



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTRUTURAS METÁLICAS URBANAS NÃO
DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA:
Uma análise da importância do aterramento na
prevenção contra choque elétrico**

Matheus Queiroz Monteiro

Brasília, setembro de 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**ESTRUTURAS METÁLICAS URBANAS NÃO
DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA:
Uma análise da importância do aterramento na
prevenção contra choque elétrico**

Matheus Queiroz Monteiro

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

Data defesa: 12/09/2024

Banca examinadora

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

Prof. Dr. Leonardo R.A.X. Menezes, UnB/ENE
Examinador interno

Prof. Dr. Kleber Melo e Silva, UnB/ENE
Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

MONTEIRO, Matheus Queiroz

ESTRUTURAS METÁLICAS URBANAS NÃO DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA:

Uma análise da importância do aterramento na prevenção contra choque elétrico. [Distrito Federal] 2024.

56 p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2024).

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

1. Estruturas metálicas

2. Sistema de aterramento

3. Choque Elétrico

4. Prevenção de acidentes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MONTEIRO, M.Q. (2024). ESTRUTURAS METÁLICAS URBANAS NÃO DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA: Uma análise da importância do aterramento na prevenção contra choque elétrico. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Matheus Queiroz Monteiro

TÍTULO: ESTRUTURAS METÁLICAS URBANAS NÃO DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA: Uma análise da importância do aterramento na prevenção contra choque elétrico.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2024.

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.

Matheus Queiroz Monteiro

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) – FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 – Brasília – DF – Brasil

Dedicatória

Aos meus pais, Cecília e Nosley, pelo amor incondicional e por sempre terem me apoiado minhas decisões com relação aos estudos, por nunca medirem esforços na minha educação e formação profissional. Aos meus padrinhos Helena e Álvaro, que me mostraram como a formação profissional é importante. À minha tia Carmem, por ter permitido que eu morasse em sua casa durante parte da graduação, tornando minha jornada menos cansativa. Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e me encorajaram a conquistar meus sonhos.

Matheus Queiroz Monteiro

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de Brasília, por me oferecer um ambiente repleto de oportunidades, onde pude evoluir como estudante e como pessoa. Aos amigos que fiz durante o curso, tornando o ambiente universitário muito mais engraçado e leve nos momentos mais difíceis. Agradeço especialmente ao meu orientador, pela sua experiência, ensinamentos técnicos desde o momento em que nos conhecemos, pelo apoio na elaboração deste trabalho e pela paciência.

Matheus Queiroz Monteiro

*“Talvez eu não tenha conseguido fazer o melhor, mas
lutei para que o melhor fosse feito. Não sou
o que deveria ser, mas felizmente,
não sou o que era antes”*

(Martin Luther King)

RESUMO

Em ambientes urbanos é comum encontrar um grande número de estruturas metálicas que desempenham diversos tipos de funções, como para atender a algum serviço público (quadra de esportes em uma praça) ou apenas como estética e identificação de um prédio. Essas estruturas, que podem ser projetadas para atender algum tipo de instalação elétrica, como torres de linhas de transmissão, mostra a importância dos trabalhos feitos pelo ser humano para atender as necessidades do próprio ser humano. No caso de estruturas que não foram feitas para atender as necessidades de instalações elétricas, é necessário verificar todos os cuidados de segurança para que a admiração por essas construções não seja ofuscada por notícias trágicas. A falta de proteção, como um sistema de aterramento, pode transformar essas estruturas em potenciais fontes de choque elétrico, colocando em risco a segurança da população.

Devido a ocorrência de acidentes com eletricidade, em estruturas não destinadas a instalação elétrica, como paradas de ônibus, *food truck*, bebedouros e alambrados, mas que, por algum motivo, tornaram-se pontos energizados mostra que alguns procedimentos de segurança não estão sendo respeitados de acordo com as normas vigentes. Este trabalho apresenta dados de medições e possíveis soluções para que tais acidentes sejam evitados.

Palavras-chave: Estruturas metálicas; Sistema de aterramento; Choque elétrico; Prevenção de acidentes.

ABSTRACT

In urban environments, it is common to find a large number of metal structures that perform various functions, such as serving some type of public service or simply as an aesthetic feature in a building. These structures, which can be designed to serve some type of electrical installation (such as transmission line towers), show how great the work done by human beings can be. In the case of structures that were not made to meet the needs of electrical installations, it is necessary to check all safety precautions so that the admiration for these constructions is not overshadowed by tragic news. The lack of protection, such as a grounding system, can transform these structures into potential sources of electric shock, putting the safety of the population at risk.

Due to the occurrence of accidents involving electricity in structures not intended for electrical installations, such as bus stops, food trucks, drinking fountains and fences, but which, for some reason, have become energized points, it shows that some safety procedures are not being respected in accordance with current standards. This work presents measurement data and possible solutions to prevent such accidents.

Keywords: Metal structures; Grounding system; Electric shock; Accident prevention.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	2
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1	SISTEMA DE ATERRAMENTO	3
2.1.1	<i>Tensão de contato ou de toque</i>	4
2.1.2	<i>Tensão de passo</i>	5
2.2	RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO.....	7
2.2.1	<i>Resistência de um sistema de aterramento</i>	7
2.2.2	<i>Resistividade do solo</i>	8
2.3	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	12
2.3.1	<i>Descarga direta</i>	13
2.3.2	<i>Descarga indireta</i>	14
3	CONSEQUÊNCIAS DO CHOQUE ELÉTRICO AO CORPO HUMANO	16
3.1	NOÇÕES BÁSICAS DE NEURÔNIOS.....	16
3.2	POTENCIAL DE AÇÃO	18
3.3	EFEITOS DO CHOQUE ELÉTRICO.....	23
3.3.1	<i>Tetanição</i>	25
3.3.2	<i>Limite de largar</i>	26
3.3.3	<i>Queimaduras</i>	27
3.3.4	<i>Fibrilação ventricular</i>	27
3.3.5	<i>Parada cardíaca e respiratória</i>	28
3.4	PROTEÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO	28
4	CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NÃO DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA.....	29
4.1	ESTRUTURA METÁLICA DE EDIFICAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	29
4.2	ESTRUTURA METÁLICA PARA COMPLEMENTAÇÃO DE EDIFICAÇÃO (JANELAS METÁLICAS).....	31
4.3	ESTRUTURA METÁLICA PARA SUPORTE DE INSTALAÇÃO ELÉTRICA.....	31
4.4	ESTRUTURA METÁLICA EXCLUSIVA PARA EQUIPAMENTO ELÉTRICO	32
4.5	EXEMPLOS DE ESTRUTURAS METÁLICAS PÚBLICAS NÃO DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA	33
4.6	PONTOS DE PARADA DE PASSAGEIROS DO DISTRITO FEDERAL.....	34
5	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	36
5.1	MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL	36

5.2	MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE	37
5.3	TESTE DE CONTINUIDADE DO SISTEMA.....	39
5.4	LOCAL DE MEDIÇÃO.....	40
6	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	41
6.1	ANÁLISE DO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL.....	41
6.2	ANÁLISE DA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE	45
6.3	ANÁLISE DO TESTE DE CONTINUIDADE	46
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 INDIVÍDUO SUJEITO À TENSÃO DE TOQUE (ESQUERDA) E DIAGRAMA ELÉTRICO EQUIVALENTE (DIREITA).	4
FIGURA 2.2 TENSÃO DE PASSO DE UM RAIO.	5
FIGURA 2.3 INDIVÍDUO SUJEITO À TENSÃO DE PASSO (ESQUERDA) E DIAGRAMA ELÉTRICO EQUIVALENTE (DIREITA).	6
FIGURA 2.4 VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE DE SOLOS (ADAPTADO).	9
FIGURA 2.5 CONFIGURAÇÃO DO ARRANJO DE WENNER.	10
FIGURA 2.6 NÚMERO DE LINHAS DE MEDIÇÃO PARA TERRENOS COM ÁREA MENOR OU IGUAL A 1000 M ²	11
FIGURA 2.7 TRAJETÓRIA DE UM RAIO PASSANDO ENTRE NUENS.	13
FIGURA 2.8 DESCARGA DIRETA SOBRE VÍTIMA.	13
FIGURA 2.9 DESCARGA ATMOSFÉRICA ATINGINDO O SOLO E ONDA ELETROMAGNÉTICA IRRADIADA PELA CORRENTE DE RETORNO.	14
FIGURA 2.10 ANIMAL SUBMETIDO A DIFERENÇA DE POTENCIAL DEVIDO À INCIDÊNCIA DE UMA DESCARGA PRÓXIMA.	15
FIGURA 3.1 ESTRUTURA BÁSICA DE UM NEURÔNIO OU CÉLULA NERVOSA.	17
FIGURA 3.2 ESQUEMA REPRESENTATIVO DO FUNCIONAMENTO ELÉTRICO DE UM NEURÔNIO.	17
FIGURA 3.3 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA NERVOSO.	18
FIGURA 3.4 EFEITO DE UMA DESPOLARIZAÇÃO Φ SOBRE UMA BIOMEMBRANA COM POTENCIAL LIMAR Φ_L	19
FIGURA 3.5 FORMA TÍPICA DO POTENCIAL DA MEMBRANA DE UMA CÉLULA NERVOSA QUANDO SE ORIGINA UM POTENCIAL DE AÇÃO.	20
FIGURA 3.6 A PROPAGAÇÃO DE UM POTENCIAL DE AÇÃO.	21
FIGURA 3.7 A DESPOLARIZAÇÃO NO LOCAL X_0 DE UM AXÔNIO.	21
FIGURA 3.8 EFEITO DE ESTÍMULOS DE TENSÕES CRESCENTES PARA PROVOCAR POTENCIAL DE AÇÃO.	22
FIGURA 3.9 INTENSIDADE E DURAÇÃO DO FLUXO DE CORRENTE ALTERNADA ENTRE MÃOS E PÉS DO CORPO HUMANO.	23
FIGURA 3.10 IMPEDÂNCIAS PARCIAIS INTERNAS DO CORPO HUMANO (PORCENTAGEM) EM RELAÇÃO AO TRAJETO DA MÃO ATÉ OS PÉS.	25
FIGURA 3.11 FREQUÊNCIA DA SOMAÇÃO E TETANIZAÇÃO.	26
FIGURA 4.1 ESTRUTURA METÁLICA DE EDIFICAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.	30
FIGURA 4.2 JANELA METÁLICA, ESTRUTURA FEITA PARA COMPLEMENTAÇÃO DE EDIFICAÇÃO.	31
FIGURA 4.3 ELETROCALHA COM ATERRAMENTO NO LABORATÓRIO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS - UNB.	32
FIGURA 4.4 QUADRO GERAL DE DISTRIBUIÇÃO COM ATERRAMENTO NAS DUAS PORTAS.	33
FIGURA 4.5 ALAMBRADO DE PROTEÇÃO PARA QUADRA DE ESPORTES.	34
FIGURA 4.6 PONTO DE PARADA PARA PASSAGEIROS COM PLACA.	35
FIGURA 4.7 PONTO DE PARADA PARA PASSAGEIROS DE ÔNIBUS COM ABRIGO.	35
FIGURA 5.1 MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL APLICADO A UMA MALHA DE ATERRAMENTO.	36
FIGURA 5.2 CURVA CARACTERÍSTICA TEÓRICA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM ELETRODO PONTUAL.	37
FIGURA 5.3 ARRANJO ESQUEMÁTICO PARA O MÉTODO DE WENNER.	38
FIGURA 5.4 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO PELO MÉTODO DE WENNER.	38
FIGURA 5.5 KIT LIMITADOR DE CORRENTE.	39
FIGURA 5.6 ABRIGO DE PASSAGEIROS EM FRENTE A FACULDADE DE TECNOLOGIA - UNB.	40

FIGURA 5.7 VISTA AÉREA DO LOCAL DE MEDIÇÃO.	40
FIGURA 6.1 TERRÔMETRO MEGABRAS MTD 20KWe	41
FIGURA 6.2 PONTO INICIAL DA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	42
FIGURA 6.3 MEDIÇÃO NA DIREÇÃO NORTE.	43
FIGURA 6.4 MEDIÇÃO NA DIREÇÃO OESTE.....	43
FIGURA 6.5 RESISTÊNCIA MEDIDA A PARTIR DO DESLOCAMENTO DOS ELETRODOS.	44
FIGURA 6.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DO ABRIGO PARA PASSAGEIROS DE ÔNIBUS. ...	44
FIGURA 6.7 VALORES DE RESISTIVIDADE ENCONTRADOS.	45
FIGURA 6.8 CIRCUITO EQUIVALENTE DO KIT LIMITADOR DE CORRENTE.	46
FIGURA 6.9 TESTE COM A FURADEIRA LIGADA DIRETO NA REDE DA CONCESSOÁRIA.....	47
FIGURA 6.10 TESTE COM A FURADEIRA LIGADA NO SISTEMA DE ATERRAMENTO DO ABRIGO.	47
FIGURA 6.11 REPRESENTAÇÃO DA PARADA DE ÔNIBUS EM FORMA DE CIRCUITO ELÉTRICO.	48
FIGURA 6.12 CIRCUITO ELÉTRICO APRESENTANDO AS RESISTÊNCIAS DE MALHA E SOLO.....	48
FIGURA 6.13 PRIMEIRA MEDIÇÃO, UTILIZANDO APENAS A FURADEIRA.....	49
FIGURA 6.14 SEGUNDA MEDIÇÃO, EM QUE FOI ADICIONADA A IMPEDÂNCIA DA ESTRUTURA METÁLICA.	49
FIGURA 6.15 SIMULAÇÃO DE POSSÍVEL EXPOSIÇÃO A CHOQUE ELÉTRICO. À ESQUERDA, POSIÇÃO DO LOCAL DE ENERGIZAÇÃO; À DIREITA, REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO NO MOMENTO DO CONTATO DE UMA PESSOA.	50
FIGURA 6.16 REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO COM AS RESISTÊNCIAS DE CONTATO E DO CORPO HUMANO.	51
FIGURA 6.17 CIRCUITO EQUIVALENTE.....	52

OBS.: AS FIGURAS SEM CITAÇÃO DE REFERÊNCIA SÃO DO PRÓPRIO AUTOR.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
BEN	Balanco Energético Nacional
BEP	Barramento de equipotencialização
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
DR	Dispositivo Diferencial Residual
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Técnica Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
SPDA	Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

1 INTRODUÇÃO

No início da civilização, as estruturas eram predominantemente compostas por materiais naturais disponíveis localmente, como pedra e madeira. Construções da Grécia antiga, do império romano e as catedrais góticas da Europa mostram o uso engenhoso desses materiais, onde a durabilidade e a estética foram equilibradas com as limitações tecnológicas da época. Com o advento da revolução industrial no século XVIII, surgiram novas possibilidades com o uso de ferro fundido e, posteriormente, aço, permitindo a construção de edificações maiores.

A transição para o uso de estruturas metálicas representou um marco significativo na engenharia, possibilitando construções mais resistentes e com maior liberdade de *design*. As vantagens do aço, como alta resistência à tração, flexibilidade e durabilidade, revolucionaram o modo como se concebem e se constroem edifícios e outras infraestruturas.

Em ambientes urbanos, a presença de estruturas metálicas é inevitável e, muitas vezes, necessária para a infraestrutura e o bem-estar da população. As características dessas estruturas e as condições ambientais às quais estão expostas podem torná-las suscetíveis a eletrificações acidentais e representar um risco significativo para a segurança pública em situações onde há exposição a descargas elétricas acidentais, como raios ou falhas na rede elétrica. Há registros de pessoas que foram vítimas de choque elétrico que fizeram contato com postes de iluminação.

Esses elementos, quando não devidamente aterrados, podem se tornar potenciais fontes de risco elétrico. Nesse contexto, a implementação de um sistema de aterramento eficaz se torna uma medida preventiva para mitigar riscos de choques elétricos.

A motivação para este trabalho se dá a partir de casos em que pessoas foram vítimas de choques elétricos ao tocarem em estruturas metálicas que foram acidentalmente energizadas por estarem próximas à postes de energia, como em julho de 2024 em que duas pessoas foram vítimas de choque elétrico ao encostarem em uma parada de ônibus em Porto de Galinhas [1].

