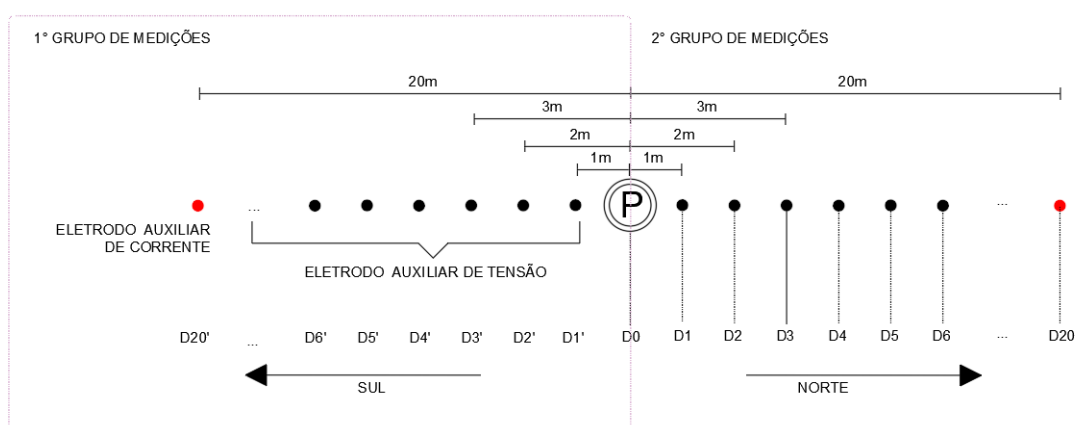
De modo similar ao apresentado no procedimento, foi aplicada uma corrente entre o poste metálico e o eletrodo auxiliar de corrente.

**Figura 56:** Método da queda de potencial aplicado ao poste metálico



A distância  $D$ , entre o poste e o eletrodo auxiliar de corrente foi estabelecida como 20 m e o deslocamento do eletrodo de tensão foi 5% de  $D$ , isto é, a cada 1m. Dois grupos de medição foram executados, o primeiro com os eletrodos instalados ao sul do poste e o segundo grupo ao norte.

**Figura 57:** Grupos de medições do método da queda de potencial aplicado ao poste metálico



A conexão entre o terrômetro e o poste foi realizada com uma garra jacaré presa a caixa de inspeção, local com maior acessibilidade e sem risco de dano a estrutura metálica. Como apresentado na Figura 58.

**Figura 58:** Conexão entre terrômetro e poste metálico



Os eletrodos de tensão e corrente, produzidos nos laboratórios da Universidade de Brasília (UnB), foram projetados para possuírem 40cm, dois quais 30cm devem ser cravados ao solo e 10cm servem de apoio a chapa soldada no plano perpendicular, facilitando a retirada do solo. O material das estacas deve ser um bom condutor de eletricidade e estar livre de processos de corrosão.

A Figura 59 apresenta todos os materiais e equipamentos utilizados no experimento.

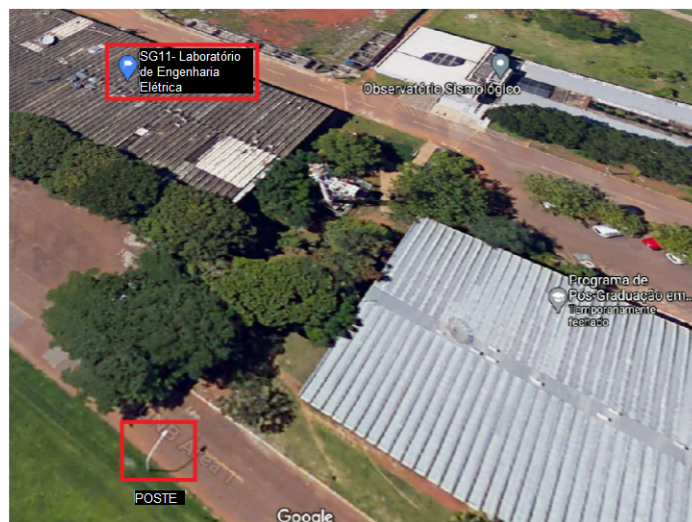


**Figura 59:** Materiais e equipamentos utilizados na medição de resistência



O local de realização do ensaio foi escolhido de forma a evitar obstáculos nas linhas de medições, ou seja, com maior área livre possível. O espaço definido com maior viabilidade foi o terreno localizado ao lado do SG11 - Laboratório de Engenharia Elétrica, Asa Norte, Distrito Federal.

**Figura 60:** Local de medição



O experimento foi realizado no dia 18 de Setembro de 2020 entre 9:30 e 14:30 Horas, horário oficial de Brasília, após 116 dias sem chuva no Distrito Federal [32]. A temperatura registrada com o celular foi 34°C e umidade de 18%.

### 5.1.3 Análise do experimento: Método da queda de potencial

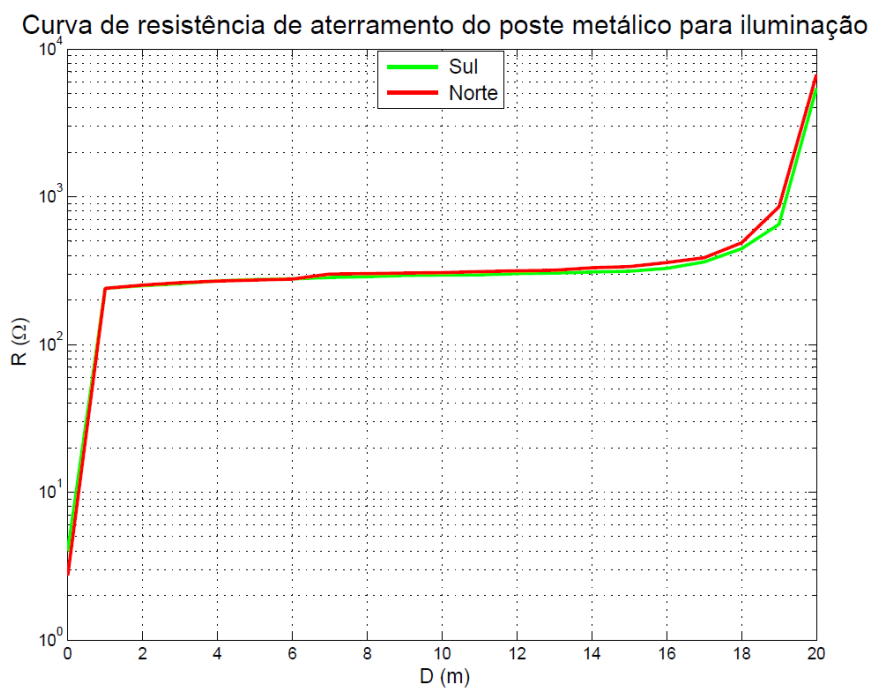
Realizando o experimento conforme descrito nas seções anteriores, os resultados são apresentados na Figura 61.

**Figura 61:** Resistência medida em função da distância entre eletrodos

D (m)	R ( $\Omega$ )		D (m)	R ( $\Omega$ )	
	Sul	Norte		Sul	Norte
0	4	2,73	11	296	311
1	240	240	12	301	315
2	250	252	13	304	318
3	258	262	14	309	330
4	269	268	15	313	336
5	275	273	16	327	358
6	278	277	17	362	386
7	284	300	18	445	488
8	288	301	19	650	856
9	293	304	20	5410	6700
10	295	306	-	-	-

Para obter a curva característica da resistência de aterramento em função do deslocamento do eletrodo de tensão, os valores apresentados na Figura 61 foram dispostos em gráfico na Figura 62 .

