MARCOS APARECIDO RUIZ GAMITO

Influência do sistema de aterramento na presença de distorção harmônica

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos

2016

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca-EESC/USP

G184i Gamito, Marcos Aparecido Ruiz
Influência do sistema de aterramento na presença de
distorção harmônica / Marcos Aparecido Ruiz Gamito;
orientador Mário Oleskovicz. - - São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação e
Área de Concentração em Engenharia Elétrica) - - Escola
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Qualidade da energia elétrica. 2. Malha do sistema
de aterramento. 3. Cargas não lineares. 4. Distorção
harmônica de tensão. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCOS APARECIDO RUIZ GAMITO.**

Título da dissertação: "Influência do sistema de aterramento na presença de distorção harmônica".

Data da defesa: 13/10/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Mário Oleskovicz**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Marcus Vinicius Borges Mendonça**
(Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM)

APROVADO

Prof. Dr. **Rafael Silva Alípio**
(Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/CEFET-MG)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

EDICATÓRIA

*A Deus por permitir que isto
aconteça, meus familiares, pelo apoio e compreensão.
E a todos os meus amigos que me ajudaram a chegar
aqui.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda minha família e amigos que participaram diretamente ou indiretamente deste trabalho.

Aos meus familiares, que se dedicaram muito para que essa etapa fosse cumprida. Sempre me apoiaram e incentivaram nos momentos difíceis.

Aos meus amigos de trabalho, que incentivaram e que quando possível me ajudaram.

Ao professor Mário Oleskovicz, pela ótima orientação, atenção dispensada, apoio e incentivo na elaboração desse trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, de que de algum modo colaboraram durante a minha pós-graduação na Universidade de São Paulo (USP).

Ao próprio Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo.

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, pela facilidade de acesso às suas instalações e equipamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

*“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último,
melhorar a humanidade.”
(Nikola Tesla)*

RESUMO

GAMITO, M, A, R. **Influência do sistema de aterramento na presença de distorção harmônica**. 2016. 125f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Com o surgimento das novas tecnologias aplicadas aos equipamentos e arranjos geométricos das fontes renováveis de energia, o sistema de aterramento passou a operar com correntes de várias frequências, diferentes da componente fundamental. Estas correntes são provenientes das novas cargas não lineares conectadas e das condições de falta, tornando mais difícil a equipotencialização do sistema de aterramento, devido, principalmente, ao seu tamanho e sua geometria. Neste cenário, esta pesquisa tem como objetivo o estudo do comportamento de um sistema de aterramento operando na presença de correntes com distorção harmônica. Para a modelagem do sistema de aterramento teste, foi utilizada a teoria de linhas de transmissão, considerando parâmetros distribuídos, pela qual o condutor foi modelado em porções ao longo de seu comprimento. Para a modelagem e análise do sistema de aterramento foram utilizados o programa ATP (*Alternative Transients Program*) e uma ferramenta computacional comercial, com o intuito de validar os valores da resistência da malha de aterramento observados. Pelos resultados encontrados, têm-se argumentos para alertar os projetos futuros de sistemas de aterramento para a necessidade e uma melhor análise das situações operacionais passíveis de ocorrência no sistema elétrico que venham a apresentar uma composição harmônica diferente e não desprezível em relação ao componente fundamental.

Palavra-chave: Malha de Aterramento, Qualidade da energia elétrica, Distorção harmônica de tensão, Distorção harmônica de corrente.

ABSTRACT

GAMITO, M, A, R. **Influence of the grounding system in the presence of harmonic distortion.** 2016. 125 pages. Master's Thesis. Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

With the rise of new technology applied to devices and geometric arrangements related to renewable energy sources, grounding systems have started to operate with currents of multiple frequencies, deviating from its fundamental component. These currents come from the connection of new nonlinear loads and fault conditions, which makes the equipotential bonding harder for the grounding system, mainly due to its size and geometry. In this scenario, this research aims to study the behavior of a grounding system operating in the presence of harmonically distorted currents. The transmission line theory was used to model the testing grounding system, based on distributed parameters, through which the conductor was modeled in increments along its length. For modeling and studying the grounding system, the ATP (Alternative Transients Program) and a commercial software tool were used in order to validate the resistance values observed in the grounding grid. Based on the results found, there are arguments to alert future grounding system projects about the need for a better assessment of operational scenarios likely to occur in the electrical system, which may display a different harmonic composition that is not negligible in relation to the fundamental component.

Keyword: Grounding Grid, Power quality, Harmonic voltage distortion, Harmonic current distortion.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	17
LISTAS DE TABELAS	21
LISTAS DE SIGLAS	23
LISTAS DE SÍMBOLOS	25
1. INTRODUÇÃO	27
1.1. Objetivos.....	28
1.2. Apresentação da estrutura do documento	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1. Aterramento e qualidade da energia elétrica.....	32
2.1.1. Aterramento do neutro de um sistema de potência.....	32
2.1.2. Compatibilidade eletromagnética	33
2.1.2.1. O sistema de aterramento para equipamentos eletrônicos.....	34
2.2. Modelagens e métodos aplicados.....	37
2.2.1. Modelagem do aterramento para uma subestação de energia elétrica.....	38
2.2.2. Modelagens analíticas.....	41
2.2.2.1. Modelagem por circuitos elétricos	41
2.2.2.2. Modelagem por linhas de transmissão.....	42
2.2.2.3. Modelagem por campo eletromagnético	43
2.2.2.4. Modelagem híbrida.....	43
2.2.3. Modelagem por métodos numéricos	44
2.2.3.1. Método das diferenças finitas no domínio do tempo.....	45
2.2.3.2. Métodos dos momentos	45
2.2.3.3. Métodos dos elementos finitos	46
2.2.3.4. Método da modelagem por linhas de transmissão.....	47
2.2.4. Modelagem via EMTP/ATP	49
2.3. Trabalhos técnicos científicos relacionados à pesquisa	51
2.3.1. Trabalhos relacionados à modelagem de sistemas de aterramento	51
2.3.2. Trabalhos relacionados à qualidade da energia e aterramento	56
3. METODOLOGIA	59

3.1.	Estudo investigativo bibliográfico	61
3.2.	Determinação das características do solo e do sistema elétrico.....	62
3.3.	Projeto da malha de aterramento pelo método da norma IEEE80	69
3.4.	Projeto da malha de terra pelo método proposto	75
3.5.	Comparação das impedâncias pelos dois métodos	83
4.	SISTEMA DE ATERRAMENTO EM ANÁLISE	85
4.1.	Modelagem do sistema de aterramento via o software comercial	86
4.2.	Modelagem do sistema elétrico de potência via o software ATP.....	95
5.	RESULTADOS	105
6.	CONCLUSÃO	117
6.1.	Continuidade da pesquisa	118
6.2.	Publicações resultantes	119
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - PC e interfaces periféricas com mais de uma referência de terra. Fonte: (IEEE Std-1100, 2005).	35
Figura 2 - Impacto de descargas atmosféricas em um sistema telefônico. Adaptado (IEEE Std-1100, 2005).	36
Figura 3 - Erros típicos na instalação elétrica entre a interligação do cabo terra e o neutro. Adaptado: (IEEE Std-1100, 2005).	37
Figura 4 - Estratificação do solo. Fonte: (MARTINS, 2001).	38
Figura 5 - Modelo de circuito PI para condutores de aterramento. Fonte: (LYNCE, 2007).	50
Figura 6 – Geometria convencional de malha de terra. Fonte: (LYNCE, 2007).	50
Figura 7 - Malha modelada em células PI. Fonte: (LYNCE, 2007).	51
Figura 8 - Diagrama de bloco para a metodologia seguida.	60
Figura 9 - Arranjo de Wenner. Fonte: (ABNT NBR 7117, 2012).	63
Figura 10 - Arranjo de Wenner na prática. Fonte: (MARTINS, 2001).	64
Figura 11 - Arranjos das direções das hastes para a estratificação do solo.	65
Figura 12 - Exemplo do cálculo da estratificação do solo via software em duas camadas.	65
Figura 13 - Modelo de solo estratificado (antes "a" e depois "b"). Fonte: (ABNT NBR 7117, 2012).	66
Figura 14 - Exemplo gráfico da resistividade ($\Omega.m$) versus a distância (m). Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).	67
Figura 15 - Curva de Sunde. Fonte: (IEEE Std-80, 2000).	68
Figura 16 - Exemplo de contribuição da corrente de curto-circuito gerada por um software de cálculo.	69
Figura 17 - Diagrama de blocos para a modelagem da malha do sistema de aterramento.	70
Figura 18 – C_s versus a espessura da camada superior de concreto ou brita. Fonte: (IEEE Std-80, 2000).	74
Figura 19 - Exemplo de divisão de uma malha de aterramento em uma célula <i>PI</i>	76

Figura 20 - Determinação do valor da impedância da malha de aterramento modelada via o software ATP.	79
Figura 21 - Exposição à tensão de toque. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).	79
Figura 22 - Circuito equivalente considerando a tensão de toque. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).	80
Figura 23 - Exposição à tensão de passo. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).	80
Figura 24 - Circuito equivalente para a tensão de toque. Adaptado: Fonte: (IEEE Std-80, 2000).	81
Figura 25 - Circuito equivalente de Thévenin para a tensão de passo. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).	81
Figura 26 – Exemplo da tensão de toque medida via o software ATP.....	82
Figura 27 – Exemplo da tensão de passo medida via o software ATP.....	83
Figura 28 – Área de localização da malha do sistema de aterramento real em análise.....	85
Figura 29 - Planta baixa do sistema de cogeração.....	86
Figura 30 – Estratificação do solo via o software comercial <i>TecAt</i>	87
Figura 31 – Valor da seção do condutor calculado via o software comercial.	88
Figura 32 – Malha de aterramento (as linhas representam os condutores e os pontos as hastes).	89
Figura 33 - Valor da resistência de aterramento via o software <i>TecAt</i>	90
Figura 34 – Níveis de tensão de passo (software <i>TecAt</i>).	91
Figura 35 – Níveis de tensão de toque (software <i>TecAt</i>).	92
Figura 36 – Níveis de tensão de passo (software <i>TecAt</i>).	93
Figura 37 - Níveis de superfície da malha em duas dimensões (software <i>TecAt</i>).	94
Figura 38 – Potencial da malha em três dimensões (software <i>TecAt</i>).	94
Figura 39 – Potencial da superfície em três dimensões (software <i>TecAt</i>).	95
Figura 40 – Divisão da malha em células <i>PI</i> para frequências até 1 MHz.....	97
Figura 41 - Divisão da malha em células <i>PI</i> para frequências entre 1 MHz e 4 MHz.	97

Figura 42 – Divisão da malha para frequências até 1 MHz.....	98
Figura 43 - Divisão da malha para frequências acima de 1 MHz e até 4 MHz.	98
Figura 44 - Método de medição do valor da impedância da malha de terra via o software ATP para frequências de até 1 MHz.	103
Figura 45 – Variação da resistividade do solo da 1ª e 2ª camada em ohms/m.	107
Figura 46 – Variação da permissividade relativa em relação à variação da frequência.	107
Figura 47 – Valores da resistência via o software comercial e valores da impedância via o software ATP/EMTP em relação à variação da frequência.	110
Figura 48 – Variação da resistência e da reatância indutiva da malha via o software ATP em relação à frequência.....	111
Figura 49 – Diferença entre as duas resistências calculadas via o software comercial e o ATP.	111
Figura 50 – Diferença de potencial entre as duas extremidades da malha de aterramento via o software ATP.	114

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de diferentes modelos. Adaptado: (POTIER <i>et al.</i> , 2010).....	44
Tabela 2 – Comparação entre os métodos numéricos. Adaptado: (POTIER <i>et al.</i> , 2010).....	49
Tabela 3 Tabela de dados dos condutores. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).	72
Tabela 4- Estratificação do solo em duas camadas via software comercial.....	87
Tabela 5 – Frequências para a qual a malha será avaliada.	96
Tabela 6 – Variação das características do solo em relação à variação da frequência.....	106
Tabela 7 – Valores da resistência calculados via o software comercial em relação à variação da resistividade do solo.	108
Tabela 8 Comparação entre os valores da resistência da malha de aterramento via o software comercial com os simulados via o software ATP/EMTP, conforme injeção de corrente Figura 44.	109
Tabela 9 – Valores da resistência da malha de terra em relação à impedância da malha via o software ATP em componentes retangulares e polares.....	112
Tabela 10 – Diferença de potencial entre as duas extremidades da malha de terra via o software ATP na ocorrência de uma injeção de corrente em uma das extremidades de 1000 A.....	113
Tabela 11 – Resumos dos resultados simulados pelo método proposto.....	115

LISTAS DE SIGLAS

ATP - *Alternative Transients Program*

CNC - *Computer Numeric Control*

ED – Equações Diferenciais

EI – Equações Integrais

EMTP - *Electromagnetic Transients Program*

FD – *Frequency Domain*

FDTD - *Finite-Difference Time-Domain*

FEM – *Finite Element Method*

FETD – *Time-Domain Finite-Element Methods*

MoM – *Method of Moments*

PDE – *Partial Differential Equation*

RMS – *Root Mean Square*

TD – *Time Domain*

THD – *Total Harmonic Distortion*

TLM – *Transmission-Line Modeling*

LISTAS DE SÍMBOLOS

V - *Volts*

A – *Ampere*

Ω – *Ohm*

s – *segundos*

$^{\circ}\text{C}$ – *graus Celsius*

J – *Joules*

mm – *milímetro*

mm² – *milímetro quadrado*

H – *Henry*

F – *Faraday*

VA – *volt-ampere*

cm³ – *centímetro cúbico*

k – *Kilo*

VA – *volt-ampere*

μ - *micro*

m – *metro*

m² – *metro quadrado*

Hz - *Hertz*

1. INTRODUÇÃO

O aterramento de sistemas elétricos tem despertado e mantido ao longo do tempo o interesse de diversos pesquisadores. Muito provavelmente, tal interesse está relacionado à importância do aterramento para um bom desempenho do sistema elétrico como um todo e, principalmente, devido às questões de segurança do corpo técnico diretamente envolvido, bem como dos usuários finais da energia elétrica.

Historicamente, os primeiros esquemas de aterramento foram frutos de uma longa evolução, orientada pelo objetivo de proteger melhor as pessoas contra choques elétricos e dos efeitos gerais da passagem de corrente pelo corpo humano (IEEE Std-80, 2000).

No Brasil, devido às características peculiares do solo, que possui valor médio de resistividade elevado (superior a $1.000 \Omega.m$ na maior parte do território) (ALÍPIO, 2008), o projeto e construção de malhas de aterramento adequadas à segurança dos seres vivos, e que garantam um bom desempenho do sistema, constituem laboriosa tarefa. Nesse sentido, os sistemas de aterramento apresentam uma singular importância no que concerne a sua influência no desempenho do sistema e na proteção humana (IEEE Std-142, 2007).

Neste contexto, esta pesquisa apresenta uma investigação do comportamento de uma malha de aterramento na presença de correntes harmônicas, que podem ser decorrentes, principalmente, da massiva instalação de cargas não lineares nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) atuais e de distúrbios transitórios provocados por chaveamentos e descargas atmosféricas.

Toda a modelagem da malha do sistema de aterramento e as simulações foram realizadas via a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*), no intuito de verificar a resposta do sistema de aterramento na presença das correntes harmônicas.

Vale frisar que atualmente nem todas as ferramentas computacionais comerciais disponíveis no mercado calculam o valor da impedância da malha do sistema de aterramento para frequências diferente de zero (componente em corrente contínua). Vale adiantar que através da ferramenta computacional ATP foi então possível modelar a malha do sistema de aterramento para varias frequências. Frente a estas frequências, foi possível levar em consideração os parâmetros dos condutores elétricos da malha para distintas situações, visto

que os condutores são considerados como ideais e operando na frequência fundamental na maioria das simulações.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar uma malha de aterramento frente às distorções harmônicas, principalmente as decorrentes da alimentação de uma carga não linear ou de algum distúrbio do sistema. Sabe-se que atualmente é muito comum encontrar cargas não lineares por todo o SEP, desde instalações residenciais, comerciais, e, principalmente, industriais, bem como a manifestação de distúrbios impulsivos ou transitórios provocados por chaveamentos e descargas atmosféricas, dentre outras situações. Também é fato que a distorção harmônica de tensão e/ou de corrente total do sistema elétrico e os transitórios trazem muitos problemas aos componentes do SEP, como transformadores, cabos, disjuntores, bancos de capacitores, etc.. Neste cenário, um fator importante associado ao aterramento é a sua capacidade de drenar as correntes harmônicas passíveis de ocorrência sem causar interferências às cargas sensíveis.

Neste contexto, foi desenvolvida uma modelagem de malha de aterramento via o software ATP que é capaz de contemplar a distribuição da corrente elétrica para diversas frequências, além da componente fundamental de 60 Hz. Pela modelagem, pode-se observar o comportamento do sistema de aterramento para frequências distintas, desde o componente em corrente contínua, até altos componentes harmônicos, como os que podem ser caracterizados por descargas atmosféricas. Vale destacar que como desenvolvida, a abordagem, além de representar o sistema de aterramento permite também representar o SEP de interesse em uma mesma simulação.

Toda a modelagem e análises que serão melhores apresentadas neste documento possuem como interesse final avaliar os parâmetros e o desempenho da malha de aterramento projetada na presença de componentes harmônicos.

1.2. Apresentação da estrutura do documento

Este documento está dividido em seis capítulos além da introdução apresentada.

O capítulo dois traz uma revisão bibliográfica sobre o assunto, assim como vários trabalhos técnico-científicos relacionados ao tema central.

O capítulo três traz uma nova metodologia para a modelagem de um sistema de aterramento quando comparado à modelagem convencional.

Já no capítulo quatro, é apresentado um sistema de aterramento real modelado conforme descrito no capítulo três.

O capítulo cinco apresenta os resultados das simulações realizadas, bem como uma discussão buscando denotar por partes as considerações adotadas.

O capítulo seis apresenta as conclusões delineadas sobre as simulações realizadas explicando as principais divergências entre o método tradicional de modelagem do sistema de aterramento e o método proposto.

Por fim, o capítulo sete apresenta as referências bibliográficas tomadas como base para a compilação deste documento como um todo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo foi dividido em três tópicos diferentes. O primeiro tópico apresenta o contexto associado ao aterramento e a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Já o segundo apresenta a modelagem do aterramento e métodos aplicados. O terceiro tópico trás alguns dos trabalhos técnico-científicos encontrados até o momento relacionados à pesquisa e tomados como referências para a compilação do material a ser apresentado.