1.1 Objetivo

Neste trabalho serão analisadas as características e os desafios específicos das estruturas metálicas públicas, em particular, paradas de ônibus, para a sua proteção. A pesquisa também buscará destacar a importância do cumprimento das normas vigentes e a aplicação de boas práticas de engenharia para garantir a segurança e o bem-estar da população.

A contribuição deste trabalho consiste em um entendimento mais aprofundado sobre as melhores práticas de aterramento de estruturas metálicas, visando a prevenção de choques elétricos e a proteção dos cidadãos em ambientes públicos.

1.2 Estruturação do trabalho

Depois de uma breve abordagem sobre o tema neste capítulo, o trabalho abordará no capítulo 2 normas vigentes sobre aterramento, resistência de aterramento e resistividade.

No capítulo 3 serão apresentados conceitos sobre choque elétrico, os efeitos pelo corpo humano e consequências à sua exposição a partir de uma fonte externa.

Será apresentado no capítulo 4 de forma breve as características de estruturas de sustentação, com foco em estruturas metálicas que não têm como objetivo serem energizadas.

O capítulo 5 apresenta os procedimentos experimentais, bem como o local escolhido para o estudo deste trabalho.

A partir dos dados coletados, o capítulo 6 irá apresentar a análise dos dados coletados e também uma comparação com dados das normas vigentes.

Por fim, as conclusões finais e sugestões para estudos futuros sobre o tema em questão no capítulo 7, para que assim, outros trabalhos complementem toda a análise feita ao longo do presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Instalações elétricas não feitas de forma adequada apresentam um grande risco à segurança das pessoas. A falta de conformidade com as normas técnicas vigentes (NBR 5410 e NR 10) pode resultar em acidentes elétricos fatais ou danos a equipamentos. As penalidades e punições por instalações elétricas mal feitas podem ser desde notificações, multas e, em casos mais graves sanções penais. Dessa forma, uma boa prática para garantir a segurança contra choques elétricos é o sistema de aterramento.

2.1 Sistema de aterramento

Toda instalação elétrica, seja de baixa ou alta tensão, para funcionar com desempenho satisfatório e ser suficientemente segura contra riscos de acidentes, deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto [2]. Dessa forma, devem ser aterradas todas as partes metálicas que possam eventualmente ter contato com partes energizadas. Assim, um sistema de aterramento deve-se providenciar uma sólida ligação às partes metálicas de equipamentos e estruturas [3].

Um sistema de aterramento visa à [2]:

- Segurança de atuação da proteção;
- Proteção das instalações elétricas contra descargas atmosféricas;
- Proteção do indivíduo contra contatos com partes metálicas da instalação caso tenham sido energizadas acidentalmente;
- Uniformização do potencial em todo o equipamento ou estrutura.

Assim, o conceito de aterramento envolve necessariamente algum tipo de contato das massas e elementos condutores com o solo, visando levar todos os componentes do sistema de aterramento a ficar no potencial mais próximo possível do solo [4].

A corrente que entra no sistema de aterramento se dispersa no solo, gerando tensões elétricas que podem provocar choques elétricos se aplicadas ao ser humano (tensão de toque e tensão de passo) [4].

2.1.1 Tensão de contato ou de toque

É a diferença de potencial entre a estrutura metálica (massa) que está situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura [5]. A Figura 2.1 mostra as condições de um indivíduo submetido a uma tensão de toque.

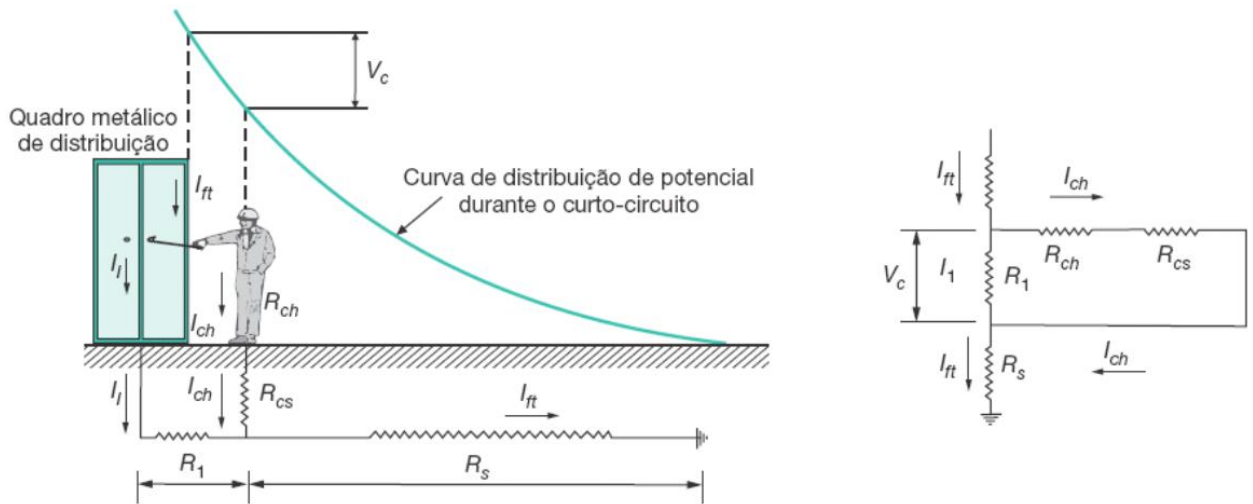


Figura 2.1 Indivíduo sujeito à tensão de toque (esquerda) e diagrama elétrico equivalente (direita) [2].

Ao aplicar a lei de Ohm ao circuito, temos [3]:

$$V_c = (R_{ch} + R_{cs}) \cdot I_{ch} \quad (2.1)$$

Onde:

- I_{ft} : corrente de curto circuito fase e terra;
- I_{ch} : corrente de choque;
- R_{ch} : resistência do corpo humano considerada 1000Ω ;
- R_s : resistência do solo;
- R_{cs} : resistência de contato resultante de cada pé com o solo;

- V_c : tensão de contato.

De acordo com a recomendação da *IEEE-80*, a resistência de contato pode ser considerada como:

$$R_{cs} = 3\rho_s \quad (2.2)$$

em que ρ_s é a resistividade superficial do solo.

Dessa forma, pode-se considerar a expressão do potencial de contato como:

$$V_c = (1000 + 3\rho_s) \cdot I_{ch} \quad (2.3)$$

2.1.2 Tensão de passo

É a tensão que, durante o funcionamento de uma instalação de terra, pode aparecer entre os pés de uma pessoa dando um passo de abertura igual a 1 metro (Figura 2.2). Estas linhas equipotenciais se formam na superfície do solo quando à escoamento de corrente de curto circuito, ou quando há potencial devido a um raio que caiu no solo [5].

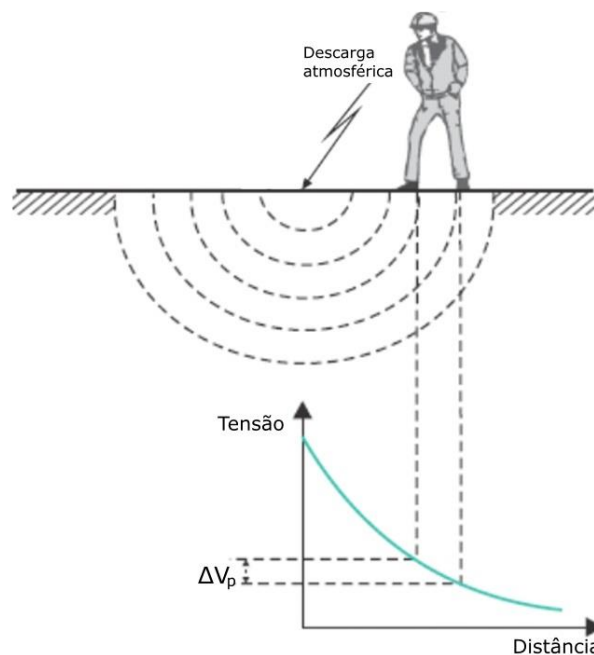


Figura 2.2 Tensão de passo de um raio [2].

A Figura 2.3 apresenta uma pessoa que pode sofrer algum efeito devido a tensão de passo perto de um quadro de distribuição.

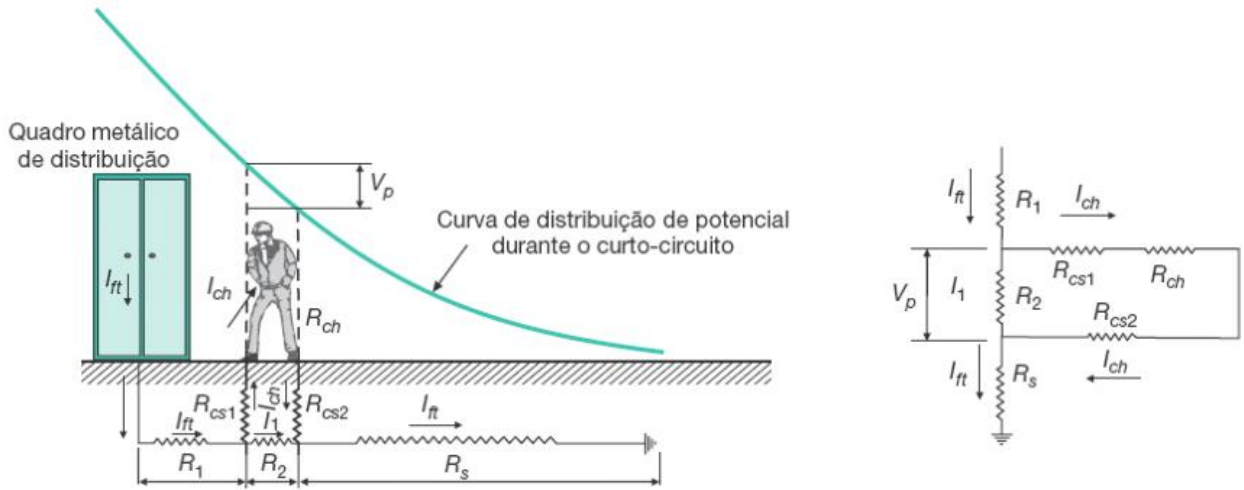


Figura 2.3 Indivíduo sujeito à tensão de passo (esquerda) e diagrama elétrico equivalente (direita) [2].

A expressão para o potencial de passo é [3]:

$$V_p = (R_{cs1} + R_{cs2} + R_{ch}) \cdot I_{ch} \quad (2.4)$$

Onde:

- R_{cs1} : resistência de contato do pé direito;
- R_{cs2} : resistência de contato do pé esquerdo;
- I_{ft} : corrente de curto circuito fase e terra;
- I_{ch} : corrente de choque;
- R_{ch} : resistência do corpo humano considerada 1000Ω ;
- R_s : resistência do solo;
- V_p : tensão de passo.

Ao considerar que uma pessoa possui a mesma resistência nos dois pés (ou seja, não considerando efeitos de próteses ou procedimentos cirúrgicos), encontramos que o potencial de passo pode ser considerado como:

$$V_p = (1000 + 6\rho_s) \cdot I_{ch} \quad (2.5)$$

Em condições análogas, a tensão de passo é maior quando comparado à tensão de toque, mas a partir de uma análise biológica, a tensão de toque se torna mais perigosa, devido ao percurso que a corrente elétrica faz pelo corpo passando pelo coração. As consequências fisiológicas causadas pela passagem de corrente elétrica no corpo humano serão apresentadas no capítulo 3.

2.2 Resistência e resistividade elétrica do solo

A NBR 15749 estabelece os critérios e métodos de medição de resistência de sistemas de aterramento e de potenciais na superfície do solo, bem como define as características gerais dos equipamentos que podem ser utilizados nas medições e os conceitos para avaliação dos resultados. A norma prevê também os cuidados que devem ser tomados quanto à segurança das pessoas.

A conexão com a terra apresenta impedância com componentes resistivas, capacitivas e indutivas. Porém, quando tratamos de correntes de baixa frequência (geralmente 60 Hz) a impedância se comporta praticamente de natureza resistiva.

2.2.1 Resistência de um sistema de aterramento

Em um sistema de aterramento, considera-se como resistência de terra o efeito de três resistências [2]:

- A resistência relativa às conexões existentes entre os eletrodos de terra (hastes e cabos).
- A resistência relativa ao contato entre os eletrodos de terra e a superfície do terreno.
- A resistência relativa ao terreno nas imediações dos eletrodos de terra, denominada, também, resistência de dispersão.

2.2.2 Resistividade do solo

O conhecimento das características do solo é de fundamental importância para o desenvolvimento de um projeto de aterramento. O conjunto de fatores que influenciam na resistividade do solo caracterizam-se como [3]:

- tipo de solo;
- composição química dos sais dissolvidos na água retida;
- concentração de sais dissolvidos na água retida;
- teor de umidade;
- temperatura;
- compactação e pressão;
- mistura de diversos tipos de solo;
- solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes;

A resistividade do solo pode ser definida como a oposição ao fluxo de corrente elétrica medida entre as faces opostas de um cubo com aresta de 1 metro e área de 1 m² preenchido com solo [6]. Sabe-se que a resistividade é dada por:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} [\Omega \cdot m] \quad (2.6)$$

em que,

- ρ : Resistividade do solo;
- R : Resistência elétrica;
- A : Área da face do cubo;
- l : Comprimento da aresta do cubo.

As diversas combinações de fatores resultam em solos com características diferentes e, como consequência, valores de resistividades distintos. Os solos que apresentam resistividade mais baixa são os que contém resíduos vegetais, os situados no fundo de vales e pantanosos.

Os de maior resistividade são os arenosos, rochosos e os situados em locais altos e desprovidos de vegetação [4]. A Figura 2.4 apresenta as resistividades típicas de alguns tipos de solo.

Natureza do solo	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Solos alagadiços/pantanosos	5 a 30
Lodo	20 a 100
Húmus	10 a 150
Argila plástica	50
Areia argilosa	50 a 500
Areia silicosa	200 a 3000
Solo pedregoso nu	1500 a 3000
Solo pedregoso com relva	300 a 500
Calcários moles	100 a 400
Calcários compactos	1000 a 5000
Xisto	50 a 300
Micaxisto	800
Granito/arenito	100 a 10000

Figura 2.4 Valores típicos de resistividade de solos [4] (Adaptado).

Segundo [7], existem alguns arranjos para verificar um conjunto de leituras tomadas com diferentes espaçamentos entre eletrodos em que, a partir dos valores obtidos, pode-se ter uma ideia da resistividade média do solo estudado e então decidir a forma mais adequada para fazer um sistema de aterramento.

Com diferentes valores típicos de resistividade do solo, é possível ter uma ideia do valor esperado. Dessa forma, o método de Wenner cumpre com o necessário para o estudo deste trabalho.

O arranjo de Wenner consiste em quatro eletrodos, igualmente espaçados, conforme a Figura 2.5, em que A e B são os eletrodos de corrente e a tensão é medida entre os eletrodos M e N.

A separação entre os eletrodos adjacentes é dada por a , sendo h a profundidade de cravação, que não deve exceder 10 % de a .

O arranjo de Wenner constitui um caso particular do arranjo de Schlumberger (método mais geral), em que os quatro eletrodos são movidos simultaneamente, aumentando o espaçamento a exponencialmente 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m e 64 m, (Figura 2.5).

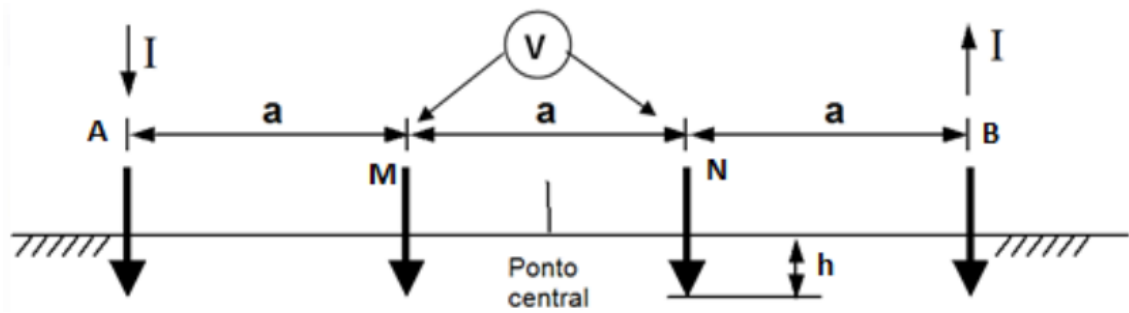


Figura 2.5 Configuração do arranjo de Wenner [7].

