



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica



Estudo comparativo entre os arranjos de aterramento do tipo A e B conforme a IEC 62305-3 utilizando o *software* XGSLab

João Itamar Vieira Júnior

Campina Grande - PB

Maio de 2021

João Itamar Vieira Júnior

Estudo comparativo entre os arranjos de aterramento do tipo A e B conforme a IEC 62305-3 utilizando o *software* XGSLab

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Área do conhecimento: Processamento de Energia

Orientador

Professor Ronimack Trajano de Souza

Campina Grande – PB

Maio de 2021

João Itamar Vieira Júnior

Estudo comparativo entre os arranjos de aterramento do tipo A e B conforme a IEC 62305-3 utilizando o *software* XGSLab

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Área do conhecimento: Processamento de Energia

Aprovado em 27/05/2021

Professor Pablo Bezerra Vilar

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor Ronimack Trajano de Souza

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

Dedico este trabalho à Deus, fonte da essência de tudo que vive, criador de todas as coisas. E à minha família, que sempre esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado a vida, me guiado no Seu caminho e me ajudado a compreender os aspectos e o funcionamento de uma parte da Sua criação.

Agradeço a minha família pelo ensinamento dos bons princípios morais, por estar sempre ao meu lado e pelo suporte nestes anos de graduação.

Agradeço aos meus amigos que acompanharam minha trajetória e que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal.

Agradeço a todos os professores que tive o privilégio de ser aluno antes da universidade.

Agradeço a instituição UFCG, pela história. A todos que fazem parte da coordenação do Departamento de Engenharia Elétrica pelo apoio administrativo excelente e a vontade de ajudar. Sem dúvida são uma referência. Aos professores pela exposição do conhecimento. Em especial ao professor Ronimack pela orientação neste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram positivamente para a conclusão dessa etapa.

RESUMO

Um sistema de aterramento consiste em um arranjo físico de condutores enterrados no solo. A aplicação de um sistema de aterramento constitui uma estratégia para evitar danos as instalações na qual ele está interligado, seja controlando oscilações de potencial perigosas no neutro do sistema ou evitando acidentes causados por energização, carregamento ou indução de partes metálicas que possam vir a entrar em contato com seres vivos. No contexto da Proteção Contra Descargas atmosféricas, o controle dos potenciais no solo figura como uma característica bastante importante a ser analisada do ponto de vista de segurança. Um sistema de aterramento é constituído basicamente de três componentes que contemplam as conexões elétricas, o eletrodo de aterramento e a terra que o envolve. Os dois últimos componentes contribuem expressivamente para o valor da impedância de aterramento e a distribuição de potenciais, justificando assim um maior detalhamento de suas características. A análise via simulação por *software* corrobora para a formação de opinião crítica sobre o desempenho do sistema de aterramento sob o ponto de vista de segurança das pessoas. Observando os resultados das simulações realizadas, é possível avaliar a influência de parâmetros de resistividade do solo e arranjo físico do sistema na impedância total e a distribuição de potenciais no solo, e valores de tensão de toque e passo, validando ou não um projeto de aterramento.

Palavras-chave: Aterramento, Subsistema de aterramento, SPDA, Distribuição superficial de potenciais, Tensão de toque, Tensão de Passo, XGSLab.

ABSTRACT

A grounding system consists of a physical arrangement of conductors buried in the ground. The application of a grounding system is a strategy to prevent damage to the installations in which it is interconnected, either by controlling dangerous potential fluctuations in the neutral of the system or by avoiding accidents caused by energization, loading or induction of metallic parts that may come into contact with living beings. In the context of Lightning Protection, the control of potentials in the soil appears as a very important characteristic to be analyzed from the point of view of safety. A grounding system consists basically of three components that contemplate the electrical connections, the grounding electrode and the earth that surrounds it. The last two components contribute significantly to the value of the grounding impedance and the distribution of potentials, thus justifying a greater detail of its characteristics. The analysis via software simulation corroborates the formation of a critical opinion about the performance of the grounding system from the point of view of people's safety. Observing the results of the simulations carried out, it is possible to evaluate the influence of soil resistivity parameters and the physical arrangement of the system on the total impedance and the distribution of potentials in the soil, and touch and step voltage values, validating or not a grounding project.

Keywords: Grounding, Earth-termination systems, Lightning Protection, Earth Surface Potential, Touch Voltage, Step Voltage, XGSLab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes da corrente no solo.....	19
Figura 2 - Efeito da umidade na resistividade do solo.....	22
Figura 3 - Comportamento da resistividade da água em função da temperatura.....	23
Figura 4 - (a) Solo real. (b) solo estratificado.....	24
Figura 5 - Arranjo do método de Wenner.....	26
Figura 6 - Composição da resistência do solo e queda de potencial a partir do eletrodo.....	28
Figura 7 - Arranjo do método da queda de potencial.....	30
Figura 8 - Curva característica teórica da resistência de aterramento de um eletrodo pontual.	31
Figura 9 - Definições segundo a IEEE std 80 de alguns conceitos de potenciais.....	32
Figura 10 - Aparência da curva pxa associada a quantidade de camada do solo.....	38
Figura 11 - Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.....	40
Figura 12 - Superfícies equipotenciais de duas hastes.....	40
Figura 13 - Comprimento mínimo do eletrodo de acordo com a classe do SPDA.....	43
Figura 14 - SPDA externo com arranjo de aterramento tipo (a) A e (b) B.....	44
Figura 15 - Forma de onda padrão para descargas atmosféricas representado pela função de Heidler.....	46
Figura 16 - Comparação entre a função de Heidler e a forma de onda equivalente senoidal..	47
Figura 17 - Edificação considerada para o projeto do subsistema de aterramento.....	49
Figura 18 - Perímetro considerado para o projeto do aterramento.....	49
Figura 19 - Subsistema de aterramento. (a) Arranjo B classe I. (b) Arranjo A classe I. (c) Arranjo B classe II. (d) Arranjo A classe II. (e) Arranjo B classe III. (f) Arranjo A classe III. (g) Arranjo B classe IV. (h) Arranjo A classe IV.....	51
Figura 20 - Desenho do arranjo tipo A Classe I no XGSLab.....	52
Figura 21 - Desenho do arranjo tipo B Classe I no XGSLab.....	53
Figura 22 - Distribuição superficial da tensão de passo. Arranjo tipo A classe I. Resistividade 1000 Ω .m.....	55
Figura 23 - Distribuição superficial da tensão de passo. Arranjo tipo A classe IV. Resistividade 1000 Ω .m.....	55
Figura 24 - Distribuição superficial da tensão de passo. Arranjo tipo B classe I. Resistividade 1000 Ω .m.....	56

Figura 25 - Distribuição superficial da tensão de passo. Arranjo tipo B classe IV. Resistividade 1000 Ω .m.....	56
Figura 26 - Arranjo tipo A classe II, 500 Ω .m.....	59
Figura 27 - Arranjo tipo A classe III, 500 Ω .m.....	59
Figura 28 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo B classe I. 500-1000 Ω .m.....	60
Figura 29 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo B classe I. 500-250 Ω .m.....	60
Figura 30 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo B classe I. 500-250 Ω .m.....	62
Figura 31 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo A classe I. 500-250 Ω .m.....	62
Figura 32 - Arranjo tipo A classe I original.....	63
Figura 33 - Arranjo tipo A classe I modificado. Resistividade 500 Ω .m.....	64
Figura 34 - Arranjo tipo A classe I modificado. Resistividade 500-250 Ω .m.....	64
Figura 35 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 1. Resistividade 500-250 Ω .m.....	65
Figura 36 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 2. Resistividade 500-250 Ω .m.....	66
Figura 37 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 3. Resistividade 500-250 Ω .m.....	66
Figura 38 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 4. Resistividade 500-250 Ω .m.....	67
Figura 39 - Distribuição de potenciais para a perda de seis descidas simultâneas. Arranjo tipo A classe I. 500-250 Ω .m.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.....	35
Tabela 2 - Resultados para classes I, II, III e IV. Resistividade de 1000 Ω .m.....	54
Tabela 3 - Diferença percentual entre os arranjos A e B. Resistividade de 1000 Ω .m.....	54
Tabela 4 - Resultados para as classes I, II, III, IV. Arranjos tipo A e B.....	57
Tabela 5 - Variação percentual de impedância em função da alteração da classe do SPDA...	58
Tabela 6 - Percentual de crescimento dos valores do arranjo tipo B classe I em relação ao tipo A classe I.....	61
Tabela 7 - Resultados para o arranjo tipo A classes I e II modificados.....	63
Tabela 8 - Resultados para a perda de descidas. Arranjo tipo A classe I.....	68
Tabela 9 - Aumento percentual das grandezas para a perda de seis descidas simultâneas em relação ao arranjo tipo A classe I original.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MRT	Monofásico com Retorno por Terra
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surtos
PDA	Proteção Contra Descargas Atmosféricas
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
GPR	<i>Ground Potential Rise</i>
SGM	<i>Smart Ground Multimeter</i>

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
1.1. Motivação.....	13
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1. Objetivos gerais.....	14
1.2.2. Objetivos específicos.....	14
2. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica.....	15
2.1. Sistema de aterramento.....	15
2.2. Conceitos básicos.....	16
2.2.1. Impedância do solo e sua medição.....	17
2.2.2. Resistividade do solo e sua medição.....	19
2.2.2.1. Tipo de solo.....	20
2.2.2.2. Umidade e sais dissolvidos.....	20
2.2.2.3. Temperatura.....	21
2.2.2.4. Compacidade do solo.....	22
2.2.2.5. Granulometria do solo.....	22
2.2.2.6. Estratificação do solo.....	23
2.2.2.7. Medição da resistividade do solo.....	24
2.2.3. Resistência de aterramento e sua medição.....	26
2.2.3.1. Medição da resistência de aterramento.....	28
2.2.4. Conceitos e considerações sobre segurança em aterramentos elétricos.....	31
2.2.4.1. Terra de referência.....	31
2.2.4.2. Tensão máxima do sistema de aterramento (GPR).....	32
2.2.4.3. Potenciais perigosos.....	32
2.2.4.4. Tensão de passo.....	32
2.2.4.5. Tensão de toque.....	32
2.2.4.6. Tensão de transferência.....	33
2.2.4.7. Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.....	33
3. Estudo comparativo.....	36
3.1. Resistividade aparente.....	36
3.2. Arranjo do eletrodo de aterramento.....	38

3.3. Sistema de proteção contra descargas atmosféricas.....	40
3.3.1. Subsistemas de aterramento do tipo A e B.....	41
3.4. Forma de onda senoidal equivalente a descargas atmosféricas.....	44
3.5. XGSLab.....	46
3.6. Metodologia.....	47
3.7. Análise dos resultados.....	53
4. Conclusão.....	69
5. Bibliografia.....	70

1. Introdução

Aterramento elétrico é essencialmente, uma ligação proposital, utilizando condutor elétrico, entre um sistema físico e a terra. O principal objetivo desta ligação é fornecer um caminho de baixa impedância para correntes oriundas de descargas atmosféricas, de curto-circuitos fase-terra e de cargas estáticas em carcaças de equipamentos, além das correntes elétricas decorrentes do desbalanceamento de cargas alimentadas por fonte de tensão trifásica em estrela aterrado.

O aterramento elétrico também tem um papel de fundamental importância, que é reduzir os riscos às pessoas que circulam sobre e nas redondezas do sistema de aterramento pelo controle de tensões induzidas no solo, e assegurar o funcionamento estável do sistema elétrico com uma adequada continuidade do serviço e um desempenho seguro do sistema de proteção.

1.1. Motivação

No contexto do PDA (Proteção contra Descargas Atmosféricas), o sistema de aterramento representa o interface responsável por dispersar as altas correntes das descargas atmosféricas no solo, de forma segura.

Dado a complexidade do comportamento da corrente dispersa no solo, a simulação computacional satisfaz a desejo de visualizar os contornos das superfícies potenciais geradas e refletir sobre a segurança das pessoas em determinados tipos de arranjos, sem a necessidade de construção dos sistemas de aterramento.

Os tipos de arranjos escolhidos para estudo foram os tipos A e B segundo a IEC 62305-3/2006. Essa norma internacional é a base NBR 5419/2015. Dentre as várias diferenças, a NBR 5419/2015 não contém em seu texto o arranjo tipo A como forma para o subsistema de aterramento.

A adoção dos dois tipos de arranjos (tipo A e B) proporcionaria alternativas de projeto que expande as possibilidades de implementação para um subsistema de aterramento, sobretudo nos grandes centros urbanos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

O objetivo desse trabalho é realizar investigação bibliográfica referente ao tema aterramento elétrico baseada em literatura acadêmica e normativa; o aprendizado de uma ferramenta de simulação de sistemas de aterramento; e o estudo comparativo de dois tipos de arranjo de aterramento considerados em norma IEC sobre PDA.

1.2.2. Objetivos específicos

Construir postura crítica e reflexiva sobre a influência dos parâmetros e características do solo, como umidade, compacidade, sais dissolvidos e etc, no fenômeno de dispersão de correntes no solo através do eletrodo de aterramento.

Avaliar a influência de parâmetros de resistividade do solo e do arranjo físico do eletrodo na impedância total, na distribuição de potenciais no solo, no GPR e nos valores de tensão de toque e passo.

Avaliar, mediante gráficos de superfícies potenciais, a influência do arranjo físico do eletrodo de aterramento na segurança das pessoas que circulam no entorno e no interior da malha de terra, por meio da análise dos potenciais de toque e passo.

2. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica

2.1. Sistema de aterramento

Um sistema de aterramento consiste de um arranjo físico de condutores enterrados no solo. O objetivo desses condutores é estabelecer o contato galvânico e intencional de qualquer estrutura ou ponto de um sistema que se queira conectar ao potencial da terra. Idealmente, um sistema de aterramento promove uma interface de perfeita condução elétrica entre o sistema ou estrutura e a terra, proporcionando ao ponto conectado ao sistema de aterramento, o mesmo potencial elétrico da terra.

Considerando a terra como um referencial de potencial nulo, percebe-se que a conexão de pontos do sistema elétrico e de estruturas à terra representa uma estratégia engenhosa para promover a segurança dos seres vivos, proteção dos equipamentos e também o bom desempenho do sistema elétrico ao qual está conectado.

É possível agrupar o ato de aterrar algo em: “aterramentos de serviço”, quando desempenham efetivamente uma função elétrica no sistema elétrico e “aterramento de segurança”, quando sua finalidade é reduzir riscos a vida (SILVA, 2010).

Uma ligação à terra pode constituir-se um fator de segurança, por permitir o escoamento para a mesma de cargas e correntes de descargas (VISACRO FILHO, 2002). Consegue-se por meio de tal prática, evitar ou pelo menos minimizar os efeitos indesejáveis de:

- Energização (acidental ou por falta de isolamento) de partes metálicas de sistemas, expostas ao contato de pessoas e animais;
- Carregamento de cargas estáticas em corpos ou equipamentos industriais cuja descarga pode originar faísca ou irradiações eletromagnéticas;

- Tensões induzidas em corpos metálicos por descargas atmosféricas ou linhas energizadas próximas (p.ex. tensões induzidas em cercas de arame por linhas de transmissão paralela à mesma).

Como exemplo de aterramento de serviço, pode-se citar o sistema monofásico com retorno por terra (MRT) empregado na distribuição rural e que reduz os custos de construção e manutenção, outro exemplo é a prática de aterrar o neutro de sistemas polifásicos com o objetivo de promover maior sensibilidade dos equipamentos de proteção contra curto-circuito, permitindo isolar prontamente os circuitos ou equipamentos faltosos. O aterramento do neutro permite ainda, limitar os níveis de sobretensão do sistema em caso de falta monofásica à terra, contribuindo positivamente em aspectos econômicos relacionados ao nível de isolamento dos equipamentos.

Dado a importância do sistema de aterramento para o sistema elétrico e para as pessoas e animais, o seu projeto e manutenção é um tema de grande interesse na engenharia elétrica.

Um sistema de aterramento real apresenta características importantes a serem analisadas, tendo em vista o desempenho adequado e satisfatório da sua função. Tais características a considerar são: sua constituição geológica, química e física do solo ao qual está enterrado; o arranjo físico do eletrodo de aterramento, as características do condutor utilizado, bem como a continuidade elétrica de suas conexões.

A seguir veremos os conceitos, aspectos e características dos elementos que constituem um sistema de aterramento real.