Em relação às metodologias para a modelagem do sistema de aterramento, verifica-se também que, a despeito da grande quantidade de trabalhos encontrados, em todos os casos, os modelos são definidos a partir de uma aproximação pela teoria de campos eletromagnéticos (POTIER *et al.*, 2010), teoria de circuitos elétricos (MELIOPOULOS e MOHARAM, 1983), e teoria de linhas de transmissão (SUNDE, 1968), apresentando cada uma, vantagens e desvantagens.

Vale comentar que o benefício de conhecer todos os tipos de modelagem é um fator determinante para um projeto de uma malha de aterramento. Em muitas situações uma malha de aterramento deve responder para duas finalidades. As finalidades apontadas são as que seguem (POMILIO, 2015):

- Proteção de seres vivos; e
- Desempenho do sistema aterrado.

Um bom sistema de aterramento que atenda as três finalidades anteriores deve possuir as seguintes características (POMILIO, 2015):

- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança reduzindo a possibilidade de choques graves ou desconfortáveis em pessoas e animais;
- Minimizar os danos materiais em equipamentos e nas linhas, em caso de falhas elétricas provocadas por deficiência ou falhas no isolamento das partes vivas;
- Possuir um valor de resistência de aterramento o mais baixo possível a fim de descarregar cargas elétricas e correntes indevidas para a terra;
- Dar maior confiabilidade e rapidez na atuação dos sistemas de proteção; e
- Proporcionar uma referência comum para as tensões do sistema.

2.1. Aterramento e qualidade da energia elétrica

Da prática, tem-se que um aterramento inadequado resulta em um tempo de parada (interrupção) desnecessário dos processos que dependam da energia elétrica, aumentando ainda o risco da ocorrência de falhas nos equipamentos. Sem um sistema de aterramento eficaz, também existe o risco de erros nas medidas das variáveis do processo e de operação dos instrumentos, problemas de distorção harmônica, problemas relacionados ao fator de potência e uma série de outras possíveis complicações (IEEE Std-1100, 2005).

Dos apontamentos encontrados, sabe-se que todo ano há um prejuízo de bilhões de dólares devido a incêndios causados por problemas elétricos nas instalações dos usuários finais da energia elétrica. Isso sem contar os custos dos litígios relacionados e a perda de produtividade individual e empresarial. No contexto da QEE, as principais causas dos problemas estão relacionadas com sistemas inapropriados de aterramento do neutro e devido à compatibilidade (ou melhor, incompatibilidade) eletromagnética (POMILIO, 2015).

Vale lembrar também que a mitigação ou amenização dos transitórios impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e dos transitórios oscilatórios, causados por chaveamentos, é diretamente ou indiretamente dependente do sistema de aterramento. Neste sentido é função do sistema de aterramento drenar diretamente as correntes de descargas atmosféricas e, indiretamente, drenar também as correntes provenientes dos transitórios, provocadas por chaveamentos ou distúrbios na rede de energia (SANTOS, 2010).

2.1.1. Aterramento do neutro de um sistema de potência

Como é de conhecimento, o aterramento do neutro não serve apenas para drenar correntes de retorno, sua função é também a de proporcionar uma referência comum para as tensões do sistema (POMILIO e DECKMANN, 2010), devido a terra apresentar um potencial de zero volt, em condições normais.

Contudo, em virtude de a terra apresentar certo valor de condutividade, nem sempre é possível manter um mesmo potencial de um sistema elétrico entre dois sistemas com neutro isolados a certa distância, principalmente quando o sistema possui cargas desequilibradas.

Deste fato, justifica-se o porquê dos sistemas de redes de distribuição de energia de muitos países serem multi aterrados (ROBERTS *et al.*, 2001).

Pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 5410 (ABNT NBR 5410, 2004) define o padrão nacional de instalações elétricas de baixa tensão e, dentre inúmeros aspectos, os métodos de aterramento. Porém a NBR permite que o neutro seja ou não interligado por um condutor, ou somente pela terra. No entanto, para cada configuração existem vantagens e desvantagens.

Sobre a importância do aterramento do neutro e do fio de retorno para a QEE podem-se destacar os seguintes pontos (POMILIO, 2015):

- Redução do risco de sobretensões nas fases;
- Aumento da segurança contra descargas ao toque;
- Aumento da confiabilidade da proteção;
- Redução do risco de mau funcionamento de equipamentos;
- Diminuição do risco de falta sustentada de fase;
- Detecção da presença de harmônicas múltiplas de três; e
- Viabilização do atendimento de cargas monofásicas sem desequilibrar as tensões.

2.1.2. Compatibilidade eletromagnética

Tem-se da literatura que o termo compatibilidade eletromagnética é empregado para descrever as interações entre os sistemas elétricos e eletrônicos. Esta interação pode ser irradiada pelo ar (emissão irradiada), ou via conexão elétrica (emissão conduzida), sendo de extrema importância o seu conhecimento para ser aplicado ao estudo de QEE (IEEE Std-1100, 2005).

Como fato, atualmente, as instalações elétricas comerciais e industriais possuem uma dimensão física mais significativa em relação às instalações antigas, o que reflete na existência de mais equipamentos eletrônicos nas instalações. Isto faz com que se torne mais difícil equipotencializar as tensões de uma malha do sistema de aterramento, quando esta possui uma corrente circulante de frequência maior em relação ao componente fundamental de 60 Hz. Muitas vezes o equipamento eletrônico que gera a corrente de frequência elevada,

acima de 60 Hz, é imune a essa corrente. Contudo, a tensão que é gerada quando essa corrente circula pelo sistema de neutro, ou da malha de terra, pode resultar em uma má operação do mesmo, o que pode gerar uma operação inadequada dos demais equipamentos e prejuízos financeiros, além da perda de produção (VENHUIZEN, 2002).

2.1.2.1. O sistema de aterramento para equipamentos eletrônicos

Conforme anteriormente comentado, um bom sistema de aterramento possui vários objetivos, dos quais, apontam-se os dois principais: promover segurança às pessoas e um bom funcionamento dos equipamentos. O primeiro é bem conhecido por todos, porém o segundo, ainda não é bem entendido pela maioria.

Como uma função não muito bem entendida do sistema de aterramento, tem-se a de promover uma referência de terra para o equipamento eletrônico.

Atualmente, existe uma imensa quantidade de equipamentos eletrônicos que geram ruídos de corrente dispersos por toda parte, desde os instalados nas indústrias, aos nas residências. Esses equipamentos são capazes de controlar desde simples a complexos processos. No entanto, até bem pouco tempo, estes se restringiam apenas a locais específicos, como em subestações conversoras de corrente contínua e em certas indústrias. Quando eram localizados em lugares específicos, era mais fácil de controlar os ruídos (distúrbios), pois as dimensões físicas do local eram de menor tamanho e com isso de mais fácil dimensionamento para um bom sistema de aterramento, melhor equipotencializado, e também um bom sistema de filtro para drenar os ruídos (POMILIO, 2010).

Segundo o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* - IEEE (IEEE Std-1100, 2005), dentre os vários problemas encontrados na prática sobre o contexto apresentado, seguem três cenários (Figuras 1, 2 e 3) de uma instalação elétrica onde podem ocorrer esses problemas.

A Figura 1 retrata um sistema de processamento eletrônico para controle de um processo industrial (computador, controlador lógico programável – CLP, e periféricos) interligado por cabos de comunicação e de energia, com dois sistemas de aterramento diferentes. Um dos problemas seria a perda dos dados, devido à conexão entre o computador (PC – *Personal Computer*) e um CLP, pois o cabo de comunicação não terá uma referência de

terra comum entre os dois lados da rede de transmissão. Com isso o sinal digital que possui dois estados (0 ou 5 V), não será identificado com precisão, ocorrendo falhas ou perdas de dados na comunicação. Além disso, outro problema é que os dois sistemas de aterramento irão promover uma diferença de potencial (ΔV_G) entre o equipamento e o quadro de energia, fazendo circular uma corrente pelo cabo terra, e com isso induzindo correntes indesejadas aos cabos de comunicação que estão próximos dos cabos de alimentação, provocando falhas e perdas de sinal.

Figura 1 - PC e interfaces periféricas com mais de uma referência de terra. Fonte: (IEEE Std-1100, 2005).

A Figura 2 retrata um equipamento de fax, conectado a uma rede de energia elétrica e ao sistema de telecomunicação. Porém, ambos os sistemas possuem um sistema de aterramento diferente. Nesta situação, a ocorrência de uma descarga atmosférica no sistema de telefonia acarretará em um potencial elevado no sistema de aterramento do mesmo. Em conclusão, o fax será submetido há uma diferença de potencial muito elevada, devido a grande diferença de potencial entre os dois sistemas de aterramento, pois estes não estão interligados. A diferença de potencial no qual o equipamento é submetido é capaz de queimar o equipamento em segundos.

Figura 2 - Impacto de descargas atmosféricas em um sistema telefônico. Adaptado (IEEE Std-1100, 2005).

A Figura 3 retrata três erros típicos na instalação elétrica entre a interligação do cabo terra e neutro. Percebe-se que a forma correta de interligação do sistema de neutro e o sistema de terra faz toda diferença, em relação à drenagem correta de correntes parasitas.

Muitas vezes há uma interligação física entre as barra de neutro e a barra de terra nos quadros de distribuição. No entanto, sabe-se que a função principal do sistema de terra do circuito é operar somente na ocorrência de uma falha de funcionamento do circuito, como drenagem de correntes de curto-circuito e correntes de fuga. A função do cabo neutro no circuito serve basicamente para caminho da corrente de retorno do circuito. Quando os dois sistemas são interligados as correntes de fuga que circulam pelo cabo terra podem circular pelo neutro dos outros circuitos adjacentes e com isso causar interferências devido à queda de tensão gerada por essas correntes. Um equipamento totalmente isolado da fonte perturbadora pode sofrer danos devido a essas interferências.

Figura 3 - Erros típicos na instalação elétrica entre a interligação do cabo terra e o neutro.
Adaptado: (IEEE Std-1100, 2005).

2.2. Modelagens e métodos aplicados

Dentre os vários objetivos que o sistema de aterramento deve atender, os mais usuais são para a segurança de pessoas e danos em equipamentos. Como função principal o mesmo deve minimizar a tensão de passo e de toque devidos as correntes de curto-circuito em subestações de energia elétrica e também drenar descargas atmosféricas (IEEE Std-80, 2000).

Para ambos os casos a modelagem do sistema de aterramento possui algumas divergências, sendo a principal, a frequência do sinal de corrente que a mesma será submetida. Para ser implementada com foco nas aplicações em subestações de energia, a frequência de operação do sistema será de 60 Hz. Já frente às descargas atmosféricas, provocando transitórios impulsivos, as correntes de descargas atmosféricas podem chegar à frequência da ordem de MHz. Para cada análise existe um método de modelagem mais apropriado.

2.2.1. Modelagem do aterramento para uma subestação de energia elétrica

Um dos primeiros passos para o projeto de aterramento de uma subestação de energia elétrica é a obtenção de dados para a modelagem do solo. De forma geral, a determinação de um modelo matemático equivalente para o solo em uma dada região onde será implantada a subestação exige a realização de diversas medidas. Dentre elas a execução de medições para a determinação de um parâmetro conhecido por resistividade do solo.

Para o dimensionamento do sistema de aterramento de uma subestação elétrica, devem-se seguir os seguintes passos (IEEE Std-80, 2000):

- Levantamento em campo da resistividade do solo;
- Estratificação do solo em duas camadas ou mais dependendo da análise;
- Cálculo da resistividade aparente do solo;
- Dimensionamento do condutor da malha de aterramento pelo nível de curto-circuito monofásico da planta;
- Cálculo dos limites de tensão de passo e de toque e corrente de fibrilação em relação ao piso da subestação da malha;
- Cálculo da malha com uma resistência de aterramento resultante $\leq 10\Omega$; e
- Verificação dos limites de tensão de passo e de toque da malha projetada.

Para a estratificação do solo é necessário injetar uma corrente e medir a tensão nele observada, ou seja, calcular a resistividade do solo pelo valor da resistência medida. Devido ao método de *Wenner* (ABNT NBR 7117, 2012), os eletrodos são espaçados entre si até a distância desejada em metros. No início a distância de “a” será de meio metro e a última de dezesseis metros, variando sempre o dobro, como: meio, um, dois, quatro, oito, até dezesseis, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Estratificação do solo. Fonte: (MARTINS, 2001).

Na qual:

ρ é a resistividade do solo em ohm.m;

I é a corrente elétrica em A;

V é a tensão em Volts; e

a é a distância entre os eletrodos em m;

Logo após as medidas de resistências, calcula-se a resistividade do solo conforme a Figura 4. Com esses dados, faz-se a estratificação do solo em duas camadas com ajuda de um software comercial ou através do Método de YOKOGAWA (método gráfico manual) (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995), e tem-se então, um modelo de solo estratificado em duas camadas.

Para o dimensionamento da seção dos condutores da malha do sistema de aterramento, deve-se utilizar a Equação 1 (IEEE Std-80, 2000), onde o fator determinante para a seção dos condutores é a corrente de curto-circuito da planta em questão.

$$A_{mm^2} = I \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (1)$$

Na qual:

I é a corrente *rms* (*root means square*) em kA;

A_{mm^2} é seção do condutor em mm²;

T_m é a máxima temperatura permitida pelo condutor em °C;

T_a é a temperatura ambiente em °C;

T_r é a temperatura referente a constante de cada material em 20 °C;

α_r é o coeficiente térmico da resistividade do material na T_r em 1/°C;

ρ_r é a resistividade do condutor na temperatura T_r em $\mu\Omega$ -cm, com $K_o = 1/\alpha_o$ ou $(1/\alpha_r) - T_r$ em °C;

t_c é a duração da corrente de falta em segundos (s); e

$TCAP$ é a capacidade térmica por unidade de volume [J/(cm³·°C)].

Para o conhecimento da máxima tensão de passo e de toque que o corpo humano pode suportar sem sofrer danos, tem-se as Equações 2 e 3 (IEEE Std-80, 2000).

$$E_{pa} = \left(\frac{157 + 0,942.C_s.\rho_b}{\sqrt{t_p}} \right) \quad (2)$$

$$E_{tc} = \left(\frac{157 + 0,236.C_s.\rho_b}{\sqrt{t_b}} \right) \quad (3)$$

Nas quais:

ρ_b é a resistividade da cobertura, onde se encontra a malha de terra;

t_p é o tempo da proteção [s]; e

C_s é o fator de redução conforme o IEEE Std 80 (2000), associado à presença de uma camada de material colocada no solo acima da malha, normalmente composta por brita ou concreto.

Para determinar a máxima corrente de choque que uma pessoa pode suportar em um determinado tempo de atuação da proteção, deve-se utilizar a Equação 4 (IEEE Std-80, 2000):

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{t_p}} \quad (4)$$

Onde I_{ch} é a corrente de fibrilação que uma pessoa de 50 kg pode suportar em mA.

Feito o dimensionamento do condutor que compõe a malha do sistema de aterramento e os cálculos limites de tensão de passo e de toque, o próximo passo é a determinação da geometria da malha para que possa atender as tensões de passo e de toque, conforme já foram calculadas.

Em primeiro instante, faz-se uma malha quadrada com as dimensões da subestação em questão, sendo esta quadriculada a cada três metros tanto na vertical como na horizontal. Acrescenta-se nas intersecções dos cabos (rede quadriculada) as hastes de aterramento (configuração ideal). Via software, verificam-se os limites permitidos para as tensões de passo

e de toque. Lembrando-se que o valor da resistência de aterramento deve possuir um valor menor possível (ABNT NBR 5419, 2015), um baixo valor de resistência e um ótimo arranjo geométrico do sistema de aterramento trazem grandes benefícios ao sistema elétrico de potência.

2.2.2. Modelagens analíticas

As aplicações dos métodos analíticos e numéricos utilizados na modelagem e análise dos transitórios em sistemas de aterramentos, de baixas ou altas frequências, resumem-se em (POTIER *et al.*, 2010):

- Modelagem por circuitos elétricos;
- Modelagem por campos eletromagnéticos;
- Modelagem híbrida; e
- Modelagem por linhas de transmissão.

Há de se considerar ainda que na modelagem analítica os fenômenos transitórios são caracterizados por duas formas de tratamento. Uma baseada no domínio da frequência (*Frequency Domain* - FD), procedendo à volta ao domínio tempo (*Time Domain* - TD) utilizando as transformadas inversas de Fourier ou de Laplace. As modelagens por circuitos elétricos e por linhas de transmissão podem utilizar diretamente o domínio do tempo ou frequência para o cálculo da resposta dos sistemas de aterramento em uma ampla faixa de frequências. Outras modelagens como, por exemplo, campos eletromagnéticos, podem utilizar o domínio da frequência ou do tempo (POTIER *et al.*, 2010).

No que segue, descreve-se o estudo das abordagens, métodos e procedimentos aplicáveis na análise dos problemas envolvendo eletricidade, empregados e utilizados na maioria dos sistemas elétricos em uso, tanto do ponto de vista da modelagem analítica como da modelagem numérica.

2.2.2.1. Modelagem por circuitos elétricos

Na modelagem por circuitos elétricos, o eletrodo de aterramento é modelado como um circuito elétrico equivalente composto por uma associação de elementos resistivos, capacitivos e indutivos. O acoplamento entre os condutores deve considerar as indutâncias mútuas entre os condutores em paralelo. As principais características desse modelo são:

- Divisão do eletrodo de aterramento em vários segmentos;
- Simplificação em um circuito equivalente para cada segmento e cálculo dos parâmetros elétricos próprios e mútuos; e
- Utilização da solução de equações nodais do circuito equivalente utilizando as leis de Kirchhoff.

Meliopoulos e Moharam (1983) usaram este tipo de modelagem para estudar transitórios em sistemas de aterramento, na qual, cada segmento do condutor de aterramento foi substituído por uma linha de transmissão com perdas e duas derivações (*shunts*).

Esse modelo é muito similar com a solução utilizada pelo programa de análise de transitórios eletromagnéticos (EMTP - *Electromagnetic Transients Program*).

Vale comentar que esse tipo de modelagem é de fácil compreensão, porque trabalha com componentes relacionados a circuitos elétricos. No entanto, se torna um pouco difícil a consideração da ionização do solo para esta modelagem.

2.2.2.2. Modelagem por linhas de transmissão

Essa modelagem foi introduzida por (SUNDE, 1968), a partir dos conceitos aplicáveis às linhas de transmissão, onde uma porção do condutor é modelada por parâmetros distribuídos por unidade de comprimento dependente da frequência (ondas viajantes). O intuito dessa modelagem é avaliar o comportamento de um condutor horizontal na superfície do solo submetido a uma descarga atmosférica direta (POTIER *et al.*, 2010).

