

Humberto Calil Bertollo

**Contribuições ao Estudo dos
Aterramentos de Sistemas Monofilares
com Retorno pelo Terra**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título
de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

Humberto Calil Bertollo

**Contribuições ao Estudo dos
Aterramentos de Sistemas Monofilares
com Retorno pelo Terra**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título
de Magister Scientiae.

APROVADA: 30 de abril de 2008

Prof. José Roberto Camacho

Prof. José Tarcísio

Prof. José Márcio Costa

Prof. Tarcísio de Assunção Pizziolo
(Co-orientador)

Delly Oliveira Filho
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Deus pela graça da vida e por me fazer sentir a sua presença guiando meus caminhos sempre.

Aos meus pais Noemi Bertollo e Vitorimar Calil Bertollo por terem me oferecido uma base familiar sólida proporcionando os pilares para meu desenvolvimento como ser humano.

Aos meus sogros Carlos Alberto de Freitas e Eunice Pires da Silva por terem me acolhido em sua casa e proporcionado um ambiente calmo e inspirador para a elaboração do trabalho

À Karla por sempre acreditar no meu potencial e me incentivar a buscar sempre o melhor.

Ao meu orientador Delly Oliveira Filho pelo direcionamento científico e pelas idéias dadas ao trabalho.

Ao meu coorientador Tarcício de Assunção Pizziolo pelo apoio e incentivo profissional.

Aos meus coorientadores Paulo Marcos Barros Monteiro e Denílson Eduardo Rodrigues pela ajuda na execução do trabalho.

Ao Jorge Luis De Franco, pelo interesse demonstrado na execução do trabalho e no meu desenvolvimento pessoal, se colocando sempre a disposição para ajudar.

Ao Marcos Tadeu Varricchio e ao Sanderson Rocha de Abreu, participantes do projeto que deu origem ao trabalho, pelo apoio dado sempre que precisei.

À ENERGISA que financiou o trabalho e me proporcionou uma experiência única por ter participado do projeto.

ÍNDICE

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
CAPÍTULO 2 – ELETRIFICAÇÃO RURAL NO BRASIL E NO MUNDO	4
2.1 EXPANSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO NO BRASIL E NO MUNDO	8
2.1.1. <i>Programas de Eletrificação Rural</i>	10
2.2 O SISTEMA MRT.....	11
2.2.1. <i>Topologias de Sistema MRT</i>	11
2.3 ATERRAMENTO	14
2.3.1. <i>Modelagem de Sistemas de Aterramento</i>	15
2.3.2 <i>Aterramento de Sistemas MRT</i>	16
2.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
CAPÍTULO 3 – PROJETO DE ATERRAMENTO PARA SISTEMA MONOFILAR	
COM RETORNO PELO TERRA	21
3.1 INTRODUÇÃO.....	21
3.1.1 <i>Objetivo</i>	22
3.2 REVISÃO DA LITERATURA	24
3.2.1 <i>Modelagem de Sistemas de Aterramento</i>	26
<i>Equação Matricial</i>	26
3.2.2 <i>Obtenção da Resistência do Aterramento e dos Potenciais no Solo</i>	28
3.2.3 <i>Considerações Acerca da Segurança de Aterramentos em MRT</i>	30
<i>Tensão de Passo</i>	31
3.3 METODOLOGIA.....	31
3.3.1 <i>Modelagem Computacional</i>	32
<i>Entrada de Dados</i>	33
<i>Cálculo</i>	34
<i>Resultados</i>	34

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.4.1 <i>Hastes em Triângulo</i>	35
3.4.2 <i>Quatro Hastes Formando um Quadrado</i>	37
3.4.3 <i>Nove Hastes Formando uma Malha com Quatro Quadrados</i>	39
3.5 CONCLUSÃO	41
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
 CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DE UMA HASTE DE ATERRAMENTO NO	
DOMÍNIO DE LAPLACE	
45	
4.1 INTRODUÇÃO	45
4.1.1 <i>Objetivos</i>	46
4.2. REVISÃO DA LITERATURA	47
4.2.1 <i>Determinação dos Parâmetros do Aterramento</i>	47
4.2.2 <i>Modelagem de uma Haste</i>	50
4.2.3 <i>Ensaio de Impulso Atmosférico</i>	51
4.3 METODOLOGIA	53
4.3.1 <i>Modelo no Domínio de Laplace</i>	53
4.3.2 <i>Proposta para uma Modelagem em Espaço de Estados</i>	55
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.5 CONCLUSÃO	60
4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
 CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO GERAL E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
FUTUROS.....	
62	
5.1 CONCLUSÃO GERAL	62
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Crescimento da população rural e urbana brasileira	4
Figura 2.3 – Sistema monofilar com transformador de isolamento.	13
Figura 2.4 – Sistema monofilar MRT com neutro parcial.	14
Figura 3.1 – Haste vertical	25
Figura 3.2 – Fluxograma do Modelo Computacional para o Projeto do Aterramento	33
Figura 3.3 – Três hastes em triângulo.	35
Figura 3.5 – Quatro hastes formando um quadrado.	37
Figura 3.6 – Potenciais gerados no solo para um sistema de aterramento com quatro hastes formando um quadrado.	38
Figura 3.7 – Nove hastes formando uma malha com quatro quadrados.....	39
Figura 4.1 - Distribuição das correntes ao longo do eletrodo.....	45
Figura 4.4 – Tensão de impulso aplicada ao modelo do aterramento.	54
Figura 4.5 – Gráfico de fluxo de sinais para uma haste representada por dois circuitos π	56
Figura 4.6 – Corrente de aterramento em função do tempo para quatro valores de resistividade elétrica do solo e permissividade elétrica relativa ϵ_r de 4.	57
Figura 4.7 – Corrente de aterramento em função do tempo para diferentes valores de comprimento da haste e permissividade elétrica relativa ϵ_r igual a 4.	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Resistência de terra limites (Ω) para aterramento dos transformadores de distribuição.....	32
Quadro 3.2 – Tensões de passo e de pata máximas para diferentes valores de potência do transformador de isolamento	37
Quadro 3.3 – Tensões de passo e de pata máximas para diferentes valores de potência do transformador de isolamento.....	39
Quadro 3.4 – Tensões de passo e de pata máximas para diferentes valores de potência do transformador de isolamento.....	41
Quadro 4.1 - Resistividade de diferentes tipos de solo	50
Quadro 4.2 – Valores das variáveis utilizadas na simulação.....	55

NOMENCLATURA

ρ	Resistividade do solo, $\Omega.m$;
ρ_c	Resistividade da haste, $\Omega.m$;
I_T	Corrente transversal que circula na haste, A;
I_{Tj}	Corrente transversal que circula na haste “j”, A;
V_p	Potencial no ponto P, V;
V_{ij}	Potencial na haste “i” gerado pela corrente que circula em uma haste “j”, V;
d_l	Elemento diferencial de comprimento da haste, m;
l	Comprimento da haste, m;
R_{ij}	Resistência entre duas hastes, Ω ;
R_{ii}	Resistência própria de uma haste, Ω ;
P_n	Potência nominal do transformador, kVA;
R	Resistência por unidade de comprimento, Ω/m ;
G	Indutância por unidade de comprimento, S/m;
L	Indutância por unidade de comprimento, H/m;
C	Capacitância por unidade de comprimento, F/m;
r	Raio da haste, m;
ϵ	Permissividade elétrica, F/m;
A	Área transversal da haste, m^2 ;
V	Tensão aplicada ao aterramento, V;
I	Corrente que circula no aterramento, A; e
ϵ_r	Permissividade elétrica, F/m.

ABREVIATURAS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MRT	Monofilar com Retorno pelo Terra
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MME	Ministério de Minas e Energia
RGR	Reserva Global de Reversão
ELETROBRÁS	Centrais Elétrica Brasileiras S.A.
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

RESUMO

BERTOLLO, Humberto Calil, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril, 2008. **Contribuições ao Estudo dos Aterramentos de Sistemas Monofilares com Retorno pelo Terra.** Orientador: Delly Oliveira Filho. Co-orientadores: Tarcísio de Assunção Pizziolo, Denílson Eduardo Rodrigues, Paulo Marcos Barros Monteiro

Esta dissertação apresenta uma discussão sobre a possibilidade de se reduzir os custos com a eletrificação rural por meio da utilização de Sistema Monofilar com Retorno pelo Terra. É apresentado o projeto de aterramento para Sistema Monofilar com Retorno pelo Terra em solicitações de baixas frequências utilizando o método das imagens considerando a simplificação do método dos potenciais constantes. Foi feito também uma modelagem por variáveis de estado no domínio de Laplace de uma haste de aterramento para solicitações em altas frequências quando se variam os parâmetros resistividade do solo e comprimento da haste tornando possível analisar o seu comportamento frente a descargas atmosféricas. Para as solicitações em baixa frequência, foi simulado o comportamento de três diferentes configurações de aterramento: hastes em triângulo, em quadrado vazio e para nove hastes formando uma malha com quatro quadrados. A partir da simulação foi possível obter o valor da resistência de aterramento para cada configuração e os potenciais gerados na superfície do solo. Com base nesses resultados, foi possível comparar os valores tabelados para resistências mínimas, em função da potência do transformador, aplicados para diferentes concessionárias de energia que utilizam o Sistema MRT com os valores calculados que mantém os potenciais no solo em níveis seguros para seres humanos e animais. Os resultados mostraram que é possível utilizar aterramentos mais simples e mais baratos, pois os gradientes de tensões no solo se mantiveram em níveis seguros.

ABSTRACT

BERTOLLO, Humberto Calil, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2008. **Contributions to the Study of the Grounding of Single Wire Earth Return Systems.** Adviser: Delly Oliveira Filho. Co-advisers: Tarcísio de Assunção Pizziolo, Denílson Eduardo Rodrigues, Paulo Marcos Barros Monteiro

This work presents a discussion on the possibility to reduce costs in rural electrification systems using a Single Wire Earth Return (SWER) system. It is presented a grounding project for a SWER system in low frequency applications, through the use of the image method, a simplification of the constant potential method and a state variable model in the Laplace domain for a grounding electrode for high frequency applications with changes in soil resistivity and in the length of the electrode, such models makes possible the analysis of the response of the grounding system to lightning discharges. For low frequency applications, the responses of three different grounding configurations were simulated: electrodes in triangular placement, electrodes placed in the corners of a square and nine electrodes placed in the corners of a grid with four squares. With the mentioned simulation it was possible to calculate the ground resistance and the surface voltage of each configuration. Obtained results were compared with values published by ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. for the minimum grounding resistance that keeps the surface voltage in safe levels for human beings and animals. Results showed that it is possible to use simpler and cheaper grounding configurations due to the fact that the surface voltages were kept in safe levels.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

A energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento econômico de uma região e para a qualidade de vida de uma população. Especialmente na zona rural, ela é fundamental para a fixação do homem no campo.

Segundo uma pesquisa feita pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em parceria com Ministério de Minas e Energia (MME), onde foram entrevistados 6.500 moradores das zonas rurais em 24 estados, 23% disseram que se não houvesse energia elétrica pelo menos um membro da família teria ido embora para a cidade. A pesquisa mostra ainda que para 67% dos entrevistados, a chegada da energia elétrica melhorou as oportunidades de estudos. Para 74% dos entrevistados as condições de trabalho melhoraram.

Historicamente, o governo tem relegado às concessionárias a implementação das redes de distribuição rural. Entretanto, elas tratam a eletrificação rural como uma extensão dos serviços prestados nas cidades. Oferecendo, portanto, em muitas das vezes padrões de eletrificação rural com sistemas trifásicos e postes de concreto e outras características que encarecem. Entretanto, como são os produtores rurais que arcam com os custos da eletrificação, a grande maioria tem ficado sem acesso a energia elétrica durante anos.

No campo, na maioria das vezes, não é necessário utilizar alimentadores trifásicos para a eletrificação das zonas rurais. Inicialmente, o que os consumidores rurais necessitam é luz elétrica e posteriormente bombas de água, que podem ser movidas por motores monofásicos. Devido a grande importância da energia elétrica no campo, o padrão exigido pelas concessionárias de postes de concreto é questionável. Podendo, portanto ser utilizado postes de madeira inicialmente para diminuição de custos.

Como substituição aos alimentadores trifásicos tem-se os monofásicos com custos menores. Com um custo menor ainda em relação aos alimentadores trifásicos tem-se o sistema Monofilar com Retorno pelo Terra (MRT) que será apresentado no Capítulo 2.

Os resultados do programa de eletrificação rural “Luz na Terra” no estado de São Paulo mostram que houve um aumento nos custos quando se diminuiu a utilização do sistema MRT e aumentou-se à utilização do sistema Bifásico Vertical (RIBEIRO, 2000).

O objetivo desse trabalho é apresentar o sistema MRT como uma alternativa viável para a eletrificação rural. Entretanto ele exige um sistema de aterramento complexo. Essa exigência motivou o estudo feito sobre aterramentos elétricos em regime permanente e em regime transitório.

1.1 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2 é feita uma discussão sobre a eletrificação rural no Brasil e no Mundo hoje apresentando a necessidade de se utilizar alternativas mais baratas para a eletrificação. É apresentado também o principio de funcionamento de sistemas MRT e uma introdução sobre aterramentos elétricos.

No capítulo 3 têm-se a descrição matemática para o projeto de sistemas de aterramento possibilitando o cálculo da resistência de aterramento e dos potenciais gerados no solo. São simuladas três configurações diferentes de aterramento para que fosse possível a análise dos resultados.

As Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS) e algumas empresas que utilizam o sistema MRT apresentaram um quadro com os valores mínimos exigidos para a resistência de aterramento em função do valor da potência do transformador de isolamento utilizado.