No arranjo de Wenner, a resistividade aparente ρ_a é dada por [7]:

$$\rho_a = \left(\frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}}} \right) \frac{\Delta V}{I} \quad (2.7)$$

onde

- a : distância entre os eletrodos M e N;
- h : profundidade de cravação dos eletrodos;
- ΔV : diferença de potencial entre os eletrodos internos (M e N);
- I : corrente circulando pelo solo entre os eletrodos externos (A e B).

Ainda de acordo com a norma, com o espaçamento de 1 m entre os eletrodos, o eletrodo cravado a menos de 0,1 m pode não ser suficiente para ter um contato adequado com o solo. O arranjo de Wenner proporciona uma melhor relação sinal/ruído, o que é importante para medições em solos com resistividade mais elevada nas camadas mais superficiais.

Para obter resultados satisfatórios, é necessário realizar um conjunto de leituras variando o espaçamento a entre as hastes em relação ao tamanho do terreno que será feita a medição. A NBR 7117 estabelece que, para terrenos com área menor ou igual a 1000 m², são necessárias no mínimo 2 linhas de medição conforme Figura 2.6.

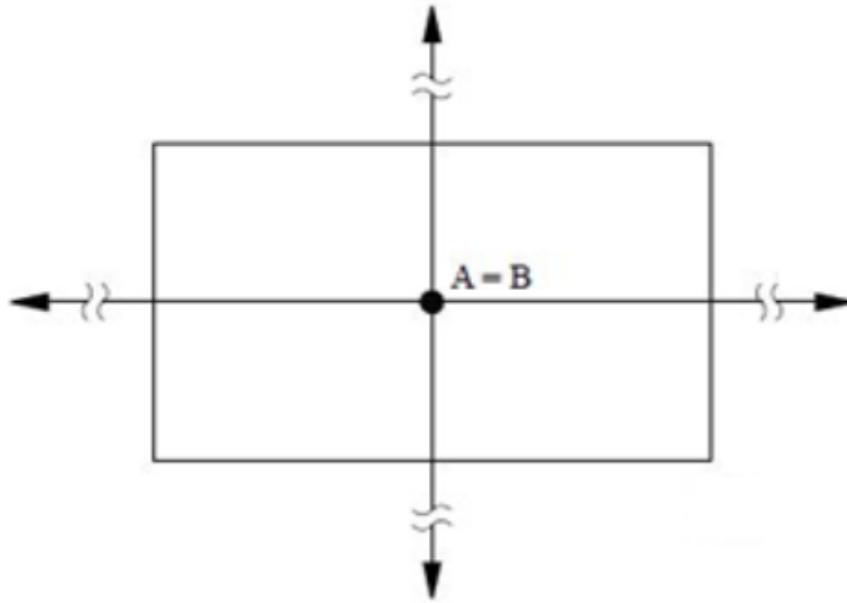


Figura 2.6 Número de linhas de medição para terrenos com área menor ou igual a 1000 m² [7].

Como temperatura e umidade do ambiente variam bastante durante o dia, os valores encontrados também serão diferentes a depender da época do ano. Assim, para melhores resultados na medição, é recomendado que o solo em estudo tenha passado por grandes períodos de seca e altas temperaturas.

Após as medições, uma análise dos dados deve ser realizada para que os mesmos possam ser avaliados em relação a sua aceitação ou não. Esta avaliação é feita da seguinte forma [3]:

- 1) Calcular a média aritmética dos valores da resistividade elétrica para cada espaçamento adotado:

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad (2.8)$$

$$\forall j = 1, q$$

$$\forall i = 1, n$$

onde:

- $\rho_M(a_j)$: Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j ;
- n : Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j ;
- $\rho_i(a_j)$: Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j ;
- q : Número de espaçamentos empregados.

- 2) Proceder o cálculo do desvio de cada medida em relação ao valor médio e deve-se desprezar todos os valores de resistividade que tenham desvio maior que 50% em relação à média:

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \quad (2.9)$$

2.3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A descarga atmosférica, também conhecida como raio, consiste em uma descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Trata-se de um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percursos de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra [8]. Quando atinge uma estrutura pode causar danos à própria estrutura e a seus ocupantes, incluindo falhas dos sistemas internos. Os danos e falhas podem se estender também às estruturas vizinhas e podem ainda envolver o ambiente local. A extensão dos danos e falhas na vizinhança depende das características das estruturas e das características da descarga atmosférica [9].

Muitas descargas atmosféricas têm sua origem nas nuvens de tempestades (Cumulus Nimbus), embora seja registrada sua ocorrência em outras condições, tais como durante erupções vulcânicas e em tempestades de areia em desertos. Por outro lado, o percurso das descargas pode ser estabelecido entre nuvem e solo, internamente à nuvem, entre nuvens (Figura 2.7) ou entre nuvem e estratosfera [8].

No contexto das áreas urbanas, a presença de estruturas metálicas públicas, como paradas de ônibus, alambrados e outras instalações, torna-se um ponto crítico de atenção em termos de segurança elétrica. Esses elementos metálicos, por suas propriedades condutoras, podem se tornar caminhos preferenciais para a corrente elétrica gerada por uma descarga atmosférica.



Figura 2.7 Trajetória de um raio passando entre nuvens.

2.3.1 Descarga direta

Os efeitos mais severos decorrentes de incidência de descargas atmosféricas são de incidência direta sobre a vítima (Figura 2.8). Nesse caso, ao atingir seres vivos, prédios, estruturas ou sistemas elétricos, os raios podem gerar incêndio, perdas de equipamentos e eventualmente, morte [8].

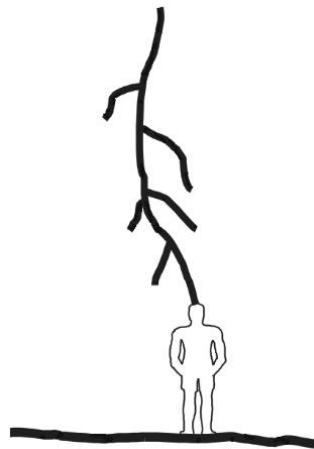


Figura 2.8 Descarga direta sobre vítima [8].

As mortes por incidência direta de descargas são frequentes tanto para seres humanos quanto para animais. O Brasil apresenta um alto índice anual de raios, justificado pela elevada densidade de descargas atmosféricas em seu território e pela grande parcela da população (cerca de 35%) engajada em atividades rurais, aumentando a vulnerabilidade a esses eventos [10].

2.3.2 Descarga indireta

Os efeitos mais frequentes decorrentes de descargas atmosféricas são aqueles produzidos por uma descarga incidente nas proximidades da ocorrência do raio, usualmente designada de descarga indireta [8].

Ao ser estabelecida uma descarga nuvem-solo, as características do fluxo de corrente de retorno pelo canal, que apresenta variação muito rápida no tempo, determina a constituição de uma onda eletromagnética que se irradia a partir da incidência do raio (Figura 2.9) [8].

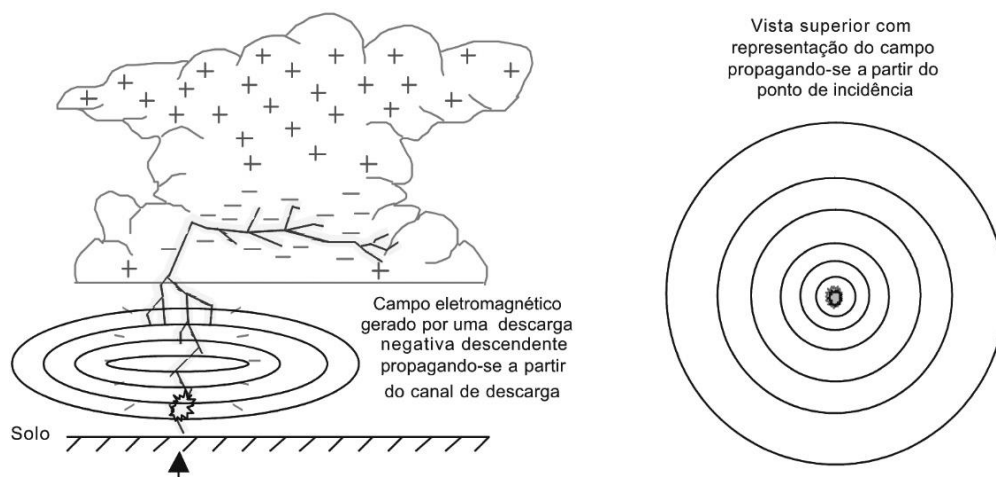


Figura 2.9 Descarga atmosférica atingindo o solo e onda eletromagnética irradiada pela corrente de retorno [8].

Dessa forma, a onda eletromagnética é capaz de induzir efeitos em corpos e estruturas. Tais efeitos podem expressar absorção da energia irradiada, causando interferência eletromagnética, ou pela geração de tensão induzida em percursos condutores fechados e em corpos condutores. Esse fenômeno é capaz de promover a circulação de uma corrente elétrica

pelo corpo de uma vítima devido a diferentes pontos de potenciais ao qual está submetida com intensidade capaz de gerar fibrilação ventricular e, eventualmente, a morte. Esse tipo de incidente é bastante comum em pastos, ocasionando a morte de animais (Figura 2.10) [8].

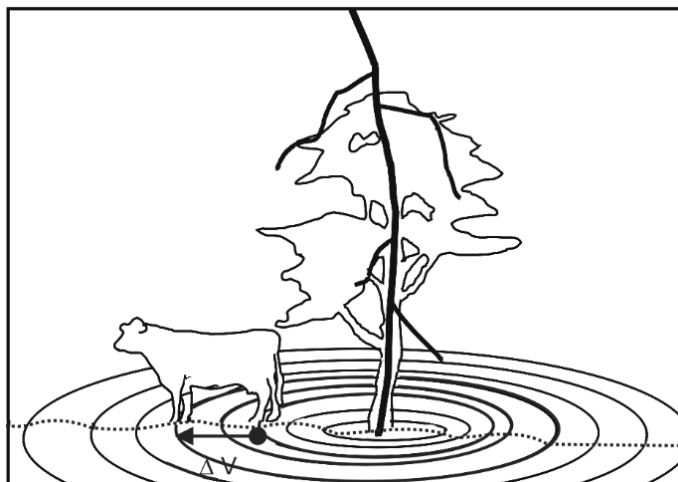


Figura 2.10 Animal submetido a diferença de potencial devido à incidência de uma descarga próxima [8].

3 CONSEQUÊNCIAS DO CHOQUE ELÉTRICO AO CORPO HUMANO

As atividades biológicas são estimuladas ou controladas por impulsos de corrente elétrica, resultante de uma diferença de potencial entre as membranas das células. No corpo humano, se uma corrente elétrica de origem externa, somada com a corrente fisiológica, poderá ocorrer uma alteração das funções vitais do organismo, causando desde pequenas dores, queimaduras ou até mesmo levar o indivíduo à morte a depender da duração da corrente.

3.1 Noções básicas de neurônios

As células são revestidas por uma biomembrana, que serve como uma barreira para proteção de sua composição. Uma propriedade de toda biomembrana é que, ao deixar passar espécimes ionizadas através dela, induz-se uma polarização, originando um potencial elétrico na biomembrana. Uma célula ao ser excitada por um estímulo externo pode ficar indiferente ou alterar o fluxo de espécimes iônicos através de sua membrana, ou seja, sua polarização seria modificada [11]. As células nervosas são exemplos de células que modificam bastante sua polarização.

Uma célula nervosa (neurônio) é especializada em receber impulsos elétricos do próprio organismo ou do ambiente externo. Ela integra as informações contidas no impulso elétrico e as retransmite para outros neurônios. Entre o interior e o exterior do neurônio existe uma diferença de potencial Φ_M , denominada potencial de membrana [11].

Para um neurônio desempenhar suas funções, todo seu corpo deve desempenhar de forma correta determinadas características quanto ao modo de gerar, conservar e transmitir impulsos elétricos, também conhecidos como potencial de ação. A Figura 3.1 apresenta a estrutura básica de um neurônio.

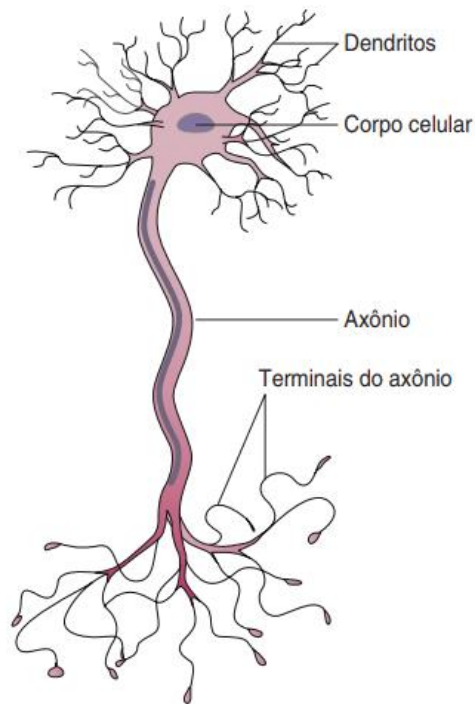


Figura 3.1 Estrutura básica de um neurônio ou célula nervosa [11].

O estímulo que se propaga pelo neurônio normalmente é iniciado no ponto de contato dos dendritos do corpo celular com os terminais de outros axônios [11]. A unidade estrutural e funcional formada por essa junção é denominada sinapse e está representado na Figura 3.2.

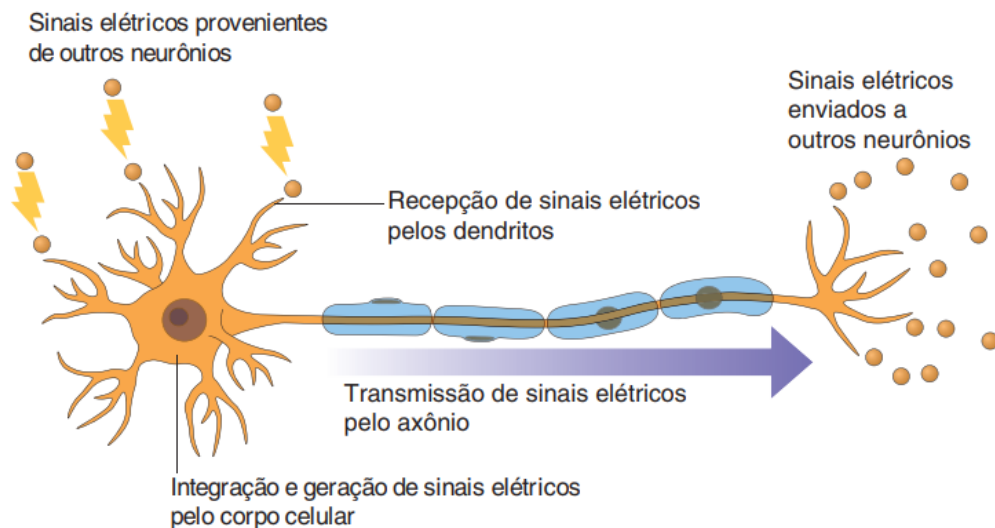


Figura 3.2 Esquema representativo do funcionamento elétrico de um neurônio [11].

Uma situação particular de como funciona o sistema nervoso é apresentada na Figura 3.3. Seu funcionamento é importante para diversas atividades do corpo para que suas partes

trabalhem de forma eficiente. Assim, esse sistema controla constantemente qualquer alteração que possa acontecer no interior ou exterior do corpo. A informação associada à alteração é transportada pelo neurônio sensor ao sistema nervoso central, que é processada e enviada para o neurônio motor [11].

