

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES
TRANSITÓRIAS EM MALHAS DE ATERRAMENTO DIANTE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**Aluno: Henry Ramón Marín Mesa
Formação: Engenheiro Eletricista**

Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Pissolato Filho – UNICAMP/ FEEC/ DSCE
Prof. Dr. Hugo Enrique Hernández Figueroa - UNICAMP/ FEEC/ DMO
Prof. Dr. Leonardo de Souza Mendes - UNICAMP/ FEEC/ DECOM
Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino – UFMG/ DEE

Campinas, 04 de novembro de 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M338e Marín Mesa, Henry Ramón
Estudo do comportamento das tensões transitórias em
malhas de aterramento diante descargas atmosféricas /Henry
Ramón Marín Mesa. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: José Pissolato Filho
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Descargas elétricas. 2. Raio. 3. Transitórios
(Eletricidade). 4. Correntes elétricas – Aterramento. 5.
Software. I. Pissolato Filho, José. II. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: Study of the behavior of the transient voltages in grounding
grids caused by lightning

Palavras-chave em Inglês: Grounding systems, Lightning, TLM, Grounding
grids, Transient voltage, Computational program

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Hugo Enrique Hernández Figueroa, José Osvaldo
Saldanha Paulino

Data da defesa: 04/11/2005

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise computacional usando a técnica numérica TLM (Transmission Line Method) do comportamento das tensões transitórias em sistemas de aterramento, quando submetidas a fenômenos impulsivos do tipo descargas atmosféricas.

É apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema e os diferentes métodos numéricos usados para modelar sistemas de aterramento.

A técnica numérica TLM é apresentada, assim como, as equações para a determinação dos parâmetros usados nas simulações e o fluxograma do programa computacional desenvolvido. O programa foi escrito em Fortran e validado comparando os resultados obtidos com simulações e testes experimentais publicados por outros autores.

Com o objetivo de obter o comportamento das tensões transitórias sobre diferentes situações, foi estudada a influência de alguns parâmetros no comportamento transitório das malhas de aterramento.

Abstract

This work, by using the TLM (Transmission Line Method) numeric technique, presents a computational analysis of the transitory tensions behavior in grounding systems, when submitted to impulsive phenomena of the atmospheric discharge type.

A bibliographical revision on the theme and the different numeric methods used for modelling grounding systems, including the TLM numeric technique, are explained, as well as the equations for the determination of the parameters used in the simulations and the flowchart of the software developed.

The program written in Fortran was validated comparing simulations and experimental tests published by other authors.

For the purpose of obtaining the transitory tensions behavior in different situations, we studied the influence of some parameters in the transitory behavior of grounding meshes.

Dedicatória

À minha *família* que me apóia, valoriza e ama de forma incondicional.

Em especial aos meus pais *Wilfredo e Miquelina*.

Agradecimentos

Aos professores *José Pissolato Filho* e *Carlos Rodrigues de Souza* pela sua orientação.

Ao *Juan* pelo constante apoio e ajuda.

Ao *Fernando* e *Leonardo* pela ajuda prestada.

A *todos* os que de alguma forma influenciaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao *CNPq* pelo suporte financeiro.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	iv
Dedicatória e Agradecimentos	v
Sumário.....	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Histórico	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do trabalho	4
Capítulo 2: Estado da Arte	5
2.1 Descargas atmosféricas.....	5
2.2 Sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).	7
2.3 Sistemas de aterramento.	9
2.3.1 Malhas de aterramento.....	9
2.3.2 Parâmetros das malhas.	11
2.4 Tensão de toque e tensão de passo.	11
2.5 Transitórios.....	13
2.6 Ionização do solo.	14
2.7 Métodos numéricos para modelar sistemas de aterramento.	17
2.7.1 Método do circuito.	17
2.7.2 Método do campo eletromagnético.	24
2.7.3 Método híbrido	26
2.7.4 Método da linha de transmissão	28
2.8 Conclusões do capítulo.....	31

Capítulo 3: Método TLM	32
3.1 Método TLM de uma linha de transmissão com perda	32
3.1.1 Equacionamento TLM unidimensional	35
3.1.2 Terminações das linhas.....	38
3.2 Determinação dos parâmetros dos cabos que compõe as malha de aterramento.	47
3.2.1 Resistência por unidade de comprimento (R).....	48
3.2.2 Eletrodos de aterramento horizontais.	48
3.2.3 Eletrodos de aterramento verticais (hastes).	49
3.3 Aspectos computacionais	50
3.3.1 Etapa de pré-processamento.	51
3.3.2 Etapa de processamento.....	51
3.3.3 Etapa de pós-processamento.....	55
3.4 Conclusões do capítulo.....	55
Capítulo 4: Resultados e Discussões	57
4.1 Validação do Método Proposto	57
4.1.1 Condição 1: Comportamento das tensões transitórias em um eletrodo horizontal de cobre com 15 m de comprimento.	58
4.1.2 Condição 2: Comportamento das tensões transitórias em um eletrodo vertical de aço com 6 m de comprimento.....	61
4.1.3 Condição 3: Comportamento das tensões transitórias em uma malha de aterramento com dimensões de 60 m x 60 m com quadrículas de 6x6 m.	64
4.1.4 Condição 4: Comportamento das tensões transitórias em uma malha de aterramento com dimensões de 21 m x 28 m com quadrículas de 7x7 m e eletrodos verticais de 2 m em todos a todos os nós do perímetro.....	67

4.2 Influência de diferentes parâmetros no comportamento transitório de uma malha de aterramento.	70
4.2.1 Caso 1: Influência da resistividade do solo	72
4.2.2 Caso 2: Influência do raio dos condutores que compõem a malha de aterramento.	73
4.2.3 Caso 3: Influência da profundidade da malha de aterramento.	74
4.2.4 Caso 4: Influência do ponto de injeção de corrente na malha	75
4.2.5 Caso 5: Influência da configuração geométrica da malha	76
4.2.6 Caso 6: Influência do uso de eletrodos verticais na malha de aterramento	78
4.3 Propagação da onda de tensão na malha de aterramento.....	79
4.4 Conclusões do capítulo.....	82
 Capítulo 5: Conclusões e Recomendações	 84
5.1 Conclusões gerais.	84
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	85
 Referências Bibliográficas.....	 86
 Anexos	 90
Anexo A.....	90
Anexo B.....	91
Anexo C.....	92

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1: Torre de telefonia de celular instalada em Cachoeira Paulista	3
Figura 1.2: Desenho do lançamento de um foguete na torre de telefonia de celular instalada em Cachoeira Paulista	3

Capítulo 2

Figura 2.1: Forma de onda típica de corrente de uma descarga atmosférica. [6]	6
Figura 2.2: Tipos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)	8
Figura 2.3: Geometrias das malhas de aterramento	10
Figura 2.4: a) Tensão de passo e b) Tensão de toque.	12
Figura 2.5: Representação de equipamentos conectados a uma malha de aterramento	14
Figura 2.6: Modelo de raio equivalente considerando a ionização do solo [9]	15
Figura 2.7: Circuito equivalente de cada segmento, Meliopoulos et.al [12].	18
Figura 2.8: Circuito equivalente de uma quadrícula da malha de aterramento [13]	20
Figura 2.9: Circuito equivalente para dipolos indutivos e capacitivos propostos por Geri [14].	21
Figura 2.10: Circuito equivalente proposto por Geri [14]	22
Figura 2.11: Circuito equivalente do sistema de aterramento proposto por Otero [15].	23

Capítulo 3

Figura 3.1: Linha de transmissão dividida em segmentos	32
Figura 3.2: Modelo de um segmento infinitesimal da linha de transmissão usando os parâmetros R, L, C e G.	33
Figura 3.3: Modelo de um segmento da linha de transmissão usando a impedância característica (Z_0).	34
Figura 3.4: Tensões incidentes e refletidas sobre um nó n	35

Figura 3.5: Equivalente de Thevenin da junção de dois segmentos de linhas em um nó n .	36
Figura 3.6: Equivalente de Thevenin para o primeiro nó conectado à fonte de excitação	38
Figura 3.7: Extremidade da linha conectada à carga indutiva (último nó da linha).	40
Figura 3.8: Equivalente de thevenin da extremidade da linha conectada à carga indutiva.	40
Figura 3.9: Extremidade da linha conectada à carga resistiva (último nó da linha)	42
Figura 3.10: Equivalente de Thevenin da extremidade da linha conectada à carga resistiva.	42
Figura 3.11: Nó paralelo com quatro linhas de transmissão conectadas a ele.	43
Figura 3.12: Equivalente de Thevenin para um nó paralelo com quatro linhas de transmissão conectadas a ele.	44
Figura 3.13: Tensão incidente em um nó paralelo.	45
Figura 3.14: Malha de aterramento.	48
Figura 3.15: Condutor enterrado	48
Figura 3.16: Fluxograma do programa computacional desenvolvido visando estudo de malhas de aterramento.	52

Capítulo 4

Figura 4.1: Eletrodo horizontal com 15 m de comprimento.	58
Figura 4.2: Corrente injetada no ponto $X=0$ m do eletrodo horizontal	59
Figura 4.3: Tensão em diferentes pontos do eletrodo horizontal obtida nas simulações	60
Figura 4.4: Medição da tensão transitória para o eletrodo de aterramento horizontal obtida por Leonid-Greev [20].	60
Figura 4.5: Eletrodo vertical com 6 m de comprimento.	62
Figura 4.6: Corrente injetada no eletrodo de aterramento vertical usada nas simulações	62
Figura 4.7: Tensão no eletrodo vertical obtida nas simulações	63
Figura 4.8: Medição da tensão transitória para o eletrodo vertical obtida por Leonid-Greev [20].	63

Figura 4.9: Malha de aterramento usada nas simulações.	64
Figura 4.10: Tensões nos diferentes pontos da malha de aterramento obtida nas simulações.	65
Figura 4.11: Tensão transitória na malha de aterramento, referência [20].	66
Figura 4.12. Malha de aterramento	67
Figura. 4.13. Tensão no ponto <i>A</i> da malha usando o método TLM	69
Figura. 4.14. Tensão no ponto <i>B</i> da malha usando o método TLM	69
Figura 4.15: Dimensões da malha de aterramento usada nas simulações.	71
Figura 4.16: Comportamento da tensão na malha no ponto <i>B</i> em função da resistividade do solo.	72
Figura 4.17: Comportamento da tensão no ponto <i>B</i> quando os raios dos condutores são alterados.....	74
Figura 4.18: Comportamento da tensão no ponto <i>B</i> da malha para diferentes profundidades de aterramento.	75
Figura 4.19: Comportamento da tensão para diferentes pontos de injeção de corrente.	76
Figura 4.20: Malhas de diferentes configurações geométricas usadas nas simulações.....	77
Figura 4.21: Comportamento da tensão para diferentes configurações da malha.	77
Figura 4.22: Comportamento da tensão para diferentes configurações da malha (ampliação).	78
Figura 4.23: Comportamento da tensão no ponto de injeção de corrente usando uma malha com ou sem eletrodos verticais.....	79
Figura 4.24: Malha de aterramento com 36 quadrículas.	79
Figura 4.25: Tensão transitória em diferentes pontos da malha.	80
Figura 4.26: Distribuição espacial da tensão transitória na superfície da malha de aterramento quando a corrente é aplicada no ponto <i>B</i> (curvas tridimensionais).	81
Figura 4.27: Distribuição espacial da tensão transitória na superfície da malha de aterramento quando a corrente é aplicada no ponto <i>B</i> (curvas de nível).....	82

Listas de tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1: Valores típicos de descargas atmosféricas. [6].....	7
---	---

Capítulo 4

Tabela 4.1: Parâmetros do eletrodo com 15 m de comprimento.....	58
Tabela 4.2: Parâmetros do eletrodo com 6 m de comprimento	61
Tabela 4.3: Parâmetros da malha de aterramento.....	65
Tabela 4.4: Comparação das simulações com os resultados experimentais e analíticos de Ramamoorthy [13].....	68
Tabela 4.5: Valores dos parâmetros da malha que foram mantidos constantes durante as simulações.....	71
Tabela 4.6: Níveis considerados no estudo dos parâmetros da malha	72
Tabela 4.7: Parâmetros do solo e dos condutores da malha composta por 36 quadrículas.....	80

Capítulo1: Introdução

1.1 Histórico

Sistemas de aterramento desempenham funções bem definidas em um sistema elétrico, tais como: proteção de equipamentos, segurança de pessoas. Além disso, é função do aterramento a proteção contra descargas atmosféricas (prédios, antenas, torres de transmissão, etc.), proporcionando caminhos de baixa impedância para a corrente da descarga através dos eletrodos ao longo do solo.

