

Gabriel Augusto Buss

**ATERRAMENTO ELÉTRICO:
APLICAÇÃO EM ESTABELECIMENTOS ASSISTENCIAIS DE
SAÚDE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Raizer.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Buss, Gabriel Augusto
Aterramento elétrico : Aplicação em estabelecimentos
assistenciais de saúde / Gabriel Augusto Buss ;
orientador, Adroaldo Raizer - Florianópolis, SC, 2016.
113 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências


1. Engenharia Elétrica. 2. Aterramento elétrico. 3.
Estabelecimento assistencial de saúde. 4. Eletrodos de
aterramento. I. Raizer, Adroaldo. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Gabriel Augusto Buss

**ATERRAMENTO ELÉTRICO:
APLICAÇÃO EM ESTABELECIMENTOS ASSISTENCIAIS DE
SAÚDE**


Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 17 de maio de 2016.

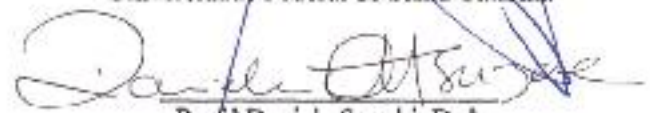


Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.
Coordenador do Curso


Banca Examinadora:



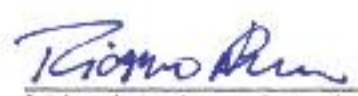
Prof. Adroaldo Raizer, Dr. (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.ª Daniela Suzuki, Dr.ª.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Marcos Telló, Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul



Prof. Ricardo Nederson do Prado, Dr.
Universidade Federal de Santa Maria

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, minha namorada e meus amigos pela compreensão, apoio incondicional e companhia ao longo de minha jornada.

Agradeço ao Prof. Adroaldo Raizer pela orientação e atenção durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos Professores da Universidade Federal de Santa Catarina pelo serviço público de qualidade prestado à sociedade brasileira.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela presteza e atenção no exercício de suas funções.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa durante parte do período de realização deste mestrado.

O planejamento de longo prazo não lida com decisões futuras, mas com o futuro de decisões presentes.

(Peter Drucker)

RESUMO

A segurança elétrica, a funcionalidade e a compatibilidade eletromagnética em uma edificação têm relação com a estratégia de aterramento elétrico adotada. Por isso, é evidente a necessidade de o estabelecimento assistencial de saúde possuir um aterramento elétrico adequado às suas funções e especificidades. Para tanto, abordam-se as questões relativas ao aterramento elétrico, principalmente as aplicações nas edificações onde são prestados os serviços de saúde. Assim, apresentam-se as questões relacionadas às técnicas de aterramento – isolada, em ponto único ou em malha – e os sistemas de aterramento – TN, TT ou IT –, previstos na norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão. Além disso, apresentam-se os comportamentos de hastes de aterramento isoladas, por meio de abordagem matemática e computacional, e de possíveis arranjos. Por fim, destacam-se as estratégias relacionadas ao aterramento elétrico adotadas para os ambientes onde se realizam procedimentos invasivos, de suporte à vida e diagnóstico.

Palavras-chave: Aterramento elétrico. Estabelecimento assistencial de saúde. Eletrodos de aterramento.

ABSTRACT

Electrical safety, functionality, and electromagnetic compatibility in a building are related to the chosen grounding strategy. Thus, it is evident that a healthcare facility needs to be provided with an appropriate grounding to its functions and specificities. Therefore, the questions related with grounding are assessed, mainly the applications related with the buildings in which the healthcare services are provided. Thereby, the issues related to the grounding techniques – independent, single-point or mesh – and the grounding systems – TN, TT or IT –, prescribed in Brazilian standard for low voltage electrical installations, are introduced. Moreover, the behavior of individual grounding rods, by means of equations and computer-aided simulations, and their possible arrangements are presented. Finally, the strategies related to grounding in places used for invasive procedures, life support activities and diagnosis are evidenced.

Keywords: Grounding. Healthcare facility. Grounding rods.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Representação do sistema de aterramento elétrico TN-C. | 47 |
| Figura 2 – Representação do sistema de aterramento elétrico TN-S..... | 48 |
| Figura 3 – Representação do sistema de aterramento elétrico TT..... | 50 |
| Figura 4 – Representação do sistema de aterramento elétrico IT..... | 51 |
| Figura 5 – Representação de um cilindro semi-infinito imerso no solo e sob a influência de um potencial escalar elétrico. | 56 |
| Figura 6 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico constante ao redor de um eletrodo cilíndrico semi-infinito..... | 58 |
| Figura 7 – Representação de uma semiesfera imersa no solo e sob a influência de um potencial escalar elétrico. | 59 |
| Figura 8 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico constante ao redor de um eletrodo de aterramento semiesférico..... | 60 |
| Figura 9 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de uma haste de aterramento..... | 63 |
| Figura 10 – Simulação computacional do campo elétrico ao redor da haste de aterramento resultante da aplicação de um potencial escalar elétrico constante. | 64 |
| Figura 11 – Simulação computacional do campo elétrico ao redor da ponta da haste de aterramento resultante da aplicação de um potencial escalar elétrico constante. | 65 |
| Figura 12 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de uma haste de aterramento cravada em um nível inferior ao do solo. | 66 |
| Figura 13 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de um conjunto de hastes de aterramento dispostas nos vértices de um triângulo equilátero. | 68 |
| Figura 14 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de um conjunto de hastes de aterramento dispostas nos vértices de um triângulo equilátero. | 69 |
| Figura 15 – Representação gráfica das funções modificadas de Bessel de ordem 0. | 80 |
| Figura 16 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo cilíndrico semi-infinito. | 81 |
| Figura 17 – Simulação computacional da distribuição do gradiente do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo cilíndrico semi-infinito..... | 82 |
| Figura 18 – Representação gráfica das funções esféricas modificadas de Bessel de ordem 0. | 84 |
| Figura 19 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo semiesférico. | 86 |

| | |
|---|-----|
| Figura 20 – Simulação computacional da distribuição do gradiente do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo semiesférico. | 87 |
| Figura 21 – Simulação computacional do desempenho comparativo dos eletrodos de aterramento cilíndricos em condições com diferentes valores de resistividade do solo. | 88 |
| Figura 22 – Bomba de infusão. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa). .. | 97 |
| Figura 23 – Equipamento de eletrocirurgia. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa). | 97 |
| Figura 24 – Aparelho de anestesia. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa). | 98 |
| Figura 25 – Ventilador mecânico. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa). | 99 |
| Figura 26 – Monitor multiparamétrico. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa). | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR – Norma Brasileira.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 25 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 27 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO..... | 28 |
| 2 O ATERRAMENTO ELÉTRICO | 29 |
| 2.1 OS PROPÓSITOS DO ATERRAMENTO ELÉTRICO..... | 30 |
| 2.1.1 Sensibilização dos dispositivos de proteção | 30 |
| 2.1.2 Escoamento de cargas estáticas à terra | 31 |
| 2.1.3 Caminho de retorno de corrente elétrica | 31 |
| 2.1.4 Proteção contra descargas atmosféricas | 31 |
| 2.1.5 Limitação de potenciais de toque e de passo..... | 32 |
| 2.1.6 Uniformização do potencial ao longo da edificação | 33 |
| 2.1.7 Potencial de referência | 33 |
| 2.1.8 Escoamento de correntes de falta à terra..... | 34 |
| 2.1.9 Resumo dos propósitos | 34 |
| 2.2 OS COMPONENTES DO ATERRAMENTO ELÉTRICO..... | 35 |
| 2.2.1 Os condutores de conexão | 35 |
| 2.2.2 Os eletrodos de aterramento | 36 |
| 2.2.3 O solo | 36 |
| 2.2.3.1 A permeabilidade magnética..... | 37 |
| 2.2.3.2 A permissividade elétrica..... | 37 |
| 2.2.3.3 A condutividade elétrica | 37 |
| 2.2.3.3.1 <i>A umidade.....</i> | 38 |
| 2.2.3.3.2 <i>A temperatura.....</i> | 39 |
| 2.2.3.3.3 <i>A estratificação.....</i> | 40 |
| 2.2.3.3.4 <i>A composição química.....</i> | 40 |
| 2.2.3.3.5 <i>A compactação.....</i> | 41 |
| 3 A EXECUÇÃO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO | 42 |
| 3.1 AS TÉCNICAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO..... | 42 |
| 3.1.1 O aterramento elétrico isolado | 42 |
| 3.1.2 O aterramento elétrico em ponto único | 43 |
| 3.1.3 A malha de aterramento elétrico | 44 |
| 3.2 OS SISTEMAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO..... | 46 |
| 3.2.1 O sistema TN..... | 46 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1.1 O sistema TN-C | 46 |
| 3.2.1.2 O sistema TN-S | 48 |
| 3.2.2 O sistema TT | 49 |
| 3.2.3 O sistema IT | 50 |
| 3.3 AS RELAÇÕES ENTRE AS TÉCNICAS E OS SISTEMAS DE ATERRAMENTO..... | 52 |
| 3.3.1 O sistema TT e a técnica de aterramento isolado..... | 52 |
| 3.3.2 O sistema TN e a técnica de malha de aterramento..... | 53 |
| 4 ATERRAMENTO ELÉTRICO EM BAIXAS FREQUÊNCIAS | 54 |
| 4.1 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL..... | 55 |
| 4.1.1 Solução em coordenadas cilíndricas..... | 55 |
| 4.1.2 Solução em coordenadas esféricas..... | 58 |
| 4.3 O DESEMPENHO DE HASTES DE ATERRAMENTO COMERCIAIS.. | 61 |
| 4.3.1 O comportamento de hastes de aterramento..... | 62 |
| 4.3.2 O comportamento do agrupamento de hastes de aterramento | 67 |
| 5 ATERRAMENTO ELÉTRICO EM ALTAS FREQUÊNCIAS ... | 71 |
| 5.1 ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA..... | 71 |
| 5.1.1 O modo diferencial conduzido | 73 |
| 5.1.2 O modo comum conduzido | 73 |
| 5.1.3 O aterramento elétrico e os modos conduzidos de acoplamento..... | 74 |
| 5.2 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL..... | 75 |
| 5.2.1 Solução em coordenadas cilíndricas..... | 78 |
| 5.2.2 Solução em coordenadas esféricas..... | 82 |
| 5.3 A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO..... | 87 |
| 5.4 A APLICAÇÃO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO PARA ALTAS FREQUÊNCIAS..... | 89 |
| 6 CRITÉRIOS RELACIONADOS À ASSISTÊNCIA À SAÚDE ... | 91 |
| 6.1 OS EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO..... | 91 |
| 6.1.1 Classificação da intensidade da corrente do choque elétrico | 91 |
| 6.1.2 As características fisiológicas do ser humano..... | 93 |
| 6.2 AS TECNOLOGIAS EM SAÚDE..... | 95 |
| 6.3 A CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DOS AMBIENTES..... | 101 |
| 6.3.1 Os ambientes onde são realizados os procedimentos invasivos..... | 103 |
| 6.3.2 Os ambientes onde são realizados os procedimentos de suporte à vida e diagnóstico..... | 105 |

| | |
|--|------------|
| 6.3.3 Os demais ambientes da edificação | 106 |
| 7 CONCLUSÃO..... | 108 |
| REFERÊNCIAS..... | 110 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária – Anvisa –, no uso de sua competência legal, publicou a Resolução de Diretoria Colegiada nº 36, de 25 de julho de 2013, que institui ações para a promoção da segurança do paciente e a melhoria da qualidade na prestação da assistência à saúde. Considerando o uso crescente de tecnologias em saúde na prestação dos serviços de saúde, é necessário avaliar a relação entre o benefício decorrente do uso de tal tecnologia e o risco inerente de sua utilização. Assim, para que a assistência à saúde seja um processo seguro e livre de incidentes, é necessário que os riscos associados à utilização de tais tecnologias sejam gerenciados, de forma a reduzi-los a um mínimo exequível.

Tendo em vista os efeitos no corpo humano da passagem de corrente elétrica e os prejuízos decorrentes de tal ação, é necessário que as instalações e os equipamentos médicos sejam seguros e proporcionem as condições adequadas à sua utilização. Como forma de proteção, os dispositivos relacionados à segurança elétrica devem possuir as condições necessárias ao seu perfeito funcionamento. Além das questões de segurança elétrica, é imprescindível que sejam garantidas as condições para o adequado funcionamento dos equipamentos médicos, uma vez que as ações terapêuticas e os diagnósticos estão intimamente relacionados ao desempenho de tais tecnologias.

Sendo assim, a solução a ser adotada para a redução do risco deverá contemplar, principalmente, a segurança elétrica e os meios necessários para o funcionamento adequado dos equipamentos médicos. Entre as diversas possibilidades existentes para a consecução de tais objetivos, destaca-se o aterramento elétrico. Esta solução desempenha papel fundamental e imprescindível, tanto na segurança elétrica como na garantia de condições para o adequado funcionamento de equipamentos médicos.

Desta forma, o aterramento elétrico desempenha um papel de destaque nas ações de segurança do paciente, apesar de muitas vezes ser negligenciado. Por este motivo, é necessário que o projeto de aterramento elétrico para um estabelecimento assistencial de saúde seja elaborado com base no perfil assistencial e nos serviços de saúde a serem prestados na edificação. Em complementação à existência de normas técnicas aplicáveis ao aterramento elétrico, é necessário desenvolver uma

consciência sobre a sua importância no processo de garantia da qualidade dos serviços de saúde.

Apesar de ser um elemento fundamental para a segurança do paciente e também da equipe de saúde, o aterramento elétrico é somente um dos componentes das instalações elétricas da edificação. Assim, sua execução não irá garantir plenamente as condições necessárias à assistência segura à saúde, uma vez que ele depende de outros elementos, por exemplo, os dispositivos de interrupção de circuitos, para que seu desempenho seja adequado.

De forma a evidenciar a importância do aterramento elétrico para o estabelecimento assistencial de saúde, a Resolução de Diretoria Colegiada nº 50, de 21 de fevereiro de 2002, estabelece a necessidade de sua implementação por meio do disposto:

Todas as instalações elétricas de um estabelecimento assistencial de saúde devem possuir um sistema de aterramento que leve em consideração a equipotencialidade das massas metálicas expostas em uma instalação. Todos os sistemas devem atender às normas da ABNT NBR 13534, NBR 5410 e NBR 5419, no que diz respeito ao sistema de aterramento.

Assim, a não execução do aterramento elétrico em uma edificação dedicada à prestação de serviços de saúde, ou a execução em desacordo com aquilo que é previsto nas normas técnicas é considerado, de acordo com a Lei nº 6.437, de 1977, como infração sanitária, sendo o responsável pelo estabelecimento assistencial de saúde sujeito às sanções previstas em lei, uma vez que, de acordo com a referida Lei:

Art. 2º Sem prejuízo das sanções de natureza civil ou penal cabíveis, as infrações sanitárias serão punidas, alternativa ou cumulativamente, com as penalidades de:

I - advertência;

II - multa; [...]

VIII - interdição parcial ou total do estabelecimento; [...]

XI - cancelamento do alvará de funcionamento do estabelecimento. [...]

Art. 10 São infrações sanitárias: [...]

II - construir, instalar ou fazer funcionar hospitais, postos ou casas de saúde, clínicas em geral, casas

de repouso, serviços ou unidades de saúde, estabelecimentos ou organizações afins, que se dediquem à promoção, proteção e recuperação da saúde, sem licença do órgão competente ou contrariando normas legais e regulamentares pertinentes.

Por fim, mais do que o simples cumprimento das normativas sanitárias vigentes, o aterramento elétrico deve ser utilizado como uma ferramenta de qualidade para a prestação da assistência à saúde, sendo necessária a compreensão dos aspectos que o tornam tão importante para as questões de segurança elétrica e de desempenho de equipamentos médicos nos estabelecimentos que prestem a assistência à saúde, qualquer que seja o seu grau de complexidade.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é propor uma configuração para o aterramento elétrico de um estabelecimento assistencial de saúde que proporcione: segurança às pessoas; funcionalidade às instalações elétricas; e compatibilidade eletromagnética aos equipamentos médicos. Desta forma, a fim de cumprir com aquilo que é proposto no objetivo principal, é necessária a consecução de uma série de etapas:

- Apresentar as principais funções e aplicações do aterramento elétrico em uma edificação de uso geral, bem como seus componentes;
- Apresentar as formas de execução do projeto do aterramento elétrico em uma edificação de uso geral;
- Apresentar o desempenho em baixas frequências de eletrodos de aterramento em situações ideais, bem como o desempenho de hastes comerciais e de seus conjuntos;
- Apresentar o desempenho em altas frequências de eletrodos de aterramento em situações ideais e as questões relacionadas à compatibilidade eletromagnética;
- Apresentar as especificidades de um estabelecimento assistencial de saúde a serem levadas em consideração no projeto do aterramento elétrico.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação é organizada em 5 capítulos que abordam os aspectos teóricos do aterramento elétrico, e mais dois referentes à introdução e a conclusão do texto. Buscou-se adotar uma linha de pensamento que permita ao leitor verificar a importância e as peculiaridades do aterramento elétrico tanto para uso geral ou uso em estabelecimentos assistenciais de saúde.

No capítulo de número 2 abordam-se os temas relativos aos propósitos do aterramento elétrico – incluindo as principais aplicações – e os componentes do aterramento elétrico – incluindo os condutores de conexão, os eletrodos de aterramento e o solo.

No capítulo de número 3 abordam-se os temas relativos à execução do aterramento elétrico, que inclui: os sistemas de aterramento prescritos na norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão, as técnicas de aterramento – isolada, em ponto único e em malha de aterramento.

No capítulo de número 4 aborda-se o comportamento de eletrodos de aterramento em situações ideais em baixas frequências e também o comportamento de conjuntos de hastes de aterramento nesta mesma condição.

No capítulo de número 5 aborda-se o aterramento elétrico para altas frequências, enfatizando a sua importância para as questões de compatibilidade eletromagnética, além de apresentar o comportamento de eletrodos de aterramento em situações ideais nesta condição de alta frequência. Não se adota para este trabalho um limite específico que diferencie os domínios de baixas e altas frequências, mas sim um conceito relacionado aos comprimentos das ondas eletromagnéticas e as dimensões das instalações. Desta forma, uma mesma frequência de onda pode ser considerada pertencente aos dois domínios, a depender das dimensões das instalações.

No capítulo de número 6 são apresentadas as peculiaridades dos estabelecimentos assistenciais de saúde, em especial as questões relacionadas à segurança das pessoas e a compatibilidade eletromagnética para os equipamentos médicos. Neste capítulo também são propostas configurações de aterramento elétrico a serem aplicadas em ambientes onde há a prestação da assistência à saúde.

2 O ATERRAMENTO ELÉTRICO

O aterramento elétrico consiste em, de acordo com Visacro Filho (2002, p. 11) “[...] uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo”. Desta forma, a partir da definição apresentada pelo autor, pode-se inferir a necessidade de determinar o que será aterrado e qual o propósito de tal aterramento elétrico.

Em relação aos sistemas físicos que serão aterrados, Williams e Armstrong (2000) afirmam que as partes condutivas expostas ou aquelas que possam ser energizadas quando da ocorrência de uma falta devem ser aterradas por uma questão de segurança. Para os referidos autores, além dos requisitos de segurança elétrica, a funcionalidade das instalações também deve ser considerada para a adequação do aterramento ao seu desempenho satisfatório.

Já em relação ao propósito do aterramento elétrico, Kindermann e Campagnolo (2011, p. 1) afirmam que:

Para que um sistema de energia elétrica opere corretamente, com uma adequada qualidade e continuidade de serviço, com desempenho seguro do sistema de proteção e, mais ainda, para garantir os limites (dos níveis) de segurança pessoal, é fundamental que o quesito Aterramento Elétrico mereça um cuidado especial.

O cuidado mencionado por Kindermann e Campagnolo (2011) deve ser evidenciado por meio da elaboração de um projeto de aterramento elétrico adequado para as situações às quais a edificação e as instalações elétricas serão submetidas. Por este motivo, a adequação do aterramento elétrico aos seus objetivos está intimamente relacionada ao conhecimento prévio e ao estudo das condições e solicitações que serão observadas na edificação, em especial na prestação dos serviços de saúde, principal atividade de um estabelecimento assistencial de saúde.

O projeto de aterramento elétrico de um estabelecimento assistencial de saúde deve contemplar os riscos naturalmente presentes em qualquer instalação elétrica acrescido daqueles inerentes às atividades relacionadas à prestação de assistência à saúde. Mamede Filho (2010, p. 83) afirma que:

Toda e qualquer instalação elétrica de alta e baixa tensão, para funcionar com desempenho

satisfatório e ser suficientemente segura contra riscos de acidentes fatais, deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto.

Assim, cabe ao responsável pelo projeto, a partir de um gerenciamento adequado de risco, definir os propósitos do aterramento elétrico e os sistemas físicos que serão aterrados, a fim de diminuir os riscos advindos da utilização de tecnologias em saúde, em especial os equipamentos médicos, e de energia elétrica na prestação da assistência à saúde.

2.1 OS PROPÓSITOS DO ATERRAMENTO ELÉTRICO

Os propósitos para o aterramento elétrico possuem natureza variada, de acordo com o risco inerente à complexidade da edificação, de suas instalações elétricas e dos equipamentos e procedimentos utilizados em suas atividades. Desta forma, pretende-se listar as ocorrências observadas na literatura técnica a respeito do tema aterramento elétrico, a fim de justificar as decisões relacionadas à elaboração deste tipo de projeto.

2.1.1 Sensibilização dos dispositivos de proteção

De acordo com Meliopoulos (1988), o aterramento das instalações elétricas está relacionado à segurança durante a ocorrência de faltas e em condições normais de funcionamento, uma vez que ele proporciona uma conexão de baixa impedância entre aquilo que se pretende aterrar e o solo, que é um condutor de eletricidade de grandes proporções. Já para Kindermann e Campagnolo (2011), o aterramento de equipamentos elétricos é determinante para o correto funcionamento dos dispositivos de proteção das instalações elétricas. Conforme Santana (1996), durante o tempo de ocorrência da falta e da não sensibilização dos dispositivos de proteção, há a presença de potenciais de toque, nas carcaças metálicas envolvidas, e dos potenciais de passo, na superfície do solo.

A partir de uma conexão de baixa impedância entre aquilo que se pretende aterrar e o solo, é possível fazer com que, durante a ocorrência de uma falta à terra, os dispositivos de proteção sejam sensibilizados de forma mais ágil e efetiva, pois, a impedância desta conexão possui

influência na magnitude da corrente elétrica que estará envolvida neste evento.

2.1.2 Escoamento de cargas estáticas à terra

O acúmulo de cargas estáticas em equipamentos elétricos, em componentes da edificação ou nas instalações elétricas pode oferecer riscos às pessoas e ao próprio patrimônio, uma vez que, a descarga abrupta de tais cargas estáticas pode ser o fator responsável pela ignição de um material combustível, e, por consequência, de um incêndio (VISACRO FILHO, 2002), ou até mesmo uma tensão da ordem de milhares de volts entre dois pontos quaisquer (MAMEDE FILHO, 2010).

A conexão das massas de equipamentos, incluindo os equipamentos eletrônicos sensíveis, em especial os equipamentos médicos, à terra por meio dos componentes do aterramento elétrico deve ser realizada. Desta forma, as cargas estáticas que por ventura venham a se acumular nas massas dos equipamentos elétricos possuirão um caminho para que possam escoar em direção à terra, evitando assim a exposição das pessoas aos riscos de um choque elétrico ou dos equipamentos ao estresse devido aos campos elétricos intensos gerados pelo acúmulo de cargas elétricas.

2.1.3 Caminho de retorno de corrente elétrica

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica do tipo monofásico com retorno pela terra, o solo desempenha a função do condutor de retorno, proporcionando assim uma economia de materiais na conexão dos consumidores à rede de distribuição. Conforme Kindermann e Campagnolo (2011), o objetivo do aterramento elétrico para este sistema de distribuição de energia elétrica é a utilização da terra como condutor de retorno para a corrente elétrica.