**Figura 62:** Curva característica de resistência do poste metálico para iluminação

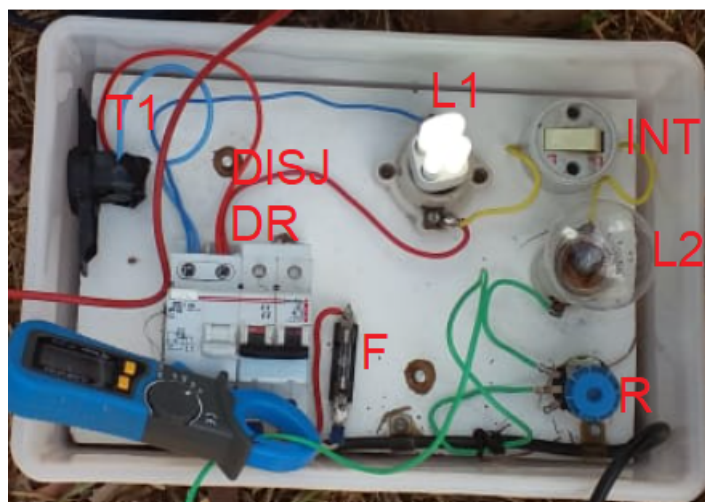


Analisando os dois grupos de medição é possível observar as três zonas assim como na Figura 55. As duas zonas referentes a interferências da malha e do eletrodo de corrente, respectivamente em  $0 \leq D < 8$  e  $14 \leq D \leq 20$  e a zona de patamar em  $8 \leq D < 14$  apresentando a resistência verdadeira do aterramento,  $R_v = 300 \Omega$ .

## 5.2 Tensão de passo e tensão de toque no poste metálico de iluminação

O segundo experimento realizado teve como objetivo verificar a existência de tensão de toque no poste energizado e tensão de passo na região circunvizinha. Para aplicar tensão ao poste de forma segura foi utilizado um kit limitador de corrente em 30mA, apresentado na Figura 63.

**Figura 63:** Kit limitador de corrente em funcionamento



O Kit é composto por:

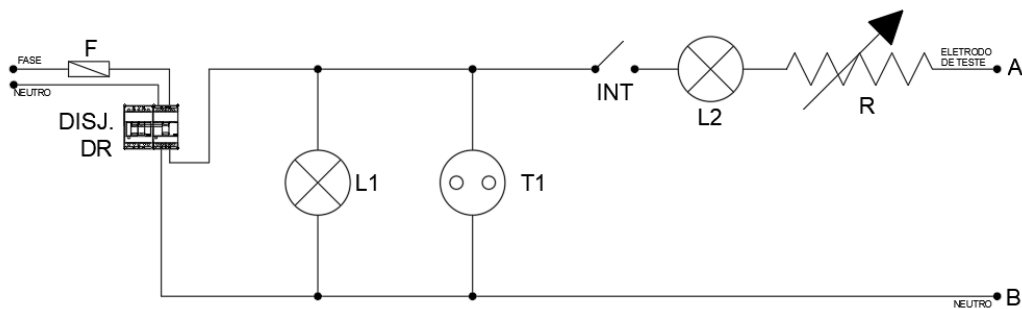
- Disj DR: 1 Conjunto Disjuntor DR 10A, 30mA;
- F: 1 Fusível;
- R: 1 Potenciômetro 50k $\Omega$ ;
- L1: 1 Lâmpada fluorescente 8W 220V;
- L2: 1 Lâmpada incandescente 40W 220V;
- INT: 1 Interruptor;



- 2 Soquetes tipo E27;
- 4 Plugues macho/fêmea;
- Cabos;

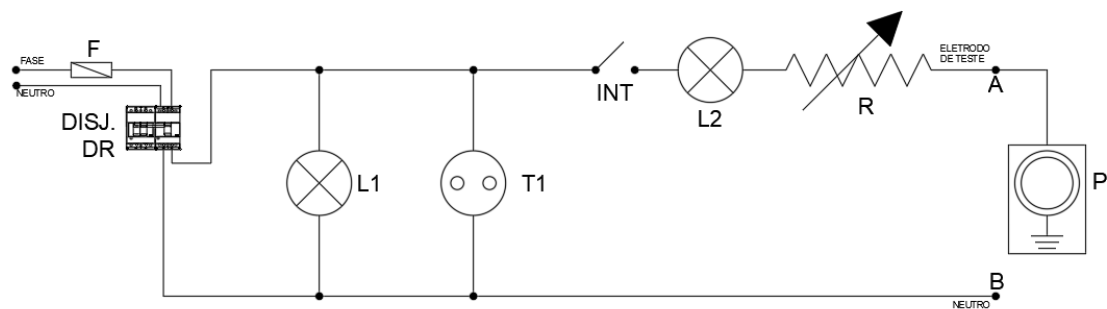
A Figura 64 apresenta o circuito equivalente do Kit limitador.

**Figura 64:** Circuito equivalente do Kit limitador de corrente



Para alimentar o Kit foi utilizado a tensão 220V da rede CEB próximo ao local do experimento, SG11. A tensão medida entre fase e neutro do circuito aberto foi  $V_{AB}=216V$ . Em seguida o poste foi adicionado ao circuito através da garra jacaré conectada a janela de inspeção, similar a conexão presente na Figura 58, e ao ponto A, retratado na Figura 65.

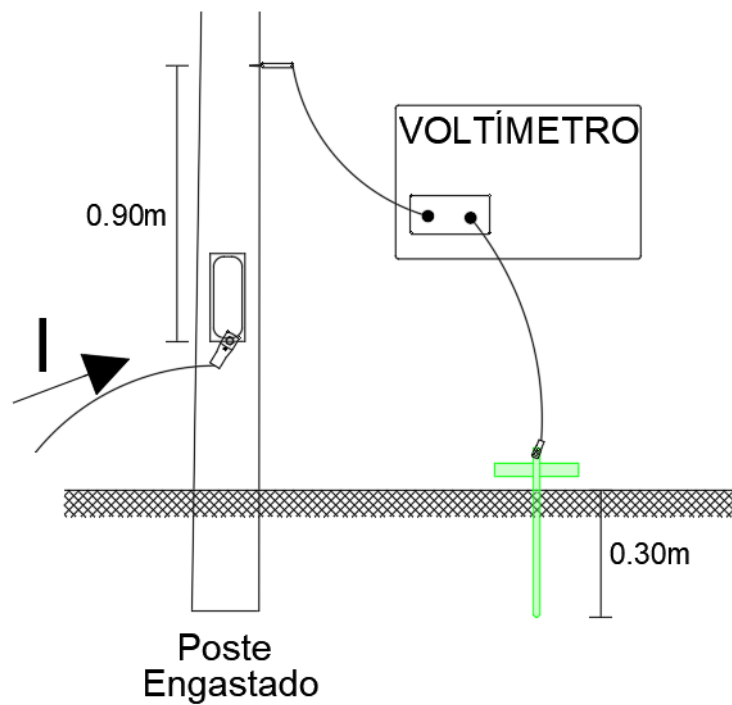
**Figura 65:** Circuito equivalente do Kit limitador de corrente com poste metálico



Com o kit ligado, foi realizada a variação do potenciômetro de modo reduzir a resistência R e injetar uma corrente de fuga para atuação do disjuntor DR. A corrente de disparo lida no amperímetro foi 23mA, isto é, 77% da corrente nominal do DR.

Conforme apresentado na Figura 66, para medição da tensão de toque foi escolhido um ponto à 0,90m do ponto de aplicação da tensão e uma haste com 30cm cravados ao solo, como referência de terra.

**Figura 66:** Medição da tensão de toque no poste metálico de iluminação



Devido a baixa corrente aplicada, por questões de segurança, o esperado não era medir tensão de toque considerada perigosa ao corpo humano mas observar a variação da tensão de toque para uma mínima variação de corrente.