A modelagem trata os condutores através da teoria de ondas viajantes, sendo esta aprimorada e incorporada ao EMTP por (MARTI, 1982). A partir deste refinamento, as tensões e as correntes ao longo do eletrodo podem ser calculadas usando o modelo do EMTP.

Essa modelagem por linhas de transmissão possui o benefício de considerar o efeito da ionização do solo para uma abordagem no domínio do tempo, possibilitando incluir o acoplamento mútuo entre os eletrodos e prever o atraso de propagação do impulso. Esse

método pode ser utilizado para a avaliação em altas frequências, sendo bastante apropriado para estudos associados às descargas atmosféricas, requerendo uma menor capacidade de processamento computacional, quando comparado ao modelo de campo eletromagnético.

2.2.2.3. Modelagem por campo eletromagnético

Por se basear nas equações de Maxwell, com mínimas aproximações, esse método é o mais rigoroso e mais preciso, e pode ser implementado usando o método de elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*) ou o Método dos Momentos (MoM – *Method of Moments*).

O modelo baseado no MoM, desenvolvido por (GRCEV, 1992), para analisar o comportamento transitório em sistemas de aterramento usa as equações de Maxwell como base para sua modelagem.

Como anteriormente colocado, a exatidão é a grande vantagem do método, devido a mínimas aproximações em sua modelagem. Porém, o mesmo é complexo de ser programado. A desvantagem é que devido ao fato do modelo se basear em uma solução no domínio da frequência, a inclusão de não linearidades devido à ionização do solo não é uma tarefa fácil.

Com o auxílio do FEM associado à modelagem eletromagnética, tem-se elevada flexibilidade de discretização da geometria e do meio, podendo ser incluída a ionização do solo, desenvolvido no domínio da frequência. O FEM resolve diretamente as equações de Maxwell, razão pela qual é muito utilizado.

Contudo, esta abordagem, devido ao tempo de simulação, torna-se inviável para ser implementada em um sistema considerando várias frequências, como, por exemplo, para os transitórios impulsivos decorrentes das descargas atmosféricas.

2.2.2.4. Modelagem híbrida

Essa modelagem, conforme o próprio nome sugere, baseia-se na utilização de uma mistura entre a modelagem por circuitos elétricos e a modelagem por campos

eletromagnéticos, sendo desenvolvida por (DAWALIBI, 1986) e, posteriormente modificada por (ANDOLFATO, BERNARDI e FELLIN, 2000).

A vantagem desse modelo em relação aos demais, é que o mesmo fornece resultados com grande exatidão em termos das grandezas de circuitos (correntes e tensões), que são as de maior interesse do ponto de vista de engenharia. As Tabelas 1 apresentam alguns critérios importantes relacionados aos modelos analíticos para transitórios em sistemas de aterramento segundo (POTIER *et al.*, 2010).

Tabela 1 – Comparação de diferentes modelos. Adaptado: (POTIER *et al.*, 2010).

Modelo	Expressão Matemática	Compreensão	Precisão	Procedimento de Solução	Desempenho computacional necessário
Eletromagnético	Trabalhosa	Difícil	Mais preciso	Trabalhoso	Grande
Circuitos	Simples	Fácil	Preciso	Simples	Pequena
Híbrido	Trabalhosa	Difícil	Preciso	Trabalhoso	Grande
Linha de Transmissão	Mais simples	Fácil	Preciso	Simples	Pequena

2.2.3. Modelagem por métodos numéricos

A complexidade da resolução analítica de uma modelagem de sistema de aterramento utilizando os métodos anteriormente apresentados se torna inviável quando a malha de aterramento apresentar uma geometria mais complexa e o solo não for de resistividade homogênea. Nesses casos o uso de métodos numéricos para análise e modelagem é uma alternativa atraente. Na verdade, os métodos numéricos de análise e modelagem de sistema de aterramento solucionam numericamente as equações de Maxwell, sujeitas a determinadas condições de contorno. Em geral, essas metodologias são classificadas em modelos de Equações Diferenciais (ED) e em modelos de Equações Integrais (EI). Do ponto de vista computacional, essas técnicas podem ser aplicadas para a solução de problemas no domínio do tempo ou no domínio das frequências (POTIER *et al.*, 2010).

Várias metodologias foram desenvolvidas e vêm recebendo constantes aprimoramentos ao longo dos últimos anos, como o MoM, o método de elementos finitos (FEM), o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD – *Finite-Difference*

Time-Domain) e a modelagem por linhas de transmissão (TLM – *Transmission-Line Modeling*).

Nos próximos itens são descritos e analisados os principais métodos numéricos utilizados para a modelagem e análise de transitórios em aterramento (impulsivos) (POTIER *et al.*, 2010).

2.2.3.1. Método das diferenças finitas no domínio do tempo

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD - *Finite-Difference Time-Domain*) se baseia na discretização das equações de Maxwell diretamente no tempo e espaço, dividindo o volume de interesse em células unitárias. No entanto, a malha gerada por várias células necessita ser uniforme. Sendo assim, a densidade da malha é determinada pelo menor detalhe de interesse do modelo. A ideia principal do algoritmo é aplicar o conceito de diferenças finitas na forma diferencial da equação de Maxwell.

O método iterativo FDTD é aquele onde os campos elétricos e magnéticos são calculados a cada passo de tempo. Esses campos são posteriormente propagados através da malha de elementos, representando dessa forma o fenômeno transitório. O uso típico do FDTD para a simulação de problemas de aterramento impulsivo envolve a excitação do sistema modelado por um pulso de correntes sendo registradas as totalidades dos campos ao longo das células da malha durante todo o período transitório considerado.

O FDTD é um método onde todo o domínio computacional é discretizado, não sendo necessário resolver um conjunto de equações. Devido a isso, é matematicamente menos denso e mais intuitivo que outros métodos numéricos como, por exemplo, o método dos momentos.

2.2.3.2. Métodos dos momentos

Considerado uma técnica no domínio da frequência e baseado no método dos “pesos residuais” o MoM foi introduzido por (HARRINGTON, 1968), onde uma equação integral é obtida através do uso de funções de *Green* no espaço livre. Essa equação integral é

solucionada pela sua redução a um sistema de equações. Dessa forma, o MoM mostra ser apropriado para resolver as integrais presentes no equacionamento de Maxwell. Posteriormente, o uso de diferentes funções de base e procedimentos de discretização conferiram ao MoM novas versões, sendo introduzido também o uso da teoria das imagens modificadas para consideração da interface solo e ar (SADIKU, 2009).

Usado mais comumente, o MoM se baseia na formulação da corrente de superfície (efeito *skin*) onde a discretização da mesma é feita através de elementos triangulares e retangulares. No caso de altas frequências provenientes do período transitório de descargas atmosféricas, a relação entre o tamanho do elemento igual a $\lambda/10$ é desejável para se obter uma boa precisão, onde λ é o comprimento de onda. O procedimento para a programação do método dos momentos usualmente envolve quatro passos (SADIKU, 2009):

- Derivar a equação integral apropriada;
- Discretizar a equação integral em uma matriz de equações usando bases ou funções de expansão e funções de ponderação;
- Estimar os elementos da matriz; e
- Solucionar a matriz de equações e obter os parâmetros de interesse.

Por ser possível aplicar uma transformada inversa de Laplace ou Fourier, esse método no domínio da frequência, pode ser aplicado à solução de problemas envolvendo transitórios. O tempo computacional e a memória requerida aumentam drasticamente para análise em mais de uma frequência. Adicionalmente, para a análise de estruturas contendo materiais não homogêneos, um método híbrido composto por MoM e FEM pode ser apropriado (YUAN, 1990).

2.2.3.3. Métodos dos elementos finitos

É uma técnica no domínio da frequência usada para solucionar equações diferenciais parciais (PDE – *Partial Differential Equation*). Embora possua uma formulação no domínio do tempo, chamada método de elementos finitos no tempo (FETD - *Time-Domain Finite-Element Methods*), sua aplicação no domínio da frequência é mais usual. O FEM foi concebido originalmente para análise estrutural, passando a ser utilizado para a solução de problemas de eletromagnetismo na década de 60 (POTIER *et al.*, 2010).

A análise utilizando o FEM envolve basicamente quatro passos:

- Discretizar a região de interesse (domínio de estudo), em sub-regiões ou elementos tipicamente triangulares ou tetraédricos (existem outros tipos de elementos finitos);
- Obter as equações de campo nas superfícies de cada elemento;
- Juntar todos os elementos na região da solução utilizando uma matriz de equações; e
- Solucionar o sistema de equações obtido.

A discretização do domínio de estudo em elementos finitos (malha gerada) pode ter diferentes refinamentos conforme a dimensão da sub-região envolvida, onde os campos elétrico e magnético são calculados nas arestas dos elementos.

O FEM tornou-se uma boa alternativa para modelar meios não homogêneos, pois as propriedades dos materiais dos elementos da malha podem ser definidas de forma independente conferindo ao método propriedades de anisotropia do meio e também mostra ser uma metodologia apropriada para a solução de problemas de dispersão, como é o caso da análise de transitórios impulsivos. Embora o MoM possua uma programação mais simples, se comparado ao FEM, o método dos elementos finitos é uma técnica numérica mais versátil para manipular problemas envolvendo geometrias complexas e não homogêneas.

O fato de o método ser uma técnica no domínio da frequência, a análise de uma banda larga de componentes de frequências provenientes de impulso, como a da proveniente de uma descarga atmosférica, pode demandar um elevado processamento computacional, além de requerer a consideração de uma grande região de análise, de modo a supor que o terra remoto (condição de contorno) possa ser estimado como zero volts. Através disso o domínio da solução precisa ser truncado, acarretando imprecisão nos resultados. No entanto, se for considerado que o surto se dissipa em uma determinada área, próximo das áreas dos eletrodos de aterramento, o FEM pode ser a melhor alternativa.

2.2.3.4. Método da modelagem por linhas de transmissão

Também chamado de método de matrizes, o método da modelagem por linhas de transmissão (TLM), é um método numérico diferencial possuindo implementações no

domínio do tempo e da frequência. A resolução desse método vem do equacionamento de Maxwell, sendo realizada por analogia com a teoria de linhas de transmissão. No caso de problemas eletromagnéticos envolvendo fenômenos transitórios, as tensões e correntes que se propagam ao longo de uma estrutura de aterramento, baseiam-se no princípio de Huygens (POTIER *et al.*, 2010). Segundo esse princípio, cada ponto de frente de onda produz ondas secundárias que se espalham em todas as direções.

Esse método permite a modelagem de problemas tridimensionais com estruturas de geometrias complexas, materiais com propriedades não lineares e não homogêneas, com perdas, dispersivo (dependentes de frequência) e anisotrópico, como é o caso do solo atuando como dielétrico em um sistema de aterramento (POTIER *et al.*, 2010).

Para a formulação no domínio do tempo, o TLM no domínio do tempo mostra ser mais adequado tendo similaridades com o método FDTD. A diferença básica entre tais metodologias é que a analogia utilizada pelo TLM é feita com circuitos elétricos e não com conceitos puramente matemáticos como é o caso do método FDTD. Sua formulação inicial foi desenvolvida por (JOHNS, 1972). Entretanto, seu desenvolvimento aprofundou-se a partir dos anos 80 favorecido pelos constantes avanços computacionais.

O algoritmo TLM pode ser descrito pelos seguintes passos:

- Determinação das tensões incidentes em cada segmento considerando a excitação presente;
- Cálculos dos campos associados aos seguimentos;
- Cálculos das tensões refletidas por cada segmento;
- Aplicação das condições de contorno para os segmentos ou nós que se localizam nas extremidades do domínio de cálculo; e
- Determinação das novas tensões incidentes para a próxima interação.

Entre as diversas vantagens do TLM pode-se citar:

- O cálculo das correntes, tensões, campo elétricos e magnéticos podem ser feitos simultaneamente na mesma simulação;
- A formulação para os casos de materiais não homogêneos e não lineares é simples;
- As simulações das versões em duas e três dimensões apresenta facilidade de programação quando a versão unidimensional é conhecida;
- A resposta impulsiva e o comportamento no tempo de um sistema podem ser determinados explicitamente; e

- Praticamente não existem problemas com estabilidade, convergência ou soluções espúrias.

Algumas vantagens e desvantagem do TLM são similares as do FDTD. Entretanto, o tempo de simulação e a memória requerida dependem da complexidade da geometria a ser analisada. Em alguns casos a simulação pode se tornar mais pesada (complexa) que a do FDTD.

Importantes critérios relacionados aos métodos numéricos apresentados anteriormente para a modelagem e análise de transitórios em sistemas de aterramento podem ser encontrados nas Tabelas 2.

Tabela 2 – Comparação entre os métodos numéricos. Adaptado: (POTIER *et al.*, 2010).

Modelo	Expressão Matemática	Compreensão	Precisão	Procedimento de Solução	Desempenho computacional necessário
FDTD	Simples	Fácil	Preciso	Simples	Pequena
MoM	Trabalhosa	Difícil	Preciso	Trabalhosa	Muito grande
FEM	Trabalhosa	Difícil	Preciso	Trabalhosa	Muito grande
TLM	Mais simples	Fácil	Preciso	Simples	Grande

2.2.4. Modelagem via EMTP/ATP

A modelagem de malhas de aterramento muitas vezes é feita através de uma única resistência equivalente medida em um ponto da malha. Contudo, sabe-se que a distribuição do potencial elétrico em uma malha depende da natureza do surto transitório e, por vezes, torna-se fundamental ter pontos distintos para aterramento de equipamentos em uma mesma malha (LYNCE, 2007). Esse fato contraria a ideia de representar a malha de aterramento por uma única resistência de aterramento.

Para a modelagem de malhas de aterramento é comum representar os condutores e hastes de aterramento por modelos *PIs* constituídos de indutância e resistência para a terra, conforme mostra a Figura 5. Nessa modelagem considera-se desprezível o efeito capacitivo dos condutores e hastes (LYNCE, 2007).

Figura 5 - Modelo de circuito PI para condutores de aterramento. Fonte: (LYNCE, 2007).

Recomenda-se que cada modelo de circuito PI represente um cabo cujo comprimento não seja superior a 10% do comprimento de onda do surto considerado (LYNCE, 2007). Considerando uma frequência em torno de 1 MHz para surtos atmosféricos (máxima frequência considerada), obtém-se um comprimento máximo de 30 metros de cabo para cada PI. A Figura 6 mostra um arranjo típico de uma malha de terra.

Figura 6 – Geometria convencional de malha de terra. Fonte: (LYNCE, 2007).

As hastes de aterramento são colocadas em pontos estratégicos da malha, sendo que o comprimento das mesmas está em torno de 3,0 m, valor este que produz uma indutância praticamente desprezível quando comparada com a indutância do cabo. Por conseguinte, é comum representar a haste de aterramento somente pela sua resistência de aterramento. Portanto, associadas às resistências de aterramento do cabo tem-se as resistências das hastes.

Em princípio, conforme ilustrado pela Figura 7, é comum pensar que um modelo no qual cada lado dos quadriláteros internos da malha seja representado por um circuito PI é a melhor opção para representação do sistema, mas isto pode não ser verdadeiro. Na verdade

um surto de tensão ou de corrente ao atingir a malha de aterramento deverá “enxergar” a impedância equivalente daquele ponto para a terra. Em uma simulação computacional, o programa utilizado deverá resolver o circuito da malha de terra e determinar a sua impedância equivalente. Para que isto seja feito de forma correta, é preciso que todas as características do solo e acoplamentos magnéticos sejam consideradas.

Figura 7 - Malha modelada em células PI. Fonte: (LYNCE, 2007).

2.3. Trabalhos técnicos científicos relacionados à pesquisa

Este item apresenta o levantamento bibliográfico realizado, com alguns trabalhos recentemente desenvolvidos e relacionados ao tema proposto. Primeiramente são expostos os trabalhos relacionados à modelagem de sistemas de aterramento e, logo após, trabalhos que relacionam as questões do aterramento no contexto da QEE.

2.3.1. Trabalhos relacionados à modelagem de sistemas de aterramento

O trabalho realizado por (NAYEL, 2012) apresenta um estudo do comportamento da impedância do sistema de aterramento do solo em relação à variação da frequência da

corrente que é injetada através do método proposto pelo autor. Para que este estudo fosse realizado, o autor utilizou o método de quatro eletrodos para injetar um sinal de corrente e medir a tensão entre os eletrodos centrais. Para aquisição da resistividade aparente do solo utilizou-se o método de *Wenner*, através da razão entre a tensão medida pela corrente injetada. Inicialmente o autor injetou uma corrente com frequência variante de 1 a 10 GHz em dois solos com permissividade relativa de 10 e 50, e ambos com resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$, na profundidade de 1 m. Neste caso a impedância do sistema de aterramento para uma permissividade relativa de 10, obteve menor impedância em relação ao experimento com a permissividade relativa de 50 a partir da frequência de 1 MHz. Logo após o autor injetou uma corrente com frequência variante de 1 a 10 GHz em dois solos com resistividade de 1.000 e 500 $\Omega.m$, ambos com permissividade relativa do solo de 10, na profundidade de 1 m. Neste caso a impedância do sistema de aterramento para as duas resistividades apresentou uma diminuição acima da frequência de 1 MHz. No último experimento, o autor injetou uma corrente com frequência variante de 1 a 10 GHz em dois solos com resistividade de 1.000 $\Omega.m$, ambos com permissividade relativa do solo de 10, porém, aplicando a corrente primeiramente na profundidade de 1 m, e depois em 5 m. Neste caso a impedância do sistema de aterramento para as duas resistividades também apresentou uma diminuição acima da frequência de 1 MHz. Analisando somente a variação da resistividade e da permissividade em relação à variação da frequência da corrente injetada, conclui-se que a resistividade aparente do solo diminui, conforme a frequência aumenta, e a permissividade relativa aparente do solo diminui, conforme a frequência aumenta, sendo essa variação maior, quando a corrente é injetada em maiores profundidades.

O trabalho realizado por (YUTTHAGOWITH *et al.*, 2012), propõe um circuito equivalente para representar um eletrodo horizontal de um sistema de aterramento para ser utilizado como modelo na avaliação de descargas atmosféricas em sistemas de transmissão e distribuição. Esse circuito equivalente é modelado através de parâmetros distribuídos RLC (resistor, indutor e capacitor), na qual, o eletrodo é dividido em porções de indutância interligadas em série e por um resistor e capacitor em paralelo em *shunt*. No entanto, as indutâncias não são representadas por séries uniformes ao longo do eletrodo. Os valores da indutância foram calculados pelo ajuste das curvas das soluções da simulação computacional utilizando métodos numéricos, em função da modelagem por teoria eletromagnética e de circuitos. Os resultados desse modelo proposto apresentaram semelhança aos resultados obtidos pelos cálculos realizados através do método numérico eletromagnético e do MoM, demonstrando a aplicabilidade da nova abordagem.