Para que este sistema de distribuição de energia elétrica possua um bom desempenho, o aterramento elétrico deve proporcionar condições adequadas para um bom acoplamento elétrico entre o solo e o eletrodo de aterramento, a fim de reduzir ao menor valor possível a impedância de aterramento, uma vez que esta determina a eficiência de todo o sistema.

2.1.4 Proteção contra descargas atmosféricas

Devido à natureza das descargas atmosféricas – grandes amplitudes de corrente elétrica fluindo durante curtos intervalos de tempo

– é necessário prover uma conexão entre os captores de tais descargas atmosféricas e o solo, conforme Williams e Armstrong (2000), a fim de evitar que tais correntes de descarga possam trazer danos ao patrimônio e à vida. Além disso, o aterramento elétrico deve proporcionar um caminho para que as descargas atmosféricas possam ser dissipadas no solo, de acordo com Kindermann e Campagnolo (2011).

Em conjunto com os demais elementos do sistema de proteção contra descargas atmosféricas – captores e condutores de descida – o aterramento elétrico desempenha uma função de grande importância para o desempenho de tal sistema. Um aterramento elétrico mal dimensionado ou mal instalado pode fazer com que as pessoas e o patrimônio sejam expostos a riscos desnecessários durante a ocorrência de descargas atmosféricas.

2.1.5 Limitação de potenciais de toque e de passo

Segundo Kindermann (2013, p. 15), a tensão de toque é “a tensão existente entre os membros superiores e inferiores de um indivíduo”, enquanto que a tensão de passo é “a tensão elétrica existente entre os dois pés devido à ocorrência de um curto-circuito”. Desta forma, a presença de tais tensões em níveis elevados pode ser considerada como um risco para as pessoas que circulam nas imediações do local onde é aplicada tal tensão. Entretanto, através da implementação de práticas de aterramento elétrico adequadas, é possível limitar as tensões induzidas ou aplicadas em corpos metálicos e minimizar os gradientes de potencial escalar elétrico ao longo da superfície do solo (VISACRO FILHO, 2002), de forma a mitigar o risco de choque elétrico.

A conexão ao solo das massas metálicas – carcaças de equipamentos elétricos, cercas ou estruturas metálicas – faz com que as tensões que venham a ser induzidas ou aplicadas a tais massas sejam limitadas, por exemplo, durante a ocorrência de uma falta ou do rompimento do isolamento de um condutor elétrico. A conexão de baixa impedância para o retorno das correntes elétricas possibilita que a tensão de toque seja menor quando comparada à situação em que a massa ou o equipamento permanece isolado em relação à terra.

A instalação de malhas de aterramento no solo permite que os potenciais escalares elétricos que venham a ser aplicados nele sejam distribuídos de forma mais suave, evitando assim a presença de elevados gradientes de potencial escalar elétrico na superfície, pois, oferecem riscos às pessoas que circulam nas imediações. A existência de um condutor elétrico em contato com o solo permite que as correntes sejam

distribuídas em volumes maiores, diminuindo assim as densidades de corrente nas imediações da área coberta por este eletrodo de aterramento.

2.1.6 Uniformização do potencial ao longo da edificação

O aterramento elétrico de uma edificação, conforme Williams e Armstrong (2000), deve prover uma característica: eliminar diferenças de potencial entre dois pontos geograficamente distintos, uma vez que tal diferença de potencial dará origem à uma circulação de corrente, resultando em uma possível situação de interferência nas instalações elétricas e nos equipamentos a elas conectados. A uniformização do potencial escalar elétrico ao longo da edificação por meio do aterramento elétrico está relacionada à diminuição da impedância de aterramento obtida através da conexão de uma série de aterramentos locais (VISACRO FILHO, 2002), que constituem um único aterramento elétrico, capaz de escoar um mesmo valor de corrente elétrica por um volume maior de solo, resultando em menores valores para as densidades de corrente elétrica. Assim, todas as partes condutivas expostas e aquelas não expostas que fazem parte da edificação, por exemplo, a estrutura metálica, devem estar conectadas ao aterramento elétrico, a fim de garantir a equipotencialização ao longo da edificação (PARISE, 2013).

O contato existente entre os eletrodos de aterramento e o solo proporciona um caminho a ser percorrido pelas correntes elétricas a fim de retornarem à sua fonte. Assim, quanto maior for esta superfície de contato, menor será a oposição à passagem de corrente elétrica, uma vez que o aumento da superfície proporciona uma multiplicação dos caminhos possíveis a serem percorridos. Como consequência, as densidades de corrente elétrica são menos intensas, resultando em gradientes de potencial escalar elétrico mais suaves ao longo da edificação (ALIPIO; VISACRO, 2014b).

2.1.7 Potencial de referência

Um potencial de referência é estabelecido nas instalações elétricas de uma edificação por meio do aterramento elétrico, a fim de proporcionar condições para que equipamentos que possuam interface elétrica entre si possam operar corretamente (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000). O aterramento elétrico que tem por objetivo estabelecer um potencial de referência para os equipamentos elétricos difere daquele dimensionado para questões de segurança, uma vez que ambos possuem objetivos diferentes (TELLÓ, 2007).

A conexão de dois equipamentos elétricos que interajam entre si deve ser feita por um meio que não cause interferências em seus funcionamentos. Assim, para evitar que dois equipamentos elétricos que interajam entre si apresentem uma degradação em seu desempenho, o aterramento elétrico para referência de sinal é utilizado.

2.1.8 Escoamento de correntes de falta à terra

O propósito do aterramento elétrico é a existência de um caminho de baixa impedância entre o neutro do sistema e a terra (MELIOPOULOS, 1988), podendo assim, com a utilização de dispositivos de proteção, proteger a vida e o patrimônio. Para este propósito é considerada uma atuação coordenada entre os dispositivos de proteção e o aterramento elétrico, de forma a permitir a desconexão da alimentação do circuito em situação de falta à terra (PARISE; MARTIRANO; PARISE, 2014). Entretanto, durante a ocorrência de uma falta à terra, tal segurança pode não ser garantida, uma vez que a magnitude das correntes envolvidas é muito alta. Desta forma, o aterramento elétrico deve ser projetado de forma a obter uma impedância com o menor valor possível (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011), diminuindo assim os efeitos causados pela falta à terra.

A diminuição do valor da impedância de aterramento é obtida através de meios que tenham por objetivo a diminuição da densidade de corrente no solo, uma vez que a impedância elétrica é uma razão entre o campo elétrico aplicado e a respectiva densidade de corrente resultante (SADIKU, 2001). Assim, ao diminuir o valor da densidade de corrente elétrica, a magnitude das diferenças de potencial na superfície do solo e de seus danos são também reduzidos.

2.1.9 Resumo dos propósitos

Tendo em vista os propósitos listados para o aterramento elétrico de uma edificação e de suas instalações, é possível classificá-los em três grupos: aqueles relativos à segurança das pessoas e do patrimônio (que inclui os equipamentos elétricos e a própria edificação); aqueles relativos à funcionalidade (que inclui os aspectos necessários do aterramento elétrico para o correto desempenho dos equipamentos e das instalações elétricas); e, por fim, aqueles relativos à compatibilidade eletromagnética (que inclui os aspectos necessários ao funcionamento dos equipamentos elétricos, para que não haja interferências ou comportamentos inesperados).

O projeto do aterramento elétrico de uma edificação, em especial dos estabelecimentos assistenciais de saúde, deve considerar cada dimensão apresentada – segurança, desempenho e compatibilidade eletromagnética –, cada qual com a ponderação correspondente ao nível de mitigação de risco que deve ser obtido para a aplicação em questão. A adoção de uma solução pode ser eficaz para mais de uma dimensão, bem como influenciar negativamente em outra, assim, a escolha deve ser precedida de uma criteriosa avaliação por parte do responsável pelo projeto e da equipe de assistência à saúde.

2.2 OS COMPONENTES DO ATERRAMENTO ELÉTRICO

O aterramento elétrico é composto, segundo Visacro Filho (2002), por três elementos: os condutores de conexão; os eletrodos de aterramento; e o solo.

2.2.1 Os condutores de conexão

Os condutores de conexão são condutores metálicos que estabelecem a ligação elétrica entre aquilo que se pretende aterrar, por exemplo, a carcaça de um equipamento elétrico, e os eletrodos de aterramento. As características desses condutores, como o tipo de material e sua seção transversal, são padronizadas pela norma técnica brasileira NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão. A escolha do condutor de conexão deve considerar a resistência mecânica e o aumento de temperatura a que serão submetidos, garantindo a manutenção de sua integridade durante a ocorrência de faltas. A seção transversal e o material do condutor a ser utilizado para a conexão do que se pretende aterrar aos eletrodos de aterramento devem ser suficientes para que o condutor suporte a corrente elétrica que irá circular durante uma eventual falta, a fim de garantir o acionamento dos dispositivos de proteção, prevenindo os riscos do choque elétrico (LIU; MITOLO; SHOKOOH, 2013).

Os condutores utilizados na conexão entre aquilo que se pretende aterrar e os eletrodos de aterramento garantem que o potencial escalar elétrico existente nos eletrodos de aterramento em condições normais, isto é, sem o fluxo de corrente elétrica, seja o mesmo daquilo que se pretende aterrar. Tais condutores oferecem uma baixa impedância ao conjunto – condutores de conexão, eletrodos de aterramento e o solo – uma vez que são utilizados materiais de elevada condutividade elétrica, como o cobre e o alumínio. Entretanto, a impedância de tais condutores pode aumentar

de acordo com a frequência de excitação dos campos eletromagnéticos aplicados neles, uma vez que a seção transversal sofre uma diminuição aparente, decorrente do efeito pelicular.

2.2.2 Os eletrodos de aterramento

Os eletrodos de aterramento são elementos metálicos que mantém contato direto com o solo, a fim de possibilitar um caminho para a dispersão de correntes que por ventura venham a circular em sua extensão (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Há uma variedade de tipos e materiais que podem compor os eletrodos de aterramento, por exemplo, condutores nus, malhas metálicas, hastes, cantoneiras e elementos estruturais.

Os eletrodos de aterramento são responsáveis pelo acoplamento elétrico entre os condutores de conexão e o solo. Por este motivo, ele deve ser aderido firmemente ao solo, uma vez que a existência de folgas, sejam elas decorrentes de um solo pouco compactado ou por causa de uma instalação inadequada, pode fazer com que o desempenho do aterramento elétrico seja comprometido.

Para a escolha do tipo de eletrodo de aterramento devem ser avaliados alguns aspectos do solo, por exemplo, a facilidade de instalação e a composição química do solo. A facilidade de instalação deve considerar a geometria do eletrodo de aterramento e a forma com que ele será instalado no solo, uma vez que geometrias complexas e solos mecanicamente resistentes tornam o trabalho custoso e de difícil execução. Já a composição química do solo em que o eletrodo de aterramento será instalado deve ser avaliada, a fim de verificar a compatibilidade entre o eletrodo e o solo, uma vez que os processos de corrosão podem ser acelerados com uma escolha equivocada (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Além disso, os demais componentes do aterramento elétrico devem ser avaliados, a fim de evitar o surgimento de potenciais decorrentes da interação entre metais distintos, que também pode resultar na corrosão acelerada de algum elemento constituinte.

2.2.3 O solo

O solo é o volume que circunda os eletrodos de aterramento e por onde são dispersadas as correntes elétricas conduzidas a ele. Suas propriedades eletromagnéticas – permeabilidade magnética, permissividade elétrica e condutividade elétrica – são definidas por sua

composição química, umidade e aspectos físicos, sendo determinantes para definir a eficiência para a condução de corrente elétrica.

O solo é um dos pontos vitais para o aterramento elétrico, e também o de mais difícil controle, dado o volume de solo que é englobado pelo aterramento elétrico. Os valores de impedância elétrica dos demais componentes do aterramento, compostos em sua totalidade por metais, são menores quando comparados à impedância do solo, sendo esta a razão de a principal parcela da impedância de aterramento estar relacionada às características do solo (VISACRO FILHO, 2002).

2.2.3.1 A permeabilidade magnética

De acordo com Sunde (1968), a permeabilidade magnética é a medida da habilidade que um meio possui para se tornar polarizado em resposta a um campo magnético imposto a ele. Dada a composição química do solo, o valor de sua permeabilidade magnética pode ser considerado constante e igual à unidade (SUNDE, 1968).

2.2.3.2 A permissividade elétrica

Conforme Sunde (1968), a permissividade elétrica é a medida da habilidade que um meio possui para se tornar polarizado em resposta a um campo elétrico imposto a ele. Ao contrário da permeabilidade magnética, o valor da permissividade elétrica relativa do solo apresenta uma variação entre 1 e 80 (SUNDE, 1968).

2.2.3.3 A condutividade elétrica

Sunde (1968) afirma que a condutividade elétrica de um meio é determinada pela medida de sua habilidade em transferir cargas elétricas em resposta à imposição de um campo elétrico. Ao contrário da permeabilidade magnética e da permissividade elétrica, a resistividade elétrica varia entre grandes limites, de 1 a 10.000 $\Omega.m$, e é fundamental para a determinação da impedância de aterramento (SUNDE, 1968).

Apesar de o solo possuir valor de resistividade elétrica (o inverso da condutividade elétrica) elevado, quando comparado aos demais componentes do aterramento elétrico, sua impedância elétrica não é elevada como o valor de sua resistividade, uma vez que as dimensões do aterramento, principalmente a geometria adotada, interferem nesta impedância, pois, alteram o valor da densidade de corrente elétrica ao redor dos eletrodos.

A resistividade elétrica do solo pode ser determinada por uma série de métodos, porém, o método de Wenner possibilita a medição da resistividade elétrica do solo no local da edificação de forma simples. A norma técnica brasileira NBR 7117:2012 – Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo – apresenta o método para a determinação da resistividade elétrica do solo, além de proporcionar uma padronização para a avaliação da resistividade em diferentes camadas do solo.

Entre os fatores que interferem na resistividade do solo destacam-se: a umidade; a temperatura; a estratificação; a composição química e a compactação (VISACRO FILHO, 2002; KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Por consequência, o tratamento do solo pode ser uma das soluções adotadas para o terreno a fim de proporcionar condições adequadas ao aterramento elétrico para a edificação e suas instalações.

2.2.3.3.1 A umidade

Em baixas frequências, a maior parcela da condução de corrente elétrica no solo é realizada através de mecanismos eletrolíticos (VISACRO FILHO, 2002). Por este motivo, a presença de água em estado líquido, e de sua característica de solubilização de compostos químicos, é elemento fundamental para a eletrólise dos sais minerais e, por consequência, a formação de íons que proporcionam as condições adequadas para a condução de corrente elétrica.

Em geral, solos secos apresentam resistividade elétrica mais elevada quando comparados aos mesmos tipos de solo com maiores teores de umidade. Entretanto, o aumento da umidade do solo nem sempre resulta em uma diminuição do valor de sua resistividade elétrica, uma vez que o excesso de água pode carrear os sais minerais para camadas mais profundas do solo. Além disso, o solo pode não dispor de sais minerais para solubilização, desta forma, um aumento na concentração de água não iria aumentar a concentração de íons.

O regime de chuvas de uma região pode alterar as concentrações de umidade do solo, fazendo com que em épocas mais secas o valor de resistividade elétrica do solo seja alterado. Assim, a medição da resistividade deve ser realizada na época mais seca do ano na região, a fim de verificar o pior caso possível para a elaboração do projeto do aterramento elétrico.

Tratamentos químicos do solo com compostos higroscópicos podem ser realizados como forma de garantir a umidade ao redor do

eletrodo de aterramento (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Além disso, o encapsulamento dos eletrodos de aterramento em concreto também pode ser utilizado como forma de garantir a umidade ao redor destes eletrodos (VIJAYARAGHAVAN; BROWN; BARNES, 2004), uma vez que o concreto é higroscópico, além de proporcionar a proteção contra a corrosão do cobre, pois, os eletrodos não entram contato direto com o solo.

2.2.3.3.2 A temperatura

O fator temperatura, que também afeta a resistividade elétrica do solo, tem uma ligação direta com a umidade, pois, é ela que determina o estado físico da umidade distribuída ao longo do solo. Baixas temperaturas (abaixo de 0°C) fazem com que a umidade seja congelada, resultando na incapacidade de solubilização dos sais minerais presentes no solo, e temperaturas elevadas (acima de 100°C) fazem com que a umidade seja evaporada, apresentando o mesmo efeito da situação anterior. Apesar de haver a influência da temperatura ambiente na resistividade do solo, esta é limitada às camadas superficiais do solo (VISACRO FILHO, 2002), assim, as camadas mais profundas não sofrem demasiadamente as influências das variações extremas na temperatura ambiente.

As camadas mais superficiais do solo são aquelas em que há a maior variação de umidade ao longo do tempo, uma vez que estão mais expostas às intempéries, ao sol, e às variações de temperatura ambiente. Apesar de o fenômeno de mudança de temperatura na camada superficial do solo ocorrer com frequência, é possível, através da adoção de estratégias de instalação dos eletrodos de aterramento, minimizar os efeitos da variação da temperatura e umidade no solo. A instalação dos eletrodos de aterramento em um nível abaixo ao da superfície pode ser uma estratégia suficiente para evitar as variações da resistividade elétrica do solo ao longo do tempo, uma vez que nas camadas mais profundas do solo há a tendência de uma variação mais atenuada nos parâmetros de temperatura e umidade.

Os eletrodos de aterramento devem ser compatíveis com as correntes elétricas que irão conduzir em situações adversas, como faltas ou descargas atmosféricas, pois, eles serão submetidos a correntes de amplitude elevada. Por consequência do efeito Joule, o aumento da temperatura ao redor dos eletrodos de aterramento pode ser uma consequência observada nestas situações adversas. Assim, a umidade ao redor do eletrodo pode ser evaporada, fazendo com que a impedância de

aterramento seja alterada por causa do aumento da resistividade elétrica do solo. Por este motivo, as proteções das instalações elétricas devem ser dimensionadas para atuar da forma mais rápida possível e os eletrodos de aterramento devem ser dimensionados de forma a diminuir as densidades de corrente elétrica em suas imediações.

2.2.3.3.3 A estratificação

A estratificação do solo evidencia a formação geológica da região (VISACRO FILHO, 2002). Desta forma, a presença de diferentes camadas de solo irá afetar o projeto do aterramento elétrico, uma vez que as camadas podem apresentar espessuras e valores de resistividade elétrica distintos umas das outras. Assim, o planejamento deve considerar a presença de diferentes camadas estratificadas, que podem ter suas características mensuradas pelo método de Wenner.

Os solos de formação mais antiga, que é o caso dos solos brasileiros, possuem valores de resistividade elétrica mais elevados do que solos de formação mais recente (VISACRO FILHO, 2002). Este fato se dá pela compactação mais acentuada dos solos antigos, diminuindo a presença de umidade em seu interior e, além disso, os solos mais recentes possuem composição química mais favorável à presença de íons em seu meio.

Tendo em vista a preferência da corrente elétrica pelos caminhos de menor impedância (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011), a presença de camadas com valores reduzidos de resistividade elétrica pode ser favorável à diminuição da impedância de aterramento. A fim de aproveitar esta característica dos solos, os eletrodos de aterramento podem ser instalados nas camadas de solo mais propícias à condução de corrente elétrica, resultando em uma redução na impedância de aterramento.

2.2.3.3.4 A composição química

O conhecimento sobre a composição química do solo é importante para a determinação da intensidade do processo de eletrólise dos sais minerais no solo, que irão resultar nas concentrações de íons deste meio. Além disso, solos compostos por óxidos de silício e de alumínio apresentam resistividade elétrica elevada (VISACRO FILHO, 2002), sendo tais componentes encontrados em grandes quantidades na superfície do planeta.

Outro fator importante a ser considerado é a compatibilidade química entre os componentes do aterramento elétrico e o solo. As características do solo podem favorecer a corrosão dos eletrodos, afetando assim o desempenho do aterramento elétrico. Desta forma é necessário verificar se os materiais utilizados são compatíveis com o solo, ou prever medidas alternativas, como metais de sacrifício, para a proteção dos componentes do aterramento elétrico (VIJAYARAGHAVAN; BROWN; BARNES, 2004).

Como forma de melhorar o desempenho do solo através da redução de sua resistividade elétrica, compostos químicos podem ser adicionados ao solo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). O tratamento químico deve ser realizado nas imediações dos eletrodos de aterramento, aumentando assim a superfície equivalente do eletrodo, uma vez que é nesta região onde se concentram as maiores densidades de corrente elétrica.

2.2.3.3.5 A compactação

A compactação do solo está relacionada aos caminhos a serem percorridos pela corrente elétrica e, por consequência, à impedância de aterramento. Solos pouco compactados possuem espaços não ocupados ao longo de sua extensão, que podem ser preenchidos por materiais isolantes, por exemplo, o ar. Já solos mais compactados proporcionam melhores caminhos para a corrente elétrica, uma vez que possuem uma continuidade física maior.

O tamanho dos grãos que compõem o solo pode influenciar na retenção de umidade por ele, uma vez que solos compostos por grãos maiores retém menos água do que aqueles compostos por grãos menores (VISACRO FILHO, 2002). Além disso, a dimensão dos grãos irá interferir na resistividade do solo, pois, há menos área de contato entre grãos maiores adjacentes, quando comparados aos grãos de menor dimensão.

3 A EXECUÇÃO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO

3.1 AS TÉCNICAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

3.1.1 O aterramento elétrico isolado

A técnica de aterramento elétrico denominada isolada, ou independente, corresponde a uma segregação entre as finalidades do aterramento elétrico (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000). Assim, há um aterramento elétrico dedicado e segregado para cada tipo de solicitação existente na edificação, seja ela relacionada ao aterramento do neutro do transformador, a proteção contra descargas atmosféricas, a referência para sinais ou a equipamentos sensíveis.

A segregação utilizada nesta técnica de aterramento consiste no afastamento dos aterramentos elétricos de acordo com a sua finalidade. Desta forma, supostamente, não haveria interferências entre dois ou mais aterramentos elétricos, permitindo aos sistemas conectados a eles operar sem que haja qualquer alteração em seu desempenho decorrente de uma solicitação aos demais aterramentos, por exemplo, a ocorrência de uma falta à terra. Porém, dadas as propriedades eletromagnéticas do solo, quando um dos aterramentos fosse solicitado, haveria a condução de corrente elétrica em suas imediações, ocasionando o surgimento de uma diferença de potencial elétrico ao longo do solo, interferindo nos demais aterramentos.

De acordo com Visacro Filho (2002), o princípio de funcionamento desta técnica de aterramento estaria associado ao fato de se evitar que distúrbios gerados em um dos aterramentos elétricos sejam transferidos aos demais e, por consequência, aos equipamentos e instalações elétricas a eles conectados, proporcionando uma espécie de isolamento entre eles. A utilização desta técnica de aterramento era uma prática comum no passado (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000), sendo o aterramento elétrico de equipamentos sensíveis separado dos demais aterramentos. Entretanto, as restrições de espaço existentes nas edificações atuais afetam o desempenho desta técnica de aterramento, uma vez que os potenciais seriam transmitidos por meio de um acoplamento resistivo através do solo entre os diferentes aterramentos elétricos.

Para Mamede Filho (2010), mesmo nos casos onde houvesse uma separação de grandes distâncias entre os aterramentos haveria riscos, pois, dois pontos próximos em uma mesma instalação, por exemplo, dois equipamentos elétricos, poderiam estar conectados a aterramentos

distintos, possibilitando a ocorrência de acidentes com pessoas (choque elétrico por meio do contato entre as carcaças dos equipamentos) ou prejuízos ao patrimônio, por exemplo, um fluxo de corrente não intencional devido a uma ligação proposital entre os equipamentos (interfaces de comunicação).

Além disso, esta técnica de aterramento apresenta uma série de desvantagens, entre elas o aumento do risco de acidentes relacionados às instalações elétricas (incêndios e choques elétricos) e problemas de compatibilidade eletromagnética (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000), pois, solicitações de grande amplitude, tais como descargas atmosféricas ou correntes de falta à terra, gerariam desequilíbrios entre os aterramentos, impondo diferenças de potenciais elevadas a diversos pontos da edificação.