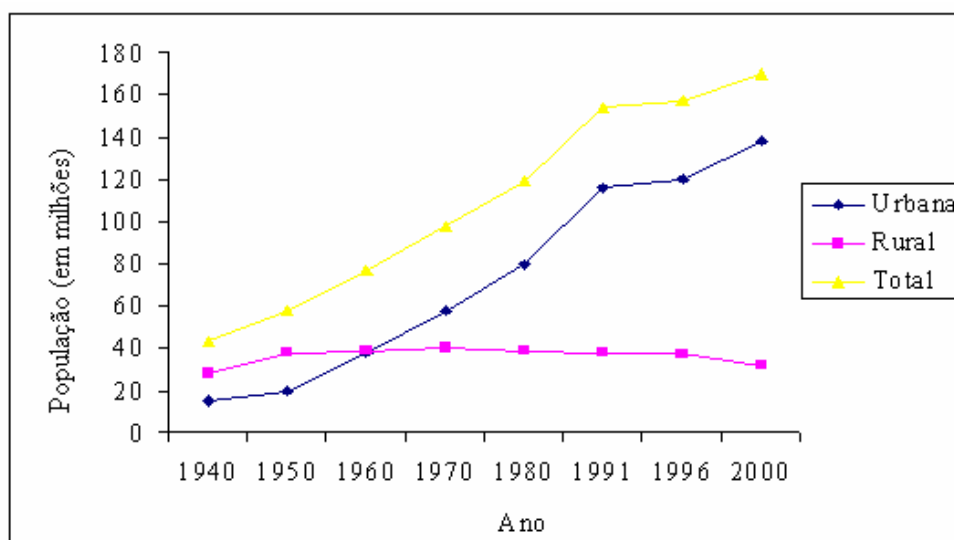
Como forma de avaliar esses valores, foram levantados o potencial de passo humano e de animais máximos encontrados para todas as configurações de aterramento estudadas. Caso eles estejam em níveis seguros, isto é, menores que 27 V, é indicado que se utilize configurações mais simples e, portanto, mais econômicas, mesmo que a resistência de aterramento seja maior que o mínimo exigido atualmente.

O Capítulo 4 trás a modelagem de uma haste de aterramento por variáveis de estado com descrição no domínio de Laplace frente a solicitações de alta frequência calculando-se a impedância de aterramento e verificando a amplitude e o tempo de duração de uma corrente gerada pela tensão de impulso.

Os resultados foram calculados para diferentes resistividades do solo e comprimento da haste. O objetivo é estudar as características das respostas transientes no domínio do tempo e a amplitude para que a resposta transitória ocorra em níveis seguros para seres humanos e animais.

CAPÍTULO 2 – ELETRIFICAÇÃO RURAL NO BRASIL E NO MUNDO

Nas últimas décadas, a participação relativa da população rural na população total brasileira tem apresentado uma trajetória descendente. A Figura 2.1 mostra a evolução do crescimento populacional nas áreas rural e urbana no Brasil, ilustrando nitidamente o processo de migração a partir de 1940 (OLIVEIRA, 2001).



Fonte: IBGE

Figura 2.1 – Crescimento da população rural e urbana brasileira.

Um dos fatores indutores desse processo de migração das zonas rurais para as cidades é a falta de energia elétrica no meio rural. Pois, inviabiliza o desenvolvimento econômico e o crescimento da renda nessas regiões. Além disso, a ausência de infra-estrutura de energia, água potável e saneamento, dentre outros itens de serviços básicos, também contribuem para a evasão das regiões rurais e, conseqüentemente, o aumento da população das zonas metropolitanas.

Apesar de não se constituir no único fator gerador de desenvolvimento, e sim apenas em um dos muitos necessários para reverter a situação de pobreza, verifica-se que nas regiões onde o fornecimento de

energia elétrica é maior, são melhores os indicadores de desenvolvimento humano (FERREIRA, 2004). Além disso, a energia elétrica aumenta a produtividade, com isso cresce a produção e a arrecadação de impostos.

Particularidades inerentes ao mercado de eletrificação rural dificultam a expansão da energia elétrica. Considera-se como um fator principal de dificuldade sua dispersão espacial de demanda, que introduz elevados custos iniciais de atendimento e seu padrão de baixo consumo per capita, aumentando, assim, o tempo necessário para o retorno do capital investido (ELETROBRAS, 2002). Em contrapartida, as empresas de energia elétrica estendem suas linhas de distribuição pela cidade gratuitamente, conectando quantos consumidores estiverem interessados. Isso se deve a grande densidade demográfica e, conseqüentemente a alta demanda.

Entretanto, é necessário modificar os critérios de análise de viabilidade de um projeto de eletrificação rural. Não se concentrando somente nos resultados econômicos de curto prazo, mas sim em questões sociais e ambientais (ELETROBRÁS, 2002).

Um fator importante que aumentaria muito a viabilidade da construção da rede de distribuição rural é a forma como é definida a zona rural. Nos EUA e na China, uma cidade como Viçosa seria considerada zona rural. Dessa forma é mais vantajoso para uma cooperativa atender uma área rural, pois além dos consumidores dispersos, que diminuem a viabilidade do projeto, há também as áreas com maior densidade demográfica, como as pequenas cidades. De acordo com o governo chinês, uma área com uma população menor que 100 mil habitantes é considerada zona rural.

Mas apesar da dificuldade de se eletrificar as zonas rurais, levando em consideração a forma como são definidas atualmente no Brasil, a adoção de algumas medidas pelo governo e a mudança na forma como as concessionárias atuam podem melhorar os índices de eletrificação rural no Brasil. Os programas de eletrificação do governo iniciados na década de 90 têm um importante papel na eletrificação das zonas rurais, financiando os custos dos produtores rurais.

Entretanto, mesmo sendo os produtores rurais que arcam com as despesas para a construção de sua linha de distribuição rural, ficando como responsabilidade das concessionárias a sua manutenção, elas exigem altos padrões para suas redes, postes de concreto, cabos de cobre ou alumínio. O ideal é primeiro energizar toda a área rural, mesmo que com postes de madeira e depois sim, instalar sofisticadas redes de distribuição.

Como forma de beneficiar ainda mais o produtor rural, deveria ser adotado no Brasil, o que é adotado nos Estados Unidos. Lá o produtor recebe uma parte dos seus gastos com a construção da rede de distribuição em ações da concessionária como forma de pagamento pela sua doação. Na realidade já foi assim no Brasil, pelo menos para concessionárias de telefonia, ou seja, a expansão da rede compensava em parte o consumidor sob a forma de distribuição de ações da concessionária.

A área rural brasileira poderia ser eletrificada a um custo e com um tempo muito menor se, ao invés do Sistema Trifásico com estrutura de alto custo inicial fosse adotado o Monofásico com Retorno pelo Terra, como fizeram os Estados Unidos, Rússia Canadá e Austrália.

O Canadá, que já teve o maior Índice de Desenvolvimento Humano do mundo por três anos na década de 90, utiliza o sistema Monofilar com Retorno pelo Terra e a maioria dos postes são feitos de madeira, mesmo em cidades grandes como Montreal.

As redes elétricas rurais já são, em sua maioria, constituídas de sistemas monofásicos, por serem mais baratos e atenderem, na maioria das vezes, as demandas de eletrificação de grande parte da zona rural. Assim, as vantagens do sistema trifásico quanto à estabilidade do sistema, promovendo variações de tensão e quanto à utilização de energia, permitindo uso de motores mais robustos, eficientes e baratos, não podem ser usufruídas (RIBEIRO, 2000). Na África, a utilização de alimentadores trifásicos nas zonas rurais resultou em um fator de utilização de 10 a 30% para as redes rurais além de deixar consumidores em potencial sem energia elétrica por não possuírem capital para instalar as redes trifásicas (BROOKING, e JANSE VAN RENSBURG, 1992). Esses fatos

demonstram os prejuízos de se utilizar indiscriminadamente alimentadores trifásicos nas zonas rurais.

Os sistemas monofásicos em uso são os sistemas fase/neutro e o sistema monofilar por retorno pelo terra. O sistema MRT é o mais barato. Nele, não há custo com o condutor neutro e a fase pode ser somente de aço, que além de ser mais barato que o cobre e o alumínio, exige que se tenha em média cerca de 5 postes/km enquanto condutores de cobre exigem 15 postes/km e de alumínio exigem 10 postes/km (RIBEIRO, 2000).

O sistema MRT possui um custo de implementação de cerca de 10% do trifásico enquanto o monofásico com condutor de retorno possui um custo de cerca de 40%.

O sistema MRT é um sistema de distribuição monofásico onde corrente de carga retorna pela terra (CAMINHA JÚNIOR; 2001; CHAPMAN, 2001; BROOKING, 1992). Há uma série de vantagens na utilização de sistemas MRT: O baixo custo de capital, simplicidade de design e redução nos custos de manutenção.

As principais características e componentes de um sistema MRT são:

- **Valores das tensões.** Tipicamente esses valores são $13,8/\sqrt{3}$ kV, $23/\sqrt{3}$ kV e $34,5/\sqrt{3}$ kV. Eles são convenientes, pois são os valores entre fase e neutro de sistemas trifásicos típicos do Brasil, com valores de 13,8 kV, 23 kV e 34,5 kV respectivamente. O padrão para tensão secundária de distribuição no meio rural é de 240 V.
- **Transformador de Isolamento.** Isola as correntes que circulam na terra das correntes do alimentador trifásico. O gradiente de tensão no aterramento deve se limitar em 27 V para impedir potenciais de passo e de toque que prejudicam a segurança de animais e seres humanos. Os valores dos transformadores de isolamento típicos são 3 kVA, 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA.

- **Características dos Condutores.** Tipicamente os condutores têm um diâmetro pequeno e alta resistência mecânica. São feitos de aço, alumínio, alumínio com alma de aço e de cobre.
- **Reatores para compensação.** Reatores em paralelo são usualmente aplicados à linha para compensar as perdas, para controlar a tensão e para diminuir o tamanho dos transformadores de isolamento.
- **Aterramento.** O aterramento tem que ser confiável e ter baixa resistência. Sistemas de aterramentos pobres reduzem a segurança e a qualidade do fornecimento de energia (CEPEL, 2002; CHAPMAN, 2001).

O principal problema associado com os sistemas MRT é a necessidade de conseguir aterramentos adequados para o circuito de retorno por terra, o que, realmente, determinará a viabilidade econômica do sistema. Uma crítica que se faz na implementação do sistema MRT em Minas Gerais é que no Estado há grande ocorrência de raios. Entretanto essa afirmação é questionável, pois, o Estado é muito grande e essa é uma observação muito simplista.

O sistema MRT necessita de um excelente aterramento, pois o terra funciona como um terra vivo, conduzindo a corrente do circuito além de servir como proteção. Vale lembrar que em sistemas monofásicos e ou trifásicos o terra normalmente conduz corrente somente em caso de atuação da proteção e em caso de desbalanceamento entre fases.

2.1 Expansão do Sistema Elétrico no Brasil e no Mundo

Estima-se que uma parcela de cerca de 1/3 da população mundial não têm acesso à energia elétrica, isso corresponde a cerca de 2 bilhões de pessoas (FERREIRA, 2004).

Os 29 países membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), organização internacional que reúne

os países mais industrializados da economia do mercado, somam 1,3 bilhão de habitantes com um consumo anual de 7.300 TWh/ano. O restante do mundo, somando 4,6 bilhões de habitantes, consome apenas 4.450 TWh/ano (FERREIRA, 2004). Ou seja, em média, os países do OCDE consomem cerca de 5,8 vezes mais que o restante do mundo.

De acordo com a fonte utilizada, as estatísticas sobre o fornecimento de energia elétrica no país podem variar. Segundo o Censo 2000, realizado pelo IBGE existem 2,4 milhões de domicílios sem iluminação elétrica. Esses consumidores não atendidos concentram-se em sua maioria nas áreas rurais das regiões Norte e Nordeste do país correspondendo a 78,53%. Se for considerada a média de 3,76 moradores por casa, segundo o IBGE, há de 10,5 milhões a 11,5 milhões de brasileiros vivendo na escuridão.

No Brasil, apenas 70% do meio rural possui energia elétrica. Porém, apesar dos esforços para expandir a eletrificação rural no Brasil, poucas propriedades rurais possuem acesso de forma regular e segura à energia elétrica, significando a exclusão de milhões de brasileiros, os quais permanecem sem energia suficiente para satisfação de suas necessidades mínimas de sobrevivência e sem possibilidade de agregar o valor da energia ao produto agrícola, impedindo, ainda, tanto o aumento da renda quanto a geração de novos empregos (ELETROBRÁS, 2002; MME, 2007). Além disso, segundo o IBGE o Brasil possui cerca de 19% de sua população vivendo em área, sendo portanto 35 milhões de habitantes e uma estimativa de 8,93 milhões de domicílios com quatro pessoas cada.

A partir da década de 90 o setor elétrico nacional tem passado por profundas modificações na sua estrutura. Buscou-se a introdução da iniciativa privada como financiadora na construção de usinas hidroelétricas e termelétricas, visando o aumento da eficiência e do fornecimento de energia elétrica no Brasil (FERREIRA, 2004).

2.1.1. Programas de Eletrificação Rural

Primeiramente, o estado do Rio Grande do Sul implementou um programa de eletrificação rural juntamente com o BNDES e a USP. Esse programa foi adaptado pelo governo do estado de São Paulo e em setembro de 1996 foi criado o programa Luz da Terra (BETIOL JÚNIOR et al, 2006).

O Programa Nacional de Eletrificação Rural Luz no Campo foi lançado em dezembro de 1999. A sua meta era levar energia para um milhão de propriedades rurais entre 2000 e 2003. Até o final de 2002 foram realizadas 200 mil ligações por ano com custos aproximados de R\$ 2,8 mil por consumidor. Instalou-se 400 mil transformadores, 3 milhões de postes e 980 mil medidores. O programa recebeu 75% dos recursos do RGR (Reserva Global de Reversão), o restante foi pago por empresas de Distribuição de Energia Elétrica, consumidores, prefeituras e associações de produtores (FERREIRA, 2004).

Nos dois programas, Luz na Terra e Luz no Campo, os interessados tinham que pagar a instalação elétrica. Esses programas apenas financiavam o pagamento (BETIOL JÚNIOR et al, 2006). Por isso, muitos consumidores ainda ficaram sem energia elétrica.

Com o objetivo de universalizar o atendimento à área rural, foi criado o Programa Nacional de Universalização do Acesso e uso da Energia Elétrica, o Luz para Todos, instituído no dia 11 de novembro de 2003 visando prover o acesso a energia elétrica a toda a área rural até 2008. O programa antecipa a universalização em sete anos, que deveria ser concretizada pelas concessionárias de energia elétrica em 2015, segundo o plano original.