O trabalho realizado por (SESNIC *et al.*, 2013) apresenta uma solução analítica da equação integral-diferencial de *Pocklington* (SESNIC *et al.*, 2011) no domínio do tempo para a avaliação do fluxo de corrente ao longo de um eletrodo horizontal de um sistema de aterramento. O eletrodo em análise é excitado através de uma fonte de corrente equivalente a uma descarga atmosférica. Para a resolução desse problema é considerada a interface solo e ar, a qual está relacionada com a teoria das imagens. Para a solução analítica, os autores utilizaram a transformada de Laplace e o Teorema do resíduo de *Cauchy* (SCHIFF, 1999). Os resultados obtidos através dessa solução analítica foram comparados com uma solução numérica no domínio da frequência, equação de *Pocklington*, utilizando a transformada inversa de Fourier. Os resultados comparados entre os dois modelos demonstraram que o método proposto atendeu a solução do problema.

A pesquisa realizada por (ALIPIO e VISACRO, 2012) apresenta um estudo da dependência dos parâmetros do solo, tais como resistividade e permissividade em relação a um sinal de descargas atmosféricas. Para isso é aplicada uma metodologia experimental para a determinação da variação da resistividade e da permissividade do solo em relação à variação da frequência. O experimento considera um eletrodo horizontal enterrado a 0,5 m de profundidade e de 9,6 m de comprimento em um solo de 1.400 $\Omega.m$ de resistividade, submetido a um sinal de corrente de frequência igual ao de uma descarga atmosférica, no intuito de verificar a resposta do nível de tensão no eletrodo. Depois de obtida a resposta experimental do nível de tensão do eletrodo enterrado, os autores fazem uma simulação computacional do mesmo modelo, porém sem levar em conta a correção da resistividade e permissividade do solo. Comparando os dois resultados, nota-se que os dados experimentais obtiveram um maior nível de tensão para solos de resistividade mais elevada. Trabalhando os dados experimentais, os autores desenvolveram duas equações para retratar o comportamento da resistividade do solo e da permissividade, no intuito de corrigir esses parâmetros em relação ao sinal de frequência da corrente injetada. Pelo que foi relatado, observa-se que para uma resistividade de solo mais elevada, é necessário fazer os ajustes da resistividade e permissividade do solo, para que o nível de tensão do eletrodo simulado seja igual ao experimental.

O estudo realizado por (BAJRAMOVIC *et al.*, 2013) apresenta uma análise da variação dos parâmetros de um circuito teste utilizado como apoio para simulações de correntes impulsivas em sistemas de aterramento que possuem eletrodos horizontais, utilizando o software EMTP/ATP. O circuito é modelado através de parâmetros concentrados, formados por um arranjo de resistores, capacitores, indutores e diodos. Com os valores das

grandezas de corrente e tensão, em relação ao tempo representados em um gráfico, devido a um experimento realizado com dois eletrodos horizontais de um sistema de aterramento com 10 e 20 m de comprimento, foi possível determinar os parâmetros dos componentes do circuito teste. Através da modelagem do circuito já ajustado no software EMTP/ATP, foi possível então analisar a relação entre a variação das grandezas do circuito teste em relação a sua resposta ao nível de tensão de surto. Nota-se que quanto maior o nível do valor da resistência que representa o sistema de aterramento no circuito, maior será o nível de tensão de surto e, quanto maior o efeito indutivo que representa o sistema de aterramento do circuito, mais severas são as tensões desenvolvidas no aterramento.

Já em (FREIRE, LIMA e GRIBEL, 2013) têm-se os estudos realizados para o projeto do sistema de aterramento da UHE (Usina Hidrelétrica) Santo Antônio, integrante do complexo do Rio Madeira em Porto Velho, localizado no estado de Rondônia. Devido a grande dimensão de 2,7 km de extensão entre as margens do leito do rio da UHE, e também devido à utilização das estruturas de ferro da barragem como integrantes do sistema de aterramento, os autores apresentam duas metodologias para o cálculo do sistema de aterramento. Primeiramente os autores realizam o cálculo através do método convencional, na qual a estratificação do solo é obtida através do método de *Wenner*, com espaçamento máximo de 64 m e em duas camadas, e, em seguida, realizam os cálculos considerando o substrato rochoso. Ou seja, consideram as camadas mais profundas do solo, a partir dos dados obtidos da sondagem do solo (recursos de geofísica) e, posteriormente, consideram também a camada de água do rio como sendo uma camada de solo, com uma resistividade e uma espessura. Os resultados com duas camadas apresentaram uma resistência de aterramento de $0,89 \Omega$. Considerando as três camadas mais profundas até o embasamento rochoso, o resultado foi de $1,37 \Omega$. Com quatro camadas mais profundas até a litosfera, o valor foi de $3,26 \Omega$. Com seis camadas até a litosfera, o valor de $3,15 \Omega$ foi encontrado, e, considerando todas as camadas mais o leito do rio, o valor foi de $1,00 \Omega$. Um fato importante ressaltado pelos autores é que para sistemas de aterramento com grandes dimensões, não se deve dimensionar o sistema de aterramento pelo método convencional, pois grandes dimensões do sistema de aterramento exige considerar todas as camadas mais profundas do solo.

FANG *et al.*, 2014 apresentam um estudo de viabilidade da utilização da própria estrutura das torres eólicas *offshore*, como sistemas de aterramento natural para operar na presença de descargas atmosféricas. Para a avaliação da impedância do sistema de aterramento é utilizado um software computacional como ferramenta, na qual se utilizou da função de Green para o cálculo da resistência de aterramento. Cada condutor utilizado da

estrutura como eletrodo natural de aterramento foi modelado em várias porções, conforme resolução pela função de Green. As simulações, também consideram alguns fatores do sistema de aterramento, como a resistividade da água do mar, da terra sob o mar, onde a torre é fixada e também a profundidade do eletrodo submerso na água. Esses fatores foram variados e observados nas simulações computacionais, quando este sistema recebeu injeções de correntes de descargas atmosféricas típicas. Foi observado que, quanto maior a quantidade de eletrodo submerso na água, quanto maior a resistividade da água do mar e também do solo submerso no mar, maior será a resistência do sistema de aterramento. Em todas essas simulações os resultados da resistência de aterramento variaram de 0,073 a 0,157 Ω , valores estes aceitáveis, pois o limite desejado é de 4 Ω (OFFSHORE STANDAR , 2007).

O trabalho realizado por (ZHANG *et al.*, 2014), apresenta um estudo do comportamento da impedância do eletrodo de aterramento no solo. O estudo, baseado em simulações computacionais, mostra a viabilidade da retirada do solo de alta resistividade nas proximidades do eletrodo, no intuito de melhoria na resposta do sistema de aterramento frente as correntes impulsivas. Para isso foram realizadas várias simulações de um eletrodo horizontal sobre um solo de duas camadas com resistividade diferentes. Porém, via software foram também consideradas a variação da profundidade, comprimento e espessura da camada superior do solo para encontrar a melhor configuração dos parâmetros apresentados do solo para minimizar a impedância do sistema. Conhecendo a melhor configuração via software foi possível inclusive estimar os custos de mão de obra para a remoção necessária da terra. Em um estudo de caso, provou-se que somente 10% do solo deveria ser substituído por um solo de resistividade menor, no intuito de melhoria do valor da impedância do sistema de aterramento, o que comprova a eficiência desse método para redução do valor da resistência de terra.

A pesquisa desenvolvida por (CAVKA, MORA e RACHIDI, 2014), apresenta um resumo de seis modelos distintos de modelagem dos parâmetros do solo, considerando, por exemplo, a condutividade e permissividade relativa em relação à variação da frequência do sinal de corrente. Dentre os modelos avaliados percebe-se que os resultados obtidos experimentalmente são semelhantes entre si. Porém existe uma maior divergência entre os resultados quando a resistividade do solo apresenta maiores valores, bem como na ocorrência de correntes de altas frequências. Através da análise pelo método de casualidade de *Kramers–Kroning* as igualdades desses modelos foram avaliadas. Para que fossem comparados entre si, dois sistemas de aterramento foram submetidos a uma corrente caracterizando descarga atmosférica. Os resultados desse método de casualidade mostraram que apenas três modelos

são considerados iguais, quando submetidos às duas situações propostas. Como resultado, pode-se dizer que esse método de casualidade é capaz de mostrar, quais os métodos são semelhantes e quais são divergentes entre si.

O trabalho realizado por (XIONG, BIN e FANG, 2014), apresenta um modelo de algoritmo sub celular de modelagem FDTD para um eletrodo plano de um sistema de aterramento. A eficiência desse algoritmo foi comprovada observando-se tanto o valor da resistência transitória do sistema de aterramento, quanto a distribuição do campo elétrico ao redor do eletrodo plano. Segundo os autores, esse algoritmo utiliza menos memória e menos tempo de processamento em relação ao algoritmo FDTD convencional. Além de suprir as necessidades apresentadas, esse algoritmo possui também o objetivo de atender todos os problemas relacionados à aplicação de eletrodos planos, como chapas de aço utilizado como eletrodos de aterramento, que apresentam forma diferente, em relação aos eletrodos atuais.

O trabalho defendido por (CHO *et al.*, 2014), apresenta um novo método numérico de cálculo do valor da impedância de terra de um condutor horizontal, quando submetido a uma injeção de corrente de alta frequência no seu centro do comprimento. Além de utilizar esse método de cálculo, também foi utilizada em um dos dois casos das simulações, a equação de *Derby* (LIU, 2007) que leva em consideração a ionização do solo. A distribuição da corrente nesse eletrodo horizontal é calculada usando um modelo de fonte chamado “*delta-gap*” (BALANIS, 2005) localizada em seu centro de comprimento, sendo uma consideração diferente em relação aos métodos antigos, quando se aplicava uma injeção de corrente no início do comprimento do eletrodo. Os resultados iniciais obtidos por esse modelo de cálculo são comparados com os resultados simulados pelo software CDEGS (HIFREQ module) (CHO *et al.*, 2014) mostrando semelhança entre os resultados encontrados. Quando a ionização do solo não é considerada, os valores simulados e medidos em campo são iguais. Porém quando a ionização do solo é considerada, o melhor valor para a constante de relaxamento para a equação de *Derby* proposta pelos autores é de 0,4 us. Conclui-se que para altas frequências, a ionização do solo deve ser levada em consideração, e que para a corrente injetada no centro de comprimento de um eletrodo horizontal, esse novo método de cálculo pode ser aplicado.

2.3.2. Trabalhos relacionados à qualidade da energia e aterramento

Morinee (2002) apresenta um breve estudo sobre problemas encontrados em sistemas de aterramento de máquinas CNC (*Computer Numeric Control*), utilizadas em usinagem. Muitas máquinas CNC apresentam um sistema eletrônico de controle para fazer a interface entre o sistema de comando e o sistema de potência. O maior problema que é relatado nessas máquinas é a queima das placas eletrônicas e erro no processamento dos controladores. Esse problema é causado devido à escolha errada de filosofia do sistema de aterramento. O autor retrata um sistema elétrico, no qual existe uma máquina CNC com sua carcaça aterrada isoladamente através de uma haste. Na ocorrência de um curto-circuito ou de descargas atmosféricas no sistema elétrico, observa-se uma diferença de potencial entre os sistemas de aterramento, fazendo com que circule uma corrente entre os mesmos, capaz de danificar os componentes da máquina CNC. O autor sugere que exista somente um sistema de aterramento capaz de fornecer um caminho único a todas correntes de falta ou descargas atmosféricas sem causar danos aos equipamentos e sem causar diferença de potencial entre os mesmos.

Já a pesquisa realizada por (SANTOS, 2010), apresenta um estudo do comportamento do sistema de aterramento elétrico de uma subestação de energia sujeito a correntes de surtos provocadas por descargas atmosféricas. O sistema apresentado é composto por um ramal de distribuição composto por três transformadores, na qual se submete uma descarga atmosférica em uma das fases da rede de energia e verificam-se os níveis de tensão de surto para o lado de alta e para o lado de baixa dos transformadores no final do ramal. Na ocorrência desses distúrbios sem a presença de protetores de surtos, os níveis de tensão são piores quando a malha do sistema de aterramento apresenta valores mais elevados de resistência.

Hannah (2012) apresenta algumas considerações em relação à melhoria de parâmetros da filosofia de proteção em relação a corrente de falta terra de sistemas da rede de distribuição. A norma ANSI C57 determina os valores mínimos de impedância de terra do sistema de distribuição em relação ao tamanho do transformador da subestação. Isso implica em limitar o valor da corrente de falta fase a terra. Esses valores mínimos de resistência de terra possuem um valor satisfatório, quando observado o lado da proteção do sistema. Com valores da resistência de terra de 40 e 30 Ω é possível obter valores de corrente de fase terra de defeito capaz de sensibilizar os relés de proteção, bem como permitir uma adequada seletividade do sistema quando da ocorrência de uma incontinência. O autor faz uma análise dos benefícios ao sistema de proteção de uma subestação com o aumento do valor da corrente mínima de terra (maior sensibilização do sistema de proteção contra curto-circuito, sistema mais confiável), e aos prejuízos que isso acarreta à qualidade da energia em relação ao desequilíbrio de tensão, quando o alimentador da subestação é submetido a correntes

desequilibradas. Quanto maior a corrente de terra na ocorrência de uma falta, maior poderá ser o desequilíbrio das tensões.

O trabalho de Abreu (2014) tem como atenção, estudos dos materiais utilizados na construção de sistemas de aterramento de torres de transmissão. O principal foco desse estudo esta voltado na escolha correta dessas matérias para que não haja uma corrosão ou roubo, não comprometendo assim o sistema de aterramento. O autor realizou varias inspeções no valor do sistema de aterramento das torres, no intuito de verificar o aumento da resistência de aterramento, percebendo que muitas das medidas realizadas apresentaram valores mais altos do que o esperado. Investigando o projeto, verificou que a corrosão acontece entre o eletrodo de aterramento de aço galvanizado e a base da torre, composta de concreto e barras de aço. Em solos de baixa resistividade ($< 50 \Omega.m$), e solo com pH acido, a corrosão desse sistema acontece mais severamente. O fato da utilização de aço galvanizado como eletrodo de aterramento, é para evitar roubos, porém acaba acarretando essa corrosão precoce. Como ressaltado pelo autor, um bom conhecimento das características do solo e dos materiais empregados na construção do sistema de aterramento traz grandes benefícios para o sistema elétrico, pois muitas regiões apresentam uma densidade alta de descargas atmosféricas, o que pode provocar destruição das bases das torres em alguns casos, caso o eletrodo de aterramento das torres não cumpra a sua função.

Já (KOCHURA, TSIVILYOU e SARIN, 2014) apresentam o resultado de uma investigação experimental e computacional de qualidade da energia de uma rede de 10 kV submetida a diferentes tipos de sistemas de aterramento de neutro. É observado que para diferentes tipos de sistema de aterramento de neutro adotado, existe uma variação no desequilíbrio de tensão da rede aérea. Os autores fazem varias medições do nível de tensão de um sistema real, considerando três tipos de sistema de aterramento do neutro: um não aterrado; aterrado pela bobina de *Petersen* (JUNIOR, 2009); e aterrado com bobina de *Petersen* em paralelo com um resistor de 1.000Ω , quando na ocorrência de uma falta fase terra, sabendo-se que a norma russa (GOST R 54149, 2010) admite 2% como valor máximo de desequilíbrio de tensão do sistema. Para o sistema com o neutro isolado, o desequilíbrio de tensão é de apenas 0,2%. Já para um sistema de neutro aterrado com bobina de *Petersen*, com compensação da corrente de falta (f_p unitário), o fator de desequilíbrio de tensão é de 8,4%, e para um sistema operando com compensação um pouco abaixo, ou um pouco acima do valor unitário, o fator de desequilíbrio de tensão é de 3,2%. Através desses resultados é possível verificar qual deles apresentou maior nível de desequilíbrio de tensão para o sistema.

3. METODOLOGIA

Este capítulo traz a metodologia vislumbrada e utilizada até o momento para esta pesquisa, destacando todos os passos, desde a revisão bibliográfica realizada, método proposto e aplicações.

A Figura 8 trás o diagrama de blocos das principais etapas, as quais serão comentadas na sequência. O diagrama de blocos total é dividido em duas partes. A primeira parte do diagrama retrata o método tradicional de dimensionamento, que é o mesmo modelo do IEEE 80 (IEEE Std-80, 2000) que pode ser realizado manualmente ou via software, e logo após, o método proposto.

O primeiro método foi aplicado considerando a frequência de 60 Hz, somente para a determinação da geometria da malha e dos seus condutores, tensão de passo e de toque. Na sequência, tem-se o método proposto para os cálculos da impedância para todas as frequências que se deseja analisar. Contudo, percebe-se que o cálculo da resistência do método proposto depende do software comercial. Ao final do loop de cálculo de todas as resistências, indutâncias e capacitâncias do modelo proposto, chega-se a todos os resultados e com isso, podem-se comparar os valores entre os dois métodos. A comparação é entre o valor da resistência do método convencional e o valor da impedância do método proposto.

Figura 8 - Diagrama de bloco para a metodologia seguida.

Com o intuito de melhor descrever o diagrama de blocos apresentado, esse capítulo será subdividido em cinco subitens:

- Estudo investigativo em relação à bibliografia considerada para modelagem do sistema de aterramento;
- Determinação das características do solo e do sistema elétrico de potência;
- Projeto da malha de aterramento da subestação de energia, conforme a norma IEEE80, assumida como sendo o método tradicional;
- Modelagem do sistema de aterramento pelo método proposto; e
- Aplicação do método proposto para um sistema de aterramento em uma subestação de energia.

O método convencional de dimensionamento da malha do sistema de aterramento apresentado no diagrama da Figura 8 é o mesmo sugerido pela IEEE80, com o cálculo dos condutores da malha para corrente de curto-circuito a 60 Hz, tensão de passo e de toque. Logo após a malha dimensionada pelo método convencional, fazem-se os cálculos para outras frequências, necessários para o método proposto. Como ficará evidente, utiliza-se então o método tradicional somente para a determinação dos condutores e da dimensão da malha.

3.1. Estudo investigativo bibliográfico

Em relação às metodologias para modelagem do sistema de aterramento apresentadas anteriormente, verifica-se que em todos os casos os modelos são definidos, ou a partir de uma aproximação pela teoria de campos eletromagnéticos, ou pelas teorias de circuitos e linhas de transmissão, apresentando particularidades em específico.