As descargas atmosféricas são reconhecidamente uma das maiores causas de danos e interrupções nos sistemas elétricos e eletrônicos. A explicação para esses fatos está relacionada principalmente à utilização em larga escala de equipamentos de elevada susceptibilidade, nos quais a ação direta de campos eletromagnéticos e as sobretensões resultantes de descargas atmosféricas diretas ou indiretas podem provocar desde operações indevidas até a destruição dos equipamentos eletrônicos e dos sistemas elétricos.

Diferentes sistemas de aterramento fazem parte da proteção contra fenômenos transitórios na indústria, subestações, prédios, etc. Entre eles podem ser citados: eletrodos verticais, horizontais e/ou malhas de aterramento. Os fenômenos transitórios induzem correntes e, conseqüentemente, tensões transitórias que se dissipam no solo, podendo causar destruição de equipamentos eletrônicos e perdas de vidas humanas. Isto justifica o estudo do comportamento destas tensões transitórias nos sistemas de aterramento.

Vários autores têm estudado as tensões transitórias em sistemas de aterramento através de diferentes métodos, tais como:

- Método do circuito;
- Método do campo eletromagnético;
- Método das linhas de transmissão;
- Método híbrido.

O método das linhas de transmissão foi tomado como base para o desenvolvimento deste trabalho. Neste sentido, os estudos pioneiros desenvolvidos por Peter B. Johns e R. L.

Beurle [1] tornaram-se um dos mais eficientes e difundidos métodos para a solução de problemas de eletromagnetismo, o TLM (Transmission line method). Esse método utiliza o princípio de Huygens [2], o qual utiliza pulsos elétricos para descrever a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço, conectando os nós do seu modelo discretizado como linhas de transmissão.

Pelo fato do método TLM utilizar linhas de transmissão, ter um equacionamento relativamente simples e tempo de processamento razoável quando comparado com outros métodos, é usado neste trabalho, que pretende desenvolver um modelo que possa ser utilizado para descrever o que acontece em uma malha de aterramento quando ela é atingida por uma descarga atmosférica direta.

Esperamos ao final desta dissertação poder oferecer condições teóricas suficientes para a utilização do software desenvolvido especialmente para esta finalidade e, também, para aprimorá-lo futuramente a partir da comparação de dados reais, que serão obtidos em Cachoeira Paulista. A validação e os ajustes necessários no software talvez sejam as etapas mais importantes deste trabalho e só poderão ser realizadas a partir dos dados que serão obtidos no experimento de Cachoeira Paulista.

Através da validação experimental deste método computacional, pretendemos desenvolver um software confiável, que possa ser empregado no projeto de malhas de aterramento de torres de telecomunicações objetivando alcançar imunidade às descargas atmosféricas diretas.

Malhas de aterramento bem dimensionadas podem favorecer uma proteção adequada contra as perturbações provenientes de descargas atmosféricas. Neste sentido, podemos buscar através de simulações computacionais as configurações ótimas do ponto de vista custo-benefício.

Acreditamos que com o uso deste programa poderemos prever, com um grau aceitável de erro, os efeitos de uma descarga direta na torre de telefonia celular instalada em Cachoeira Paulista (Figura 1.1 e 1.2) ou em qualquer outra estrutura de proteção desejada.



Figura 1.1: Torre de telefonia de celular instalada em Cachoeira Paulista

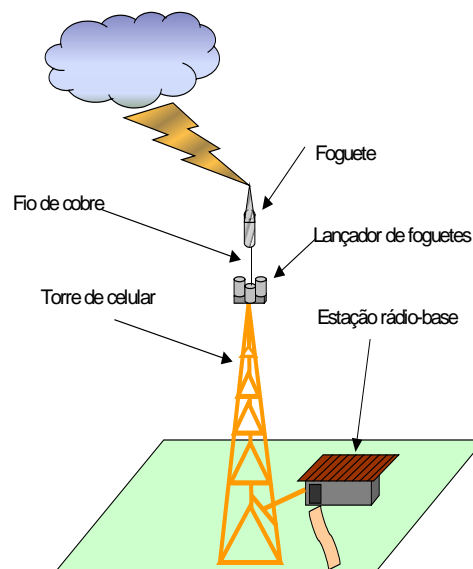


Figura 1.2: Desenho do lançamento de um foguete na torre de telefonia de celular instalada em Cachoeira Paulista

1.2 Objetivos

- 1) Apresentação da técnica numérica TLM, das equações para a determinação dos parâmetros dos eletrodos e descrição do fluxograma do programa computacional desenvolvido.

- 2) Validação do programa a partir de dados obtidos por outros autores em simulações computacionais e experimentalmente.
- 3) Determinação da influência de diferentes parâmetros na tensão transitória da malha de aterramento, tais como:
 - Resistividade do solo;
 - Permissividade do solo;
 - Raio do condutor que compõe a malha de aterramento;
 - Profundidade em que se encontra a malha de aterramento;
 - Ponto de injeção de corrente;
 - Configuração geométrica da malha;
 - Uso de eletrodos verticais na malha de aterramento.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação está estruturada em 5 capítulos, descritos a seguir.

A **Introdução** apresenta a razão pela qual esta dissertação de mestrado foi escrita. Em seguida, são enumerados os objetivos que se desejam alcançar.

O capítulo 2 fornece ao leitor o **Estado da Arte** relacionado ao tema em questão, sendo citados vários trabalhos e autores que serviram de referência para o presente trabalho.

No capítulo 3, **Método TLM**, são apresentados: o método numérico TLM, usado na elaboração do programa computacional, as equações para a determinação dos parâmetros dos eletrodos e uma explicação do programa escrito em linguagem Fortran, através de um fluxograma.

No capítulo 4, **Resultados e Discussões**, são feitas: a validação do modelo proposto através de comparações com resultados obtidos em simulações computacionais e experimentos realizados por outros autores, o estudo da influência de diferentes parâmetros na tensão transitória de uma malha de aterramento e algumas conclusões preliminares.

No capítulo 5, **Conclusões**, são abordados os resultados obtidos no trabalho e algumas conclusões preliminares respeito das simulações efetuadas. Também são apresentadas sugestões para a realização de alguns trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estado da Arte

2.1 Descargas atmosféricas

Para que uma descarga atmosférica possa ocorrer é necessário que a nuvem fique carregada eletricamente, a explicação deste fenômeno é que pequenas partículas presentes no interior da nuvem compostas por poeira, água e cristais de gelo (hidrometeoros) crescem e interagem entre si através de colisões. A partir destas colisões as partículas menores adquirem carga elétrica positiva, enquanto as partículas maiores adquirem carga elétrica negativa [3].

As ações do movimento de convecção e da força de gravidade acabam separando as partículas. A parte superior da nuvem carrega-se positivamente e a parte inferior negativamente. Esta separação de cargas produz uma enorme diferença de potencial no interior da nuvem e desta para o solo [4].

Podem ser destacados quatro tipos de descargas atmosféricas, levando-se em consideração os pontos entre as quais são observadas [5]: descarga nuvem-terra, descarga nuvem-nuvem, descarga dentro da própria nuvem e descarga nuvem-atmosfera.

Para este trabalho as descargas atmosféricas de maior importância são as descargas nuvem-terra, pois estas são as grandes responsáveis pelos enormes prejuízos causados ao sistema elétrico.

Uma descarga para a terra ocorre em várias etapas, começando sobre a forma de pequenas descargas originadas na nuvem em direção à terra, chamadas de descargas piloto. Quando a descarga piloto aproxima-se da terra, outras descargas que se originam na terra sobem ao encontro daquelas que descem da nuvem, formando a descarga principal, ou seja, um canal ionizado entre a nuvem e a terra; nesse instante, é estabelecida uma corrente de grande intensidade denominada corrente de retorno, que é da ordem de centenas de amperes.

A maioria das descargas atmosféricas nas regiões tropicais são de polaridade negativa, ou seja, a nuvem se carrega negativamente em relação à terra e a corrente de retorno é composta de cargas negativas que viajam da nuvem para a terra; a duração dessa corrente é da ordem de algumas dezenas de microssegundos. O tempo de trânsito da corrente de retorno ao longo do canal da descarga é da ordem de $100 \mu\text{s}$ e a velocidade próxima ao solo é mais alta que aquela que sai da nuvem [5].

Quando o centro de cargas da nuvem, que iniciou o processo de descarga atmosférica, é completamente descarregado, o seu potencial fica bastante reduzido em relação aos outros centros de carga existentes na nuvem e, desta forma, ocorrem as chamadas descargas subsequentes [4]. Estas descargas utilizam o canal ionizado, formado durante a primeira descarga, para descarregar os outros centros de carga da nuvem [4].

A forma de onda típica de uma descarga atmosférica é mostrada na Figura 2.1 e, na Tabela 2.1, são mostrados alguns valores típicos de descargas atmosféricas.

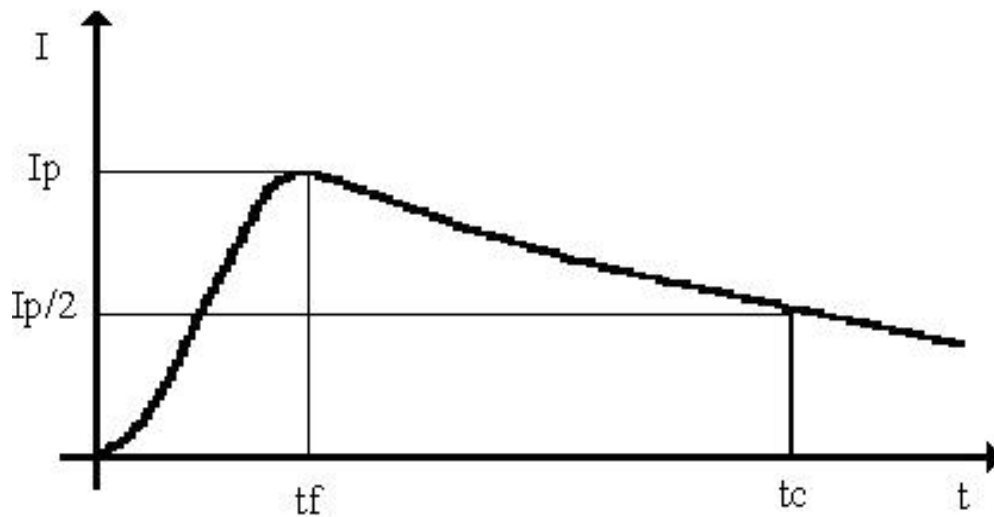


Figura 2.1: Forma de onda típica de corrente de uma descarga atmosférica [6].