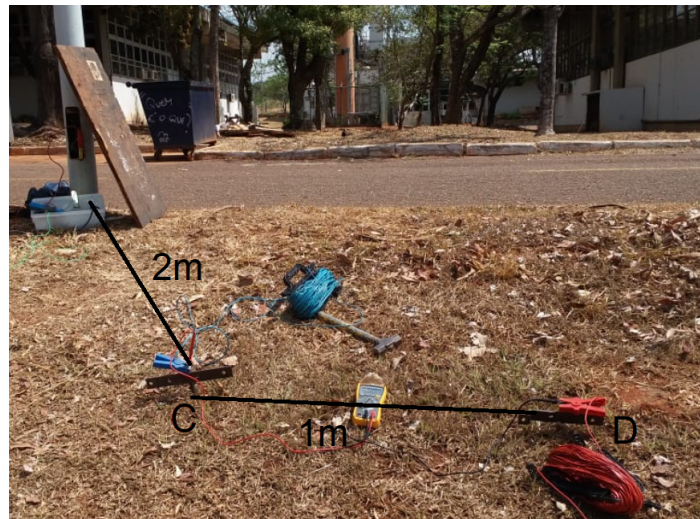
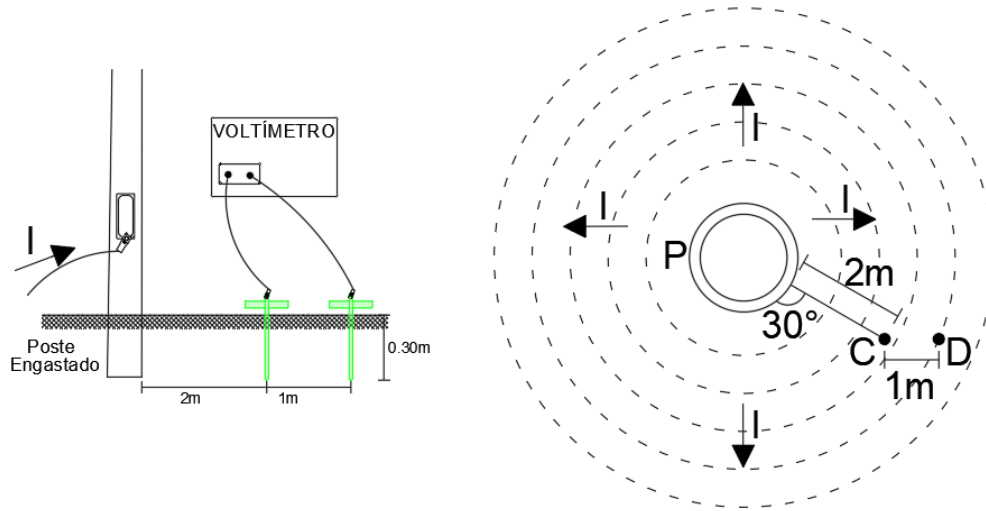
O resultado encontrado é apresentado na Figura 67.

**Figura 67:** Tensão de toque medida no poste

I (mA)	Tensão de toque (mV)
10	160
12	200
15	276

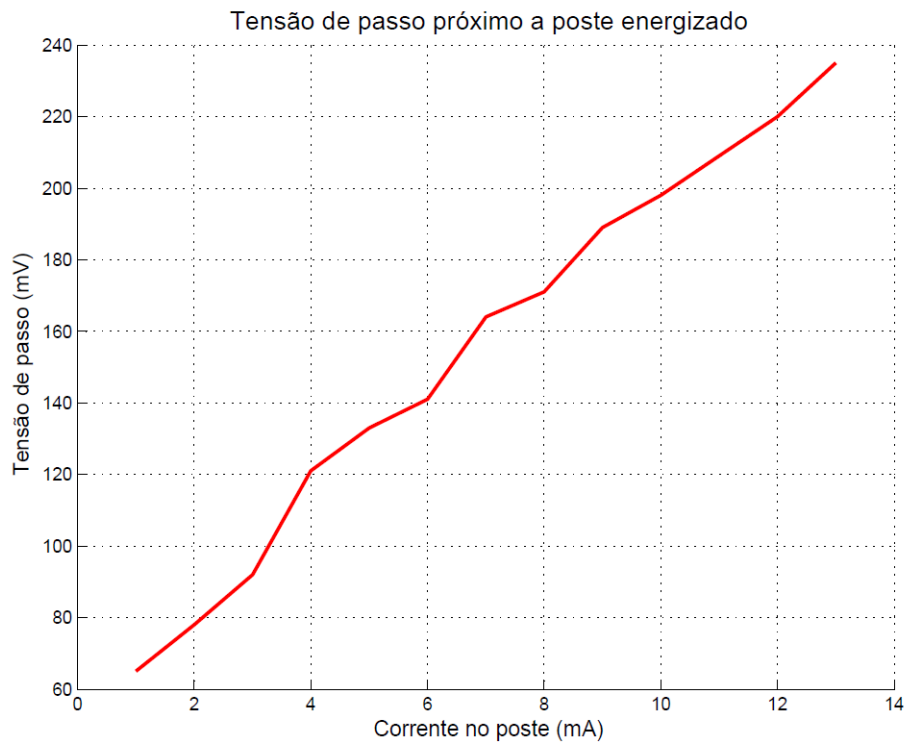
Para o teste de tensão de passo, o local de aplicação da corrente no poste foi mantido e a tensão de passo, em um passo de 1m, foi medida à 2m de distância do poste, como retratado na Figura 68.

**Figura 68:** Medição da tensão de passo no solo circunvizinho ao poste energizado



Similar ao experimento para tensão de toque, o esperado não era medir tensão de passo considerada perigosa ao corpo humano, mas observar a variação da tensão de passo para uma mínima variação de corrente. A Figura 69 apresenta os resultados obtidos de tensão de passo próximo ao poste energizado com corrente máxima de 23mA, dita como corrente de disparo do disjuntor DR.

**Figura 69:** Relação entre tensão de passo e corrente aplicada ao poste metálico

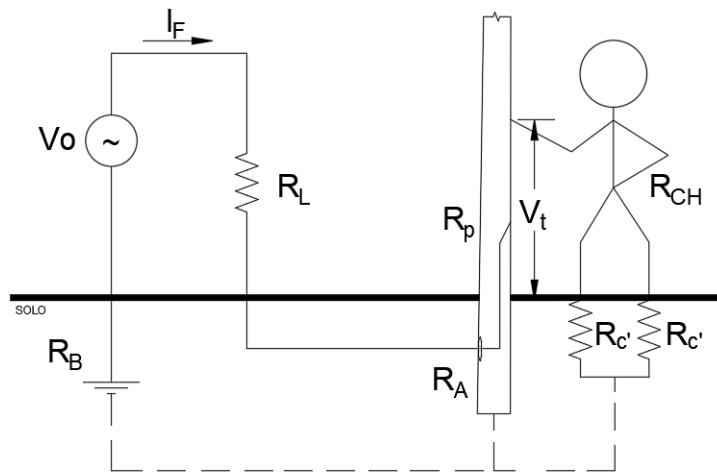


A resposta da tensão de passo em relação a variação da corrente aplicada no poste demonstra que a tensão medida não era proveniente de interferência dos equipamentos e/ou de redes externas ao procedimento.

### 5.3 Poste com esquema de aterramento TT

Como apresentado no Capítulo 4, o esquema de aterramento TT possui alimentação e massa direta e separadamente aterradas. Considerando a altura do engastamento ( $e$ ) do poste como eletrodo natural é possível dizer que o aterramento existente está estruturado através do esquema TT, conforme Figura 70.