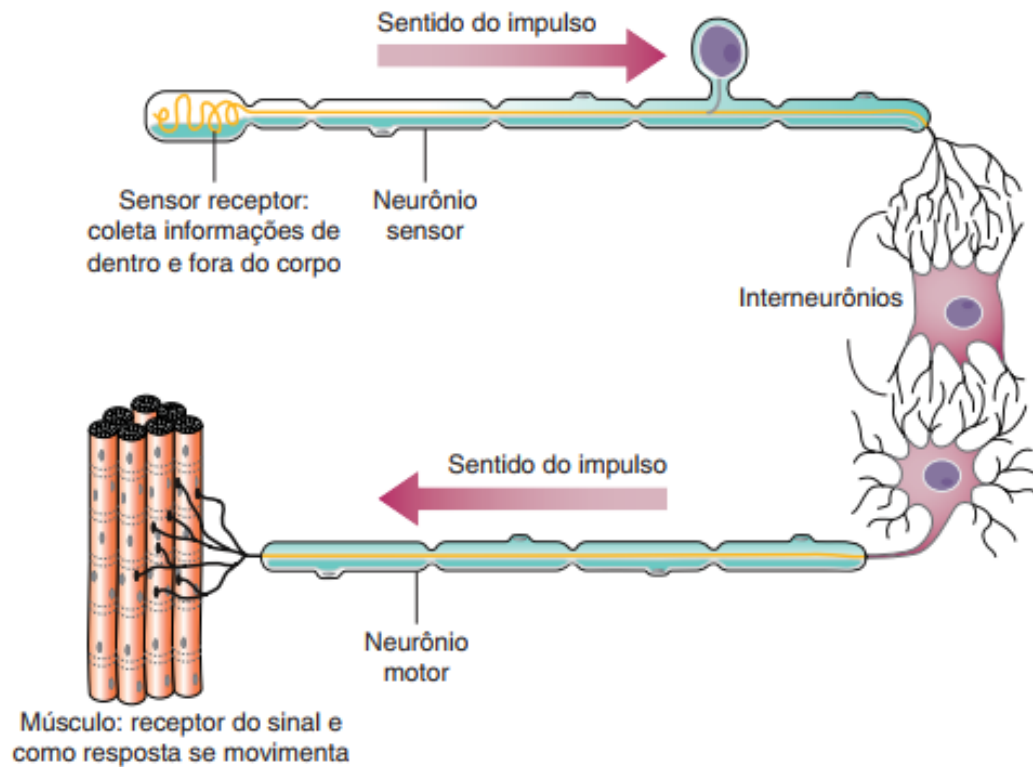


Figura 3.3 Representação do funcionamento do sistema nervoso [11].

O neurônio sensor conduz os impulsos nervosos ao sistema nervoso central no cérebro e na medula espinhal. O neurônio motor conduz os impulsos nervosos a partir do sistema nervoso central aos diversos órgãos do corpo, que respondem com algum tipo de ação [11].

3.2 Potencial de ação

Quando uma célula é excitável, a condutância elétrica da membrana muda seu valor quando o estímulo externo está agindo, alterando o valor do potencial de repouso Φ_0 . Se ϕ é a variável que mede o grau de alteração do valor Φ_M^0 , então

$$\Phi_M = \Phi_M^0 + \phi \quad (3.1)$$

será o potencial da membrana quando está alterada com relação ao repouso [11].

Para que o potencial de ação ocorra, é necessário que aconteça a despolarização inicial ϕ em uma célula excitável, que deve ter valor acima de um valor mínimo ϕ_L , denominado potencial limiar. A Figura 3.4 apresenta diferentes cenários para o caso de pequenas alterações em que podem ou não criar um potencial de ação [11].

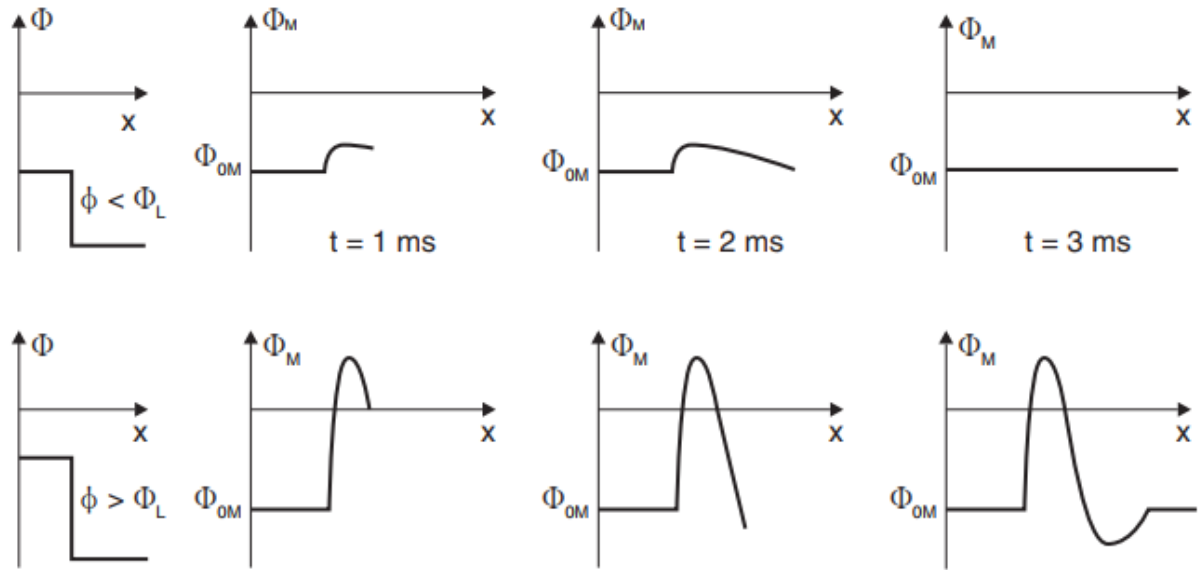


Figura 3.4 Efeito de uma despolarização ϕ sobre uma biomembrana com potencial limiar Φ_L [11].

Os sinais nervosos são transmitidos por potenciais de ação, que são rápidas alterações do potencial da membrana que se propagam com grande velocidade por toda a membrana da fibra nervosa. Quando se origina um potencial de ação (Figura 3.5), o potencial da membrana Φ_M assume valores acima de Φ_M^0 . Nesse momento, os canais de sódio da biomembrana se abrem, originando um fluxo de íons de sódio (Na^+), que será o efeito responsável pela sua despolarização. Após alguns milissegundos, abrem-se os canais de potássio (K^+) e fecham-se os de sódio, formando um fluxo de íons K^+ através da membrana, que originará sua repolarização. O período de hiperpolarização acontece quando os canais de potássio se fecham [11].

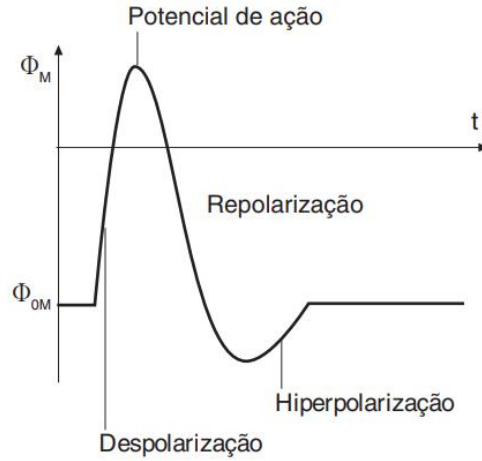


Figura 3.5 Forma típica do potencial da membrana de uma célula nervosa quando se origina um potencial de ação [11].

A indução de um potencial de ação no corpo do neurônio equivale a disparar um pulso que se propagará com muita rapidez e que não altera sua forma ao longo da fibra nervosa, até chegar ao terminal do axônio. Os neurônios, quando excitados, transmitem potenciais de ação em apenas um sentido. Na membrana do neurônio, existem diversos tipos de canais, sendo cada um seletivo para determinado espécime iônico. No caso de canais de sódio K^+ , por cada 20 íons de K^+ que fluem pelo canal, um íon Na^+ pode passar por ele [11].

Durante a propagação do potencial de ação, há uma variação do potencial Φ_M com o tempo, em virtude da alteração da densidade superficial de carga elétrica. Essa densidade é dada por [11]:

$$\sigma_M = \frac{C}{A} \Phi_M = C_M \Phi_M \quad (3.2)$$

sendo C_M a capacitância da membrana por unidade de área, de forma que nessa região da fibra nervosa, σ_M será:

- (+) em sua superfície externa e (–) em sua superfície interna se $\Phi_M < 0$;
- (–) em sua superfície externa e (+) em sua superfície interna se $\Phi_M > 0$;
- 0 em ambas as superfícies se $\Phi_M = 0$

Em células excitáveis, uma despolarização local produz um curto-circuito transitório na biomembrana, que se propagará por toda ela como um pulso de despolarização (Figura 3.6). A

despolarização de uma seção da biomembrana eletricamente excitada originará mudanças no canal de sódio. O fluxo de Na^+ origina a despolarização de seções adjacentes da membrana, o que induz à abertura de outros canais de sódio [11].

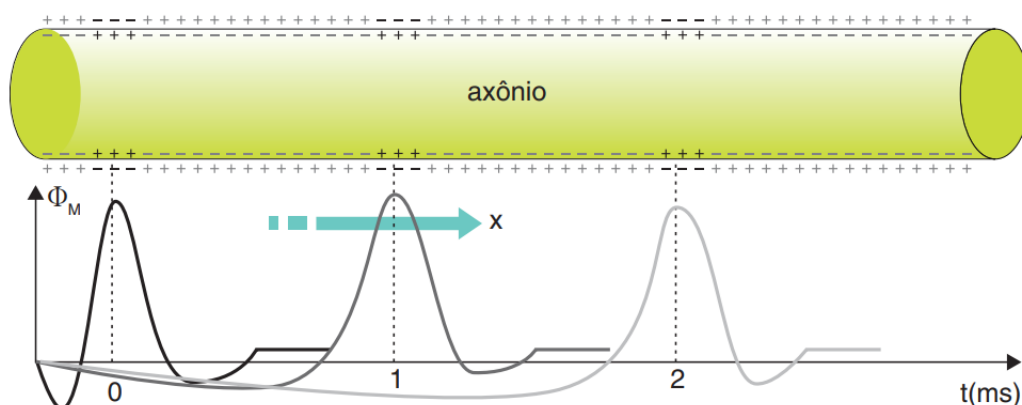


Figura 3.6 A propagação de um potencial de ação [11].

As novas polarizações criarão, pelos meios condutores em torno da membrana, correntes elétricas locais. Entre o local X_0 da membrana despolarizada no instante t_0 por causa da evolução de um potencial de ação e os locais X_{+1} e X_{-1} , vizinhos imediatos de X_0 , estabeleceram-se correntes elétricas locais, representadas por setas na Figura 3.7. Sob o efeito dessas correntes, o potencial da membrana no local X_{+1} tende a se alterar até um valor limiar, provocando o início de um novo potencial de ação. Por outro lado, no local X_{-1} , a despolarização análoga à do local X_{+1} não provoca a iniciação de um potencial de ação, isso por causa da existência do período refratário. O potencial de ação se propagará de X_0 para X_{+1} sem interrupção motivada pela ação dessas correntes de curto-circuito locais. A volta rápida de Φ_M a seu valor inicial em X_0 provoca a interrupção das correntes locais, assegurando uma nova propagação [11].

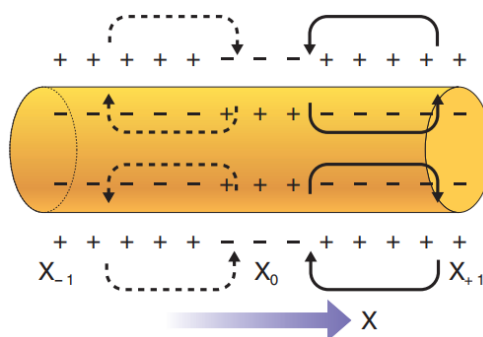


Figura 3.7 A despolarização no local X_0 de um axônio [11].

Um estímulo elétrico fraco pode não ser suficiente para excitar uma fibra. No entanto, quando a tensão do estímulo é aumentada, chega em um ponto que ocorre a excitação. A Figura 3.8 apresenta os efeitos de estímulos aplicados sucessivamente, com intensidade progressivamente crescente. Um estímulo fraco no ponto A faz com que o potencial da membrana mude de -70 mV para -65 mV, mas não é suficiente para que o potencial de ação se desenvolva. No ponto B o estímulo é maior, porém ainda não é o suficiente. O estímulo, porém, perturba o potencial de membrana local por cerca de 1 milissegundo. Essa pequena alteração é chamada de potencial local agudo e, quando não conseguem desencadear um potencial de ação são chamados de potenciais subliminares agudos.

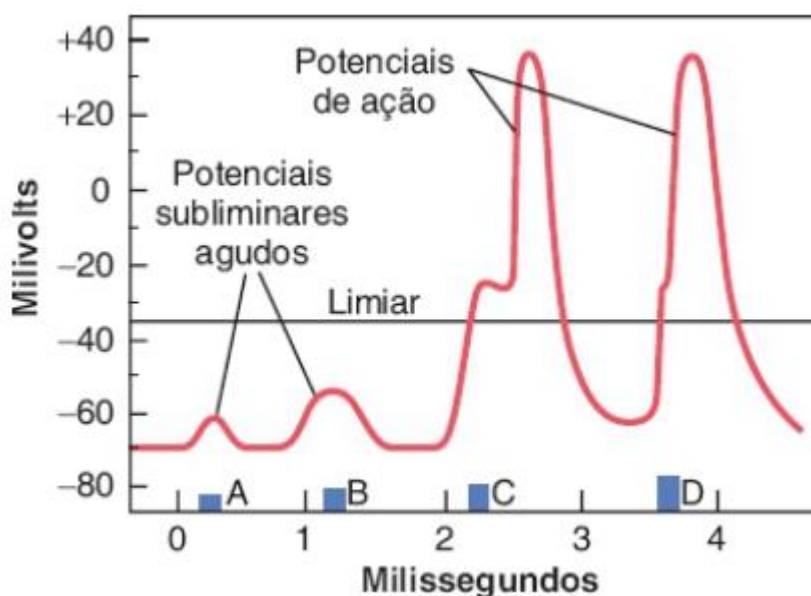


Figura 3.8 Efeito de estímulos de tensões crescentes para provocar potencial de ação [12].

No ponto C e D os estímulos já são suficientemente fortes para desencadear o potencial de ação, com destaque para o ponto D, em que o potencial local agudo é bem mais forte, gerando menos tempo de ação [12].

Um novo potencial de ação não pode ocorrer em uma fibra excitável enquanto a membrana ainda estiver polarizada do potencial de ação anterior. A razão para essa restrição é que, após o potencial de ação ser iniciado, os canais de sódio, por exemplo, tornam-se inativos, e qualquer quantidade de sinal excitatório aplicado a esses canais nesse momento não será efetivo. Somente após o retorno do potencial de membrana ao valor original ou próximo disso que será possível fazer outro potencial de ação. Então, em pequena fração de segundo, os canais se abrem e um novo potencial de ação pode ser iniciado [12].

3.3 Efeitos do choque elétrico

Os efeitos externos recebidos pelo corpo humano, que provocam um potencial de ação, como por exemplo o calor de uma chama, funcionam de maneira semelhante ao efeito do choque elétrico.

O choque elétrico é identificado como a passagem de corrente elétrica em um organismo vivo e altera, de maneira não controlada, os impulsos fisiológicos internos, deixando o sistema fisiológico mais propenso a alterações vitais [13].

Quando uma tensão externa é aplicada ao corpo, pela lei de Ohm, podemos estimar a intensidade da corrente elétrica através desse corpo. Para isso, é necessário conhecermos sua resistência elétrica, cujo valor depende: (a) de entre que partes do corpo ela é medida e (b) se a pele está seca (alta resistência) ou molhada (baixa resistência). Portanto, a corrente elétrica que flui dentro de um corpo terá uma dependência crítica com a condição da pele nos pontos de contato com a fonte externa [11].

Os efeitos causados pelo choque elétrico também variam de acordo com o caminho que a corrente percorre o corpo e pelo tempo de duração. A Figura 3.9 apresenta o tempo de duração que a corrente atravessa o corpo e os efeitos fisiológicos causados decorrente de uma corrente alternada com frequência variando entre 15 e 100 Hz, com o percurso entre as mãos e os pés.