Na Figura 2.1, t_f é o tempo de frente e t_c é o tempo de cauda da onda de corrente.

Tabela 2.1: Valores típicos de descargas atmosféricas [6].

I_p (kA)	T_f (μ s)
3.50	1.0
12.0	2.0
19.0	3.0
25.0	5.0
29.5	6.0
34.0	7.0
39.0	7.9
43.5	8.2
50.0	10.0
66.0	11.5
102	30.0
200	40.0

Para evitar que as descargas atmosféricas causem danos às estruturas e aos equipamentos que elas atingem, é necessário propiciar um caminho de baixa impedância (sistemas de proteção contra descargas atmosféricas SPDA), para que a corrente produto da descarga escoe para terra através dos sistemas de aterramento adequados.

2.2 Sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)

A função dos SPDA é evitar danos causados pelas elevadas corrente de retorno dos raios. Um bom SPDA é aquele capaz de captar as descargas atmosféricas que atingiram as

estruturas protegidas e conduzir as suas elevadas correntes para o solo através do sistema de aterramento [6].

A norma brasileira NBR-5419 regulamenta três modos diferentes de proteção de estruturas: método Franklin, eletrogeométrico e método Faraday [7].

Esses métodos diferem quanto à forma de captação das descargas atmosféricas: no método Franklin e eletrogeométrico isto é feito através de hastes metálicas verticais ou cabos horizontais suspensos, Figura 2.2.a e Figura 2.2.b, respectivamente; no método Faraday isto é feito através de cabos condutores apoiados na própria estrutura a ser protegida, Figura. 2.2.c.

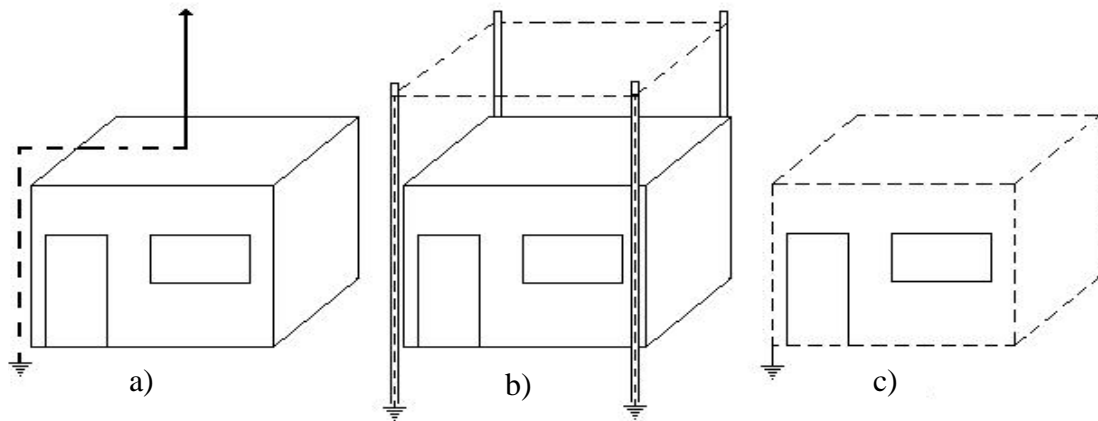


Figura 2.2: Tipos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

Para os três métodos é muito importante o correto dimensionamento dos condutores de descida, da malha de aterramento e que a conexão com esta esteja em perfeitas condições; isso deve poder ser verificado com facilidade, pois uma má conexão ou mesmo uma descontinuidade pode provocar acidentes graves [4].

Um dos componentes mais importantes de um SPDA é o sistema de aterramento, pois, além de ter a importante função de facilitar o escoamento para terra de toda a corrente captada pelo SPDA durante a descarga atmosférica, têm a função de proteger as pessoas contra tensões de passo, que possam surgir no solo e pôr em risco a vida de quem estiver por perto no momento da descarga atmosférica [4].

2.3 Sistemas de aterramento

O sistema de aterramento exerce varias funções em um sistema elétrico tais como:

- Segurança de pessoas que transitam pela área sobre a malha de aterramento;
- Proteção de equipamentos;
- Proteção de edificações.

Os sistemas de aterramento apresentam diversas configurações geométricas e podem ser compostos por: condutores horizontais, hastes verticais ou por uma combinação entre eles formando uma malha de aterramento.

2.3.1 Malhas de aterramento

O uso de malhas de aterramento é feito há muitas décadas e se espalhou por instalações elétricas no mundo todo. Esses sistemas apresentam diversos tamanhos e configurações geométricas e são utilizados em diversos tipos de instalações elétricas como:

- Instalações de telecomunicações;
- Subestações de energia elétrica;
- Aeroportos;
- Instalações industriais;
- Instalações residenciais;
- Laboratórios de pesquisa e análise, etc.

Podemos representar uma malha de terra como sendo composta por diversos condutores formando um plano quadriculado paralelo à superfície do solo, Figura 2.3.a e

Figura 2.3.b, ou ainda, planos diversos no subsolo. Essas diferentes geometrias estão relacionadas com o espaço para a instalação da malha, o tipo de terreno e as necessidades de aterramento elétrico do local.

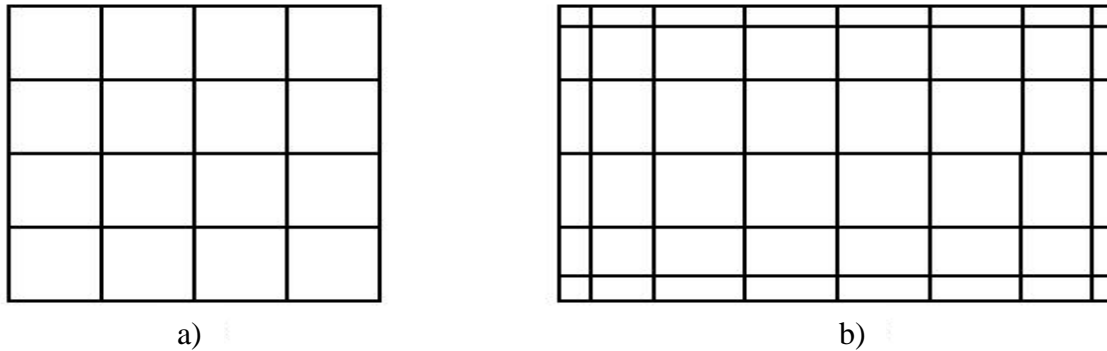


Figura 2.3: Geometrias das malhas de aterramento.

As malhas de aterramento tiveram origem com a necessidade de se obter superfícies sobre as quais as pessoas pudessem andar sem sofrer com riscos causados por eventuais tensões entre os pés e as mãos. Inicialmente, o aterramento era executado apenas com hastes cravadas no solo, e conectadas por meio de cabos aos equipamentos e partes metálicas expostas ao contato humano.

Os sistemas de malhas de aterramento devem suportar as correntes que escoam para a terra. Essas podem ser, por exemplo, a corrente de curto-circuito de uma instalação, a corrente de uma descarga atmosférica, surtos de chaveamento, correntes harmônicas ou sinais diversos de alta frequência. Mesmo com essas correntes circulando pela malha, deve ser mantida uma região equipotencial na superfície do solo acima da malha e ao redor desta. Além disso, diferenças de tensão entre os pontos de aterramento devem ser evitadas para não causar correntes e tensões de modo comum entre os equipamentos conectados ao mesmo sistema de aterramento, pois essas tensões são danosas a diversos dispositivos eletrônicos.

2.3.2 Parâmetros das malhas

Para analisar uma malha de aterramento são necessários vários parâmetros:

- Parâmetros do solo;
- Parâmetros geométricos;
- Sinal de perturbação.

Os parâmetros do solo são a resistividade elétrica aparente do solo ρ , a permissividade elétrica ϵ_r e a permeabilidade magnética μ_r . A resistividade aparente é obtida a partir da estratificação do solo, que pode ser feita com a ajuda de um terrômetro. A permissividade elétrica e a permeabilidade magnética podem ser medidas em laboratório a partir de uma amostra do solo ou obtidas na literatura.

Os parâmetros geométricos são a bitola do cabo a ser usado na malha, a profundidade dos cabos da malha p e a forma geométrica da malha.

O sinal de perturbação é a corrente ou tensão aplicada à malha devido a uma descarga atmosférica, surtos de chaveamento, correntes harmônicas, etc.

2.4 Tensão de toque e tensão de passo

As tensões de passo e de toque surgem entre os pés de uma pessoa ou entre os pés e uma parte do corpo (geralmente a mão e o pé), respectivamente.

A Figura 2.4.a mostra uma pessoa submetida a uma tensão de contato ou toque. A corrente que atravessa o corpo humano é a responsável pelos danos que acontecem no coração e em outras partes do corpo, dependendo de sua intensidade, podem levar a pessoa à morte [8]. O valor máximo de tensão de toque a qual o corpo humano pode ficar submetido indefinidamente sobre condições estabelecidas e sem risco de vida é denominada tensão de toque limite (ver tabela anexo A).

Quando uma pessoa encontra-se sobre uma malha de aterramento, é atravessada por uma determinada corrente e, nesse momento, fica submetida a uma tensão de passo entre os dois pés, conforme é mostrado na Figura 2.4.b [8]. No anexo B se mostra o valor máximo da tensão de passo para diferentes tempos.

As construções de instalações elétricas devem ser feitas levando-se em consideração o surgimento de tensões de toque e de passo suportáveis pelas pessoas que transitarão sobre a superfície compreendida pela malha de aterramento.

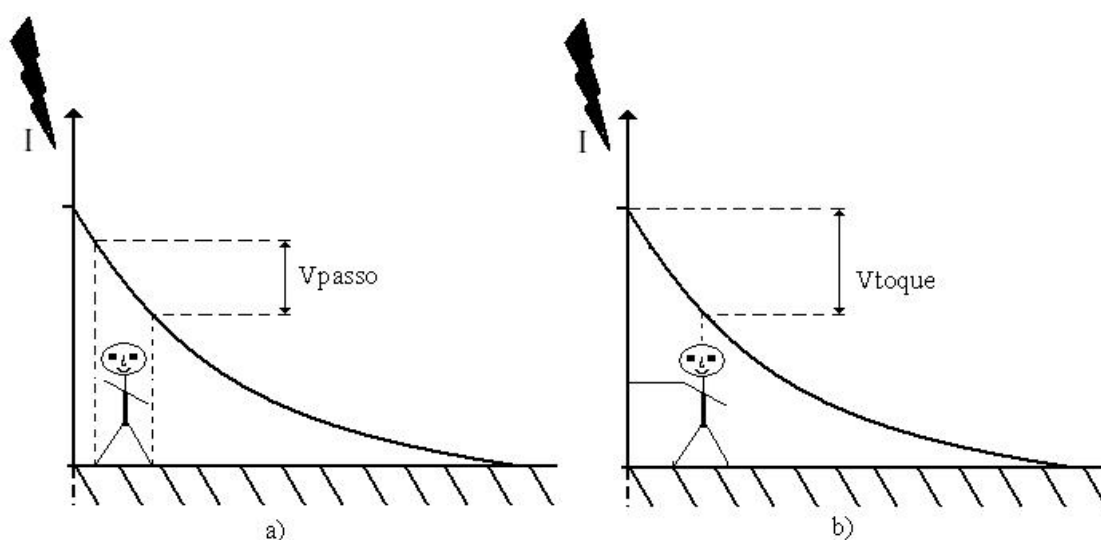


Figura 2.4: a) Tensão de passo e b) Tensão de toque.