**Figura 70:** Percurso da corrente de falta aplicada ao poste



onde:

$R_L$ : Resistência do condutor de fase ( $\Omega$ );

$R_B$ : Resistência do aterramento do secundário do transformador ( $\Omega$ );

$R_p$ : Resistência do poste ( $\Omega$ );

$R_{CH}$ : Resistência do corpo humano ( $\Omega$ );

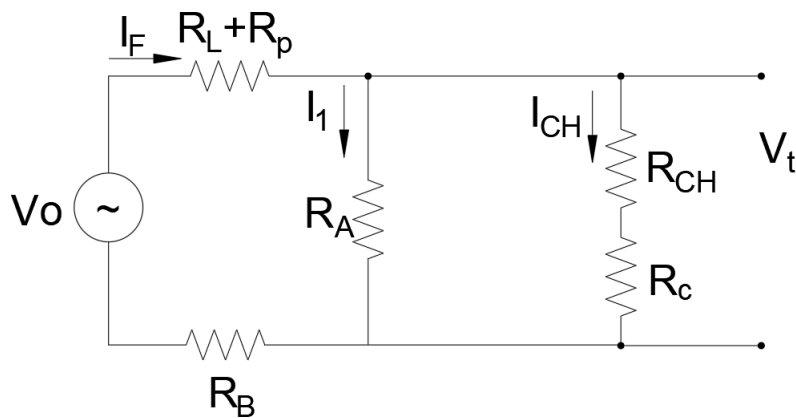
$R_A$ : Resistência de aterramento ( $\Omega$ );

$R_c$ : Resistência de contato ( $\Omega$ );

$V_o$ : Tensão fase neutro (220V);

O circuito equivalente é dado por:

**Figura 71:** Circuito equivalente de falta fase-massa no poste com aterramento no esquema TT



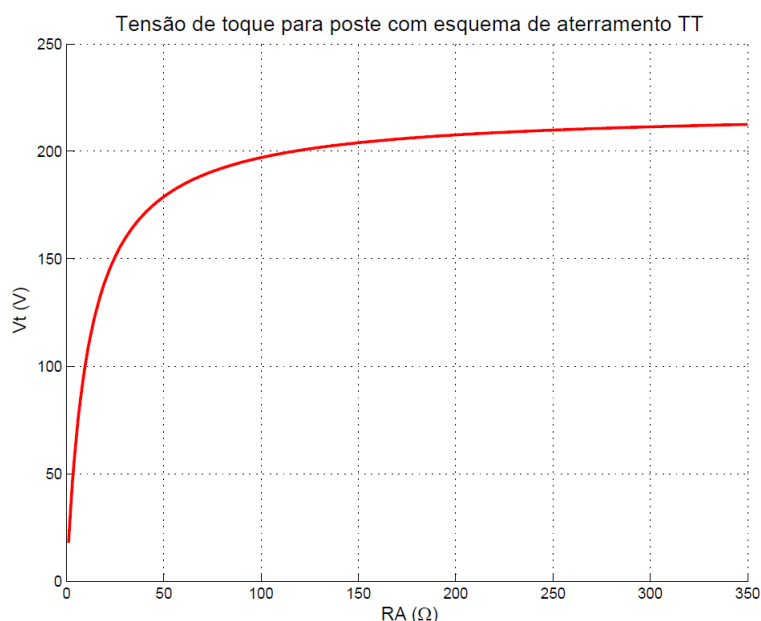
Por questões de simplificação, considera-se  $R_p$  como uma resistência concentrada, em

série com a resistência do condutor de proteção. A tensão de contato resultante da falta é dada por:

$$V_C = \frac{V_o * R_a * (R_{CH} + R_C)}{R_A * (R_{CH} + R_C) * (R_L + R_P + R_B) * (R_A + R_{CH} + R_C)} \quad (35)$$

A curva que expressa a tensão de toque no poste com esquema de aterramento TT é apresentada na Figura 72.

**Figura 72:** Curva de tensão de toque para poste com esquema de aterramento TT



Considerando a resistência verdadeira do aterramento do poste como eletrodo natural, obtida pelo método da queda de potencial, como  $R_A=300\Omega$ , temos que  $V_C=211,4V$ .

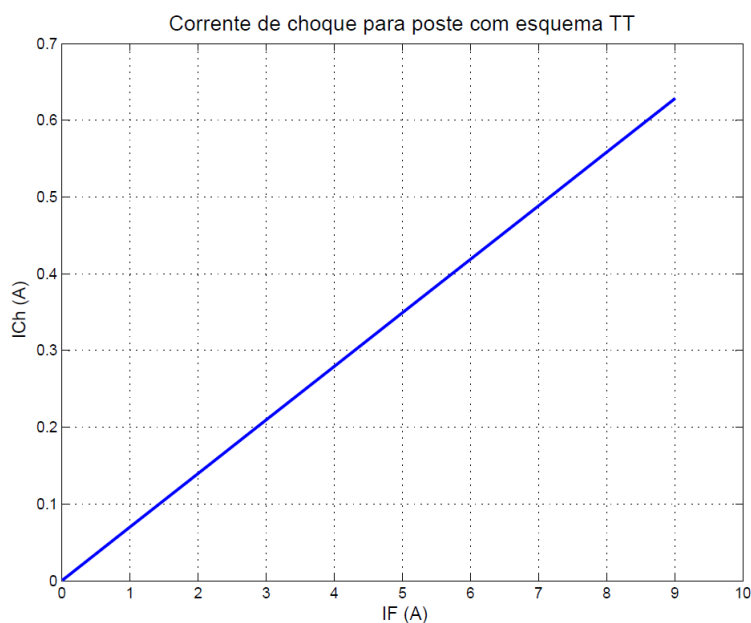
Dado que a tensão fase neutro é 220V, para uma tensão de toque inferior a tensão limite, dado na NBR 5410, como 50V, a resistência de aterramento é dada pela Equação 36.

$$R_A \leq 0,33R_B \quad (36)$$

Supondo a resistência de aterramento do secundário do transformador ( $R_B$ ) como  $10\Omega$  a resistência de aterramento ( $R_A$ ) deve ser de  $3,3\Omega$ . Na prática, valores tão baixos para resistência são difíceis de serem executados em solos com resistividade de  $1000\Omega$ . Embora, os parâmetros como tratamento do solo, quantidade, raio e comprimento dos eletrodos possam ser alterados, conforme explicitado no capítulo 4, a prática não é aconselhável dado os dispêndios exigidos e a dificuldade em medir o valor da resistência de aterramento da alimentação ( $R_B$ ).

O esquema apresentado levou em consideração que toda a tensão da fase seria aplicada ao poste. Entretanto, como apresentado na Figura 23, existem casos em que a alimentação entra em contato, esporadicamente, com o poste em curtos períodos de tempo, de modo que haja uma corrente de fuga incapaz de sensibilizar o dispositivo de proteção de sobrecorrente. A Figura 73 retrata o gráfico da corrente de choque, isto é, corrente que percorre o corpo humano em caso de falta para correntes de falha de até 10A.

**Figura 73:** Corrente de choque para poste com esquema de aterramento TT



Para uma corrente de fuga de 1A, a corrente que percorre o corpo humano está em torno de 60mA. Como apresentado na Figura 2, correntes entre 25 e 80 mA podem causar reações fisiológicas como contrações violentas e asfixia.

Neste caso de falta, é possível que as luminárias recebem corrente suficiente para continuar a operação normal tendo em vista que disjuntores com curva C necessitam de uma corrente de 5 a 15 vezes a corrente nominal para que ocorra o desarme em tempo menor que 5s. Dado curva dos disjuntores de 40A, curva C da empresa Siemens, a Figura 74 apresenta as correntes de falta sem que ocorra o desarme do disjuntor para determinado tempo, considerando a corrente demandada pela carga.

**Figura 74:** Corrente de falta sem que ocorra desarme do disjuntor

Corrente de desarme (A)	Tempo de desarme (s)	Corrente demandada pela carga (A)	Corrente de falta sem desarme do disjuntor (A)
120	4	1,36	118,64
160	3	1,36	158,64
200	0,03	1,36	198,64

O método de instalação existente associado apenas a dispositivos de sobrecorrente, não garante segurança contra choques elétricos, devido a elevada tensão de contato e corrente de choque elétrico que pode surgir devido algum defeito. Em consonância com a NBR 5410/2004, fica comprovado que a utilização de esquema de aterramento TT, exige a utilização de dispositivo DR para garantia de segurança.