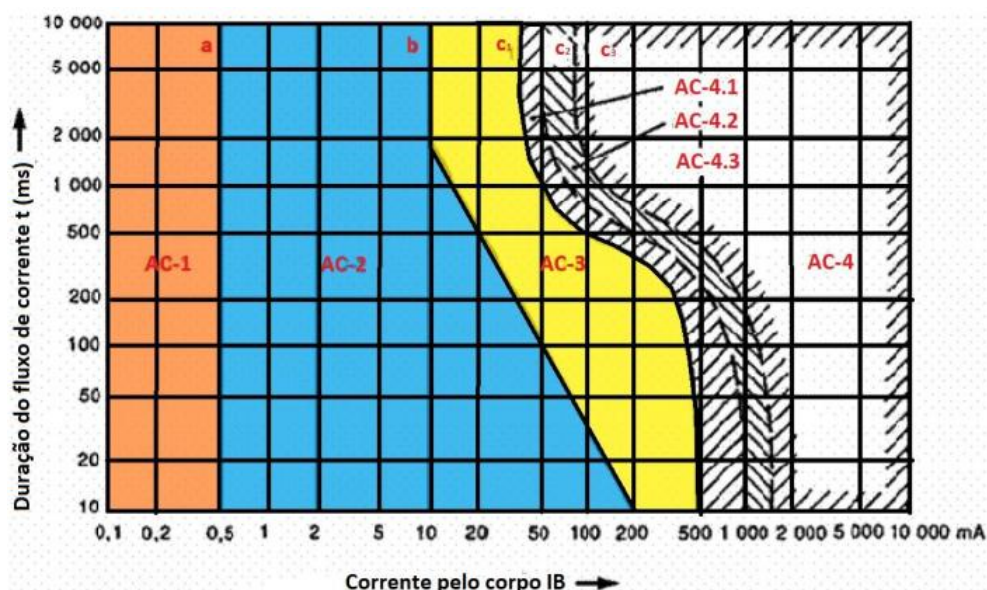


Figura 3.9 Intensidade e duração do fluxo de corrente alternada entre mãos e pés do corpo humano [14].

Em que [14]:

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_1 :

- 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.

Dessa forma é possível concluir que, a partir de 10 mA já é possível sentir efeitos significativos causados pela corrente e 25 mA já pode ser o suficiente para causar parada cardíaca e queimaduras.

A Figura 3.10 apresenta o valor das impedâncias parciais internas (em porcentagem) do corpo humano, em relação ao trajeto da mão até pé. Ainda segundo [14], os valores médios de resistência para o corpo humano em função do trajeto são:

- Mão/pé: 1000 a 1500 Ω ;
- Mão/mão: 1000 a 1500 Ω .

- Mão/tórax: 450 a 700 Ω .

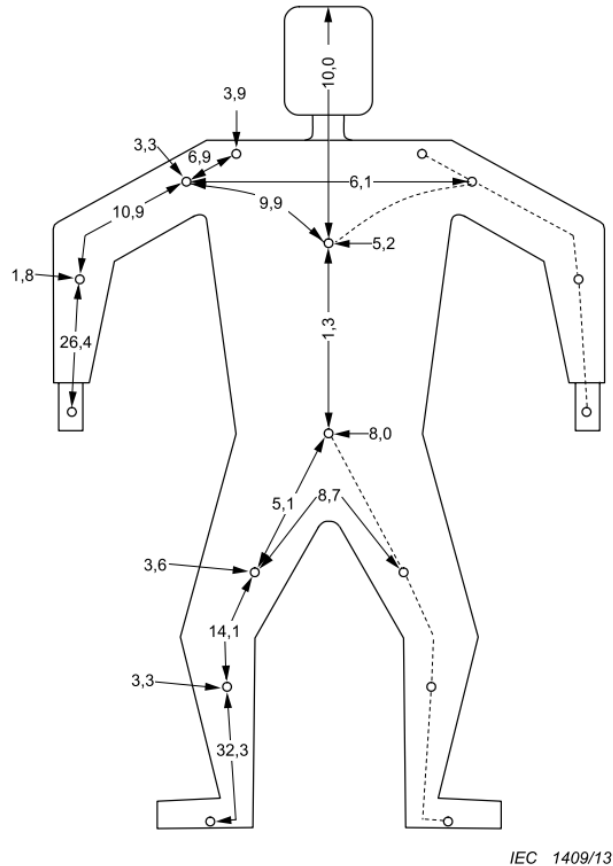


Figura 3.10 Impedâncias parciais internas do corpo humano (porcentagem) em relação ao trajeto da mão até os pés [14].

3.3.1 Tetanização

Toda atividade muscular é fortemente dependente de propriedades elétricas das células constituintes dos músculos esqueléticos, lisos e cardíacos. Os músculos lisos envolvem órgãos ou estruturas como o estômago, o intestino ou os vasos sanguíneos, e suas contrações involuntárias são coordenadas pelo sistema nervoso autônomo. Os músculos esqueléticos estão ligados aos ossos. Os músculos cardíacos apresentam características dos músculos esqueléticos e lisos e têm a particularidade de contrair-se espontaneamente [11].

A Figura 3.11 mostra os princípios da somação por frequência e da tetanização. O lado esquerdo mostra contrações musculares individuais sucedendo-se uma após a outra, com baixa frequência de estimulação. Em seguida, à medida que essa frequência vai aumentando, alcança-

se um ponto onde cada nova contração ocorre antes que a anterior termine. Como resultado, a segunda contração é parcialmente somada à anterior, de forma que a força total da contração aumenta progressivamente com o aumento da frequência. Quando a frequência atinge um nível crítico, as contrações sucessivas eventualmente ficam tão rápidas que se fundem, e a contração total do músculo aparenta ser completamente uniforme e contínua, como mostra a figura. Isso é referido como tetanização. Com frequência pouco maior, a força da contração atinge sua capacidade máxima, de modo que qualquer aumento adicional da frequência além desse ponto não exerce novos efeitos para aumentar a força contrátil. Isso ocorre porque quantidades suficientes de íons cálcio são mantidas no sarcoplasma muscular mesmo entre os potenciais de ação, de modo que o estado contrátil total é mantido, sem que seja permitido nenhum grau de relaxamento entre os potenciais de ação [12].

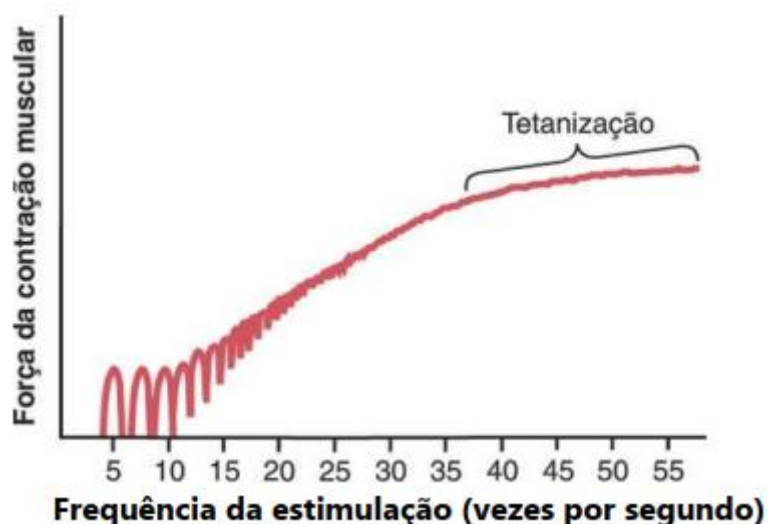


Figura 3.11 Frequência da somação e tetanização [12].

3.3.2 Limite de largar

É definido como a corrente máxima que uma pessoa pode suportar ao segurar um condutor energizado. Para essa grandeza em corrente alternada de 50 a 60 Hz, os valores situam entre média de 10 mA em mulheres e em média 16 mA em homens. Em corrente contínua foram encontrados valores médios de 51 mA em mulheres e 76 mA em homens [4].

Valores inferiores ao limite de largar podem gerar contrações musculares violentas e, indiretamente provocar acidentes, como quedas e ferimentos causados por partes móveis de máquinas [4].

3.3.3 Queimaduras

A passagem de corrente elétrica em qualquer meio gera efeito Joule. Ao tratar-se do corpo humano e a depender da intensidade e duração dessa corrente, pode produzir queimaduras. Quanto maior a densidade de corrente e mais longo o tempo pelo qual a corrente permanece, mais graves são as queimaduras produzidas [4].

Pelo fato de a pele apresentar elevada resistência elétrica e os tecidos internos apresentarem baixa resistência, a situação torna-se crítica nos pontos de entrada e saída de corrente, podendo ocorrer como consequência das queimaduras a necrose, que é caracterizada pela morte de um grupo de células do organismo [4].

3.3.4 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 [4]. O fenômeno pode ser causado por choque elétrico ou isquemia do músculo cardíaco, de seu sistema de condução especializado ou de ambos [12].

Quando isso acontece, muitas partes pequenas do músculo ventricular se contraem ao mesmo tempo, enquanto, de igual modo, muitas outras partes se relaxam. Dessa forma, nunca ocorre contração coordenada de todo o músculo ventricular a um só tempo, o que é necessário para o ciclo de bombeamento do coração. Apesar do movimento maciço de sinais estimulatórios por toda parte dos ventrículos, as câmaras ventriculares não aumentam de volume nem se contraem, mas permanecem no estágio indeterminado de contração parcial, e o bombeamento fica ausente ou a ser feito em quantidades desprezíveis [12].

3.3.5 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 [15].

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 [15].

3.4 Proteção contra choque elétrico

As partes do corpo humano cujo funcionamento é mais sensível às correntes elétricas externas são: o cérebro, os músculos do tórax, os centros nervosos que controlam a respiração e os músculos do coração [11].

Segundo [16], as pessoas e os animais devem ser protegidos contra choques elétricos, seja o risco associado a contato acidental com parte viva ou por falhas que possam colocar uma massa acidentalmente sob tensão. Dessa forma, em caráter geral, existem dois tipos de proteção: proteção básica e proteção supletiva. Assim, para que tenha proteção contra choques elétricos, deve haver esse conjunto de proteção mediante combinação de meios independentes ou mediante aplicação de uma medida capaz de prover ambas as proteções, simultaneamente.

Ainda de acordo com [16], proteção básica é caracterizada por promover isolamento ou separação básica, uso de barreira ou invólucro, ou ainda limitador de tensão, como por exemplos isoladores. Já a proteção supletiva tem como objetivo a equipotencialização e seccionamento automático da alimentação, fazer isolamento suplementar ou separação elétrica, em que podemos citar disjuntores e sistemas de aterramento.

4 CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NÃO DESTINADAS À INSTALAÇÃO ELÉTRICA

Uma estrutura refere-se a um sistema de partes conectadas usadas para suportar uma carga. Na engenharia civil, estruturas incluem edifícios, pontes e torres [17]. Vasos de pressão, tanques, estruturas de aeronaves e navios, estruturas de apoios para sistemas elétricos são outros exemplos. Este trabalho terá como foco estruturas de construção civil que não possuem como foco instalações elétricas. Ainda na engenharia civil, é considerado como elementos estruturais alguns elementos dos quais as estruturas são compostas, como vigas, tirantes e colunas. Para este trabalho, será considerado como estrutura os sistemas de sustentação feitos para suportar grandes massas.

Estruturas metálicas não destinadas à instalação elétrica são aquelas que não estão conectadas diretamente a uma fonte de energia elétrica durante o seu uso normal. Exemplos típicos incluem paradas de ônibus, alambrados, corrimões, postes de iluminação (quando desligados), cercas de eventos, entre outros. Essas estruturas, apesar de não estarem energizadas, podem representar um risco de choque elétrico em determinadas condições, como em casos de falhas elétricas ou descargas atmosféricas. Geralmente são feitas de aço, alumínio ou outras ligas metálicas resistentes à corrosão. Podem ser galvanizadas ou pintadas para aumentar a durabilidade e resistência às intempéries.

4.1 Estrutura metálica de edificação para construção civil

Estrutura metálica projetada para suportar grande volume de massa como vigas ou colunas. Fabricadas frequentemente em aço carbono e tratadas de forma a prevenir corrosão. São altamente resistentes a forças de tração e compressão, permitindo bastante estabilidade à edificação.

Para este tipo de estrutura, o tópico 6.4.2.1 da norma [16] estabelece os critérios para equipotencialização, em que cada as armaduras de concreto armado e outras estruturas metálicas da edificação devem possuir uma equipotencialização principal. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de edificações metálicas próprias para construção civil que não são destinadas a instalações elétricas. Para verificar se a estrutura estava eletricamente aterrada, um trabalhador local informou que não havia aterramento.



Figura 4.1 Estrutura metálica de edificação para construção civil.

4.2 Estrutura metálica para complementação de edificação (janelas metálicas)

São estruturas metálicas mais comuns no cotidiano (Figura 4.2). Disponível em várias cores e acabamentos para se adequar ao design do ambiente, geralmente são fabricadas em alumínio ou aço inoxidável. Além de serem superfícies fáceis de limpar, ainda apresentam várias opções para diferentes tipos de vidro, podendo melhorar o isolamento térmico ou acústico.

De acordo com o tópico 4.1.9 [16], a instalação elétrica deve ser concebida e construída livre de qualquer influência mútua prejudicial entre instalações elétricas e não elétricas. Dessa forma, juntamente com o item 4.1.1, espera-se que tal estrutura não tenha risco acidental de contato com parte elétrica exposta.



Figura 4.2 Janela metálica, estrutura feita para complementação de edificação.

4.3 Estrutura metálica para suporte de instalação elétrica

São estruturas metálicas projetadas para suportar conduítes, cabos elétricos, bandejas de cabos, eletrocalhas e outros componentes de sistemas elétricos Figura 4.3. Fabricados em aço

galvanizado ou alumínio para evitar corrosão, são dimensionados para suportar o peso dos cabos, facilmente montável e ajustável para diferentes configurações de instalação. A estrutura está eletricamente aterrada de acordo com o item 6.4.2.1.1 [16].



Figura 4.3 Eletrocalha com aterramento no laboratório de instalações elétricas – UnB.

4.4 Estrutura metálica exclusiva para equipamento elétrico

É uma estrutura metálica projetada especificamente para abrigar equipamentos elétricos como transformadores, painéis de controle e quadros de distribuição. Algumas possuem sistema de ventilação para evitar aquecimento de equipamentos internos. Os materiais mais comuns são aço galvanizado ou alumínio, com revestimento para dissipação térmica e proteção contra corrosão. Normalmente possuem portas ou painéis removíveis para facilitar a manutenção dos

equipamentos internos e também possuem fechaduras ou mecanismos de proteção contra acesso não autorizado. Também devem estar aterrados de acordo com [16]. Na Figura 4.4 é possível notar que as portas do quadro de distribuição estão conectadas ao aterramento elétrico da instalação.



Figura 4.4 Quadro geral de distribuição com aterramento nas duas portas.

4.5 Exemplos de estruturas metálicas públicas não destinadas à instalação elétrica

Projetadas para resistir a diversas condições ambientais e de vandalismo, são frequentemente produzidas a partir de alumínio ou aço galvanizado e revestida ou pintada para

proteção contra corrosão. Algumas podem incluir medidas de segurança como aterramento para prevenção de choques elétricos. São estruturas utilizadas em alambrados, corrimões, postes de sinalização, paradas de ônibus, entre outros Figura 4.5.



Figura 4.5 Alambrado de proteção para quadra de esportes.

4.6 Pontos de parada de passageiros do Distrito Federal

Segundo a Secretaria de Estado de Mobilidade do Distrito Federal, é feita a classificação para pontos de parada para passageiros de ônibus, em que podem ser modelos com placas ou com abrigos. A Figura 4.6 apresenta um ponto de parada com placa, que geralmente são feitos em locais que não possuem espaço suficiente para fazerem um abrigo.



Figura 4.6 Ponto de parada para passageiros com placa [18].

Os pontos com abrigos já possuem infraestrutura (piso e cobertura). São mais comuns feitos em estrutura de concreto para suportar efeitos de intempéries (Figura 4.7). Por ter maior durabilidade, são mais comuns de serem vistos.



Figura 4.7 Ponto de parada para passageiros de ônibus com abrigo [19].