2.2. Conceitos básicos

Aterrar um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) consiste em ligá-lo propositalmente ao solo. Um sistema de aterramento é constituído basicamente de três componentes:

- as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos de aterramento;
- eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico enterrado no solo);
- terra que envolve os eletrodos.

É importante frisar que na maioria das situações de projeto, o aterramento é dimensionado para atender solicitações lentas como as decorrentes de um curto-circuito num sistema elétrico de potência. As frequências associadas a esse tipo de ocorrência são baixas, sendo próximas a frequência fundamental do sistema, ou seja, 50 ou 60 Hz. Sendo assim, na maioria dos casos, pode-se modelar o solo que envolve os eletrodos desprezando-se as indutâncias e capacitâncias do mesmo. Porém, tal simplificação não pode ser aplicada em casos de análise do comportamento do sistema de aterramento frente a uma descarga atmosférica (corrente impulsiva) ou uma falta de alta frequência.

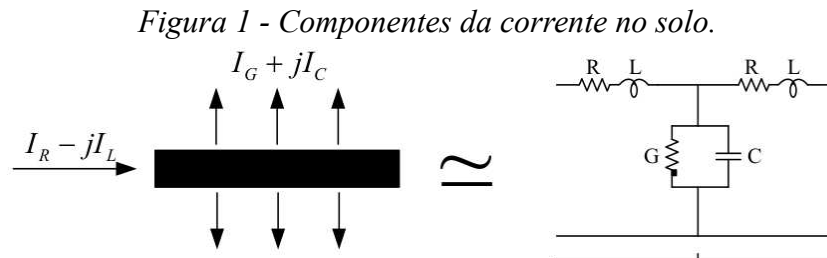
O arranjo físico dos eletrodos de aterramento e as características do solo que os envolvem, contribuem expressivamente para o valor da resistência do sistema de aterramento e também na distribuição de potenciais no solo.

Sendo esses fatores essenciais para o projeto de um sistema de aterramento, trataremos com mais detalhes sobre impedância do sistema de aterramento e sua medição, resistividade do solo e sua medição e resistência do sistema de aterramento e sua medição.

2.2.1. Impedância do solo e sua medição

Para avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que, em geral, uma conexão para a terra apresenta resistência, capacitância e indutância que influenciam na capacidade de condução de corrente para a terra. Assim, a perspectiva na qual o sistema enxerga o aterramento pode ser expressa pela sua impedância. Essa impedância é denominada “impedância de aterramento” e pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo a injeção de corrente elétrica no mesmo através dos eletrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante (VISACRO FILHO, 2002).

Considerando uma porção limitada do eletrodo, observa-se que a corrente dissipada para o solo é composta por quatro componentes, representadas na Figura 1. A corrente injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo.



Fonte: VISACRO FILHO, 2002.

Onde:

- I_R e I_L – parte real e imaginária da corrente longitudinal, respectivamente;
- I_G e I_C – parte real e imaginária da corrente transversal, respectivamente;
- R – resistência elétrica do condutor de aterramento;
- L – indutância do condutor de aterramento;
- G – condutância do solo;
- C – capacitância do solo.

A parcela da corrente que percorre o condutor de aterramento é dita longitudinal. Ela é responsável pelas perdas térmicas internas ao condutor, e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos de correntes. Em termos de circuito equivalente, essas características podem ser modeladas por uma resistência e uma indutância em série (VISACRO FILHO, 2002).

A parcela da corrente que é dissipada para o solo é dita transversal. O campo elétrico no solo (um meio de resistividade ρ e permissividade ϵ) determina o fluxo de corrente condutiva e capacitiva no meio, onde a relação entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, e sim da relação $\sigma/\omega\epsilon$. Essas características podem ser modeladas por uma

condutância e uma capacitância colocadas em paralelo no circuito equivalente (VISACRO FILHO, 2002).

Adicionalmente, devido à propagação da corrente no solo, devem ser considerados os efeitos mútuos entre os diversos pontos dos eletrodos de aterramento. Essa característica confere certa complexidade no equacionamento (VISACRO FILHO, 2002).

Para a medição da impedância de aterramento pode ser utilizado o equipamento desenvolvido pela empresa *Hood-Paterson & Dewar*, denominado *Smart Ground Multimeter – SGM*. O método utilizado é composto por um instrumento capaz de medir a impedância de um sistema de aterramento com o sistema energizado e utiliza-se o método da queda de potencial, não há informações sobre a frequência da corrente injetada. Sabe-se no entanto que o equipamento fornece a impedância do sistema de aterramento por meio do método de estimativa (BELTANI, 2007).

2.2.2. Resistividade do solo e sua medição

Pode-se definir a resistividade do solo como sendo a resistência elétrica medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias preenchido com esse solo (VISACRO FILHO, 2002).

O solo geralmente possui baixa condutibilidade elétrica em seu estado natural. Solos comuns têm resistividade de 2 a 20.000 Ω .m, enquanto um condutor como o cobre puro tem resistividade da ordem de $1,6 \times 10^{-8}$ Ω .m (VISACRO FILHO, 2002).

A capacidade do solo de conduzir correntes elétricas deve-se a presença de outros elementos em sua composição. Em baixas frequências a condução ocorre basicamente por meios eletrolíticos, ou seja, a presença de umidade e sais minerais contribuem majoritariamente para o mecanismo de condução.

O solo é um meio geralmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local em função do tipo, nível de umidade, profundidade das camadas, idade da formação geológica, temperatura, salinidade e outros fatores naturais, sendo também

afetado por fatores externos como contaminação e compactação (NBR 7117, 2012). Algumas características que contribuem para o valor da resistividade serão elencados a seguir.

2.2.2.1. Tipo de solo

O solo é composto por vários elementos, então o seu tipo é definido considerando o material mais abundante da sua composição. Um mesmo tipo de solo pode ter valores de resistividades distintos a depender da sua localização.

É possível caracterizar faixas de valores de resistividade obtidos por medições de campo considerando condições usuais de umidade para diversos tipos de solo (VISACRO FILHO, 2002). Tais valores podem ser consultados em literaturas e normas especializadas como por exemplo a NBR 7117/2012, que trata da medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.

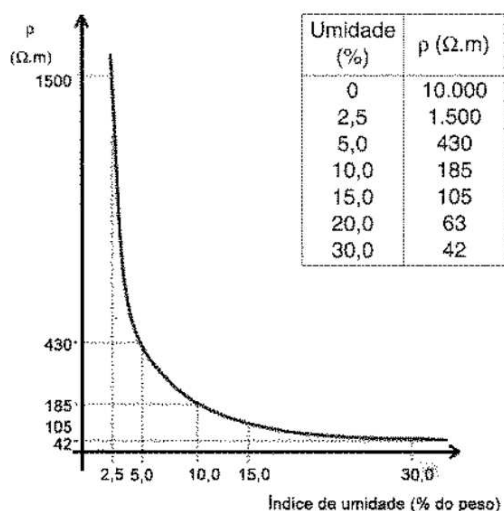
2.2.2.2. Umidade e sais dissolvidos

Em baixas frequências o mecanismo básico de condução elétrica do solo é a eletrólise. Dessa forma, a umidade e a quantidade de sais dissolvidos afetam consideravelmente o valor da resistividade de um determinado solo.

A quantidade de água no solo é variável com uma série de fatores, tais como clima, época do ano, temperatura, natureza do solo, existência de lençóis subterrâneos entre outros. Em geral a umidade aumenta com a profundidade.

A Figura 2 apresenta um gráfico que relaciona o valor da resistividade e umidade para um solo arenoso. Observa-se que a resistividade diminui sensivelmente com o aumento da quantidade de água diluída no solo para variações do índice de 0 a 18%. A partir daí a variação da umidade afeta pouco o valor da resistividade. Experiências realizadas com diversos outros tipos de solo apresentam um comportamento semelhante (VISACRO FILHO, 2002).

Figura 2 - Efeito da umidade na resistividade do solo.



Fonte: VISACRO FILHO, 2002.

No entanto não é razoável presumir que o solo que retenha grande quantidade de água tenha pequena resistividade se a quantidade de sais nele dissolvido for baixa (VISACRO FILHO, 2002).

2.2.2.3. Temperatura

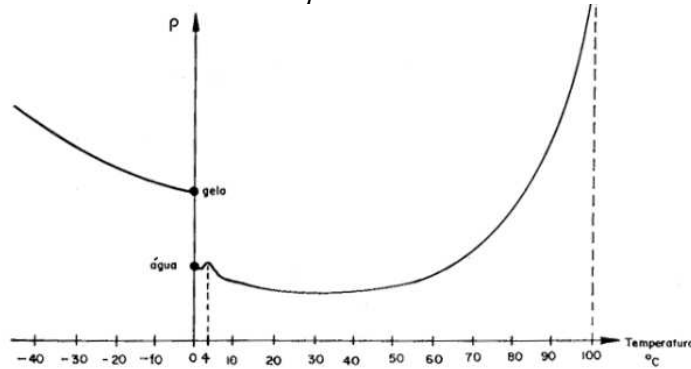
A influência da temperatura no valor da resistividade está ligada diretamente à concentração de umidade no solo e a característica molecular da água quando ocorre mudança de seu estado físico.

Em temperaturas elevadas a água presente no solo evapora, diminuindo a umidade retida por ele, deixando-o mais seco e com a formação de bolhas internas, dificultando a condução de corrente e consequentemente aumentando o valor de resistividade (KINDERMANN, 1995).

A medida que os valor de temperatura cai, a concentração de água no solo aumenta, causando diminuição no valor da resistividade. No entanto, sabe-se que o valor da resistividade da água congelada é elevado, então, conclui-se que para temperaturas muito

baixas onde há presença de água congelada no solo, o valor de resistividade é elevado (KINDERMANN, 1995). A Figura 3 ilustra o comportamento da resistividade da água em função da temperatura na mesma.

Figura 3 - Comportamento da resistividade da água em função da temperatura.



Fonte: KINDERMANN, 1995.

2.2.2.4. Compacidade do solo

Um solo mais compacto apresenta maior continuidade física, e maior área de contato entre os grãos de solo, o que melhora a condução de corrente elétrica e proporciona um menor valor de resistividade. Sendo assim, se recomenda esperar um certo tempo após a instalação de um sistema de aterramento para realizar a medição de sua resistividade, de modo a obter um valor correspondente ao estado de compacidade permanente do solo (VISACRO FILHO, 2002).

2.2.2.5. Granulometria do solo

A presença de grãos no solo são de considerável importância para o valor da resistividade.

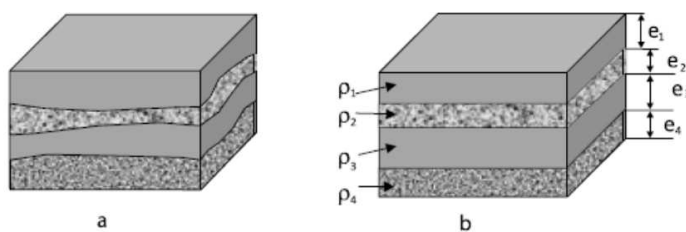
Um solo composto por grãos apresenta espaços vazios, que afetam o valor da resistividade no que diz respeito a superfície de contato entre os grãos e a retenção de umidade no solo.

Solos compostos predominantemente por grãos com maiores dimensões, apresentam grandes espaços vazios, diminuindo a superfície de contato, dificultando a condutibilidade elétrica. Grãos maiores conferem baixa capacidade de reter umidade, deixando-a evaporar com facilidade e/ou escorrer para regiões mais profundas do solo. Essas características aumentam o valor de resistividade do solo (VISACRO FILHO, 2002).

2.2.2.6. Estratificação do solo

O solo é constituído, em geral, por várias camadas horizontais com formação geológica diferente, sendo por essa razão, modelado em camadas estratificadas conforme mostrado na Figura 4. Esta estratificação é alcançada a partir da determinação da resistividade do solo em suas várias camadas (KINDERMANN, 1995). Cada camada com altura e e resistividade ρ .

Figura 4 - (a) Solo real. (b) solo estratificado.



Legenda	
ρ_1, e_1	Resistividade e espessura da camada de número 1
ρ_2, e_2	Resistividade e espessura da camada de número 2
ρ_3, e_3	Resistividade e espessura da camada de número 3
ρ_4, e_4	Resistividade e espessura da camada de número 4

Fonte: NBR 7117, 2012.

A resistividade do solo de um local depende dos diversos fatores vistos. No entanto, o estabelecimento da relação de todos esses fatores ao comportamento da resistividade de um solo estudado, torna-se complexo em casos reais. Isso confere importância à medição da resistividade no local de instalação do sistema de aterramento para a avaliação do solo.

A seguir veremos métodos para a medição do valor da resistividade de um solo.

2.2.2.7. Medição da resistividade do solo

A NBR 7117 – 2012 considera os seguintes métodos de medição:

- amostragem física do solo;
- método da variação de profundidade (método dos três eletrodos);
- método dos dois eletrodos;
- método dos quatro eletrodos, com os seguintes arranjos:
 - arranjo do eletrodo central;
 - arranjo de Lee;
 - arranjo de Wenner;
 - arranjo de Schlumberger – Palmer.

A medição da resistividade por amostragem física do solo fornece, em laboratório, curvas de resistividade em função da quantidade de água adicionada ao solo (primeiro ensaio), além de ser possível realizar ensaios de capacidade de retenção de água (segundo ensaio) (NBR 7117, 2012).

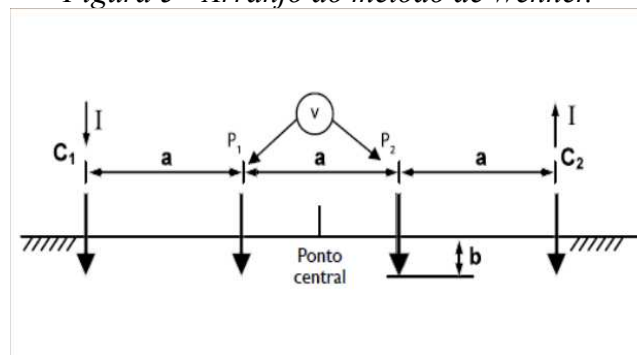
O primeiro ensaio citado fornece parâmetros de resistividade mínima quando o solo está saturado com água e resistividade máxima quando o solo está totalmente seco. No segundo ensaio, a capacidade de retenção de água representa a umidade que o solo terá na sua maior parte do tempo, estando esse fator relacionado com a penetração de água no solo pelo efeito de capilaridade (NBR 7117, 2012).

O método da amostragem tem a limitação de não considerar a estratificação do solo, e as características anisotrópicas e heterogêneas, ou seja, o método não considera integralmente a situação real do solo no local onde será instalado os eletrodos de aterramento. Assim, esse método fornece um critério comparativo com os resultados obtidos em campo pelo método dos quatro eletrodos (NBR 7117, 2012).

Para aplicações reais é necessário métodos de prospecção geoeletricos, dentre os quais o mais conhecido e utilizado é o método de Wenner (KINDERMANN, 1995). Esse método utiliza a detecção dos potenciais estabelecidos nas imediações de eletrodos adequadamente posicionados, sendo possível a caracterização da composição do solo da região em termos de sua resistividade.

O método de Wenner utiliza quatro pontos, igualmente espaçados, cravados a uma mesma profundidade no local do aterramento, como visto na Figura 5. O diâmetro das hastes não devem exceder um décimo do espaçamento.

Figura 5 - Arranjo do método de Wenner.



Fonte: NBR 7117, 2012.

Pelos terminais C_1 e C_2 injeta-se uma corrente no solo. A queda de tensão causada pela corrente é detectada entre os terminais internos P_1 e P_2 . Estabelecendo a relação entre a tensão e a corrente medida obtêm-se o valor de resistência do solo entre C_1 e C_2 .

Frank Wenner provou que existe uma relação linear entre o valor da resistividade do solo e a resistência medida conforme a Equação 1. Nela, a e b são o espaçamento entre as hastes e a profundidade que são enterradas as hastes, respectivamente.

$$\rho = \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \right] \cdot R \quad \Omega \cdot m \quad (1)$$

As hastes utilizadas no método devem ter aproximadamente 50 cm de comprimento com o diâmetro entre 10 e 15 mm.