Considerando a tensão de contato limite com 50V, a Figura 75 apresenta os valores máximos de resistência de aterramento das massas em função da corrente diferencial-residual de atuação ( $I_N$ ) do dispositivo DR.

**Figura 75:** Valores máximos de resistência de aterramento em função da corrente de atuação do DR

$I_N$ (A)	$R_a$ ( $\Omega$ )
0,03	1667
0,3	167
0,5	100

Com a utilização do DR no esquema TT, as resistências de aterramento das massa podem assumir valores elevados. Para a situação em questão, a inserção do DR nas instalações pode ser considerado como uma proteção adicional porém inviável devido a necessidade de continuidade do serviço e a dificuldade de detecção do problema dado os incontáveis postes metálicos para iluminação pública espalhados pela cidade.



## **6 PROPOSTAS DE PROTEÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO EM POSTES METÁLICOS DE ILUMINAÇÃO**

A partir da confirmação de risco de choque elétrico por meio de tensão de passo e tensão de toque, é necessário propor proteções básicas e supletivas que satisfaçam os requisitos de segurança das pessoas.

### **6.1 Propostas de proteção básica**

A proteção básica tem como objetivo impedir o contato direto com as partes vivas da instalação, evitando as situações apresentadas nas Figuras 22 e 23. Nos postes metálicos para iluminação, a proteção básica pode ser aplicada por meio das seguintes medidas:

#### **6.1.1 Eletrodutos rígidos**

A utilização de eletroduto rígido metálico em todo trajeto dos condutores de alimentação proporcionará mais segurança em situações como apresentada na Figura 23, em que o solo foi modificado devido a agentes naturais. Associada a proteção contra influências externas, a interligação dos eletrodutos ao aterramento da instalação por meio do condutor de proteção, irá assegurar a proteção contra choque elétrico devido ao contato indireto, no caso da energização acidental do eletroduto metálico.

#### **6.1.2 Manutenções corretivas e preventivas**

Manutenções corretivas e preventivas frequentes, para impedir a exposição do condutores na janela de inspeção, mediante a substituição de parafusos perdidos, enferrujados ou furtados.

### **6.2 Proposta de proteção supletiva**

#### **6.2.1 Esquema de aterramento TN-C-S**

A NBR 5410:2004 exige que todas as unidades consumidoras atendidas pela rede pública de distribuição em baixa tensão tenham o neutro aterrado nas origens das respectivas instalações, de modo a proporcionar um sistema de aterramento efetivo. Contudo, os esquemas

TN-C-S e TT são as duas configurações que tornam possível a aplicação da exigência.

Embora a norma NBR 5410:2004 não seja aplicável a iluminação pública, entende-se que a condição de aterramento do neutro reforça a eficiência dos aterramentos de proteção. Como apresentado no Capítulo 5, o esquema de aterramento TT para postes metálicos de iluminação é inviável devido a dificuldade em obter baixas resistências de aterramento em solos com alta resistividade ou a obrigatoriedade da utilização de dispositivo DR. Tendo em vista a exclusão dos esquemas IT e TT devido a fatores técnicos mencionados, é proposto um esquema de aterramento TN-C-S para os postes metálicos de iluminação.

### 6.2.2 Barramento de equipotencialização

No esquema TN-C-S, o percurso da corrente de falta fase-massa possui baixa impedância, devido a natureza condutiva dos elementos metálicos como fios e cabos. Na prática, a norma admite que no quadro de origem do circuito terminal que alimenta as massas seja realizada uma ligação equipotencial como ponto de referência.

Tendo o quadro de comando como origem da instalação, a equipotencialização será realizada com o barramento de cobre, exemplificado na Figura 76.

**Figura 76:** Quadro de comando com barramento de equipotencialização



### 6.2.3 Aterramento principal

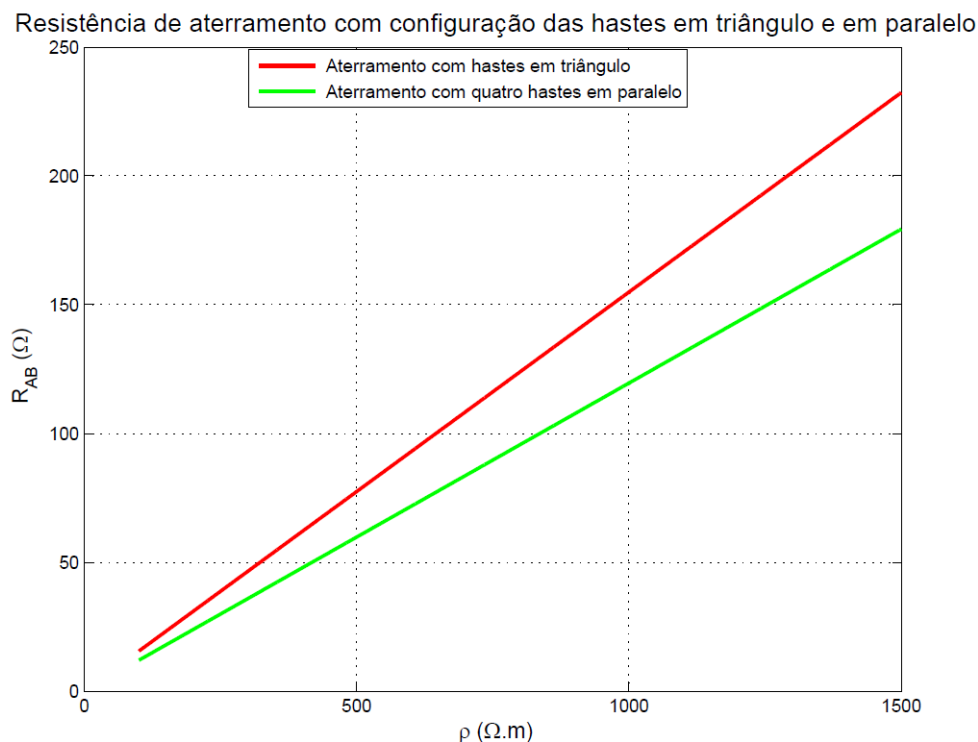
O aterramento conectado ao barramento deve ser obtido por meio do conjunto de hastes interligadas em triângulo equilátero ou do conjunto de quatro hastes interligadas em paralelo, conforme Figura 45. Para hastes de  $\frac{5}{8}$ " considera-se os seguintes parâmetros:

**Figura 77:** Parâmetros das hastes de aterramento

Parâmetros	m
L	2,4
s	2,2*L
2a	0.015

As curvas apresentadas na Figura 78, mostram a relação entre a resistência do aterramento e a resistividade do solo.

**Figura 78:** Resistência de aterramento com configuração das hastes em triângulo e em paralelo



Considerando a resistividade do solo como 1000  $\Omega.m$ , as resistências de aterramento para as configurações das hastes em triângulo e em paralelo, são, respectivamente 155  $\Omega$  e 120  $\Omega$ .