No início, as malhas de aterramento eram projetadas exclusivamente para proporcionar uma tensão de passo suportável em 60 Hz e em estado estacionário. Para isto, inúmeros estudos, testes e análises de malhas operando em baixa frequência foram realizados. Procedimentos técnicos e práticos com base no eletromagnetismo aplicado e nas observações levaram ao surgimento de processos matemáticos e computacionais para o levantamento das tensões de passo e de toque para diversos tipos de malhas. Essas malhas poderiam ser instaladas em solos com características diversas.

Com o avanço das técnicas numéricas e a capacidade de armazenamento dos computadores, vários algoritmos foram escritos objetivando o refino da análise de tensões

de passo e de toque geradas por correntes em malhas de aterramento. Esta evolução permitiu um melhor rendimento das instalações elétricas com um menor índice de falhas e de choque elétricos.

Apesar destes progressos, vários aspectos ainda não podiam ser analisados e eliminados, sendo estes os responsáveis por falhas no sistema elétrico e por choques, além disso, os equipamentos e dispositivos elétricos se tornam cada vez mais sensíveis e vulneráveis a estes problemas. O MTBF (índice médio entre falhas) necessita cada vez mais ser reduzido para permitir uma maior qualidade e continuidade do fornecimento de serviços.

A evolução das técnicas feitas até então tratavam apenas as baixas frequências, isto é 60Hz. Quando os efeitos transitórios estavam presentes, não se tinha idéia do que poderia acontecer. Isto resultou e resulta em diversas falhas, choques elétricos e queima de equipamentos e placas de circuito impresso, além de perdas de dados.

Apesar das técnicas ainda não estarem totalmente desenvolvidas, as pesquisas sobre o assunto começaram há várias décadas. Estas visam, principalmente, abordar a questão dos transitórios nas malhas de aterramento.

2.5 Transitórios

Os transitórios em malha de aterramento podem ocorrer, por exemplo, durante uma descarga atmosférica, início de um curto-circuito ou quando uma corrente qualquer é injetada na malha. Nesse sentido, as pesquisas evoluíram para analisar as altas frequências presente nas malhas de aterramento.

Programas computacionais com grande sofisticação começam a aparecer em diversas frentes, visando tratar de uma forma mais adequada a questão das tensões de passo e de toque transitórias. Estes também têm permitido analisar tensões e corrente de modo comum. A Figura 2.5 ilustra dois equipamentos conectados a uma mesma malha e se comunicando entre si, a tensão de modo comum aparece nesta linha de comunicação devido ao desbalanço de tensão na malha.

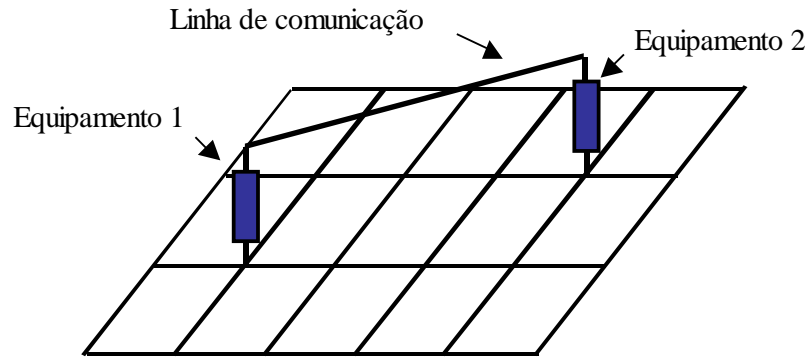


Figura 2.5: Representação de equipamentos conectados a uma malha de aterramento.

Quando uma corrente de alta frequência, por exemplo, a corrente de uma descarga atmosférica, é injetada na malha de aterramento, a mesma se comporta como uma impedância, ou seja, além da resistência da malha temos de considerar as componentes indutivas e capacitivas.

2.6 Ionização do solo

Altas correntes impulsivas associadas às descargas atmosféricas são capazes de produzir o fenômeno chamado de ionização do solo. Essas correntes circulam pelos cabos e hastes da malha de aterramento criando um campo elétrico muito elevado o que provoca uma série de arcos elétricos dos cabos e hastes para o solo, tornando de certa forma, o solo em torno do sistema de aterramento um bom condutor.

Pesquisadores de todo o mundo investigaram esse assunto durante anos e duas linhas de pesquisas merecem destaque:

- Aproximação geométrica: Assume um aumento na superfície do eletrodo para justificar a redução da impedância;
- Aproximação física: Assume um comportamento dinâmico da resistividade do solo ao redor do eletrodo para considerar a redução da impedância de aterramento.

GAO Yanqin [9], [10] usa a aproximação geométrica e considera como se o raio do eletrodo aterrado se incrementa quando o solo fica ionizado (Figura 2.6); esse raio é variável no tempo de acordo com a variação da corrente injetada no sistema de aterramento.

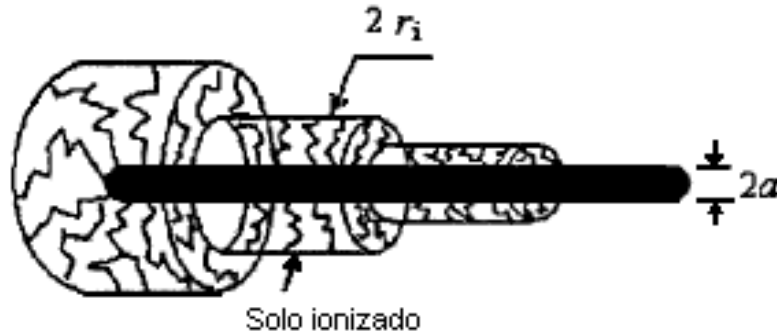


Figura 2.6: Modelo de raio equivalente considerando a ionização do solo [9].

Na figura acima r_i é o raio do segmento de condutor com o solo ionizado e a é o raio do condutor sem o fenômeno de ionização.

Para determinar o raio quando o solo fica ionizado [9], [10], usa a seguinte equação:

$$J_i = \frac{E_0}{\rho} = \frac{\Delta i_i}{2\pi r_i \Delta l} \quad (2.1.a)$$

ou

$$r_i = \frac{\rho \Delta i_i}{2E_0 \pi \Delta l} \quad (2.1.b)$$

onde E_0 é o valor crítico de campo elétrico, J_i é a densidade de corrente, Δi_i é a dissipação de corrente para a terra e Δl é o comprimento do segmento considerado.

Y Liu [11] utiliza a mesma equação de [9] e [10] para determinar o raio do condutor para cada segmento do eletrodo vertical ou horizontal, exceto para os segmentos da ponta do eletrodo vertical, que usa a equação (2.1c).

$$r_i = \frac{1}{2} \left(-\Delta l + \sqrt{\Delta l^2 + \frac{2\rho \cdot \Delta i_i}{\pi E_0}} \right) \quad (2.1.c)$$

Um aumento fictício do raio do condutor quando o solo fica ionizado provoca um aumento da condutância e capacitância do segmento e, conseqüentemente, uma diminuição da impedância de aterramento o que diminui as tensões transitórias na malha ou sistema de aterramento.

Por outro lado, Y Liu [11] também usou a aproximação física e fez um estudo diminuindo a resistividade do solo na região de ionização em torno de 7 %.

Para comparar os dois enfoques, Y Liu [11] simulou um caso mostrando que quando se usa uma diminuição de 7 % na resistividade, a tensão transitória é 45 % menor quando comparada com a diminuição do raio do condutor no caso estudado. Mais estudos devem ser feitos com este enfoque, sobretudo para altas resistividade do solo, para melhor elucidar este tipo de comportamento.

No trabalho proposto, este efeito não foi considerado nas simulações computacionais, prevalecendo a característica linear e isotrópica dos parâmetros do solo. Entretanto, se considerado nas simulações, este fenômeno seria benéfico para o sistema de aterramento, pois a dissipação de corrente seria maior com o valor da impedância sendo inferior quando comparada com o mesmo valor sem considerar esse fenômeno.

2.7 Métodos numéricos para modelar sistemas de aterramento

Desde os anos 1980, a capacidade de processamento e a velocidade de processamento dos computadores têm aumentado consideravelmente. Isto acelerou muitos campos da ciência e da engenharia aumentando a capacidade de resolução de problemas baseados em complexos métodos numéricos. A modelagem do comportamento de sistemas de aterramento sobre a influência de fenômenos transitórios rápidos tais como descargas atmosféricas, teve uma significativa melhora, pois:

- Os modelos se baseiam em diversas suposições a fim de chegar em equações simples;
- Complexos sistemas de aterramento podem ser modelados facilmente devido à grande memória e velocidade dos computadores.

Os métodos mais conhecidos na modelagem de sistemas de aterramento são:

- Método do circuito;
- Método do campo eletromagnético;
- Método híbrido;
- Método das linhas de transmissão.

2.7.1 Método do circuito

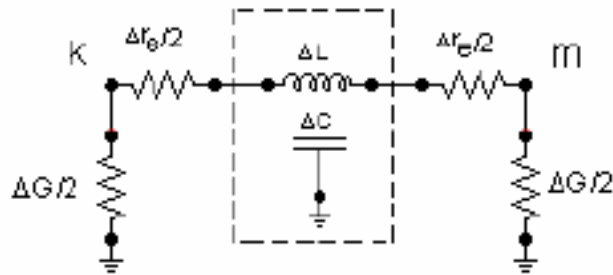
Um dos métodos numéricos usados para o estudo dos transitórios em sistemas de aterramento com geometria complexa é o método do circuito.

Os principais passos deste método são:

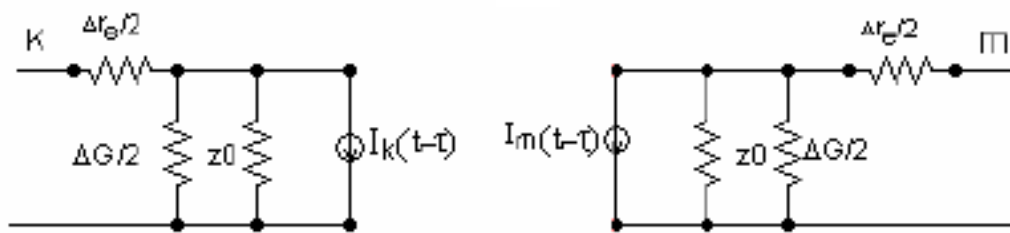
- Dividir o sistema de aterramento em vários segmentos finitos;
- Criar um circuito equivalente e determinar os seguintes parâmetros: indutância própria e mútua, capacitância, condutância e resistência interna;

- Resolver as equações dos nós do circuito equivalente que representa o sistema de aterramento, usando as leis de Kirchoff. As equações dos nós podem ser apresentadas em diferentes formas dependendo do circuito equivalente adotado na representação do sistema de aterramento.

O método do circuito para a análise do transitório em sistemas de aterramento foi desenvolvido por Meliopoulos et.al. em 1983 [12]. O mesmo utiliza os parâmetros de cada segmento ($\Delta G, \Delta C, \Delta L$ e Δr_e) de forma independente da frequência. A parte mais interessante desse trabalho é que cada segmento condutor é substituído por uma linha de transmissão com perdas e duas condutâncias, conforme a Figura (2.7.a).