No programa Luz para Todos, o solicitante de energia elétrica deve ser atendido gratuitamente. Os gastos para a instalação das linhas de distribuição são de obrigação do governo, das prefeituras e das concessionárias de energia elétrica.

Esses programas também foram criados em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá e Austrália para viabilizar o atendimento de

áreas rurais. Eles aliaram uma estrutura de financiamento atrativa, com o uso de sistemas de distribuição simplificados.

Nos Estados Unidos, a adoção do sistema monofásico e a padronização dos equipamentos resultaram em um custo de 412 dólares por quilômetro na década de 30 (RIBEIRO e KURAHASSI, 2000).

Um dado interessante da Rússia ajudou a conscientizar o governo sobre a importância da eletrificação rural. Foi constatado que um quilowatt-hora era, aproximadamente, equivalente a quatro horas de trabalho de um agricultor (ABRIL, 1988).

No programa rural do Governo do Mato Grosso do Sul, cada quilômetro da sofisticada rede trifásica com postes de concreto custava trinta vezes mais que na cidade francesa de Raimbolet, onde foram construídos sistemas monofásicos com postes de madeira (RIBEIRO et al, 2000).

2.2 O Sistema MRT

No sistema de distribuição MRT utiliza-se apenas uma fase para alimentar cargas. O retorno da corrente é feito pela terra.

A utilização de sistema MRT tem sido feita extensamente na Nova Zelândia, Austrália, Canadá, Índia, Brasil, África e Ásia.

2.2.1. Topologias de Sistema MRT

No Brasil oito empresas distribuidoras de energia elétrica vêm utilizando o sistema MRT (ABRIL, 1988; CAMINHA JÚNIOR, 2001). De acordo com a natureza do sistema elétrico existente e as características do solo de cada região do país aonde as experiências vêm se verificando, foram desenvolvidas as seguintes versões do sistema MRT:

a) Sistema Monofilar: É constituído de um condutor ligado a uma das fases de uma linha trifásica tendo o solo como caminho de retorno para a

corrente. Os transformadores de distribuição têm seus enrolamentos primários ligados entre o condutor e o solo. São originados em alimentadores cuja saída da subestação de origem é estrela aterrada, Figura 2.2.

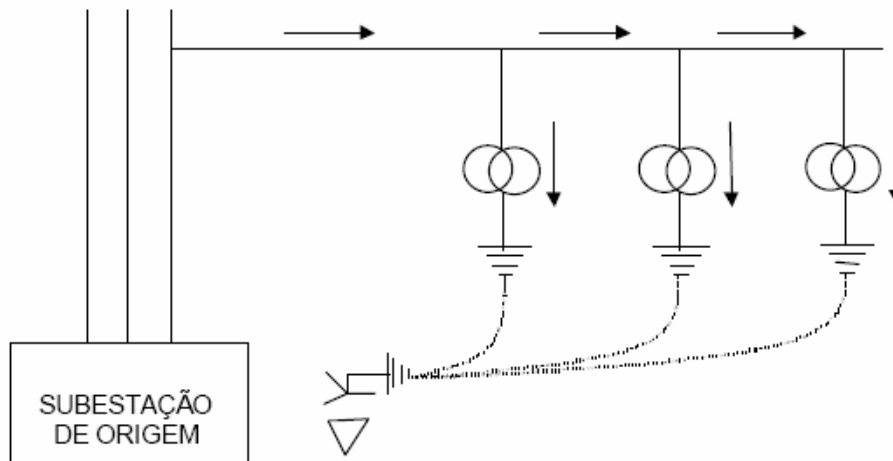


Figura 2.2 – Sistema monofilar sem transformador de isolamento.

A vantagem desse sistema é que a potência que pode ser fornecida aos consumidores é igual a da rede de distribuição primária. Porém os aterramentos da rede trifásica e do sistema MRT ficam interligados.

b) Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento: O condutor metálico é retirado do sistema trifásico por meio de um transformador de isolamento tendo o solo como retorno para a corrente, Figura 2.3. O enrolamento primário do transformador de isolamento é ligado entre duas fases da rede trifásica e o enrolamento secundário é ligado entre um condutor metálico e o terra.

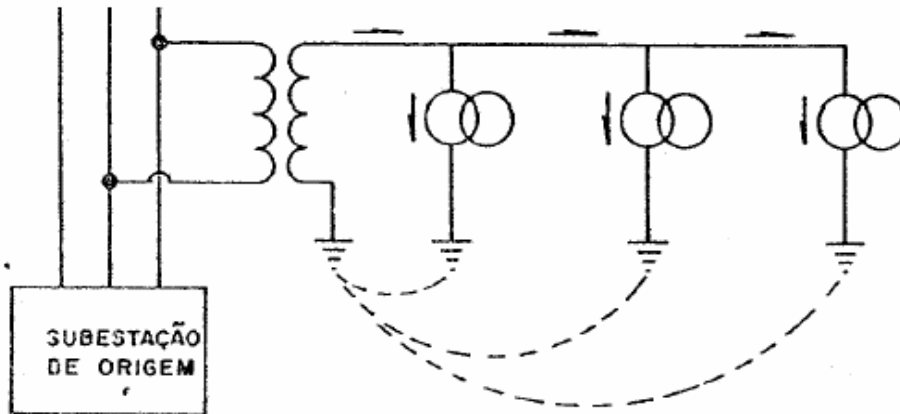


Figura 2.3 – Sistema monofilar com transformador de isolamento.

As vantagens da utilização desse sistema são adequar a tensão MRT às tensões nominais padronizadas, elevar a tensão para permitir o atendimento a uma área mais ampla em condições mais econômicas, limitar os locais de circulação das correntes de retorno pela terra e limitar as correntes de curto-circuito.

As desvantagens desse sistema são: o custo adicional do transformador de isolamento, a limitação da potência de fornecimento do ramal pela potência do transformador de isolamento e que na falta do aterramento do transformador de isolamento cessa-se o fornecimento de energia para todo o ramal.

c) Sistema MRT com Neutro Parcial: Consiste na interligação dos aterramentos dos transformadores de distribuição do ramal MRT por meio de um condutor adicional. É utilizado como solução em regiões onde apresenta um solo de alta resistividade. A interligação dos aterramentos dos transformadores forma uma única malha reforçando o aterramento e contribuindo para a diminuição da resistência de terra. Figura 2.4 (BROOKING e JANSE VAN RENSBURG, 1992).

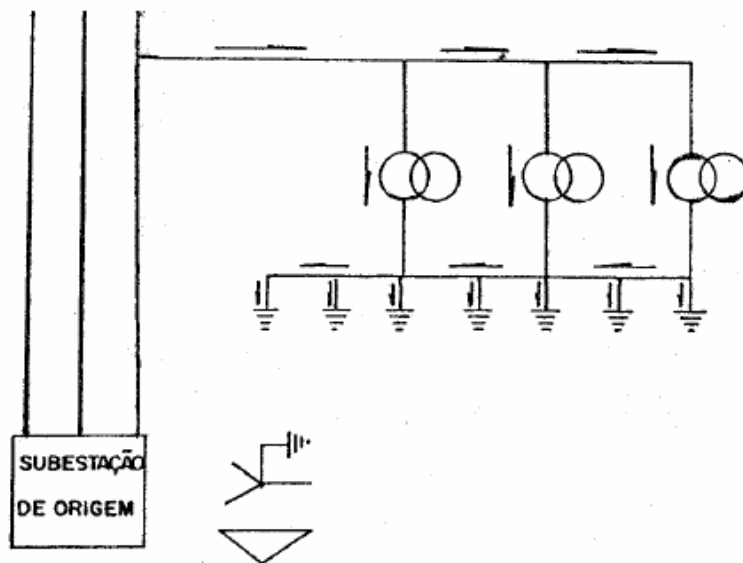


Figura 2.4 – Sistema monofilar MRT com neutro parcial.

Para todas as versões de MRT citadas, o secundário do transformador de distribuição tem seu esquema de ligação feito por meio de um tap central. Essa ligação possibilita ligar as cargas em dois valores de tensões, sendo um valor o dobro do outro (CEPEL, 2002; CAMINHA JÚNIOR; 2001), geralmente 120 e 240 V.

2.3 Aterramento

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que o sistema enxerga o aterramento como uma impedância. Essa impedância de aterramento pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

A resistência do aterramento resultante e as condições de segurança para o mesmo, só serão conhecidas antes da construção, se for efetuado um projeto.

O projeto de aterramento para cada caso, baseado em levantamento das características do solo local, vai definir uma ou mais configurações adequadas.

Para condições de baixa frequência, baixas correntes e valores de resistividade do solo não muito elevados, são desprezíveis os efeitos capacitivos e de ionização do solo e a haste de aterramento comporta-se como uma resistência linear. Nas aplicações de alta frequência, como as ondas impulsivas de correntes associadas a descargas atmosféricas são necessárias considerar o efeito capacitivo e a influência da reatância indutiva ao longo do eletrodo (VISACRO FILHO, 2002).

Portanto se a corrente que circula pelo solo é de baixa frequência, a resistência de aterramento pode ser modelada desprezando-se o efeito capacitivo e indutivo da corrente.

2.3.1. Modelagem de Sistemas de Aterramento

O projeto de sistemas de aterramento requer o cálculo da resistência de aterramento e dos potenciais na superfície do solo. Os dois métodos que se utiliza para se calcular esses parâmetros em solicitações de baixa frequência, como 60Hz, são o Método dos Elementos Finitos e o Método das Imagens. O primeiro possui grande flexibilidade e o segundo é mais utilizado por projetistas devido a sua menor complexidade, porém, possui maiores limitações (PEREIRA FILHO, 1999).

No presente trabalho utilizou-se o Método das Imagens. Ele permite representar o sistema por um conjunto de imagens que reproduz o potencial da fonte sobre uma fronteira especificada.

O interesse inicial é determinar o potencial na superfície do solo. Inicialmente determina-se o potencial em um ponto devido a segmentos diferenciais da corrente em um eletrodo. Integrando a corrente ao longo do eletrodo ou da configuração de eletrodos, obtêm-se o potencial em um ponto devido à corrente que circula no aterramento.

A resistência é obtida dividindo-se o potencial obtido pela corrente injetada no aterramento.

2.3.2 Aterramento de Sistemas MRT

Na vizinhança de um transformador, os gradientes de tensão no solo devem ser mantidos suficientemente baixos, evitando-se colocar em risco a vida de pessoas e animais. Um projeto cuidadoso resultando em uma baixa resistência de terra reduz esses gradientes de tensão para valores seguros. As ligações a terra devem ser estáveis e de resistência adequada, pois as redes monofilares têm seu desempenho, tanto sob o aspecto de confiabilidade como segurança, estritamente vinculado às condições dos seus aterramentos. Além disso, um rompimento nas conexões do aterramento vai gerar tensões perigosas (BROOKING e JANSE VAN RENSBURG, 1992).

Para o projeto de aterramento de sistemas MRT, sob o prisma da segurança quanto a danos mecânicos, utiliza-se a configuração em anel (onde a ruptura de um condutor de interligação das hastes não implica em alteração substancial da resistência do aterramento), porém, esta poderia vir a ser prejudicial para efeito de escoamento de surtos, apesar de favorecer a distribuição dos potenciais da superfície.

O resultado do projeto será certamente uma combinação de hastes alinhada e condutores horizontais ou em anel (CEPEL, 2002).

A preocupação no projeto do sistema de aterramento para sistemas de distribuição MRT está na determinação do menor valor possível da resistência elétrica oferecida ao escoamento das correntes não permitindo que sejam ultrapassados os valores de potenciais de passo e de toque.

Potencial de toque é a diferença de potencial entre o ponto de contato com a estrutura aterrada e um ponto na superfície situado a um metro de distancia da base da estrutura.

Potencial de passo é a tensão entre dois pés sobre a superfície onde circula a corrente de aterramento. Varia com a distância ao ponto de aterramento (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Para se projetar corretamente um sistema de aterramento é necessário conhecer a resistividade do solo e a estratificação que o mesmo apresenta em relação à variação da resistividade (SALARI FILHO et al, 2000).

Do ponto de vista da proteção contra choque elétrico, o objetivo de um sistema de aterramento é proporcionar uma superfície equipotencial no solo onde estão colocados os componentes da instalação elétrica e onde as pessoas estão passando. Esta superfície equipotencial irá garantir que quando uma corrente circular pelo aterramento, seja ela proveniente de uma falta, de uma descarga atmosférica, ou, no caso de sistemas MRT, na corrente de carga, não aparecerá diferença de potencial além dos limites de segurança entre diferentes pontos acessíveis à pessoa. Porém a superfície só será equipotencial se a condutividade do material da superfície for nula.

O projeto de uma malha de aterramento de uma instalação visa buscar uma condição aceitável, uma situação real, onde poderão aparecer gradientes de potencial no solo, porém esses valores devam ser aceitáveis.

No projeto de aterramento de sistemas MRT deve-se levar em conta a proteção das vidas de pessoas e animais.

Diferentes autores divergem quanto ao valor mínimo de potencial de passo que pode apresentar risco ao ser humano. Basicamente, esses valores se situam entre 12 e 27 V (CEPEL, 2002).

2.4 Referências Bibliográficas

BETIOL JÚNIOR, G., STRAZZI, P. E., CARMO, J. R., RIBEIRO, F. S. “Metodologia de Análise Técnica para Redução de Custo no Planejamento das Obras do Programa “Luz para Todos” em São Paulo” AGRENER, 2006.

BROOKING, T. R., JANSE VAN RENSBURG, N. “The Improved Utilization of Existing Rural Networks with the Use of Intermediate Voltage and Single Wire Earth Return Systems”, IEEE AFRICON '92 Proceedings., 3rd AFRICON Conference, 1992.

CAMINHA JÚNIOR, I. C. “Análise dos Potenciais de Superfície Gerados no Solo por um Sistema Monofilar com Retorno por Terra”. 115 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CEPEL – “Seleção de Sistemas MRT”, RER-05, 2002.

CHAPMAN, N. “Australia’s rural consumers benefit from single-wire earth returns systems”, Transmission and Distribution, pp. 56-61, Apr. 2001.

ELETROBRÁS. “O Programa de Eletrificação Rural “LUZ NO CAMPO”: Resultados Iniciais”, CEPEL, 2002.

FERREIRA, S. N. M., “Como Introduzir e implementar as Práticas de Produção mais limpa em obras de Eletrificação Rural”. 223f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2004.