3.1.2 O aterramento elétrico em ponto único

A técnica de aterramento elétrico denominada ponto único, ou em estrela, corresponde a uma união de todos os aterramentos elétricos em um único ponto. Assim, todos os sistemas, instalações e equipamentos que requeiram o aterramento elétrico são conectados a um único ponto, não havendo distinção de finalidades como havia na técnica anterior, sejam elas relacionadas ao aterramento do neutro do transformador, a proteção contra descargas atmosféricas, a referência de sinal ou a equipamentos sensíveis (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000).

A conexão de todos os equipamentos e instalações elétricas a um único ponto de aterramento consiste na pressuposta inexistência de uma diferença de potencial nos condutores de proteção ao longo de toda a edificação. Assim, sem esta diferença de potencial, não haveria um fluxo de corrente elétrica nos condutores de proteção. Além disso, quando houvesse uma elevação no potencial elétrico de referência do aterramento elétrico, decorrente de uma solicitação, por exemplo, uma falta à terra decorrente de um curto circuito, esta elevação seria transmitida por igual aos condutores de proteção ao longo da edificação, evitando o surgimento de diferenças de potencial ao longo da edificação. Porém, a execução e a manutenção deste tipo de técnica de aterramento requerem maior atenção, uma vez que a integridade do sistema pode ser comprometida involuntariamente.

O desempenho desta técnica de aterramento elétrico é intimamente relacionado às frequências as quais as instalações elétricas serão submetidas. Para Mamede Filho (2010), em alguns casos, como aqueles em que há somente frequências industriais envolvidas, o

aterramento elétrico preconizado por esta técnica pode ser eficaz, entretanto, quando as instalações elétricas forem submetidas a frequências elevadas, o desempenho do aterramento elétrico será comprometido, uma vez que não somente os condutores intencionais irão determinar os valores de impedância à terra, mas um conjunto de reatâncias indutivas e capacitivas não intencionais também irão contribuir com esta impedância. Segundo Williams e Armstrong (2000), a origem desta técnica de aterramento foi em uma época em que a eletrônica ainda não era desenvolvida, e por este motivo, sua aplicação pode não ser adequada às instalações elétricas atuais.

De acordo com Visacro Filho (2002), esta técnica de aterramento possui, teoricamente, um desempenho satisfatório quando submetido às descargas atmosféricas, faltas, transitórios e ruídos de baixa frequência. Entretanto, em condições normais de aplicação, é difícil garantir que os condutores metálicos se mantenham isolados com o decorrer do tempo, pois as falhas de isolamento podem comprometer esta técnica. Além disso, a referida técnica requer condutores longos para a conexão dos equipamentos mais distantes, tornando-os assim, suscetíveis a ruídos de alta frequência, pois, tais condutores se comportariam como antenas nesta situação. Por este motivo, esta técnica é adequada para aplicações em que não há grandes comprimentos dos condutores de conexão.

3.1.3 A malha de aterramento elétrico

A técnica de aterramento elétrico denominada malha de aterramento, ou aterramento por equipotencialização, corresponde a uma conexão de todos os elementos metálicos da edificação, não somente aqueles pertencentes ao escopo das instalações elétricas, mas também os demais componentes metálicos presentes, como as estruturas e esquadrias.

A conexão existente entre todos os elementos metálicos da edificação consiste na criação de uma estrutura equipotencial para o correto desempenho de equipamentos e instalações elétricas. O objetivo a ser alcançado com esta conexão está relacionado à eliminação de possíveis diferenças de potencial elétrico entre dois pontos distintos da edificação e, por consequência, o fluxo de corrente elétrica. Desta forma, é possível cumprir com os requisitos relacionados ao desempenho das instalações elétricas, a segurança das pessoas e do patrimônio e, por fim, com as questões de compatibilidade eletromagnética (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000).

Esta técnica de aterramento elétrico prevê então, de acordo com Visacro Filho (2002), a existência de diversos aterramentos elétricos locais que estariam conectados entre si, possibilitando a equipotencialização ao longo da edificação. Assim, para melhor atender aos requisitos de aterramento elétrico de equipamentos sensíveis, é necessário conectá-los aos demais componentes metálicos da edificação, a fim de garantir que não haja potenciais elétricos distintos ao longo da edificação (VISACRO FILHO, 2002).

Apesar de os condutores metálicos possuírem um comportamento similar ao de antenas quando são submetidos a variações em alta frequência de campos eletromagnéticos, as múltiplas conexões existentes ao longo da edificação proporcionam caminhos alternativos e não ressonantes para as correntes que por ventura venham a circular nesta malha formada ao longo da edificação (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000). Assim, esta técnica de aterramento é adequada também para as questões relativas à compatibilidade eletromagnética, uma vez que a conexão prevista pela malha garante a existência de múltiplos caminhos para o fluxo de corrente elétrica em uma grande faixa de frequências, além de também proporcionar uma associação de eletrodos de aterramento, reduzindo assim a impedância deste aterramento elétrico conjunto da edificação.

A partir das possibilidades de conexão de diferentes aterramentos elétricos aos demais componentes metálicos da edificação, é possível estabelecer uma proteção tanto para baixas frequências como para as altas frequências a partir da elaboração de um projeto de aterramento elétrico adequado para cada faixa de frequência e conectados entre si (MAMEDE FILHO, 2010).

3.2 OS SISTEMAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

A norma técnica brasileira para as instalações elétricas de baixa tensão estabelece uma classificação para o aterramento elétrico, de acordo com a configuração do alimentador, por exemplo, o transformador, e de suas cargas. Tal classificação é composta por duas letras: a primeira refere-se à situação da alimentação em relação à terra e a segunda refere-se à situação da carga em relação à terra, sendo que esta norma admite a execução de sistemas TT, TN ou IT.

A norma estabelece a primeira letra como “T” onde a alimentação dos circuitos é conectada a um ponto diretamente aterrado ou “I” onde a alimentação dos circuitos é isolada em relação à terra ou conectada a ela por meio de uma impedância. Já para a segunda letra, a norma estabelece como “T” onde a carga é conectada somente à terra ou “N” onde a carga é conectada ao ponto de alimentação aterrado. Pode haver ainda uma terceira letra que especifica a disposição do condutor de neutro e o de proteção, sendo ela “C” onde ambas as funções são desempenhadas por um único condutor ou “S” onde ambas as funções são desempenhadas por condutores distintos.

3.2.1 O sistema TN

Neste sistema de aterramento elétrico, a alimentação do circuito é aterrada, no caso, o neutro do transformador possui conexão à terra, e a carga é conectada por meio de um condutor ao aterramento do neutro. Para Mamede Filho (2010), tudo aquilo que se pretende aterrar deve ser conectado ao ponto de aterramento da alimentação por meio do condutor de proteção. Este tipo de sistema de aterramento elétrico permite a circulação de corrente através do condutor de proteção, a fim de sensibilizar os dispositivos de proteção dos circuitos, cessando assim a alimentação e a falta propriamente dita (PARISE; MARTIRANO; PARISE, 2014).

3.2.1.1 O sistema TN-C

A Resolução de Diretoria Colegiada nº 50, de 21 de fevereiro de 2002, proíbe a utilização do sistema de aterramento elétrico TN-C em estabelecimentos assistenciais de saúde.

Neste sistema de aterramento elétrico, o condutor de proteção é o mesmo utilizado para o neutro das instalações elétricas, assim, no caso de um desbalanceamento de fases, presença de harmônicas de tensão na

rede ou em um caso de uma falta, o potencial escalar elétrico existente no condutor neutro é transferido àquilo que se deseja aterrar, expondo as pessoas e o patrimônio a riscos.

A representação gráfica do sistema de aterramento TN-C é apresentada na Figura 1. Na representação é possível verificar o compartilhamento de um mesmo condutor para funções distintas: proteção e o neutro do sistema trifásico. Apesar de um sistema trifásico ser representado, não há perda de generalidade quando a alimentação é monofásica ou bifásica.

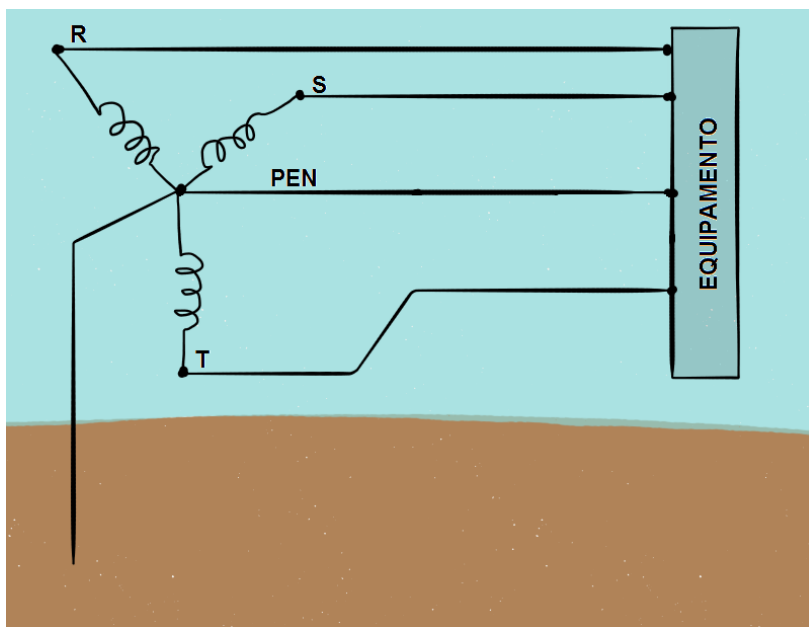


Figura 1 – Representação do sistema de aterramento elétrico TN-C.

A utilização deste sistema de aterramento elétrico oferece riscos ao patrimônio e às pessoas, pois, pode fazer com que potenciais elevados sejam aplicados na carcaça de equipamentos, podendo gerar um incêndio a partir de uma falta, ou um choque elétrico em uma pessoa que entre em contato com tal equipamento. Além disso, este sistema de aterramento elétrico apresenta uma grande desvantagem: a impossibilidade da instalação de dispositivos de proteção diferencial residual, uma vez que o condutor de proteção e de neutro é compartilhado.

Outro ponto importante a ser destacado para este sistema de aterramento elétrico diz respeito à referência de potencial elétrico entre vários equipamentos, uma vez que ela pode variar ao longo da edificação, pois, esta referência estaria vinculada ao nível do desbalanceamento entre as fases ou da presença de harmônicas de tensão na rede, além, da impedância do condutor neutro e de proteção (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

3.2.1.2 O sistema TN-S

Este sistema de aterramento elétrico é caracterizado por possuir condutores distintos cumprindo as funções de neutro e de proteção. Entretanto, pelo fato de ambos os condutores possuírem a mesma origem, o ponto de aterramento do transformador de alimentação, aquilo que se pretende aterrar pode ser submetido a tensões indesejadas no caso de sobretensões no ponto de aterramento, por exemplo, uma descarga atmosférica ou um surto de tensão (MAMEDE FILHO, 2010).

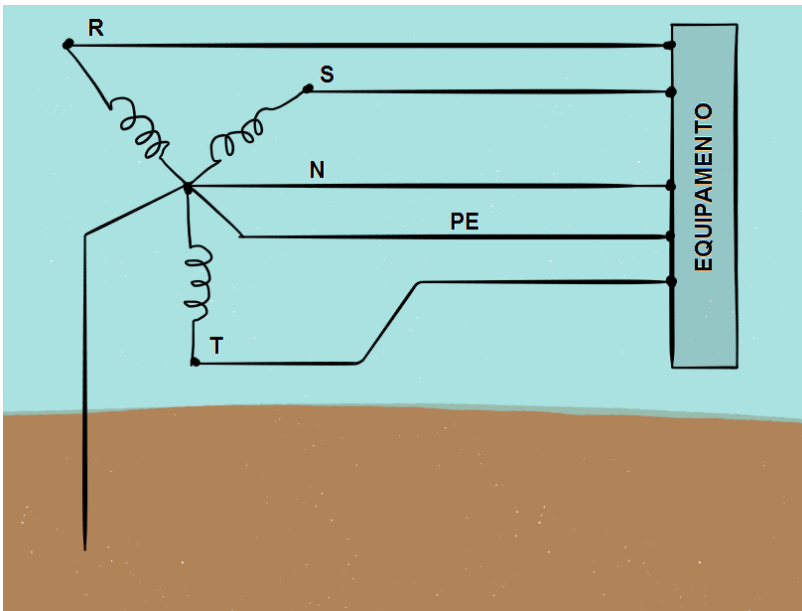


Figura 2 – Representação do sistema de aterramento elétrico TN-S.

Entretanto, de acordo com Mamede Filho (2010), a presença de tensões no condutor neutro (o condutor de retorno de corrente elétrica),

por exemplo, um desbalanceamento de fases ou a presença de harmônicas de tensão, não interferem no condutor de proteção e naquilo que se pretende aterrar, pois, os condutores com funções distintas – proteção e neutro – são separados entre si.

A representação gráfica do sistema de aterramento TN-S é apresentada na Figura 2. Na representação é possível observar a separação existente entre os condutores de proteção e sua conexão no ponto de aterramento do transformador. Esta característica confere ao sistema de aterramento um bom desempenho, destacando-se, a melhoria da qualidade de energia elétrica (TELLÓ, 2007).

A presença do condutor de proteção possibilita a sensibilização dos dispositivos de proteção das instalações elétricas, pois, na ocorrência de uma falta ou uma falha no isolamento do equipamento elétrico, há um caminho de baixa impedância através de tal condutor para o retorno das correntes (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Assim, de acordo com Kindermann e Campagnolo (2011) o sistema de aterramento TN-S independe do valor de impedância de aterramento para sensibilizar os dispositivos de proteção, permitindo que edificações em regiões com elevados valores de resistividade elétrica do solo também possuam um sistema de proteção eficaz de suas instalações elétricas.

3.2.2 O sistema TT

Este sistema de aterramento é caracterizado pelo aterramento em locais distintos da alimentação e daquilo que se pretende aterrar. Em decorrência do fato de o condutor neutro e o de proteção não serem aterrados em um mesmo ponto, aquilo que se pretende aterrar não é submetido a tensões que por ventura venham a surgir no condutor neutro (MAMEDE FILHO, 2010). Este tipo de sistema de aterramento elétrico permite a circulação de corrente através do solo, a fim de sensibilizar os dispositivos de proteção dos circuitos, cessando assim a alimentação e a falta propriamente dita (PARISE; MARTIRANO; PARISE, 2014).

Entretanto, de acordo com Kindermann e Campagnolo (2011), o sistema de aterramento elétrico TT possui uma grande desvantagem: a necessidade de um aterramento elétrico de baixa impedância. Desta forma, a presença de um solo com alta resistividade iria influenciar negativamente no desempenho deste sistema, uma vez que as correntes que por ventura venham a circular pela terra gerariam diferenças de potencial escalar elétrico significativas na superfície do solo, podendo trazer riscos às pessoas e ao patrimônio. Por este motivo, estabelecer um potencial de referência para este sistema de aterramento elétrico é uma

tarefa de difícil execução. Além da desvantagem relacionada à necessidade de uma baixa impedância de aterramento, este sistema não é recomendado para a melhoria da qualidade de energia elétrica (TELLÓ, 2007), não sendo a melhor opção para a conexão de cargas sensíveis para evitar interferências eletromagnéticas.

A representação gráfica do sistema de aterramento TT é apresentada na Figura 3

Figura 3 – Representação do sistema de aterramento elétrico TT.

. Na representação é possível observar a separação existente entre os aterramentos do neutro do transformador e do equipamento elétrico.

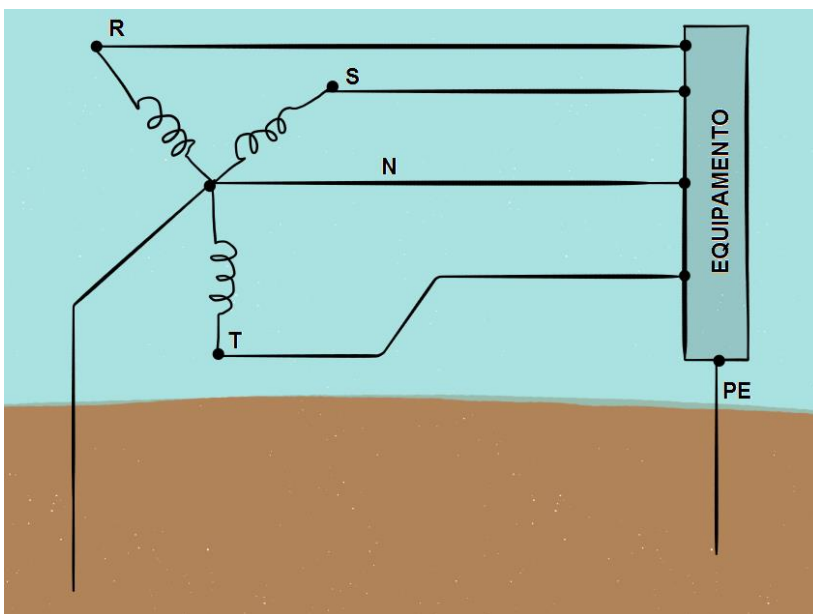


Figura 3 – Representação do sistema de aterramento elétrico TT.

3.2.3 O sistema IT

Este sistema de aterramento elétrico é caracterizado pelo isolamento da alimentação em relação à terra (ou pela conexão do neutro do transformador à terra por meio de uma impedância) e o aterramento elétrico da carga. Este tipo de sistema de aterramento elétrico visa a limitação e o controle de uma primeira falta à terra, geralmente relacionada a correntes de fuga (PARISE; MARTIRANO; PARISE, 2014).

Este tipo de sistema de aterramento elétrico permite a continuidade do fornecimento de energia elétrica mesmo durante a ocorrência de um primeiro defeito (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Porém, a existência de um segundo defeito simultâneo poderá interromper o fornecimento de energia elétrica ao equipamento, uma vez que elevadas magnitudes de corrente poderão fluir pelos condutores, sensibilizando os dispositivos de proteção.

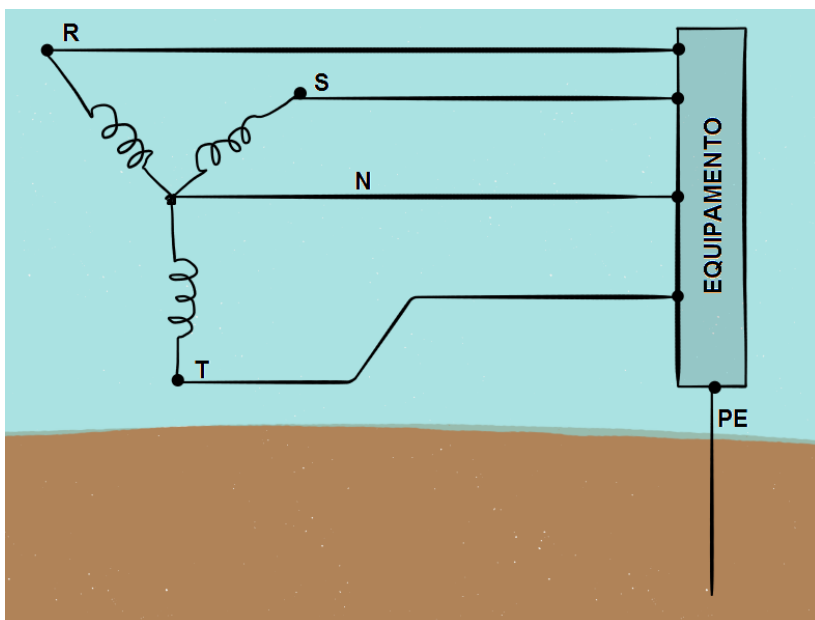


Figura 4 – Representação do sistema de aterramento elétrico IT.

Além de proporcionar a continuidade do fornecimento de energia elétrica, este sistema possui um desempenho superior em relação à segurança elétrica, quando comparado aos demais, uma vez que a ausência intencional de conexão entre a fonte de alimentação e a terra impede a circulação de corrente elétrica no caso de uma pessoa entrar em contato com uma parte viva da instalação, pois, não há um caminho de baixa impedância para o retorno de tais correntes. Apesar da segurança elétrica proporcionada por este sistema, ele não é recomendado para a melhoria da qualidade de energia elétrica (TELLÓ, 2007), uma vez que não há uma referência de potencial definida para o transformador de alimentação.

A representação gráfica do sistema de aterramento IT é apresentada na Figura 4. Na representação é possível observar o isolamento da fonte de alimentação em relação à terra e o aterramento do equipamento elétrico.

3.3 AS RELAÇÕES ENTRE AS TÉCNICAS E OS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Os sistemas de aterramento previstos na norma técnica brasileira de instalações elétricas de baixa tensão – TT, TN e IT – possuem características relacionadas às técnicas de aterramento – isolada, em ponto único e em malha. Tais características permitem a associação das vantagens e desvantagens aos sistemas de aterramento, com base nas técnicas de aterramento.

3.3.1 O sistema TT e a técnica de aterramento isolado

O sistema de aterramento elétrico TT tem por característica o aterramento da fonte de alimentação distinto daquele aterramento utilizado para sua carga. A separação existente entre os conjuntos de eletrodos de aterramento é semelhante à segregação preconizada na técnica isolada de aterramento elétrico, uma vez que os diferentes componentes a serem aterrados são conectados a um conjunto distinto de eletrodos de aterramento.

Assim, a partir da existência de dois aterramentos elétricos (aparentemente) independentes entre si, as instalações e os equipamentos elétricos a ela conectados podem sofrer a ação de interferências eletromagnéticas, pois, duas das principais características do aterramento elétrico no aspecto de compatibilidade eletromagnética são desconsideradas: a equipotencialização ao longo da edificação e o caminho de baixa impedância para as correntes de retorno. Sendo assim, a ausência de tais características do aterramento elétrico faz com que as instalações elétricas e os equipamentos possam ser mais facilmente submetidos às interferências eletromagnéticas.

Desta forma, não há uma referência de potencial elétrico comum para a alimentação, uma vez que o acoplamento entre os conjuntos distintos de eletrodos de aterramento se dá através do solo, que a princípio, pode não possuir boas características elétricas.

A possibilidade de degradação da qualidade de energia elétrica mediante a utilização deste sistema de aterramento elétrico, ou da técnica isolada, desencoraja sua utilização nas instalações elétricas de um

estabelecimento assistencial de saúde, visto que este possui requisitos mais restritivos em relação a esta qualidade.

Além das questões referentes à qualidade de energia elétrica, este sistema de aterramento não apresenta boas características em relação à segurança elétrica, pois, a sensibilização dos dispositivos de proteção das instalações elétricas irá depender da qualidade do aterramento elétrico, que é uma função da resistividade elétrica do solo, que pode possuir uma grande variação em relação à época do ano e a localização geográfica da edificação.

3.3.2 O sistema TN e a técnica de malha de aterramento

O sistema de aterramento elétrico TN, ou mais especificamente o sistema TN-S (uma vez que a utilização do sistema TN-C em estabelecimentos assistenciais de saúde é proibida por norma) possui o aterramento do neutro do transformador de alimentação no mesmo ponto em que há a origem do condutor de proteção.

Uma variação permitida pela norma técnica brasileira de instalações elétricas de baixa tensão é a existência de um aterramento elétrico específico para aquilo que se pretende aterrar, pois, providências adicionais, por exemplo, eletrodos de aterramentos e condutores complementares, podem ser utilizadas para a melhoria do aterramento elétrico (TELLÓ, 2007). Assim, os aterramentos complementares podem ser conectados ao aterramento elétrico principal da fonte de alimentação, sem que o sistema TN-S seja descaracterizado.

Nesta configuração modificada, o sistema de aterramento é similar à técnica de malha de aterramento elétrico, na qual há uma variedade de aterramentos elétricos, intencionais ou não, conectados entre si. Além disso, as características construtivas deste sistema de aterramento modificado proporcionam duas condições favoráveis aos aspectos de compatibilidade eletromagnética: a equipotencialização ao longo da edificação e o caminho de baixa impedância para as correntes de retorno.

Além das questões favoráveis em relação à compatibilidade eletromagnética, a existência de um caminho de baixa impedância entre os aterramentos elétricos, por meio de condutores de conexão, faz com que as respostas dos dispositivos de proteção das instalações elétricas sejam mais rápidas e confiáveis, uma vez que não há a dependência da resposta à qualidade do solo, garantindo assim a segurança elétrica durante todos os períodos do ano e nas mais variadas localizações geográficas da edificação.