Relembra-se que esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento de uma malha de aterramento na presença de correntes harmônicas e transitórios impulsivos ou oscilatórios. Neste contexto, o método a ser escolhido para analisar esse problema tem que ser capaz de apresentar como resultado a distribuição da corrente e tensão da malha de terra para diversas frequências em análise.

Dentre os métodos estudados no capítulo anterior, o método de modelagem via o software EMTP/ATP foi o escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa, pois permite considerar em uma mesma simulação os dois sistemas (de potência e o sistema da malha de

terra). Além disso, pode-se utilizar a teoria de circuitos e a teoria de linhas de transmissão adaptada para o software EMTP ATP em uma abordagem no domínio do tempo. Vale adiantar que nesta abordagem não será considerada a ionização do solo, pois esse fenômeno só acontece quando na presença de um elevado campo elétrico (POTIER *et al.*, 2010), o que não será a situação a ser implementada.

3.2. Determinação das características do solo e do sistema elétrico

Para projetar um sistema de aterramento para uma subestação de energia, deve-se em primeiro lugar fazer um levantamento em campo do local onde se deseja fazer um sistema de aterramento, assim como definir os espaços uteis para a construção do mesmo e, na sequência, deve-se levantar a resistividade do solo do local desejado. Para isso devem-se conhecer todas as principais características do solo que possam interferir no sistema de aterramento.

O solo é, geralmente, constituído por diversas camadas, sendo que cada camada apresenta um específico valor de resistividade e uma espessura diferente. A determinação destes valores e a estratificação do solo são muito importantes para o cálculo dos parâmetros do sistema de aterramento, essenciais para o desenvolvimento de projetos e estudos, assim como para a determinação dos potenciais de passo e de toque que são muito importantes para segurança humana, além do que, a partir do conhecimento das características, pode-se também construir um sistema mais barato e funcional.

A composição do solo é também bastante heterogênea, sendo que o valor de sua resistividade pode variar de local para local em função do tipo de solo, nível de umidade, profundidade das camadas, idade da formação geológica, da temperatura, da salinidade e de outros fatores naturais (EPRI EL-2020, 1981).

Dentre os vários métodos para a estratificação do solo, será utilizado nesse trabalho o arranjo dos quatro pontos igualmente espaçados, mais conhecido como arranjo de *Wenner*. Esta escolha se justifica por ser este o arranjo mais conhecido e utilizado, e também por permitir determinar as camadas do solo em vários metros de profundidade (ABNT NBR 7117, 2012). As Figuras 9 e 10 ilustram o procedimento escolhido.

Figura 9 - Arranjo de Wenner. Fonte: (ABNT NBR 7117, 2012).

Conforme a Figura 9 deve-se medir a tensão entre os eletrodos P₁ e P₂ do arranjo. Nesta figura, “a” é a distância entre eletrodos adjacentes e “b” a profundidade de cavação, onde a resistividade em função de “a” é considerada pela Equação 5. Contudo, se a distância “b” for menor ou igual a 10% em relação à distância de “a”, a resistividade pode ser calculada conforme a Equação 6 (ABNT NBR 7117, 2012).

$$\rho = \frac{4.\pi.a.\frac{U}{I}}{1 + \frac{2.a}{\sqrt{a^2 + 4.b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (5)$$

$$\rho = 2.\pi.a.\frac{U}{I} \quad (6)$$

Nas quais:

ρ é a resistividade do solo [$\Omega.m$];

a é a distância entre os eletrodo [m];

b é a profundidade do eletrodo enterrado [m];

U é a tensão medida entre os eletrodos intermediários [V]; e

I é a corrente medida entre os eletrodos adjacentes [A].

Figura 10 - Arranjo de Wenner na prática. Fonte: (MARTINS, 2001).

Fisicamente, a distância “a” entre os eletrodos deve ser variada de 1, 2, 4, 8, 16 até 32 m conforme ilustra a Figura 10. Além disso, as medições devem ser realizadas em várias direções, conforme também retrata a Figura 11. Com isso, obtêm-se seis valores de resistividades para cada direção em função do comprimento de “a”. Para determinar o valor final, faz-se uma média das resistividades entre as várias direções medidas e calculadas.

Na sequência, os valores obtidos devem alimentar a base de dados do software que estratificará a camada do solo em duas ou mais camadas, e determinará a espessura que cada camada possui, conforme a escolha do usuário, ou ainda, devido à capacidade do software, essa estratificação pode ser feita em duas ou mais camadas. Contudo, o usual é fazer em duas camadas (MARTINS, 2001). Esse processo também pode ser executado manualmente, através do Método gráfico de *Yokogawa*. Porém é muito trabalhoso. Por isso, nesse trabalho a estratificação será realizada via software, conforme o exemplo da Figura 12.

O valor da resistividade do solo estratificado servirá para determinar a resistência da malha de aterramento e participará diretamente na determinação dos níveis de tensão máximo que a superfície da malha de aterramento sofrerá quando da ocorrência de uma falta (curto-circuito).

O objetivo de aumentar a distância de “a” entre os eletrodos é para que a corrente injetada atinja profundidades maiores no solo, bem como para que seja possível estratificar as camadas do solo mais profundas e, com isso, planejar um melhor arranjo dos cabos e hastes no solo para atingir valores mais baixos de resistência no final do projeto.

Figura 11 - Arranjos das direções das hastes para a estratificação do solo.

Earth Model - Fitting Result:			Spacing Meter	Resistivity Ohm-Meters
Soil Layer	Thickness Meter	Resistivity Ohm-Meter	1	1.00 937.770020
1	2.2021	964.2783	2	2.00 1188.459961
2	Infinity	2007.4146	3	4.00 1325.750000
			4	8.00 1580.849976
			5	16.00 1868.119995
			6	

Figura 12 - Exemplo do cálculo da estratificação do solo via software em duas camadas.

O terrômetro de quatro pontas é o equipamento mais indicado para fazer as medições em campo necessárias para a estratificação (duas pontas são para a tensão e duas para a corrente), conforme ilustrado na Figura 9. Outro procedimento é através da utilização de uma fonte de tensão em substituição da utilização de um terrômetro, medindo-se as grandezas de correntes e tensão para se determinar as grandezas necessárias. A Figura 13 mostra um modelo de solo estratificado.

Figura 13 - Modelo de solo estratificado (antes "a" e depois "b"). Fonte: (ABNT NBR 7117, 2012).

Depois de obtidos os valores da estratificação do solo em uma, duas ou mais camadas, é necessário determinar um valor único de resistividade equivalente (resistividade aparente do solo " ρ_a ") capaz de representar todas as resistividades de cada camada em uma única. Isso é necessário, porque será útil na determinação dos níveis da tensão de passo e de toque, que serão comentados mais adiante.

O método gráfico de *Sunde* é capaz de aproximar duas camadas do solo em uma camada equivalente (IEEE Std-80, 2000). Para isso, os seguintes passos devem ser observados:

- Plotar o gráfico da resistividade ρ no eixo y versus espaço "a" no eixo x através dos valores calculados e levantados em campo, como no exemplo da Figura 14;

Figura 14 - Exemplo gráfico da resistividade ($\Omega.m$) versus a distância (m). Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).

- Determinar os valores de resistividade das duas camadas pelo método de *Yokogawa*, ou via software;
- Determinar a relação entre os valores da resistividade da primeira e segunda camada e interpolar ou não uma curva correspondente no gráfico de *Sunde* (Figura 15). Dessa relação, encontrar o valor de $\rho a/\rho l$ em y no joelho dessa curva, e o valor de a/h no eixo x; e

Figura 15 - Curva de Sunde. Fonte: (IEEE Std-80, 2000).

- Para encontrar o valor da resistividade aparente deve-se multiplicar o valor encontrado no eixo y do gráfico de *Sunde* pelo valor da resistividade da primeira camada do solo. Para encontrar a profundidade equivalente da malha de aterramento, basta rebater o valor da resistividade aparente calculada anteriormente no gráfico da Figura 14 e determinar o valor da distância no eixo x, multiplicando esse valor encontrado da distância com o valor de a/h encontrado no gráfico de *Sunde*.

Realizado o levantamento das características do solo, o próximo passo é conhecer as correntes de curto-circuito fase terra que o sistema elétrico de potência da subestação de energia poderá enfrentar. Na ocorrência de um curto-circuito monofásico (fase-terra) na subestação, circulará pelo sistema de aterramento uma corrente elétrica por um determinado tempo, até que o sistema de proteção o interrompa (sistemas com neutro aterrado). Nessa

situação a malha de terra deverá suportar essa corrente e também proporcionar níveis de tensão aceitáveis sobre sua superfície, como medida de segurança para pessoas.

Conclui-se que para um sistema elétrico de potência, o dimensionamento da malha de terra tem que atender mais de uma função, como, drenar correntes de descargas atmosféricas e proteger pessoas contra tensão de toque e de passo geradas pelas correntes de defeito. Para isso, o projetista deve conhecer todas as correntes de curto-circuito do sistema de potência, conhecer a configuração do sistema de aterramento de neutro da planta e os níveis de tensão fase-fase. Para conhecer todos esses parâmetros é ideal que haja um estudo preliminar de curto-circuito e seletividade da planta, pois nele devem constar todas as informações necessárias, como, por exemplo, as ilustradas pela Figura 16, na qual mostra os valores das correntes de curto-circuito trifásica e monofásica de um sistema elétrico e também as impedâncias de sequência positiva e negativa, geradas por um estudo de curto-circuito.

----- Contribution Data -----				PU (100 MVA Base)	
	Duty	Units	R/X	R PU	X PU
3P:	2,356	Amps	0.784	Pos: 1.096	1.397
SLG:	2,785	Amps	0.645	Zero: 0.251	0.992

Figura 16 - Exemplo de contribuição da corrente de curto-circuito gerada por um software de cálculo.

3.3. Projeto da malha de aterramento pelo método da norma IEEE80

Para a determinação da malha de um sistema de aterramento de uma subestação de energia, será utilizado o método proposto pela norma (IEEE Std-80, 2000), na qual o procedimento está exposto no diagrama de blocos da Figura 17. Este diagrama de blocos detalha o método tradicional inicialmente já apresentado no diagrama da Figura 8. Após a conclusão de todos os passos desse diagrama de blocos, é possível determinar a malha, com todas as características necessárias para ser implementada em uma subestação de energia.

Figura 17 - Diagrama de blocos para a modelagem da malha do sistema de aterramento.

Conforme mostra o diagrama de blocos, o primeiro passo já foi discutido no subitem anterior. O segundo passo é relacionado ao dimensionamento do condutor da malha de aterramento, que deve suportar uma corrente de curto-circuito de defeito por um tempo determinado sem ocorrer seu rompimento, conforme a Equação 7.

$$A_{mm^2} = I \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)}} \quad (7)$$

Na qual:

I é a corrente rms em [kA];

A_{mm^2} é seção do condutor em [mm²];

T_m é a máxima temperatura permitida pelo condutor [°C];

T_a é a temperatura ambiente em °C;

T_r é a temperatura referente a constante de cada material em 20[°C];

α_r é o coeficiente térmico da resistividade do material T_r em [1/°C];

A_r é o coeficiente térmico da resistividade do material T_r in [1/°C];

ρ_r é a resistividade do condutor na temperatura T_r em [$\mu\Omega$ -cm], com $K_o = 1/\alpha_o$ ou $(1/\alpha_r) - T_r$ em [°C];

t_c é a duração da corrente de falta em [s]; e

$TCAP$ é a capacidade térmica por unidade de volume [J/(cm³·°C)].

Para a determinação dos parâmetros mencionados acima, pode-se utilizar a Tabela 3.

Tabela 3 Tabela de dados dos condutores. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).

Descrição	Condutividade do Material (%)	α_r fator a 20°C (1/°C)	K_0 a 0°C (0°C)	Temperatura de fusão T_m (°C)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP capacidade térmica [$\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$]
Cobre recozido de tempera mole	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre comercial tempera dura	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Cabo de aço coberto de cobre	40	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Cabo de aço coberto de cobre	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Haste de aço coberto de cobre	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Alumínio grau EC	61,0	0,00403	228	657	2,86	2,56
Alumínio liga 5005	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,60
Alumínio liga 6201	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,60
Cabo de aço coberto de alumínio	20,3	0,00360	258	657	8,48	3,58
Aço, 1020	10,8	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Haste de aço coberto de aço inox	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Haste de aço revestido de zinco	8,6	0,00320	293	419	20,10	3,93
Aço inox 304	2,4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

No terceiro passo, calculam-se os níveis de tensão de toque e de passo permissíveis na superfície da malha, quando da ocorrência de um curto-circuito na subestação. Para tanto, utiliza-se das Equações 8 e 9 (IEEE Std-80, 2000).

$$E_{pa} = \left(\frac{157 + 0,942 \cdot C_s \cdot \rho_b}{\sqrt{t_p}} \right) \quad (8)$$

$$E_{tc} = \left(\frac{157 + 0,236.C_s \cdot \rho_b}{\sqrt{t_p}} \right) \quad (9)$$

Nas quais:

E_{pa} é a máxima tensão de passo permitida [V];

ρ_b é a resistividade da cobertura onde se encontra a malha de terra [$\Omega.m$];

t_p é o tempo de atuação da proteção [s];

C_s é o fator de redução, conforme (IEEE Std-80, 2000); e

E_{tc} é a máxima tensão de toque permitida [V].

Para determinar a máxima corrente de choque que uma pessoa pode suportar em um determinado tempo de atuação da proteção deve-se utilizar a Equação 10 (IEEE Std-80, 2000):

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{t_p}} \quad (10)$$

Na qual:

I_{ch} é a corrente de fibrilação que uma pessoa de 50 kg pode suportar em [mA]; e

t_p é o tempo de atuação da proteção [s].

Para a determinação do fator de redução, deve-se encontrar, primeiramente, o fator de reflexão k (Equação 11), fator que determina uma constante capaz de encontrar graficamente o fator de redução C_s via gráfico (Figura 18).

$$k = \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_a + \rho_b} \quad (11)$$

Na qual:

ρ_a é a resistividade aparente do solo [$\Omega.m$];

ρ_b é a resistividade da cobertura do concreto ou brita onde se encontra a malha de terra [Ω.m]; e

k é o fator de reflexão utilizado para encontrar o fator de redução.

Figura 18 – C_s versus a espessura da camada superior de concreto ou brita. Fonte: (IEEE Std-80, 2000).

O quarto passo está voltado para uma determinação preliminar da quantidade de cabos e hastes que deverão ser utilizados para que a resistência da malha de terra seja inferior a 10 Ω. Para isso utiliza-se da Equação 12. Na verdade, o software não dimensiona a malha de terra com as dimensões necessárias e com as quantidades de condutores. O software apenas calcula o valor da resistência e as tensões limites de uma malha definida pelo usuário. Para que o usuário tenha em mente um tamanho de malha, basta verificar a quantidade média de condutores que precisará através da Equação 12.

$$R_g = \rho_a \cdot \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (12)$$

Na qual:

R_g é o valor da resistência [Ω];

ρ_a é o valor da resistividade aparente do solo [$\Omega.m$];

L_t é o comprimento médio utilizado como condutores da malha [m];

A é a área utilizada para a construção da malha de terra [m^2]; e

h é a profundidade da malha [m].

Através de um cálculo preliminar, sabendo da área do local, determina-se uma malha e se verifica o valor da resistência de terra, que deve estar abaixo de 10Ω (passo 5). Caso não esteja, basta aumentar a área ou a quantidade de condutores, com o intuito de diminuir esse valor.

Depois de encontrado uma dimensão preliminar da malha, utiliza-se o software para a determinação exata da resistência da malha e dos cálculos do valor limite de tensão de toque e de passo. Caso o valor da resistência de terra for encontrado e os valores de tensão de toque e de passo estiverem acima do limite, deve-se modificar o arranjo da malha, até que os valores sejam menores que os valores limites especificados.

Após os cálculos e todos os procedimentos apontados, tem-se finalmente o projeto da malha de terra finalizado (passo 6).

3.4. Projeto da malha de terra pelo método proposto

A determinação da malha de um sistema de aterramento de uma subestação de energia pelo método proposto por (LYNCE, 2007) propõe dividir a malha em células *PI*, composta por resistores e indutores para sua representação via software EMTP/ATP. Essa modelagem não representa a malha somente por um resistor de aterramento, mas por um arranjo de indutores, capacitores e resistores que, juntos, representam a impedância da malha, que pode ser utilizada para estudos voltados a sistemas que operam em uma frequência mais elevada.

A partir do sexto passo, a Figura 8 representa o diagrama de blocos com o procedimento da modelagem proposta.

Analizando o diagrama de blocos para a modelagem da malha de aterramento via ATP, percebe-se que o método proposto, é uma continuação do procedimento do método da

(IEEE Std-80, 2000), visto anteriormente. Sendo assim, os comentários que seguem dizem respeito ao sexto passo da Figura 8.

O sexto passo propõe dividir a malha em células *PI*, representadas por resistores, indutores e capacitores, conforme a teoria de linhas de transmissão. Para essa modelagem é necessário conhecer o comprimento de onda do sinal que a malha será submetido para determinar o máximo comprimento de cada célula *PI*, conforme mostra a Equação 13.

$$\lambda = \frac{c}{10.f} \quad (13)$$

Na qual:

λ é o máximo comprimento do condutor a ser adotado [m];

c é a velocidade da luz [m/s]; e

f é a frequência do sinal [Hz].

Determinado o máximo comprimento do condutor, o próximo passo é dividir a malha pré-dimensionada em células *PI*, conforme o exemplo da Figura 19.

Figura 19 - Exemplo de divisão de uma malha de aterramento em uma célula *PI*.

Pela Figura 19, conclui-se que a modelagem para essa malha compreende transformar todos os condutores (verticais e horizontais) em duas indutâncias, quatro resistências e quatro capacitâncias equivalentes. Já as hastes são modeladas por quatro resistências equivalentes.

Para o sétimo passo, utiliza-se a Equação 14 e a Equação 15 para determinar a resistividade e a permissividade do solo em relação à variação da frequência do sinal a ser analisado na malha do sistema de aterramento. A Equação 14 é válida para a frequência de

100 Hz a 4 MHz, e a Equação 15 é válida entre 10 kHz até 4 MHz, sendo que se deve considerar o mesmo valor de permissividade de 10 kHz para valores de frequências menores.