O método considera que para um solo homogêneo, a medição realizada à um valor a de espaçamento entre as hastes, praticamente 58% da corrente que passa pelos eletrodos de corrente ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes. Portanto, para efeito do método de Wenner, considera-se que o valor de resistência elétrica lida no aparelho é relativa a uma profundidade a do solo (KINDERMANN, 1995), e a equação 1 fornece aproximadamente a resistividade média do solo na profundidade a .

Para o projeto de um sistema de aterramento, deve-se realizar medidas em vários pontos e variando o espaçamento a entre hastes, cobrindo a área onde será instalado o sistema. Assim, um conjunto de leituras, tomadas com vários espaçamentos entre hastes resulta em um conjunto de valores de resistividade, que quando plotadas em função do espaçamento, indica a variação da resistividade com a profundidade.

A partir dos dados obtidos é possível modelar computacionalmente o solo estratificado para posterior simulação do desempenho do sistema de aterramento.

2.2.3. Resistência de aterramento e sua medição

Quando percorrido por uma corrente, o sistema de aterramento se comporta como uma impedância complexa. Para aplicações de alta frequência (p.ex. telecomunicações) é necessário considerar os efeitos capacitivos do solo, bem como a influência da reatância indutiva ao longo dos condutores e eletrodos. Tais efeitos também estão presentes para ondas impulsivas (p.ex. descargas atmosféricas). Em condições de baixa frequência, tal impedância aproxima-se de uma resistência.

A resistência atribuída a um sistema de aterramento é entendida como a relação do valor da tensão resultante no eletrodo com referência a um ponto remoto, e o valor da corrente injetada no solo através do mesmo.

Para a análise da resistência de aterramento deve-se considerar três componentes principais:

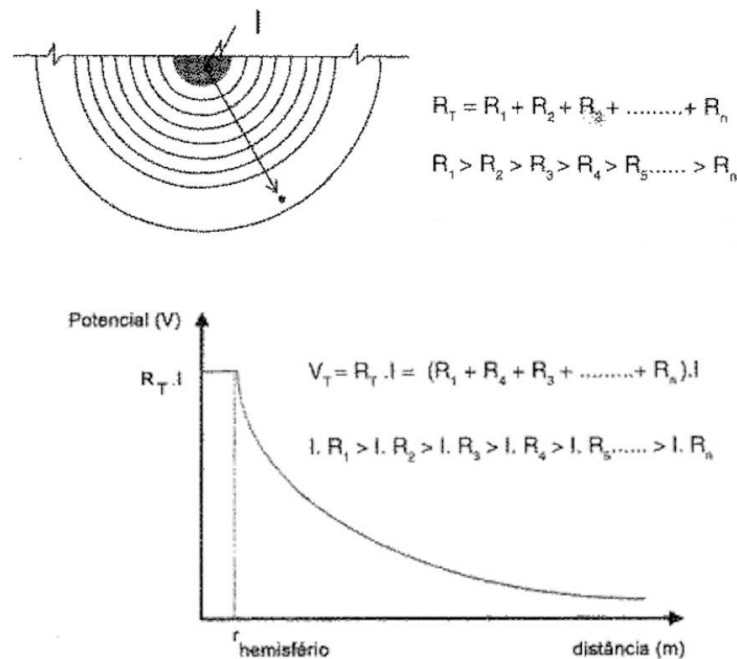
- Resistência própria dos eletrodos de aterramento e das conexões ao mesmo – usualmente de valor baixo pela alta condutividade dos materiais empregados;

- Resistência promovida pela superfície de contato entre o eletrodo e a terra que o envolve – de valor desprezível se o eletrodo estiver isento de algum tipo de cobertura isolante e se a terra estiver bem comprimida junto a superfície do eletrodo;
- Resistência da terra circunvizinha ao eletrodo.

Dentre os elementos citados acima, a resistência da terra circunvizinha ao eletrodo é determinante para o valor da resistência de aterramento, que por sua vez depende basicamente da resistividade do solo e da corrente provinda do eletrodo (VISACRO FILHO, 2002).

Para entender a influência da terra circunvizinha sobre o valor da resistência de aterramento, considere-se um fluxo de corrente de condução para um solo homogêneo por meio de um eletrodo hemisférico. Como ilustrado na Figura 6, o solo é modelado em fatias dotadas de resistividade, e de área que cresce à medida que se afasta do eletrodo.

Figura 6 - Composição da resistência do solo e queda de potencial a partir do eletrodo.



Fonte: VISACRO FILHO, 2002.

Cada fatia apresenta um valor de resistência ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$), e a resistência total (R_T) é o somatório até a enésima fatia. Considerando a mesma espessura para todas as fatias, a

resistência de cada uma decresce com o aumento da distância dela até o eletrodo, devido ao aumento da área. Assim, conclui-se que o que determina efetivamente o valor da resistência de um sistema de aterramento é a porção de terra próxima do eletrodo, podendo ser desprezada parcialmente a contribuição ínfima das fatias a grandes distâncias do eletrodo (VISACRO FILHO, 2002).

Outro fato constatado dessa análise é a queda do potencial ($V_T = R_T \cdot I$) do eletrodo em referência ao infinito (terra remoto). Como o fluxo de corrente (I) que atravessa cada fatia é o mesmo, a diferença de potencial entre cada fatia ($I \cdot R_1, \dots, I \cdot R_n$) decresce devido a diminuição do valor de resistência de cada fatia. Esse fato, ilustrado na Figura 6, evidencia um maior risco aos seres humanos e animais que transitam nas proximidades de um sistema de aterramento na ocorrência de uma falta (VISACRO FILHO, 2002).

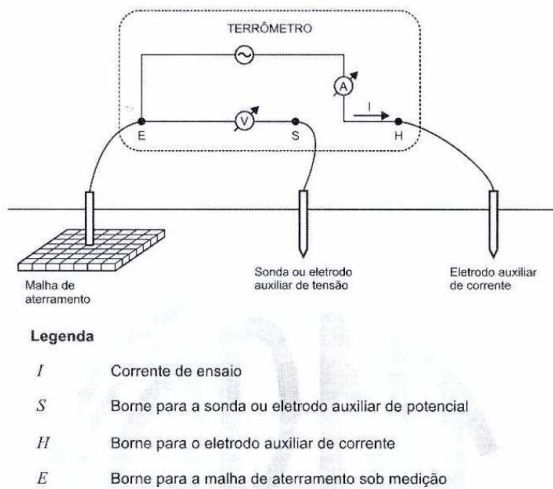
2.2.3.1. Medição da resistência de aterramento

A determinação do valor da resistência de um sistema de aterramento depende da forma e dimensão do eletrodo (considerando um mesmo solo). Cada configuração de eletrodo determina uma formulação específica para o campo elétrico devido a forma de distribuição da densidade de corrente no solo. Assim pode-se obter uma fórmula analítica para o cálculo da resistência de aterramento.

Para fins práticos, a medição no campo é o procedimento mais eficaz para a verificação da resistência ôhmica do eletrodo de aterramento (NBR 15749, 2009). A NBR 15749/2009 apresenta procedimentos para a aplicação do Método da Queda de Potencial.

Este método recomendado pela norma, consiste basicamente em fazer circular uma corrente através do eletrodo de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente, e medir a tensão entre a malha de terra e o terra de referência (terra remoto) por meio de uma sonda ou eletrodo auxiliar de potencial, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Arranjo do método da queda de potencial.



Fonte: NBR 15749, 2009.

Para a realização das medições, a norma adverte a importância das medidas de segurança que devem ser tomadas para diminuir o risco de acidentes relativos a potenciais perigosos que possam surgir nas proximidades de sistemas de aterramento ou em estruturas condutoras aterradas.

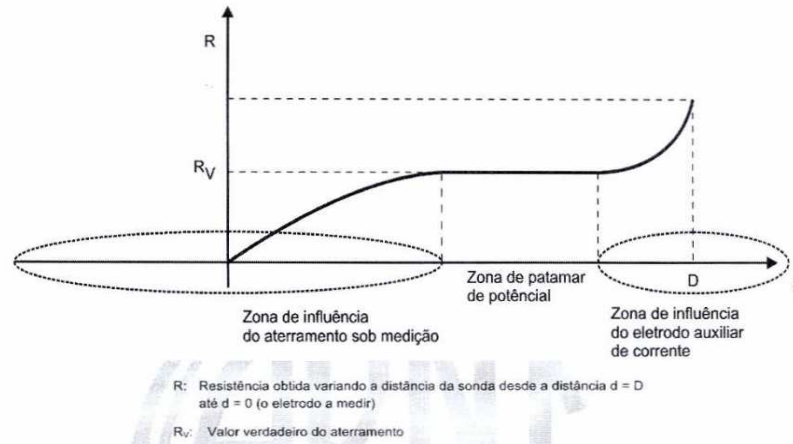
Como medidas de segurança a norma recomenda:

- a utilização de calçados e luvas com nível de isolamento compatível com os valores máximos de tensão que possam ocorrer no sistema sob medição;
- evitar a realização de medições sob condições atmosféricas adversas, tendo em vista a possibilidade de ocorrência de descargas atmosféricas;
- e evitar que pessoas estranhas ao serviço e animais se aproximem dos eletrodos utilizados na medição.

No procedimento de medição, o eletrodo de potencial deve ser deslocado ao longo de uma direção predefinida, a partir da periferia do sistema de aterramento sob ensaio, em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância entre a periferia do sistema de aterramento e o eletrodo de corrente (NBR 15749, 2009).

Com o conjunto de leituras é possível obter a curva característica da resistência de aterramento semelhante a Figura 8.

Figura 8 - Curva característica teórica da resistência de aterramento de um eletrodo pontual.



Fonte: NBR 15749, 2009.

Para obter o valor verdadeiro da resistência do aterramento, é necessário que o eletrodo de corrente esteja a uma distância satisfatória, ou seja, maior que a zona de influência do sistema ensaiado, e o deslocamento do eletrodo de potencial deve ser coincidente com o sentido e a direção do eletrodo de corrente.

Seguindo o procedimento descrito, o trecho horizontal da curva (patamar de potencial), representa o valor da resistência do sistema sob ensaio.

O método da queda de potencial apresenta algumas limitações de ordem prática. Devido a necessidade de lançar os eletrodos de corrente e potencial a distâncias satisfatórias para obter a zona de patamar de potencial, o método apresenta dificuldades quando o sistema de aterramento encontra-se em regiões urbanas e densamente povoadas. É percebida também a dificuldade em medir a resistência de um sistema de aterramento de grandes dimensões, pois existe a necessidade de estender o eletrodo de corrente e potencial a distâncias grandes, as vezes de quilômetros (NBR 15749, 2009).

A norma apresenta como alternativa a utilização de instrumentos em alta frequência, entre 20 kHz e 30 kHz, permitindo a obtenção dos patamares em menores distâncias. No entanto, ela ressalta que tal solução é mais adequada ao método de injeção de altas correntes.

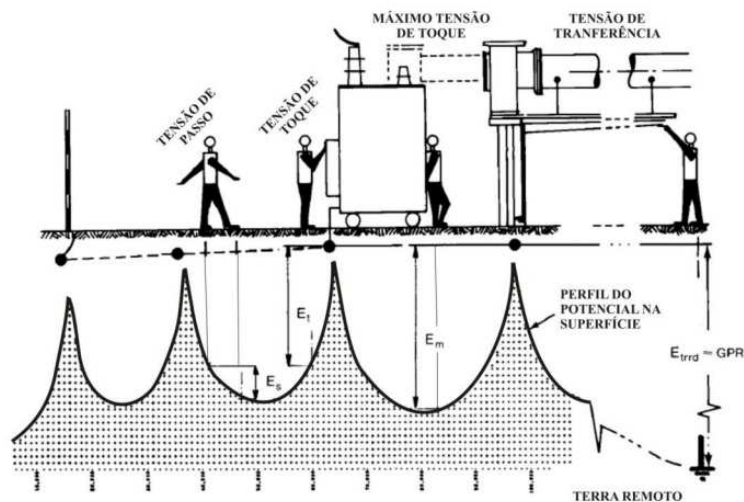
2.2.4. Conceitos e considerações sobre segurança em aterramentos elétricos

Em situações de falta ou descarga atmosférica, ocorre a injeção de corrente no eletrodo de aterramento. Na dispersão dessa corrente para o solo verifica-se o aparecimento de gradiente de potencial decrescente a partir da localização do aterramento. Esse gradiente de potencial introduz a necessidade de análise da segurança das pessoas que estejam próximas a um sistema de aterramento.

Normas como a IEEE std 80 discorrem sobre a tolerância do corpo humano quando da circulação de corrente elétrica através dele. Essas correntes são devidas a diferença de potencial entre partes do corpo em contato direto ou indireto com a terra.

A seguir serão apresentados alguns conceitos e definições necessários para a análise do desempenho de um sistema de aterramento segundo prescrições normativas, e a Figura 9 ilustra as definições segundo a IEEE std 80 de alguns conceitos de potenciais.

Figura 9 - Definições segundo a IEEE std 80 de alguns conceitos de potenciais.



Fonte: Adaptado de IEEE std 80, 2000.

2.2.4.1. Terra de referência

Terra de referência ou terra remoto é a região do solo suficientemente afastada da zona de influência de um eletrodo ou sistema de aterramento, tal que a diferença de potencial entre dois quaisquer de seus pontos, devido à corrente que circula pelo eletrodo para a terra, seja desprezível. É uma superfície praticamente equipotencial e considerada zero para a referência de tensões elétricas.

2.2.4.2. Tensão máxima do sistema de aterramento (GPR)

Tensão máxima que um sistema de aterramento pode atingir relativamente ao terra de referência quando ocorre a injeção de corrente para o solo.

2.2.4.3. Potenciais perigosos

Potenciais que podem provocar danos quando aplicados ao elemento tomado como referência.

2.2.4.4. Tensão de passo

Diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa. Considerada igual a 1,0 m.

2.2.4.5. Tensão de toque

Diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Convencionada igual a 1,0 m.

2.2.4.6. Tensão de transferência

Um caso especial de tensão de toque, onde uma tensão é transferida para dentro ou para fora das instalações de ou para um ponto remoto externo ao local das instalações.

2.2.4.7. Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

Os efeitos da corrente elétrica atravessando o corpo humano depende principalmente de três fatores, sendo estes a duração, a magnitude e a frequência da corrente. A consequência mais desastrosa para o corpo humano de uma possível exposição à passagem de corrente elétrica é a fibrilação ventricular. O limite da fibrilação ventricular está associado não somente a magnitude e a frequência da corrente a que a pessoa é exposta, mas também a massa e a energia efetivamente absorvida pelo ser humano vitimado (MACEDO, 2012).

Charles Dalziel concluiu após estudos, que 99,5% das pessoas com 50 kg ou mais suportariam sem fibrilação a corrente elétrica determinada pela equação 2, para t_s entre 0,03 e 3 segundos (IEEE std 80, 2000). Sendo t_s o tempo de exposição da pessoa à corrente elétrica.

$$I_{choque} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad A \quad (2)$$

Segundo Visacro Filho, na frequência industrial, os efeitos da corrente elétrica pode se manifestar de várias formas. Numa escala progressiva associada à intensidade de corrente, pode-se dizer que os mesmos evoluem numa certa sequência:

- simples formigamento (ou aquecimento);

- enrijecimento muscular;
- inibição dos centros nervosos (com probabilidade de parada respiratória);
- alteração do ritmo cardíaco (em alguns casos causando a fibrilação ventricular);
- ocorrência de queimaduras profundas com necrose dos tecidos;
- alterações no sangue (provocadas por efeito térmico e eletrolíticos).

A Tabela 1 mostra alguns efeitos no corpo humano em função da magnitude da corrente que o atravessa.

Tabela 1 - Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.

I (mA)		Reação fisiológica	Consequência	Salvamento	Resultado final provável
CA	CC				
Até 25	Até 80	1 mA (CA) – Limiar da sensação de formigamento. 5-15 mA (CA) – Contração muscular. 15-25 mA (CA) – Contração muscular violenta e problemas respiratórios.	Se a corrente for próxima à 25 mA pode haver asfixia e conseq. morte aparente.	Respiração artificial.	Restabelecimento
25-80	80-300	- sensação insuportável. - Contração muscular violenta. - Asfixia.	Morte aparente.	Respiração artificial.	Restabelecimento
>80	>300	- Asfixia imediata. - Fibrilação ventricular. - Alteração musculares (químicas). - Queimaduras.	Morte aparente.	-Respiração artificial. - Massagem cardíaca.	-Caso levado ao hospital e feito desfibrilação. - Restabelecimento
Corrente da ordem de ampères		-Queimaduras (efeito térmico). - Necrose dos tecidos. - Fibrilação ventricular. - Asfixia imediata. - Danos posteriores resultado do produto da eletrólise no organismo.	- Morte aparente. - Dependendo da extensão das queimaduras, sequelas ou morte.	- Respiração artificial. - Massagem cardíaca. - Tratamento hospitalar.	- Hospital. - Desfibrilação. - Recuperação difícil. - Atrofia muscular. - Outros danos.