5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

5.1 Método da queda de potencial

O método da queda de potencial é recomendado para a medição da resistência de aterramento utilizando um equipamento chamado terrômetro [5]. O método consiste em fazer circular uma corrente elétrica entre a malha de aterramento por meio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o ponto de referência (terra) por meio de um eletrodo auxiliar de tensão, conforme indicado na Figura 5.1, em que

- I: Corrente de ensaio
- E: Borne para a malha de aterramento sob medição
- S: Borne para eletrodo auxiliar de potencial
- H: Borne para eletrodo auxiliar de corrente

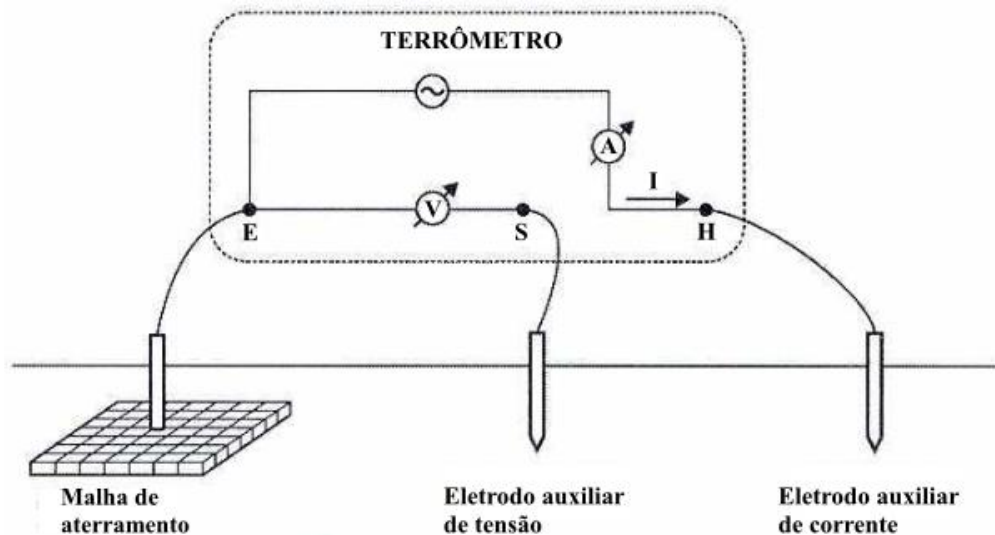


Figura 5.1 Método da queda de potencial aplicado a uma malha de aterramento [5]

A distância entre o eletrodo de referência e o eletrodo auxiliar de corrente deve ser pelo menos 5% da distância d do sistema (distância em que há influência do eletrodo de corrente).

A partir do deslocamento da haste S entre o sistema de aterramento e o eletrodo H, é esperado obter a curva característica da resistência de aterramento em função do deslocamento, de acordo com a Figura 5.2 [5].

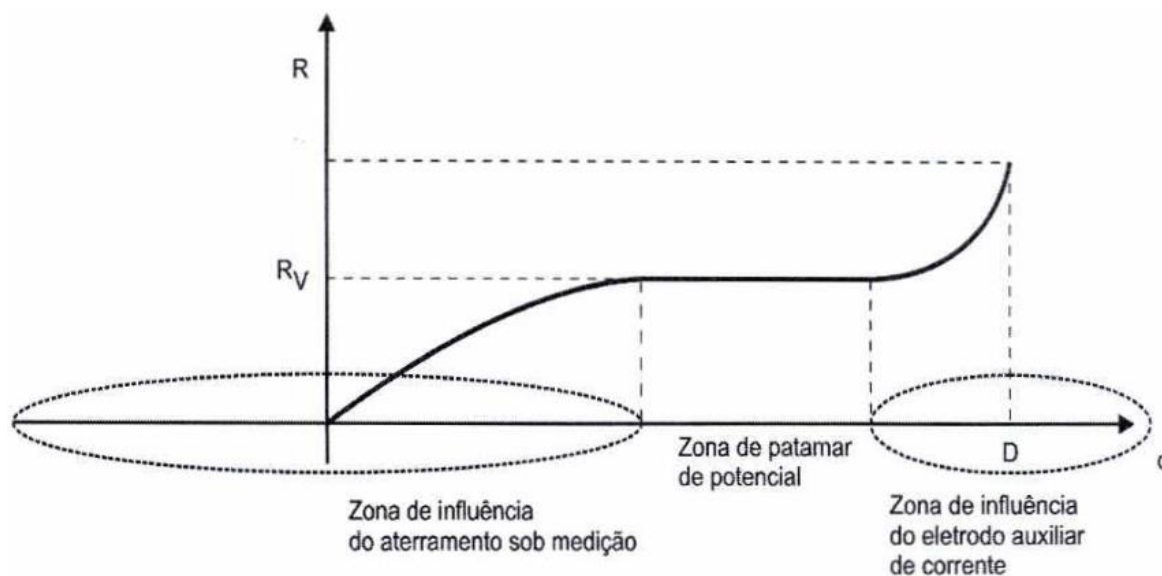


Figura 5.2 Curva característica teórica da resistência de aterramento de um eletrodo pontual [5].

Onde:

- R : Resistência obtida variando a distância do eletrodo auxiliar de tensão;
- R_V : Resistência verdadeira do aterramento.

É possível notar pela Figura 5.2 que há três zonas ao longo da distância d . A zona de influência do aterramento sob medição; a Zona de patamar de potencial em que expressa o verdadeiro valor da resistência de aterramento; Zona de influência do eletrodo auxiliar de corrente.

5.2 Medição de resistividade

Conforme descrito no capítulo 2, este estudo utilizou o método de Wenner para o cálculo da resistividade do solo, conforme especificado na norma vigente, juntamente com a recomendação do manual próprio terrômetro. O arranjo descrito pelo manual está indicado na Figura 5.3.

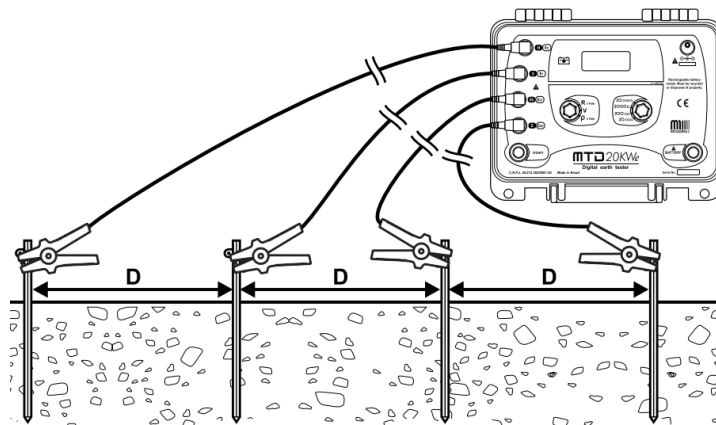


Figura 5.3 Arranjo esquemático para o método de Wenner [20].

De acordo com a equação

(2.7), o termo $\frac{\Delta V}{I}$ será substituído por R , que é a informação que o terrômetro sinaliza em seu visor, facilitando a obtenção do parâmetro desejado.

As medições foram realizadas em duas posições conforme especificado no tópico 2.2.2. A Figura 5.4 apresenta os equipamentos do experimento, bem como a posição em que foi feita a primeira medição resistividade.



Figura 5.4 Medição da resistividade do solo pelo método de Wenner.

5.3 Teste de continuidade do sistema

No início do experimento, foi verificado se existia continuidade em vários pontos do abrigo e com o abrigo ao lado. Todos os pontos medidos confirmaram continuidade. Em seguida, foi feito um teste para verificar existência de tensão no abrigo utilizando um kit limitador de corrente em 30 mA, apresentado na Figura 5.5.

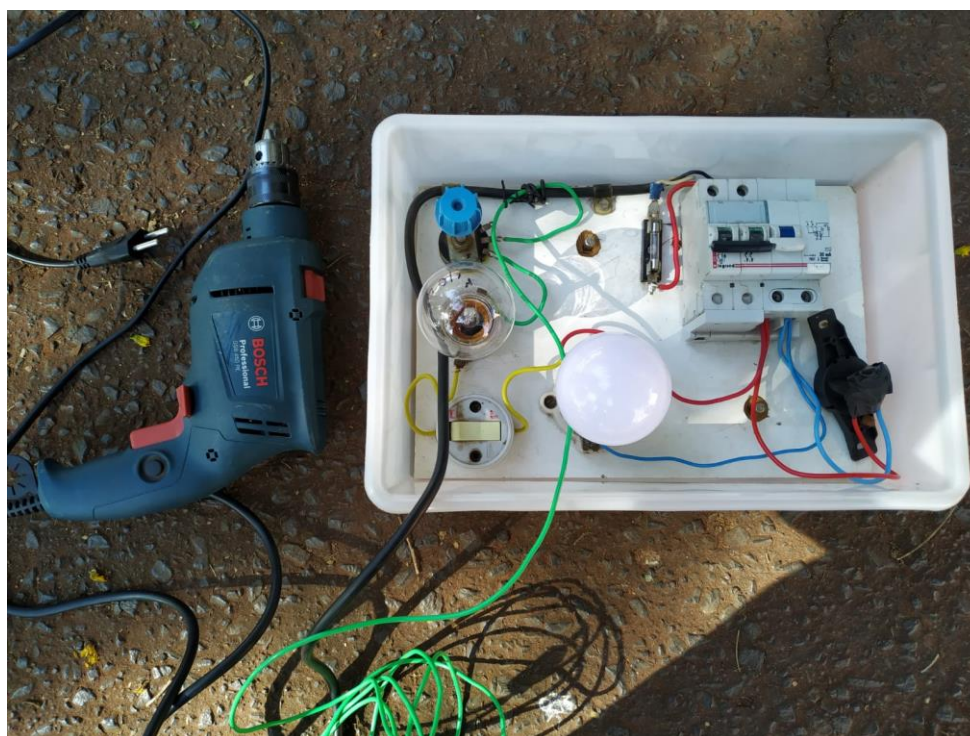


Figura 5.5 Kit limitador de corrente.

O kit limitador de corrente é composto pelos seguintes equipamentos:

- 1 Disjuntor DR 16 A, 30 mA;
- 1 Fusível;
- 1 Potenciômetro 50 k Ohm;
- 1 Lâmpada LED 220 V; 9 W;
- 1 Lâmpada incandescente 220 V, 40 W;
- 1 Interruptor;
- 2 Soquetes cerâmica E27;

5.4 Local de medição

O abrigo para passageiros escolhido para fazer a verificação do sistema de aterramento fica próximo a Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB) e possui espaço suficiente para realizar as medições (Figura 5.6). O abrigo possui uma estrutura metálica de sustentação e apresenta ponto de iluminação embutida.



Figura 5.6 Abrigo de passageiros em frente a Faculdade de Tecnologia - UnB.

O experimento foi realizado no dia 16 de maio de 2024, entre 10:00 e 13:15 horas, horário oficial de Brasília. Os valores encontrados foram referentes a um período de seca de 23 dias no Plano Piloto/DF [21]. A temperatura registrada pelo aplicativo de celular AccuWeather foi de 23°C e umidade de 46,7%. A Figura 5.7 mostra o local de realização do experimento.



Figura 5.7 Vista aérea do local de medição [22].

6 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

6.1 Análise do método da queda de potencial

O terrômetro digital utilizado para coleta de dados foi o modelo MTD 20KWe da empresa Megabras (Figura 6.1). O equipamento permite medir resistências de aterramento e resistividade do terreno, além das tensões espúrias provocadas pelas correntes parasitas no solo. A corrente gerada pelo terrômetro circula pela malha de aterramento e o eletrodo de corrente, e mede-se a tensão entre a malha de aterramento e à estaca auxiliar de corrente. O valor de R é obtido como o quociente da tensão e da corrente [20].



Figura 6.1 Terrômetro Megabras MTD 20KWe

Os eletrodos de tensão e corrente utilizados foram produzidos em laboratório da Universidade de Brasília, com 40 cm de altura e possuem uma chapa soldada de forma perpendicular com 3,5 cm para facilitar a retirada do solo. Para a medição, foram cravados 25 cm do eletrodo no solo.

Para facilitar a medição, foi conectado um condutor de cobre à uma estaca, simulando a malha de aterramento em um ponto inicial a 50 cm de distância do abrigo de passageiros de ônibus Figura 6.2Figura 6.2 Ponto inicial da medição de resistência de aterramento..



Figura 6.2 Ponto inicial da medição de resistência de aterramento.

A distância D entre o ponto do início da medição e o eletrodo auxiliar de corrente foi de 20 metros. Cada deslocamento do eletrodo de tensão foi 5% do valor de D , ou seja, 1 metro cada. Foram feitas duas medições para melhor análise dos dados. A Figura 6.3 mostra o primeiro conjunto de medição, com os eletrodos instalados ao norte em relação ao abrigo.



Figura 6.3 Medição na direção norte.

O segundo conjunto de medição foi realizado a oeste em relação ao abrigo, em que foi feita uma adaptação na medição por conta de uma ciclovia Figura 6.4. Dessa forma, as distâncias referentes a 4 e 5 metros não foram realizadas.

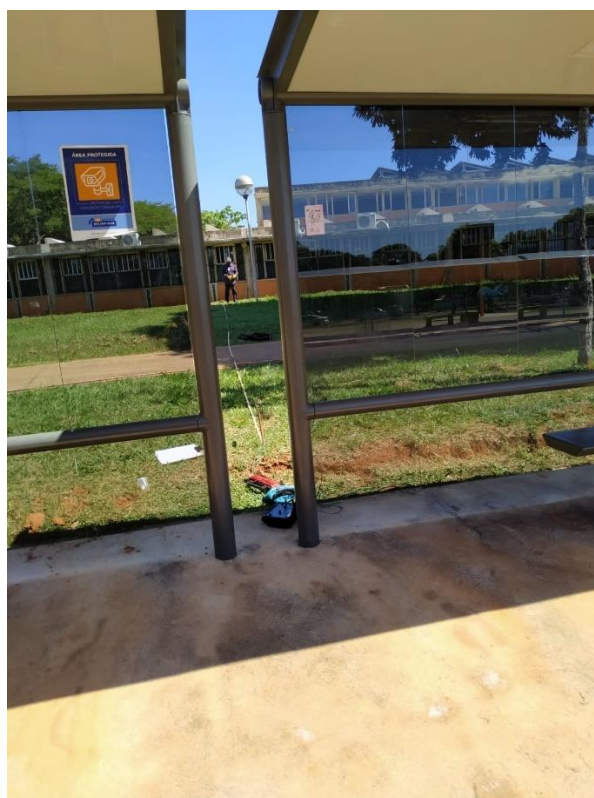


Figura 6.4 Medição na direção oeste.

Após realizar o experimento, os valores de resistência encontrados para cada grupo de medição estão apresentados na Figura 6.5.

Distância (m)	Resistência (Ω)		Distância (m)	Resistência (Ω)	
	Norte	Oeste		Norte	Oeste
0	0,68	0,73	11	26,1	30,9
0,5	15	15,4	12	26,7	31,3
1	17,1	19,57	13	28	32,1
2	17,3	23,4	14	29,2	32,5
3	17,6	26,6	15	31,3	33,9
4	17,9	-	16	33,2	35,8
5	19,4	-	17	39,5	38,8
6	20,2	29,4	18	53,4	45
7	23,6	29,7	19	89,8	69,6
8	24,2	30	19,5	145,4	123
9	24,6	30,3	20	1780	1485
10	25,3	30,6	-	-	-

Figura 6.5 Resistência medida a partir do deslocamento dos eletrodos.

Para obter a curva característica da resistência de aterramento em função do deslocamento do eletrodo de tensão, conforme apresentado na Figura 5.2, foi plotado um gráfico com duas curvas referentes aos valores da Figura 6.5 estão apresentados na Figura 6.6.

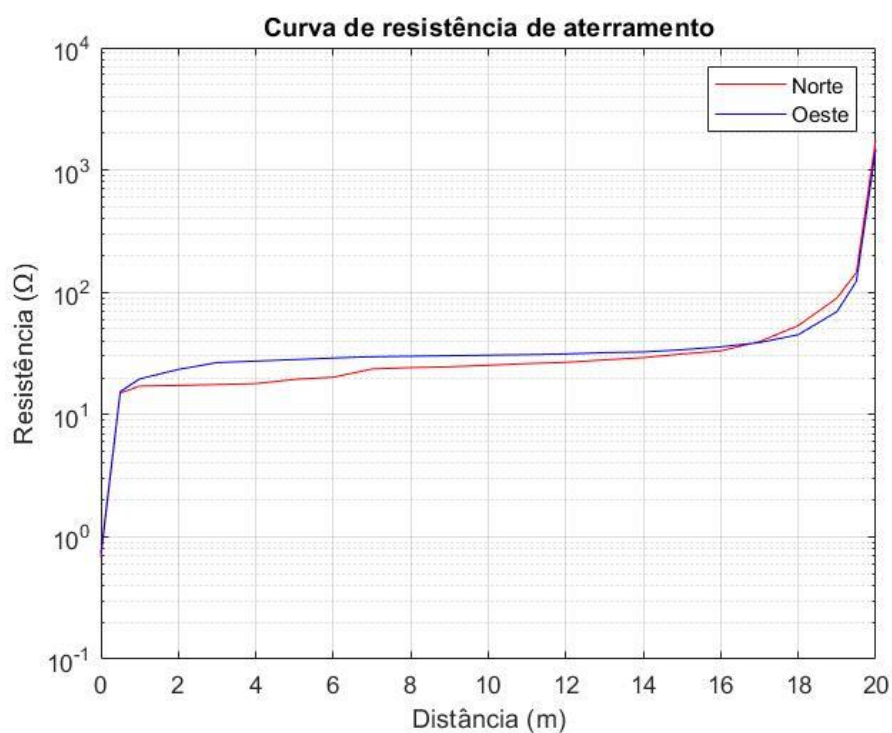


Figura 6.6 Curva característica de resistência de aterramento do abrigo para passageiros de ônibus.