GUIA RURAL ABRIL, Ed. Abril, p. 84-92, 1988.

KINDERMANN, G., CAMPAGNOLO, J. M. “Aterramento Elétrico”, Porto Alegre, Sagra-DC Luzzato, 1995.

MME – Ministério das Minas e Energia. Políticas Públicas e Promoção das Energias Renováveis. www.mme.gov.br acessado em 09/07/2007 às 14:00 h.

OLIVEIRA, L. C. “Perspectivas para a Eletrificação Rural no Novo Cenário Econômico-Institucional do Setor Elétrico Brasileiro”. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

PEREIRA FILHO, M. L. “Aplicação do Método de Imagens Complexas ao Cálculo de Malhas de Aterramento em Solos com Estratificação Horizontal”. 1999. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – USP, São Paulo.

RIBEIRO, F. S., KURAHASSI, L. F. “A evolução dos custos no programa de eletrificação rural do estado de São Paulo”. Encontro de Energia do Meio Rural, Setembro, 2000.

RIBEIRO, F. S., KURAHASSI, L. F., PAZZINI, L. H. A. Custos unificados para a eletrificação rural em São Paulo. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas.

SALARI FILHO, J. C., SANTOS, L. A. A, NASCIMENTO, J. M. L. “Resistência de Aterramento e Diferenças de Potencial de Passo e de Toque para Sistemas de Aterramento Empregados em Redes de Distribuição Rural”. Relatório Técnico ADG-A/PER, Cepel, 2000.

VISACRO FILHO, S. “Aterramentos Elétricos” – São Paulo : Artliber,
2002, 159p.

CAPÍTULO 3 – PROJETO DE ATERRAMENTO PARA SISTEMA MONOFILAR COM RETORNO PELO TERRA

3.1 Introdução

O projeto de malhas de aterramento em baixa frequência deve considerar o aspecto de desempenho e segurança, relacionado com o valor da resistência de aterramento e com o potencial na superfície do solo respectivamente (PEREIRA FILHO, 1999; LIU et al, 2005).

Devido ao efeito da corrente circulando no aterramento, o potencial elétrico do aterramento aumenta. Esse potencial pode resultar em choque elétrico para pessoas e animais (LIU et al, 2005).

Para que a instalação elétrica opere corretamente, com uma adequada continuidade de serviço, um desempenho seguro do sistema de proteção e, mais ainda para garantir os limites de segurança pessoal, é fundamental que o desenvolvimento de um Sistema de Aterramento mereça um cuidado especial. A necessidade do aterramento elétrico pode ser resumida nos tópicos abaixo:

- Ocorrendo uma falta fase/terra em uma instalação elétrica, os dispositivos de segurança atuam mais rapidamente em baixa resistência de terra;
- Previne o aparecimento de uma tensão elétrica na carcaça de um equipamento;
- Protege contra sobre tensões transitórias durante a comutação, impulso de manobra, ou durante a ação de um raio ou impulso atmosférico; e
- Retorno de sistemas elétricos, como no caso de sistema MRT.

Em sistemas MRT, o meio de dispersão da corrente de retorno é o solo, o qual pode apresentar variações em função da forma geológica, nível

de compactação, teor de umidade e sais nele contido. Portanto um bom projeto de aterramento é essencial para garantir a utilização segura desse sistema (CAMINHA JÚNIOR, 2001).

Na vizinhança de um transformador, os gradientes de tensão no solo devem ser mantidos suficientemente baixos, evitando-se colocar em risco a vida de pessoas e animais. Um projeto cuidadoso resultando em uma baixa resistência de terra reduz esses gradientes de tensão para valores seguros.

As ligações a terra devem ser estáveis e de resistência adequada, pois as redes monofilares têm seu desempenho, tanto sob o aspecto de confiabilidade como segurança, estritamente vinculado às condições dos seus aterramentos. Além disso, um rompimento nas conexões do aterramento gera tensões perigosas (BROOKING, 1992).

As normas técnicas de algumas companhias de energia elétrica recomendam um valor mínimo de resistência de aterramento para que as diferenças de potencial no solo fiquem abaixo de um valor, garantindo assim a segurança de pessoas e animais.

Nesse trabalho foi criado um programa computacional capaz de calcular a resistência de aterramento e os potenciais no solo para as configurações mais comuns de sistemas de aterramento. Por meio dos resultados obtidos é possível prever se os potenciais no solo, gerados por diferentes condições de funcionamento de sistemas MRT, serão ou não prejudiciais para homens e animais.

3.1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é modelar o projeto das principais topologias de aterramento utilizadas em sistemas MRT para a partir do modelo fazer as seguintes análises:

- Verificar a resposta do sistema quando se varia: a topologia de ligação, o número de hastes e a potência do transformador de isolamento.

- Comparar os valores de potencial de passo máximo obtidos para diferentes configurações em relação aos valores máximos suportados por humanos e animais segundo normas e a literatura.

3.2 Revisão da Literatura

O projeto de sistemas de aterramento requer o cálculo da resistência de aterramento e dos potenciais na superfície do solo. Utiliza-se o Método dos Elementos Finitos e o Método das Imagens para se calcular esses parâmetros em solicitações de baixa frequência, como 60 Hz (PEREIRA FILHO, 1999).

O método utilizado para cálculo dos potenciais no solo e da resistência de aterramento de diversas configurações de aterramento para Sistemas MRT nesse trabalho foi o Método das Imagens juntamente com método dos potenciais constantes.

Cada eletrodo de aterramento é modelado como um componente individual e os efeitos combinado das eletrodos determinam a resistência elétrica do sistema de aterramento. A tensão gerada, devido a corrente circulando no aterramento, em todos os condutores é considerada constante (GARRETT e PRUITT, 1985; TUMA, 2005).

O eletrodo é modelada como vários segmentos infinitesimais considerados fontes pontuais de corrente, portanto o potencial em qualquer ponto é calculado integrando a contribuição de cada segmento, equação 3.1.

$$V_p = \frac{\rho}{4\pi L} \int_0^L \frac{I_T}{r} dl \quad (3.1)$$

em que

- V_p = Potencial no ponto P, V;
- I_T = Corrente transversal que circula no eletrodo, A;
- dl = Elemento diferencial de comprimento do eletrodo, m;
- ρ = Resistividade do solo, $\Omega.m$;
- L = Comprimento do eletrodo, m; e
- r = Distância do ponto P ao elemento infinitesimal dl da haste, m.

Considere um eletrodo vertical situado nas coordenadas x_0, y_0 , a uma profundidade média z_m , injetando uma corrente I em um solo uniforme, Figura 3.1.

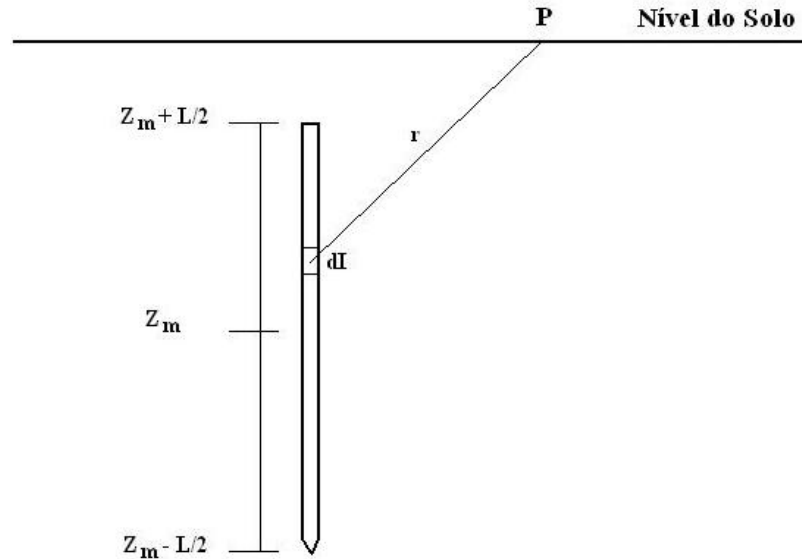


Figura 3.1 – Haste vertical

Resolvendo a integral da equação 3.1 analiticamente, para a determinação do potencial em um ponto P na superfície devido a uma haste encontra-se a equação 3.2 (PEREIRA FILHO, 1999).

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi L} \left[\operatorname{arcsenh} \left(\frac{z - (z_m - \frac{L}{2})}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \right) \right] - \left[\operatorname{arcsenh} \left(\frac{z - (z_m + \frac{L}{2})}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \right) \right] \quad (3.2)$$

Onde z é a profundidade da haste.

Segundo Garret e Pruitt (GARRET e PRUITT, 1985), a tensão em qualquer condutor em uma malha de terra é a somatória da tensão gerada nele em função de todos os condutores contidos no sistema de aterramento.

Numa interpretação mais moderna a diferença de potencial em uma haste é a dada pela integral do potencial em um ponto da sua superfície, ao longo de todo seu comprimento, devido à corrente nela mesma e nas outras hastes.

3.2.1 Modelagem de Sistemas de Aterramento

Na modelagem de sistemas de aterramento em solicitações de alta frequência, como descargas atmosféricas ou faltas, deve-se considerar a impedância de aterramento. Dessa forma, é considerado o efeito capacitivo da corrente transversal que percorre o eletrodo e o efeito indutivo da corrente longitudinal.

O objetivo do presente trabalho é modelar as principais configurações de aterramentos de sistemas MRT durante o seu funcionamento em regime permanente, ou seja, somente para solicitações de correntes de baixa frequência, 60 Hz.

Nesse caso, utiliza-se o método do potencial constante. O efeito da impedância longitudinal é nulo e a impedância transversal é caracterizada como uma resistência. Portanto, a resistência de aterramento do sistema é obtida determinando-se a resistência transversal, ou seja, a resistência imposta para a corrente que se dissipa para o solo.

Equação Matricial

Para a modelagem de um sistema de aterramento composto de várias hastes verticais determina-se o potencial gerado em uma haste “i” por uma corrente circulando em uma haste “j”.

A resistência entre duas hastes (R_{ij}) é definida pelo potencial médio causado na haste “i” dividido pela corrente dispersa pelo condutor “j”. A resistência própria de uma haste (R_{ii}) é o potencial médio na superfície dessa haste causado pela corrente que circula por ela.

O potencial gerado em uma haste em função da corrente circulando nessa haste ou em outra, é dado pela equação 3.3 (ELLER, 2007).

$$V_{ij} = \frac{\rho I_{Tj}}{4\pi L_j L_i} \int_{L_j} \int_{L_i} \frac{1}{r} dl_j dl_i \quad (3.3)$$

em que

- V_{ij} = Potencial na haste “i” gerado pela corrente que circula em uma haste “j” (V);
 I_{Tj} = Corrente transversal que circula na haste “j” (A);
 d_{li} = Elemento diferencial de comprimento do eletrodo “i” (m);
 d_{lj} = Elemento diferencial de comprimento do eletrodo “j” (m);
 L_i = Comprimento do eletrodo “i” (m);
 L_j = Comprimento do eletrodo “j” (m); e
 ρ = Resistividade do solo ($\Omega.m$).

As hastes são divididas em segmentos diferenciais de comprimento. Cada segmento diferencial gera um potencial elétrico diferencial na haste onde se deseja determiná-lo. O potencial médio na haste será determinado resolvendo-se a integral da equação 3.3.

Para a utilização da equação 3.1 a distribuição de corrente é assumida constante sobre todo o comprimento do condutor. Fazer essa consideração significa dizer que a corrente não é dispersada para o solo, porém essa consideração facilita os cálculos e é a base para o projeto de aterramento utilizando o método das imagens.

As resistências entre duas hastes e próprias podem ser derivadas da equação 3.3. Sabe-se que:

$$R_{ij} = \frac{V_{ij}}{I_{Tj}} \quad (3.4)$$

Logo:

$$R_{ij} = \frac{\rho}{4\pi L_j L_i} \int_{l_j} \int_{l_i} \frac{1}{r} dl_j dl_i \quad (3.5)$$

Para a determinação das resistências devem ser somados os efeitos das imagens dos segmentos das hastes por onde circula a corrente.

O Método das Imagens consiste na conversão de um campo elétrico em outro mais fácil de calcular. Permite representar o problema original por um conjunto de imagens que reproduzem o potencial da fonte em um determinado eixo, no caso da análise dos potenciais no solo, na superfície

dos eletrodos (PEREIRA FILHO, 1999). É mais utilizado para se determinar o efeito da estratificação do solo. Nesse trabalho, foi utilizado para se levar em conta o efeito da presença do ar.

Para se acrescentar o efeito das imagens no cálculo das resistências mútuas e próprias de cada eletrodo, soma-se o efeito do eletrodo numa posição simétrica em relação ao eixo horizontal.

Para a modelagem do sistema de aterramento, defini-se a equação matricial 3.6.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1j} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{i1} & R_{i2} & \dots & R_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_j \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Para a utilização da equação acima deve ser assumido que as tensões em todos os condutores do sistema de aterramento são iguais e que a tensão em cada condutor é a média das tensões em todos os seus pontos. Essa hipótese é consequência da hipótese de que a corrente nos condutores são constantes.

3.2.2 Obtenção da Resistência do Aterramento e dos Potenciais no Solo

Por meio da solução da equação matricial 3.6 obtêm-se a resistência total do sistema de aterramento e os potenciais no solo.

Após a obtenção de todas as resistências da matriz de resistências da equação 3.6 por meio da equação 3.5, deve-se solucionar a equação 3.6. A solução é feita como se segue (ELLER, 2007; VISACRO FILHO, 1992).

Inicialmente, inverte-se a matriz de resistências R, obtendo-se:

$$R^{-1} = G \quad (3.7)$$

$$I = GV \quad (3.8)$$

Somando-se as equações do sistema de equações obtido pela equação matricial 3.6, tem-se:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_i = V_1(G_{11} + G_{21} + \dots + G_{i1}) + V_2(G_{12} + G_{22} + \dots + G_{i2}) + \dots + V_i(G_{1i} + G_{2i} + \dots + G_{ii}) \quad (3.9)$$

Pela aproximação de potencial constante, $V_1=V_2=\dots=V_i=V$ e $I_1+I_2+\dots+I_i=I_{TOTAL}$. Portanto:

$$I_{TOTAL} = V(G_{11} + G_{12} + \dots + G_{2j} + \dots + G_{12}) \quad (3.10)$$

A resistência total do sistema de aterramento pode ser obtida por meio da equação:

$$R_r = \frac{V}{I_{total}} = \frac{1}{(G_{11} + G_{12} + \dots + G_{2j} + \dots + G_{12})} \quad (3.11)$$

Solucionando o sistema matricial 3.6 obtêm-se as correntes de dispersão em cada eletrodo. O potencial em cada eletrodo é obtido pela equação 3.10 onde I_{total} é a corrente injetada no aterramento.