Fonte: KINDERMANN, 1995.

Tendo em vista a seriedade do tema que envolve a segurança em sistemas de aterramento, ver-se que a análise dos parâmetros que contribuem para o projeto de aterramentos seguros para as pessoas, são indispensáveis.

3. Estudo comparativo

Como visto anteriormente, o arranjo do sistema de aterramento reflete pronunciadamente no valor da impedância e na distribuição de potenciais no solo. Neste capítulo serão detalhados alguns aspectos teóricos importantes para a melhor análise dos sistemas de aterramento comparados, bem como a metodologia utilizada e os resultados obtidos da comparação entre os arranjos objetos desse trabalho.

3.1. Resistividade aparente

Um solo estratificado em várias camadas apresenta resistividade diferente para cada camada. Consequentemente, a dispersão da corrente de surto para o solo depende da geometria do sistema de aterramento e das características de cada camada pelas quais ele se estende.

Define-se resistividade aparente ou média como a resistividade vista por um sistema de aterramento particular em integração com o solo. Assim, um solo (p.ex. homogêneo) pode apresentar diferentes valores de resistividade aparente visto por dois sistemas de aterramento distintos, mesmo que estes possuam a mesma configuração de arranjo, mas com diferentes dimensão, profundidade e etc. Ou ainda, uma configuração de arranjo do eletrodo pode interagir diferentemente com solos de mesma resistividade aparente, porém, estratificados distintamente.

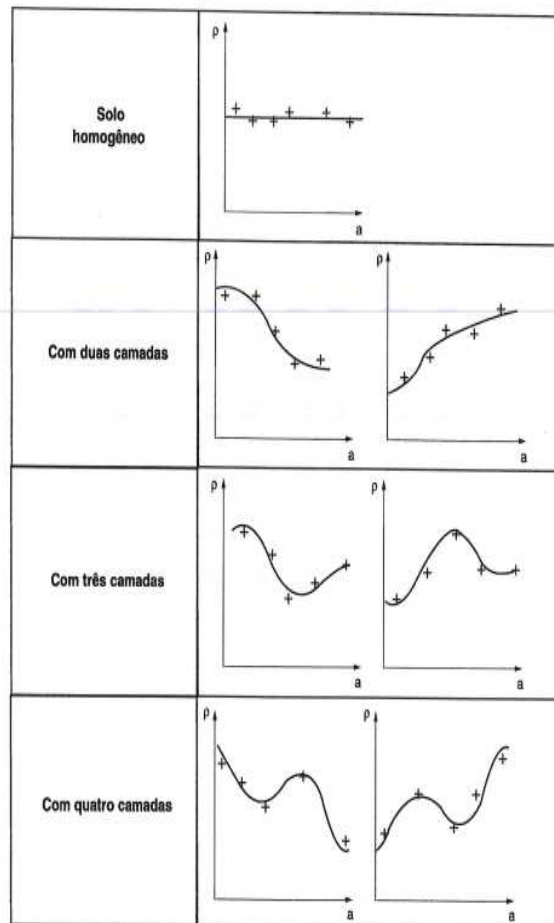
Para determinar o valor da resistividade aparente é necessário adotar técnicas disponíveis de modelagem da estratificação, dentre as quais pode-se citar o método de Wenner já visto, e os métodos gráficos: método simplificado, método gráfico de curvas-padrão e auxiliar, método de Pirson e 2º método de Tagg.

Os métodos para determinação da estratificação pressupõem a composição do solo por camadas aproximadamente horizontas. Matematicamente, o número de camadas é igual à um

mais o número de pontos de inflexão da curva ρxa (resistividade x distância entre eletrodos) construída por meio das medições efetuadas utilizando o método de Wenner.

Analisando a Figura 10 observa-se o aspecto da curva respectiva à quantidade de camadas do solo. Nela verifica-se que camadas mais profundas do solo não apresentam necessariamente menores valores de resistividade. Esse fato é explicado pela total dependência dos valores de resistividade pela composição geológica, química e física do solo, e não necessariamente da profundidade.

Figura 10 - Aparência da curva ρxa associada a quantidade de camada do solo.



Fonte: NBR 7117, 2012.

3.2. Arranjo do eletrodo de aterramento

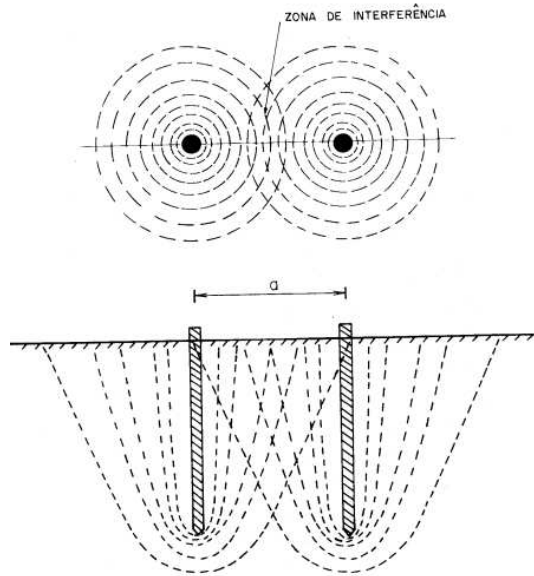
Um arranjo de eletrodo de aterramento é entendido como o aspecto geométrico obtido por meio de conexões entre condutores e/ou hastes enterrados. Alguns arranjos tipicamente utilizados são:

- Arranjo em malha;
- Arranjo em única haste vertical;
- Arranjo em hastes alinhadas em paralelo;
- Arranjo em hastes em quadrado vazio;
- Arranjo em anel;
- Arranjo em condutores enterrados horizontalmente no solo;
- Ou uma combinação dos anteriores.

Cada arranjo confere ao sistema de aterramento, valor de resistência de aterramento e distribuição de potenciais no solo, particular, considerando o mesmo solo.

Para arranjos que possuem hastes interligadas, o cálculo da resistência não segue a lei simples do paralelismo de resistências elétricas. Isto é devido a interferências nas zonas de atuação das superfícies equipotenciais. A Figura 11 ilustra, para duas hastes, as superfícies equipotenciais que cada haste teria se a outra não existisse, e a zona de interferência.

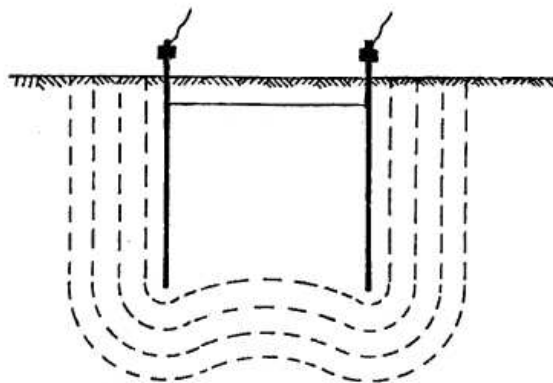
Figura 11 - Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.



Fonte: KINDERMANN, 1995.

A zona de interferência causa uma área de bloqueio do fluxo da corrente de cada haste, então a área de dispersão efetiva da corrente de cada haste torna-se menor, aumentando a resistência de cada haste dentro do conjunto. A Figura 12 mostra a superfície equipotencial resultante da interação do fluxo de corrente entre duas hastes próximas interligadas, nela observa-se o efeito da zona de interferência na distribuição do potencial do conjunto, e a diminuição da área de dispersão efetiva, aumentando o valor de resistência do sistema em comparação ao caso em que não haja zona de interferência.

Figura 12 - Superfícies equipotenciais de duas hastes.



Fonte: KINDERMANN, 1995.

Observa-se que um aumento no espaçamento entre as hastes faz com que a interferência seja diminuída. Na prática, o espaçamento aconselhável gira em torno do comprimento de uma haste (KINDERMANN, 1995).

3.3. Sistema de proteção contra descargas atmosféricas

De acordo com a NBR 5419/2015, não há dispositivos ou métodos capazes de modificar os fenômenos climáticos naturais a ponto de se prevenir a ocorrência de descargas atmosféricas. As descargas atmosféricas que atingem estruturas (ou linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram nas estruturas) ou que atingem a terra em suas proximidades são perigosas às pessoas, às próprias estruturas, seus conteúdos e instalações. Portanto, medidas de proteção contra descargas atmosféricas devem ser consideradas.

Dado as conclusões de uma prévia análise risco, a adoção de tais medidas de proteção contra descargas atmosféricas podem resultar na necessidade de instalação de um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA externo).

Do resultado da análise de risco é definido o nível de proteção contra descargas atmosféricas (NP), que é definido como um número associado a um conjunto de parâmetros da corrente elétrica para garantir que os valores especificados em projeto não estejam superdimensionados ou subdimensionados quando da ocorrência de uma descarga atmosférica (NBR 5419, 2015).

Baseado nos correspondentes níveis de proteção (NP) são definidas quatro classes de SPDA (I, II, III, IV) que possuem um conjunto de regras construtivas particular para cada classe (NBR 5419, 2015).

Um SPDA é definido como um sistema utilizado para reduzir danos físicos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura, e consiste nos sistemas externo e interno de proteção contra descargas atmosféricas. Um SPDA externo é definido como a parte do SPDA consistindo em um subsistema de captação, um subsistema de descida e um subsistema de aterramento (NTU 014, 2017).

Subsistema de captação é a parte do SPDA externo que utiliza elementos metálicos, com a função de captor, dispostos em qualquer direção, que são projetados e posicionados para interceptar as descargas atmosféricas (NTU 014,2017).

Subsistema de descida é a parte de um SPDA externo projetado para conduzir a corrente da descarga atmosférica desde o subsistema de captação até o subsistema de aterramento (NTU 014, 2017).

Subsistema de aterramento é a parte de um SPDA externo que é destinada a conduzir e dispersar a corrente da descarga atmosférica na terra (NTU 014, 2017).

Sendo o subsistema de aterramento o objeto de estudo deste trabalho, vejamos a seguir as características construtivas dos subsistemas de aterramento tipos A e B considerados na IEC 62305-3/2006.

3.3.1. Subsistemas de aterramento do tipo A e B

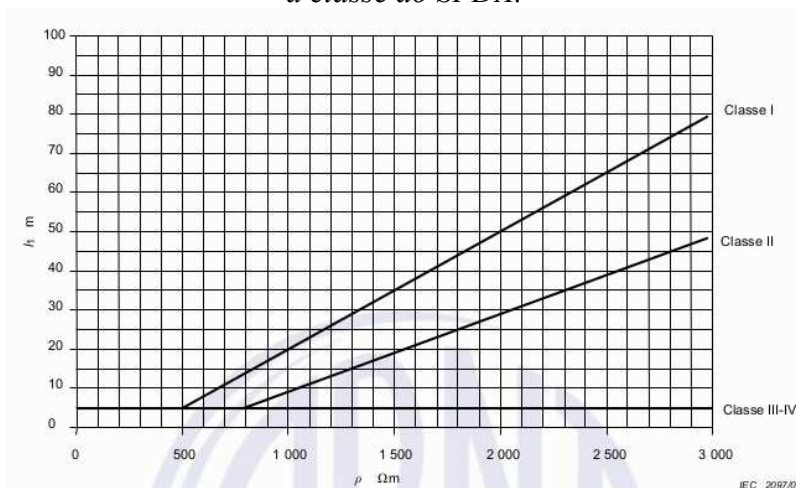
No contexto da proteção contra descarga atmosférica (SPDA), o sistema de aterramento desempenha a importante função de dispersar a corrente proveniente da descarga para o solo, garantindo a proteção contra danos físicos e lesões a seres vivos devido à sobretensão potencialmente perigosa.

Normas como a IEC 62305 e a NBR 5419/2015, que tratam da proteção contra descargas atmosféricas, consideram preferencial o uso da armadura das fundações da edificação como eletrodo de aterramento, desde que providas de continuidade elétrica. Porém, na impossibilidade de utilizar as fundações como eletrodo de aterramento, tais normas apresentam alternativas para a geometria e dimensões do arranjo do eletrodo.

Particularmente, a IEC 62305-3/2006 considera o subsistema de aterramento como uma continuação do subsistema de captação e do subsistema de descida, devendo estabelecer ligação equipotencial entre os condutores de descida e controle dos potenciais na vizinhança da parede da edificação a ser protegida. Para tanto, ela distingue dois tipos de arranjos de eletrodos de aterramento, o tipo A e o tipo B. Ambos os arranjos possuem comprimento

mínimos dos condutores do eletrodo de aterramento (l_1) de acordo com a classe do SPDA, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Comprimento mínimo do eletrodo de acordo com a classe do SPDA.



Fonte: NBR 5419, 2015.

O arranjo tipo A consiste em eletrodos verticais arranjados individualmente (hastes de aterramento) e/ou eletrodos radiais horizontais (eletrodos de superfície), que deve ser conectado a cada condutor de descida e não podendo ter menos do que dois eletrodos no arranjo. Para o eletrodo de aterramento vertical (haste) ou inclinado, o comprimento do eletrodo deve ser metade do valor de l_1 obtido segundo a curva apresentada na Figura 13, e para a combinação de eletrodos verticais e horizontais, o comprimento total deve ser considerado.

Ainda para o arranjo tipo A a norma IEC 62305-3/2006 admite que o comprimento mínimo do eletrodo (l_1) pode ser desconsiderado, desde que uma resistência menor que 10Ω seja alcançada para sistema de aterramento.

O arranjo tipo B consiste em um eletrodo de aterramento em anel, externo à estrutura a ser protegida, em contato com o solo por pelo menos 80% do seu comprimento total. Embora 20% do eletrodo convencional possa não estar em contato direto com o solo, a continuidade elétrica do anel deve ser garantida ao longo de todo o seu comprimento.

Para esse tipo de arranjo, o raio médio (r_e) da área abrangida pelo eletrodo não pode ser inferior ao valor de l_1 . Quando o valor requerido de l_1 for maior que o valor conveniente de r_e , eletrodos adicionais horizontais ou verticais (ou inclinados) devem ser adicionados com comprimentos individuais l_r e l_v , respectivamente, dado pelas equações 3 e 4.

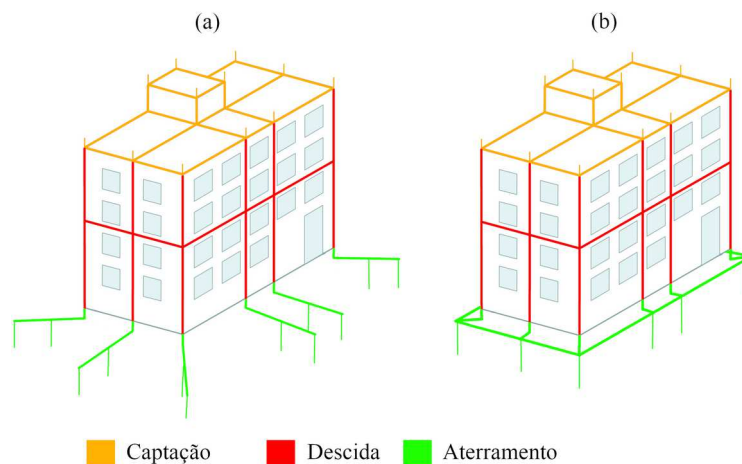
$$l_r = l_1 - r_e \quad \text{m} \quad (3)$$

$$l_v = (l_1 - r_e) \cdot 0,5 \quad \text{m} \quad (4)$$

Tais eletrodos adicionais devem ser localizados o mais próximo possível dos pontos onde os condutores de descida forem conectados e dispostos equidistantemente. A IEC 62305-3/2006 recomenda que o número de eletrodos adicionais não seja inferior ao número de condutores de descida.

A Figura 14 ilustra um sistema de SPDA externo com subsistema de captação, subsistema de descida e subsistema de aterramento (tipos A e B). Nela evidencia-se a diferença física entre os tipos de aterramento A e B.