2.7.a



2.7.b

Figura 2.7: Circuito equivalente de cada segmento, Meliopoulos et.al [12].

O equacionamento do circuito apresentado na Figura 2.7 é dado por (2.2)

$$[Y][V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t, \dots)] \quad (2.2)$$

Na equação (2.2) $[Y]$ é a matriz admitância do circuito equivalente, $[V(t)]$ é o vetor de tensão para um tempo t , $[I_s(t)]$ é o vetor das correntes injetadas nos nós do circuito equivalente e $[b(t - \Delta t, \dots)]$ é o histórico do vetor de corrente.

Em 1998, Romamoorthy et al. [13] desenvolveram o método do circuito simplificado para a malha de aterramento. Nessa aproximação, depois de dividir todo o sistema de aterramento em n segmentos, cada um destes é modelado como um laço com indutância própria e mútua (ΔL) e condutância própria e mútua (ΔG), como mostra a Figura (2.8). O sistema de equações dos nós para o circuito equivalente do sistema de aterramento pode ser escrito como:

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1}[V] \right\} \quad (2.3)$$

Na equação (2.3): $[V]$ é o vetor de tensão, $[I_s]$ é vetor das correntes injetadas, $[G]$ é a matriz condutância e $[L]$ é a matriz indutância. Mesmo não considerando o acoplamento capacitivo, este modelo é satisfatório para analisar transitórios em sistemas de aterramento localizados em solos com baixa resistividade.

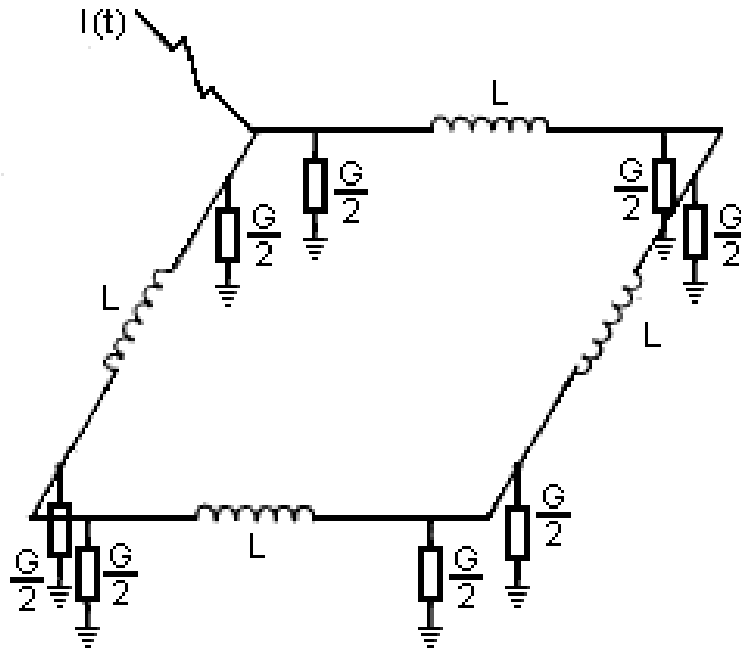


Figura 2.8: Circuito equivalente de um quadriculado da malha de aterramento [13].

Em 1999, duas modificações no método do circuito, baseadas no trabalho de Meliopoulos [12], foram publicadas por Geri [14] e por Otero [15], [16] respectivamente, onde ambos incluem o fenômeno da ionização do solo no modelo.

Geri [14] usa um circuito diferente para representar cada segmento do condutor de aterramento, ao invés da linha de transmissão com perdas combinada com a condutância, simula cada dipolo indutivo e capacitivo como sendo uma condutância ligada em paralelo com um gerador de corrente ideal e a indutância mútua como sendo uma fonte de corrente de tensão controlada, conforme é mostrado na Figura (2.9).

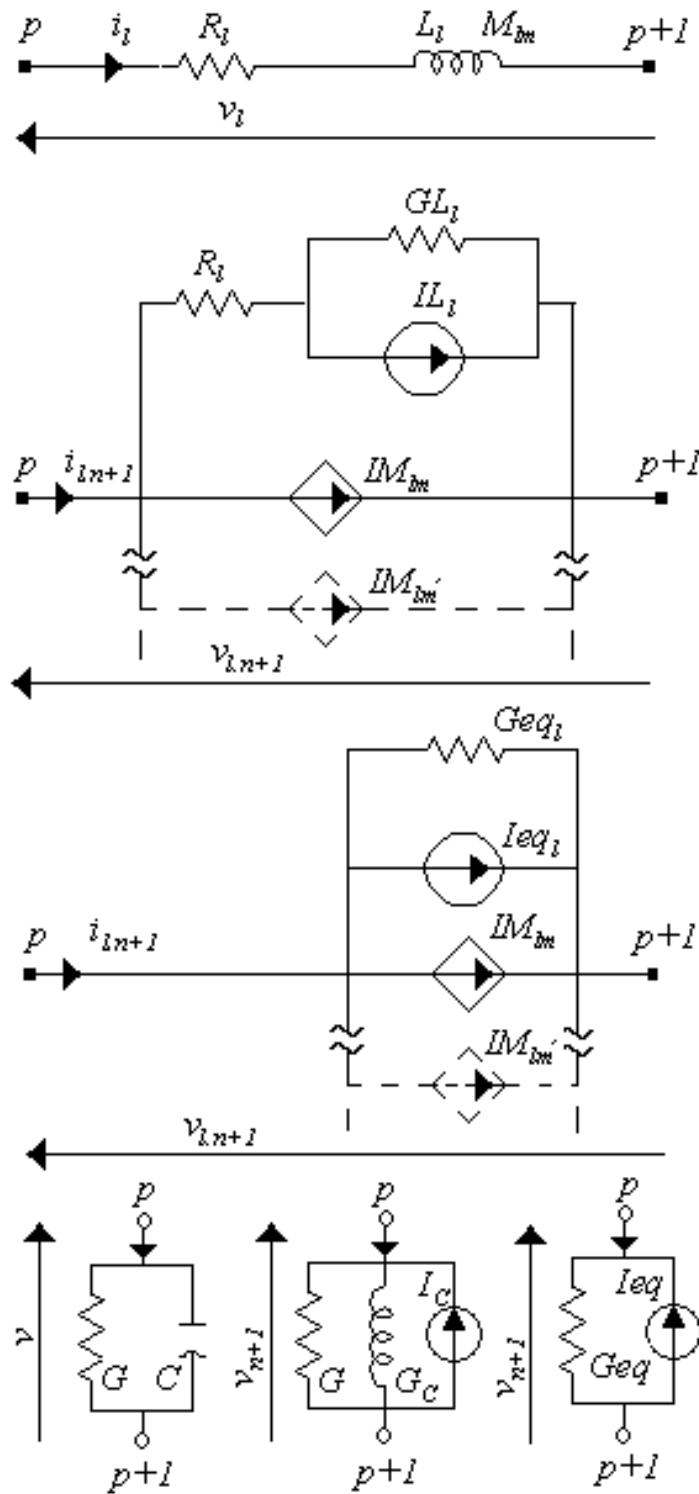


Figura 2.9: Circuito equivalente para dipolos indutivos e capacitivos propostos por Geri [14].

Aplicando o teorema de Norton, o circuito equivalente para cada segmento do sistema de aterramento assume a estrutura mostrada na Figura (2.10).

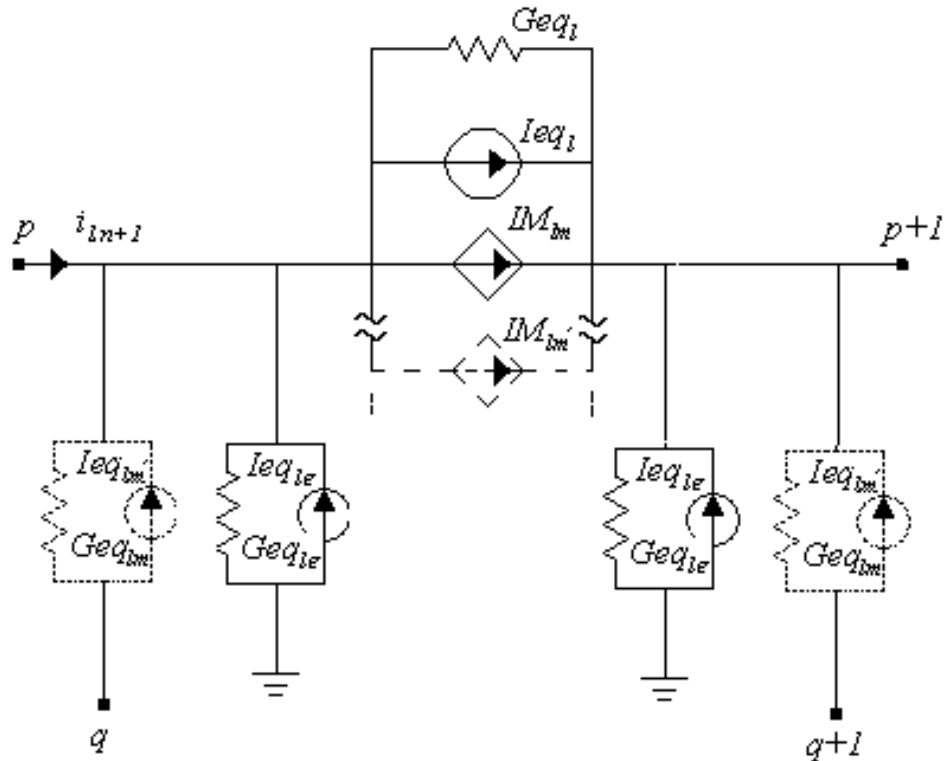


Figura 2.10: Circuito equivalente proposto por Geri [14].

O circuito equivalente do sistema de aterramento apresentado por Otero et.al. [15], [16] é mostrado na Figura (2.11). A equação para a solução deste circuito é obtida segundo (2.4), a mesma é resolvida no domínio da frequência e é, provavelmente, a primeira tentativa de análise de sistemas de aterramento no domínio da frequência baseada na teoria do circuito.

$$[I_s] = [K]^t \cdot [G] \cdot [K] \cdot [V] + [Y] \cdot [V] \quad (2.4)$$

onde $[V_{ave}] = [K] \cdot [V]$

Em (2.4), $[I_s]$ é o vetor da fonte de corrente externa, $[K]$ é a matriz constante, que relaciona o vetor coluna $[V_{ave}]$ com o vetor coluna de tensão no nó $[V]$. $[G]$ é a matriz que inclui o efeito capacitivo e indutivo e $[Y]$ é a matriz admitância do circuito, que inclui o efeito resistivo e indutivo.