4 ATERRAMENTO ELÉTRICO EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

A fim de analisar a eficiência do aterramento elétrico em uma edificação e obter subsídios para a elaboração de seu projeto, é necessário verificar o comportamento de seus elementos constituintes. Assim, o conhecimento da relação entre o eletrodo de aterramento e o solo é fundamental para avaliar o desempenho das ações e escolhas de projeto adotadas para o aterramento elétrico.

A forma de distribuição da corrente elétrica no solo ao redor do eletrodo irá determinar as características eletromagnéticas do aterramento elétrico da edificação. Por este motivo, se faz necessária a solução das equações de Maxwell, que descrevem o comportamento das grandezas eletromagnéticas.

Em se tratando de campos eletromagnéticos, sua interação com o meio irá variar com base em uma série de parâmetros, sejam eles constitutivos (as propriedades eletromagnéticas do meio: condutividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade magnética) ou dependentes do tipo de excitação presente no meio, por exemplo a forma de variação temporal de uma determinada grandeza eletromagnética de interesse.

Tendo em vista a simplificação na resolução das equações de Maxwell, a adoção de um modelo que desconsidere a variação temporal dos campos eletromagnéticos em favor de sua resposta em frequência é comumente utilizada para a resolução de problemas. Entretanto, a simplificação de cálculos pode se mostrar insuficiente para retratar comportamentos de campos eletromagnéticos em uma determinada situação, por exemplo, os transitórios. Porém, a adoção de um modelo simplificado pode ser de grande valia para algumas situações, por exemplo, as baixas frequências.

Desta forma, pretende-se apresentar um modelo de representação das grandezas eletromagnéticas em uma situação que desconsidere a variação temporal de tais grandezas, fornecendo informações ao responsável pelo projeto do aterramento elétrico.

Serão apresentados os resultados de dois modelos distintos: a injeção de corrente no solo a partir de um cilindro semi-infinito, a qual proporciona uma distribuição de campo elétrico em sentido radial em relação ao eletrodo cilíndrico; e a injeção de corrente no solo a partir de uma semiesfera, a qual proporciona uma distribuição de campo elétrico em sentido radial em relação ao eletrodo semiesférico.

A utilização da representação em coordenadas cilíndricas ou esféricas justifica-se pelo fato de ser possível verificar a variação dos

campos eletromagnéticos na superfície do solo com a solução analítica das equações de Maxwell. Desta forma, é possível verificar matematicamente os modelos adotados para o problema em questão, sendo possível aplicá-los em diferentes situações.

4.1 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL

Para a situação em que a variação dos campos eletromagnéticos é desconsiderada, as equações de Maxwell, que também descrevem o comportamento de tais campos, são representadas pelas Equações (1), (2), (3) e (4).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_V \quad (4)$$

Para o caso em questão, o campo elétrico é representado como o oposto do gradiente do potencial escalar elétrico, conforme a Equação (5).

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (5)$$

Para um meio isotrópico e eletricamente neutro, ou seja, um meio sem falta ou excesso de cargas elétricas, a substituição da Equação (5) na Equação (4) resulta na Equação (6).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6)$$

4.1.1 Solução em coordenadas cilíndricas

Para a solução da equação de Laplace para o potencial escalar elétrico, representada pela Equação (6), em coordenadas cilíndricas, para a qual se considera como eletrodo de aterramento um cilindro metálico semi-infinito com um determinado raio (ρ_0), imerso em um meio de resistividade constante, e sob a influência de um potencial escalar elétrico constante (V_0), conforme a Figura 5. Na representação é possível verificar a distribuição radial em coordenadas cilíndricas do campo elétrico ao

redor do eletrodo de aterramento escolhido. Apesar de um cilindro semi-infinito ser inexequível, o cálculo é realizado com o objetivo de apresentar o comportamento do potencial escalar elétrico nas imediações de uma haste de aterramento cilíndrica.

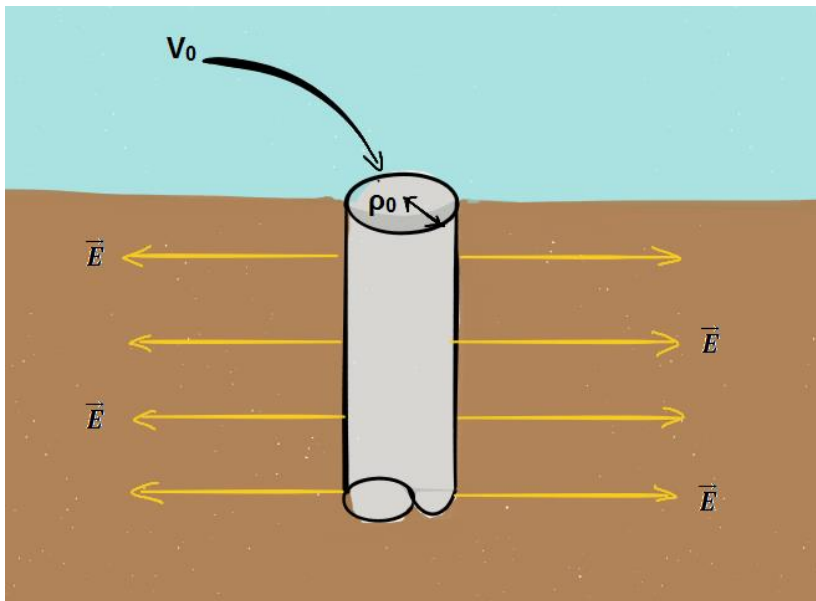


Figura 5 – Representação de um cilindro semi-infinito imerso no solo e sob a influência de um potencial escalar elétrico.

Adotando as coordenadas cilíndricas para a solução da equação que descreve o comportamento do potencial escalar elétrico da situação em questão, obtém-se a Equação (7).

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial V}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

Para a simplificação do problema, considera-se que a única variação do potencial escalar elétrico ocorra em função da distância ao centro do eletrodo, o que resulta na Equação (8).

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dV}{d\rho} \right) = 0 \quad (8)$$

A equação diferencial resultante da solução da equação de Laplace para o potencial escalar elétrico em coordenadas cilíndricas tem sua família de soluções apresentada pela Equação (9).

$$V(\rho) = A \ln(\rho) + B, \rho > 0 \quad (9)$$

Tal família de soluções é válida para um número sem fim de equações, sendo necessária a aplicação das condições de contorno para garantir uma solução única. Para tanto, é necessário estabelecer dois valores de contorno para a equação: um diz respeito ao potencial escalar elétrico aplicado na superfície externa do eletrodo, delimitada por seu raio, e o outro diz respeito ao afastamento do terra remoto (R). O terra remoto é um ponto suficientemente afastado do eletrodo de aterramento ao qual é atribuído um potencial elétrico nulo (VISACRO FILHO, 2002). A Equação (9) pode ser representada de forma específica pela Equação (10).

$$V(\rho) = V_0 \frac{\ln(\rho/R)}{\ln(\rho_0/R)}, \rho_0 \leq \rho \leq R \quad (10)$$

A distribuição do potencial escalar elétrico em função da distância ao centro do eletrodo é apresentada na Figura 6. Para tanto, considera-se que o cilindro semi-infinito possua raio de 1 centímetro, esteja submetido a um potencial escalar elétrico invariante em relação ao tempo de 100 V e o terra remoto esteja situado a uma distância de 50 metros a partir do centro do eletrodo de aterramento. A simulação computacional da Equação (10), representada na Figura 6, foi feita no Matlab®.

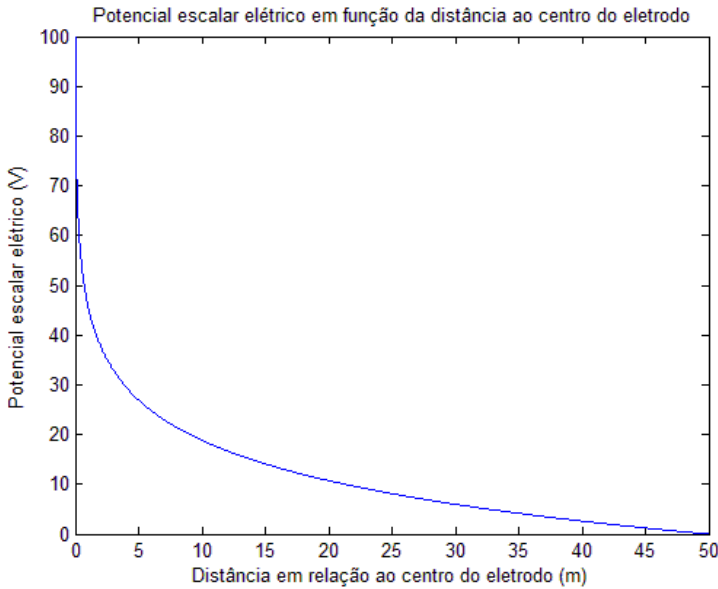


Figura 6 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico constante ao redor de um eletrodo cilíndrico semi-infinito.

4.1.2 Solução em coordenadas esféricas

Para a solução da equação de Laplace para o potencial escalar elétrico, representada pela Equação (6), em coordenadas esféricas, para a qual se considera como eletrodo de aterramento uma semiesfera metálica com um determinado raio (r_0), imerso em um meio de resistividade constante, e sob a influência de um potencial escalar elétrico constante (V_0), conforme a Figura 7. Na representação é possível verificar a distribuição radial em coordenadas esféricas do campo elétrico ao redor do eletrodo de aterramento escolhido.

Adotando as coordenadas esféricas para a solução da equação que descreve o comportamento do potencial escalar elétrico da situação em questão, obtém-se a Equação (11).

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (11)$$

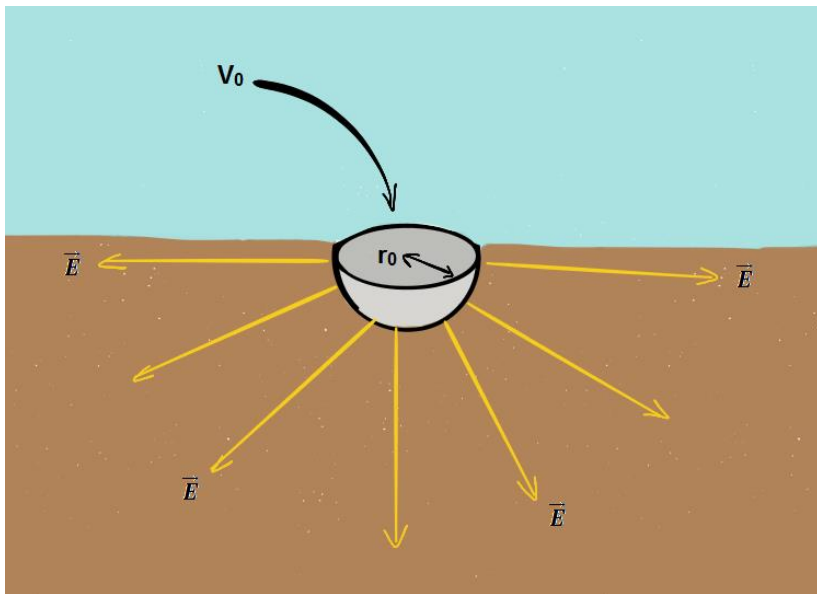


Figura 7 – Representação de uma semiesfera imersa no solo e sob a influência de um potencial escalar elétrico.

Para a simplificação do problema, considera-se que a única variação do potencial escalar elétrico ocorra em função da distância ao centro do eletrodo, o que resulta na Equação (12).

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (12)$$

A equação diferencial resultante da solução da equação de Laplace para o potencial escalar elétrico em coordenadas cilíndricas tem sua família de soluções apresentada pela Equação (13).

$$V(r) = A \frac{1}{r} + B, r > 0 \quad (13)$$

Tal família de soluções é válida para um número sem fim de equações, sendo necessária a aplicação das condições de contorno para garantir uma solução única. Para tanto, é necessário estabelecer dois valores de contorno para a equação: um diz respeito ao potencial escalar elétrico aplicado na superfície externa do eletrodo, delimitada por seu raio, e outro diz respeito ao potencial escalar elétrico no infinito. A

Equação (13) pode ser representada de forma específica pela Equação (14).

$$V(r) = V_0 r_0 \frac{1}{r}, r \geq r_0 \quad (14)$$

A distribuição do potencial escalar elétrico em função da distância ao centro do eletrodo é apresentada na Figura 8. Para tanto, considera-se que a semiesfera possua raio de 1 centímetro e esteja submetida a um potencial escalar elétrico invariante em relação ao tempo de 100 V. A simulação computacional da Equação (14), representada na Figura 8, foi feita no Matlab®.

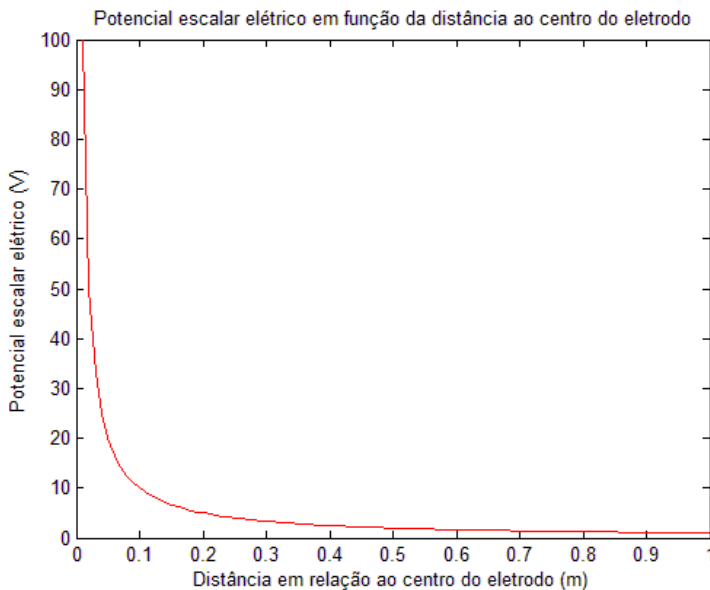


Figura 8 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico constante ao redor de um eletrodo de aterramento semiesférico.

Comparando os comportamentos do potencial escalar elétrico para as duas situações, representados pela Figura 6 e pela Figura 8, pode-se concluir que para o caso onde foi adotada uma semiesfera apresenta valores de gradiente de potencial mais intensos do que o caso do cilindro semi-infinito. O motivo que explica este fenômeno é o fluxo constante do campo elétrico em função da distância ao eletrodo de aterramento. Para o

caso em coordenadas cilíndricas, o campo elétrico decai com o inverso da distância, enquanto que para o caso em coordenadas esféricas, o campo elétrico decai com o inverso do quadrado da distância.

4.3 O DESEMPENHO DE HASTES DE ATERRAMENTO COMERCIAIS

A execução do projeto de aterramento elétrico em uma edificação, qualquer que seja a sua destinação, possui uma série de fatores a serem levados em consideração. Dois fatores se destacam nas etapas de projeto e execução: a durabilidade e a facilidade de aquisição dos componentes.

A fim de garantir a continuidade do desempenho do aterramento elétrico ao longo do tempo, é necessária a adoção de algumas medidas desde a etapa de projeto, visando a escolha de materiais que sejam resistentes à ação do tempo e as condições impostas pelo local onde ele será instalado. Cuidados relativos à corrosão das partes metálicas devem ser adotados com base na análise química do solo, se valendo, quando possível e viável, da correção dos fatores que degradem de forma acentuada o aterramento elétrico ou da utilização de materiais especiais para o tipo de solo encontrado. Quando as medidas de proteção e retardo da degradação dos componentes do aterramento não são viáveis, é necessário que sejam previstos meios para a inspeção e substituição frequentes dos materiais.

Para garantir a execução do projeto conforme suas especificações, é necessário também que o responsável por sua elaboração adote materiais e componentes acessíveis na região, visando a economicidade da solução adotada. Além dos materiais, também é importante verificar se a equipe responsável pela execução será capaz de reproduzir todos os cuidados adotados ao longo da elaboração do projeto. Essas atitudes previnem a execução de medidas alternativas – fora de conformidade com o projeto – que possam comprometer o desempenho do aterramento elétrico.

Tendo em vista a facilidade de acesso e da existência de componentes específicos para esta solução, a haste de aterramento de aço recoberta por cobre, especificada pela NBR 13571:1996 – Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios – pode ser considerada como uma das soluções para a elaboração do projeto do aterramento elétrico de uma edificação. Vale lembrar também a importância dos demais componentes da edificação, em especial suas estruturas metálicas, que também podem desempenhar funções do aterramento elétrico, sem prejuízos.

A haste de aço recoberta por cobre possui algumas características importantes que privilegiam seu uso: seu formato e resistência mecânica (proporcionada pelo aço) facilitam a inserção no solo por meio de métodos convencionais, por exemplo a cravação através de batidas; a camada de cobre desempenha as funções de proteção do aço contra as ações corrosivas do solo (evitando a oxidação), além de proporcionar um caminho de baixa impedância para o fluxo de correntes elétricas ao longo da hastes, devido à alta condutividade do cobre.

4.3.1 O comportamento de hastes de aterramento

A fim de ilustrar o comportamento de hastes de aterramento em baixas frequências, foi utilizado o método de elementos finitos para a solução das equações de Maxwell. O programa de computador utilizado para o desenho das geometrias foi o AutoCad®. Já o cálculo das soluções pelo método dos elementos finitos foi feito com o programa de computador Ansys®.

Para representar a haste de aterramento na simulação computacional, utilizou-se um cilindro e um cone justapostos, com diâmetro de dois centímetros, que possuem uma altura total de 2 metros, a fim de representar o corpo da haste e a sua ponta. Já para o solo, considerou-se como sendo um cilindro concêntrico à haste de aterramento, homogeneamente preenchido por um material isotrópico de resistividade elétrica de $1000 \Omega \cdot m$ e raio de 2 metros a partir do centro da haste de aterramento. A limitação deste volume de solo ao redor do eletrodo se deu pela necessidade de impor uma limitação ao volume de cálculo para o método computacional.

Os potenciais escalares elétricos aplicados na haste e na superfície exterior do cilindro, utilizados como valores de contorno para a solução do método dos elementos finito, foram escolhidos com base na representação da distribuição do potencial escalar elétrico invariável no tempo para uma haste cilíndrica semi-infinita envolta por um meio homogêneo. Neste caso, foi aplicado um potencial escalar elétrico de 100 volts no eletrodo e de 38 volts na superfície lateral do cilindro que representa o solo.

Como resultado, obteve-se a distribuição do potencial escalar elétrico ao redor do eletrodo de aterramento conforme a Figura 9. Observa-se nesta representação que as superfícies equipotenciais se distribuem em um conjunto concêntrico à haste de aterramento. Além disso, a partir da observação da distribuição do potencial escalar elétrico, que o gradiente desta grandeza possui direção radial nas porções próximas

à superfície, conforme previsto no cálculo do desempenho de uma haste cilíndrica semi-infinita excitada por um potencial escalar elétrico constante.

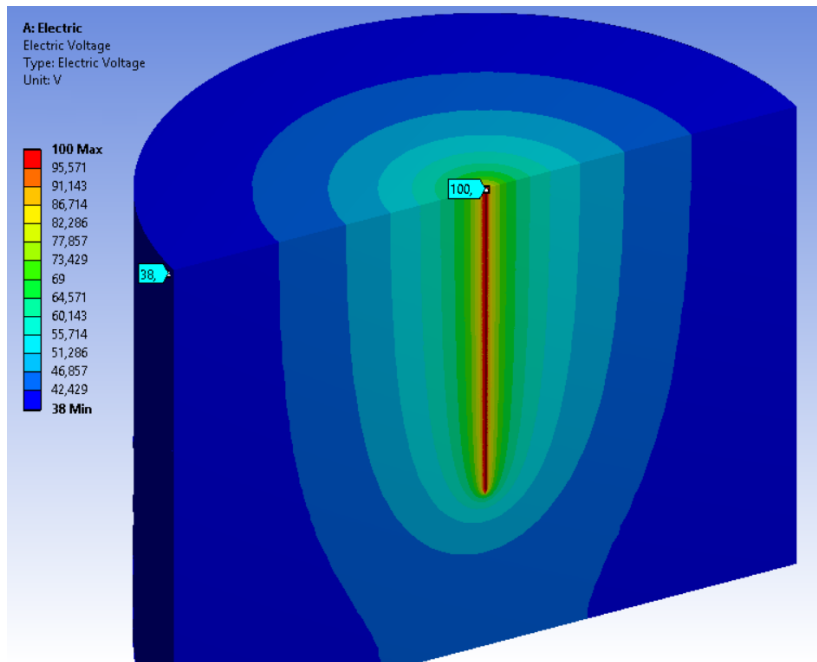


Figura 9 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de uma haste de aterramento.

A simulação computacional da distribuição do campo elétrico, representada na Figura 10, também evidencia tal comportamento. Observa-se que, na porção imediatamente próxima ao eletrodo de aterramento, o campo elétrico (representado pelas setas em azul) possui um comportamento bem definido: linhas de campo com direção radial. É possível verificar também que o campo elétrico apresenta o mesmo comportamento ao longo da extensão do eletrodo de aterramento. Assim, o comportamento da haste de aterramento está em conformidade com aquilo que foi previsto para o caso de uma haste de aterramento cilíndrica semi-infinita excitada por um potencial escalar elétrico constante.

Entretanto, tal comportamento (linhas de campo radiais e paralelas entre si) não é observado na ponta da haste de aterramento, conforme a Figura 11. Na ponta da haste é verificada uma alteração no

perfil do campo elétrico, uma vez que a representação de sua ponta não é mais um cilindro, mas sim um cone. Os vetores de maior magnitude (representados por setas em verde e amarelo), provavelmente, são decorrentes da variação abrupta presente na representação geométrica da ponta da haste.

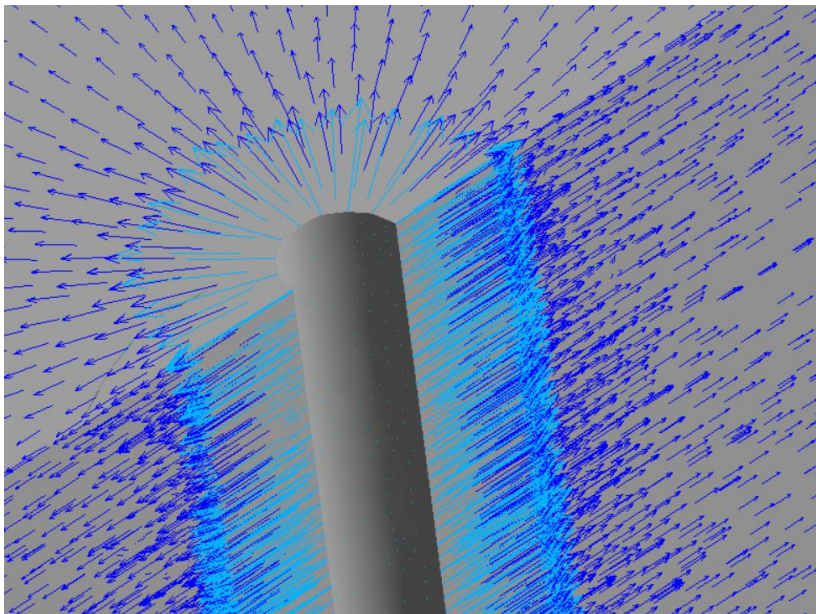


Figura 10 – Simulação computacional do campo elétrico ao redor da haste de aterramento resultante da aplicação de um potencial escalar elétrico constante.

Apesar de a situação representada pela Figura 9 fornecer informações para o caso onde não há variação no potencial escalar elétrico ao longo do tempo, ela pode ser utilizada como referência para os casos onde há uma variação de baixa frequência dos potenciais. Entretanto, é necessário avaliar se a frequência aplicada não irá resultar em outros efeitos, por exemplo, o efeito pelicular e a presença de um valor significativo de reatância indutiva ao longo da haste de aterramento.