Figura 14 - SPDA externo com arranjo de aterramento tipo (a) A e (b) B.



Fonte: Próprio autor.

Construtivamente, o arranjo tipo A apresenta maior flexibilidade de projeto, podendo ser considerado vantajoso para a proteção de edificações em centros urbanos, onde a presença obrigatória de um eletrodo em anel fechado (tipo B) implicaria em serviço oneroso e de difícil implementação. Em contraponto, o projeto do arranjo tipo B apresenta relativa simplicidade e previsibilidade na sua concepção.

3.4. Forma de onda senoidal equivalente a descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas da nuvem para a terra são classificadas, segundo a sua forma de onda, como se segue:

- Primeiro impulso positivo 10/350 μ s;
- Primeiro impulso negativo 1/200 μ s;
- Impulsos negativos subsequentes 0,25/100;

O primeiro impulso pode ter polaridade positiva (em 10 % dos casos) ou negativa, enquanto o impulso subsequente tem polaridade sempre negativa. A polaridade indica o sinal das cargas na parte da nuvem onde o relâmpago começa. As cargas negativas e positivas estão na parte inferior e superior da nuvem, respectivamente.

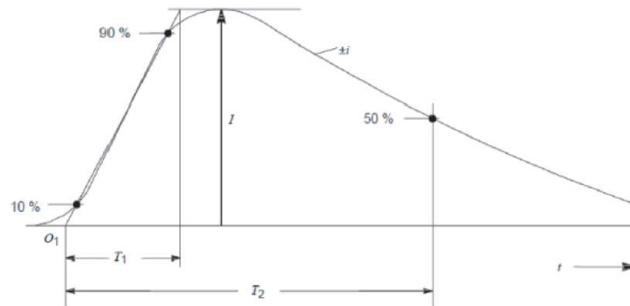
A forma de onda padrão dos impulsos para descargas atmosféricas podem ser definidos pela função de Heidler a seguir.

$$i = \frac{i}{k} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} e^{(-t/\tau_2)} \quad (5)$$

Onde:

- I - é o valor da corrente de pico;
- k - é o fator de correção para o valor de pico de corrente;
- t - é o tempo;
- τ_1 - é a constante de tempo de frente;
- τ_2 - é a constante de tempo de cauda.

Figura 15 - Forma de onda padrão para descargas atmosféricas representado pela função de Heidler.



Fonte: XGSLab, User's Guide. 2019.

Os principais valores padronizados pela IEC 62305-1/2006 para o primeiro e subsequente impulso são os seguintes (os valores de pico dependem do nível de proteção do SPDA):

- Primeiro impulso positivo: $I = 200, 150$ ou 100 kA, $T_1/T_2 = 10/350$ μ s, $\tau_1 = 19$ μ s, $\tau_2 = 485$ μ s;
- Primeiro impulso negativo: $I = 100, 75$ ou 50 kA, $T_1/T_2 = 1/200$ μ s, $\tau_1 = 1,82$ μ s, $\tau_2 = 285$ μ s;
- Impulso subsequente: $I = 250, 37,5$ ou 25 kA, $T_1/T_2 = 0,25/100$ μ s, $\tau_1 = 0,454$ μ s, $\tau_2 = 143$ μ s;

A simulação de fenômenos envolvendo a forma de onda de uma descarga atmosférica, pode demandar elevado esforço computacional. Assim, para simplificar os cálculos e posterior estudo, pode ser utilizado, para fins de engenharia, uma abordagem aproximada, representando o transiente do impulso atmosférico com uma única forma de onda senoidal de frequência equivalente (XGSLab User's Guide, 2019).

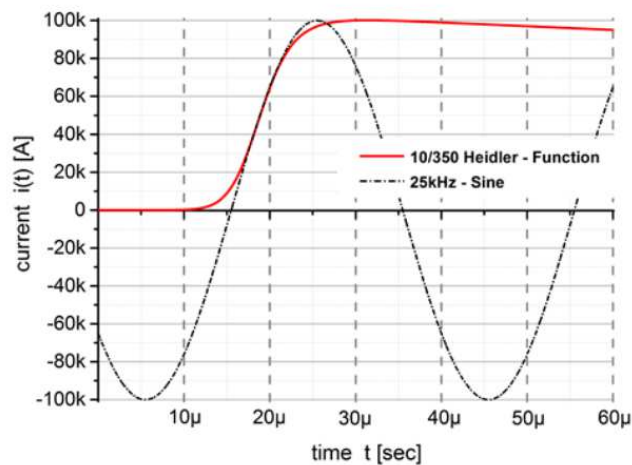
O uso da forma de onda senoidal, pode permitir a obtenção de resultados semelhantes quando considerado a forma de onda impulsiva. A equivalência entre as formas de onda de impulso e senoidal significa que os valores máximos das duas formas de onda são os mesmos para a perspectiva da engenharia. Sendo suficiente considerar o valor de pico da corrente, para o cálculo das tensões de toque, passo e etc (MEPPELINK, 2016).

A frequência equivalente de um impulso padrão com o tempo de frente T_1 pode ser calculada como segue.

$$f_{eq} = \frac{1}{4 T_1} \quad (6)$$

Assim, a onda equivalente senoidal ao primeiro impulso positivo 100 kA – 10/350 μ s, tem frequência de 25 kHz. A inclinação das correntes equivalentes senoidais são cerca de 12 % maiores do que a função de Heidler correspondente (MEPPELINK, 2016).

Figura 16 - Comparação entre a função de Heidler e a forma de onda equivalente senoidal.



Fonte: MEPPELINK, 2016.

Percebe-se que a frequência equivalente seria a frequência quando considerado apenas o tempo de frente do impulso, que é a parte mais íngreme só sinal. A amplitude para a senoide equivalente e o sinal impulsivo é considerada a mesma, porém, a NBR 5419/2015 considera que para efeitos de dimensionamento das MPS's, pode-se considerar 50 % da corrente total para cada classe.

3.5. XGSLab

Problemas envolvidos em simulações eletromagnéticas levando em consideração a presença de um sistema de aterramento são geralmente considerados complexos, porque a

maioria das simplificações usadas em outros campos muitas vezes não são aplicáveis (XGSLab User's Guide, 2019).

O XGSLab é um dos mais poderosos softwares de simulação eletromagnética para sistemas de energia, aterramento e proteção contra descargas atmosféricas e o único software disponível no mercado que leva em consideração os padrões EN e IEEE (XGSLab User's Guide, 2019).

O referido *software* possui módulos para aplicações básicas de sistemas de aterramento (GSA) e aplicações gerais de sistemas de aterramento no domínio da frequência (GSA_FD). E também, módulos que simulam sistemas com condutores aéreos e enterrados no domínio da frequência (XGSA_FD) e no domínio do tempo (XGSA_TD).

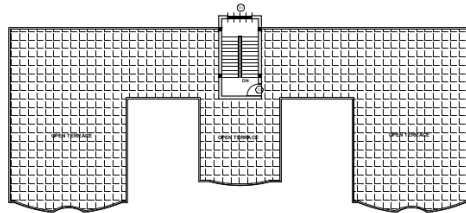
Os módulos GSA, GSA_FD, XGSA_FD e XGSA_TD são baseados em uma abordagem numérica “híbrida”, também chamada PEEC (*Partial Element Equivalent Circuit*), e levam a teoria de circuito e eletromagnética combinados em um único modelo de cálculo. Os métodos híbridos reúnem os pontos fortes dos outros métodos e são adequados para fins de engenharia pois permitem a análise de cenários complexos, incluindo parâmetros externos adicionais, como tensões, correntes e impedâncias (XGSLab User's Guide, 2019).

Para o cálculo da tensão de toque, o XGSLab considera a diferença de potencial de um ponto da superfície à um ponto de referência. Assim, a tensão de toque não é então referida a um ponto a um metro de distância do elemento metálico como para as definições padrão. Já a tensão de passo é calculada considerando a diferença de potencial entre dois pontos na superfície distantes de um metro, conforme a definição padrão.

3.6. Metodologia

Para o estudo de caso será considerada uma edificação de três pavimentos, representada na Figura 17.

Figura 17 - Edificação considerada para o projeto do subsistema de aterramento.

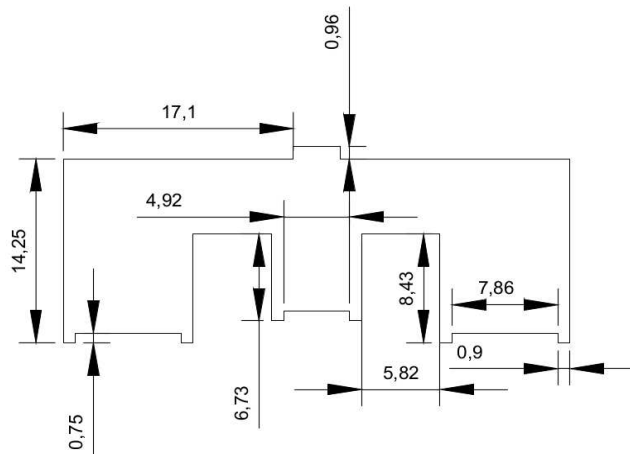


Fonte: Desconhecida.

Para a referida edificação foram projetados subsistemas de aterramento para as quatro classes de SPDA. Os subsistemas de aterramento foram projetados adotando os arranjos tipo A e B conforme o método prescrito pela IEC 62305-3/2006, com cabos de 50 mm² enterrados a 0,5 m de profundidade no solo e hastes de 2,4 m de comprimento e 16 mm de diâmetro.

No projeto do subsistema de aterramento para cada uma das classes e arranjos foi adotado o perímetro do térreo da edificação, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Perímetro considerado para o projeto do aterramento.

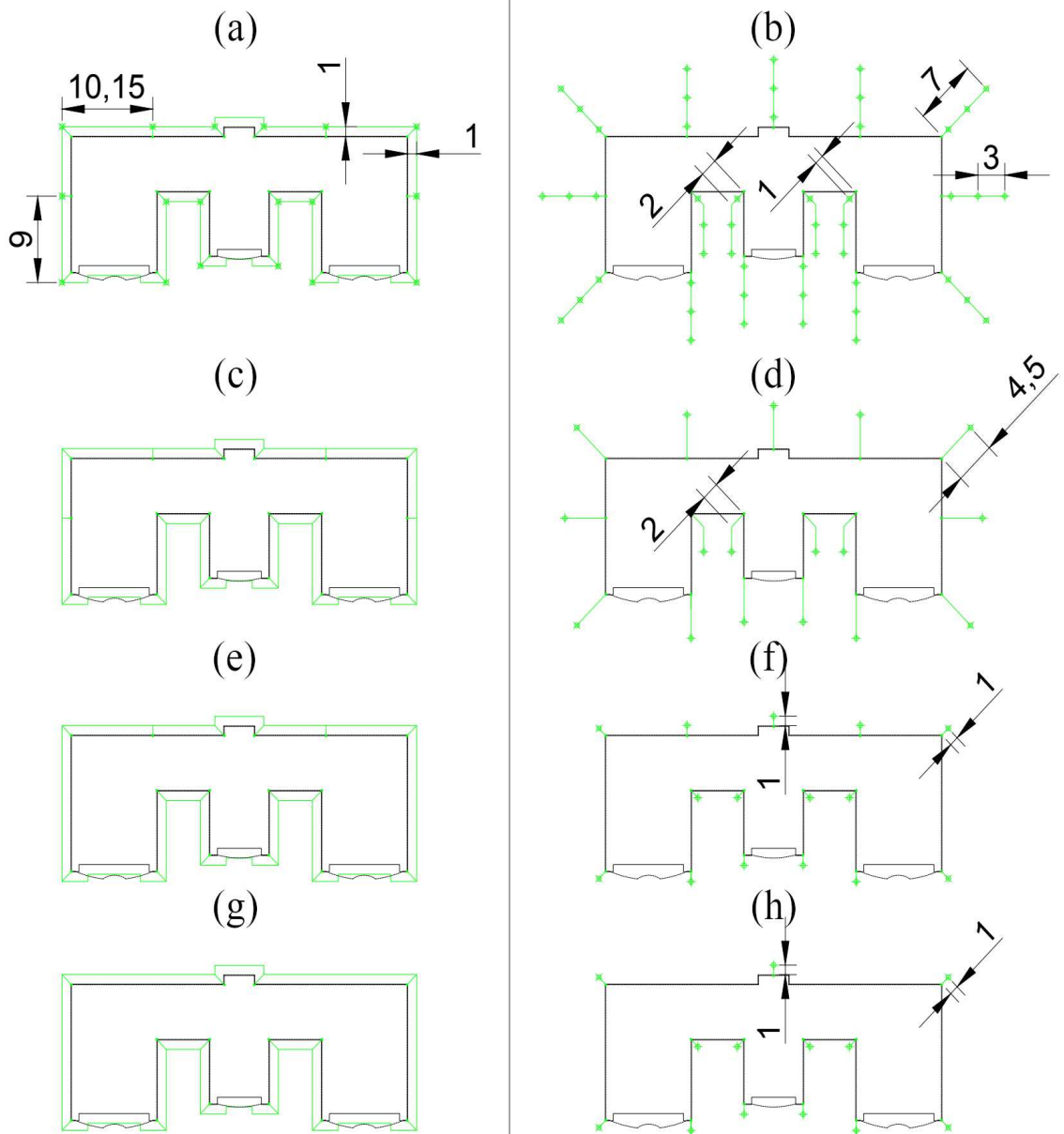


Fonte: Próprio autor.

Conforme o método prescrito pela IEC 62305-3/2006, no arranjo tipo A, o subsistema de aterramento é dotado de um eletrodo de aterramento específico para cada descida do SPDA, cujas características dessa malha estão associadas à classe do SPDA. No arranjo tipo B, o subsistema de aterramento é dotado de um eletrodo de aterramento único para toda a edificação, sendo este eletrodo conectado a cada uma das descidas do SPDA. O arranjo B circunda toda a edificação, distanciando-se a um metro do seu perímetro.

Na Figura 19 são ilustrados os oito arranjos do subsistema de aterramento, sendo quatro arranjos tipo A e quatro do tipo B. Cada tipo de arranjo foi projetado para as quatro classes de SPDA, com comprimento l_1 sendo determinado em função do gráfico apresentado na Figura 2 da IEC 62305-3/2006 e Figura 3 da ABNT NBR 5419-3/2015, para uma resistividade de $1000 \Omega \cdot m$. A quantidade de condutores de descida foi determinada em função do distanciamento entre condutores de descida, conforme Tabela 4 da IEC 62305-3/2006 e Tabela 4 da ABNT NBR 5419-3/2015. Os condutores de descida foram dispostos de forma a proporcionar um distanciamento seguro de portas, janelas e secadas presentes na edificação escolhida.

Figura 19 - Subsistema de aterramento. (a) Arranjo B classe I. (b) Arranjo A classe I. (c) Arranjo B classe II. (d) Arranjo A classe II. (e) Arranjo B classe III. (f) Arranjo A classe III. (g) Arranjo B classe IV. (h) Arranjo A classe IV.



Legenda

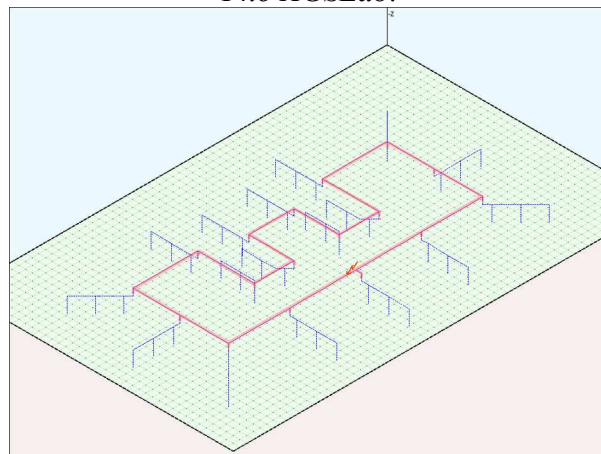
Haste cobreada 16x2400 mm	⊗
Captação	—

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros elétricos para cada um dos arranjos foram obtidos através de simulações computacionais, utilizando-se o *software* XGSLab para obter o valor da impedância total do arranjo, do GPR, da distribuição de potenciais no solo e as tensões de toque e passo. Para tanto, é considerado somente o eletrodo enterrado no solo, desse modo não há necessidade de desenhar o subsistema de captação, subsistema de descida e anéis de equalização com fidelidade ao projeto completo do SPDA.