A partir dos dois grupos de medições, foi possível identificar as três zonas como mostrado na Figura 5.2. A primeira, referente à interferência da malha de aterramento está entre $0 \leq D < 8$, a zona de patamar em $8 \leq D < 14$ e a zona referente a interferência do eletrodo de corrente em $14 \leq D < 20$. Dessa forma, conclui-se que a resistência média para aquela medição na zona de patamar consiste em $R = 30 \Omega$.

Este valor pode ser considerado elevado quando comparado com o valor de resistência de materiais condutores, mas ao se tratar de teste de aterramento, é um valor bastante aceitável. Dessa forma, ao se tomar como resistência média do corpo humano sendo 1000Ω , percebe-se que esse sistema, ao ser aterrado, torna o ambiente mais seguro para as pessoas ao redor no caso de acontecer algum tipo de anomalia.

6.2 Análise da medição de resistividade

Considerando como ponto central sendo a estaca que está exatamente atrás do terrômetro (Figura 5.4), foram feitas duas medições conforme especificação do manual do equipamento. O valor escolhido para a profundidade das estacas foi de 25 cm. Considerando que a distância entre cada uma das estacas foi de 1 m, os valores encontrados para as duas medições estão apresentados na Figura 6.7.

Posição	Resistência (Ω)	Resistividade (ρ_a)
Norte - Sul	31,4	216,96
Sul - Norte	34,5	238,38

Figura 6.7 Valores de resistividade encontrados.

Os valores de resistividade encontrados estão de acordo com a literatura para latossolos vermelhos, que são de textura argilosa, apresentam retração acentuada da massa do solo após a exposição dos perfis ao efeito de secamento por algumas semanas, que é o tipo de solo predominante encontrado na região da Universidade de Brasília [23] [24].

6.3 Análise do teste de continuidade

A partir dos equipamentos mostrados na Figura 5.5, foi feito o esquemático do circuito para teste de continuidade do sistema de aterramento. Pode acontecer de existir tensão entre os pontos medidos, mas quando se faz um teste com algum equipamento pode acontecer de não funcionar. A Figura 6.8 mostra o primeiro circuito montado para verificar se havia corrente de fuga para a terra.

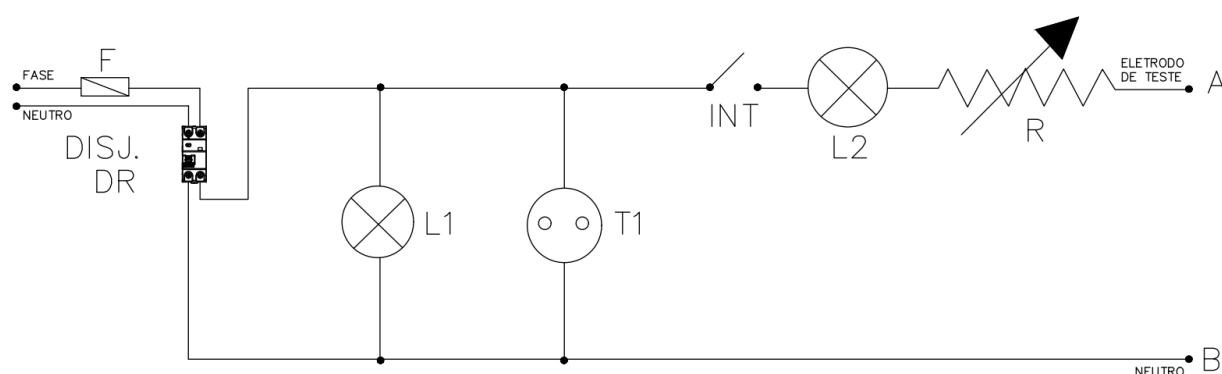


Figura 6.8 Circuito equivalente do Kit limitador de corrente [13].

Para a alimentação do kit foi utilizada tensão 220 V da concessionária, próximo ao local do experimento. A tensão medida entre fase e neutro de circuito aberto foi de 219 V. Para conectar o abrigo ao kit, foi utilizado um condutor de cobre conectado a um parafuso da estrutura. Ao energizar o kit, foi realizada uma variação do potenciômetro para medir a variação de corrente de fuga necessária para atuar o disjuntor DR. Com o auxílio de um alicate amperímetro, a corrente de fuga lida foi de 16 mA, 53% da corrente nominal e fuga do disjuntor DR.

Em um segundo momento, fez-se uso de uma furadeira da marca Bosch, com valores nominais de 220 V, 2,2 A e potência de 450 W, ligada ao sistema de aterramento do abrigo. A furadeira, conectada ao sistema da concessionária, apresentou uma tensão de 215,6 V e corrente de 1,23 A (Figura 6.9), enquanto que ligada ao sistema de aterramento do abrigo apresentou tensão de 186 V e corrente de 1,1 A (Figura 6.10).

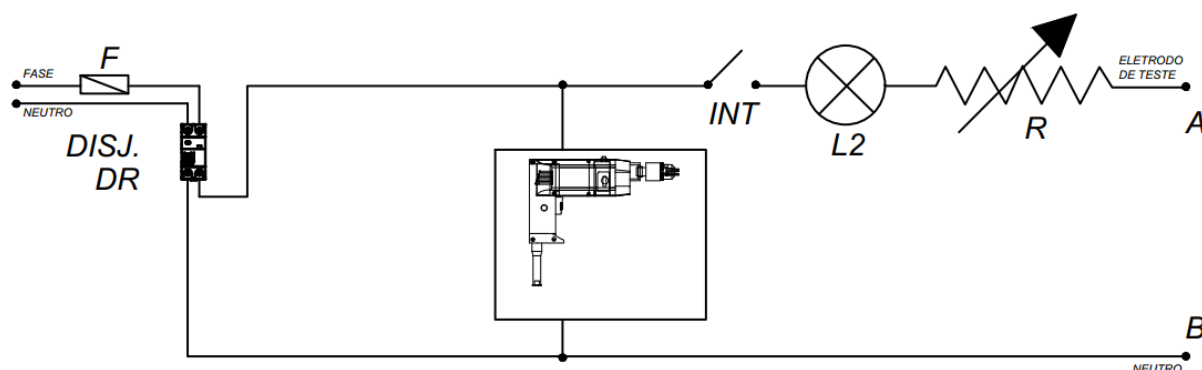


Figura 6.9 Teste com a furadeira ligada direto na rede da concessionária.

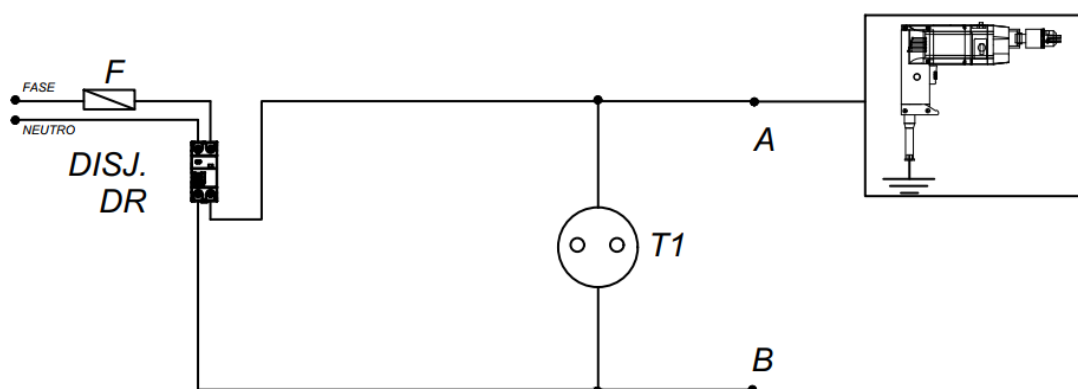


Figura 6.10 Teste com a furadeira ligada no sistema de aterramento do abrigo.

A parada de ônibus pode ser vista na forma de um circuito resistivo, em que as estruturas de sustentação (pés) apresentam valores resistências pequenos, como esperado de um condutor metálico. A medição de resistência utilizando um multímetro apresentou um valor de $0,4 \, \Omega$ (Figura 6.11).

A diferença de tensão encontrada nas medições pode ter sido ocasionada pela resistência do abrigo juntamente com a resistência de solo do local. Devido ao fato de haver continuidade entre os dois pontos de parada, significa que esse sistema possui algum tipo de conexão dentro do solo. Dessa forma, é possível apresentar em um novo circuito todas as impedâncias relacionadas (Figura 6.12). Nessa análise, não foi considerada a influência da frequência, assim, a impedância $Z = R + jX$, em que $X \rightarrow 0$. Dessa forma, $Z = R$.

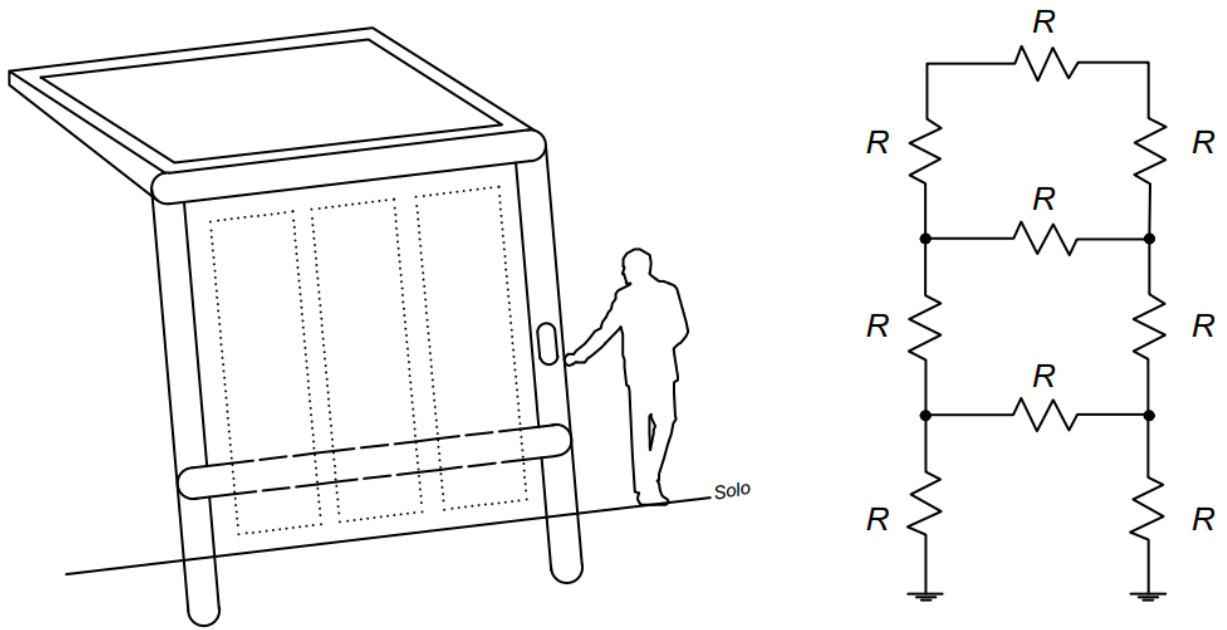


Figura 6.11 Representação da parada de ônibus em forma de circuito elétrico.

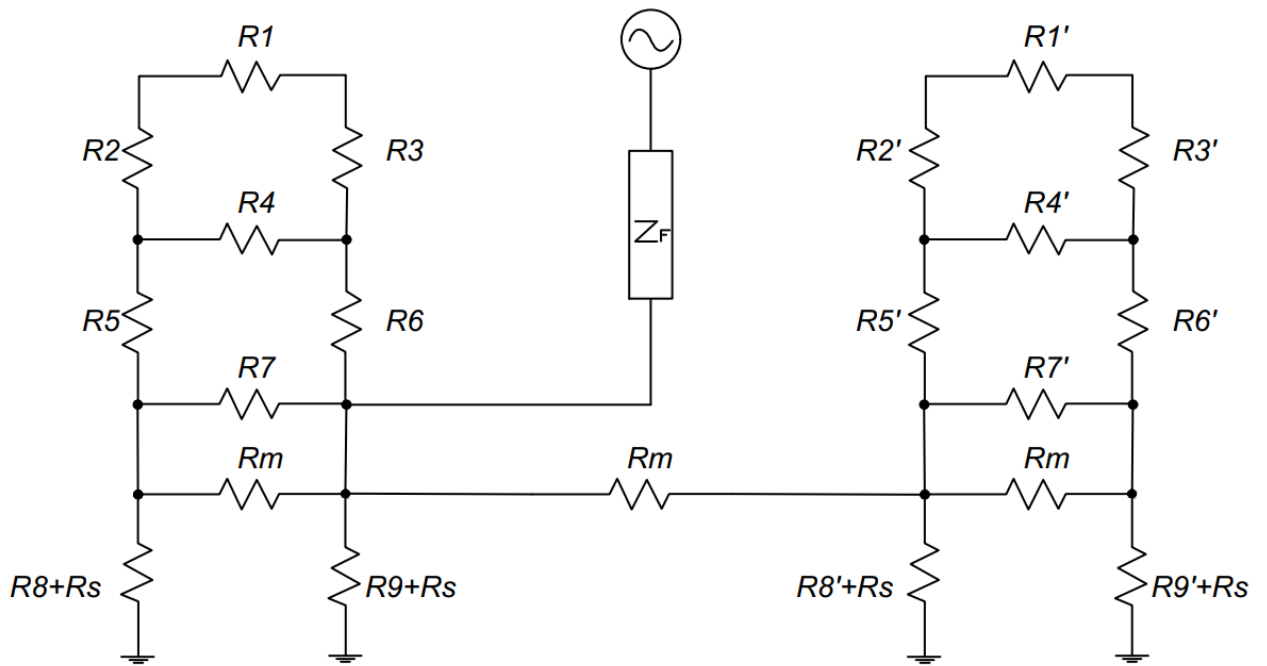


Figura 6.12 Circuito elétrico apresentando as resistências de malha e solo.

Sendo

$$R_1 = R_2 = \dots = R_7 = R'_1 = R'_2 = \dots = R'_7$$

$$R_8 + R_s = R_9 + R_s = R'_8 + R_s = R'_9 + R_s$$

Onde:

- R_1 = Resistência da haste da estrutura do ponto de parada;
- R_m = Resistência da malha de sustentação dentro do solo;
- R_s = Volume de resistência de solo, onde distribui a dispersão de corrente com o solo;
- Z_F = Impedância da furadeira.

A partir de todos os componentes no circuito identificado, pode-se simplificar o circuito e verificar se o ponto da medição em que foi encontrado 186 V de fato é um bom ponto de aterramento.

A Figura 6.13 apresenta o momento em que foi encontrado o valor de 215,6 V. Essa diferença na tensão pode ter sido causada por uma queda de tensão devido à alguns contatos entre os plugues das tomadas dos equipamentos, e também pela impedância da própria linha. A Figura 6.14 apresenta o esquemático da segunda medição, em que foi considerada a impedância da estrutura metálica.

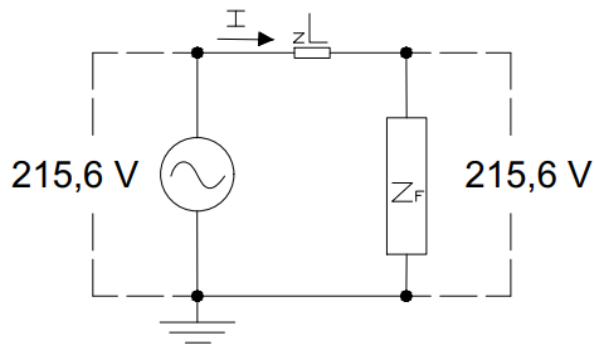


Figura 6.13 Primeira medição, utilizando apenas a furadeira.