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(1 + \left(1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0,73} \right) (f - 100)^{0,65} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$\varepsilon_r = 7,6 \cdot 10^3 \cdot f^{-0,4} + 1,3 \quad (15)$$

Na qual:

ρ é a resistividade do solo para a frequência a ser considerada;

ρ_0 é a resistividade do solo para a frequência base;

f é a frequência em Hz; e

ε_r é a permissividade relativa do solo;

Antes do oitavo passo calcula-se a resistência da malha de aterramento via o software comercial, considerando somente os cabos, e depois considerando os cabos com as hastes, com as resistividades do solo ajustadas para as frequências calculadas anteriormente. Para cada frequência deve-se calcular a resistência da malha com o auxílio do software comercial.

No oitavo passo, calcula-se a resistência da malha de terra completa via o ATP, resistência dos cabos e das hastes, através dos valores gerados de resistência de aterramento somente dos cabos pelo software comercial e depois dos cabos e das hastes juntas. Faz-se então um cálculo de proporcionalidade para verificar a contribuição de cada metro de cabo e de cada haste em relação a resistência da malha total. Com isso é possível quantificar o valor da resistência de cada metro de cabo e de cada haste e, conseqüentemente, determinar os valores das resistências que deverão ser inseridas em cada célula PI para representar os cabos e as hastes.

Para o nono passo, calcula-se as indutâncias própria e mútua de cada condutor determinadas com ajuda de uma sub-rotina do ATP, chamada *Cable Constants*, a mesma utilizada para modelagem de cabos subterrâneos. Já para a determinação da indutância equivalente, utiliza-se a Equação 16, pela qual, conclui-se que a indutância equivalente é a soma da indutância própria do condutor, mais a somatória das indutâncias mútuas dos condutores em paralelo, pela razão entre sua quantidade.

$$L_{eq} = \frac{1}{n} \cdot \left(L_{ii} + \sum_{j=2}^n M_{ij} \right) \quad (16)$$

Na qual:

L_{eq} é a indutância série equivalente do condutor [H];

L_{ii} é a indutância própria do condutor [H];

n é a quantidade de condutores horizontais e verticais; e

M_{ij} é a indutância mútua do condutor [H].

No nono passo deve ser calculada a capacitância dos cabos das malhas, conforme a Equação 17 (SUNDE, 1968). Devido ao comprimento das hastes serem bem menores em relação aos cabos horizontais, não será considerada a indutância e nem a capacitância das hastes.

$$C = \frac{\rho \cdot \epsilon_r \cdot 8,85418782 \cdot 10^{-12}}{R} \quad (17)$$

Na qual:

C é a capacitância total dos cabos em Faraday;

ρ é a resistividade do solo;

ϵ_r é a permissividade relativa do solo; e

R é o valor da resistência dos condutores;

Realizados todos os cálculos voltados para o dimensionamento das indutâncias e resistências dos condutores verticais e horizontais, bem como das hastes, chega-se na malha modelada unindo todas as células *PI*.

O próximo passo é a determinação da resistência da malha de aterramento. Para isso aplica-se uma fonte de tensão conhecida na malha e se mede o valor da corrente. A razão entre esses valores é o valor da resistência de aterramento, conforme exemplo a Figura 20.

Figura 20 - Determinação do valor da impedância da malha de aterramento modelada via o software ATP.

Os níveis de tensão de toque são determinados conforme as Figuras 21 e 22 (IEEE Std-80, 2000).

Figura 21 - Exposição à tensão de toque. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).

Na qual:

U é a tensão da fonte [V];

Z é a impedância do sistema [Ω];

I_f é a corrente de falta [A];

I_g é a corrente de falta que circula pela malha de terra [A]; e

I_b é a corrente que circula pelo corpo humano [A].

Figura 22 - Circuito equivalente considerando a tensão de toque. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).

A tensão de toque está relacionada à tensão presente entre os pontos H e F , na qual, é a tensão entre a mão e o pé do indivíduo. Para a determinação do valor da tensão entre os pontos H e F , faz-se o equivalente de Thévenin para encontrar o nível da tensão equivalente e o valor da resistência equivalente.

Para encontrar os níveis da tensão de passo, tem-se o mesmo procedimento. Porém, o nível de tensão que deve ser medido é entre os dois passos, onde se encontra a pessoa. As Figuras 23, 24 e 25 mostram o arranjo de como deve ser medido os níveis de tensão.

Figura 23 - Exposição à tensão de passo. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).

Na qual:

U é a tensão da fonte [V];

Z é a impedância do sistema [Ω];

I_f é a corrente de falta [A];

I_g é a corrente de falta que circula pela malha de terra [A]; e

I_b é a corrente que circula pelo corpo humano [A].

Para ambos os casos, a tensão de toque e de passo pode ser representada por uma fonte de tensão e uma impedância equivalente de Thévenin, conforme as Figuras 26 e 27.

Figura 24 - Circuito equivalente para a tensão de toque. Adaptado: Fonte: (IEEE Std-80, 2000).

Figura 25 - Circuito equivalente de Thévenin para a tensão de passo. Adaptado: (IEEE Std-80, 2000).

Nas quais:

V_{th} é a tensão equivalente de Thévenin [V];

Z_{th} é a impedância equivalente de Thévenin [Ω];

R_b é a resistência do corpo [Ω]; e

R_f é a resistência de contato no solo de um pé [A].

Para fazer a medição dos valores de tensão de passo e toque via o ATP/EMTP, o processo é manual. No entanto, os valores não são apresentados de forma gráfica, como os valores apresentados via software comercial. O intuito principal desse método não é determinar exatamente em todos os pontos os níveis de tensão, mas sim, determinar somente nos locais onde o nível de tensão é mais severo, como na borda da malha, na qual o valor do potencial é mais alto.

As Figuras 26 e 27 mostram de que forma os potenciais de toque e de passo podem ser observados via o ATP sobre os condutores. No entanto, vale ressaltar que estes pontos, não são os mesmos utilizados na prática para extrair os níveis de tensão de passo e de toque de uma malha em relação ao solo.

Figura 26 – Exemplo da tensão de toque medida via o software ATP.

Figura 27 – Exemplo da tensão de passo medida via o software ATP.

Para um estudo mais detalhado, deve-se utilizar um software capaz de apresentar graficamente todos os níveis de tensão, em duas ou três dimensões. Vale lembrar que o objetivo principal desse método é modelar a malha de aterramento para que ela possa representar corretamente os efeitos das correntes não senoidais encontradas nas cargas não lineares ou correntes de surto em um sistema de aterramento de uma subestação de energia.

3.5. Comparação das impedâncias pelos dois métodos

A comparação dos valores de impedância entre os dois métodos é importante para verificar se a malha de aterramento modelada pelo método proposto apresenta os mesmos valores de impedância da malha de aterramento modelada pelo método tradicional (resistência de terra).

As medições devem ser realizadas para a frequência fundamental da subestação, que é de 60 Hz e para outras frequências harmônicas de interesse para o estudo. O intuito foi verificar se a malha de aterramento apresenta comportamento diferente para frequências distintas da fundamental, sabendo que estas frequências podem ser provenientes de transitórios impulsivos e oscilatórios, os quais podem causar sérios danos aos equipamentos e ao sistema elétrico como um todo. Quando sistemas de aterramento apresentam altas impedâncias, implica em piores níveis de tensão de surto (SANTOS, 2010). Além disso, é

possível mensurar quais frequências devem ser consideradas no cálculo da impedância da malha do sistema de aterramento para futuro estudos.

4. SISTEMA DE ATERRAMENTO EM ANÁLISE

O sistema de aterramento real e em análise está localizado no Estado de Minas Gerais. A Figura 28 retrata em vermelho a região da construção da malha do sistema de aterramento. O sistema de aterramento proposto é parte de uma subestação de energia elétrica real, composta por uma capacidade instalada entre carga e geração de 100 MW. Vale lembrar que, dos objetivos iniciais, a malha de aterramento deve cumprir as funções necessárias para operação do sistema elétrico e segurança das pessoas. Ou seja, deve prover uma tensão de passo e de toque admissível para a segurança de pessoas e prover baixa impedância para o sistema elétrico para correntes de defeito e descargas atmosféricas.

Figura 28 – Área de localização da malha do sistema de aterramento real em análise.

A Figura 29 ilustra a dimensão e também retrata a planta baixa da subestação em questão, pois através desse *layout* é possível verificar a localização das fontes geradoras. Cada uma delas possui um ponto aterrado através dos cubículos de aterramento que se localizam sob a base das máquinas síncronas.

Figura 29 - Planta baixa do sistema de cogeração.

Além da modelagem do sistema de aterramento ser necessária, a modelagem do sistema elétrico de potência, com todas as características elétricas, como a determinação das impedâncias e das correntes de curto-circuito também são necessárias.

Conforme anteriormente já colocado, o objetivo desse modelo será a verificação do comportamento do sistema de aterramento frente à inserção de correntes harmônicas.

4.1. Modelagem do sistema de aterramento via o software comercial

Através do levantamento realizado em campo e dos resultados provenientes da utilização do software comercial *TecAt* (Tecnologia em Aterramentos Elétricos), foi determinado à estratificação do solo em duas camadas, conforme apresentado na Tabela 4 e Figura 30. Devido a facilidade de dimensionamento da malha de aterramento via software, para a modelagem dessa malha, foi utilizado o software comercial *TecAt* e não se optou pela utilização das equações citadas pela IEEE 80. Contudo, vale frisar que a utilização do software leva a resultados com maior exatidão do que o método analítico proposto pela IEEE 80.

Para o dimensionamento da malha através do método tradicional, foi necessário conhecer além das grandezas físicas do solo, as grandezas físicas dos condutores horizontais, verticais e das hastes a serem utilizadas na construção da malha de aterramento.

Tabela 4- Estratificação do solo em duas camadas via software comercial.

Camadas	Resistividade do Solo ($\Omega.m$)	Espessura (m)
1	924,20	1,68
2	1.882,57	∞

Figura 30 – Estratificação do solo via o software comercial *TecAt*.

Sendo assim, sabendo que a corrente trifásica máxima de curto circuito no local é de 21,4 (kA), e de 1(kA) para a situação monofásica, com um tempo de extinção do curto-circuito de 0,5s, tem-se o cálculo da seção do condutor, conforme a Equação 7, ou via o software comercial.

Via o software, chega-se então ao valor de 56,79mm², conforme a Figura 31. Considerando uma seção superior normalizada, tem-se a seção de 70 mm².

Material: cobre meio-duro
 Corrente [kA]: 21
 Tempo [s]: 0,5
 t max [°C]: 850
 t amb [°C]: 40
 t ref [°C]: 20
 alfa 0: 0,004132
 alfa ref: 0,00381
 Resistividade: 1,7774
 TCAP: 3,42

 Seção mínima do condutor na conexão: 56,79 mm²

Figura 31 – Valor da seção do condutor calculado via o software comercial.

Como a subestação possui uma dimensão média de 72 m de comprimento, por 72 m de largura, foi possível determinar a área utilizada pela a malha, ilustrada pela Figura 33, onde a área demarcada em amarelo é o local onde se encontram fisicamente instalados os equipamentos da subestação.

Para a determinação do tamanho da malha é necessário que esta esteja sobre toda a área da subestação e que, quando necessário, se estenda ao seu redor com o intuito de diminuir o valor da resistência de aterramento para um valor menor que 10 Ω (ABNT NBR 5419, 2005).

Neste sentido, primeiramente, foi dimensionada uma malha do tamanho da subestação. Contudo, pelo valor encontrado da resistência maior do que 10 Ω via o software comercial *TecAt*, aumentou-se o tamanho da malha até que o valor ficasse próximo de 10 Ω . Sendo assim, conforme ilustrado pela Figura 32, o tamanho da malha extrapolou o tamanho da instalação física da subestação.

Figura 32 – Malha de aterramento (as linhas representam os condutores e os pontos as hastes).

Para a malha de aterramento da Figura 33, a quantidade de cabos utilizada de 70 mm² foi de 3.852 m, juntamente com 42 hastes de 5/8" de cobre *CooperWeld* de 250 µm com 6 m de comprimento. Com essa quantidade de cabos e hastes, e com o arranjo físico da malha, chega-se ao valor de resistência de aterramento de 10,29 Ω, conforme indicado na Figura 33.

N° de camadas: 2
 camada #1: 924,2 [Ohm.m] x 1,68 [m]
 camada #2: 1882,57 [Ohm.m] x

 Tempo de processamento: 2,778 s
 Resistência da Malha [Ohm] = 10,29
 Máximo potencial da Malha [V] = 10286,27

condutores:								
Nr.	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Raio (mm)	NSub Tipo
cabos								
1	0,0	0,0	0,5	72,0	0,0	0,5	4,7	25 A
2	0,0	3,0	0,5	72,0	3,0	0,5	4,7	25 A
3	0,0	6,0	0,5	72,0	6,0	0,5	4,7	25 A
4	0,0	9,0	0,5	72,0	9,0	0,5	4,7	25 A
5	0,0	12,0	0,5	72,0	12,0	0,5	4,7	25 A
6	0,0	15,0	0,5	72,0	15,0	0,5	4,7	25 A
7	0,0	18,0	0,5	72,0	18,0	0,5	4,7	25 A
8	0,0	21,0	0,5	72,0	21,0	0,5	4,7	25 A
9	0,0	24,0	0,5	72,0	24,0	0,5	4,7	25 A
10	0,0	27,0	0,5	72,0	27,0	0,5	4,7	25 A
11	0,0	30,0	0,5	72,0	30,0	0,5	4,7	25 A
12	0,0	33,0	0,5	72,0	33,0	0,5	4,7	25 A
13	0,0	36,0	0,5	72,0	36,0	0,5	4,7	25 A
14	0,0	39,0	0,5	72,0	39,0	0,5	4,7	25 A
15	0,0	42,0	0,5	72,0	42,0	0,5	4,7	25 A
16	0,0	45,0	0,5	72,0	45,0	0,5	4,7	25 A

Figura 33 - Valor da resistência de aterramento via o software *TecAt*.

O próximo passo foi determinar os níveis máximos de tensão de passo e de toque em Volts que um corpo humano de 50 kg pode suportar, conforme as Equações 17 e 18, respectivamente, ou via o software comercial.

Para este estudo, considera-se um tempo de meio segundo para o tempo de atuação do sistema de proteção e 3.000 ($\Omega.m$) como valor da camada de cobertura do concreto. Foi considerada uma camada de concreto de 0,05m na superfície da área da subestação.

Com base nestes valores, chega-se então a tensão de toque admissível de 529,83 (V).

Para a determinação da tensão de passo suportável pelo ser humano, utiliza-se a Equação 8, ou novamente o software comercial.

Com base nos valores anteriormente apresentados para o tempo de atuação do sistema de proteção, valor da resistividade da camada de cobertura do concreto, chega-se a um valor da tensão de passo de 1453,24 (V).

Conforme mostra a Figura 34, traçaram-se três retas na malha do software comercial para análise dos níveis de tensão de passo e de toque sobre suas respectivas direções, com o intuito de determinar os valores máximos admissíveis de tensão de toque e de passo que uma pessoa de 50 kg possa suportar na situação de se encontrar em qualquer um desses pontos sobre as retas.

Figura 34 – Níveis de tensão de passo (software *TecAt*).

Analisando a Figura 35, verifica-se que o nível de tensão de toque da malha está dentro dos níveis aceitáveis na região onde se encontram os equipamentos elétricos, ou seja, sobre as retas P1, P2 e P3, apresentada na Figura 34.

Figura 35 – Níveis de tensão de toque (software *TecAt*).

Analisando a Figura 36, verifica-se que o nível de tensão de passo da malha está dentro dos níveis aceitáveis na região onde se encontra os equipamentos elétricos, ou seja, sobre as retas P1, P2 e P3, apresentada na Figura 34.

Figura 36 – Níveis de tensão de passo (software *TecAt*).

Vale ressaltar que esses cálculos são de extrema importância para garantir a eficiência da malha tanto no quesito de funcionalidade do sistema elétrico, quanto de segurança pessoal. Percebe-se que os níveis de tensão de passo e de toque possuem valores mais elevados na periferia.

A Figura 37 ilustra os níveis de tensão de superfície da malha em duas dimensões, e a Figura 38 e a 39 ilustram os níveis da tensão da malha e de superfície em três dimensões.

Figura 37 - Níveis de superfície da malha em duas dimensões (software *TecAt*).

Figura 38 – Potencial da malha em três dimensões (software *TecAt*).

Figura 39 – Potencial da superfície em três dimensões (software *TecAt*).

Verificados os limites de tensão de passo e de toque da malha, bem como o valor da resistência de aterramento, conclui-se que a malha está adequadamente dimensionada para a subestação em análise.

4.2. Modelagem do sistema elétrico de potência via o software ATP

Utilizando o modelo proposto na Figura 20, bem como as Equações 14 e 15 para a determinação das grandezas do solo, as Equações 16 e 17 para a determinação das indutâncias e capacitâncias dos condutores horizontais, e a utilização do software *TecAt* para a determinação das resistências dos cabos e das hastes, é possível modelar a malha do sistema de aterramento anteriormente proposta via o software ATP. Vale lembrar que esta modelagem é baseada no modelo da teoria de linhas de transmissão e será implementada neste trabalho com o intuito de analisar o efeito do sistema de aterramento operando na presença de

correntes harmônicas. Para essa análise do comportamento da malha serão consideradas as frequências conforme as grandezas apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Frequências para a qual a malha será avaliada.

Frequência [Hz]
0
60
120
180
300
420
540
660
780
900
1.020
1.140
1.380
1.500
3.000
10.000
30.000
50.000
100.000
200.000
300.000
600.000
1.000.000
2.000.000
3.000.000
4.000.000

Como primeiro passo para a modelagem, divide-se a malha em células *PI* e determina-se a quantidade de células para que a modelagem atenda a resposta em frequência das possíveis correntes transitórias. Para as frequências até a 1 MHz, divide-se a malha em células conforme a Figura 40, e para frequências acima e até a 4 MHz, conforme Figura 41.

Determinando os valores das resistências, indutâncias e capacitâncias, têm-se a divisão das malhas conforme as Figuras 42 e 43 para modelagem via o software *ATP*.

Figura 40 – Divisão da malha em células *PI* para frequências até 1 MHz.

Figura 41 - Divisão da malha em células *PI* para frequências entre 1 MHz e 4 MHz.

Figura 42 – Divisão da malha para frequências até 1 MHz.

Figura 43 - Divisão da malha para frequências acima de 1 MHz e até 4 MHz.

Para a determinação dos valores das resistências de cada célula PI, faz-se o uso do software comercial para determinar os valores das resistências para cada uma das resistividades em relação à frequência. Primeiramente, calculam-se os valores da resistência somente dos cabos e logo após a resistência da malha toda (cabo e haste).

Para a determinação das resistências de cada célula PI, faz-se alguns cálculos de proporcionalidade, pois cada cabo e cada haste contribuem com valores proporcionais de condutância.