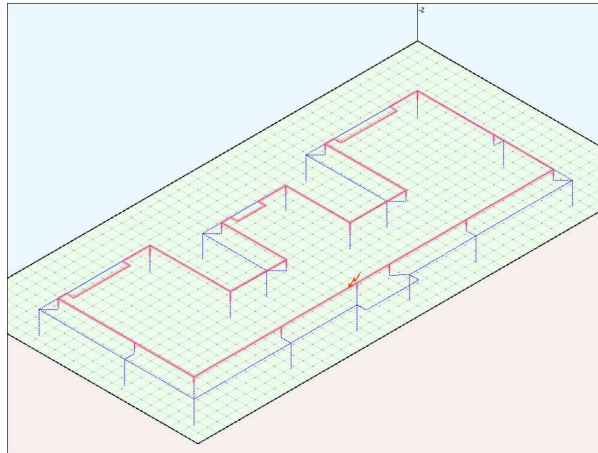
Tanto para o arranjo tipo A quanto para o arranjo tipo B, foi desenhado condutores aéreos à meio metro do solo e descidas, com o objetivo de simular a captação, divisão e condução da corrente até o eletrodo de aterramento. A Figura 20 e Figura 21 apresentam os desenhos dos arranjos classe I para os tipos A e B realizados no XGSLab, com os condutores aéreos destacados em vermelho.

Figura 20 - Desenho do arranjo tipo A Classe I no XGSLab.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Desenho do arranjo tipo B Classe I no XGSLab.



Fonte: Próprio autor.

Cada arranjo projetado foi simulado para solo com $1000 \Omega \cdot m$ de resistividade em camada única.

Adicionalmente, os arranjos foram simulados para solo estratificado em uma e duas camadas. Para o solo com duas camadas foi considerada a espessura de 2,5 m para a primeira camada. O valor de resistividade utilizado para o solo com uma camada foi $500 \Omega \cdot m$. Para solo com duas camadas foram considerados dois cenários: $500 \Omega \cdot m - 1000 \Omega \cdot m$ e $500 \Omega \cdot m - 250 \Omega \cdot m$ para a primeira e segunda camada respectivamente, sendo analisado o comportamento dos arranjos em casos onde o valor de resistividade da segunda camada é maior ou menor que o valor de resistividade da primeira camada. Sabendo que a norma NBR 5419/2015 considera que para efeitos de dimensionamentos das MPS's, pode-se considerar 50 % da corrente total para cada classe, cada caso foi simulado para valores de corrente de 100 kA para a classe I, 75 kA para a classe II e 50 kA para as classes III e IV, considerando um primeiro impulso positivo, ou seja, metade do valor de corrente descrito pela norma. Os casos foram simulados para a frequência de 25 kHz, ou seja, considerando uma senoide equivalente a um primeiro impulso positivo.

Para cada um dos arranjos foi avaliada a influência da variação da resistividade e da configuração do arranjo, no tocante aos valores de impedância total, tensão de toque e passo, GPR e a distribuição de potenciais no solo. Também será comparado o comportamento entre os arranjos tipo A e B, e analisado casos particulares como a perda de condutores de descidas e a possibilidade de desconsiderar o comprimento mínimo l_1 para o arranjo tipo A.

3.7. Análise dos resultados

Para analisar os resultados obtidos na simulação dos arranjos, deve-se destacar que as hastes medem 2,4 m de comprimento e também são enterradas há 0,5 m de profundidade. Assim, há 0,4 m de cada haste imersa na segunda camada, para os casos de simulações com solos de duas camadas.

Para facilitar a organização dos dados em tabela, o tipo e a classe de cada arranjo foram representados por uma letra e um número, por exemplo: o arranjo tipo A classe I é representado apenas por A1, o arranjo tipo B classe IV é representado por B4.

A Tabela 2 apresenta os resultados para solo com resistividade de 1000 $\Omega.m$, correspondente as quatro classes de SPDA. Nela observa-se que para a classe I, o arranjo tipo A apresenta valores menores que o tipo B para todas as grandezas calculadas pelo *software*.

Tabela 2 - Resultados para classes I, II, III e IV. Resistividade de 1000 $\Omega.m$.

Uma camada								
1000 $\Omega.m$								
	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
GPR (kV)	1600,267	1890,175	1560,904	1517,426	1612,981	1016,386	1782,308	1020,453
Impedância (Ω) [mod°]	16,000 8,002	18,900 4,054	20,810 6,266	20,230 3,791	32,260 4,003	20,33 3,785	35,650 4,469	20,410 3,855
Máx. tensão de toque (kV)	1157,462	1424,505	1174,119	1175,842	1276,95	788,749	1450,406	792,99
Máx. tensão de passo (kV)	564,232	605,173	795,843	558,937	1110,292	289,771	1258,147	291,563

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3 apresenta a diferença percentual entre as grandezas do arranjo tipo B em relação ao tipo A, para solo com resistividade de 1000 $\Omega.m$. Nela, percebe-se que o arranjo B classe I, possui GPR 18,126 % maior que o arranjo tipo A classe I, e o arranjo B classe IV possui GPR 42,754 % inferior ao arranjo A classe IV.

Tabela 3 - Diferença percentual entre os arranjos A e B. Resistividade de 1000 $\Omega.m$.

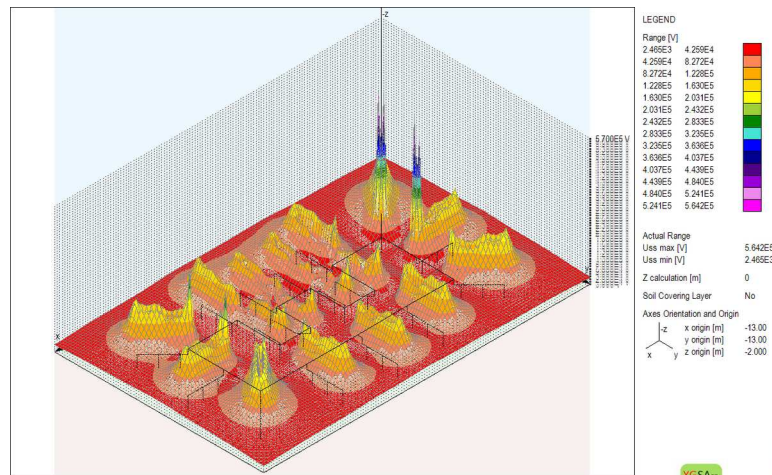
Uma camada				
1000 $\Omega.m$				
	B1/A1	B2/A2	B3/A3	B4/A4
GPR (%)	18,116	-2,785	-36,987	-42,745
Impedância (%)	18,125	-2,787	-36,981	-42,749
Máx. tensão de toque (%)	23,071	0,147	-38,232	-45,326
Máx. tensão de passo (%)	7,256	-29,768	-73,901	-76,826

Fonte: Próprio autor.

A análise da tensão de passo no entorno da edificação representa um item crucial no projeto de uma arranjo de aterramento, pois envolve a segurança das pessoas e animais que circulam na superfície onde está instalado o sistema de aterramento.

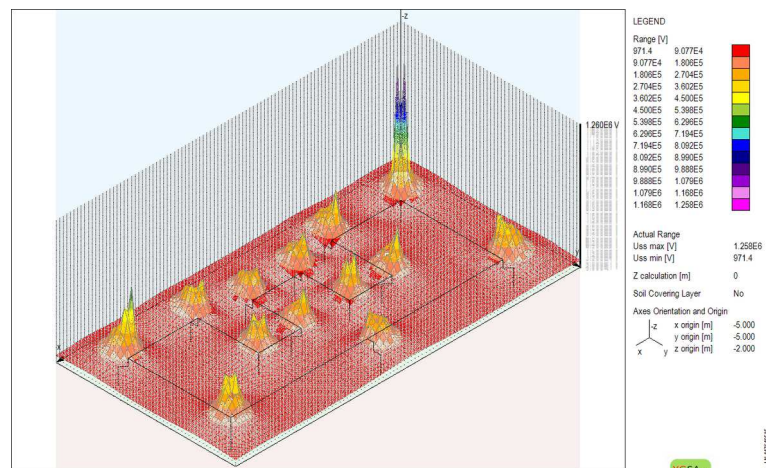
A Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 ilustram a distribuição da tensão de passo na superfície do solo, para os arranjos tipo A e B, para as classes I e IV, ou seja, a classe referente ao nível de proteção mais e menos rigoroso, respectivamente. Para os dois tipos, a tensão de passo é maior em regiões próximas aos condutores enterrados que compõe o eletrodo de aterramento. O tipo B apresenta maior uniformidade na distribuição da tensão de passo no entorno da edificação, pela presença do anel fechado característico do arranjo.

*Figura 22 - Distribuição superficial da tensão de passo.
Arranjo tipo A classe I. Resistividade 1000 $\Omega.m$.*



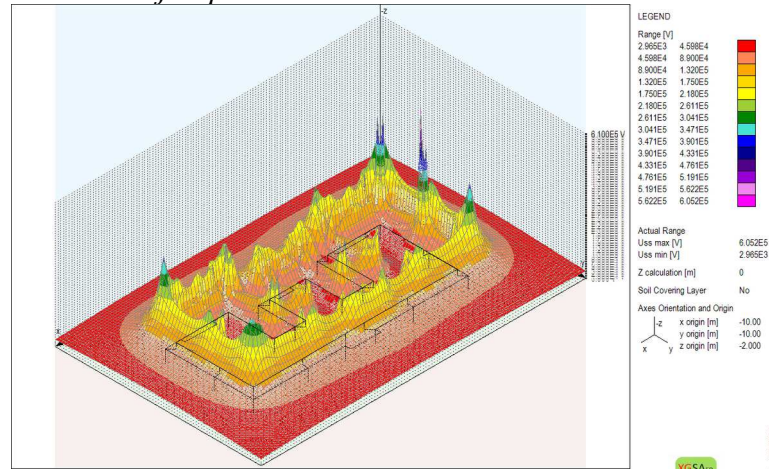
Fonte: Próprio autor.

*Figura 23 - Distribuição superficial da tensão de passo.
Arranjo tipo A classe IV. Resistividade 1000 $\Omega.m$.*



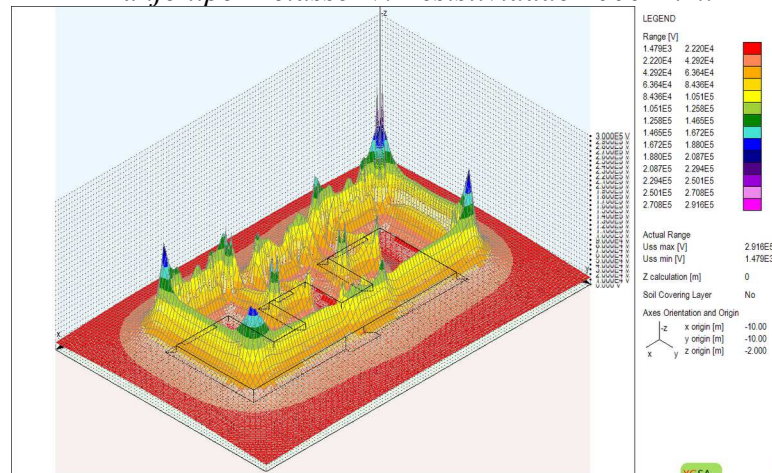
Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Distribuição superficial da tensão de passo.
Arranjo tipo B classe I. Resistividade 1000 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Distribuição superficial da tensão de passo.
Arranjo tipo B classe IV. Resistividade 1000 $\Omega.m$.



Próprio autor.

Numa análise generalizada para as quatro classes, observa-se que o arranjo tipo A tem pior desempenho em relação ao tipo B à medida que aumenta-se a classe do SPDA considerado. Este fato é decorrente das prescrições de projeto determinadas pela norma, onde, no arranjo tipo B ocorre a manutenção de um anel fechado no entorno da edificação para todas as classes de SPDA. Enquanto no arranjo tipo A, ocorre diminuição considerável do comprimento total de condutores enterrados no solo. Assim, para o projeto do subsistema de

aterramento considerado, o arranjo tipo A apresenta melhores resultados que o arranjo tipo B apenas para a classe I.

Para classes em que o arranjo tipo B apresenta melhores resultados em relação ao tipo A (classes II, III e IV), ver-se que a tensão de passo é a grandeza mais alterada pela diminuição do comprimento l_1 dos condutores para o tipo A, prescrita pela norma.

Para a análise da resposta de cada tipo de arranjo à variação de resistividade e configuração do solo, observe-se os valores obtidos na Tabela 4. Ela contém os resultados obtidos para as quatro classes de SPDA e para configurações de solo em uma e duas camadas de resistividade 500 $\Omega.m$ para camada única, 500-1000 $\Omega.m$ e 500-250 $\Omega.m$, para primeira e segunda camada, respectivamente.

Tabela 4 - Resultados para as classes I, II, III, IV. Arranjos tipo A e B.

Uma camada								
500 $\Omega.m$								
	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
GPR (kV)	845,25	961,686	807,849	770,551	819,561	516,106	906,937	518,211
Impedância (Ω) [mod $^\circ$]	8,452 16,261	9,617 9,021	10,770 13,213	10,270 8,509	16,390 8,992	10,320 8,497	18,140 9,975	10,360 8,636
Máx. tensão de toque (kV)	631,136	736,545	619,472	601,517	653,729	403,456	743,607	405,695
Máx. tensão de passo (kV)	282,178	302,542	397,097	279,393	554,481	144,176	629,219	145,068
Duas camadas								
1ª 500 $\Omega.m$ 2ª 1000 $\Omega.m$								
	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
GPR (kV)	1271,75	1460,182	1157,511	1144,659	1110,059	765,5	1206,832	767,43
Impedância (Ω) [mod $^\circ$]	12,720 10,047	14,600 5,392	15,430 8,578	15,260 5,190	22,200 6,144	15,310 5,191	24,140 6,949	15,350 5,283
Máx. tensão de toque (kV)	838	1012,693	781,662	808,867	789,176	541,715	890,353	543,775
Máx. tensão de passo (kV)	319,11	319,213	438,704	288,094	635,333	163,255	714,017	164,026
1ª 500 $\Omega.m$ 2ª 250 $\Omega.m$								
	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
GPR (kV)	596,17	665,912	600,34	562	614,975	376,905	690,414	379,069
Impedância (Ω) [mod $^\circ$]	5,962 24,235	6,659 13,618	8,005 18,669	7,493 12,194	12,300 12,509	7,538 12,159	13,810 13,664	7,581 12,340
Máx. tensão de toque (kV)	496,812	555,357	508,562	478,416	531,729	321,196	608,534	323,452
Máx. tensão de passo (kV)	251,464	287,639	362,004	280,975	465,498	137,597	532,146	138,617

Fonte: Próprio autor.

De um modo geral o GPR e a impedância de um aterramento dependem dos seguintes parâmetros:

- A superfície total de contato do eletrodo com o solo, ou seja, da quantidade de condutores enterrados estabelecendo o contato com o solo;
- A disposição dos condutores enterrados no solo, ou seja, a configuração física do arranjo;
- A zona de interferência das superfícies equipotenciais causada pela proximidade entre os eletrodos, ou seja, a área efetiva de dispersão da corrente no solo;

- O valor de resistividade da primeira camada, visto que, nela encontra-se imersa o eletrodo de aterramento;
- O valor de resistividade da segunda camada, visto que esta se encontra próxima ao eletrodo de aterramento, devido a pequena espessura da primeira camada.

Embora o comportamento de um aterramento resulte da soma de todos esses parâmetros conjuntos, considere-se para efeito de análise, a contribuição individual desses fatores para os valores de impedância.

Sob o ponto de vista dos dois primeiros pontos, observa-se que para os arranjos tipos A e B o valor da impedância cresce para valores crescentes da classe do SPDA. Quanto maior a classe do SPDA menor o comprimento do eletrodo a ser enterrado no solo, diminuindo assim a superfície total de contato do eletrodo com o solo, elevando os valores de impedância. Observa-se, ainda na Tabela 4, a elevação expressiva do valor da impedância do arranjo tipo A quando para valores crescentes da classe do SPDA. Enquanto para o arranjo B a alteração se mostra expressiva apenas na mudança da classe I para a classe II, devido a subtração de um número significativo de hastes. Para as classes II, III e IV o arranjo tipo B apresenta valores de impedância próximos, decorrente da obrigatoriedade da presença do anel em todas as classes, ocorrendo somente a subtração do seguimento do condutor de descida enterrado com o objetivo de se conectar com o subsistema de aterramento.