Finalmente pode-se calcular o potencial em qualquer ponto P por meio da equação 3.1. Para considerar o efeito de todas as hastes do sistema de aterramento utiliza-se o somatório da equação 3.12.

$$V_P = \sum_j \frac{\rho}{4\pi L} \int_0^L \frac{I_{ij}}{r} dl_j \quad (3.12)$$

3.2.3 Considerações Acerca da Segurança de Aterramentos em MRT

A primeira consideração a respeito do aterramento das linhas MRT é a proteção da vida de pessoas e animais.

A literatura disponível menciona a possível ocorrência de risco para gradientes de potencial na superfície do solo superiores a 12 V. Entretanto, mesmo em solos com alta resistividade, essa condição é sempre satisfeita limitando-se o potencial no solo em 27 V (CEPEL, 2002). Essas considerações são aplicadas para gradientes de potencial causados por corrente de carga em regime permanente. O código australiano limita a tensão máxima em 20 V para condições normais de operação (CAMINHA JUNIOR, 2001).

Para casos de faltas deverá ser considerada a corrente de curto-circuito e o tempo de atuação da proteção. Dalziel propõe a equação 3.13 como sendo a corrente limite (CEPEL, 2002).

$$I_{\text{Permissível}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (3.13)$$

em que

$I_{\text{permissível}}$ = Corrente máxima suportada (A); e

t = Tempo de duração do choque (s).

O limiar para a sensação da corrente alternada pelo corpo humano é 1mA. Corrente de 9 a 25 mA resultam em descontrole muscular e problemas respiratórios. O limiar para fibrilação ventricular varia de 50 a 100 mA. Portanto, considera-se o valor de $I_{\text{permissível}}$ máximo igual a 10mA para o ser humano (CAMINHA JÚNIOR, 2001).

Tensão de Passo

Tensão de passo é a tensão elétrica entre dois pés durante a circulação de corrente. Esta aparece quando os pés tocam linhas equipotenciais de valores diferentes (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995; LIU et al, 2005). Nos projetos de aterramento, considera-se a distância entre dois pés como sendo de um metro.

A tensão de passo máxima é limitada pela máxima corrente permissível ao corpo humano que não causa fibrilação. É calculado pela equação 3.15.

$$V_{\text{PassoMáximo}} = (R_{\text{corpohumano}} + 6\rho)I_{\text{choque}} \quad (3.15)$$

em que

- $V_{\text{PassoMáximo}}$ = Tensão máxima entre os pés (V);
- $R_{\text{CorpoHumano}}$ = Resistência do corpo humano (Ω);
- ρ = Resistividade do solo (Ωm); e
- $I_{\text{permissível}}$ = Corrente máxima suportada (A).

Em animais de grande porte (boi, cavalo, etc), a tensão de passo se transforma em tensão de pata. A tensão de pata é maior que a tensão de passo, com o agravamento de que a corrente do choque passa pelo coração.

3.3 Metodologia

Foi feito um programa computacional capaz de estimar a resistência de aterramento e os potenciais no solo de sistemas com diferentes configurações em função da variação dos parâmetros mais comuns.

Por meio da resistência de aterramento e da diferença máxima de potencial no solo é possível determinar se o sistema atende as necessidades mínimas de proteção contra os gradientes de potencial gerados pela

circulação de corrente pela terra e os valores de resistência de aterramento máximos para transformadores de distribuição propostos pela ELETROBRÁS e pelas concessionárias de energia que utilizam o sistema MRT, Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Resistência de terra limites (Ω) para aterramento dos transformadores de distribuição.

Tensão 13,8/ $\sqrt{3}$ kV	Transformadores (kVA)				
	3	5	10	15	25
Empresa	3	5	10	15	25
CEMAR	20	20	20	-	-
CELPE	65	40	20	15	-
COBER	30	30	20	13,3	-
LIGHT	-	42,5	21,2	14,2	-
CELESC	-	10	10	10	10
CEEE	-	20	20	20	10
ELETROBRÁS	71	42,5	21,2	14,2	8,5

Fonte: (GUIA RURAL ABRIL, 1988)

3.3.1 Modelagem Computacional

Foi feita uma modelagem computacional para determinar o efeito de diferentes parâmetros do Sistema MRT nos valores obtidos para o sistema de aterramento.

A Figura 3.2 indica o fluxograma de execução do programa.

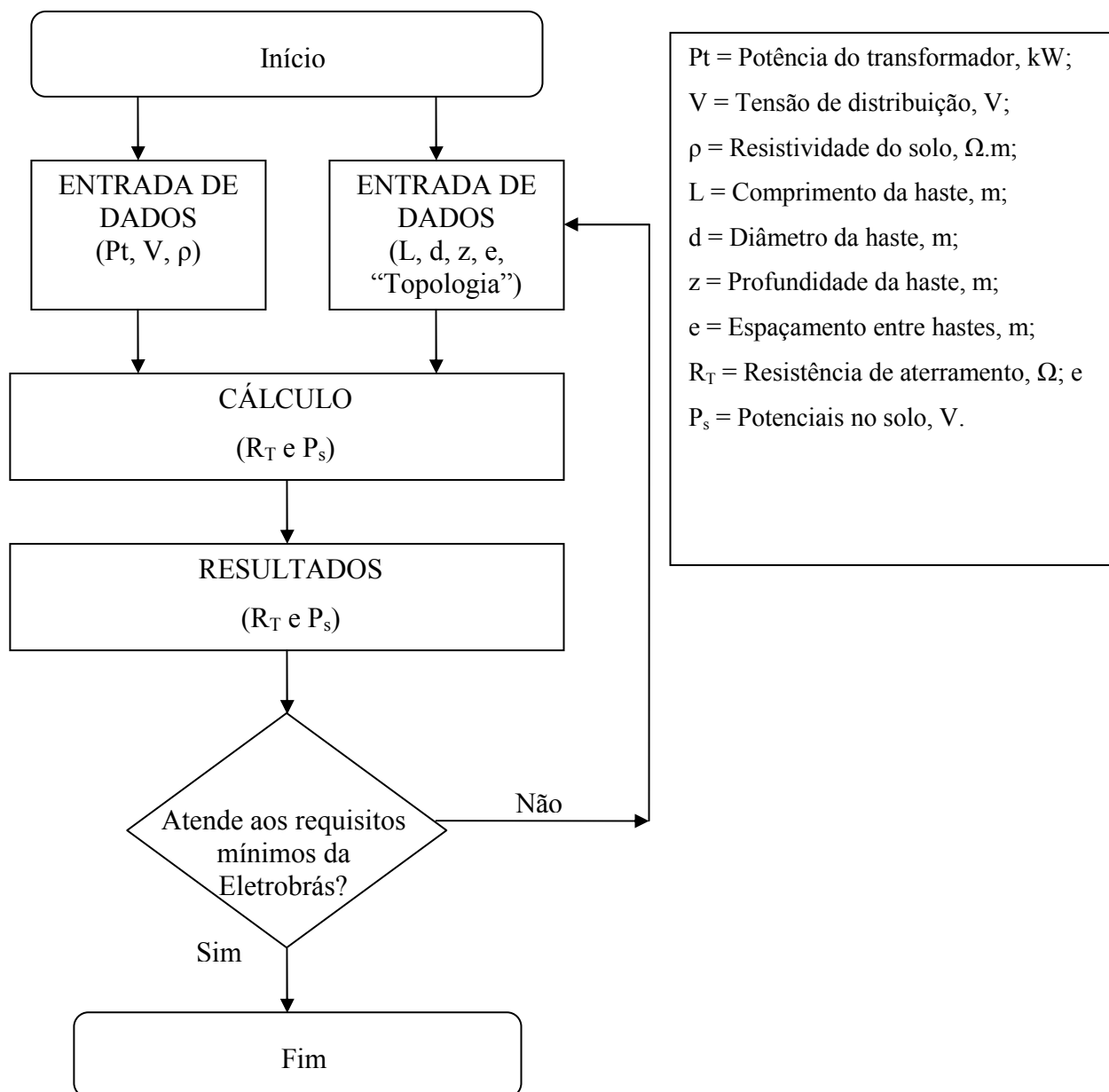


Figura 3.2 – Fluxograma do Modelo Computacional para o Projeto do Aterramento

Entrada de Dados

Para a simulação, devem-se especificar os seguintes parâmetros:

- Potência do transformador de isolamento e tensão de distribuição do sistema MRT. Por meio desses valores será computada a corrente injetada no sistema de aterramento;
- A resistividade do solo;

- O comprimento, o diâmetro, profundidade e o espaçamento entre as hastes; e
- Tipo de topologia de aterramento. O programa oferece quatro topologias: uma haste, três hastes em triângulo, quatro hastes em um quadrado e nove hastes formando uma malha com 4 quadrados.

Cálculo

A partir dos dados de inicialização, o programa calcula a resistência equivalente e os gradientes de potencial no solo por meio da metodologia descrita em ELLER (2007), GARRET (1985) e PEREIRA FILHO (1999). Em ELLER (2007) foi feita uma análise experimental utilizando modelos reduzidos de aterramento em cubas eletrolíticas para a comprovação da metodologia adotada. Os erros se limitaram a uma faixa inferior a 3%.

Devido à dificuldade de se obter analiticamente as soluções das integrais duplas, elas foram calculadas numericamente pelo método de Simpson.

Resultados

Os dados de saída apresentados ao usuário são a resistência total do sistema de aterramento, a distribuição do potencial elétrico ao longo de uma linha partindo do centro da malha e o potencial de passo máximo obtidos em humanos e animais.

Em humanos, considerou-se a distância de um metro entre os pés conforme descrito por norma, para se analisar o potencial de passo. Em animais, considerou-se dois metros, simulando a diferença de tensão entre as patas de um animal de grande porte.

3.4 Resultados e Discussão

Os resultados abaixo foram obtidos para hastes com diâmetro de 1,25 cm, 2,4 m de comprimento, 0,5 m de profundidade e com espaçamento (e) de 2m. A resistividade do solo foi suposta constante no valor de 100 Ω .m. Porém encontram-se resistividades do solo que variam de 100 Ω .m a 700 Ω .m. O valor da resistividade do solo influencia de forma muito importante o potencial de passo estudado nesse trabalho.

A tensão de alimentação primária foi fixada em $13,8/\sqrt{3}$ kV.

3.4.1 Hastes em Triângulo

O sistema de três hastes em triângulo é montado conforme Figura 3.3.

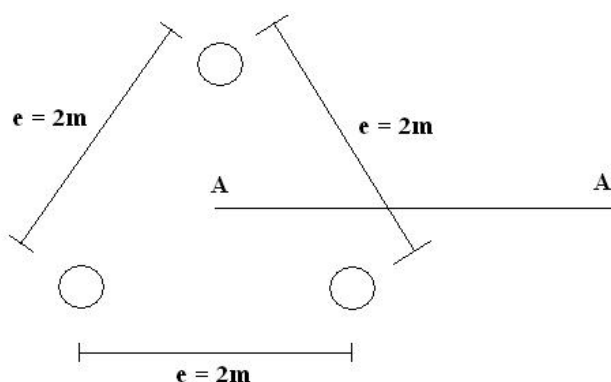


Figura 3.3 – Três hastes em triângulo.

A resistência de aterramento obtida para esse sistema com os valores dos parâmetros descritos acima foi $R_t = 17,37 \Omega$. Esse valor atende aos parâmetros da ELETROBRÁS para transformadores com potências de 3, 5 e 10 kVA. Porém, de acordo com o Quadro 3.1, este valor é alto para transformadores de isolamento com potências de 15 e 25 kVA.

Os potenciais no solo obtidos para os diferentes valores de potências do transformador de isolamento estão representados na Figura 3.4. Esses

valores estão referenciados ao centro do sistema de aterramento, se distanciando dele por meio de uma linha reta conforme Figura 3.3.

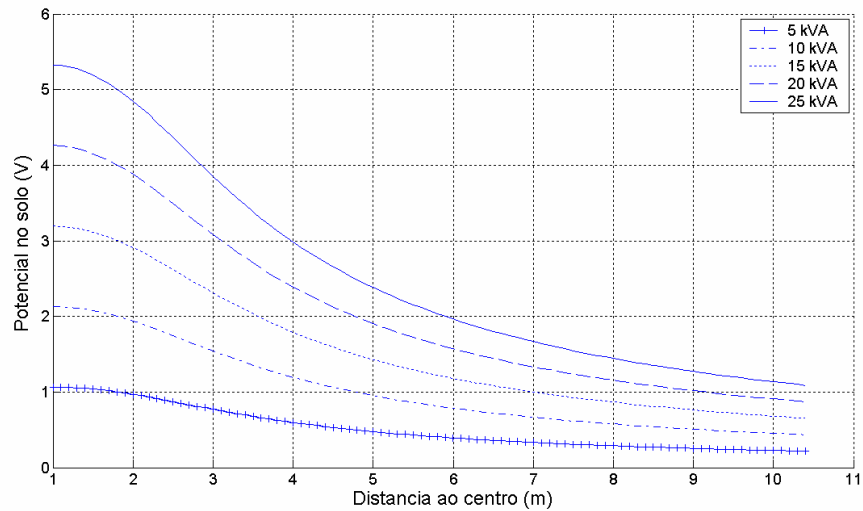


Figura 3.4 – Potenciais gerados no solo para um sistema de aterramento com três hastes em triângulo.

Por meio da Figura 3.4 verifica-se que a um metro do centro o potencial no solo possui o valor máximo. À medida que se afasta do centro do aterramento, o valor do potencial no solo diminui. Quanto maior é a potência do transformador, maior é a inclinação negativa da curva, resultando em uma maior diferença de tensão no solo. Os potenciais no solo tendem a zero quando se aumenta a distância ao centro da haste.