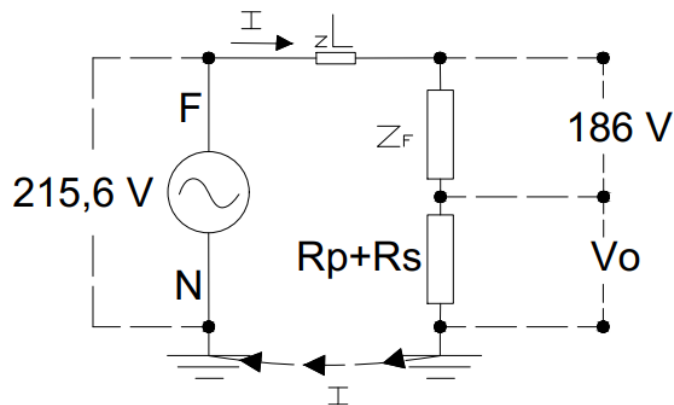


Figura 6.14 Segunda medição, em que foi adicionada a impedância da estrutura metálica.

A variação do valor de tensão na furadeira de 215 V para 186 V (Figura 6.14) é provocada pela impedância da estrutura da parada de ônibus adicionada com a impedância de solo do aterramento sem a conexão do neutro. Dessa forma, há a perda de referência da rede.

É possível notar que temos um valor para resistência da estrutura metálica juntamente com o volume de resistência de solo. Pela lei de Kirchhoff, o valor de tensão equivalente para o conjunto das resistências seria de 29,6 V. Assim, considerando que a resistência da estrutura é suficientemente pequena, e considerando também apenas 4 pontos para escoamento de corrente (pés), temos que:

$$I_{escoamento} = \frac{1,1}{4} = 275 \text{ mA} \quad (6.1)$$

Sendo $V_0 = 29,6 \text{ V}$, temos que

$$R_s = \frac{29,6}{1,1} = 26,91 \Omega \quad (6.2)$$

Segundo [9], deve-se obter a menor resistência de aterramento possível. Esse valor de resistência encontrado se dá pela procura de um ponto de referência para o escoamento da corrente, que, neste estudo, pode ser representado pelo transformador localizado na Faculdade de Tecnologia.

Como ilustração, um tronco de uma árvore caiu em uma linha de transmissão urbana, fazendo com que a parada de ônibus seja energizada com tensão de 220 V, como apresentado na Figura 6.15.

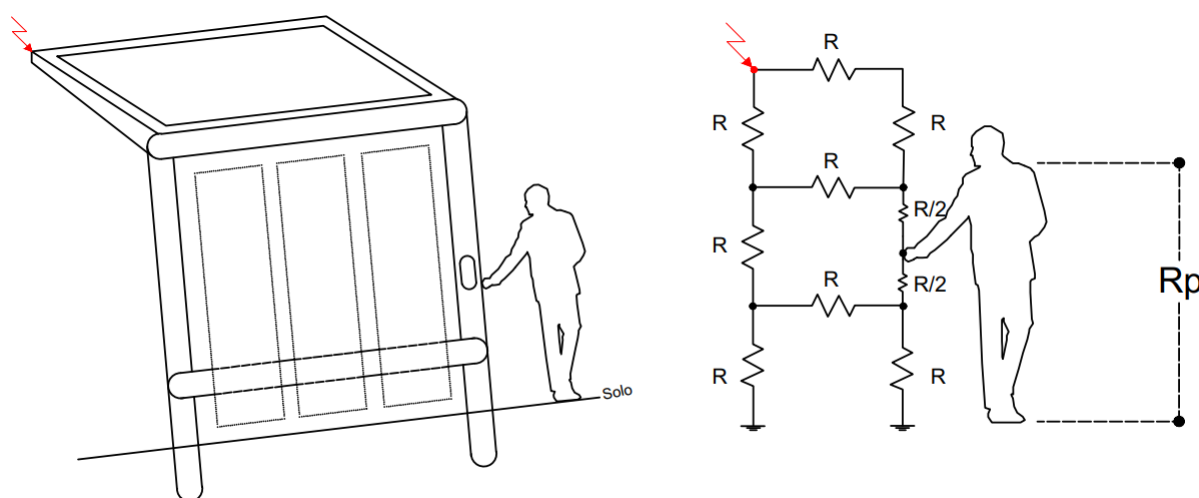


Figura 6.15 Simulação de possível exposição a choque elétrico. À esquerda, posição do local de energização; à direita, representação do circuito no momento do contato de uma pessoa.

Como forma de simplificar o circuito, a Figura 6.16 apresenta as resistências de contato da pessoa com a estrutura metálica, a resistência do corpo humano e também a resistência de contato com o solo.

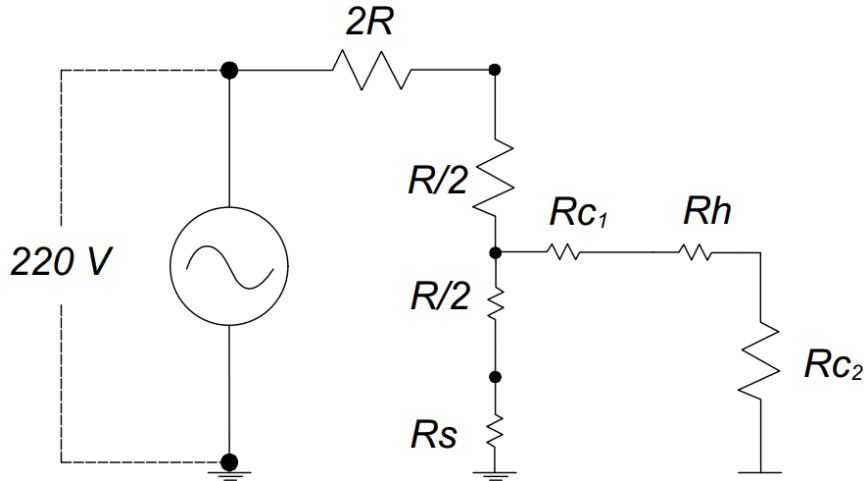


Figura 6.16 Representação do circuito com as resistências de contato e do corpo humano.

Onde:

- R = Resistência da estrutura metálica;
- R_s = Volume de resistência de solo, onde distribui a dispersão de corrente com o solo;
- R_{c1} = Resistência de contato da palma da mão com a estrutura metálica;
- R_{c2} = Resistência de contato dos dois pés com o solo;
- R_h = Resistência do corpo humano.

Assim, temos que:

$$R_p = R_{c1} + R_h + R_{c2} \quad (6.3)$$

em que, como encontrado na medição, $R = 0,4 \, \Omega$. Utilizando o valor encontrado na medição da resistência de aterramento conforme a equação (6.2) e também como base os valores de resistência de contato encontrados em [25]:

- Palma da mão mede aproximadamente 60 a 80 cm², será considerado 60 cm². Dessa forma, temos que a resistência de contato da mão será de 250 Ω ;
- Pés medem aproximadamente 100 cm². Logo, a resistência de contato dos pés é 75 Ω ;
- Resistência do corpo humano aproximadamente 1000 Ω .

$$R_p = 250 + 75 + 1000 = 1325 \, \Omega \quad (6.4)$$

$$R_{eq} = \frac{R_p \cdot \left(\frac{R}{2} + R_s\right)}{R_p + \left(\frac{R}{2} + R_s\right)} = 26,56\Omega \quad (6.5)$$

A Figura 6.17 mostra o circuito equivalente para essa ilustração, de forma a facilitar o cálculo de V_o .

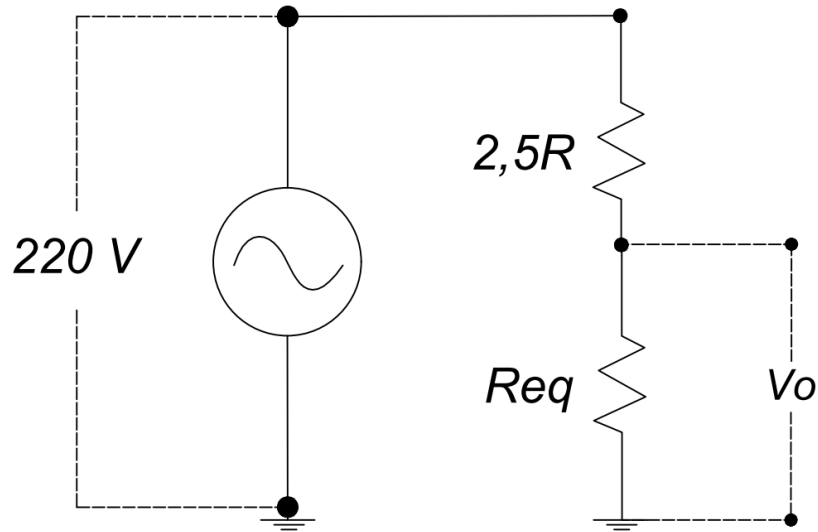


Figura 6.17 Circuito equivalente.

A corrente total percorrida nesse circuito será:

$$I = \frac{220}{(2,5 \cdot 0,4) + 26,56} = 7,98 A \quad (6.6)$$

$$V_o = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + 2,5R} \cdot 220 = \frac{26,56}{26,56 + 2,5 \cdot 0,4} \cdot 220 = 212,01 V \quad (6.7)$$

Assim, uma pessoa estaria exposta a uma tensão de 220 V. Conforme a equação (6.4):

$$I_h = \frac{212,01}{1325} = 160,01 mA \quad (6.8)$$

Esse valor de corrente encontrado é suficiente para causar riscos graves à saúde de uma pessoa, de acordo com a Figura 3.9.

Como forma de verificar um valor diferente de tensão em que uma pessoa estaria exposta, será utilizado como resistência de solo $R_s = 5 \Omega$.

$$R_{eq} = \frac{1325 \cdot \left(\frac{0,4}{2} + 5\right)}{1325 + \left(\frac{0,4}{2} + 5\right)} = 5,17 \, \Omega \quad (6.9)$$

$$V_o = \frac{5,17}{5,17 + 2,5 \cdot 0,4} \cdot 220 = 185,24 \, V \quad (6.10)$$

$$I_h = \frac{185,24}{1325} = 139,8 \, mA \quad (6.11)$$

$$I = \frac{185,24}{5,17 + 2,5 \cdot 0,4} = 30,02 \, A \quad (6.12)$$

Esse valor de corrente encontrado na equação (6.12) é suficiente para ativar qualquer sistema de proteção, como por exemplo disjuntores.

Considerando agora que a pessoa, no momento de contato com a parada de ônibus energizada, e sob a mesma resistência de aterramento encontrada no ensaio ($R_s = 26,91$), possua um calçado com resistência elétrica de aproximadamente $1 \, M\Omega$:

$$I_h = \frac{215,14}{10^6} = 0,21 \, mA \quad (6.13)$$

O valor de corrente encontrado na equação (6.13) mostra que, em uma boa condição de isolamento, uma pessoa não sofreria de efeitos perceptíveis de corrente. Mas na situação de uma pessoa estar com um calçado que não possua um valor alto de resistência, a partir desse valor de tensão, poderia sofrer um choque elétrico.

Dessa forma, como visto na equação (6.6), com o atual sistema de aterramento da parada de ônibus, não seria suficiente para atuar qualquer sistema de proteção.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Ao tratar-se de estruturas em locais públicos, por serem acessíveis por muitas pessoas em diversos momentos do dia, além de serem utilizados no período noturno como quadras de esportes e paradas de ônibus, é necessário ter um olhar crítico em relação à segurança elétrica. O trabalho apresenta a importância do aterramento de estruturas metálicas em diversos materiais, como em janelas e portões, afim de mostrar como fazer para evitar acidentes com choque elétrico.

O trabalho também apresentou efeitos biológicos causados por correntes elétricas externas ao corpo humano, desde valores de tensão imperceptíveis até àqueles que podem causar danos graves.

Conforme exposto ao longo do trabalho, o nível de tensão encontrado é preocupante ao se tratar de segurança em eletricidade. Pode-se notar que, caso aconteça uma situação em que, por algum motivo, o ponto de ônibus tenha sido energizado e coincidir de ser época de chuva, pode acontecer de alguma pessoa sofrer um acidente grave ao tocar na estrutura.

Este trabalho obteve resultados significantes para que tais estruturas sejam feitas com um cuidado maior em relação a segurança em eletricidade. Dessa forma, conclui-se que o ponto de ônibus não foi feito um sistema de aterramento adequado.

A proposta para solução dos problemas apresentados seria um sistema de equipotencialização, que poderia ser instalado, como indica a norma. A utilização de sistemas de DPS não seria necessário, tendo em vista que não são estruturas de instalações elétricas. Outra proposta seria um sistema de proteção em que, quando houver uma corrente de fuga para a carcaça das paradas de ônibus, alambrados e afins, esse sistema de proteção atue.

Para trabalhos futuros, propõem-se pesquisas de segurança para comunidades expostas ao surgimento de tensões perto de torres de linhas de transmissão e também métodos para medição de sistemas de aterramento de estruturas metálicas urbanas não destinadas às instalações elétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PERNAMBUCO, D. D., 17 Julho 2024. Disponível em: <<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2024/07/pai-e-filho-levam-choque-eletrico-em-parada-de-onibus-em-porto-de-gali.html>>.
2. FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
3. KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995.
4. COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
5. ABNT. **NBR 15749**: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009.
6. FILHO, S. V. **Aterramentos Elétricos**. São Paulo: Artliber, 2002.
7. ABNT. **NBR 7117-1**: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.
8. FILHO, S. V. **Descargas atmosféricas**: uma abordagem de engenharia. São Paulo: Artliber, 2005.
9. ABNT. **NBR 5419**: Proteção Contra Descargas Atmosféricas. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.
10. MARTINHO, E. et al. **Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2024 - Ano base 2023**. Salto-SP: Abracopel, 2023.
11. DURAN, J. E. R. **Biofísica**: conceitos e aplicações. São Paulo: Pearson, 2011.
12. JOHN, H. E.; GUYTON, A. C. **Tratado de Fisiologia Médica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2023.
13. GUEDES, Y. D. S. **Postes metálicos na iluminação pública**: Análise das instalações na prevenção contra choque elétrico. Brasília: UnB, 2020.
14. IEC. Effects of current on human beings and livestock – Part 1 : General aspects. In: _____ **IEC TS 60479 -1**. [S.l.]: [s.n.], 2018.

15. KINDERMANN, G. **Choque Elétrico**. Sagra Luzzatto. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 2ª ed, 2000.
16. ABNT. **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.
17. HIBBELE, R. C. **Análise das estruturas**. São Paulo: Pearson, 2013.
18. MATSUKI, E. Sem paradas de ônibus, moradores do DF improvisam guaritas de madeira. - Veja mais em <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/03/25/sem-paradas-de-onibus-moradores-do-df-improvisam-guaritas-de-madeira.htm?cmpid=copiaecola>. **UOL**, 2013. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/03/25/sem-paradas-de-onibus-moradores-do-df-improvisam-guaritas-de-madeira.htm>>.
19. SENA, E.; MOURA, R. Plano Piloto recebe novas paradas de ônibus. **Administração regional do Plano Piloto**, 2019. Disponível em: <<https://www.planopiloto.df.gov.br/2019/07/12/plano-piloto-recebe-novas-paradas-de-onibus/>>.
20. MEGABRAS. **Manual de uso - termômetro digital MTD-20KWe**. [S.l.]: [s.n.], 2008.
21. LUCHETTA, G. Correio Braziliense. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/cidades-df/2024/05/6866140-previsao-do-tempo-para-df-e-de-sol-e-termometros-em-ate-30c.html>>.
22. GOOGLE Earth. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-15.76264516,-47.87185683,1126.76674017a,13.17233093d,35y,-135.96898479h,40.84587748t,-0r>>.
23. IPEDF. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: [s.n.], 2020.
24. EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. [S.l.]: EMBRAPA, 2018.
25. NISKIER, J.; MACINTYRE, A. J. **Instalações elétricas**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.