A Tabela 5 apresenta o crescimento percentual de impedância entre as classes de SPDA. Ela mostra o maior crescimento percentual da impedância na alteração da classe II para a III para o arranjo tipo A, e para o tipo B o maior crescimento é observado para a alteração da classe I para a II.

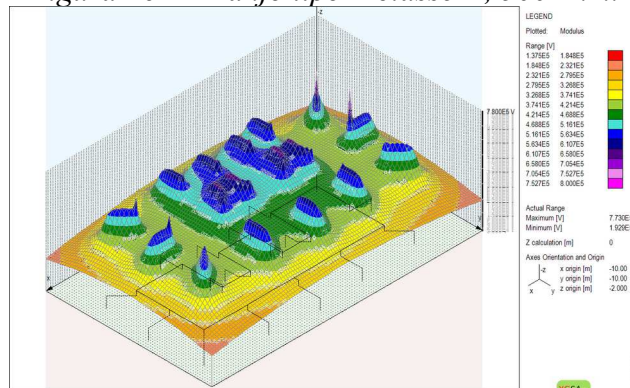
Tabela 5 - Variação percentual de impedância em função da alteração da classe do SPDA.

Uma camada					
500 Ω.m					
A1 A2	A2 A3	A3 A4	B1 B2	B2 B3	B2 B4
27,425	52,182	10,677	6,790	0,487	0,388
Duas camadas					
1ª 500 Ω.m 2ª 1000 Ω.m					
21,305	43,876	8,739	4,521	0,328	0,261
1ª 500 Ω.m 2ª 250 Ω.m					
34,267	53,654	12,276	12,524	0,601	0,570

Fonte: Próprio autor.

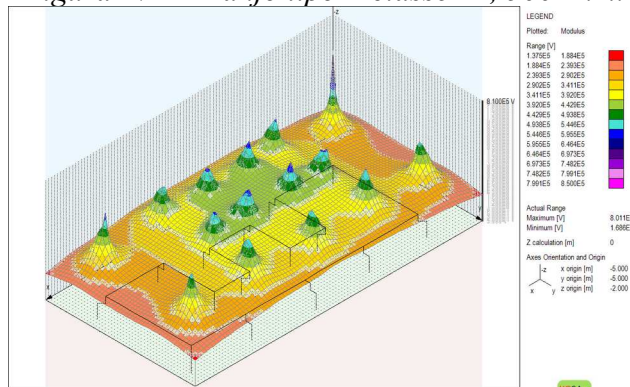
Quanto as zonas de interferência, observa-se que para maiores classes de SPDA há diminuição da interferência entre os eletrodos pelo maior afastamento entre as descidas, o que individualmente causaria a diminuição do valor de impedância do arranjo, porém para os arranjos projetados, esse parâmetro (zona de interferência entre eletrodos próximos) não supera a diminuição do comprimento de eletrodo enterrado, dado as dimensões e disposição do arranjo. A Figura 26 e Figura 27 exemplifica o que foi descrito acima.

Figura 26 - Arranjo tipo A classe II, 500 Ω .m.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - Arranjo tipo A classe III, 500 Ω .m.



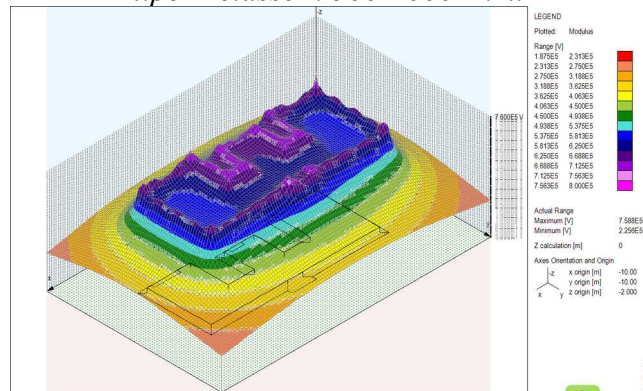
Fonte: Próprio autor.

Como mencionado na metodologia, as simulações foram realizadas para um solo com uma e duas camadas, porém, considerando o solo com uma camada como um solo de duas camadas com o mesmo valor de resistividade para as duas camadas, pode-se estabelecer uma relação entre as três configurações de solo. Assim, têm-se três solos com 500 Ω .m na primeira camada, e 250 Ω .m, 500 Ω .m e 1000 Ω .m na segunda camada. Fazendo essa consideração

nota-se que para um tipo e classe particular de SPDA (p.ex. B2), o crescimento do valor da resistividade da segunda camada proporciona o crescimento de todas as grandezas obtidas.

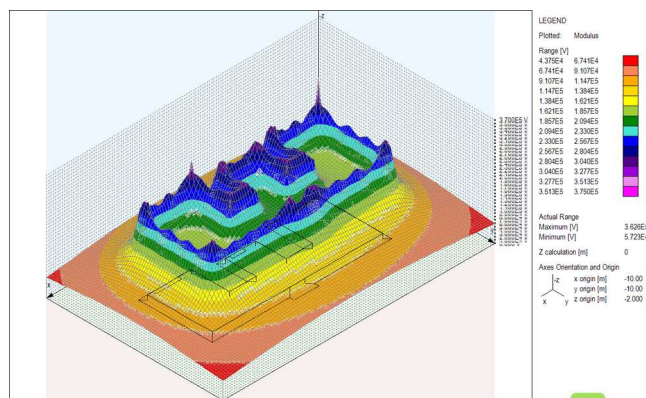
A resistividade de um solo caracteriza a oposição a dispersão de corrente elétrica naquele solo. Essa característica é percebida observando a Figura 28 e Figura 29. Nela percebe-se a oposição a penetração da corrente na segunda camada de solo quando esta tem maior valor de resistividade que a primeira camada (Figura 28), assim a corrente tende a ser dispersa majoritariamente na primeira camada. Em contra partida, os valores de GPR, impedância, tensão de toque e passo máximos são maiores se comparados com o cenário onde a resistividade da segunda camada é menor que o da primeira (Figura 29). Para o cenário onde a resistividade da segunda camada é menor que o da primeira (Figura 29), percebe-se que a corrente “busca” a segunda camada sendo majoritariamente dispersa nela. Tal comportamento ocorre para os dois tipos e as quatro classes de arranjos simulados.

Figura 28 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo B classe I. 500-1000 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 29 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo B classe I. 500-250 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

Uma característica do arranjo tipo B é a presença obrigatória do eletrodo em anel circundando a edificação a ser protegida. Independente da classe do SPDA determinada, a instalação do anel no entorno da edificação é obrigatório. Assim, o arranjo físico do tipo B é pouco alterado pela mudança da classe de SPDA, exceto pela subtração de hastes e a ausência do prolongamento do condutor de descida que está imerso no solo e faz parte do eletrodo de aterramento.

O arranjo tipo A, em contraste ao tipo B, tem o comprimento do eletrodo modificado, pronunciadamente, pela mudança da classe do SPDA, em concordância com a prescrição da norma sobre o comprimento l_1 mínimo a ser instalado.

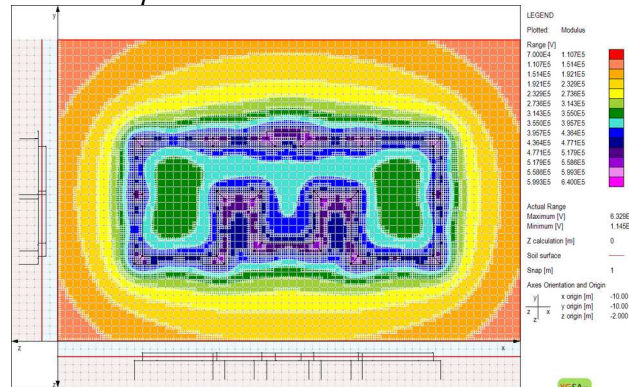
Observando ainda a Tabela 4, comparando os dois tipos de arranjos, ver-se que, considerando as três configurações de solo simuladas, o arranjo tipo A apresenta valores menores que o arranjo tipo B somente para a classe I do SPDA. Para a classe I, o arranjo tipo B possui 151,08 m de condutores e 18 hastes enterrados e dispostos em uma área ligeiramente maior que a área da edificação. O arranjo tipo A possui 127,5 m de condutores e 51 hastes enterrados, e está disposta em uma área consideravelmente maior que a área da edificação. Para esse caso, o projeto do arranjo tipo A consegue estabelecer contato com o solo e dispersar as correntes com mais eficiência que o tipo B. A Tabela 6 apresenta o percentual de crescimento das grandezas do arranjo B1 em relação ao A1. Nela ver-se que a grandeza de maior crescimento é a tensão de toque para o solo com 500-1000 $\Omega.m$ de resistividade. A Figura 30 e Figura 31 apresenta a diferença na distribuição dos potenciais para os arranjos A1 e B1.

Tabela 6 - Percentual de crescimento dos valores do arranjo tipo B classe I em relação ao tipo A classe I.

	Uma camada	Duas camadas	
	500 $\Omega.m$	1ª 500 $\Omega.m$ 2ª 1000 $\Omega.m$	1ª 500 $\Omega.m$ 2ª 250 $\Omega.m$
GPR (%)	13,775	14,817	11,698
Impedância (%)	13,784	14,780	11,691
Máx. tensão de toque (%)	16,701	20,846	11,784
Máx. tensão de passo (%)	7,217	0,032	14,386

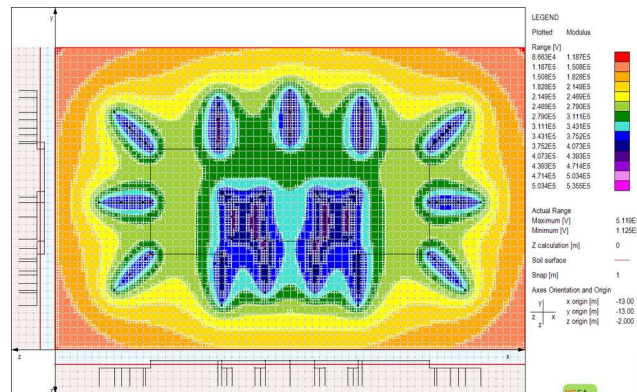
Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo B classe I. 500-250 Ω .m.



Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - Distribuição de potenciais. Arranjo tipo A classe I. 500-250 Ω .m.



Fonte: Próprio autor.

A norma IEC 62305-3/2006 propõe que, para o arranjo tipo A, o comprimento l_1 do eletrodo pode ser desconsiderado desde que a impedância do aterramento seja menor que 10 Ω .m.

Com o objetivo de testar os efeitos dessa proposição, o arranjo tipo A classes I e II foram modificados subtraindo o comprimento do eletrodo até sua impedância ser mais próxima possível de 10 Ω .m. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as configurações de solo onde, de acordo com a Tabela 4, o valor da impedância é inferior à 10 Ω , e apresenta também o aumento percentual dos valores em relação ao arranjo A1 original.

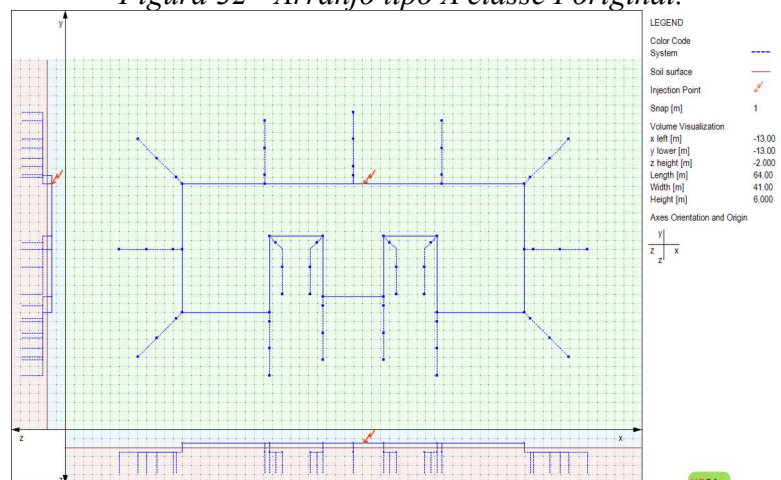
Tabela 7 - Resultados para o arranjo tipo A classes I e II modificados.

Arranjo tipo A modificado $\rho \leq 10 \Omega$			
	A1		A2
	500 Ω .m	1ª 500 Ω .m 2ª 250 Ω .m	1ª 500 Ω .m 2ª 250 Ω .m
GPR (kV)	992,728	996,288	743,13
Impedância (Ω) [mod]°	9,927 13,924	9,963 16,824	9,908 16,252
Máx. tensão de toque (kV)	746,19	870,814	651,55
Máx. tensão de passo (kV)	408,985	654,563	505,467
Aumento percentual (%)			
	A1		A2
	500 Ω .m	1ª 500 Ω .m 2ª 250 Ω .m	1ª 500 Ω .m 2ª 250 Ω .m
GPR (%)	17,448	67,115	23,785
Impedância (%)	17,451	67,108	23,773
Máx. tensão de toque (%)	18,230	75,280	28,116
Máx. tensão de passo (%)	44,939	160,301	39,630

Fonte: Próprio autor.

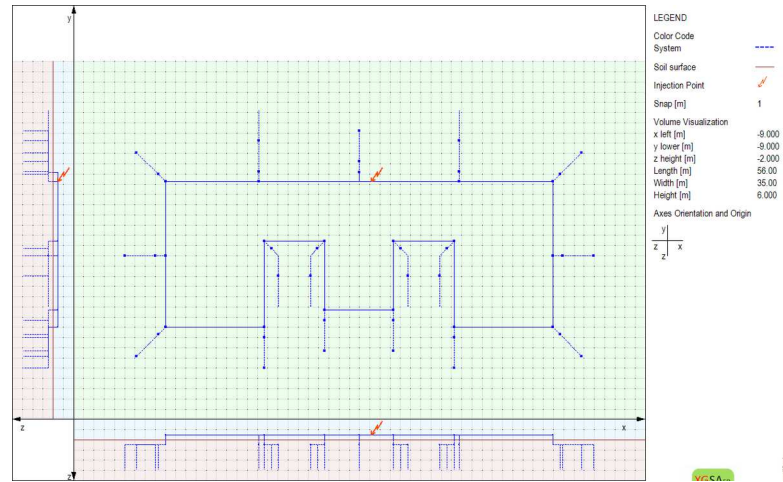
A Figura 32, Figura 33 e Figura 34 mostram as modificações feitas no arranjo A classe I em relação ao arranjo original. Nela observa-se a redução significativa na quantidade de condutores suprimidos ao considerar a proposição da norma IEC 62305-3/2006. Em contraponto ao benefício construtivo dado pela redução da quantidade de condutores, as modificações no arranjo elevaram consideravelmente os valores de tensão de toque e tensão de passo máximos, principalmente para solo com resistividade 500-250 Ω .m, o que pode ser considerado um prejuízo ao desempenho do arranjo modificado do ponto de vista de segurança. O maior percentual de aumento foi observado para a tensão de passo máximo, para o arranjo tipo A classe I com resistividade 500-250 Ω .m.

Figura 32 - Arranjo tipo A classe I original.



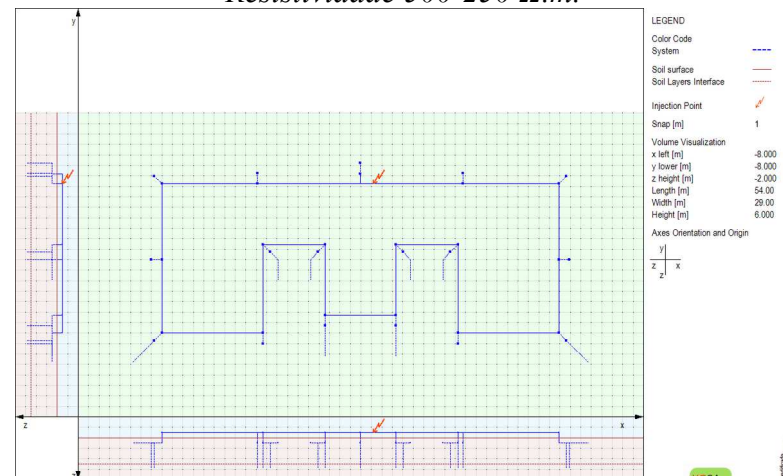
Fonte: Próprio autor.