As tensões de passo máximas encontrados para os diferentes valores de potência do transformador de isolamento estão representadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Tensões de passo e de pata máximas para diferentes valores de potência do transformador de isolamento

Potência do transformador (kVA)	Tensão de passo máxima em humanos (V)	Tensão de passo máxima em animais (V)
5	0,20	0,37
10	0,40	0,74
15	0,60	1,12
20	0,80	1,49
25	1,00	1,87

3.4.2 Quatro Hastes Formando um Quadrado

Essa configuração pode ser visualizada na Figura 3.5.

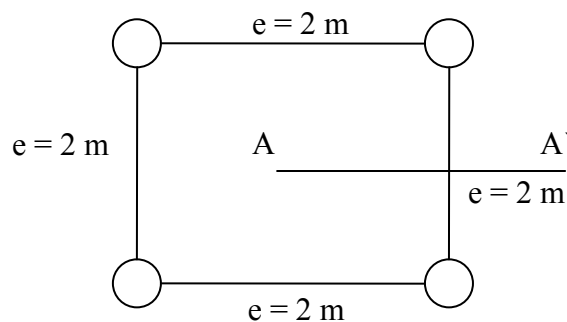


Figura 3.5 – Quatro hastes formando um quadrado.

A resistência de aterramento obtida para esse sistema de aterramento com os valores dos parâmetros descritos acima foi $R_t = 14,24 \Omega$. Esse valor atende aos valores mínimos da tabela da ELETROBRÁS para transformadores com potências de 3, 5, 10 e 15 kVA.

Os potenciais no solo obtidos para diferentes valores de potências do transformador de isolamento estão representados na Figura 3.6. Esses

valores estão referenciados ao centro do sistema de aterramento, se distanciando dele por meio de uma linha reta conforme Figura 3.5.

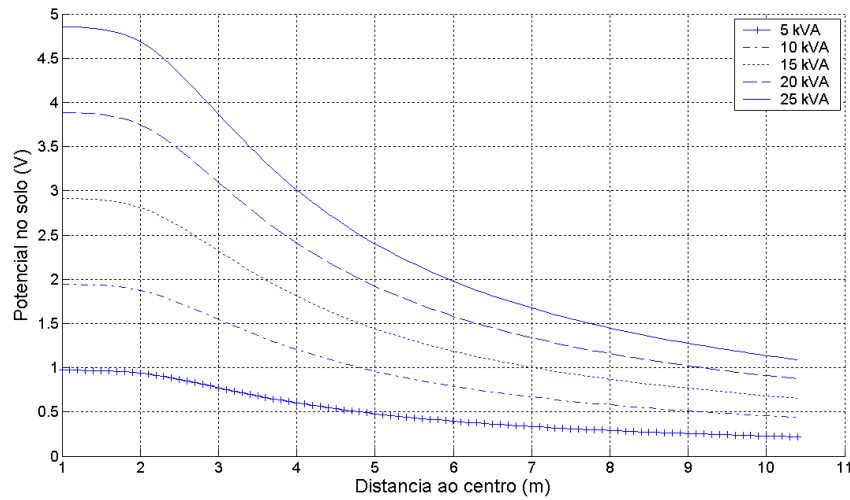


Figura 3.6 – Potenciais gerados no solo para um sistema de aterramento com quatro hastes formando um quadrado.

Por meio da Figura 3.6 verifica-se que a um metro do centro o potencial no solo possui o valor máximo. À medida que se afasta do centro do aterramento, o valor do potencial no solo diminui. Quanto maior é a potência do transformador, maior é a inclinação negativa da curva, resultando em uma maior diferença de tensão no solo. Os potenciais no solo tendem a zero quando se aumenta a distância ao centro da haste.

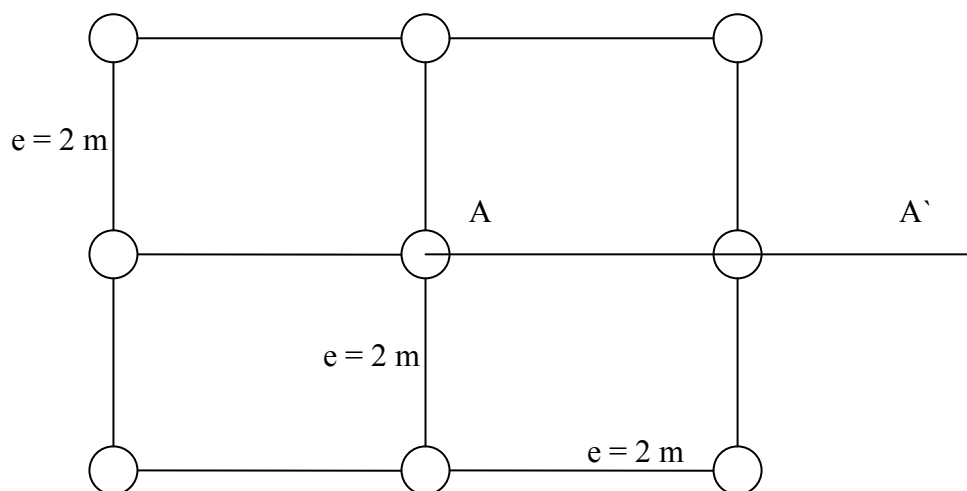
Os potenciais de passo máximos encontrados para diferentes valores de potência do transformador de isolamento estão representados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Tensões de passo e de pata máximas para diferentes valores de potência do transformador de isolamento

Potência do transformador (kVA)	Tensão de passo máxima em humanos (V)	Tensão de passo máxima em animais (V)
5	0,18	0,34
10	0,37	0,67
15	0,55	1,02
20	0,73	1,35
25	0,92	1,69

3.4.3 Nove Hastes Formando uma Malha com Quatro Quadrados

A configuração com nove hastes formando uma malha com 4 quadrados é obtida conforme Figura 3.7.



A resistência de aterramento obtida para esse sistema de aterramento com os valores dos parâmetros descritos acima foi $R_t = 8 \Omega$. Esse valor

atende a indicação da tabela da ELETROBRÁS para todas as potências dos transformadores de isolamento.

Os potenciais no solo obtidos para diferentes valores de potências do transformador de isolamento estão representados na Figura 3.8. Esses valores estão referenciados ao centro do sistema de aterramento, se distanciando dele por meio de uma linha reta conforme Figura 3.7.

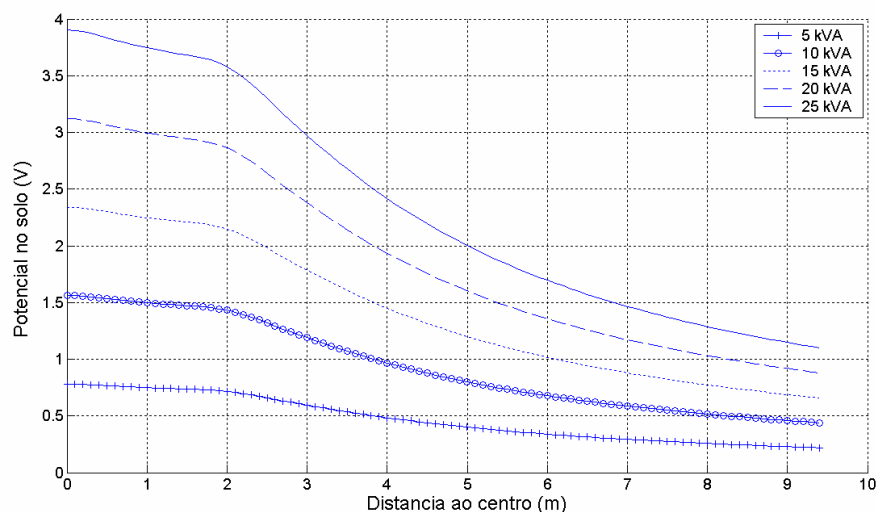


Figura 3.8 – Potenciais gerados no solo para um sistema de aterramento com nove hastes formando uma malha com quatro quadrados.

Por meio da Figura 3.8 verifica-se que a partir do centro do aterramento o potencial no solo diminui. Quanto maior é a potência do transformador, maior é a inclinação negativa da curva, resultando em uma maior diferença de tensão no solo. Os potenciais no solo tendem a zero quando se aumenta muito a distância ao centro da haste.

Os potenciais de passo máximos encontrados para diferentes valores de potencia do transformador de isolamento estão representados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Tensões de passo e de pata máximas para diferentes valores de potência do transformador de isolamento

Potência do transformador (kVA)	Tensão de passo máxima em humanos (V)	Tensão de passo máxima em animais (V)
5	0,13	0,23
10	0,25	0,46
15	0,38	0,70
20	0,51	0,93
25	0,63	1,16

3.5 Conclusão

Os resultados obtidos estão coerentes com o comportamento esperado para as diferentes topologias de sistemas de aterramento analisados. O que já era esperado, pois a metodologia utilizada nos cálculos já foi validada por vários autores para a modelagem de sistemas de aterramento.

Com esse trabalho, foi elaborado um programa onde é possível calcular a resistência de aterramento e os potenciais em qualquer ponto do solo para qualquer configuração de aterramento.

De acordo com a tabela da ELETROBRÁS, a única configuração que resulta em uma resistência de aterramento que atende a todas as potências dos transformadores de isolamento foi uma malha contendo nove hastes.

Entretanto, para solicitações de regime permanente, a tabela da Eletrobrás está super-dimensionada considerando-se os gradientes de potencial no solo, pois se verificou que, para todas as configurações de aterramento analisadas, os potenciais de passo máximos ficaram bem abaixo do limite considerado de 25 V, podendo, portanto ser utilizado configurações de aterramento mais simples, que resultam em menores custos.

Não foi feita uma análise de custos detalhada por não ter sido considerado o foco desse trabalho.

3.6 Referências Bibliográficas

BROOKING, T. R., JANSE VAN RENSBURG, N. “The Improved Utilization of Existing Rural Networks with the Use of Intermediate Voltage and Single Wire Earth Return Systems”, IEEE AFRICON '92 Proceedings., 3rd AFRICON Conference, 1992.

CAMINHA JÚNIOR, I. C. “Análise dos Potenciais de Superfície Gerados no Solo por um Sistema Monofilar com Retorno por Terra”. 115 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CEPEL – “Relatórios de Eletrificação Rural”, 2002.

ELLER, W. L. G, Modelagem Eletromagnética de Aterramentos sob Solicitações de Baixas Freqüências. Trabalho de Graduação, DAEE, Cefetmg, 2007

GARRET, D. L.; PRUITT, J. G. “Problems encountered with the average potential method of analyzing substation grounding systems”. IEEE Trans. On PAS, vol 104, n 12, dec. 1985, pg. 3586-3596.

GUIA RURAL ABRIL, Ed. Abril, p. 84-92, 1988.

KINDERMANN, G., CAMPAGNOLO, J. M. “Aterramento Elétrico”, Porto Alegre, Sagra-DC Luzzato, 1995.

LIU, J.; SOUTHEY, R. D.; DAWALIBI, F. P., “Application of Advanced Grounding Design Techniques to Plant Grounding Systems”. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference e Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China, 2007.

PEREIRA FILHO, M. L. “Aplicação do Método de Imagens Complexas ao Cálculo de Malhas de Aterramento em Solos com Estratificação Horizontal”. 1999. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – USP, São Paulo.

TUMA, E. D. “Proposta de um Novo Modelo para Análise dos Comportamentos Transitório e Estacionário de Sistemas de Aterramento, Usando-se o Método FDTD”. 2005. 126f. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – UFPA, Pará.

VISACRO FILHO, S. F. “Aterramentos Elétricos” - São Paulo : Artliber, 2002, 159p. : il. ; 21 cm.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DE UMA HASTE DE ATERRAMENTO NO DOMÍNIO DE LAPLACE

4.1 Introdução

Para a modelagem de um sistema de aterramento, deve-se levar em conta também o seu comportamento frente a fenômenos transitórios como descargas atmosféricas e tensões de impulso de manobra.

Linhas de eletrificação rural, como Sistemas MRT estão muito sujeitas à descargas atmosféricas.

Frente a fenômenos transitórios, no lugar de resistência de aterramento, calcula-se a impedância de aterramento. O comportamento de um eletrodo, nesse caso, é explicado por três componentes: componente resistiva, capacitiva e indutiva, conforme a Figura 4.1 (LORENTZOU e HATZIARGVRIOU, 2001; LORENTZOU e HATZIARGVRIOU, 2005 e RAMIREZ e DAVILLA, 2004).

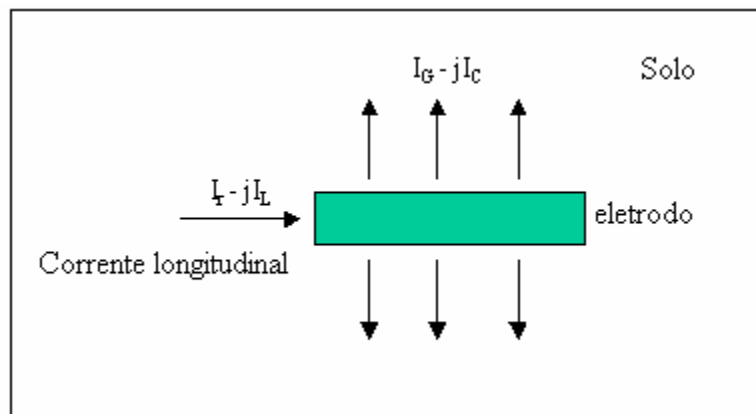


Figura 4.1 - Distribuição das correntes ao longo do eletrodo

A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo. Em relação a última parcela, a corrente longitudinal, são observadas perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos de corrente. Essa parcela está representada por meio da

resistência da indutância em série. A corrente que é transferida para o solo é representada pela condutância e pela capacitância (VISACRO FILHO, 2002).

4.1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é modelar uma haste de aterramento frente a fenômenos transitórios e analisar sua resposta em função do tempo. A modelagem foi feita:

- No domínio de Laplace, e
- Utilizando Equações de Espaço de Estados.