Considerando que a haste de aterramento está inserida em um cilindro com diâmetro de 4 metros, que representa o solo ao seu redor, é possível verificar uma diferença de potencial da ordem de 62 volts entre a haste de aterramento e a superfície externa lateral do cilindro que representa o solo. Esta diferença é proporcional ao potencial escalar elétrico imposto à haste, que para o exemplo, foi de 100 volts. Para

potenciais maiores, por exemplo, uma falta à terra, onde é aplicada a tensão de fase nos eletrodos de aterramento, esta diferença seria ainda maior. Tal diferença de potencial é aplicada diretamente na superfície do solo, expondo quem estiver nas proximidades do eletrodo de aterramento a tensões de passo e de toque. Desta forma, esta distribuição de potencial ao longo da superfície do solo pode proporcionar situações de risco às pessoas.

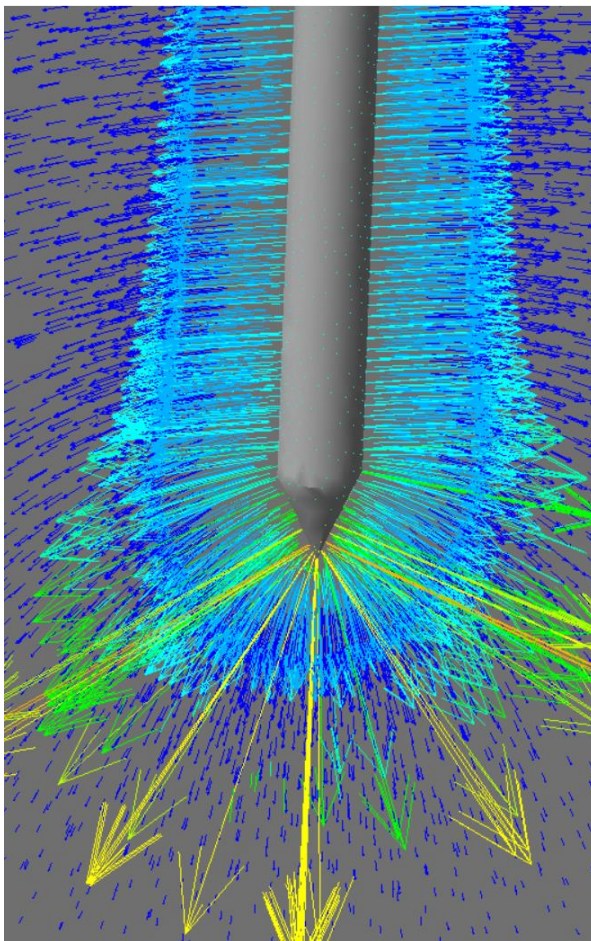


Figura 11 – Simulação computacional do campo elétrico ao redor da ponta da haste de aterramento resultante da aplicação de um potencial escalar elétrico constante.

Uma forma de diminuir a tensão na superfície do solo é inserindo a haste em uma porção mais profunda do solo, ou mediante a colocação de uma camada de brita sobre o solo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011). Além de proporcionar níveis menores de tensão ao longo da superfície do solo, a colocação da haste de aterramento em um nível inferior ao do solo proporciona a proteção mecânica dos componentes, uma vez que eles permanecem fora de alcance e, a depender da solução adotada, protegidos, por exemplo, por um tubo de concreto com tampa.

O perfil da distribuição do potencial escalar elétrico para a situação em que o eletrodo de aterramento é cravado em um nível 50 centímetros abaixo do solo é apresentado na Figura 12. Para este caso, a diferença de potencial na superfície do solo acessível às pessoas é da ordem de 9 volts, muito inferior ao caso sem este desnível, que era da ordem de 62 volts.

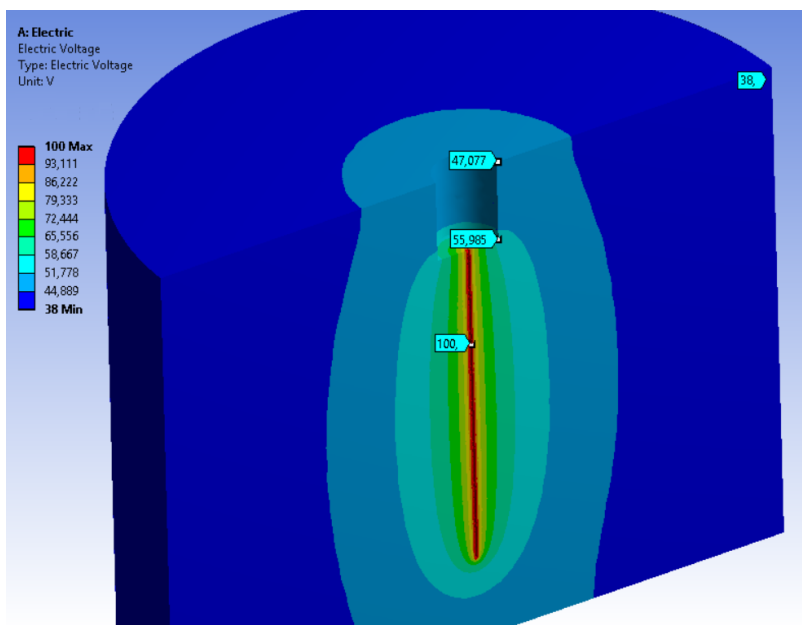


Figura 12 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de uma haste de aterramento cravada em um nível inferior ao do solo.

Apesar das vantagens proporcionadas por este desnível, ele também pode vir a ser um local para o acúmulo de água. Por este motivo, é necessária a adoção de uma estratégia para a drenagem da água que

venha a ficar acumulada, por exemplo, o preenchimento do buraco com brita ou através da preparação do solo para a drenagem.

4.3.2 O comportamento do agrupamento de hastes de aterramento

O agrupamento de hastes de aterramento é uma alternativa a ser considerada na elaboração do projeto de aterramento elétrico de uma edificação, uma vez que hastes individuais de aterramento podem não ser capazes de prover as características desejadas ao aterramento, como o valor da impedância de aterramento ou a equipotencialização ao longo da edificação.

Assim, para que o aterramento elétrico possa desempenhar suas funções satisfatoriamente, é necessária a adoção de agrupamentos de hastes de aterramento. Apesar de ser composto por um conjunto de hastes, o agrupamento apresenta características distintas daquelas observadas em hastes individuais, principalmente o comportamento de campos elétricos e de distribuição do potencial escalar elétrico nas imediações do eletrodo de aterramento.

Esta variação observada é um fenômeno natural, pois, as interferências entre hastes agem como uma forma de bloqueio do fluxo de corrente elétrica (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011), uma vez que a distribuição do potencial escalar elétrico e do respectivo campo elétrico não é uniforme ao redor dos eletrodos de aterramento, conforme a simulação para hastes individuais. Assim, ao contrário de uma associação de resistores ideais, a associação de hastes de aterramento não é algo exato, pois, as interferências entre elas irão afetar o comportamento do conjunto formado. Para Kindermann e Campagnolo (2011), esta interferência seria reduzida com o aumento da distância entre eletrodos, entretanto, tais distâncias inviabilizariam a execução do projeto.

Dois arranjos elementares para o agrupamento de hastes de aterramento podem ser obtidos por meio da colocação de eletrodos nos vértices de um quadrado ou de um triângulo equilátero, sendo que tais disposições podem ser expandidas com a combinação dos arranjos elementares. A escolha dos arranjos foi feita pelo fato de as hastes adjacentes permanecerem a uma mesma distância entre si, sendo esta distância, para efeito das simulações computacionais, o próprio comprimento das hastes (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

A fim de representar graficamente a distribuição de potencial escalar elétrico ao redor dos arranjos de eletrodos, foram elaboradas duas simulações: uma representa a associação de eletrodos de aterramento nos vértices de um triângulo equilátero, que por simetria, forma um hexágono

(7 hastes distribuídas); e outra que representa a associação de eletrodos de aterramento nos vértices de um quadrado, que por simetria, forma um quadrado maior (9 hastes distribuídas).

Para a simulação computacional, foi adotado o mesmo padrão de hastes de aterramento utilizadas para apresentar o comportamento de hastes individuais, envoltas por um cilindro preenchido com um material de resistividade elétrica de $1000 \Omega \cdot m$. Os valores de contorno utilizados foram os mesmos daqueles utilizados para o caso com uma haste: 100 volts aplicados nos eletrodos e 38 V aplicados na superfície lateral do cilindro que representa o solo, a uma distância de 2 metros da haste mais distante do eletrodo central do conjunto. Para a simulação, não há conexão entre as hastes, ou seja, os potenciais são impostos individualmente e diretamente nas hastes, por meio dos valores de contorno.

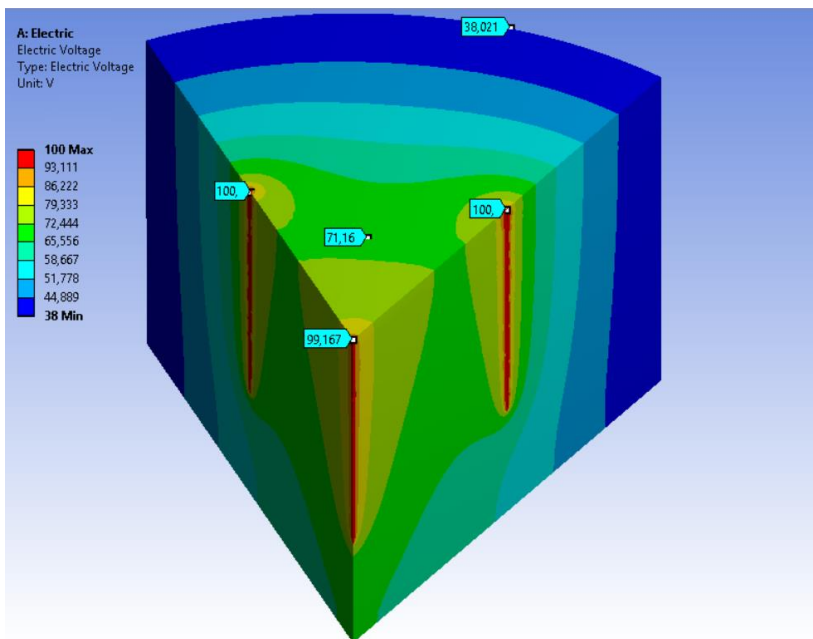


Figura 13 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de um conjunto de hastes de aterramento dispostas nos vértices de um triângulo equilátero.

A representação gráfica do potencial escalar elétrico ao redor de eletrodos de aterramento dispostos nos vértices de triângulos equiláteros, formando um hexágono, é apresentada na Figura 13. O agrupamento de

hastes de aterramento em formato de triângulos equiláteros proporciona uma distribuição de potencial mais homogênea e suave na superfície interior, fato que não era observado no caso das hastes de aterramento individuais. Desta forma, é possível obter uma superfície com gradiente de potencial escalar elétrico menor na área compreendida entre as hastes de aterramento, quando comparada à área externa a elas.

A representação gráfica do potencial escalar elétrico ao redor de eletrodos de aterramento dispostos nos vértices de quadrados, formando um quadrado maior, é apresentada na Figura 14. O agrupamento de hastes de aterramento nos vértices de quadrados proporciona uma distribuição de potencial mais homogênea e suave na superfície interior, fato que não era observado no caso das hastes de aterramento individuais. Desta forma, é possível obter uma superfície com gradiente de potencial escalar elétrico menor na área compreendida entre as hastes de aterramento, quando compara à área externa a elas.

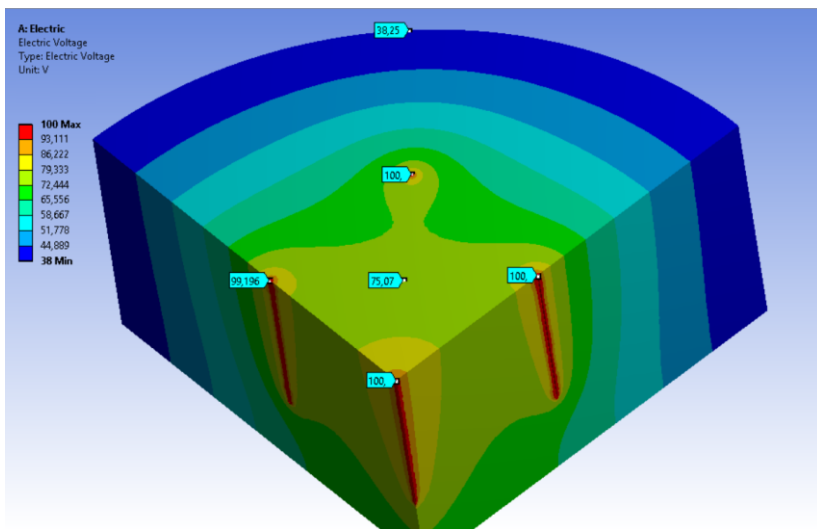


Figura 14 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico ao redor de um conjunto de hastes de aterramento dispostas nos vértices de um triângulo equilátero.

Para efeitos de comparação entre os arranjos, o arranjo de hastes de aterramento triangular proporciona uma maior densidade de eletrodos por unidade de área, pois, para um afastamento de 2 metros entre hastes, é possível obter uma relação de 1 haste para cada 3,46 metros quadrados,

enquanto no arranjo quadrangular, a relação é de 1 haste para cada 4 metros quadrados.

Além da maior densidade hastes por área proporcionada pelo arranjo triangular, este arranjo permite que as hastes também sejam conectadas diretamente a outras 6 hastes, enquanto que no arranjo quadrangular, as hastes podem ser conectadas diretamente a somente outras 4 hastes.

Tais características proporcionam melhor desempenho para o arranjo em formato de triângulo equilátero, pois um número maior de hastes é inserido em uma mesma área, quando comparado ao arranjo em formato de quadrado, o que pode favorecer a diminuição do valor da impedância de aterramento, quando comparado ao arranjo quadrangular. Além disso, são proporcionados também mais caminhos alternativos à passagem de corrente elétrica, uma vez que há mais conexões entre hastes, o que pode diminuir o valor da impedância entre dois pontos distintos do aterramento elétrico, quando comparado ao arranjo quadrangular.

5 ATERRAMENTO ELÉTRICO EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Ao contrário do caso em que não há variação, ou quando existente, ela ocorre de forma suave, as variações de alta frequência das grandezas eletromagnéticas dão origem a outros fenômenos. Tais fenômenos estão relacionados às componentes das equações de Maxwell que não são levadas em consideração nas situações de baixas frequências. As simplificações adotadas são consistentes para a representação em baixas frequências, porém, não são adequadas para as variações de alta frequência (ALIPIO; VISACRO, 2014b).

Assim, destacam-se os comportamentos reativos dos campos eletromagnéticos de alta frequência. Por exemplo, um fenômeno deste comportamento é o efeito pelicular, que está relacionado à capacidade de penetração de campos eletromagnéticos em meios condutores. Este efeito é observado de forma menos intensa nas condições de baixas frequências, desta forma, campos com esta característica penetram com mais facilidade em meios condutores, sem que haja uma atenuação significativa de sua amplitude.

Além do efeito pelicular, outro fenômeno observado nos casos de altas frequências são as interferências eletromagnéticas. Tais interferências podem dar origem a falhas em equipamentos suscetíveis, por exemplo, degradação no desempenho, distorções, atrasos ou falsos resultados, por meio de variações em seus parâmetros de alimentação, por exemplo, alterações na amplitude da tensão ou distorções na forma de onda (ARMSTRONG, 2014).

O aterramento elétrico tem então, para as altas frequências, uma interação afetada justamente por este tipo de excitação, o que requer, da mesma forma como feito para o aterramento elétrico em baixas frequências, a verificação do comportamento das grandezas eletromagnéticas para eletrodos de aterramento em situações ideais, a fim de fornecer informações ao responsável pelo projeto.

5.1 ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

Para que haja problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética nas instalações elétricas, é necessária a existência simultânea de três fatores: a fonte de interferências eletromagnéticas; a vítima suscetível a tais interferências; e, por fim, o caminho pelo qual se dá o acoplamento de tais interferências. A ausência de um dos fatores mencionados inviabilizaria a existência de problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética.

Analisando este conjunto de fatores, chega-se à conclusão de que o responsável pelo projeto do aterramento elétrico dispõe somente de uma alternativa a fim de garantir o correto funcionamento das instalações e dos equipamentos elétricos, sejam eles utilizados ou não na prestação da assistência à saúde: interferir no acoplamento entre a fonte de interferências eletromagnéticas e a vítima suscetível a tais interferências. A existência desta única alternativa advém do fato de que nem sempre é possível restringir a escolha de equipamentos, ainda mais em um estabelecimento assistencial de saúde, onde coexistem equipamentos que geram interferências eletromagnéticas, por exemplo, os bisturis elétricos, que têm seu princípio de funcionamento baseado na geração e manutenção de arcos elétricos, e aqueles aparelhos que são suscetíveis às interferências eletromagnéticas, por exemplo, os monitores multiparamétricos, que são sensibilizados por sinais biológicos da ordem de milésimos de volts.

Existindo esta impossibilidade na escolha dos equipamentos que são conectados às instalações elétricas da edificação, no caso dos estabelecimentos assistenciais de saúde, resta ao responsável pelo gerenciamento das tecnologias em saúde, em conjunto com os demais responsáveis pelo projeto arquitetônico e de instalações elétricas, a alocação dos ambientes e dos equipamentos elétricos na edificação, além de proporcionar as condições adequadas para a alimentação de tais equipamentos. Desta forma, seria possível antecipar os problemas que podem estar presentes na edificação a ser construída, reformada ou ampliada, e mitigá-los, seja por meio da separação física dos equipamentos, por meio da segregação dos circuitos de alimentação ou por meio da adoção de um aterramento elétrico complementar eficaz para o propósito da edificação, que de acordo com a Resolução de Diretoria Colegiada nº 50, de 21 de fevereiro de 2002, é “[...] a prestação de assistência à saúde à população, que demande acesso ou não de pacientes, em regime de internação ou não, qualquer que seja seu nível de complexidade”.

Assim sendo, o aterramento elétrico das instalações deve atuar de forma coordenada com os demais componentes da edificação, a fim de evitar ou minimizar os efeitos do acoplamento entre a fonte e a vítima de interferências eletromagnéticas. Por este motivo, o projeto deve considerar as características do meio no qual está inserido e os desafios aos quais ele estará sujeito.

A fim de verificar os casos em que o aterramento elétrico pode influenciar de forma positiva na redução deste acoplamento, é necessário listar os seus possíveis modos. No que se refere ao aterramento elétrico e

o acoplamento conduzido através dos condutores de alimentação, observam-se os modos comum e diferencial (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000).

5.1.1 O modo diferencial conduzido

O modo diferencial de acoplamento entre a fonte e a vítima é constituído por interferências eletromagnéticas presentes entre os condutores de alimentação de forma diferencial, ou seja, um dos condutores de alimentação permite a entrada das interferências no equipamento, enquanto o outro permite a sua saída (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000). Pela característica deste modo de acoplamento, as interferências percorrem um dos condutores de alimentação, interagem com os circuitos internos do equipamento elétrico e são conduzidas pelo outro condutor.

Dada a forma de propagação das interferências, é possível diminuir a intensidade deste modo de acoplamento através da existência de um caminho de baixa impedância entre os condutores de alimentação, proporcionando assim um caminho alternativo às interferências eletromagnéticas (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000). A título de exemplo, é possível instalar filtros adequados entre os condutores de alimentação, ou entre eles e o aterramento, para que as interferências eletromagnéticas conduzidas sejam desviadas e não interajam com o equipamento. Assim, seria possível mitigar a amplitude das interferências eletromagnéticas impostas ao equipamento por meio da inserção de filtros em seu arranjo, que seriam devidamente sintonizados para as frequências que possam vir a trazer problemas ao desempenho dos equipamentos elétricos.

5.1.2 O modo comum conduzido

O modo comum de acoplamento entre a fonte e a vítima é constituído por interferências entre os condutores de alimentação e um ponto comum a eles (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000), e não mais entre os próprios condutores de alimentação como ocorre no modo diferencial. Este ponto pode ser caracterizado como um elemento comum aos condutores de alimentação, por exemplo, o condutor de proteção conectado ao aterramento elétrico.

O modo comum de acoplamento apresenta uma dificuldade para o seu tratamento e mitigação: a possibilidade de ser constituído por elementos diversos da edificação, por exemplo, as estruturas metálicas ou

o próprio aterramento elétrico. No caso dos exemplos mencionados, durante a ocorrência de uma descarga atmosférica, haveria uma perturbação nos condutores metálicos que seria conduzida por modo comum aos demais elementos da edificação, incluindo as instalações elétricas e os equipamentos a elas conectados.

Assim, para Williams e Armstrong (2000) a dificuldade no tratamento das interferências eletromagnéticas de modo comum advém da: dificuldade em prever as possíveis causas e seus efeitos; a variabilidade das interferências; e a possibilidade de afetar uma série de equipamentos que, a princípio, não possuem uma relação entre si. Desta forma, este modo de acoplamento é de difícil diagnóstico e solução, uma vez que a causa dos problemas de compatibilidade eletromagnética nem sempre é clara, além de os efeitos ocorrerem de forma imprevisível e aleatória.

5.1.3 O aterramento elétrico e os modos conduzidos de acoplamento

Entre as finalidades do aterramento elétrico, duas delas se destacam no controle dos modos de acoplamento de interferências eletromagnéticas: a equipotencialização e a existência de um caminho de baixa impedância para as correntes de retorno. Ambas as finalidades estão intimamente relacionadas por meio da redução das diferenças de potencial elétrico ao longo da edificação.

Sendo o aterramento elétrico constituído pelos condutores de conexão, os eletrodos de aterramento e o solo, ambas as finalidades estão relacionadas de forma mais direta aos condutores de conexão. Tais condutores são responsáveis por proporcionar a conexão entre aquilo que se pretende aterrar e o solo (onde as correntes elétricas poderão escoar), além de estabelecer a conexão entre os eletrodos de aterramento ao longo da edificação.

Assim, é função de tais condutores de conexão a equipotencialização dos diferentes elementos metálicos da edificação, uma vez que o potencial de referência das instalações elétricas será o potencial de tais condutores. Além disso, eles proporcionam um caminho de retorno para as correntes elétricas à sua fonte. Já os eletrodos de aterramento proporcionarão o escoamento das cargas elétricas ao solo, sejam elas cargas estáticas ou dinâmicas.

Desta forma, quanto melhor for o caminho para o retorno das correntes elétricas à sua origem, que é obtido através da associação dos eletrodos de aterramento envoltos pelo solo, menor será o valor da impedância para as interferências eletromagnéticas, o que resulta em

menores densidades de corrente elétrica e, por consequência, menores valores de diferenças de potencial na edificação, em especial em seu aterramento elétrico, garantindo assim a equipotencialização. Pelos motivos apresentados, o aterramento elétrico por meio de seus componentes é capaz de atenuar as consequências advindas do modo comum de acoplamento de interferências eletromagnéticas. O aterramento elétrico proporciona uma condição na qual as diferenças de potencial ao longo da edificação são reduzidas, uma vez que há um controle no fluxo das interferências elétricas de modo comum (WILLIAMS; ARMSTRONG, 2000).

Em se tratando do acoplamento de modo diferencial, o aterramento novamente proporciona, por meio de seus componentes, um caminho de baixa impedância que pode ser utilizado para o retorno das correntes de interferência à sua fonte. Entretanto, o aterramento elétrico deixa de exercer esta função nos casos em que a impedância para o desvio das interferências eletromagnéticas é alocada entre os condutores de alimentação, uma vez que o retorno de corrente se daria pelos próprios condutores e não mais pelo aterramento.

5.2 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL

Para a situação em que a variação dos campos eletromagnéticos seja considerada, as equações de Maxwell, que descrevem o comportamento de tais campos, são representadas pelas Equações (15), (16), (17) e (18).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_V \quad (18)$$

A solução do problema requer a utilização do potencial vetor magnético que possui a relação com o vetor indução magnética expressa pela Equação (19).

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (19)$$

Substituindo a relação entre o potencial vetor magnético e o vetor indução magnética na equação de Maxwell representada pela Equação (17), e também considerando a independência entre a variação espacial e a variação temporal de um campo vetorial, obtém-se a Equação (20).

$$\nabla \times \vec{E} = -\nabla \times \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (20)$$

Considerando a propriedade do cálculo vetorial que estabelece um valor nulo ao rotacional do gradiente de um potencial escalar, pode-se utilizar o potencial escalar elétrico para estabelecer uma relação entre o campo elétrico, a variação temporal do potencial vetor magnético e o potencial escalar elétrico, representada pela Equação (21).