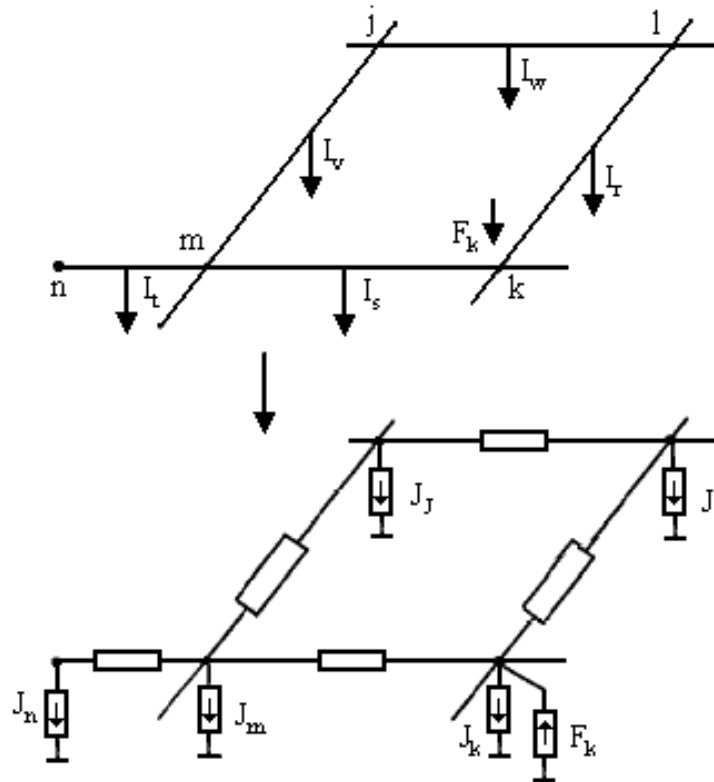


Figura 2.11: Circuito equivalente do sistema de aterramento proposto por Otero [15].

O método do circuito torna a análise do comportamento transitório complexo do sistema de aterramento em uma simples análise do circuito equivalente. Além disso, é possível incorporar o fenômeno de ionização do solo e, também, o acoplamento mútuo entre os condutores aterrados.

2.7.2 Método do campo eletromagnético

O método do campo eletromagnético é o mais rigoroso com relação à modelagem do comportamento transitório de sistemas de aterramentos. O método utiliza as equações de Maxwell com poucas aproximações. Esse método pode ser implementado usando o método dos momentos (MoM) ou de elementos finitos.

O modelo para o estudo do comportamento de transitórios em sistemas de aterramentos baseado no MoM foi desenvolvido por Grcev [17], [18], [19], [20]. Este método parte da equação integral de Maxwell do campo elétrico, conforme (2.5a) e (2.5b).

$$E^s = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \left(\nabla\nabla - \gamma^2 \right) \int_1 t' \cdot I_1(r') G_n(r, r') dl \quad (2.5.a)$$

$$G_n(r, r') = G_1(r, r') + G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (2.5.b)$$

onde: E^s é o campo elétrico total disperso ao longo da superfície do condutor, $t' \cdot I_1(r')$ é a corrente fluindo através do condutor, $\hat{\epsilon} = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ é a permissividade complexa do meio e $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$ é a constante de propagação da onda no meio, σ , ϵ e μ são a condutividade, a permissividade e a permeabilidade, respectivamente. $G_n(r, r')$ é a função completa de Green. $G_1(r, r')$ e $G_i(r, r')$ são as funções dyadic de Green para o campo elétrico em r devido ao elemento infinitesimal e a sua imagem e $G_s(r, r')$ é o termo de correção para a interface ar-solo.

A condição de contorno é obtida fazendo-se o campo elétrico longitudinal total na superfície do condutor aterrado satisfazer a equação (2.6)

$$t \cdot (E^i + E^s) = IZ_s \Delta l \quad (2.6)$$

Na equação (2.6), E^i é o campo elétrico incidente e Z_s é a impedância interna série do condutor por unidade de comprimento.

Quando a fonte de corrente para cada segmento do sistema de aterramento é conhecida, o campo elétrico entorno do sistema de aterramento e a perda de corrente do segmento do condutor de aterramento para o solo, podem ser facilmente determinados. O potencial para diferentes pontos da superfície do condutor de aterramento pode ser calculado por integração do campo elétrico normal do ponto à superfície da terra.

O método do campo eletromagnético baseado no método dos momentos resolve as equações de Maxwell no domínio da frequência e utiliza poucas aproximações, resultando ser muito eficiente.

Algumas desvantagens deste método são, complexidade de implementação e elevados tempos de processamento para sistemas de aterramento muito grande. Por causa do procedimento de solução no domínio da frequência não pode ser modificado facilmente para incluir as não linearidades devido à ionização do solo.

Outra aproximação do método do campo eletromagnético para a análise dos transitórios em sistemas de aterramentos foi desenvolvida por Nekhoul et.al. [21], [22]. O modelo parte das equações elétricas ou magnéticas da energia, que envolve equações de Maxwell diferenciais parciais com respeito ao potencial vetorial (A) e ao potencial escalar (V) em diferentes domínios/volumes do sistema. Este método é implementado usando o método de elementos finitos (FEM) baseando a sua solução no princípio físico de minimizar a energia no sistema. As equações obtidas são apresentadas em (2.7.a) e (2.7.b) para o campo no solo e (2.7.c) para o campo no ar.

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) (\nabla \times \vec{A}) + (\sigma_{\text{soil}} + j\omega \epsilon_{\text{soil}}) (j\omega \vec{W} \vec{A} + \vec{W} \cdot \nabla V) d\Omega = 0 \quad (2.7.a)$$

$$\int_{\Omega} (\sigma_{\text{soil}} + j\omega\epsilon_{\text{soil}}) \nabla w \cdot (j\omega \vec{A} + \nabla V) d\Omega = 0 \quad (2.7.b)$$

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times w) (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) (\nabla \times \vec{A}) d\Omega = 0 \quad (2.7.c)$$

Para resolver o problema numérico das equações apresentadas anteriormente, estas são transformadas em equações lineares, dividindo todo o sistema em n volumes ou pequenos elementos. A dificuldade desta aproximação está em encontrar as corretas condições de contorno nas fronteiras com o ar e com a terra, usando a transformação espacial [23], [24], o qual diminui o tamanho do problema. A vantagem principal desta aproximação baseada no método de elementos finito, é que a discretização do problema no domínio geométrico ou do meio pode ser altamente flexível com relação aos elementos não uniformes que descrevem formas complexas. Essa é a razão pela qual pode-se incluir o fenômeno de ionização do solo neste modelo [22].

2.7.3 Método híbrido

O método híbrido usado na análise de transitórios de sistemas de aterramento foi iniciado por Dawalibi em 1986 [25], [26] e, mais tarde modificado por Andolfato et.al. [27] em 2000. A palavra híbrido significa que este método é uma combinação do método do campo eletromagnético e do método do circuito.

Todo o sistema de aterramento deve ser dividido em um numero n de segmentos infinitesimais. O campo elétrico em um ponto é definido por (2.8), o qual é derivado das equações de Maxwell.

$$\vec{E} = -\text{grad}V - j\omega \vec{A} \quad (2.8)$$

Em (2.8), \vec{A} é o potencial vetorial e V é o potencial escalar. Ao longo de cada segmento k , a equação (2.8) pode se transformar na equação (2.9).

$$Z_{sk} I_k + \sum_{i=1}^n (V_{ave_k} - V_{ave_i}) + j\omega \sum_{i=1}^n \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl = 0 \quad (2.9)$$

Em (2.9), Z_{sk} é a impedância série interna do segmento do condutor k , o qual inclui o efeito skin. V_{ave_k} e V_{ave_i} são os potenciais dos segmento k e i , respectivamente. Andolfato et.al. [27] detalharam:

$V_{ik} = V_{ave_k} - V_{ave_i}$ é devido ao acoplamento capacitivo

e

$j\omega \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl$ é devido ao acoplamento indutivo

desta forma a equação (2.9) pode ser reescrita como (2.10).

$$Z_{sk} I_k + \sum_{i=1}^n (C-G)_{ik} I_{lik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik} I_i = 0 \quad (2.10)$$

A equação (2.10) está na forma de uma equação de circuito, entretanto, os componentes de acoplamento capacitivo e indutivo são determinados por uma rigorosa análise do campo eletromagnético, conforme (2.11.a) e (2.11.b).

$$j\omega L_{ik} = \frac{j\omega}{I_i} \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl \quad (2.11.a)$$

$$(C - G)_{ik} = \frac{V_{ik}}{I_{\perp ik}} = \frac{1}{4\pi\sigma_{\text{soil}} l_i} \int \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl + \zeta \cdot \frac{1}{4\pi\sigma_{\text{soil}} l'_i} \int \frac{e^{-\gamma r'}}{r'} dl' \quad (2.11.b)$$

Em (2.11.a) e (2.11.b), \vec{A}_{ik} é o vetor potencial no segmento k devido à fonte de corrente no segmento i , l_i e l'_i são os comprimentos dos segmentos i e de sua imagem i' , respectivamente, I_i é a corrente que flui ao longo do segmento i , $I_{\perp ik}$ é a dissipação de corrente do segmento i para k através do solo, r e r' são as distâncias da fonte de corrente e da imagem ao ponto onde o campo é calculado, respectivamente, $\sigma_{\text{soil}} = \sigma_{\text{soil}} + j\omega\epsilon_{\text{soil}}$ é condutividade complexa do solo, $\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_{\text{soil}} + j\omega\epsilon_{\text{soil}})}$ é a constante de propagação e ζ é o coeficiente de reflexão capacitivo.

A vantagem do método híbrido é a inclusão da influência na impedância interna série das componentes indutivas e componentes capacitivas, o que torna mais exato o método quando comparado com o método do circuito convencional, especialmente, quando a frequência da fonte de injeção é elevada.

2.7.4 Método da linha de transmissão

O método das linhas de transmissão foi o primeiro método usado na simulação do comportamento transitório de sistemas de aterramento.

Verma et al. [28], Mazzetti et al. [29] e Velazquez et al.[30] aplicaram o conceito de linhas de transmissão em um condutor de aterramento horizontal, o qual é descrito pelas equações do telegrafista (2.12.a) e (2.12.b).

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + r_e I = 0 \quad (2.12.a)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial t} + GV = 0 \quad (2.12.b)$$

A solução das equações (2.12.a) e (2.12.b), descreve analiticamente a distribuição de corrente e tensão ao longo do condutor de aterramento.

Mais tarde, Lorentzou et al. [31] parte das mesmas equações do telegrafista (2.12.a) e (2.12.b), mas derivando a equação de distribuição de corrente e de tensão no condutor de aterramento diretamente no domínio do tempo.

Menter e Grcev [32] fizeram uma análise do método da linha de transmissão em sistemas de aterramento usando as equações da linha de transmissão dependentes da frequência (2.13.a) e (2.13.b), onde a impedância longitudinal $Z(\Gamma)$ e admitância transversal $Y(\Gamma)$ variam com a frequência segundo (2.13.c) e (2.13.d).

$$\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad (2.13.a)$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad (2.13.b)$$

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma_{\text{soil}} + i\omega\epsilon_{\text{soil}})} \log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right) \right]^{-1} \quad (2.13.c)$$

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1.85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}} \quad (2.13.d)$$

Menter et al. [32] combinaram o modelo da linha de transmissão para cabos contrapeso com outras partes de uma subestação de 123 kV usando EMTP.

Marcos André [33] fez um estudo do comportamento transitório de sistemas de aterramentos usando o método da linha de transmissão. Neste estudo os efeitos encontrados nas linhas de transmissão como: efeito corona, pelicular e indutância mútua não foram abordados. A técnica numérica utilizada foi o método TLM (Transmission line method) [34].

Neste trabalho [33], três tipos de parâmetros para a malha de terra foram definidos, o primeiro referente aos cantos da malha (chamado de parâmetro L), o segundo referente à lateral da malha (chamado de parâmetro T) e os parâmetros em cruz que são os do meio da malha de aterramento. Os parâmetros obtidos relacionados com o tipo de solo e de condutor foram a condutância, indutância e capacitância para a terra. Cada nó da malha foi modelado como a junção de duas, três ou quatro linhas de transmissão com impedância $Z = \sqrt{L/C}$. O intervalo de tempo foi obtido a partir de $\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{1/\mu\epsilon}$ sendo Δx a largura da quadrícula.