O comprimento total dos cabos da malha é de 3.600 m, possuindo 42 hastes, sendo que cada área da malha da Figura 40 possui uma contribuição proporcional de cabos, sendo a da célula PI 1 de 792 m, PI 2 de 864 m, PI 3 de 861 m e da PI 4 de 936 m. Em relação às hastes, a célula PI 1 e PI 3 possuem 12 hastes cada uma, PI 2 8 hastes, e PI 4, 10 hastes.

A quantidade de cabos entre as células PI 1-2 e PI 1-3 é de 36 m, e entre as células PI 2-4 e PI 3-4 é de 39 m.

O cálculo das resistências somente dos cabos da célula PI 1 é determinada, conforme a Equação 18.

$$R_{x1} = \left(\frac{1}{\frac{Area_1}{L_{ct}}} \right) \cdot R_{cabo} \cdot 8 \quad (18)$$

Na qual:

R_{x1} é o valor da resistência equivalente de cada resistor equivalente dos cabos da célula PI 1;

$Area_1$ é a quantidade em metros dos cabos da célula PI 1;

R_{cabo} é a resistência somente dos cabos da malha toda calculada via o software comercial; e

L_{ct} é o comprimento total dos condutores horizontais da malha;

Para o cálculo das resistências entre cada célula PI utiliza-se a Equação 19.

$$R_{x12} = \left(\frac{1}{\frac{Area_{12}}{L_{ct}}} \right) \cdot R_{cabo} \cdot 4 \quad (19)$$

Na qual:

R_{x12} é o valor da resistência equivalente de cada resistor equivalente dos cabos entre as células PI 1-2;

$Area_{12}$ é a quantidade em metros dos cabos entre as células PI 1-2;

R_{cabo} é a resistência somente dos cabos da malha toda calculada via o software comercial; e

L_{ct} é o comprimento total dos condutores horizontais da malha.

Para o cálculo das resistências de todas as outras células e entre elas, fazem-se os mesmos cálculos via as Equações 18 e 19, porém, com a quantidade de cabos de cada célula.

O próximo passo é a determinação dos valores das resistências das hastes em cada célula. Primeiramente calcula-se o valor da resistência da malha total (cabos e hastes) via o software comercial e com os valores calculados anteriormente somente dos cabos, determina-se o valor da resistência total de todas as hastes, conforme a Equação 20.

$$R_h = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{R_{total}} \right) - \left(\frac{1}{R_{cabo}} \right)} \right) \quad (20)$$

Na qual:

R_h é o valor da resistência equivalente de todas as hastes;

R_{cabo} é a resistência somente dos cabos da malha toda calculada via o software comercial; e

R_{total} é a resistência total da malha (cabos e hastes) calculada via o software comercial.

Os valores das resistências de cada resistor dentre os 4 existentes de cada célula PI referentes a haste são calculados conforme a Equação 21.

$$R_{xh1} = \left(\frac{1}{\frac{Area_{h1}}{H}} \right) \cdot R_h \cdot 4 \quad (21)$$

Na qual:

R_{xh1} é o valor da resistência equivalente de cada resistor equivalente das hastes de cada célula PI 1;

$Area_{h1}$ é a quantidade de hastes da célula PI 1;

R_h é o valor da resistência equivalente de todas as hastes; e

H é a quantidade total de haste de toda a malha.

O procedimento é o mesmo para a determinação dos valores das resistências equivalentes das hastes para as outras células.

Para o cálculo das capacitâncias de cada célula PI, primeiramente, calcula-se a capacitância total da malha, conforme a Equação 17 e, logo após, as capacitâncias de todas as células PI, conforme a Equação 22.

$$C_{x1} = \frac{\left(\frac{Area_1}{L_{ct}} \right) \cdot C_{total}}{8} \quad (22)$$

Na qual:

C_{x1} é o valor da capacitância de cada capacitor da célula PI 1;

$Area_1$ é a quantidade em metros dos cabos da célula PI 1;

C_{total} é o valor da capacitância total da malha, calculada conforme a Equação 17; e

L_{ct} é o comprimento total dos condutores horizontais da malha.

Observa-se que houve somente o cálculo das capacitâncias dos cabos, pois as hastes não contribuíram para a diminuição do valor da resistência da malha, devido à resistividade da malha ser maior nas camadas mais profundas. Vale afirmar que o valor da resistência da malha acrescentando as hastes diminuiu em apenas 0,24 ohms. Ou seja, existe uma situação em que a resistência considerando somente os cabos chega ao valor de 10,5 ohms, com somente as hastes em 350 ohms. Fazendo o equivalente em paralelo dos cabos com as hastes, a resistência chega a um valor de 10,2 ohms. Conclui-se também que quanto maior o valor da resistência, menor a capacitância, conforme a Equação 17.

O cálculo das capacitâncias entre todas as células PI é realizado, conforme a Equação 23.

$$C_{x12} = \left(\frac{\left(\frac{Area_{12}}{L_{ct}} \right) \cdot C_{total}}{4} \right) \quad (23)$$

Na qual:

C_{x12} é o valor da capacitância de cada capacitor entre as células PI 1-2;

$Area_{12}$ é a quantidade em metros dos cabos da célula PI 1-2;

L_{ct} é o comprimento total dos condutores horizontais da malha; e

C_{total} é o valor da capacitância total da malha, calculada conforme Equação 17.

Para o cálculo das resistências e das capacitâncias para o arranjo da Figura 41 faz-se os mesmos cálculos apresentados anteriormente. A única mudança é em relação à quantidade de cabos e de hastes de cada célula, que nesse caso é menor, pois a malha foi dividida em células com menores quantidades de cabos. Os números nas equações anteriores (18, 19, 21, 22 e 23) para a determinação da resistência e da capacitância indicam a quantidade de resistores ou capacitores em que resultou a resistência ou capacitância equivalente de cada célula ou entre elas.

A quantidade de cabos de cada célula PI da Figura 43 é de 36m, e entre as células 9, 6 e 3m. O máximo de hastes em cada célula é de uma peça, conforme ilustra a Figura 43.

Os componentes em magenta e azul escuro da Figura 43, que se apresentam na extremidade direita e na parte inferior, são cabos, pois nesse caso não foi possível formar mais uma célula PI. Para se formar mais outra célula o comprimento e largura da malha deveria possuir mais 6m.

Para o cálculo das indutâncias equivalentes de cada célula PI de ambas as Figuras 40 e 41 utiliza-se a Equação 16, na qual esta implícita as indutâncias mutuas e próprias de cada condutor horizontal ou vertical de cada célula. Após a determinação da indutância equivalente, multiplica-se o valor resultante por dois para a determinação das indutâncias de cada um dos lados das células PI.

Para a medição da impedância da malha via o software ATP, injeta-se, por uma fonte de corrente, uma corrente de 1 (A) em um ponto de conexão de terra da malha, conforme indicado na Figura 44. Medindo-se então o nível de tensão, foi possível calcular o valor da impedância da malha de aterramento.

Figura 44 - Método de medição do valor da impedância da malha de terra via o software ATP para frequências de até 1 MHz.

Na prática a medição da resistência da malha de terra é medida geralmente tomando como ponto de conexão de terra uma de suas extremidades, pois nesses pontos, geralmente, existe uma caixa de medição, e também se consegue, com isso, obter uma distância maior entre os eletrodos de corrente do terrômetro.

Através da modelagem via o software ATP, conforme mostrado na Figura 44, determina-se o modelo de malha de aterramento para ser utilizada em posteriores simulações. Cada bloco GRP da Figura 44 é composto por uma indutância, capacitância e resistência, os quais representam as características dos cabos, e os resistores retratam as características das hastes.

5. RESULTADOS

Analisando o diagrama de blocos apresentado para a metodologia desse trabalho, verifica-se que o mesmo é dividido em duas modelagens diferentes de sistemas de malha de aterramento: um modelo convencional e outro modelo através do software ATP. Busca-se por estas modelagens distintas, comparar os dois modelos resultantes, a fim de determinar o comportamento da impedância da malha de aterramento em diferentes frequências.

A Tabela 6 mostra todos os resultados das características do solo da malha de aterramento em relação à variação da frequência, conforme as Equações 14 e 15. As principais grandezas que variam são a resistividade e a permissividade do solo, sendo que todas as grandezas tendem a diminuir quanto maior a frequência. Conforme observado na tabela, somente acima de 10 kHz o valor da permissividade começa a variar, o que já era esperado conforme as referências bibliográficas citadas anteriormente (ALÍPIO e VISACRO, 2012).

A modelagem da malha, conforme a metodologia proposta permite considerar a variação de todas as grandezas elétricas da malha, resistência, indutância e capacitância, em função da frequência.

O gráfico da Figura 45 mostra a variação da resistividade do solo da 1ª e 2ª camadas em relação à variação da frequência.

Tabela 6 – Variação das características do solo em relação à variação da frequência.

Ordem Harmônica	Frequência [Hz]	Resistividade do Solo 1 ^a Camada	Resistividade do Solo 2 ^a Camada	Permissividade Relativa
0	0	924,2	1.882,57	192,2
1	60	924,2	1.882,57	192,2
2	120	922,9	1.879	192,2
3	180	921,2	1.873	192,2
5	300	919	1.865	192,2
7	420	917,2	1.859	192,2
9	540	915,6	1.854	192,2
11	660	914,4	1.849	192,2
13	780	912,9	1.845	192,2
15	900	911,7	1.841	192,2
17	1.020	909,8	1.837	192,2
19	1.140	909,6	1.833	192,2
23	1.380	907,5	1.826	192,2
25	1.500	906,4	1.823	192,2
50	3.000	896	1.789	192,2
167	10.000	864,2	1.685,9	192,2
500	30.000	809	1.519,1	124,3
833	50.000	771,1	1.411,4	101,6
1.667	100.000	704,51	1.235,1	77,3
3.333	200.000	620,49	1.032,8	58,9
5.000	300.000	564,5	909	50,27
10.000	600.000	462,1	702,2	38,42
16.666	1.000.000	386,1	563,2	31,56
33.333	2.000.000	290	402,6	24,23
50.000	3.000.000	240,3	325,4	20,8
66.667	4.000.000	208,53	278,12	18,68

Analisando a Figura 45, nota-se que quanto maior a frequência, menores são os valores de resistividade do solo e menores as diferenças entre as duas resistividades do solo. Nesse caso o solo tende a se comportar como um solo homogêneo, com a frequência tendendo ao infinito. Pela figura, também se observa que as variações da resistividade são mais expressivas para solos de menor condutividade.

Figura 45 – Variação da resistividade do solo da 1ª e 2ª camada em ohms/m.

Analisando a Figura 46, percebe-se que a permissividade possui uma variação maior para frequências entre 10 kHz e 500 kHz, sendo esta variação mais acentuada ainda para frequências maiores. É válido lembrar que quanto menor a permissividade, menor será a capacitância.

Figura 46 – Variação da permissividade relativa em relação à variação da frequência.

Vale observar da Tabela 7 que a contribuição das hastes para a diminuição dos valores da resistência da malha de aterramento é muito pequena para qualquer frequência. Para uma frequência elevada, os valores da resistência diminuem para valores próximos à zero.

Tabela 7 – Valores da resistência calculados via o software comercial em relação à variação da resistividade do solo.

Ordem Harmônica	Frequência [Hz]	R [ohms] (cabo)	R [ohms] (cabo e haste)
0	0	10,53	10,29
1	60	10,53	10,29
2	120	10,51	10,27
3	180	10,48	10,24
5	300	10,44	10,19
7	420	10,4	10,16
9	540	10,38	10,14
11	660	10,35	10,11
13	780	10,33	10,09
15	900	10,31	10,07
17	1.020	10,29	10,05
19	1.140	10,27	10,03
23	1.380	10,23	9,99
25	1.500	10,21	9,98
50	3.000	10,03	9,80
167	10.000	9,48	9,26
500	30.000	8,59	8,38
833	50.000	8	7,81
1.667	100.000	7,04	6,86
3.333	200.000	5,93	5,77
5.000	300.000	5,24	5,10
10.000	600.000	4,08	3,96
16.666	1.000.000	3,29	3,19
33.333	2.000.000	2,36	2,29
50.000	3.000.000	1,92	1,86
66.667	4.000.000	1,64	1,59

A Tabela 8 mostra os valores observados pelas duas modelagens, software comercial e software ATP/EMTP, para as frequências de 0 até 4 MHz.

Para frequências até 10 kHz ambos os valores apresentam as mesmas grandezas. Porém, acima dessa frequência a diferença entre os valores se torna mais expressiva.

Para 200 kHz a impedância via o software ATP/EMTP é praticamente o dobro em relação à resistência da malha para 60 Hz, via o software comercial. Pelo software comercial, a diminuição dos valores da resistência para altas frequências, devido à diminuição da resistividade, permite inferir que a malha se comporta melhor para altas frequências. No entanto, nota-se que a geometria dos cabos e seus parâmetros influenciam na impedância da malha, acarretando em uma maior impedância equivalente.

Tabela 8 Comparação entre os valores da resistência da malha de aterramento via o software comercial com os simulados via o software ATP/EMTP, conforme injeção de corrente Figura 44.

Ordem Harmônica	Frequência [Hz]	R [ohms] (cabo e haste) Software Comercial	Z [ohms] Software ATP	Diferença ATP/EMTP - Software Comercial [%]
0	0	10,29	10,282	-0,078
1	60	10,29	10,282	-0,076
2	120	10,27	10,263	-0,071
3	180	10,24	10,232	-0,083
5	300	10,19	10,175	-0,146
7	420	10,16	10,152	-0,082
9	540	10,14	10,135	-0,051
11	660	10,11	10,102	-0,082
13	780	10,09	10,082	-0,079
15	900	10,07	10,062	-0,079
17	1.020	10,05	10,042	-0,081
19	1.140	10,03	10,021	-0,089
23	1.380	9,99	9,982	-0,080
25	1.500	9,98	9,972	-0,080
50	3.000	9,80	9,792	-0,081
167	10.000	9,26	9,328	0,731
500	30.000	8,38	8,920	6,448
833	50.000	7,81	9,353	19,759
1.667	100.000	6,86	12,150	77,113
3.333	200.000	5,77	19,922	245,262
5.000	300.000	5,10	26,761	424,716
10.000	600.000	3,96	37,987	859,274
16.666	1.000.000	3,19	44,430	1.292,776
33.333	2.000.000	2,29	86,416	3.673,621
50.000	3.000.000	1,86	108,151	5.714,577
66.667	4.000.000	1,59	125,017	7.762,731

Através da Figura 47 percebe-se a grande variação dos valores das impedâncias para as altas frequências, quando comparada aos resultados apresentados pelo software comercial.

Figura 47 – Valores da resistência via o software comercial e valores da impedância via o software ATP/EMTP em relação à variação da frequência.

A impedância da malha calculada via o software ATP é composta por uma resistência e uma reatância indutiva. A Tabela 9 mostra a variação dessas duas grandezas em relação à variação da frequência. Nota-se que para frequências mais elevadas, a reatância indutiva dos cabos cresce de forma que a área efetiva da malha de terra diminui, ou seja, as correntes para frequências elevadas não conseguem se dissipar por toda a área da malha, somente ao redor do ponto mais próximo da tomada de terra. Sendo assim, para esta situação, com menos cabos efetivos entre o solo, maior será a resistência. Acima de 10 kHz essa diferença começa a aumentar tomando a proporção de até oito vezes maior em relação à resistência da malha de terra a 60 Hz. A Figura 48 mostra a variação da reatância indutiva e da resistência da impedância da malha simulada via o software ATP. Já a Figura 49 ilustra a diferença entre a resistência calculada via o software comercial e a parte real da impedância calculada via o software ATP.

A diferença entre as resistências é mais significativa a partir de 100 kHz. Conforme a Figura 48 verifica-se que houve uma oscilação na reatância indutiva para a frequência de 1 MHz, fato que, provavelmente, se deve à variação da permissividade, fazendo também oscilar a capacitância da malha. Esses resultados oscilaram devido à variação de todos os parâmetros da malha, tais como resistividade, permissividade e resistência em relação à frequência.

Figura 48 – Variação da resistência e da reatância indutiva da malha via o software ATP em relação à frequência.

Figura 49 – Diferença entre as duas resistências calculadas via o software comercial e o ATP.

Tabela 9 – Valores da resistência da malha de terra em relação à impedância da malha via o software ATP em componentes retangulares e polares.

Ordem Harmônica	Frequência [Hz]	R [ohms] (cabo e haste) Software Comercial	R [ohms] Software ATP	X [ohms] Software ATP	Z [ohms] Software ATP	Ângulo [°]
0	0	10,29	10,28	0,000	10,282	0,000
1	60	10,29	10,28	0,017	10,282	0,092
2	120	10,27	10,26	0,022	10,263	0,122
3	180	10,24	10,23	0,030	10,232	0,170
5	300	10,19	10,18	0,047	10,175	0,262
7	420	10,16	10,15	0,063	10,152	0,354
9	540	10,14	10,13	0,078	10,135	0,439
11	660	10,11	10,10	0,092	10,102	0,521
13	780	10,09	10,08	0,106	10,082	0,601
15	900	10,07	10,06	0,119	10,062	0,679
17	1.020	10,05	10,04	0,128	10,042	0,729
19	1.140	10,03	10,02	0,145	10,021	0,830
23	1.380	9,99	9,98	0,169	9,982	0,971
25	1.500	9,98	9,97	0,182	9,972	1,047
50	3.000	9,80	9,79	0,323	9,792	1,888
167	10.000	9,26	9,29	0,857	9,328	5,270
500	30.000	8,38	8,43	2,924	8,920	19,137
833	50.000	7,81	7,97	4,901	9,353	31,603
1.667	100.000	6,86	7,73	9,373	12,150	50,483
3.333	200.000	5,77	10,25	17,084	19,922	59,041
5.000	300.000	5,10	14,85	22,264	26,761	56,302
10.000	600.000	3,96	29,59	23,820	37,987	38,832
16.666	1.000.000	3,19	42,02	14,428	44,430	18,950
33.333	2.000.000	2,29	44,29	74,201	86,416	59,166
50.000	3.000.000	1,86	63,83	87,304	108,151	53,827
66.667	4.000.000	1,59	82,88	93,595	125,017	48,474

Além da verificação dos valores da impedância da malha de aterramento, foi verificada também a diferença de potencial entre suas extremidades em relação ao método proposto, injetando-se uma corrente de 1000 A em uma extremidade da malha e verificando a diferença de potencial entre o ponto de injeção da corrente e a outra extremidade totalmente oposta.

A Tabela 10 mostra a diferença de potencial entre as duas extremidades em relação à variação da frequência da corrente injetada de 1000 A.