4.2. Revisão da Literatura

4.2.1 Determinação dos Parâmetros do Aterramento

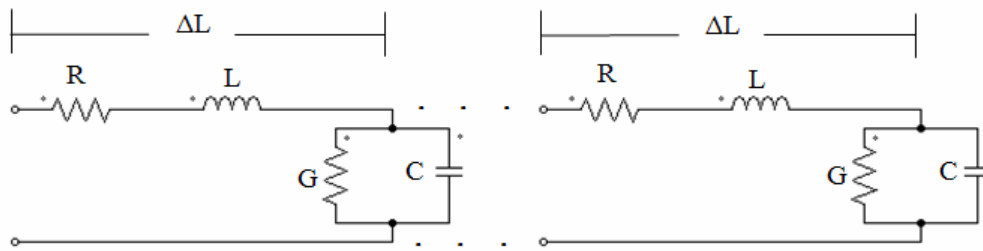
Em geral, sistemas de aterramento são construídos para obter baixa resistência elétrica em baixas frequências. Entretanto, em altas frequências, o comportamento de um eletrodo de aterramento é explicado por quatro componentes: resistiva, condutiva, capacitiva e indutiva (LORENTZOU e HATZIARGVRIOU, 2001; LORENTZOU e HATZIARGVRIOU, 2005; RAMIREZ e DAVILLA, 2004).

Se uma porção limitada do eletrodo é considerada, a corrente dissipada para o solo é composta por quatro componentes de acordo com a Figura 4.1.

No circuito equivalente a parcela referente a corrente que circula ao longo do eletrodo esta representada por meio de uma resistência e uma indutância em série.

O campo elétrico no solo determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre tais não depende da geometria dos eletrodos, mas somente da relação “ $\sigma/\omega\varepsilon$ ”, onde σ se refere à condutividade do solo, w à frequência da corrente e ε à permissividade do solo (VISACRO FILHO, 2002).

O circuito da Figura 4.2 é o circuito equivalente de uma haste de aterramento que representa os fenômenos descritos acima.



em que:

R	=	Resistência por unidade de comprimento, Ω/m ;
L	=	Indutância por unidade de comprimento, H/m;
G	=	Condutância por unidade de comprimento, S/m;
C	=	Capacitância por unidade de comprimento, F/m;
ΔL	=	Varição do comprimento da haste, m;

Figura 4.2 – Circuito equivalente de uma haste de aterramento.

O eletrodo de aterramento é tratado como π -circuitos conectados em série. Dependendo do tamanho do eletrodo define-se a quantidade de circuitos utilizados no modelo para se alcançar uma melhor precisão.

Os parâmetros definidos neste modelo são:

- R, resistência por unidade de comprimento, Ω/m ;
- L, indutância por unidade de comprimento, H/m;
- G, condutância por unidade de comprimento, S/m; e
- C, capacitância por unidade comprimento (F/m).

Para a determinação dos parâmetros do circuito do modelo de uma haste de aterramento vertical são encontradas na literatura equações obtidas do trabalho de Rudenberg (LORENTZOU e HATZIARGVRIOU, 2005).

$$G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi L} \log\left(\frac{2L}{r}\right) \quad (4.1)$$

$$C = 2\pi L \epsilon \log\left(\frac{2L}{r}\right) \quad (4.2)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \log\left(\frac{2l}{r}\right) \quad (4.3)$$

em que

- l = comprimento da haste, m;
- r = raio da haste, m;
- μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo, H/m;
- ρ = resistividade do solo, Ωm ;
- ε = permissividade elétrica, F/m;

Para a determinação das equações 4.1 a 4.3 considera-se o solo como uniforme e as suas características, como resistividade ρ e permissividade dielétrica ε são consideradas constantes. Além disso, considera-se que o comprimento do raio do condutor é muito menor que o comprimento da onda eletromagnética e do comprimento do condutor (RAMIREZ e DAVILLA, 2004).

A resistência que representa a parcela da corrente longitudinal é calculada por meio da equação 4.4.

$$R = \frac{\rho_c}{A} \quad (4.4)$$

em que

- R = resistência por unidade de comprimento, Ω/m ;
- ρ_c = resistividade da haste, Ωm ;
- A = área transversal da haste, m^2 ;

Em função do tipo de solo, a resistividade é definida pelo Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Resistividade de diferentes tipos de solo

Tipo de Solo	Resistividade (Ωm)
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argilas	80 a 330
Terra de Jardim	140 a 480
Calcário fissurado	500 a 1000
Calcário compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000
Areia comum	3000 a 8000
Basalto	10000 a 20000

Fonte: VISACRO FILHO 2002

4.2.2 Modelagem de uma Haste

A obtenção de modelos para a representação de um sistema de aterramento de forma mais precisa é feita resolvendo-se as equações eletromagnéticas para dada configuração dos eletrodos. Nesse caso o problema pode ser resolvido usando potenciais retardados e o método dos momentos para resolver as equações. Uma outra maneira de modelar eletrodos de aterramento é utilizando um modelo $n-\pi$ de linhas de transmissão (LORENTZOU e HATZIARGVRIOU, 2005; RAMIREZ e DAVILLA, 2004). Em LORENTZOU et al (2003) encontra-se um método para a análise matemática da resposta transitória no domínio do tempo envolvendo o modelo $n-\pi$.

O modelo $n-\pi$ utilizado para representar uma haste de aterramento está representado na Figura 4.2. Cada circuito π em série é um circuito de 2ª ordem, pois contém um capacitor e um indutor. A modelagem de um circuito elétrico pode ser feita no domínio de Laplace, determinando-se a sua função de transferência, estando o sistema com condições iniciais nulas.

4.2.3 Ensaios de Impulso Atmosférico

As sobre-tensões de origem externa são devidas às descargas atmosféricas diretas ou próximas aos elementos componentes do sistema elétrico, tais como as linhas de transmissão e os equipamentos instalados em subestações (transformadores, disjuntores, pára-raios, seccionadores etc.). As correntes resultantes das descargas atmosféricas podem atingir até 200 kA, com tempos de crescimento de 1 μ s a 10 μ s.

O surto de tensão desenvolvido no sistema elétrico está relacionado ao surto de corrente injetado pela descarga atmosférica incidente através da impedância de surto ou impedância característica da linha de transmissão. Estas sobretensões podem atingir várias dezenas de milhares de volts, com taxas de crescimento elevadas, representando um real perigo aos equipamentos elétricos, submetendo principalmente o isolamento entre espiras das porções iniciais dos enrolamentos de transformadores e geradores a severos esforços dielétricos.

Tensões de impulso são requeridas em laboratórios de alta tensão para simular o efeito de impulsos atmosféricos e impulsos de manobra. Em laboratório, elas são geradas por descargas de capacitores de alta tensão por meio do rompimento da resistência elétrica do ar. Uma tensão de impulso com a forma de uma dupla exponencial foi padronizada para ensaios de impulso atmosférico. Ela alcança rapidamente um valor máximo e cai abruptamente para zero, Figura 4.3

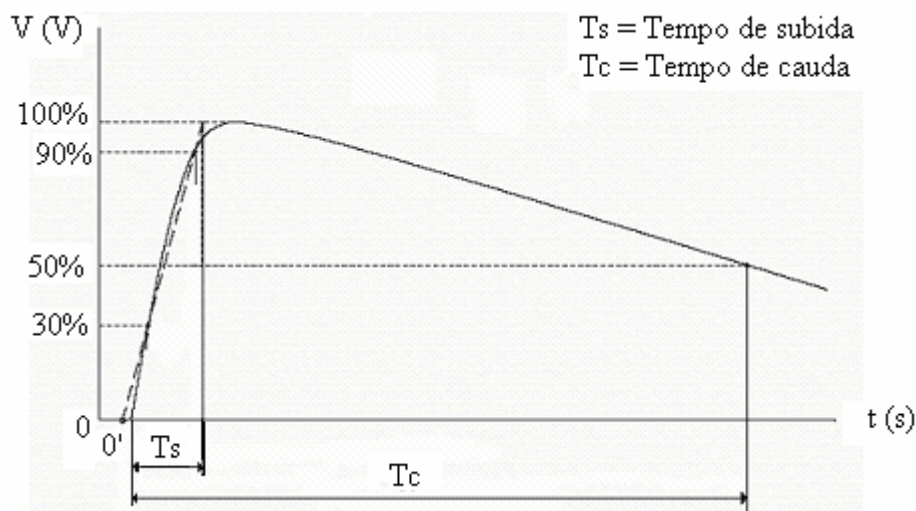


Figura 4.3 – Forma de onda para ensaios de impulso atmosférico.

A forma da tensão de impulso gerada em laboratório para simular um impulso atmosférico é determinada por certos parâmetros para a frente e para a cauda. Devido à dificuldade de se medir o início da tensão, a determinação dos tempos é realizada por um zero virtual O' , definido por uma reta que passa pelos pontos correspondentes a 30% e 90% do valor de pico da tensão, na frente da onda. Portanto, o tempo de subida, que vai de O' até onde o ponto de cruzamento da reta com a onda, e o tempo de cauda, que vai de O' até o ponto correspondente a 50% do valor de pico da tensão na cauda, são determinados.

Uma tensão de impulso 1,2/50 é usada para simular uma descarga atmosférica, o que representa uma tensão de impulso com $T_s = 1,2 \mu s$ e $T_c = 50 \mu s$ (KIND, 1978).

4.3 Metodologia

No presente trabalho é apresentado a modelagem utilizando-se solução de circuito elétrico no domínio de Laplace para o circuito equivalente da Figura 4.2. É apresentado também uma modelagem utilizando Equações de Espaço de Estado.

A partir da função de transferência encontrada para o modelo no domínio de Laplace, foi analisada a resposta do sistema a uma entrada impulso.

4.3.1 Modelo no Domínio de Laplace

Na modelagem feita no domínio de Laplace utilizou-se apenas um circuito π para representar toda a haste devido a complexidade de se utilizar n circuitos em série e por um circuito atender as necessidades do presente trabalho.

A função de transferência da haste de aterramento pode ser encontrada por meio de uma análise simples do circuito equivalente da Figura 4.2 para um circuito π , resultando em (KURO, 1999):

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{CG^{-1}s+1}{LCG^{-1}s^2 + (RCG^{-1} + L)s + (R + G^{-1})} \quad (4.5)$$

em que,

- V = Tensão aplicada ao aterramento, V;
- I = Corrente que circula no aterramento, A;
- R = Resistência por unidade de comprimento, Ω/m ;
- L = Indutância por unidade de comprimento, H/m;
- G = Condutância por unidade de comprimento, S/m; e
- C = Capacitância por unidade comprimento, F/m.

Foi aplicada, à função de transferência, uma entrada de tensão impulso normalizada para simular um impulso atmosférico, ou seja, com um tempo de subida de $1,2 \mu\text{s}$ e um tempo de cauda de $50 \mu\text{s}$. O valor da amplitude foi de 10 kV , conforme pode ser observado na Figura 4.4.

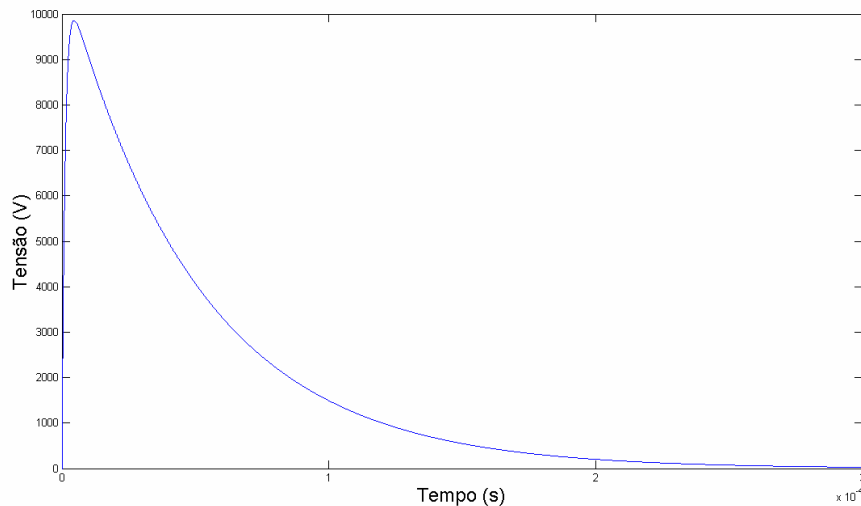


Figura 4.4 – Tensão de impulso aplicada ao modelo do aterramento.

Foi feita a simulação variando-se as condições em que se encontra a haste, ou seja, variando-se a resistividade e a permissividade elétrica do solo.

Também foi analisada a resposta do sistema quando se aumenta o comprimento da haste de aterramento.

A resistividade do solo foi variada de 5 a $20000 \Omega\cdot\text{m}$. Essa faixa compreende aos seguintes tipos de solo: lama, húmus, limo, argilas, terra de jardim, calcário fissurado, calcário compacto, granito, areia comum e basalto, Quadro 4.1.

O Quadro 4.2 mostra os valores das variáveis utilizadas para a simulação do comportamento da haste de aterramento.

Quadro 4.2 – Valores das variáveis utilizadas na simulação

Variável	Descrição	Valores	Unidade
ρ	Resistividade do solo	5 à 20000	Ωm
ρ_c	Resistividade da haste	1,710-8	Ωm
r	Raio da haste	0,0063	cm
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	$4\pi 10^{-7}$	H/m
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa	4 e 10	adm
L	Comprimento da haste	1 a 10	m

4.3.2 Proposta para uma Modelagem em Espaço de Estados

O circuito equivalente de uma haste de aterramento utilizada em aplicações de altas frequências é composto por n circuitos π conforme está representado na Figura 4.2.

Como hipótese inicial, será considerada que, a cada um metro a haste de aterramento será representada como um circuito π em série. Portanto para uma haste de dois metros têm-se dois circuitos π em série.

As equações de estado para o circuito da Figura 4.2, na forma matricial, considerando-se dois circuitos “ π ” são (OGATA, 2003):

$$\begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \frac{de_{c1}}{dt} \\ \frac{de_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \left(\frac{R_2}{L_2} - \frac{R_1}{L_1}\right) & -\left(1 + \frac{1}{L_2}\right) & \frac{1}{L_2} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & \frac{G_1^{-1}}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{G_2^{-1}}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ e_{c1} \\ e_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_T] \quad (4.6)$$

$$[i_T] = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ e_{c1} \\ e_{c2} \end{bmatrix} + [0][v_T] \quad (4.7)$$

em que i_T é a saída do sistema e a corrente total que circula no aterramento e v_T é a tensão aplicada ao modelo do aterramento. A matriz de espaço, A , é, portanto, dada por:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \left(\frac{R_2}{L_2} - \frac{R_1}{L_1}\right) & -\left(1 + \frac{1}{L_2}\right) & \frac{1}{L_2} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & \frac{G_1^{-1}}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{G_2^{-1}}{C_2} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

As matrizes de espaço de estado apresentadas em 4.6 e 4.7 são para uma haste de dois metros. Para uma haste de $2 + n$ metros deve-se acrescentar n circuitos π e acrescentar $2.n$ variáveis de estado à matriz de espaço de estados.