O motivo pelo qual o método da linha de transmissão foi o primeiro a ser usado na modelagem do comportamento transitório de malhas de aterramento, é que, inicialmente este foi usado para simular o comportamento transitório de cabos contrapeso.

O método da linha de transmissão para a modelagem de sistemas de aterramento pode ser usado no domínio do tempo ou da frequência, similarmente ao método do circuito, também pode incluir o acoplamento mútuo entre as diferentes partes dos condutores de aterramento. Além disso, pode simular uma propagação detalhada das ondas viajando no condutor, o que é importante para estudo de grandes sistemas de aterramento. O tempo computacional requerido é muito menor quando comparado com o método do circuito ou com o método do campo eletromagnético.

2.8 Conclusões do capítulo

Com o estudo feito até aqui podemos concluir que são adotados diferentes métodos para a análise do comportamento transitório de sistemas de aterramento.

Para o uso na engenharia, os modelos para a análise de transitórios em sistemas de aterramento devem ser simples, com tempos de processamento rápidos e devem representar todas as características importantes do comportamento transitório do sistema de aterramento.

Pelo fato do método TLM pertencer ao método das linhas de transmissão, ter um equacionamento simples, tempo de processamento e precisão nos resultados aceitáveis, ele foi usado para o estudo de sistemas de aterramento apresentado neste trabalho.

Capítulo 3: Método TLM

Neste capítulo, é descrita a técnica numérica TLM, assim como, as diferentes terminações ou condições de contorno necessárias para a realização deste estudo.

Mostra-se o equacionamento necessário na determinação dos parâmetros para cabos enterrados vertical e horizontalmente, sendo os mesmos usados como dados de entrada do programa computacional proposto neste estudo de sistemas de aterramento.

Apresentam-se, ainda, os aspectos computacionais que envolvem a aplicação do método TLM, tais como: linguagem computacional, fluxograma do programa, escolha do programa para pós-processamento e visualização dos resultados.

3.1 Método TLM para uma linha de transmissão com perdas

Para exemplificar a teoria básica do método TLM, considera-se a linha de transmissão mostrada na Figura 3.1, onde são executados seccionamentos imaginários de forma a gerar a discretização [4], [34], [35], [36], [37].

O método das linhas de transmissão pode ser entendido como um conjunto de trechos de linhas onde cada segmento comporta-se como uma linha independente e, desta forma, pode ser tratado e analisado de forma independente. Este é o princípio do método numérico TLM.

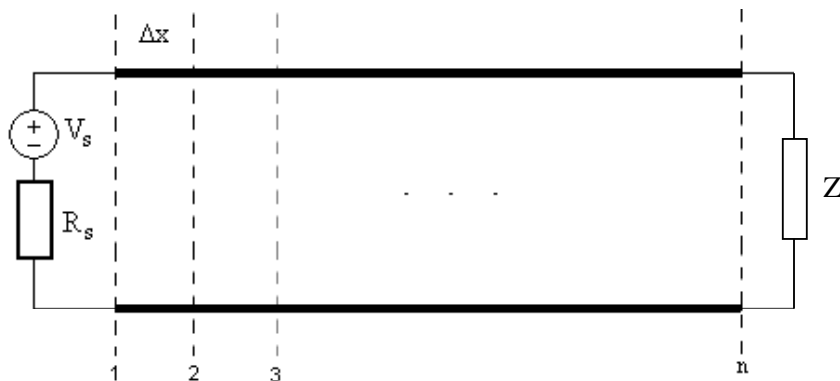


Figura 3.1: Linha de transmissão dividida em segmentos.

Na figura 3.1, tem-se:

- V_s é a fonte de tensão aplicada no início da linha;
- n é a número de segmentos nos quais a linha foi dividida;
- R_s é a resistência da fonte;
- Z é a impedância da carga;

O comprimento de cada segmento pode ser determinado por (3.1).

$$\Delta x = (\text{comprimento da linha}) / n \quad (3.1)$$

Os segmentos da linha são considerados idênticos e, de acordo com a teoria de linhas de transmissão, podem ser representados pela configuração da Figura 3.2 [34].

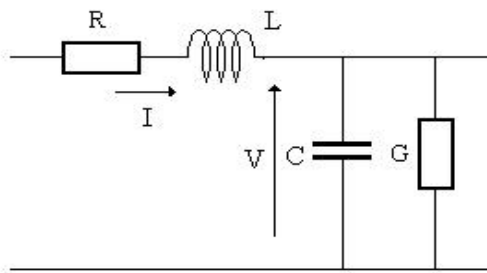


Figura 3.2: Modelo de um segmento infinitesimal da linha de transmissão usando os parâmetros R, L, C e G.

Na figura 3.2:

- R Resistência / m;
- L Indutância / m;
- C Capacitância / m;
- G condutância / m.

Esse segmento de linha de transmissão é a unidade básica para a aplicação do método TLM unidimensional. Um outro modelo pode ser utilizado substituindo a capacitância e a

indutância de cada segmento pelo valor da impedância característica da linha Z_0 definida por (3.2).

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (3.2)$$

A Figura 3.3 mostra a nova configuração do segmento usando a impedância característica.

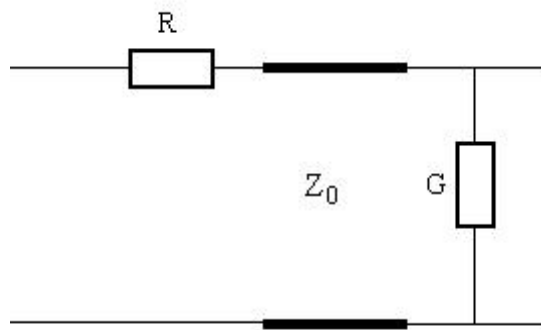


Figura 3.3: Modelo de um segmento da linha de transmissão usando a impedância característica (Z_0).

A velocidade de propagação na linha, que é a velocidade de propagação de cada segmento desde que a linha seja homogênea, é dada por (3.3).

$$v = \Delta x / \Delta t \quad (3.3)$$

O tempo de propagação em cada trecho Δx será obtido então por (3.4).

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\frac{1}{\sqrt{\frac{LC}{\Delta X^2}}}} = \sqrt{LC} \quad (3.4)$$

3.1.1 Equacionamento TLM unidimensional

Considera-se uma linha de transmissão onde a uma extremidade está conectada uma carga e a outra uma fonte de tensão. Divide-se a linha em segmentos iguais, conforme a Figura 3.1. O encontro entre duas linhas adjacentes é chamado de *nó*, na conexão entre elas é determinada a incidência e a reflexão das ondas de tensão. Os níveis de tensão e de corrente nesses nós podem ser conhecidos em cada instante de tempo.

O equacionamento básico do método TLM utilizado para representar sinais de tensão e corrente viajando ao longo de uma linha de transmissão é analisado cuidadosamente no esquema da Figura 3.4 [34].

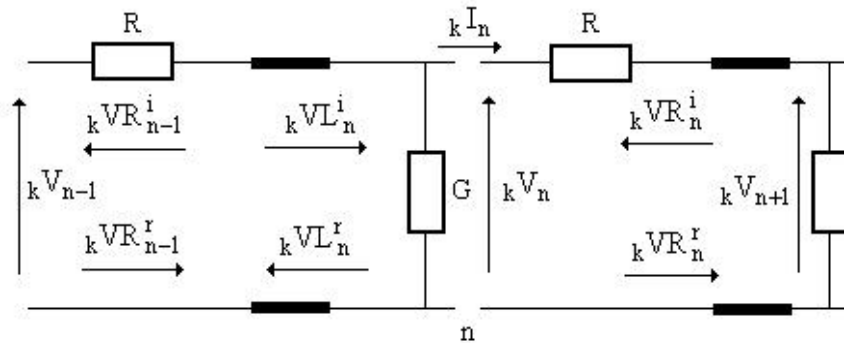


Figura 3.4: Tensões incidentes e refletidas sobre um nó n .

Na figura 3.4:

- V tensão viajando na linha;
- I corrente viajando na linha;
- k instante de tempo;
- n nó considerado;
- i / r incidente / refletida;
- L / R esquerda / direita.

Na Figura 3.5, apresenta-se o equivalente de Thevenin da Figura 3.4 de um nó n , no qual há tensões incidentes e refletidas pelo lado esquerdo e pelo lado direito, para um determinado instante de tempo definido por k .

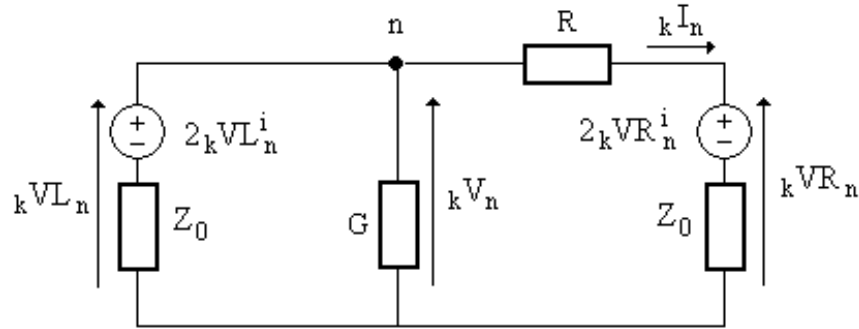


Figura 3.5: Equivalente de Thevenin da junção de dois segmentos de linhas em um nó n .

O modelo da Figura 3.5 representa um nó interno com nós vizinhos em ambos os lados, o equacionamento do circuito equivalente mostrado nessa figura é feito a seguir.

Aplicando a lei de Kirchoff das correntes no circuito da Figura 3.5 tem-se:

$$k V_n = \frac{\frac{2_k V_L_n^i}{Z_0} + \frac{2_k V_R_n^i}{Z_0 + R}}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_0 + R} + G} \quad (3.5)$$

Da mesma forma obtém-se a expressão para a corrente:

$$k I_n = \frac{k V_n - 2_k V_R_n^i}{Z_0 + R} \quad (3.6)$$

A tensão total na entrada da linha à esquerda é:

$$k V_L_n = k V_n \quad (3.7)$$

O que significa dizer que a tensão no nó “ n ” é igual à tensão à esquerda deste. Por outro lado, a tensão à direita do nó “ n ” define-se segundo a expressão (3.8).

$${}_k VR_n = 2{}_k VR_n^i + I_n Z_0 \quad (3.8)$$

As equações (3.7) e (3.8) relacionam os valores da tensão e da corrente em cada nó da linha com as tensões que incidem por ambos os lados destes.

A relação entre as tensões incidentes e refletidas pode ser obtida através da soma das parcelas incidentes e refletidas, o que determina a tensão total para ambos os lados segundo as expressões seguintes.

$${}_k VL_n = {}_k VL_n^r + {}_k VL_n^i \quad (3.9)$$

$${}_k VR_n = {}_k VR_n^r + {}_k VR_n^i \quad (3.10)$$

Isolando as respectivas tensões refletidas, obtêm-se:

$${}_k VL_n^r = {}_k VL_n - {}_k VL_n^i \quad (3.11)$$

$${}_k VR_n^r = {}_k VR_n - {}_k VR_n^i \quad (3.12)$$

A tensão que reflete em um determinado nó atinge o nó adjacente após um intervalo de tempo Δt . Dessa forma, tornando o processo iterativo, as novas tensões incidentes serão:

$${}_{k+1} VL_n^i = {}_k VR_{n-1}^r \quad (3.13)$$

$${}_{k+1} VR_n^i = {}_k VL_{n+1}^r \quad (3.14)$$

As equações (3.5) à (3.14), descrevem as tensões e correntes dos nós internos, os quais compõem a maior parte das linhas consideradas.