Figura 33 - Arranjo tipo A classe I modificado.
Resistividade 500 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Arranjo tipo A classe I modificado.
Resistividade 500-250 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

Ao longo do tempo, o SPDA está sujeito a sofrer a ação degradante do ambiente que o cerca. Danos ao SPDA podem ser originados das mais variadas formas, como por exemplo, processos de oxidação e eventuais impactos mecânicos aos seus condutores. De forma geral, por estarem expostos ao tempo, os subsistemas de captação e descida são mais suscetíveis a danos mecânicos que o subsistema de aterramento. Ambos, os subsistemas de captação e descida, são destinados a captar e conduzir correntes das descargas atmosféricas para que o subsistema de aterramento disperse-as no solo. Desse modo, danos aos subsistemas de

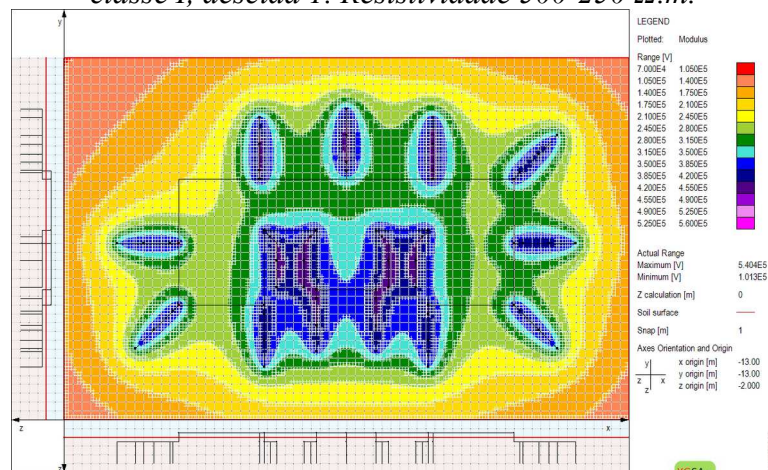
captação e descida podem modificar o comportamento do aterramento na dispersão das correntes no solo.

Analisando os tipo de arranjo A e B, percebe-se que num eventual seccionamento dos condutores descidas do SPDA, o tipo B não teria sua morfologia alterada, devido ao anel enterrado que interliga todas as descidas do SPDA. Para o arranjo tipo A, o método de projeto consiste de um eletrodo individual para cada condutor de descida, e o conjunto dos eletrodos são interligados pelo subsistema de captação e/ou anéis de equalização. Assim, para o arranjo tipo A, o seccionamento de um condutor de descida abaixo do anel de equalização mais próximo do solo, significaria a perda de um parte considerável do arranjo.

Para simular a situação descrita, o arranjo tipo A classe I foi modificado para cinco cenários: a perda de quatro descidas individuais; e a perda de seis descidas simultâneas. As perdas individuais foram colocadas em locais onde, para o arranjo tipo A classe I original, percebe-se diferenças consideráveis na zona de interferência entre os eletrodos próximos.

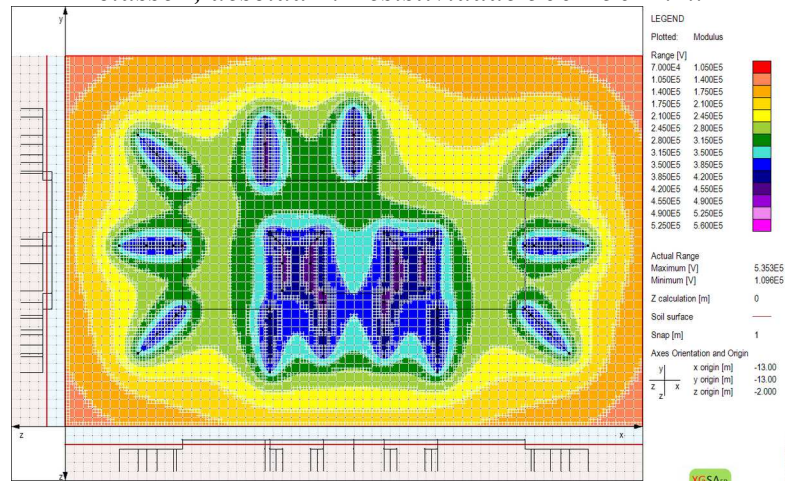
A Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 apresentam a distribuição de potenciais para a perda de cada descida individual, e a Figura 39 para as seis descidas simultaneamente, todos os casos para configuração de solo de 500-250 Ω .m.

Figura 35 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 1. Resistividade 500-250 Ω .m.



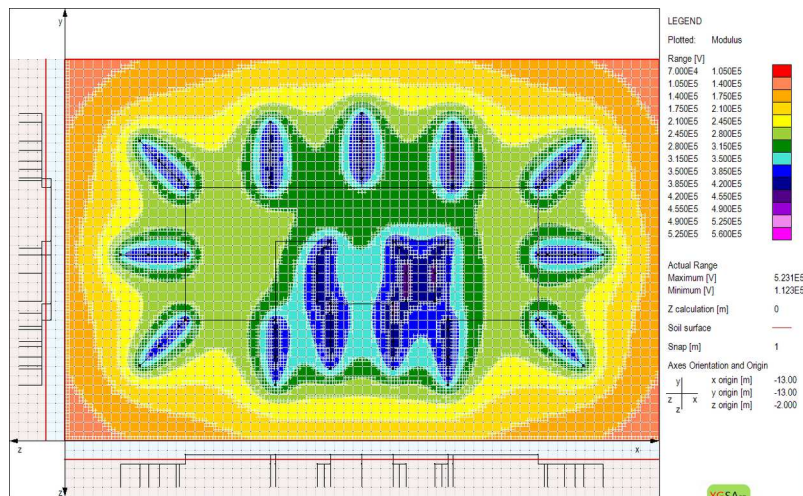
Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 2. Resistividade 500-250 $\Omega.m$.



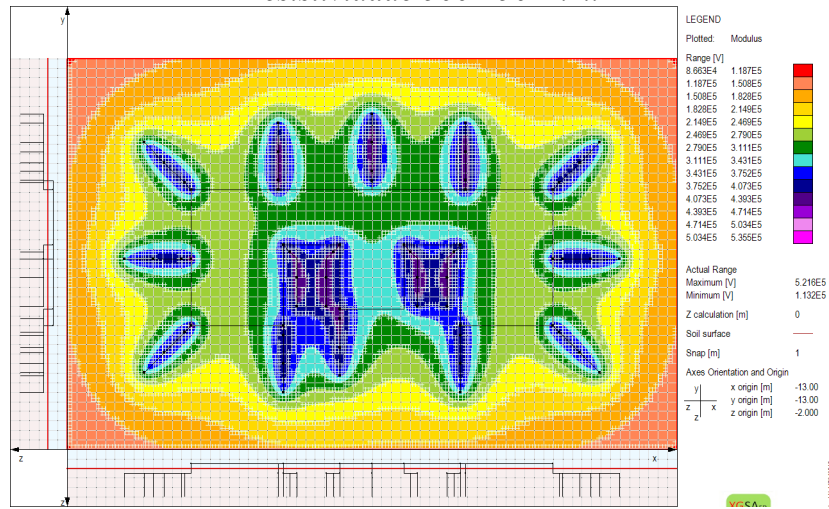
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 3. Resistividade 500-250 $\Omega.m$.



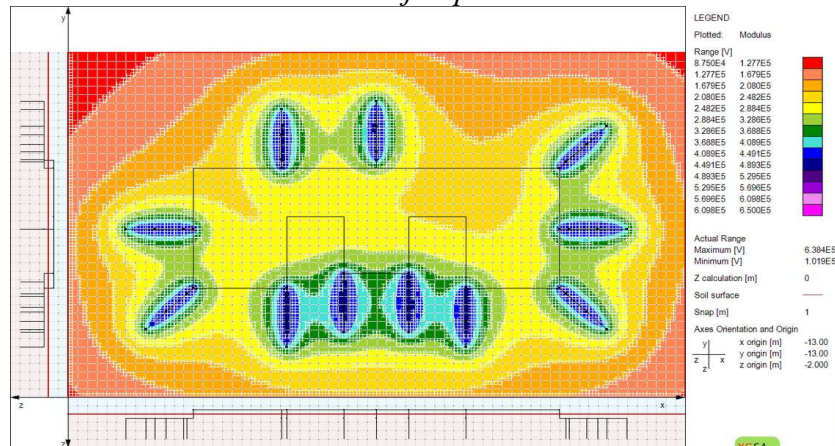
Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Distribuição de potenciais para o seccionamento de condutores de descida. Arranjo tipo A classe I, descida 4. Resistividade 500-250 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 39 - Distribuição de potenciais para a perda de seis descidas simultâneas. Arranjo tipo A classe I. 500-250 $\Omega.m$.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 8 apresenta os resultados para os cinco cenários simulados e o caso original (A1), para as três configurações de solo consideradas. Nela observa-se que, o seccionamento da descida que causa a perda do eletrodo A1_1 (tipo A classe I, descida 1), provoca o maior aumento das grandezas, e a perda do eletrodo A1_3 (tipo A classe I, descida 3) provoca o menor aumento das grandezas, dentre os seccionamentos individuais. Esse fato pode ser explicado pela diferença da área efetiva de dispersão de corrente do eletrodo A1_1 e A1_3.

Sendo a área efetiva do eletrodo A1_1 maior que a do A1_3, a sua contribuição para o desempenho do arranjo é mais considerável que os outros eletrodos testados.

Tabela 8 - Resultados para a perda de descidas. Arranjo tipo A classe I.

Uma camada						
500 Ω.m						
	A1	A1 1	A1 2	A1 3	A1 4	A1 6 descidas
GPR (kV)	845,25	883,657	875,759	852,444	853,764	974,929
Impedância (Ω) [mod ^o]	8,452 16,261	8,837 16,076	8,758 17,225	8,524 15,748	8,538 15,715	9,749 14,122
Máx. tensão de toque (kV)	631,136	689,148	668,262	636,89	638,552	776,508
Máx. tensão de passo (kV)	282,178	328,707	296,759	300,324	288,606	417,786
Duas camadas						
1ª 500 Ω.m 2ª 1000 Ω.m						
	A1	A1 1	A1 2	A1 3	A1 4	A1 6 descidas
GPR (kV)	1271,75	1323,657	1306,224	1279,7	1282,301	1430,096
Impedância (Ω) [mod ^o]	12,720 10,047	13,240 9,955	13,060 10,698	12,800 9,778	12,820 9,766	14,300 8,989
Máx. tensão de toque (kV)	838	927,177	882,709	844,2	846,425	1029,236
Máx. tensão de passo (kV)	319,11	369,309	331,734	335,117	325,97	465,856
1ª 500 Ω.m 2ª 250 Ω.m						
	A1	A1 1	A1 2	A1 3	A1 4	A1 6 descidas
GPR (kV)	596,17	625,002	623,655	601,326	601,542	704,395
Impedância (Ω) [mod ^o]	5,962 24,235	6,250 23,933	6,237 25,580	6,013 23,380	6,015 23,333	7,044 20,391
Máx. tensão de toque (kV)	496,812	533,437	526,446	500,756	501,325	609,284
Máx. tensão de passo (kV)	251,464	285,723	266,546	266,846	258,065	372,851

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 9 apresenta o aumento percentual das grandezas em relação ao arranjo original, para o seccionamento de seis descidas simultaneamente, conforme a Figura 39. Nela observa-se que para a perda de seis descidas simultaneamente (A1_6_descidas), a configuração de solo de resistividade 500-250 Ω.m apresentou o maior aumento percentual de GPR, impedância e tensão de passo, e a menor variação se dá para a configuração de solo 500-1000 Ω.m. Observando a Tabela 9, ver-se que a tensão de passo é a mais afetada pela perda dos eletrodos.

Tabela 9 - Aumento percentual das grandezas para a perda de seis descidas simultâneas em relação ao arranjo tipo A classe I original.

	500 Ω.m	1ª 500 Ω.m 2ª 1000 Ω.m	1ª 500 Ω.m 2ª 250 Ω.m
GPR (%)	15,342	12,451	18,153
Impedância (%)	15,345	12,421	18,148
Máx. tensão de toque (%)	23,033	22,821	22,639
Máx. tensão de passo (%)	48,058	45,986	48,272

Fonte: Próprio autor.

Para o arranjo tipo B classe I, foi simulado a perda de seis descidas simultâneas. Foi constatado que o seccionamento das seis descidas não alterou os resultados de forma

significativa, se mantendo muito próximos aos apresentados na Tabela 4, com diferenças menores que 0,3 % nos valores das grandezas.

4. Conclusão

O sistema de aterramento é uma parte importante das instalações elétricas. Seu desempenho satisfatório confere segurança as pessoas e equipamentos.

A análise de um sistema de aterramento deve considerar a dinâmica dos fenômenos que ocorrem no solo, sua composição química e física, e ao longo do tempo observando as variações climáticas do local no qual foi instalado e a degradação dos seus componentes.

O projeto de um sistema de aterramento é dotado de considerável complexidade, pois envolve a compreensão de mecanismos de condução de corrente elétrica no solo. Solo este que, por sua natureza velada, desafia os engenheiros à desenvolverem métodos para caracterizá-lo, modelá-lo e simulá-lo conforme as necessidades de projeto.

A existência de normas nacionais e internacionais que discorrem sobre o tema aterramentos, colecionam métodos de projeto e avaliação de sistemas de aterramento. O desempenho de um arranjo de aterramento se resume ao julgamento dos valores de GPR, impedância/resistência total, distribuição de potenciais no solo, tensão de toque e tensão de passo.

No contexto do SPDA, a eficiência do sistema de aterramento em dispersar a corrente de descarga atmosférica no solo com segurança, é determinante para a proteção das pessoas e dos equipamentos contidos no interior da edificação e no seu entorno.

Com a simulação do tipos de arranjos de aterramento de que trata a norma IEC 62305-3/2006, foi observado a influência do desenho do arranjo no modo como a corrente é dissipada no solo, gerando distribuição de potenciais particulares para cada tipo de arranjo.

O arranjo tipo A possui relativa complexidade de projeto, exigindo do projetista cautela no desenho do arranjo, com vistas a verificar a distribuição de potenciais perigosos no entorno da edificação. No entanto, sua flexibilidade na disposição dos condutores enterrados, confere ao arranjo tipo A maiores possibilidades de soluções para edificações onde a implantação do arranjo tipo B torna-se inviável.

O arranjo tipo B possui simplicidade de projeto e controle conservador de potenciais no entorno da edificação. Porém, a presença obrigatória de um anel fechado pode tornar complicada a implantação do arranjo, principalmente em centros urbanos.

5. Bibliografia

BELTANI, J. N., Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas. Dissertação (Mesrado). Faculdade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP., 2007.

DEHN. Lightning Protection Guide, 3^a ed. 2014.

IEC 62305-3 – 2006. Protection Against Lightning – Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard, 2006.

IEEE Std 80 – 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY: IEEE Power Engineering Society, Substation Committee, 2000.

J. MACEDO, C. L. S., Análise de Sistemas de Aterramento de Subestação e Pés de Torre. Trabalho de Conclusão de Curso. UFCG, Campina Grande, PB., 2012.

KINDERMANN, G., & CAMPAGNOLO, J. M., Aterramento Elétrico, 3^a ed. Sagra-DC Luzzatto. Porto Alegre, RS., 1995.

MEPPELINK, Jan. Calculation of Lightning Effects in the Frequency Domain with a Program based on Hybrid Methods. Cigré, Bologna, 2016.

NBR 15749. Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento. ABNT. Rio de Janeiro, RJ., 2009.

NBR 15751. Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos. ABNT. Rio de Janeiro, RJ., 2009.

NBR 7117. Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo. ABNT. Rio de Janeiro, RJ., 2012.

NTU 014. Projetos de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas de Subestações de Distribuição. Grupo Energisa, 2017.

SILVA, J. A., Estudo Sobre o Método de Poço Profundo de Aterramento. Trabalho de Conclusão de Curso, UFCG. Campina Grande, PB., 2010.

VISACRO FILHO, S., Aterramentos Eléricos. Artliber Editora Ltda. São Paulo, SP., 2002.

“XGSLab rel. 6.4.2 User’s Guide” SINT Ingegneria Srl – Italy, 2019.