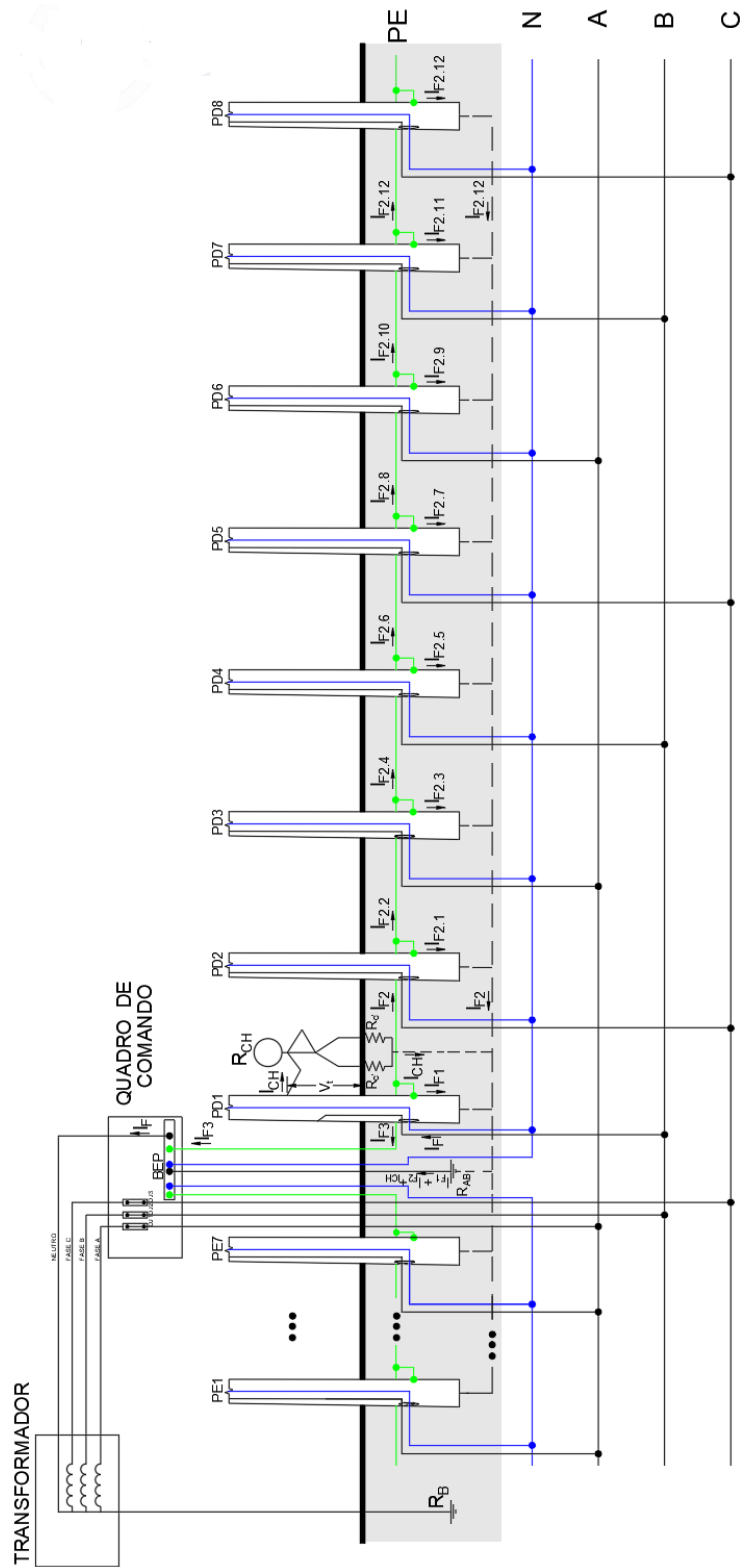
A configuração definida deve proporcionar menor resistência, entretanto a disponibilidade de espaço é outro fator importante a ser analisado.

#### **6.2.4 Aterramento múltiplo**

A norma NBR 5410:2004 recomenda que seja realizado o aterramento dos condutores de proteção sempre que for possível. Com isso o aterramento múltiplo é uma prática que, em caso de falha, assegura que o potencial das massas se aproxime ao máximo do potencial da terra.

Considerando que todos os postes alimentados por um mesmo quadro de comando possuem a profundidade de engastamento como eletrodo natural de aterramento, a eficiência do esquema TN é potencializada se houver interligação entre eles, através do condutor de proteção. Na Figura 79, é apresentado o percurso da corrente de falha em um esquema de aterramento TN-C-S aplicado aos postes metálicos.

**Figura 79:** Sistema de iluminação pública multi-aterrado com esquema TN-C-S



Onde:

$R_A$ : Resistência de aterramento do secundário do transformador;

$R_{AB}$ : Resistência de aterramento do quadro de comando;

$R_{CH}$ : Resistência do corpo humano;

A, B, C: Condutores de fase - Fase A, Fase B e Fase C, seccionadas por disjuntor monopolar;

N: Condutor neutro;

PE: Condutor de proteção;

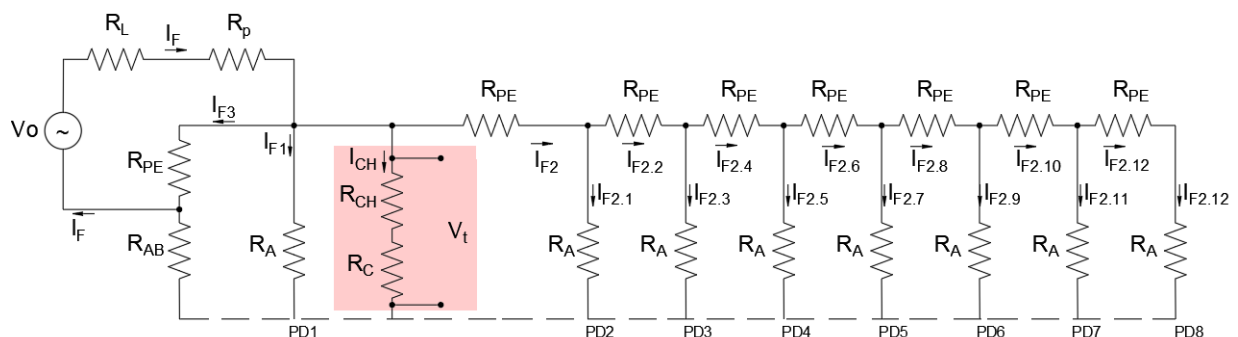
$I_{Fx}$ : Corrente de falta em seu respectivo ramo.

$I_{CH}$ : Corrente de choque elétrico.

Observa-se que é uma prática comum que metade dos postes alimentados pelo circuito originado no quadro sejam instalados a direita do quadro e outra metade a esquerda, fazendo com que a corrente de alimentação das luminária se divida próximo a origem e que a queda de tensão no condutor seja reduzida.

Na Figura 80 é apresentado o circuito equivalente do aterramento múltiplo TN-C-S, considerando uma falha fase massa e o contato da vítima de choque elétrico ao poste energizado.

**Figura 80:** Tensão de toque no sistema multi-aterrado com esquema TN-C-S



Onde:

$R_A$ : Resistência de aterramento do poste como eletrone natural ( $\Omega$ );

$R_{PE}$ : Resistência do condutor de proteção ( $\Omega$ );

$R_L$ : Resistência do condutor de fase ( $\Omega$ );

$R_p$ : Resistência do poste ( $\Omega$ );

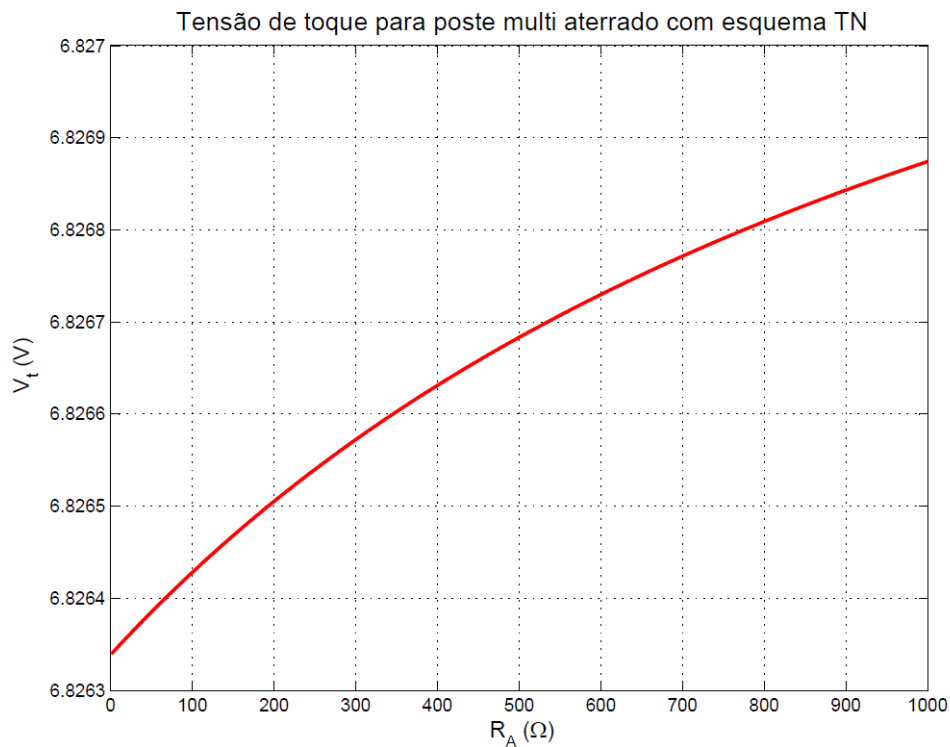
Os valores das resistências que fazem parte do percurso da corrente de falta são apresentados na Figura 81. O condutor de proteção utilizado é de cobre com seção nominal de  $16\text{mm}^2$ .