Tabela 10 – Diferença de potencial entre as duas extremidades da malha de terra via o software ATP na ocorrência de uma injeção de corrente em uma das extremidades de 1000 A.

Ordem Harmônica	Frequência [Hz]	Diferença de Potencial p/ 1 kA [V]
0	0	0
1	60	21
2	120	41
3	180	60
5	300	95
7	420	129
9	540	162
11	660	193
13	780	225
15	900	255
17	1.020	286
19	1.140	315
23	1.380	372
25	1.500	402
50	3.000	742
167	10.000	3.075
500	30.000	5.335
833	50.000	8.130
1.667	100.000	14.132
3.333	200.000	24.707
5.000	300.000	32.531
10.000	600.000	40.569
16.666	1.000.000	43.278
33.333	2.000.000	86.254
50.000	3.000.000	108.680
66.667	4.000.000	124.850

Analisando a Figura 39 percebe-se que para o software comercial a diferença de potencial entre as extremidades da malha de terra é o mesmo quando da ocorrência da injeção de 1000 A, e que para a simulação via o software ATP isso não acontece.

A Figura 50 mostra a variação do nível do potencial em relação à frequência para o software ATP. Observa-se que a variação do nível de potencial cresce de forma não linear e de forma mais acentuada para frequências acima de 1 MHz.

Figura 50 – Diferença de potencial entre as duas extremidades da malha de aterramento via o software ATP.

Até o momento, foram apresentados todos os resultados decorrentes da simulação da malha via o software ATP. Porém vale lembrar que esses valores de impedância da malha de aterramento em relação à variação da frequência do sinal de corrente são devidos à tomada de terra no ponto conforme mostra a Figura 44, e que para cada ponto escolhido como tomada de terra existe uma impedância característica. Também vale lembrar que esses resultados são particulares para essa malha de aterramento, respeitando todas as considerações apontadas para a implementação da mesma.

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados observados no trabalho como um todo.

Tabela 11 – Resumos dos resultados simulados pelo método proposto.

Ordem Harmônica	Frequência [Hz]	Resistividade do Solo 1ª Camada	Resistividade do Solo 2ª Camada	R [ohms] (cabo) Software Comercial	R [ohms] (cabo e haste) Software Comercial	Permissividade Relativa	R [ohms] Software ATP	X [ohms] Software ATP	Z [ohms] Software ATP	Ângulo [°]	Diferença Resistência Software ATP - Resistência Software Comercial [%]	Diferença Impedância Software ATP - Resistência Software Comercial [%]	Diferença de Potencial p/ 1kA [V]
0	0	924,2	1.882,57	10,53	10,29	192,2	10,28	0,000	10,282	0,000	-0,078	-0,078	0
1	60	924,2	1.882,57	10,53	10,29	192,2	10,28	0,017	10,282	0,092	-0,076	-0,076	21
2	120	922,9	1.879	10,51	10,27	192,2	10,26	0,022	10,263	0,122	-0,071	-0,071	41
3	180	921,2	1.873	10,48	10,24	192,2	10,23	0,030	10,232	0,170	-0,083	-0,083	60
5	300	919	1.865	10,44	10,19	192,2	10,18	0,047	10,175	0,262	-0,147	-0,146	95
7	420	917,2	1.859	10,4	10,16	192,2	10,15	0,063	10,152	0,354	-0,084	-0,082	129
9	540	915,6	1.854	10,38	10,14	192,2	10,13	0,078	10,135	0,439	-0,054	-0,051	162
11	660	914,4	1.849	10,35	10,11	192,2	10,10	0,092	10,102	0,521	-0,086	-0,082	193
13	780	912,9	1.845	10,33	10,09	192,2	10,08	0,106	10,082	0,601	-0,085	-0,079	225
15	900	911,7	1.841	10,31	10,07	192,2	10,06	0,119	10,062	0,679	-0,086	-0,079	255
17	1.020	909,8	1.837	10,29	10,05	192,2	10,04	0,128	10,042	0,729	-0,090	-0,081	286
19	1.140	909,6	1.833	10,27	10,03	192,2	10,02	0,145	10,021	0,830	-0,100	-0,089	315
23	1.380	907,5	1.826	10,23	9,99	192,2	9,98	0,169	9,982	0,971	-0,094	-0,080	372
25	1.500	906,4	1.823	10,21	9,98	192,2	9,97	0,182	9,972	1,047	-0,096	-0,080	402
50	3.000	896	1.789	10,03	9,80	192,2	9,79	0,323	9,792	1,888	-0,136	-0,081	742
167	10.000	864,2	1.685,9	9,48	9,26	192,2	9,29	0,857	9,328	5,270	0,306	0,731	3.075
500	30.000	809	1.519,1	8,59	8,38	124,3	8,43	2,924	8,920	19,137	0,566	6,448	5.335
833	50.000	771,1	1.411,4	8	7,81	101,6	7,97	4,901	9,353	31,603	1,999	19,759	8.130
1.667	100.000	704,51	1.235,1	7,04	6,86	77,3	7,73	9,373	12,150	50,483	12,698	77,113	14.132
3.333	200.000	620,49	1.032,8	5,93	5,77	58,9	10,25	17,084	19,922	59,041	77,612	245,262	24.707
5.000	300.000	564,5	909	5,24	5,10	50,27	14,85	22,264	26,761	56,302	191,120	424,716	32.531
10.000	600.000	462,1	702,2	4,08	3,96	38,42	29,59	23,820	37,987	38,832	647,263	859,274	40.569
16.666	1.000.000	386,1	563,2	3,29	3,19	31,56	42,02	14,428	44,430	18,950	1.217,292	1.292,776	43.278
33.333	2.000.000	290	402,6	2,36	2,29	24,23	44,29	74,201	86,416	59,166	1.834,197	3.673,621	86.254
50.000	3.000.000	240,3	325,4	1,92	1,86	20,8	63,83	87,304	108,151	53,827	3.331,871	5.714,577	108.680
66.667	4.000.000	208,53	278,12	1,64	1,59	18,68	82,88	93,595	125,017	48,474	5.112,704	7.762,731	124.850

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo inicial um estudo investigativo do comportamento do sistema de aterramento frente a correntes caracterizadas por frequências diferentes da fundamental. Por questões técnicas e práticas, sabe-se que a qualidade de energia fornecida e empregada pelo usuário final esta ligada diretamente ao sistema de aterramento, e que muitos sistemas de geração da energia estão passando por consideráveis mudanças, devido a crescente penetração das fontes renováveis de energia e devido também a evolução e a massiva aplicação de equipamentos (cargas) dependentes da eletrônica de potência.

O capítulo dois deste documento, retratou muitas das formas de modelagem para sistemas de aterramento, bem como teceu as principais considerações sobre o assunto. Ficou claro que a depender da aplicação da malha de aterramento, como, por exemplo, para análises transitórias e/ou em regime permanente, existem algumas abordagens que procuram melhor caracterizá-la. A escolha do modelo a ser usado em uma simulação é muito importante, pois cada modelo possui uma particularidade e possíveis vantagens decorrentes das simulações computacionais.

Para tanto, para esta pesquisa, foi utilizado o *software* ATP para a modelagem do sistema de aterramento e um software comercial, o *TecAt*, para auxílio e comparação das modelagens.

Em relação a modelagem via o *software* ATP, foi apresentada a metodologia passo a passo levando em consideração o dimensionamento de uma malha de aterramento para uma subestação de energia elétrica real. No capítulo quatro foi apresentado e determinado o sistema real de energia elétrica em análise.

A localização geográfica da subestação proposta possui um solo com alta resistividade e com isso teve como resultado uma grande malha de aterramento, sendo que nesse caso não foi adotado nenhum tratamento para o solo. Foi preferido a não adoção do tratamento do solo, visto que na prática isso não é muito efetivo para aterramentos de grandes dimensões.

Para a frequência de 60 Hz obteve-se como resultado uma malha de 72 por 72 m, quadriculada a cada 3m por cabos em um formato quadrado, com algumas hastes distribuídas. Atualmente esse modelo e dimensionamento são utilizados por muitas empresas. Contudo,

conforme apontado por esta pesquisa há a necessidade de se verificar o principal objetivo do projeto da malha para que se possa encontrar uma geometria ótima que atenda todas as funções exigidas.

Como conclusão dos resultados das simulações propostas, conclui-se que para ordens harmônicas até a 50ª ordem (componente harmônico de 3.000 Hz), ambos os tipos de modelagens, convencional (software comercial) e proposta (ATP) apresentaram os mesmos valores de impedância, somente divergindo na equipotencialização da malha para o sistema de aterramento. Para frequências acima de 50 kHz, os valores da impedância da malha já se tornam divergentes entre os dois modelos empregados. Neste caso, conclui-se que a modelagem proposta via o software ATP retrata melhor o comportamento da malha a partir desta frequência.

Como fato, sabe-se que o produto final entregue ao consumidor é a energia elétrica, representada por níveis adequados no fornecimento da tensão. Contudo, contrário ao esperado e desejado fornecimento da energia elétrica, existem muitas perturbações (distúrbios), tais como os transitorios impulsivos e oscilatórios, e ruídos no contexto da QEE, bem como vários dispositivos de proteção que podem ser aplicados e que atuam na inibição dessas perturbações do sistema, dependendo no entanto, de um adequado e conservado sistema de aterramento. Para esses distúrbios caracterizados por frequências mais elevadas o sistema de aterramento proposto e modelado poderá ser usado para estudos e análises futuras, pois retrata todas as características do sistema de aterramento em detalhes. Vale ressaltar que o sistema de aterramento, conforme modelado nesta pesquisa via o *software* ATP, apresentou uma alta impedância para os transitórios oscilatórios, o que não foi verdade para a modelagem adotada como convencional via o software comercial utilizado.

6.1. Continuidade da pesquisa

Este trabalho desenvolvido apresentou uma proposta de modelagem de um sistema de aterramento na presença de correntes harmônicas para uma malha de aterramento real, conforme apresentado anteriormente. Para estudos futuros vale apontar outros fatores que não foram explorados nesta pesquisa como, por exemplo, a avaliação da dimensão física da malha em relação à variação da impedância para as diversas frequências. Além disso, atenção pode

ser dada no sentido de avaliar a variação da impedância da malha em relação à injeção de corrente em diversos pontos da malha para uma frequência escolhida. Vale destacar que, atualmente, os sistemas de aterramento estão sendo caracterizados por uma grande dimensão (área ocupada) em função, principalmente de uma maior presença de fontes alternativas de energia, como, por exemplo, parques eólicos e solares. Nestes novos cenários, até para a frequência de 60 Hz pode acontecer da malha de aterramento vir a apresentar uma não equipotencialização na ocorrência de uma condição de falta sobre o sistema elétrico.

6.2. Publicações resultantes

A linha de pesquisa desenvolvida até o momento apresenta duas participações em congressos nacionais de relevância, conforme abaixo discriminadas:

GAMITO, M. A. R. e OLESKOVICZ, M. “O comportamento de um sistema de aterramento na presença de cargas não lineares”. X Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (X CBQEE), Araxá, MG, Brasil, ISSN: 2236-8531, Anais (CD), 2013.

GAMITO, M. A. R. e OLESKOVICZ, M. “O comportamento de um sistema de aterramento de uma subestação de energia frente à situação de falta de alta impedância”. XX Congresso Brasileiro de Automática (XX CBA), Belo Horizonte, MG, Anais, 2014.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. Experience in material selection for grounding systems for power transmission towers. In: **2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition**. Chicago, IL, USA: IEEE Press, 2014. p. 1-5.
- ADOLFATO, R.; BERNARDI, L.; FELLIN, L. Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2000. v.15, n.3, p. 1001-1009, 2000. ISSN 0885-8977.
- ALÍPIO, R. S. **Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET/MG, 2008.
- ALIPIO, R.; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2012 (?). v.55, n.1, p. 132-139, 2012. ISSN 0018-9375.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 209 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012. 64 p.
- BAJRAMOVIC, Z. et al. Analysis of Test Circuits for Measuring Impulse Grounding Resistance. In: **EuroCon 2013**. Zagreb, Croacia: IEEE Press, 2013. p. 712-716.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory Analysis and Design-Third Edition**. Wiley-Interscience, 2005, p. 447-450.
- CAVKA, D.; MORA, N.; RACHIDI, F. A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2013. v.56, n.1, p. 177-187, 2014. ISSN 0018-9375.

CHO, S. et al. A Method of Calculating the Frequency-Dependent Ground Impedance of Horizontal Electrodes. In: **International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. Shanghai: IEEE Press, 2014. p. 422-426.

DAWALIBI, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors-part I – single conductors. **IEEE Power Engineering Review**, 1986. v. PER-6, n.10, p. 32-33, 1986. ISSN 0272-1724.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **EPRI EL-2020** Ground Electrode Design. California: International Engineering Company, Inc. 1981.

FANG, C. et al. Feasibility Study on Using Jacket Structure as Natural Grounding Electrode of Offshore Wind Turbines. In: **International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. Shanghai: IEEE Press, 2014. p. 265-268.

FREIRE, P. E. F.; LIMA, M. A.; GRIBEL, V. L. GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO – GSE: Estudo do Sistema de Aterramento da UHE Santo Antônio. In: **XXII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Brasília:[s.n], 2013. p. 1-8.

GRCEV, L. Computation of transient voltages near complex grounding system caused by lightning currents. In: **IEEE 1992 International Symposium on Electromagnetic Compatibility**. Anaheim, CA, USA: IEEE Press, 1992. p. 17-21.

HANNAH, A. Power quality considerations in distribution engineering. In: **Rural Electric Power Conference (REPC)**. Milwaukee, WI: IEEE Press, 2012. p. C2-1-C2-6.

HARRINGTON, R. **Field Computation by Moment Methods**. 1st. ed. New York: The Macmillan Company, 1968.

JOHNS, P. B. Application of the transmission-line matrix method homogeneous wave guides of arbitrary cross-section. In: **The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, 1972. p. 1086-1091, 1972. ISSN 0020-3270.

JUNIOR, I. G. C. **Aterramento do Ponto Neutro das Redes de Distribuição Através de Bobina Ressonante**. Dissertação de Mestrado. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2009.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J.M. **Aterramento Elétrico**. 3 ed. Porto Alegre: Editora SAGRA D.C. LUZZATTO, 1995.

KOCHURA, D.; TSIVILYOV, I.; SARIN, L. Influence of neutral grounding method on voltage unbalance in 10 kV network with cable lines and overhead lines. In: **2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)**. Rakvere: IEEE Press, 2014. p. 359-362.

Liu, **Soil and site characterization using electromagnetic waves**. Virginia: Tech Univ., 2007.

LYNCE, M. **Apostila – Introdução ao Sistema ATP**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

MARTI, J. Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetics transient simulations. **IEEE Transactions Apparatus and System**, 1982. v. PAS-101, n.1, p. 147-157, 2007. ISSN 0018-9510.

MARTINS, L. M. N. **CD – Aterramentos Elétricos**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2001.

MELIOPOULOS, A. P.; MOHARAM, M. G. Transient analysis of grounding system. **IEEE Transactions Apparatus and System**, 1983. v. PAS-102, n.2, p. 389-399, 2007. ISSN 0018-9510.

MORINEE, A. G. Power Quality Considerations for CNC Machines : GROUNDING. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2002. v. 38, n.2, p. 615, 2002. ISSN 0093-9994.

NATIONAL STANDARD. **GOST R 54149-2010**: Norms of Power Quality in General Purpose Power Supply Systems.

NAYEL, M. Study Frequency Characteristics of Ground by Using Four Electrode Method. In: **2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)**. Shanghai: IEEE Press, 2012. p. 313-317.

OFFSHORE STANDARD (**DNV-OS-J101**). 2007, Design of Offshore Wind Turbine Structures, DET NOR SKE VERITAS.

POMILIO, J. A. **Apostila – Eletrônica de Potência**. 2015. Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a8.pdf>.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, J. A. **Apostila – Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica**. Campinas: DSCE-FEEC, 2010.

POTIER, G. C. et al. **Física dos Raios e Engenharia de Proteção**. Porto Alegre: Editora EDIPUCRS, 2010.

POWER SYSTEMS ENGINEERING COMMITTEE OF THE IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY. **IEEE Std 142** Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2007.

POWER SYSTEMS ENGINEERING COMMITTEE OF THE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEM DEPARTMENT. **IEEE Std 1100** Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2005.

ROBERTS, J. et al. Análise dos Métodos de Proteção Contra Falhas à Terra nos Sistemas de Distribuição Aterrados, Não Aterrados e Compensados. In: **SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMERCIAL LTDA**. Campinas: [s.n.], 2001. p. 1-39.

SADIKU, M. N. **Numerical Techniques in Electromagnetics with Matlab**. New York: CRC Press, 2009.

SANTOS, C. G. A Influência da Resistência de Terra nos Efeitos das Descargas Atmosféricas. **O Setor Elétrico**, Uberlândia, v.48, p. 108-114, 2010.

SCHIFF, J. L. **The Laplace Transform - Theory and Application**. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1999.

SESNIC, S. et al. Analytical Modeling of a Transient Current Flowing Along the Horizontal Grounding Electrode. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2013. v.55, n.6, p. 1132-1139, 2013. ISSN 0018-9375.

SESNIC, S.; POLJAK, S.; TKACHENCO, S. "Time domain analytical modeling of a straight thin wire buried in a lossy medium. **Pogress Electromagn. Res.**, vol. 121, p. 485-504, 2011.

SUBSTATIONS COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Std 80** Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York: Institute of Eletrical and Eletronics Engineers, Inc.2000.

SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. New York: Dover Publications, 1968.

VENHUIZEN, R. **Apostila – Guia de Aplicação de Qualidade de Energia Aterramento e CEM: Uma Abordagem dos Sistemas de Aterramento**. São Paulo: Procobre, 2002.

XIONG, R.; BIN C.; FANG, D. An Algorithm for the FDTD Modeling of Flat Electrodes in Grounding Systems. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 2014 . v.62, n.1, p. 345-353, 2014. ISSN 0018-926X.

YUAN, X. Tree-dimensional electromagnetic scattering from inhomogeneous objects by the hybrid moment and finite element method. **IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques**, 1990. v.38, n.8, p. 1053-1058, 2002. ISSN 0018-9480.

YUTTHAGOWITH, P. et al. Transient Equivalent Circuit of a Horizontal Grounding Electrode. In: **2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application**. Shanghai: IEEE Press, 2012. p. 157-161.

ZHANG, F. et al. The simulation research on the impulse characteristics of the grounding electrode in the layered soil. In: **International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. Shanghai: IEEE Press, 2014. p. 1625-1628.