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (21)$$

Substituindo a Equação (21) na Equação (15), e considerando que o meio em questão é isotrópico, homogêneo e linear, obtém-se a Equação (22).

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \vec{B} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} \quad (22)$$

Considerando, mais uma vez, a independência entre a variação temporal e a variação espacial dos campos vetoriais, e substituindo a Equação (19) e a Equação (21) na Equação (22), obtém-se a relação expressa pela Equação (23).

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \vec{A} = \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (23)$$

Desenvolvendo a Equação (23), obtém-se a Equação (24).

$$\nabla \cdot \left(\nabla \cdot \vec{A} + \mu \sigma V + \mu \varepsilon \frac{\partial V}{\partial t} \right) = \left(\nabla^2 \vec{A} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} \right) \quad (24)$$

Considerando que o meio em questão é eletricamente neutro, é possível afirmar que o divergente do vetor indução elétrica é nulo. Assim, a substituição da Equação (21) na Equação (18) tem como resultado a Equação (25).

$$\nabla \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla^2 V \quad (25)$$

A partir deste ponto, considera-se que os potenciais e os campos eletromagnéticos variam de forma harmônica (com frequência angular ω), permitindo assim a adoção de grandezas fasoriais (denotadas pelo índice S), que permitem a solução do problema no domínio da frequência. Substituindo a Equação (25) na Equação (24), obtém-se como resultado a Equação (26).

$$\frac{-1}{j\omega} \nabla(\nabla^2 V_s - j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)V_s) = \nabla^2 \vec{A}_s - j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{A}_s \quad (26)$$

Considera-se como a constante de propagação do meio a expressão da Equação (27).

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (27)$$

Desta forma, a substituição da Equação (27) na Equação (26) resulta na Equação (28).

$$\frac{-1}{j\omega} \nabla(\nabla^2 V_s - \gamma^2 V_s) = \nabla^2 \vec{A}_s - \gamma^2 \vec{A}_s \quad (28)$$

A fim de encontrar a solução para a Equação (28), é necessário satisfazer simultaneamente a Equação (29) e a Equação (30), que descrevem o comportamento do potencial escalar elétrico e do potencial vetor magnético, respectivamente.

$$\nabla^2 V_s - \gamma^2 V_s = 0 \quad (29)$$

$$\nabla^2 \vec{A}_s - \gamma^2 \vec{A}_s = 0 \quad (30)$$

O processo para a definição da Equação (29) e a Equação (30) foi proposto por Sunde (1968), sendo elas as equações de onda em um

meio homogêneo. A partir das relações, descritas pela Equação (19) e pela Equação (21), entre o potencial escalar elétrico e o potencial vetor magnético, é possível definir o comportamento dos campos elétrico e magnético.

5.2.1 Solução em coordenadas cilíndricas

Para a solução da equação do potencial escalar elétrico, expressa pela Equação (29), em coordenadas cilíndricas, para a qual se considera como eletrodo de aterramento um cilindro metálico semi-infinito com um determinado raio (ρ_0), imerso em um meio de resistividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade elétrica constantes, e sob a influência de um potencial escalar elétrico harmonicamente variável (com frequência angular ω), conforme a Figura 5. Na representação é possível verificar a distribuição radial em coordenadas cilíndricas do campo elétrico ao redor do eletrodo de aterramento escolhido. Neste caso, onde há a variação dos campos eletromagnéticos em relação ao tempo, a variação temporal do potencial vetor magnético e o gradiente do potencial escalar elétrico também são distribuídas de forma a existir somente uma componente resultante – o campo elétrico – com direção radial.

Adotando as coordenadas cilíndricas para a solução da equação que descreve o comportamento do potencial escalar elétrico da situação em questão, obtém-se a Equação (31).

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial V_s}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 V_s}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V_s}{\partial z^2} = \gamma^2 V_s \quad (31)$$

Para a simplificação do problema, considera-se que a única variação do potencial escalar elétrico ocorra em função da distância em relação ao centro do eletrodo, o que resulta na Equação (32).

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dV_s}{d\rho} \right) = \gamma^2 V_s \quad (32)$$

A equação diferencial que representa a distribuição do potencial escalar elétrico em função da distância em relação ao centro do eletrodo de aterramento é expressa pela Equação (33).

$$\rho^2 \frac{d^2 V_s}{d\rho^2} + \rho \frac{dV_s}{d\rho} - \rho^2 \gamma^2 V_s = 0 \quad (33)$$

Adotando a substituição de variáveis expressa pela Equação (34), e substituindo-a na Equação (33), obtém-se como resultado a Equação (35). A partir da substituição de variáveis, o potencial escalar elétrico não é somente uma função da distância em relação ao centro do eletrodo, mas também das propriedades eletromagnéticas do solo e da frequência de excitação.

$$r = \gamma\rho \quad (34)$$

$$r^2 \frac{d^2 V_s}{dr^2} + r \frac{dV_s}{dr} - (r^2 + 0^2)V_s = 0 \quad (35)$$

De acordo com Abramowitz e Stegun (1964), a equação diferencial representada pela Equação (36) possui como solução as funções modificadas de Bessel, representadas pela Equação (37) e pela Equação (38).

$$z^2 \frac{d^2 w}{dz^2} + z \frac{dw}{dz} - (z^2 + \nu^2)w = 0 \quad (36)$$

$$I_\nu(z) = \left(\frac{1}{2}z\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{4}z^2\right)^k}{k! \Gamma(\nu + k + 1)} \quad (37)$$

$$K_\nu(z) = \left(\frac{1}{2}\pi\right) \frac{I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)}{\text{sen}(\nu\pi)} \quad (38)$$

As funções modificadas de Bessel possuem representação gráfica apresentada pela Figura 15. A representação gráfica da Equação (37) e da Equação (38), representada na Figura 15, foi feita no Matlab®.

Comparando a Equação (35) com a Equação (36), conclui-se que a solução para o potencial escalar elétrico é representada por uma combinação linear das funções modificadas de Bessel, resultando na Equação (39).

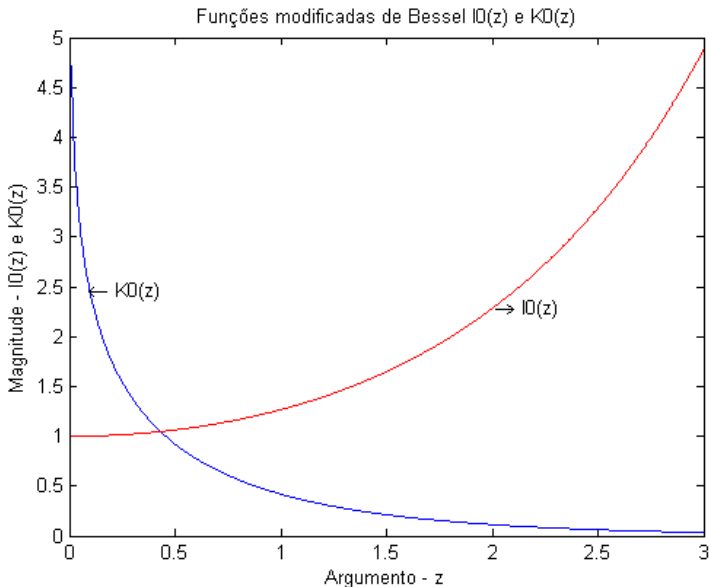


Figura 15 – Representação gráfica das funções modificadas de Bessel de ordem 0.

$$V_s(r) = a_0 I_0(r) + a_1 K_0(r) \quad (39)$$

Comparando as representações gráficas das funções modificadas de Bessel com o comportamento esperado do potencial escalar elétrico, que tem valor nulo no infinito, é possível afirmar que uma das funções modificadas de Bessel, aquela que cresce indefinidamente, não é adequada para a representação. Assim, a constante relacionada a esta função modificada de Bessel deve ser nula.

A fim de definir uma solução única para o potencial escalar elétrico, uma vez que a Equação (39) apresenta como solução uma família de resultados, é necessário aplicar as condições de contorno para a equação: uma diz respeito ao potencial escalar elétrico aplicado na superfície externa do eletrodo, delimitada por seu raio, e outra diz respeito ao potencial escalar elétrico no infinito. A Equação (39) pode ser representada de forma específica pela Equação (40).

$$V_s(r) = \frac{V_0}{K_0(\gamma\rho_0)} K_0(r), r \geq \gamma\rho_0 \quad (40)$$

Por fim, a representação gráfica do potencial escalar elétrico para uma situação em que é imposto um potencial senoidal com amplitude de 100 V e frequência de 60 Hz, 600 Hz e 6 kHz em um eletrodo de aterramento cilíndrico semi-infinito de raio igual a 1 centímetro, cravado em um solo com permeabilidade magnética relativa unitária, permissividade elétrica relativa igual a 4 e resistividade elétrica igual a $1000 \Omega \cdot m$ é apresentada na Figura 16. A simulação computacional da Equação (40), representada na Figura 16, foi feita no Matlab®.

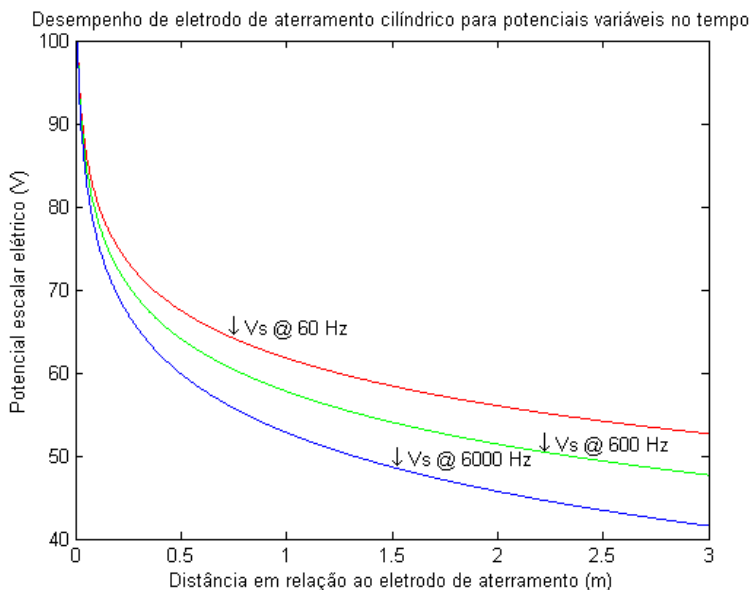


Figura 16 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo cilíndrico semi-infinito.

Para o caso em questão, percebe-se que a atenuação do valor do potencial escalar elétrico em função da distância ao eletrodo de aterramento também é uma função relacionada às propriedades eletromagnéticas do solo e a frequência de excitação, o que difere do caso em que o potencial escalar elétrico é mantido constante. Percebe-se, através da análise da Figura 17, que a maior porção relativa do gradiente do potencial escalar elétrico está confinada em até um metro em relação ao centro do eletrodo de aterramento. Desta forma, espera-se que as interferências – entre hastes separadas entre si – geradas por este gradiente não sejam significativas quando os eletrodos estiverem adequadamente

afastados. A simulação computacional do gradiente do potencial escalar elétrico, representada na Figura 17, foi feita no Matlab®.

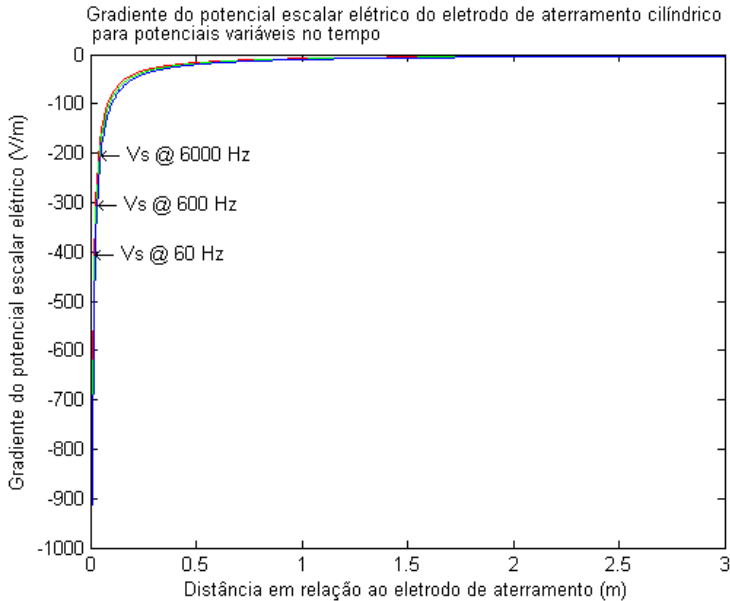


Figura 17 – Simulação computacional da distribuição do gradiente do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo cilíndrico semi-infinito.

5.2.2 Solução em coordenadas esféricas

Para a solução da equação do potencial escalar elétrico, expressa pela Equação (29), em coordenadas esféricas, para a qual se considera como eletrodo de aterramento uma semiesfera metálica com um determinado raio (r_0), imersa em um meio de resistividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade elétrica constantes, e sob a influência de um potencial escalar elétrico harmonicamente variável (com frequência angular ω), conforme a Figura 7. Na representação é possível verificar a distribuição radial em coordenadas esféricas do campo elétrico ao redor do eletrodo de aterramento escolhido. Neste caso, onde há a variação dos campos eletromagnéticos em relação ao tempo, a variação temporal do potencial vetor magnético e o gradiente do potencial elétrico também são distribuídas de forma a existir somente uma componente resultante – o campo elétrico – com direção radial.

Adotando as coordenadas esféricas para a solução da equação que descreve o comportamento do potencial escalar elétrico da situação em questão, obtém-se a Equação (41).

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V_s}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\text{sen}\theta \frac{\partial V_s}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial^2 V_s}{\partial \phi^2} = \gamma^2 V_s \quad (41)$$

Para a simplificação do problema, considera-se que a única variação do potencial escalar elétrico ocorra em função da distância em relação ao centro do eletrodo, o que resulta na Equação (42).

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV_s}{dr} \right) = \gamma^2 V_s \quad (42)$$

A equação diferencial que representa a distribuição do potencial escalar elétrico em função da distância em relação ao centro do eletrodo de aterramento elétrico é expressa pela Equação (43).

$$r^2 \frac{d^2 V_s}{dr^2} + 2r \frac{dV_s}{dr} - r^2 \gamma^2 V_s = 0 \quad (43)$$

Adotando a substituição de variáveis expressa pela Equação (44), e substituindo-a na Equação (43), obtém-se como resultado a Equação (45). A partir da substituição de variáveis, o potencial escalar elétrico não é somente uma função da distância em relação ao centro do eletrodo, mas também das propriedades eletromagnéticas do solo e da frequência de excitação.

$$r' = \gamma r \quad (44)$$

$$r'^2 \frac{d^2 V_s}{dr'^2} + 2r' \frac{dV_s}{dr'} - (r'^2 + 0(0 + 1)^2) V_s = 0 \quad (45)$$

De acordo com Abramowitz e Stegun (1964), a equação diferencial representada pela Equação (46) possui como solução as funções esféricas modificadas de Bessel, representadas pela Equação (47), pela Equação (48), e pela Equação (49).

$$z^2 \frac{d^2 w}{dz^2} + 2z \frac{dw}{dz} - (z^2 + n(n+1)^2)w = 0 \quad (46)$$

$$i_n^{(1)}(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} I_{n+\frac{1}{2}}(z) \quad (47)$$

$$i_n^{(2)}(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} I_{-n-\frac{1}{2}}(z) \quad (48)$$

$$k_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} K_{n+\frac{1}{2}}(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} K_{-n-\frac{1}{2}}(z) \quad (49)$$

As funções esféricas modificadas de Bessel possuem representação gráfica apresentada pela Figura 18. A representação gráfica da Equação (47), da Equação (48) e da Equação (49), representada na Figura 18, foi feita no Matlab®.

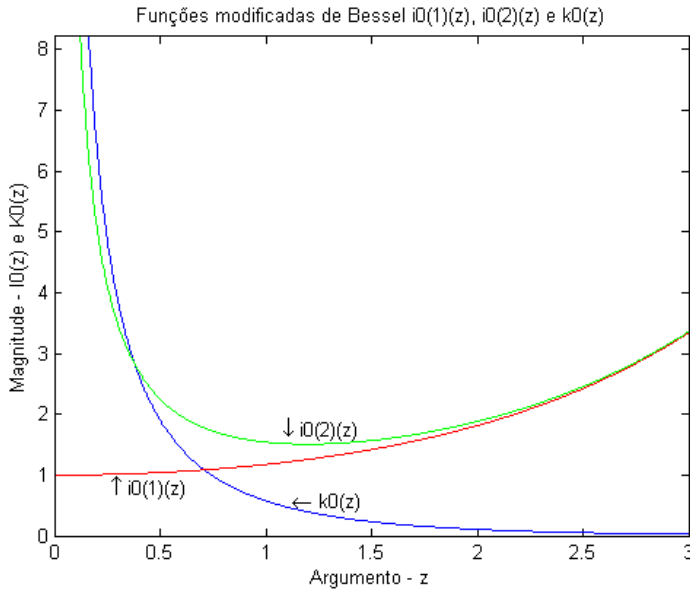


Figura 18 – Representação gráfica das funções esféricas modificadas de Bessel de ordem 0.

Comparando a Equação (45) com a Equação (46), conclui-se que a solução para o potencial escalar elétrico é representada por uma combinação linear das funções esféricas modificadas de Bessel, resultando na Equação (50).

$$V_s(r') = a_0 i_0^{(1)}(r') + a_1 i_0^{(2)}(r') + a_2 k_0(r') \quad (50)$$

Comparando as representações gráficas das funções esféricas modificadas de Bessel com o comportamento esperado do potencial escalar elétrico, que tem valor nulo no infinito, é possível afirmar que duas das funções esféricas modificadas de Bessel, aquelas que crescem indefinidamente, não são adequadas para a representação. Assim, as constantes relacionadas a essas funções esféricas modificadas de Bessel devem ser nulas.

A fim de definir uma solução única para o potencial escalar elétrico, uma vez que a Equação (50) apresenta como solução uma família de resultados, é necessário aplicar as condições de contorno para a equação: uma diz respeito ao potencial escalar elétrico aplicado na superfície externa do eletrodo, delimitada por seu raio, e outra diz respeito ao potencial escalar elétrico no infinito. A Equação (50) pode ser representada de forma específica pela Equação (51).

$$V_s(r') = \frac{V_0}{k_0(\gamma r_0)} k_0(r'), r' \geq \gamma \rho_0 \quad (51)$$

Por fim, a representação gráfica do potencial escalar elétrico para uma situação em que é imposto um potencial senoidal com amplitude de 100 V e frequência de 60Hz, 600 Hz e 6 kHz em um eletrodo de aterramento semiesférico de raio igual a 1 centímetro, cravado em um solo com permeabilidade magnética relativa unitária, permissividade elétrica relativa igual a 4 e resistividade elétrica igual a 1000 $\Omega \cdot m$ é apresentada na Figura 19. A simulação computacional da Equação (51), representada na Figura 19, foi feita no Matlab®.

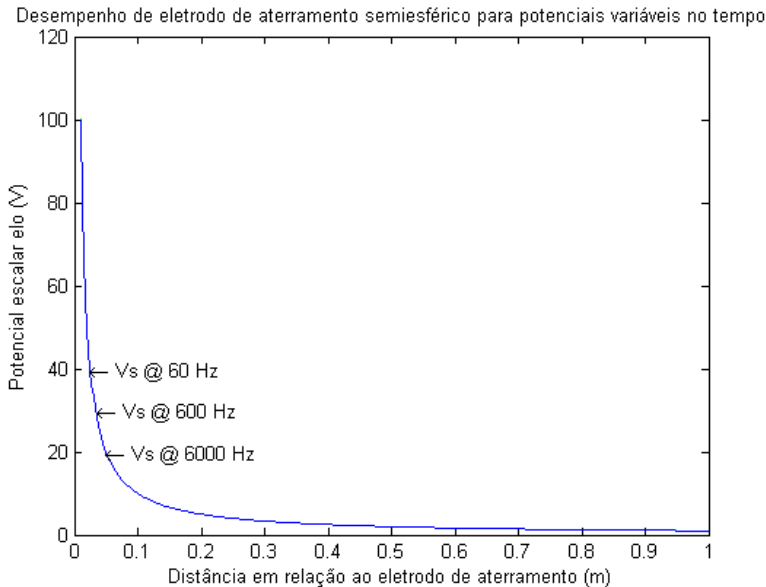


Figura 19 – Simulação computacional da distribuição do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo semiesférico.

Para o caso em questão, percebe-se que a atenuação do valor do potencial escalar elétrico em função da distância ao eletrodo de aterramento também é uma função relacionada às propriedades eletromagnéticas do solo e a frequência de excitação, o que difere do caso em que o potencial escalar elétrico é mantido constante. Entretanto, as variações em relação às diferentes frequências aplicadas na excitação do eletrodo de aterramento pouco diferem umas das outras, o que é evidenciado pela sobreposição das linhas na representação gráfica da Figura 19. Percebe-se, através da análise da Figura 20, que a maior porção relativa ao gradiente do potencial escalar elétrico está confinada em até 20 centímetros em relação ao centro do eletrodo de aterramento. A simulação computacional do gradiente do potencial escalar elétrico, representada na Figura 20, foi feita no Matlab®. Desta forma, espera-se que as interferências – entre hastes separadas entre si – geradas por este gradiente não sejam significativas quando os eletrodos estiverem adequadamente afastados.

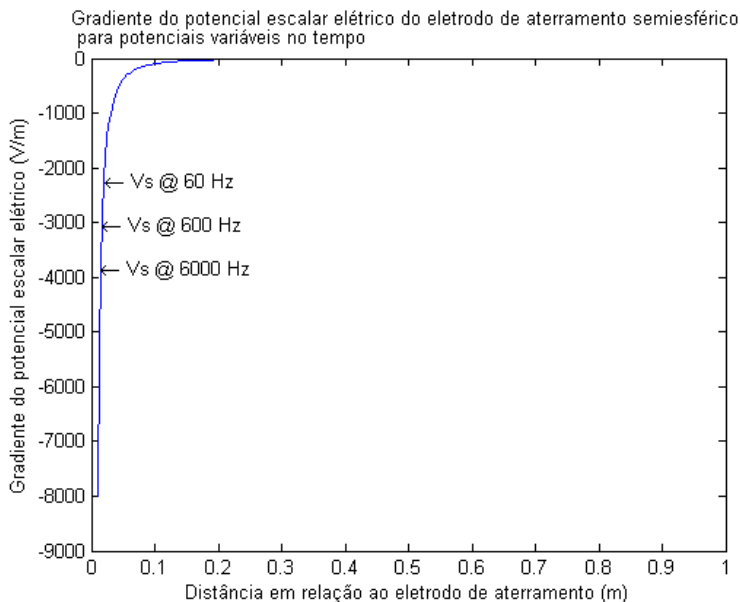


Figura 20 – Simulação computacional da distribuição do gradiente do potencial escalar elétrico harmonicamente variável ao redor de um eletrodo semiesférico.

5.3 A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO

Uma vez que a constante de propagação, expressa pela Equação (27), é uma função dos parâmetros do solo e da frequência de excitação, há uma dependência do comportamento dos eletrodos de aterramento em relação às grandezas mencionadas. Por consequência desta dependência, há uma necessidade de adequação do aterramento elétrico ao local e às condições a que ele será submetido.

Da mesma forma como observado na Figura 16, onde houve somente a variação da frequência de excitação do potencial escalar elétrico, a variação dos parâmetros do solo também resulta em comportamentos semelhantes (ALIPIO; VISACRO, 2014b). Tal variação nos parâmetros do solo pode ser verificada com o aumento da frequência de excitação nos eletrodos de aterramento, que resulta em uma redução no valor da impedância do solo, diminuindo assim a elevação do potencial escalar elétrico nos arredores do eletrodo para um mesmo valor de corrente, quando comparado à mesma situação em baixa frequência (CAVKA; MORA; RACHIDI, 2014).

A redução da condutividade elétrica e da permissividade elétrica irá influenciar na constante de propagação indicada pela Equação (27), fazendo com que a maior parcela da variação das grandezas eletromagnéticas esteja confinada em uma parcela do solo mais próxima do eletrodo.