**Figura 81:** Resistências presentes no percurso da corrente de falta ( $\Omega$ )

$R_L$	$R_{PE}$	$R_P$	$R_{AB}$	$R_A$	$R_{CH}$	$R_C$
0.028	0.85	155	300	3000	1000	

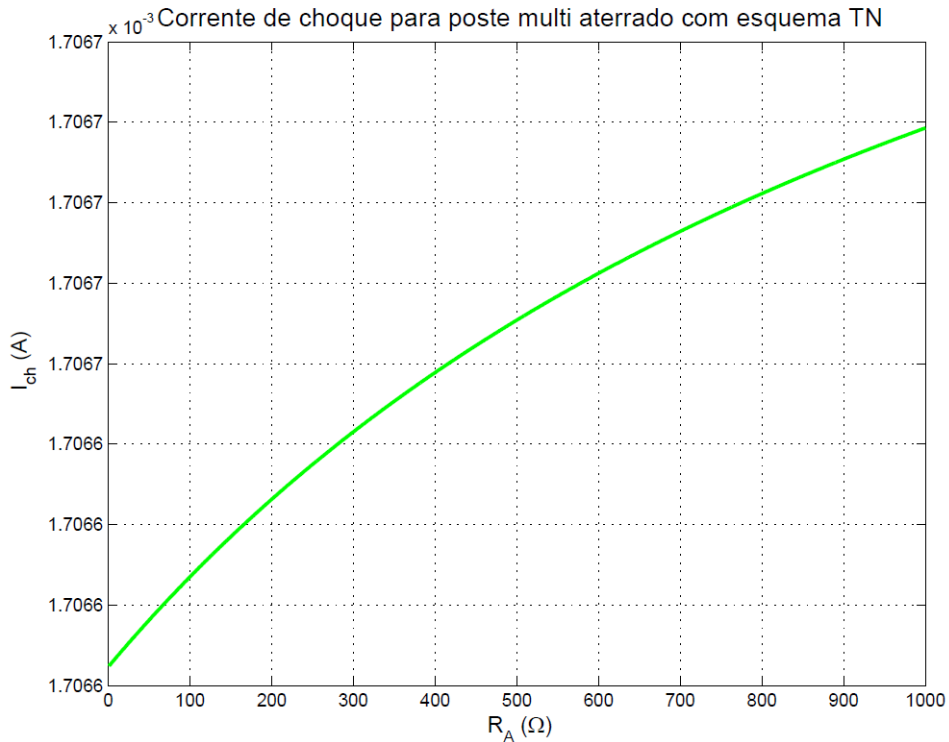
A tensão de toque ( $V_t$ ), apontada na Figura 80 como a região em vermelho, em função da variação da resistência do aterramento ( $R_A$ ) do ponto de referência é retratado da Figura 82.

**Figura 82:** Corrente de choque elétrico no sistema multi-aterrado com esquema TN-C-S



A corrente de choque elétrico ( $I_{CH}$ ) em função da variação da resistência do aterramento ( $R_A$ ) do ponto de referência é retratado da Figura 83.

**Figura 83:** Circuito equivalente do sistema multi-aterrado com esquema TN-C-S



Dado que a resistência de aterramento do poste proveniente do engastamento ( $R_A$ ) medida pelo método da queda de tensão no Capítulo 5 é  $300 \Omega$ , a tensão de toque e a corrente de choque elétrico encontrada no gráfico é, respectivamente,  $6,82V$  e  $1,7mA$ . De acordo com a Figura 2, corrente choque elétrico abaixo de  $25mA$ , tendo o corpo humano como percurso, causam reações fisiológicas como sensação de formigamento e contração muscular. Considerando a Figura 3 a corrente de choque está abaixo do início de percepção para  $99,5\%$  das pessoas.

Observa-se que a variação da tensão de toque e da corrente de choque elétrico é mínima. Esse resultado demonstra que mesmo que a resistência de aterramento do poste ( $R_A$ ) se altere ao longo do ano, devido as variações de umidade e compacidade, o sistema TN-C-S continua sendo eficaz na proteção contra choques elétrico.

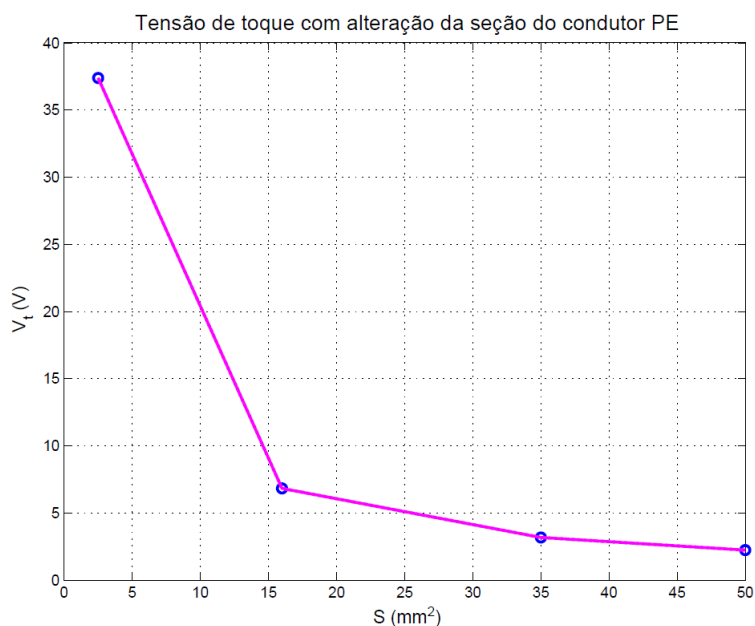
### 6.2.5 Seção do condutor de proteção

A tensão de toque e a corrente de choque elétrico no esquema TN-C-S foram reduzidas em torno de, respectivamente, 31 e 35 vezes se comparada com os mesmos no esquema TT. Esse melhoria se deve a baixa resistência do condutor de proteção, que proporciona um caminho mais favorável para que a corrente de falta retorne a fonte. Na Figura 84 é mostrada



a tensão de toque no poste multi-aterrado considerando o aumento da seção do condutor de proteção.