O diagrama de estado correspondente ao modelo está representado na Figura 4.5.

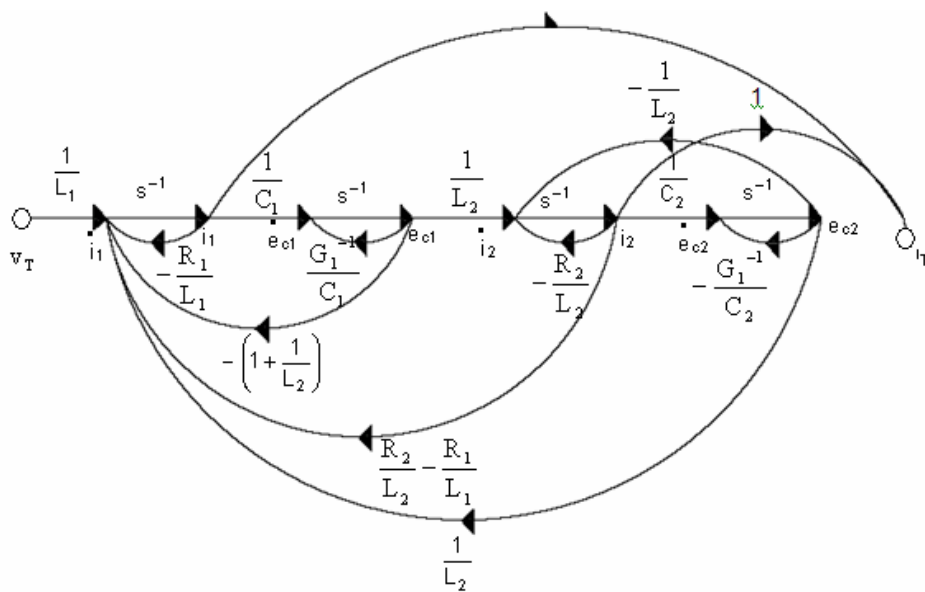


Figura 4.5 – Gráfico de fluxo de sinais para uma haste representada por dois circuitos π .

Por meio do diagrama de estado pode ser analisado o comportamento do aterramento quanto a controlabilidade, observabilidade e ganhos entre a entrada e os estados.

4.4 Resultados e Discussão

Todos os resultados foram obtidos para o modelo da haste de aterramento utilizando um circuito π .

A Figura 4.6 mostra a corrente de aterramento, gerada a partir da aplicação de uma tensão de impulso, para quatro valores de resistividade do solo e permissividade elétrica relativa igual a quatro. Para todas as curvas o comprimento da haste é de um metro.

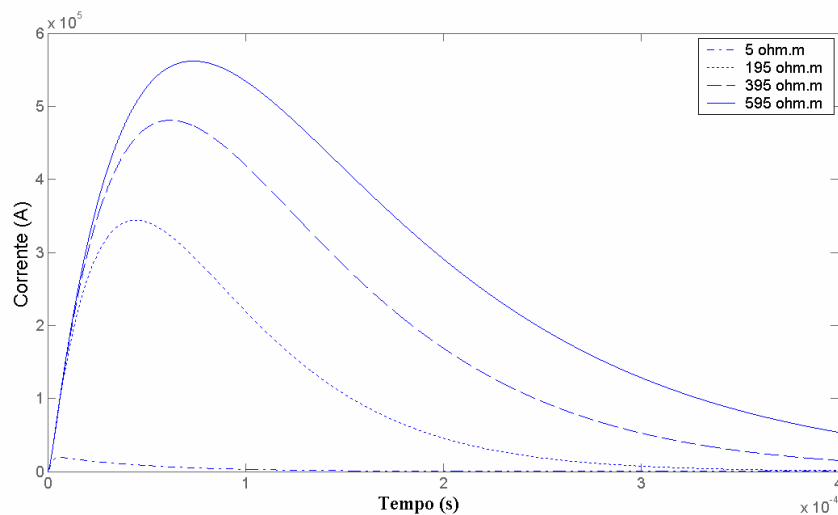


Figura 4.6 – Corrente de aterramento em função do tempo para quatro valores de resistividade elétrica do solo e permissividade elétrica relativa ϵ_r de 4.

Por meio destes resultados conclui-se que para valores de resistividade do solo baixos, o sistema demora menos para retornar ao valor de corrente igual a zero em relação aos sistemas que possuem resistividade do solo alta. Verifica-se também que para valores de resistividade do solo altos, a corrente de aterramento assume amplitudes maiores.

Foi verificado também que variando a permissividade elétrica relativa do solo a resposta do sistema de aterramento diante de uma entrada de tensão de impulso não varia consideravelmente.

Na Figura 4.7 observa-se a resposta de corrente do sistema em função de uma entrada de tensão de impulso para valores de comprimento da haste variando de 1 a 10 m e para um valor de permissividade elétrica relativa ϵ_r igual a 4.

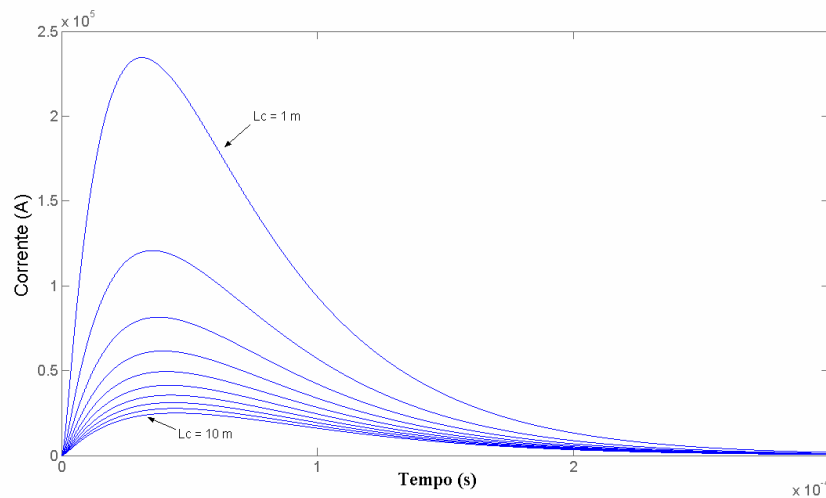


Figura 4.7 – Corrente de aterramento em função do tempo para diferentes valores de comprimento da haste e permissividade elétrica relativa ϵ_r igual a 4.

A Figura 4.7 mostra as respostas de corrente para comprimentos da haste de aterramento variando de 1 a 10 m. Quanto maior o comprimento da haste melhor é a resposta do sistema. O tempo de acomodação da corrente, ou seja, o tempo que a corrente demora para alcançar o valor zero, é igual para todos os valores de comprimento da haste. Entretanto para hastes com comprimentos menores, a amplitude da corrente é maior.

Verifica-se também por meio da Figura 4.7 que à medida que se aumenta o comprimento da haste, a resposta varia pouco, tendendo a um valor, ou seja, saturando. Isso mostra que há um limite para o aumento do comprimento da haste para a melhoria da resposta.

Assim como para diferentes valores de resistividade elétrica do solo, foi verificado que variando a permissividade elétrica relativa do solo a resposta do sistema de aterramento diante de uma entrada de tensão de impulso não varia consideravelmente.

4.5 Conclusão

Este trabalho permitiu aplicar os conhecimentos de modelagem e controle ao estudo de aterramentos elétricos e nortear o projeto de aterramentos para sistemas MRT frente a fenômenos transitórios.

Verificou-se o comportamento do sistema para diferentes valores de resistividade do solo, de comprimento da haste e de permissividade elétrica do solo. Concluiu-se que valores menores de resistividade e valores maiores de comprimento da haste melhoram a resposta do aterramento diante de uma descarga atmosférica.

Os valores de corrente obtidos apresentados estão coerentes com o encontrados nas bibliografias, pois acompanharam a forma de onda tensão de impulso padronizada aplicada a entrada do modelo.

Deve-se, portanto, atentar para esses valores no projeto de um sistema de aterramento para sistemas MRT, pois nesses sistemas a corrente que circula no aterramento gera gradientes de potenciais no solo por onde transitam animais e humanos.

São necessárias formas de validação do modelo, como por exemplo, a realização de ensaios práticos.

4.6 Referências Bibliográficas

KIND, D. An Introduction to High Voltage Experimental Technique – 1. ed. – Braunschweig: Vieweg, 1978.

KUO, B. C. “Automatic Control Systems” – 7th ed. Prentice-Hall, 1995.

LORENTZOU, M. I., HATZIARGVRIOU, N. D. “Overview of Grounding Electrode Models and their Representation in Digital Simulations”, IPST 2001 Conference, New Orleans – USA.

LORENTZOU, M. I., HATZIARGVRIOU, N. D. “Transmission Line Modeling of Grounding Electrodes and Calculation of their Effective Length under Impulse Excitation”, IPST 2005 Conference.

LORENTZOU, M. I., HATZIARGVRIOU, N. K., PAPADIAS, B.C. “The Time Domain Analysis of Grounding Electrodes Impulse Response”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.5, 2003.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno – São Paulo: Prentice Hall, 2003. 4. ed.

RAMIREZ, J., DAVILLA, S. “Models of Grounding under Lightning Discharges. Simple Electrode Configurations”, 2004.

VISACRO FILHO, S. F. “Aterramentos Elétricos” - São Paulo : Artliber, 2002, 159p. : il. ; 21 cm.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO GERAL E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão Geral

Desenvolveu-se esse trabalho com a finalidade de se obter um estudo mais profundo sobre o projeto de aterramentos elétricos para linhas de eletrificação rural. Foram encontradas muitas dificuldades por ser um assunto novo e também por não haver livros didáticos explicando como são feitos esses projetos.

Por meio do levantamento das vantagens da energia elétrica no campo, conclui-se que é necessário investir em formas mais baratas para a construção das linhas elétricas rurais para que todos os consumidores possam ser atendidos de forma eficiente, ou seja, possa-se compartilhar mais os benefícios que a energia elétrica pode trazer.

O sistema MRT é uma opção quando se querem reduzir os custos, pois os custos da eletrificação rural no programa do governo “Luz na Terra” diminuíram com a utilização de sistemas MRT e aumentaram com a utilização de sistema bifásico.

Entretanto, o sistema MRT exige um aterramento mais elaborado, portanto, para a utilização de sistemas MRT deve-se projetar um aterramento de forma a manter os potenciais no solo em níveis seguros para pessoas e animais.

Para o projeto de sistemas de aterramento para linhas de eletrificação rural Monofilares com Retorno pelo Terra foi utilizado o método das imagens. Ele exige que sejam feitas algumas simplificações, porém é muito utilizado por projetistas de aterramentos elétricos.

Como forma de analisar o comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas, foi feita uma modelagem do circuito π equivalente por variáveis de estado no domínio de Laplace. A abordagem no domínio de Laplace modela em regime transiente o comportamento do aterramento para diversas situações de interesse.

Foi feito um programa computacional para a realização de todas as simulações e para o levantamento dos resultados obtidos. Para o caso do terceiro capítulo, foi possível obter a resistência de aterramento e os potenciais gerados no solo. Para a simulação feita no domínio de Laplace, é possível obter a resposta transitória da corrente elétrica que circula em uma haste quando é aplicada uma tensão atmosférica. Por meio da simulação computacional é possível avaliar com facilidade o comportamento do sistema para uma gama grande de valores.

A partir dos estudos de caso feitos para o projeto de diferentes configurações de aterramento, foi possível, a partir dos resultados, criticar o quadro da ELETROBRÁS, que trás o valor da resistência de aterramento mínima para diferentes potências de sistemas MRT. Pelos resultados, a única configuração que resulta em uma resistência de aterramento que atende a todos os valores de potências dos transformadores de isolamento foi uma malha contendo nove hastes, que é muito cara.

Entretanto, para solicitações de regime permanente, a tabela da Eletrobrás está super-dimensionada considerando-se os gradientes de potencial no solo, pois se verificou que, para todas as configurações de aterramento analisadas, os potenciais de passo máximos ficaram bem abaixo do limite considerado de 25 V, podendo, portanto ser utilizadas configurações de aterramento mais simples, que resultam em menores custos.

Na modelagem da haste de aterramento, foram aplicados conhecimentos de modelagem e controle ao estudo de aterramentos elétricos.

Verificou-se o comportamento do sistema para diferentes valores de resistividade do solo, de comprimento da haste e de permissividade elétrica do solo. Concluiu-se que valores menores de resistividade e valores maiores de comprimento da haste melhoram a resposta do aterramento diante de uma descarga atmosférica.

Deve-se, portanto, atentar para esses valores no projeto de um sistema de aterramento para sistemas MRT, pois nesses sistemas a corrente

que circula no aterramento gera gradientes de potenciais no solo por onde transitam animais e humanos.

Por se tratar de uma abordagem nova sobre modelagem de aterramentos elétricos, são necessárias formas de validação do modelo, como por exemplo, a realização de ensaios práticos que validem os modelos desenvolvidos.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

São propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- (i) Projeto de sistemas de aterramento em baixas frequências considerando a estratificação do solo.
- (ii) Modelagem de uma haste de aterramento no domínio de Laplace utilizando vários circuitos π em série.
- (iii) Realização de experimento para validação do projeto de aterramento em baixas frequências.
- (iv) Realização de experimento para validação da modelagem de uma haste de aterramento para solicitações de altas frequências.
- (v) Análise dos resultados de solicitações em altas frequência utilizando a modelagem em espaço de estado.
- (vi) Modelagem das hastes e do sistema de aterramento utilizando Elementos Finitos.
- (vii) Cálculo do potencial de passo para cada tipo de malha utilizando Elementos Finitos.
- (viii) Modelagem transitória das hastes utilizando um programa acreditado mundialmente como é o caso do ATP-EMTP.