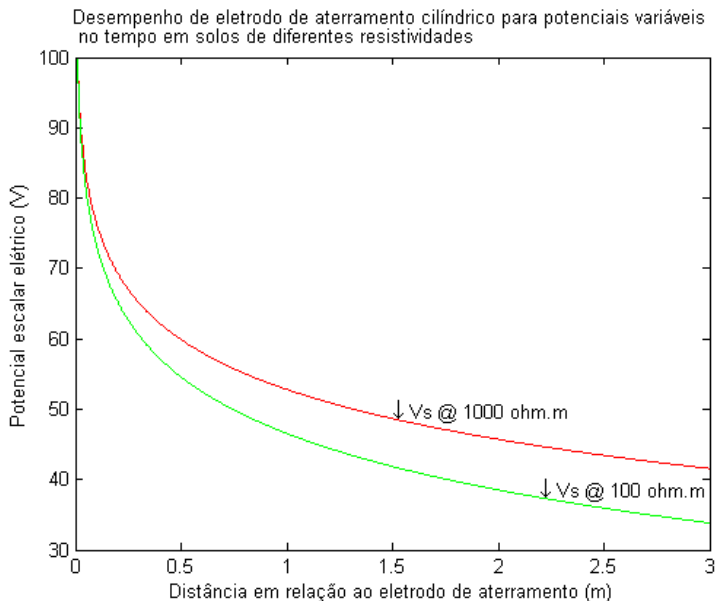


Figura 21 – Simulação computacional do desempenho comparativo dos eletrodos de aterramento cilíndricos em condições com diferentes valores de resistividade do solo.

A Figura 21 exemplifica este comportamento de variação em função das características do meio. No caso em questão, houve uma variação no valor da resistividade elétrica do solo, mantendo os demais parâmetros e a frequência de excitação constantes (para a representação adotou-se a frequência de 6000 Hz). O exemplo foi feito com base no modelo ideal de eletrodo de aterramento cilíndrico semi-infinito, representado pela Figura 5. A simulação computacional do desempenho comparativo referente à Equação (40), representada na Figura 21, foi feita no Matlab®.

Uma vez que os eletrodos cilíndricos ideais possibilitam apresentar as variações da distribuição do potencial escalar elétrico de forma mais clara, permitindo ao leitor comparar duas situações, foi dada

preferência a esta situação para a apresentação dos resultados na Figura 21. A representação da comparação para o caso do eletrodo semiesférico não possibilita a distinção visual, apesar de existente, entre dois casos, uma vez que há a sobreposição das linhas, como ocorre na Figura 19 e na Figura 20. Por este motivo, não se apresentou a comparação das situações para eletrodos semiesféricos. A impossibilidade de distinção entre as situações está relacionada à geometria do eletrodo e da distribuição dos potenciais ao redor dele, pois, as frentes de onda são esféricas, o que resulta em um decaimento inversamente proporcional ao quadrado da distância em relação ao eletrodo, decaimento este que se sobrepõe à variação dos parâmetros do solo ou da frequência.

5.4 A APLICAÇÃO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO PARA ALTAS FREQUÊNCIAS

Convencionalmente, o aterramento elétrico da edificação é uma disciplina voltada ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas e ao aterramento em frequências industriais. Apesar de cumprir com os objetivos propostos para cada uma delas, as estratégias utilizadas podem não ser aplicáveis às altas frequências. Quando o aterramento elétrico é submetido a variações de alta frequência, as tensões e correntes envolvidas devem ser tratadas como ondas eletromagnéticas (ALIPIO; SCHROEDER; AFONSO, 2015).

Tendo em vista os efeitos reativos da variação em alta frequência das grandezas eletromagnéticas, o aterramento elétrico deve ser apto às condições impostas a ele. Assim, uma configuração dedicada para esta aplicação é um requisito obrigatório para a garantia de seu desempenho, uma vez que a proximidade irá impactar na impedância na conexão dos equipamentos elétricos aos eletrodos de aterramento.

Ao contrário do aterramento elétrico para baixas frequências, que permite a adoção de um ponto centralizado de aterramento junto à fonte de alimentação para toda a edificação, sem que haja um comprometimento demasiado de seu desempenho, o aterramento elétrico para altas frequências é dependente da geometria escolhida, uma vez que as reatâncias capacitivas e indutivas distribuídas ao longo do aterramento interferem no desempenho da solução adotada, uma vez que as ondas de tensão nos eletrodos e condutores de conexão estão sujeitas a fortes atenuações (ALIPIO; SCHROEDER; AFONSO, 2015).

Assim, a fim de evitar problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética decorrentes de interferências de alta frequência, é preciso proporcionar um caminho de baixa impedância ao solo, para que tais

interferências sejam mitigadas. Portanto, deve-se verificar o comportamento dos componentes do aterramento elétrico em altas frequências: o solo; os condutores de conexão; e os eletrodos de aterramento.

As propriedades eletromagnéticas do solo variam de acordo com a frequência de excitação das grandezas eletromagnéticas. Esta variação, faz com que as características medidas em baixa frequência não sejam adequadas para representar o caso em que as variações são de alta frequência, necessitando assim de uma correção nos valores (ALIPIO; VISACRO, 2014a). Os valores de resistividade e permissividade elétrica apresentam uma redução em seus valores quando são comparadas as medidas em 60 Hz com aquelas em frequências elevadas (SILVEIRA; CONTI; VISACRO, 2014).

Já os condutores de conexão têm um aumento em sua impedância proporcionado pelos efeitos reativos decorrentes das altas frequências. Assim, a fim de mitigar esse efeito, é necessário que as conexões sejam feitas da forma mais direta possível, a fim de reduzir as impedâncias dos condutores, e conseqüentemente, melhorar o desempenho do aterramento elétrico.

Assim, como forma de mitigação dos riscos associados às interferências eletromagnéticas na prestação de assistência à saúde, a edificação deve dispor de um aterramento elétrico dedicado às altas frequências, de preferência, localizado próximo aos ambientes onde a ocorrência de tais fenômenos acarrete em danos à saúde dos pacientes, à saúde da equipe de assistência, bem como à qualidade da assistência à saúde prestada. A adoção desta medida permite a atenuação das interferências eletromagnéticas, por possibilitar um meio de baixa impedância para a dissipação da energia de tais interferências no solo.

6 CRITÉRIOS RELACIONADOS À ASSISTÊNCIA À SAÚDE

A necessidade de adequação do projeto do aterramento elétrico para um estabelecimento assistencial de saúde requer um conhecimento a respeito de suas atividades e dos principais fatores associados a elas. Para tanto, são apresentados alguns fatores relevantes para a definição das características e requisitos do aterramento elétrico nas edificações onde há a prestação dos serviços de saúde.

6.1 OS EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO

Uma forma eficaz de se mitigar o risco de choque elétrico em uma pessoa pode ser obtida através do afastamento desta pessoa dos circuitos de alimentação e equipamentos elétricos. Ou seja, este afastamento dos componentes energizados pode ser adotado como uma boa solução para a redução do risco do choque elétrico, uma vez que a pessoa não faria parte de um possível circuito.

Entretanto, nem sempre é possível que haja este afastamento, pois, há situações em que a interação com circuitos de alimentação e equipamentos elétricos é inevitável, então, o risco de choque elétrico permanece presente enquanto houver tal interação. Em especial, em um estabelecimento assistencial de saúde, o paciente e a equipe de assistência à saúde não têm a escolha de se afastar de equipamentos elétricos ou de seus circuitos de alimentação, uma vez que a qualidade e a eficácia dos serviços de saúde dependem cada vez mais da utilização das tecnologias em saúde.

Desta forma, como há uma interação forçada e constate, muitas vezes prolongada, entre as pessoas e os elementos que oferecem o risco de choque elétrico, é necessário que tais riscos sejam compreendidos plenamente e mitigados na medida do possível, sem que haja prejuízo às ações de assistência à saúde. Por este motivo, a classificação das intensidades do choque elétrico é fundamental para o entendimento do risco associado à utilização da energia elétrica.

6.1.1 Classificação da intensidade da corrente do choque elétrico

Charles Dalziel, um pesquisador da *University of California, Berkeley*, em busca de informações a respeito do choque elétrico, submeteu um conjunto de voluntários a uma variedade de intensidades de corrente elétrica, a fim de verificar o comportamento e as reações dessas

pessoas. O objetivo do pesquisador era de verificar experimentalmente o efeito das diferentes intensidades de corrente elétrica, relacionando-as com as reações e efeitos causados no organismo dos voluntários. Desta forma, haveria uma fonte de informações com base em um estudo detalhado a respeito dos efeitos da corrente elétrica nas pessoas, uma vez que os casos em que as pessoas acidentalmente entravam em contato com a energia elétrica possuíam uma série de incertezas na descrição da situação e, muitas vezes, a única grandeza conhecida era o valor da tensão de alimentação dos circuitos.

A partir da análise estatística das reações e dos comportamentos dos voluntários, Charles Dalziel estabeleceu uma classificação para as intensidades de corrente de choque elétrico aplicadas em adultos saudáveis. Então, tal classificação poderia ser aplicada em casos diversos, por exemplo, no projeto de equipamentos elétricos, uma vez que os dados obtidos possuiriam significância estatística.

A classificação obtida pelo pesquisador é composta por: correntes de percepção (*perception currents*); correntes de reação (*reaction currents*); correntes de largar (*let-go currents*); e as correntes de fibrilação ventricular do coração (*fibrillating currents*) (DALZIEL, 1972).

De acordo com o pesquisador (DALZIEL, 1972), a corrente de percepção é definida como a menor intensidade de corrente elétrica capaz de causar um pequeno aquecimento (no caso de corrente contínua) ou um formigamento (no caso de corrente alternada) perceptível na pele do indivíduo. O valor estabelecido para a corrente de percepção para a amostra de indivíduos é de aproximadamente 1,1 mA para homens e de 0,7 mA para mulheres.

A próxima classificação estabelecida pelo pesquisador é a corrente de reação, que é definida como a intensidade de corrente elétrica capaz de causar uma reação involuntária nos músculos do indivíduo. Esta reação pode dar origem a outros eventos, por exemplo, uma contração muscular involuntária ou um espasmo.

A corrente de largar, de acordo com Dalziel (1972), é o limiar da intensidade de corrente elétrica que ainda permite ao indivíduo exercer o controle muscular e largar o condutor ou o equipamento que seja o responsável pelo choque elétrico. O valor obtido experimentalmente para a corrente de largar para o grupo é de 16 mA para homens e de 10,5 mA para mulheres. Correntes elétricas com intensidades superiores à corrente de largar sobrepõem os impulsos nervosos de comando muscular, podendo assim causar choques elétricos de maior duração e danos ao

organismo, uma vez que a pessoa é incapaz de se livrar da causa do choque elétrico.

Por fim, a corrente de fibrilação, de acordo com o pesquisador (DALZIEL, 1972), é a intensidade de corrente elétrica capaz de causar a fibrilação ventricular do coração, e tem por consequência a parada da circulação sanguínea do indivíduo, uma vez que, conforme Kindermann (2013), a eficiência do bombeamento do sangue pelo coração é comprometida. Por conta do risco de fibrilação ventricular do coração dos indivíduos da pesquisa, que pode não ser reversível, a corrente elétrica foi aplicada em animais, em especial ovelhas e porcos, que possuem relações de massa semelhantes à do ser humano, e os valores obtidos foram extrapolados. Como resultado, encontrou-se uma relação para a intensidade de corrente elétrica (em ampères) à frequência industrial capaz de causar a fibrilação ventricular do coração de uma pessoa adulta em função da duração do choque, expressa pela Equação (52).

$$I \geq \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (52)$$

Além das consequências abordadas pela pesquisa de Charles Dalziel, o choque elétrico pode causar outros danos ao ser humano, destacando-se as ulcerações (decorrentes de movimentos eletrolíticos de íons), as queimaduras (decorrentes do calor liberado pela passagem de corrente elétrica pelo tecido), as câimbras musculares (decorrentes de estímulos prolongados nos nervos motores) e as paradas respiratórias (decorrentes de estímulos elétricos entre as costelas ou câimbras) (CHAKRABARTTY; PANDA, 2010).

6.1.2 As características fisiológicas do ser humano

A pele, conforme Charles Dalziel, ou melhor, a camada mais externa dela apresenta os maiores valores de impedância do corpo humano quando está seca, entretanto, condições físicas (temperaturas elevadas) ou psicológicas (nervosismo ou ansiedade) são capazes de alterar esta impedância, reduzindo-a e tornando o corpo humano mais suscetível à passagem de corrente elétrica e seus efeitos. Além disso, o corpo humano possui uma característica que o torna mais vulnerável à corrente elétrica: a impedância do corpo decresce com o aumento da corrente, tensão ou tempo de exposição ao choque elétrico (DALZIEL, 1972).

Assim, apesar de possuir uma camada protetora, no caso, a pele, o ser humano ainda é vulnerável aos efeitos do choque elétrico, sendo necessária a adoção de medidas suplementares para mitigar os riscos associados à passagem de corrente elétrica pelo organismo.

A presença da pele, principalmente de sua impedância, no caminho percorrido pela corrente elétrica, é a principal característica que diferencia os tipos de choque: macrochoques e microchoques. No macrochoque, a pele faz parte do caminho percorrido pela corrente elétrica, e já no microchoque a pele não faz parte do caminho percorrido pela corrente elétrica. De acordo com Kindermann (2013), no macrochoque a corrente do choque elétrico penetra no corpo pelo seu lado externo, e no microchoque, ela penetra diretamente no interior do corpo humano.

A importância da pele no percurso da corrente do choque elétrico se dá pelo fato de o sangue ser um líquido composto por uma solução iônica, tornando-o um fluido condutivo, com resistividade elétrica na faixa de 135 a 150 $\Omega \cdot \text{cm}$ (KINDERMANN, 2013). Pelo fato de o sangue irrigar a integralidade dos tecidos e órgãos que compõem o organismo, ele faz com que o interior do corpo humano seja um local propício à passagem da corrente elétrica.

Assim sendo, no caso da fibrilação ventricular do coração, na qual é necessária uma densidade de corrente elétrica suficiente fluindo através do coração, os microchoques apresentam um risco maior de fibrilação ventricular do coração quando comparados aos macrochoques, uma vez que a tensão necessária para desencadear tal complicação é menor no primeiro caso, que possui uma impedância substancialmente inferior quando comparado ao segundo. De acordo com Dalziel (1972), correntes elétricas de microchoques da ordem de 20 μA a 60 Hz, fluindo através do coração, são suficientes para desencadear a fibrilação ventricular do coração.

O caminho percorrido pela corrente no interior do corpo humano tem um papel de grande importância nos efeitos à saúde do ser humano, sendo que a presença ou não do coração neste caminho irá determinar a gravidade do choque elétrico (LI; DU; XIA, 2011), uma vez que o coração é um órgão que desempenha uma função vital.

Além disso, os microchoques podem não apresentar sintomas ou marcas visíveis, uma vez que as correntes elétricas envolvidas possuem uma amplitude muito reduzida. Desta forma, um diagnóstico preciso é algo de difícil execução, pois, um evento de fibrilação ventricular do coração e posterior parada cardíaca em um estabelecimento assistencial de saúde, em especial a parada cardíaca, pode ter várias causas.

Assim, no caso do estabelecimento assistencial de saúde, onde são executados frequentemente procedimentos invasivos, aqueles em que há a penetração da pele e mucosas, existem as condições necessárias aos microchoques: equipamentos elétricos interagindo com o interior do paciente. Desta forma, o paciente pode estar exposto a correntes elétricas fatais sem que a equipe de assistência à saúde esteja ciente ou possa fazer algo a respeito da questão, pois, a ordem de grandeza das correntes elétricas do microchoque são muito inferiores àquelas do macrochoque,

Assim, a ocorrência de fibrilação ventricular do coração em um paciente submetido a um choque elétrico é uma possibilidade a ser considerada pelo responsável pelo projeto das instalações elétricas do estabelecimento assistencial de saúde, em especial dos ambientes onde são realizados os procedimentos invasivos. Por este motivo, ações mais rígidas relacionadas à mitigação do risco de choques elétricos devem ser adotadas.

Como o aterramento elétrico possibilita o escoamento de cargas estáticas (geradas a partir de correntes de fuga ou falhas no isolamento dos equipamentos elétricos), além de garantir a equipotencialização da edificação, a conexão dos equipamentos médicos à terra, por meio do aterramento elétrico, deve ser considerada como uma opção para a proteção da vida do paciente.

6.2 AS TECNOLOGIAS EM SAÚDE

A densidade de utilização de tecnologias em saúde, em especial os equipamentos médicos, nas ações de diagnóstico e terapia em um estabelecimento assistencial de saúde está relacionada à complexidade e a capacidade de resolução dos serviços de saúde prestados. A interação do paciente com os equipamentos médicos pode ser feita de diversas formas, seja ela por meio de campos eletromagnéticos (no caso da ressonância magnética), contato com a pele (no caso da realização de um eletrocardiograma), contato com as mucosas íntegras (no caso da endoscopia) ou o contato com o interior do corpo (no caso dos procedimentos cirúrgicos).

A utilização das tecnologias em saúde está intimamente vinculada ao princípio físico do equipamento médico e também ao risco inerente de sua utilização, por exemplo, a geração de uma imagem médica de uma fratura óssea irá expor o paciente (e o operador do equipamento médico) a uma dose de radiação ionizante. Por esta razão, é necessário verificar a relação entre o risco (para o exemplo, a exposição do paciente à radiação ionizante e uma possível neoplasia decorrente desta exposição)

e o benefício (para o exemplo, as informações precisas para o tratamento da fratura óssea) na utilização de tal tecnologia em saúde, a fim de verificar a viabilidade de inserção (ou a sua possível retirada) de tal tecnologia em saúde nos protocolos médicos do estabelecimento assistencial de saúde.

Desta forma, cabe ao estabelecimento assistencial de saúde o gerenciamento de suas tecnologias em saúde, conforme a Resolução de Diretoria Colegiada nº 2, de 25 de janeiro de 2010, a fim de garantir as condições necessárias à manutenção da eficácia do uso de tais tecnologias na prestação da assistência terapêutica e das ações de diagnóstico. Assim, com base no gerenciamento de suas tecnologias em saúde, o responsável pelo estabelecimento assistencial de saúde terá ao seu alcance uma ferramenta para a tomada de decisão, necessária para a garantia da qualidade na prestação dos serviços de saúde.

Considerando o ciclo de vida de uma tecnologia em saúde – o período compreendido entre a inserção desta tecnologia no estabelecimento assistencial de saúde e o seu descarte –, é necessário prover as condições para o seu correto funcionamento durante todo este período. Assim, a preparação, o uso e a manutenção dos equipamentos médicos configuram tarefas principais a serem adotadas pelo serviço de assistência à saúde (CATELANI; CHIARI; RISALITI, 2014).

Entre as tecnologias em saúde existentes, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária classificou como críticos por meio do “Manual de tecnovigilância: abordagens de vigilância sanitária de produtos para saúde comercializados no Brasil” (2010) os seguintes equipamentos médicos: bomba de infusão; bisturi elétrico; aparelhos de anestesia; ventilador mecânico; e os monitores multiparamétricos.

A bomba de infusão, representada na Figura 22, é um equipamento médico responsável pelo controle de fluxo de um determinado medicamento, seja ele de uso enteral ou parenteral. A utilização de bombas de infusão na assistência à saúde está relacionada à aplicação contínua de medicamentos, por exemplo, os antineoplásicos ou anestésicos, ou em uma dosagem específica. A programação da velocidade de infusão do medicamento está relacionada ao tratamento prescrito pela equipe de assistência à saúde do paciente, estando vinculada a eficácia de tal terapia à capacidade de adequação da bomba de infusão à prescrição. Como intercorrências relacionadas à utilização da bomba de infusão, destacam-se a sobredose e a subdose na administração de medicamentos



Figura 22 – Bomba de infusão. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa).



Figura 23 – Equipamento de eletrocirurgia. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa).

O bisturi elétrico, representado na Figura 23 (fonte dos pulsos elétricos), é um equipamento médico responsável pelo corte de tecidos e coagulação do sangue, utilizado em alguns tipos de procedimentos invasivos. O princípio de funcionamento dos bisturis elétricos está relacionado à passagem de corrente elétrica através dos tecidos, causando o aquecimento da região por meio do efeito Joule, em especial de sua superfície, onde as densidades de corrente elétrica são mais intensas. A possibilidade de realizar cortes e coagular o sangue simultaneamente é uma das vantagens deste equipamento médico, pois, os bisturis convencionais com lâminas são incapazes de coagular o sangue, entretanto, por causa da interação entre a eletricidade e o corpo humano, há riscos de queimaduras ou danos ao organismo do paciente. De acordo com Kindermann (2013), por utilizar correntes elétricas de alta frequência, que são confinadas nas camadas mais externas dos tecidos, o bisturi elétrico não apresenta riscos aos órgãos internos do paciente. Como efeitos adversos da utilização desta tecnologia em saúde, destacam-se as queimaduras de pele.



Figura 24 – Aparelho de anestesia. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa).

O aparelho de anestesia, representado na Figura 24, é um equipamento médico que tem por objetivo induzir, manter e retirar o paciente de um estado no qual sua capacidade de responder a estímulos, principalmente a dor e os movimentos, seja suprimida. O princípio de funcionamento dos aparelhos de anestesia está relacionado à manutenção da concentração de agentes anestésicos no organismo do paciente. Os eventos adversos relacionados à utilização de aparelhos de anestesia estão relacionados à dosagem equivocada do agente anestésico, podendo causar uma sedação inadequada, e à ventilação deficitária, seja por defeitos mecânicos ou por alterações em sua programação.



Figura 25 – Ventilador mecânico. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa).

O ventilador mecânico, representado na Figura 25, é um equipamento médico responsável pela manutenção da atividade respiratória do paciente, seja para complementar o seu esforço ou para assumi-lo de forma plena. A utilização de ventiladores mecânicos na assistência à saúde está relacionada à melhora no processo respiratório e a redução do esforço a ser feito pelo paciente em situações onde o tratamento intensivo é imprescindível. A programação do ritmo do ventilador mecânico é feita de acordo com as características clínicas e fisiológicas do paciente. Como intercorrências relacionadas ao uso dos ventiladores mecânicos, destacam-se as lesões de mucosas advindas da pressão exercida pelo equipamento, e a variação nos parâmetros da

respiração, acarretando no excesso ou na falta de oxigênio no organismo do paciente.

O monitor multiparamétrico, representado na Figura 26, é um equipamento médico responsável pela captação dos sinais fisiológicos do paciente, sejam eles de frequência ou pressão cardíaca, de temperatura ou saturação de oxigênio no sangue, e pela apresentação das informações relacionadas à equipe de assistência à saúde. A utilização dos monitores multiparamétricos na assistência à saúde está relacionada à monitoração de pacientes com o objetivo de tornar as ações terapêuticas mais efetivas, além de sinalizar as ocorrências que requeiram uma intervenção médica. Como intercorrências relacionadas ao uso dos monitores multiparamétricos, destacam-se as falhas na captação de sinais e as interferências causadas por equipamentos alheios à monitoração do paciente.



Figura 26 – Monitor multiparamétrico. (Fonte: Manual de tecnovigilância – Anvisa).

As tecnologias em saúde evoluíram de forma conjunta com o desenvolvimento da eletrônica, possibilitando que equipamentos médicos realizem tarefas refinadas na assistência à saúde. Assim, como todo equipamento eletrônico, as tecnologias em saúde também podem sofrer falhas causadas por interferências, sejam elas de origem humana ou

eletromagnética. Por este motivo, e também pela criticidade dos equipamentos médicos utilizados na assistência à saúde, as instalações elétricas, incluindo o aterramento, devem proporcionar as condições necessárias para que tais equipamentos possam desempenhar sua função de forma adequada, garantindo a qualidade na prestação dos serviços de saúde.

6.3 A CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DOS AMBIENTES

A Resolução de Diretoria Colegiada nº 50, de 21 de fevereiro de 2002, é a norma utilizada para a avaliação da programação e do planejamento de edificações em que a assistência à saúde é prestada. Nela são apresentados os requisitos e os ambientes necessários à realização de atividades relacionadas direta e indiretamente com a assistência à saúde dos pacientes.