**Figura 84:** Tensão de toque em poste TN-C-S multiaterrado em relação a seção do condutor de proteção



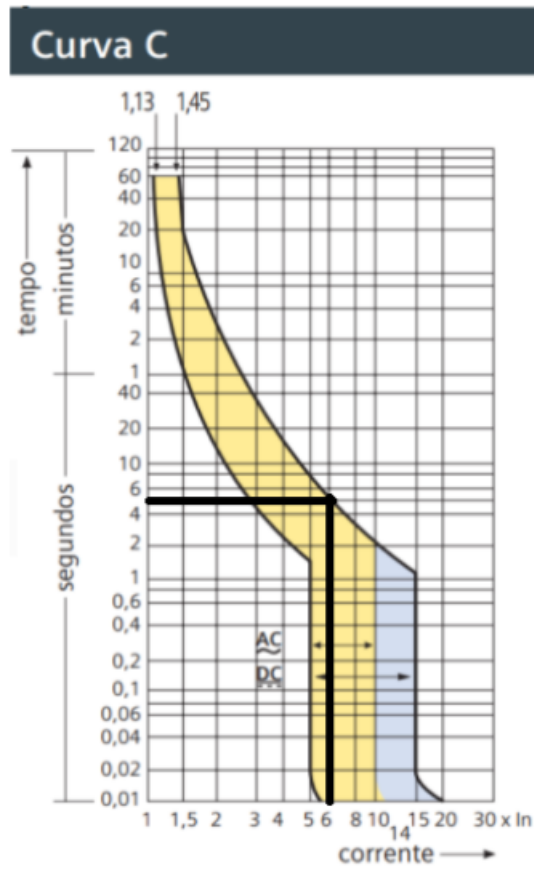
Analisando a curva é possível observar que tensão de toque reduz a medida que a seção do condutor de proteção aumenta, isto é, os perigos associados ao choque elétrico diminui com o aumento da seção do condutor de proteção.

### 6.2.6 Condição de proteção do esquema TN-C-S

A condição necessária para empregar o esquema TN, admitindo falta fase-massa é dado na Equação 13. A impedância  $Z_S$  é composta pela resistência do condutor de fase ( $R_L$ ) e pela impedância do condutor de proteção ( $Z_{PE}$ ).

Como referência, na Figura 85, é apresentada a curva característica do disjuntor de 40A, curva C, da empresa Schneider Electric™.

**Figura 85:** Curva característica do disjuntor de 40A curva C



Considerando o tempo máximo de seccionamento como 5s, a corrente de atuação é 6 vezes a corrente nominal, isto é, 240A. A impedância  $Z_s=0,90\Omega$  é a resistências do percurso da corrente de falta, fornecida pela resistência total do circuito equivalente apresentado na Figura 80.

$$Z_s * I_n = 216 \quad (37)$$

Como a relação é menor que 220V, a condição de atuação do dispositivo de sobrecorrente é satisfeita.

A baixa tensão de toque e corrente de choque elétrico associado ao validação da condição de atuação do dispositivo de sobrecorrente admite a aplicação do sistema de aterramento proposto para a proteção das pessoas contra choque elétrico em postes metálicos na iluminação pública.

## **7 CONCLUSÕES**

No cenário atual de adensamento populacional das cidades, a iluminação pública torna-se cada vez mais requisitada visando a segurança e a harmonia com as ruas e as edificações. No contexto da prevenção contra choque, a modernização das luminárias com LEDs e comandos eletrônicos de acionamentos não reduz a tensão elétrica de alimentação que apresenta valores de riscos de choque nos postes metálicos sem aterramentos adequados.

Este trabalho mostrou a situação de postes metálicos engastados como aterramento natural, sem aterramentos dedicados, com valores de resistência considerados altos para efeito das proteções exigidas por normas técnicas.

Propostas de adequação de esquemas de aterramentos foram simulados, verificando-se altos riscos de choque elétrico e criação de potenciais de elevação de corrente de terra quando considerados tão somente os aterramentos naturais dos postes fincados no solo.

Na proposta de segurança apresentada, um sistema de aterramento é efetuado para criação de um barramento de equipotencialização principal no quadro de comando das luminárias dos postes e, assim, criado e disponibilizado o condutor de proteção (PE) para conexão direta aos metais de cada poste. Correntes de fuga, nessa configuração, são conduzidas pelo PE até o quadro de comando sem a criação de potenciais perigosos nas partes metálicas dos postes.

Comprovado pelos cálculos, um aterramento próximo do quadro de comando e a ligação equipotencial para cada poste, sem a necessidade de aterramentos adicionais por poste, reduziu sobremaneira os níveis de tensão de risco de choque por toques em caso de falta elétrica.

### **7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Como trabalhos futuros, propõem-se pesquisas das instalações elétricas de suportes metálicos de sinalização semaforica, por sua exposição aos transeuntes urbanos e os riscos de choque elétrico.

Salientam-se, também, como trabalho futuro, análises dos alambrados de quadras de recreação e praças públicas.

As medições de campo e aprofundamento da literatura complementam os trabalhos de pesquisa em busca da prevenção de acidentes elétricos.

## Referências

- [1] SANTAELLA, L. *Percepção fenomenologia ecologia semiótica*. 1ª. ed. 2011.
- [2] LUCIA, F. L. D. *Iluminação pública história, tecnologia, cálculo e regulamentação*. 1ª. ed. 2018.
- [3] ABNT. *NBR 5101:2018 - Iluminação pública - procedimento*, 3ª. ed., 2018.
- [4] ROSITO, L. H. *Desenvolvimento da iluminação pública no brasil*, 2009.
- [5] LER+DIGITAL. *Tesla x edison: A guerra das correntes*.
- [6] ABRACOPEL. *Anuário estatístico de acidentes de origem elétrica*, 2020.
- [7] MATOS, W. <https://jornaldebrasil.com.br/cidades/jovem-de-18-anos-morre-apos-choque-eletrico-em-quadra-de-esportes/>.
- [8] GLOBOPLAY. <https://globoplay.globo.com/v/8235189/>.
- [9] DURÁN, J. E. R. *Biofísica - fundamentos e aplicações*. 1ª. ed. 2003.
- [10] A M B COTRIM, A. *Instalações elétricas*.
- [11] KINDERMANN, G. *Choque elétrico*. 2ª. ed. 2000.
- [12] VIANA, M. J.; DOS SANTOS FERREIRA, S. *Proteção contra choques elétricos em canteiros de obras*, 2018.
- [13] WILLIAM H. HAYT, J. *Eletromagnetismo*. 6ª. ed. 2003.
- [14] IEEE. *STD 80 - Guide for safety in ac substation grounding*, 2ª. ed., 2013.
- [15] IEC. *60479-1:2018 - Effects of current on human beings and livestock - part 1: General aspects*, 2018.
- [16] FILHO, S. V. *Aterramentos elétricos*. 1ª. ed. 2005.
- [17] ABNT. *NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão*, 2ª. ed., 2004.
- [18] CEB. *NTD 3.09 - Especificação de materiais e equipamentos de iluminação pública*, 2ª. ed., 2013.
- [19] ABNT. *NBR 14744:2001 - Poste de aço para iluminação*, year = 2001, edition = "1ª"

- [20] ABNT. NM 87:2000 - Aço carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química, 1ª. ed., 2000.
- [21] ABNT. NBR 3.38 - Luminárias para iluminação pública, 2ª. ed., 2013.
- [22] CRUZ, C. <https://segov.df.gov.br/em-dois-anos-todo-o-df-sera-iluminado-por-led/>.
- [23] CEB. NTIP 1.01 - Especificações e homologação de luminárias led, 2ª. ed., 2017.
- [24] ABNT. NBR 15749 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento, 1ª. ed., 2009.
- [25] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento elétrico. 5. ed. 1995.
- [26] ABNT. NBR 7117:2012 - Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, 2012.
- [27] DE AQUINO, F. R. *Estudo comparativo entre a resistividade elétrica e características geotécnicas de um solo argiloso compactado*, 2010.
- [28] CARDOSO, J. R. Engenharia eletromagnética. 1ª. ed. 2011.
- [29] KAISER, K. L. Electromagnetic compatibility handbook. 1ª. ed. 2004.
- [30] ABNT. NBR 15751 - Sistemas de aterramento de subestações - requisitos, 1ª. ed., 2013.
- [31] MEGABRAS. Guia do usuário - terrômetro digital megabras mtd-20kwe, 2003.
- [32] CRUZ, C. <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2020/09/19/inmet-preve-possibilidade-de-chuva-no-df-durante-fim-de-semana.ghtml>.