A complexidade dos serviços de saúde prestados na edificação está muitas vezes relacionada às tecnologias em saúde empregadas e no risco ao qual a equipe de saúde e o paciente estão expostos. Por este motivo, há uma relação entre o risco e a complexidade do procedimento realizado.

A criticidade dos equipamentos médicos na prestação da assistência à saúde deve ser levada em consideração no projeto do aterramento elétrico da edificação, principalmente os riscos que são oriundos da aplicação de tais tecnologias. Desta forma, os riscos associados a um determinado equipamento médico devem ser identificados e mitigados na medida de sua proporção. Entre as estratégias adotadas para a mitigação do risco, encontram-se aquelas que são incorporadas ao projeto e aquelas que alertam sobre os riscos e requerem uma intervenção (RAY; CLEVELAND, 2013). Entre as medidas incorporadas ao projeto para a mitigação dos riscos destaca-se o aterramento elétrico, e para as medidas que alertam sobre os riscos e requerem intervenção, destacam-se os alarmes, por exemplo, a supervisão do nível de isolamento para um sistema de aterramento IT.

Tendo em vista a necessidade da garantia da segurança do paciente por meio de ações e estratégias adotadas pelo estabelecimento assistencial de saúde, as instalações e os equipamentos médicos também devem ser alvos de análises de risco, uma vez que há um aumento crescente na densidade tecnológica adotada na prestação da assistência à saúde.

Assim, a manutenção de um conjunto de características das instalações elétricas e dos equipamentos médicos – a segurança, a

funcionalidade e a compatibilidade eletromagnética – pode ser alcançada por meio de um aterramento elétrico dimensionado adequadamente, conforme as características dos serviços de saúde prestados e de seus riscos intrínsecos.

Desta forma, o tripé – segurança, funcionalidade, e compatibilidade magnética – deve ser observado em conjunto com os riscos associados aos procedimentos realizados nos diferentes ambientes do estabelecimento assistencial de saúde. A concentração de esforços para a redução do risco em pontos específicos da edificação pode ser uma das estratégias utilizadas para adequar o projeto à viabilidade econômica do empreendimento.

De forma a garantir que o aterramento elétrico das instalações elétricas da edificação esteja adequado às atividades realizadas – a prestação de serviços de saúde – é necessário avaliar tais atividades e o risco envolvido em cada uma delas. A Resolução de Diretoria Colegiada nº 50, de 21 de fevereiro de 2002, apresenta uma lista exaustiva das unidades relacionadas aos serviços de saúde: o atendimento básico; o atendimento de urgência e emergência; a internação; o apoio ao diagnóstico e terapia; o apoio técnico; o ensino e pesquisa; o apoio administrativo; e o apoio logístico. A partir de uma análise de tais unidades, é possível avaliar o risco a que a equipe de assistência à saúde e os pacientes estão expostos.

Dada a impossibilidade de o ambiente onde os serviços de saúde são prestados ser livre de riscos, a adoção de medidas suficientes para a garantia da segurança, sejam elas relacionadas à minimização da ocorrência de danos à saúde ou morte, devem ser adotadas pelo estabelecimento assistencial de saúde (CORCIOVA; ANDRITOI; CIORAP, 2013). Assim, estratégias relacionadas à segurança do paciente e ao funcionamento adequado das tecnologias em saúde, por meio do aterramento elétrico, devem ser adotadas.

Pode-se resumir as principais atividades relacionadas a um risco aumentado em relação àqueles já existentes na edificação, sendo elas: os procedimentos invasivos e os procedimentos de suporte à vida e diagnóstico. Este risco está associado a um dano à saúde do paciente, a um diagnóstico equivocado, ou a ambos. Há ambientes em que ambos os riscos se fazem presentes, entretanto, a preponderância de um determinado risco será considerada para efeitos de projeto do aterramento elétrico, em detrimento dos demais riscos.

O risco relacionado à energia elétrica deve ser mitigado, estabelecendo as relações entre os requisitos de proteção e os efeitos indesejados relacionados à eletricidade, considerando e prevendo as

situações que possam vir a trazer riscos à saúde dos pacientes e da equipe de assistência (LANZISERO, 2012).

Tendo em vista a sensibilidade do corpo humano à passagem de corrente elétrica, em especial os microchoques, nos ambientes em que se realizam procedimentos invasivos, o risco do choque elétrico é mais relevante que os demais, por exemplo, o risco do mau funcionamento de um equipamento que por ventura seja vítima de interferências eletromagnéticas, apesar de esta situação também oferecer riscos à vida do paciente.

Com base na categorização dos ambientes onde ocorre a assistência à saúde, é possível adotar ações e estratégias para a redução do risco por meio do aterramento elétrico, concentrando assim os esforços de projeto e os recursos disponíveis. Apesar de haver uma escolha para a mitigação de um risco em detrimento do outro, há outras ações e estratégias possíveis, que não o aterramento elétrico, para a diminuição dos riscos desfavorecidos.

6.3.1 Os ambientes onde são realizados os procedimentos invasivos

A execução de procedimentos invasivos em um determinado ambiente pode ter relação com a ocorrência de eventos adversos relacionados à ocorrência de choques elétricos nos pacientes. Uma das causas para esta relação pode estar relacionada à diminuição do valor de impedância elétrica do corpo humano, uma vez que a presença da pele desempenha um importante papel.

Exemplos deste tipo de ambiente são as salas de cirurgia do centro cirúrgico, as salas de procedimento da hemodinâmica e as salas de emergência. Neste tipo de ambiente, a penetração da pele ou de mucosas é uma atividade corriqueira, assim, a probabilidade da ocorrência de um evento adverso relacionado ao choque elétrico, principalmente os microchoques, é maior do que nos ambientes onde não há a realização deste tipo de procedimento.

Apesar da existência de ambientes em que o choque elétrico é também um risco, por exemplo, a lavanderia hospitalar, local onde há a presença de água em abundância e de equipamentos elétricos, eles não são considerados para esta avaliação, uma vez que não se encaixam no perfil abordado.

A mitigação do risco para este tipo de ambiente está relacionada ao aumento da segurança elétrica das instalações, para que a ocorrência de um possível choque elétrico decorrente de uma falta ou mau funcionamento de um equipamento médico seja evitada, ou quando não

for possível, ao menos reduzida. Assim, adotar-se-á para este tipo de ambiente uma composição de estratégias, como a técnica e o sistema de aterramento elétrico, além da disposição geométrica dos eletrodos de aterramento.

Entre as opções existentes para a técnica de aterramento elétrico – isolado, em ponto único ou em malha – dar-se-á preferência à malha de aterramento, pelo fato de esta opção possuir melhor desempenho em relação às demais técnicas, além de proporcionar uma redução no valor da impedância de aterramento elétrico da edificação e uma distribuição mais uniforme do potencial escalar elétrico de referência ao longo da edificação.

A disposição geométrica dos eletrodos de aterramento deve considerar o aumento da densidade de hastes de aterramento por unidade de área, a fim de possibilitar um valor reduzido de impedância de aterramento. Para isso, dar-se-á preferência à distribuição triangular de hastes de aterramento, arranjando-as de forma a cobrir, minimamente, a superfície onde se encontra a unidade onde se realizam os procedimentos invasivos. Além disso, as prescrições relacionadas ao aterramento elétrico em altas frequências devem ser adotadas, a fim de garantir o correto funcionamento dos equipamentos médicos e da segurança das pessoas. Para tanto, devem ser avaliadas as condições impostas aos ambientes onde este aterramento elétrico será instalado, principalmente as frequências das interferências eletromagnéticas e a dependência dos parâmetros do solo em função da frequência de excitação. Desta forma, o aterramento elétrico adotado para as finalidades de baixa frequência, por exemplo, a sensibilização dos dispositivos de proteção, não é adequado para a aplicação em altas frequências.

Por fim, para o sistema de aterramento elétrico – TN, TT ou IT – dar-se-á a escolha pelo sistema IT. Tal sistema é preconizado na norma de instalações elétricas de estabelecimentos assistenciais de saúde, a NBR 13534:2008 – Instalações elétricas de baixa tensão: requisitos específicos para instalação em estabelecimentos assistenciais de saúde. Além disso, o fornecimento de energia para este sistema é mantido mesmo com a ocorrência de uma falta, o que garantiria, a princípio, a continuidade do fornecimento de energia elétrica durante a realização dos procedimentos invasivos. Apesar de o sistema elétrico adotado não ser apropriado para as questões de compatibilidade eletromagnética, uma vez que este não permite estabelecer um potencial de referência para as instalações elétricas, ele possui características que o tornam mais seguro, quando comparado aos demais sistemas, considerando a especificidade deste tipo de aplicação. Além disso, o barramento de proteção dos quadros de

alimentação, presentes no interior da unidade, e todas as carcaças metálicas acessíveis deverão estar conectados à malha de aterramento específica desta unidade. Tal conexão deverá ser feita da forma mais direta possível, preferencialmente em linha reta, para que o menor valor possível de impedância seja alcançado.

6.3.2 Os ambientes onde são realizados os procedimentos de suporte à vida e diagnóstico

O suporte à vida e diagnóstico engloba atividades onde a precisão dos dados coletados junto ao paciente e sua interpretação estão diretamente relacionados à opção terapêutica adotada pela equipe de assistência à saúde, além do correto funcionamento das tecnologias em saúde empregadas. Assim, nos ambientes onde são realizados este tipo de atividades, é necessário que as instalações elétricas e o aterramento elétrico possibilitem condições satisfatórias para o funcionamento dos equipamentos médicos.

Para este tipo de ambiente, o risco preponderante está relacionado à alteração do diagnóstico resultante de dados do paciente, além do mau funcionamento das tecnologias em saúde. Tais incidentes podem ter origem em interferências eletromagnéticas ou ruídos aplicados em um equipamento suscetível.

A diminuição do risco para este tipo de ambiente está relacionada ao aumento do desempenho do aterramento elétrico para as questões de compatibilidade eletromagnética, para que a ocorrência de uma possível interferência nos equipamentos médicos seja evitada, ou quando não for possível, reduzida. Assim, adotar-se-á para este tipo de ambiente uma composição de estratégias, como a técnica e o sistema de aterramento elétrico, além da disposição geométrica dos eletrodos de aterramento.

Entre as opções existentes para a técnica de aterramento elétrico – isolado, em ponto único ou em malha – dar-se-á preferência, mais uma vez, à malha de aterramento, pelo fato de esta opção possuir melhor desempenho em relação às demais, além de proporcionar uma redução no valor da impedância de aterramento elétrico da edificação e uma distribuição mais uniforme do potencial escalar elétrico de referência ao longo da edificação.

A disposição geométrica dos eletrodos de aterramento deve considerar o aumento da densidade de hastes de aterramento por unidade de área, a fim de possibilitar um valor reduzido de impedância de aterramento. Para isso, dar-se-á preferência à distribuição triangular de hastes de aterramento, arranjando-as de forma a cobrir, minimamente, a

superfície onde se encontra a unidade onde se realizam os procedimentos de suporte à vida. Além disso, as prescrições relacionadas ao aterramento elétrico em altas frequências devem ser adotadas, a fim de garantir o correto funcionamento dos equipamentos médicos e da segurança das pessoas. Para tanto, devem ser avaliadas as condições impostas aos ambientes onde este aterramento elétrico será instalado, principalmente as frequências das interferências eletromagnéticas e a dependência dos parâmetros do solo em função da frequência de excitação. Desta forma, o aterramento elétrico adotado para as finalidades de baixa frequência, por exemplo, a sensibilização dos dispositivos de proteção e o aterramento do neutro do transformador, não é adequado para a aplicação em altas frequências.

Por fim, para o sistema de aterramento elétrico – TN, TT ou IT – dar-se-á a escolha pelo sistema TN-S. A escolha deste sistema de aterramento, em detrimento dos demais, está relacionada ao fato de este ser mais adequado às questões de compatibilidade eletromagnética, além de permitir a adoção pelas instalações elétricas do potencial elétrico de referência da edificação. Além disso, o barramento de proteção dos quadros de alimentação, presentes no interior da unidade, e todas as carcaças metálicas acessíveis deverão estar conectados à malha de aterramento específica desta unidade. Tal conexão deverá ser feita da forma mais direta possível, preferencialmente em linha reta, para que o menor valor possível de impedância seja alcançado.

6.3.3 Os demais ambientes da edificação

Apesar de haver a distinção entre as atividades relacionadas aos procedimentos invasivos e os de suporte à vida e diagnóstico na edificação do estabelecimento assistencial de saúde, há também os riscos relacionados aos demais ambientes, pois estes também dispõem de equipamentos e de instalações elétricas. A distinção existente para os ambientes especiais da edificação, está relacionada a um aumento na proteção dos pacientes e da equipe de assistência à saúde, pois, estes encontram-se mais expostos ou vulneráveis aos riscos inerentes das tecnologias em saúde.

A necessidade da garantia da segurança, da funcionalidade e da compatibilidade eletromagnética de equipamentos e de instalações elétricas deve ser avaliada para a edificação como um todo, pois a qualidade na prestação de serviços de saúde está intimamente relacionada à atenção dispendida às questões da estrutura do estabelecimento assistencial de saúde. Desta forma, também se faz necessária a definição

de parâmetros de projeto para o aterramento elétrico do restante da edificação.

Para este tipo de ambiente não haverá uma preocupação com um risco específico, como havia com os ambientes em que os procedimentos invasivos são realizados – segurança elétrica – e os ambientes em que os procedimentos de suporte à vida e diagnóstico são realizados – compatibilidade eletromagnética.

A técnica de aterramento elétrico será a mesma utilizada para os ambientes especiais da edificação: a malha de aterramento. Farão parte desta malha de aterramento todos os elementos metálicos da edificação, como as ferragens estruturais, o sistema de proteção contra descargas atmosféricas, o aterramento do neutro do transformador de alimentação e os aterramentos locais destinados aos ambientes onde ocorrem os procedimentos invasivos e os de suporte à vida.

Os eletrodos de aterramento para este tipo de ambiente serão aqueles utilizados no restante da edificação, em especial, os eletrodos de aterramento do transformador de alimentação, ao qual o neutro está conectado. Desta forma, não há a necessidade de adoção de um aterramento dedicado para o restante da edificação, a não ser que equipamentos específicos o requeiram, por exemplo, aqueles relacionados às tecnologias de informação.

Por fim, adotar-se-á o sistema de aterramento TN-S, o mesmo adotado para os ambientes onde são realizados os procedimentos de suporte à vida e diagnóstico. Entretanto, o condutor de proteção será aquele com origem junto ao neutro do transformador de alimentação.

7 CONCLUSÃO

As aplicações convencionais para o aterramento elétrico possuem uma série de fatores a serem levados em consideração na etapa de elaboração de seu projeto. Os estabelecimentos assistenciais de saúde, por desempenharem atividades de maior risco à saúde, devem considerar além dos fatores convencionais, aqueles relativos à segurança elétrica e a compatibilidade eletromagnética para os equipamentos médicos, uma vez que há uma relação direta entre o desempenho do aterramento e a segurança do paciente.

Entre as técnicas de aterramento abordadas – isolada, em ponto único ou malha – a técnica de malha de aterramento proporciona, comparativamente, o melhor desempenho. Entretanto, para uma eficaz execução desta técnica de aterramento, é necessária a integração entre as diferentes disciplinas que compõem o projeto de uma edificação, para que haja uma integração de forma harmoniosa entre os diferentes elementos que compõem tal projeto.

As tecnologias em saúde, fundamentais para a eficácia da assistência prestada, devem possuir as condições necessárias para o seu correto funcionamento. Desta forma, as instalações elétricas, que também incluem o aterramento, devem ser projetadas para este propósito específico, a fim de evitar, ou mitigar a um mínimo exequível, as possíveis interferências eletromagnéticas que possam ser submetidas aos equipamentos médicos.

Dada a sensibilidade do corpo humano à passagem de corrente elétrica e os danos causados por esta interação, urge a necessidade da redução dos fatores de risco, principalmente, nos ambientes onde são executados os procedimentos invasivos, uma vez que em tais condições, os pacientes estão mais suscetíveis aos microchoques.

Apesar da usual utilização do aterramento elétrico para finalidades em baixa frequência (aterramento do neutro do transformador de alimentação), ou mesmo de respostas impulsivas (componente do sistema de proteção contra descargas atmosféricas), o aterramento elétrico também deve ser utilizado para a mitigação dos efeitos de grandezas eletromagnéticas de alta frequência, principalmente as interferências eletromagnéticas.

Entretanto, ao contrário do aterramento elétrico em baixas frequências, a aplicação em altas frequências requer um conhecimento prévio das condições específicas de operação. Além do mais, o perfil das atividades da edificação, em especial a criticidade com as componentes de segurança, e a presença de equipamentos médicos suscetíveis a

interferências eletromagnéticas requerem um projeto de aterramento elétrico compatível.

O comportamento das hastes de aterramento para aplicações de alta frequência, assim como a propagação de ondas eletromagnéticas em um meio qualquer, é dependente das características do meio – no caso do aterramento elétrico, o solo – e da natureza da excitação. A penetração dos campos eletromagnéticos no solo ao redor dos eletrodos de aterramento, em especial as hastes cilíndricas, é inversamente proporcional à frequência de tais campos. Assim, quanto maior a frequência de excitação das grandezas eletromagnéticas, menor será a capacidade de tais grandezas penetrarem no solo.

Por consequência, a impedância dos eletrodos de aterramento aumenta de acordo com a variação das grandezas eletromagnéticas impostas a eles, o que resulta em um aterramento elétrico eficaz até um determinado limite de frequência.

Assim, a associação de eletrodos de aterramento deve ser feita de tal forma que proporcione aos ambientes de assistência à saúde o tripé previsto neste texto: segurança às pessoas; funcionalidade às instalações elétricas; e compatibilidade eletromagnética aos equipamentos médicos. O comportamento dos campos eletromagnéticos faz com que o aumento na frequência requeira um aumento na densidade do aterramento elétrico, uma vez que deve ser privilegiada a equipotencialização ao longo da edificação.

Resulta-se assim em uma malha de aterramento mais refinada, ou seja, com menores espaçamentos entre hastes adjacentes, com maior densidade de hastes por unidade de área, cobrindo a área dos ambientes, de acordo com as frequências que possam vir a causar problemas de compatibilidade eletromagnética. Além disso, a malha de aterramento para altas frequências deve considerar a necessidade de dedicação exclusiva a determinados ambientes, a fim de minimizar as distâncias (e por consequência a impedância) dos condutores de conexão.

Por fim, a coordenação do aterramento elétrico com os demais elementos de proteção das instalações elétricas, bem como com a equipe de engenharia clínica do estabelecimento assistencial de saúde é imprescindível para a garantia da qualidade e da segurança do paciente nas ações de assistência à saúde. Desta forma, as rotinas de substituição e de manutenção dos equipamentos médicos devem estar alinhadas ao aterramento elétrico, de forma a prevenir a ocorrência de incidentes e, principalmente, de eventos adversos relacionados às tecnologias em saúde.

REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, Milton; STEGUN, Irene A. **Handbook of mathematical functions**: with formulas, graphs and mathematical tables. Washington, 1964.

ALIPIO, Rafael; SCHROEDER, Marco Aurélio O.; AFONSO, Márcio M. **Voltage distribution along earth grounding grids subjected to lightning currents**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, n. 6, novembro/dezembro 2015.

ALIPIO, Rafael; VISACRO, Silvério. **A new model for the frequency dependence of soil parameters**. International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014. ISBN 978-1-4799-3544-4.

_____. **Impulsive efficiency of grounding electrodes: effect of frequency-dependent soil parameters**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, n. 2, abril, 2014.

ARMSTRONG, Keith. **Why few (if any) medical devices comply with their EMC standard, and what can be done about it**. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Raleigh, Estados Unidos, 2014. ISBN 978-1-4799-5544-2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. 2004.

_____. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. 2004.

_____. **NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. 2012.

_____. **NBR 13534**: Instalações elétricas de baixa tensão: requisitos específicos para instalação em estabelecimentos assistenciais de saúde. 2008.

_____. **NBR 13571**: Haste de aterramento aço cobreada e acessórios – especificação. 1996.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução de Diretoria Colegiada nº 36, de 25 de julho de 2013. Institui ações para a segurança do paciente em serviços de saúde e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2013.

_____. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução de Diretoria Colegiada nº 50, de 21 de fevereiro de 2002. Aprova o Regulamento Técnico destinado ao planejamento, programação, elaboração, avaliação e aprovação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2002.

_____. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução de Diretoria Colegiada nº 2, de 25 de janeiro de 2010. Dispõe sobre o gerenciamento de tecnologias em saúde em estabelecimentos de saúde. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

_____. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Manual de tecnovigilância**: abordagens de vigilância sanitária de produtos para a saúde comercializados no Brasil. Brasília, 2010.

_____. Lei nº 6.437, de 20 de agosto de 1977. Configura infrações à legislação sanitária federal, estabelece as sanções respectivas, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1977.

CATELANI, Marcantonio; CIANI, Lorenzo; RISALITI, Chiara. **Risk assessment in the use of medical devices: a proposal to evaluate the impact of the human factor**. 2014. ISBN 978-1-4799-2921-4.

CAVKA, Damir; MORA, Nicolas; RACHIDI, Farhad. **A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, n. 1, fevereiro, 2014.

CHAKRABARTTY, Ashoke; PANDA, Rajanikant. **Criticality of electrical safety for medical devices**. 2010 International Conference on Systems in Medicine and Biology (ICSMB), Kharagpur, India. ISBN 978-1-61284-039-0.

CORCIOVA, Calin; ANDRITOI, Doru; CIORAP, Radu. **Elements of risk assessment in medical equipment**. The 8th International

Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, Romênia, 2013. ISBN 978-1-4673-5980-1.

DALZIEL, Charles F. **Electric shock hazard**. IEEE spectrum, fevereiro de 1972.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. **Aterramento Elétrico**. Florianópolis: 6ª Edição do Autor, 2011.

KINDERMANN, Geraldo. **Choque elétrico**. Florianópolis: Edição do autor, 2013.

LANZISERO, Thomas. **Electric shock hazards – risk assessment and safety management**. 2012. ISBN 978-1-4673-1033-8.

LI, ChunLan; DU, SongHuai; XIA, Yue. **Study on equivalent circuit of the human body and its transient response against electric shock**. The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011. ISBN 978-1-4244-9621-1.

LIU, Haijun; MITOLO, Massimo; SHOKOOH, Farrokh. **Thermal sizing and electric shock calculations for equipment grounding conductors**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, n. 4, julho/agosto, 2013.

MAMEDE FILHO, João. **Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento**. São Paulo: Érica, 2010.

MELIPOULOS, A. P. Sakis. **Power systems grounding and transients: na introduction**. New York: Marcel Dekker, 1988.

PARISE, Giuseppe. **A new summary on the IEC protection against electric shock**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, n. 2, março/abril, 2013.

_____; MARTIRANO, L; PARISE, L. **Grounding and bonding: a combined protection against electric shock**. 2014. ISBN 978-1-4799-2288-8.

RAY, Arnab; CLEAVELAND, Rance. **Constructing safety assurance cases for medical devices**. ASSURE, São Francisco, Estados Unidos, 2013. ISBN 978-1-4673-6324-2.

SADIKU, Matthew N. O. **Elements of electromagnetics**. New York: Oxford University Press, 2001.

SANTANA, Crismara Janina da Rosa. **Instalações elétricas hospitalares**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1996.

SILVEIRA, Fernando H.; CONTI, Alberto De; VISACRO, Silvério. **Evaluation of lightning-induced voltages over lossy ground with frequency-dependent soil parameters**. International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014. ISBN 978-1-4799-3544-4.

SUNDE, Erling D. **Earth conduction effects in transmission systems**. New York, Dover Publications, 1968.

TELLÓ, Marcos (Org.). **Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequências**: com apresentação de casos. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

VIJAYARAGHAVAN, G.; BROWN, Mark; BARNES, Malcolm. **Practical grounding, bonding shielding and surge protection**. Oxford: Newnes, 2004.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos elétricos**: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

WILLIAMS, Tim; ARMSTRONG, Keith. **EMC for Systems and Installations**. Oxford: Newnes, 2000.