As equações de tensão e corrente para nós externos são diferentes daquelas obtidas para nós internos e dependem das condições de contorno ou da terminação da linha, [4], [34], [37].

A seguir são descritas as terminações usadas neste estudo.

- Terminação em fonte de excitação (V_s);
- Terminação em carga indutiva (Z_L);
- Terminação em carga resistiva (R_t);
- Terminação em mais de uma linha.

3.1.2 Terminações das linhas

Terminação em fonte de excitação.

O equacionamento relativo a uma fonte de tensão (excitação) conectada ao primeiro segmento da linha, constituindo o primeiro nó, tem localizado ao seu lado direito o equivalente relativo à linha e, ao seu lado esquerdo, o equivalente da fonte com sua resistência interna. A Figura 3.6 apresenta o equivalente de Thevenin para uma fonte de excitação conectada ao primeiro nó da linha.

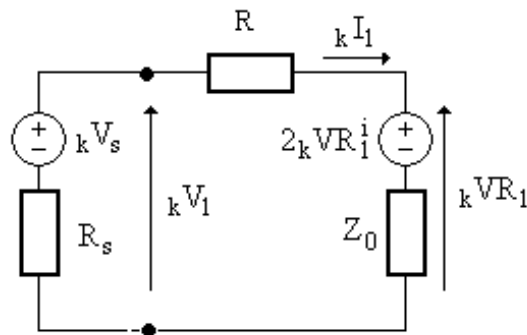


Figura 3.6: Equivalente de Thevenin para o primeiro nó conectado à fonte de excitação.

O procedimento para o equacionamento deste primeiro nó segue os mesmos passos que para os nós localizados na porção central da linha de transmissão.

Considerando V_s como sendo a tensão interna da fonte, as equações da tensão e corrente para o primeiro nó, bem como as tensões incidentes e tensões refletidas, são dadas por:

$${}_k V_1 = \frac{\frac{{}_k V_s}{R_s} + \frac{2{}_k VR_1^i}{Z_0 + R}}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{Z_0 + R}} \quad (3.15)$$

$${}_k I_1 = \frac{{}_k V_1 - 2{}_k VR_1^i}{Z_0 + R} \quad (3.16)$$

$${}_k VR_1 = 2{}_k VR_1^i + {}_k I_1 Z_0 \quad (3.17)$$

$${}_k VR_1^r = {}_k VR_1 - {}_k VR_1^i \quad (3.18)$$

$${}_{k+1} VR_1^i = {}_k VL_2^r \quad (3.19)$$

Terminação em carga indutiva.

Para a análise da terminação em carga indutiva, o mesmo procedimento de cálculo será repetido. Um tratamento especial deve ser dado à carga, conforme apresentado na Figura 3.7.

As indutâncias e capacitâncias presentes na linha devem ser modeladas para que possam participar do equacionamento do método, ou seja, tais elementos são substituídos por modelos de linhas de transmissão [34].

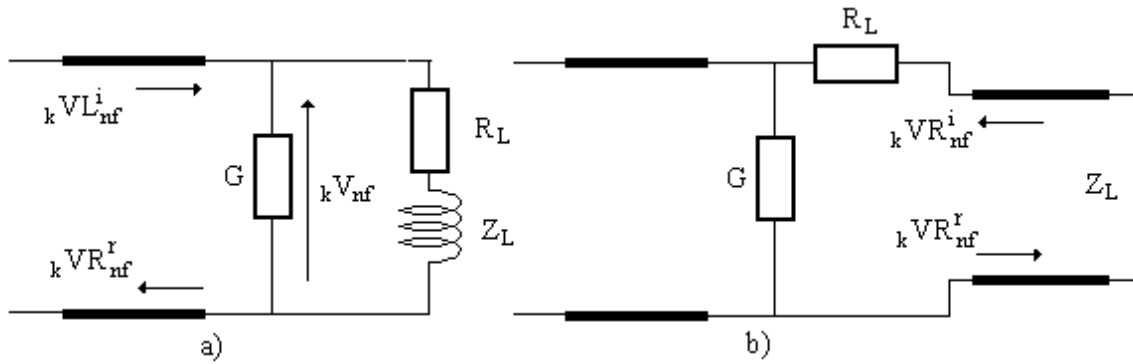


Figura 3.7: Extremidade da linha conectada à carga indutiva (último nó da linha).

Na Figura 3.7.a, pode-se verificar a ligação da linha à carga e, na Figura 3.7.b, o modelo substituindo a indutância presente na carga por o modelo de linha de transmissão. Este modelo é uma derivação da linha de transmissão, sendo que a onda deve penetrar e retornar num tempo total igual a Δt [34].

O equivalente de Thevenin para esta terminação é apresentado na Figura 3.8, onde Z_L representa a impedância da carga.

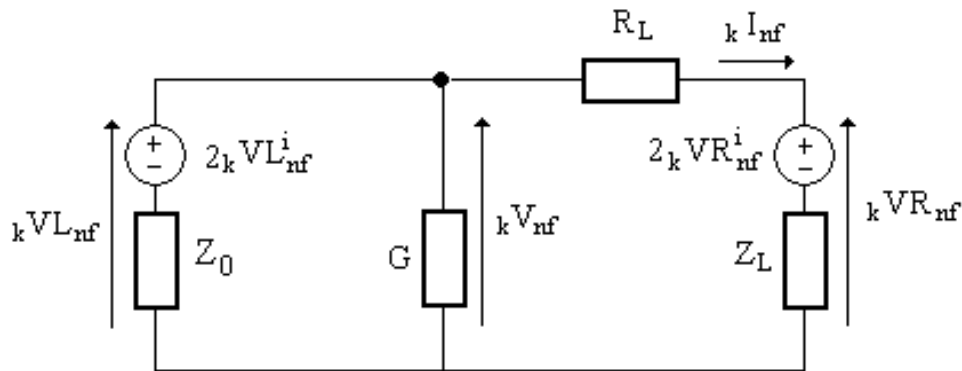


Figura 3.8: Equivalente de Thevenin da extremidade da linha conectada à carga indutiva.

As equações da tensão e da corrente no último nó, assim como, as tensões incidentes e refletidas são:

$${}^k V_{nf} = \frac{\frac{2 {}^k V L_{nf}^i}{Z_0} + \frac{2 {}^k V R_{nf}^i}{Z_L + R_L}}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_L + R_L} + G} \quad (3.20)$$

$${}^k I_{nf} = \frac{{}^k V_{nf} - 2 {}^k V R_{nf}^i}{Z_L + R_L} \quad (3.21)$$

$${}^k V L_{nf}^r = {}^k V L_{nf} - {}^k V L_{nf}^i \quad (3.22)$$

A relação com o instante de tempo seguinte é dada por:

$${}^{k+1} V L_{nf}^i = {}^k V R_{nf}^r \quad (3.23)$$

Ainda é necessário definir as tensões que atuam diretamente sobre a carga. Estas são definidas por:

$${}^k V R_{nf} = 2 {}^k V R_{nf}^i + {}^k I_{nf} Z_L \quad (3.24)$$

$${}^k V R_{nf}^r = {}^k V R_{nf} - {}^k V R_{nf}^i \quad (3.25)$$

A relação com o instante de tempo seguinte para essas equações é dada por:

$${}^{k+1} V R_{nf}^i = - {}^k V L_{nf}^r \quad (3.26)$$

O sinal negativo junto à tensão refletida demonstra a existência de um curto-circuito na extremidade da carga.

Terminação em carga resistiva.

Na Figura 3.9, é mostrada uma linha de transmissão com a sua extremidade conectada a uma resistência R_t , a mesma é chamada de terminação em carga resistiva. Essa permite a representação de varias configurações dependendo do valor de resistência adotado para R_t . Algumas destas são:

- $R_t = \infty$ (linha aberta)
- $R_t = 0 \Omega$ (linha em curto circuito)
- $R_t = Z_0$ (linha casada)

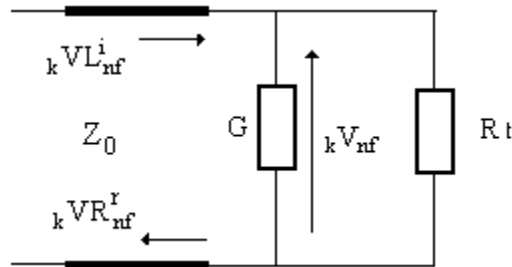


Figura 3.9: Extremidade da linha conectada à carga resistiva (último nó da linha)

A obtenção das equações do método TLM para este caso é simples, para isso partimos da Figura 3.10, que representa o equivalente de Thevenin da terminação analisada.

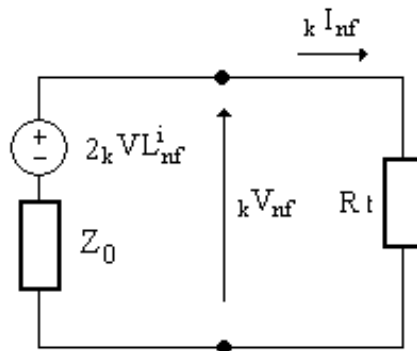


Figura 3.10: Equivalente de Thevenin da extremidade da linha conectada à carga resistiva.

Analisando a Figura 3.10, têm-se:

$${}_k I_{nf} = \frac{2 {}_k V_{nf}^i}{R_t + Z_0} \quad (3.27)$$

$${}_k V_{nf} = R_t \cdot {}_k I_{nf} \quad (3.28)$$

Tornando o processo iterativo:

$${}_k V_{nf}^r = {}_k V_{nf} - {}_k V_{nf}^i \quad (3.29)$$

$${}_{k+1} V_{nf}^i = {}_k V_{nf}^r \quad (3.30)$$

Terminação em mais de uma linha.

A terminação em mais de uma linha de transmissão pode ser representada pela Figura 3.11, que também é a configuração de um nó paralelo para o caso TLM bidimensional [34].

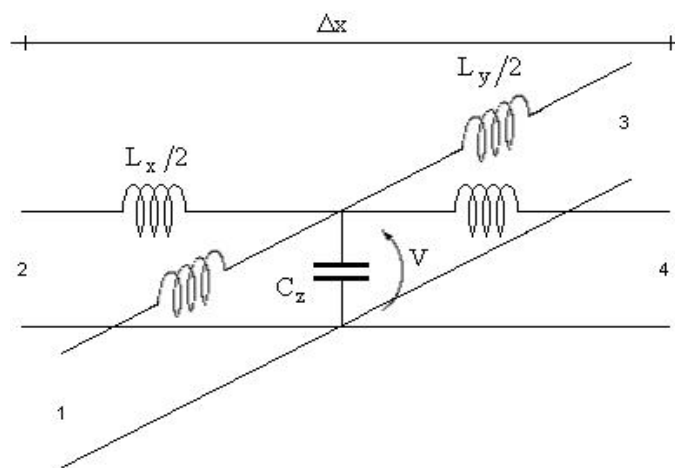


Figura 3.11: Nó paralelo com quatro linhas de transmissão conectadas a ele.

O equivalente de Thevenin do nó representado na Figura 3.11 é ilustrado na figura 3.12, que permite equacionar o contorno do método TLM para linhas de transmissão conectadas a outras linhas [4], [34], [37].

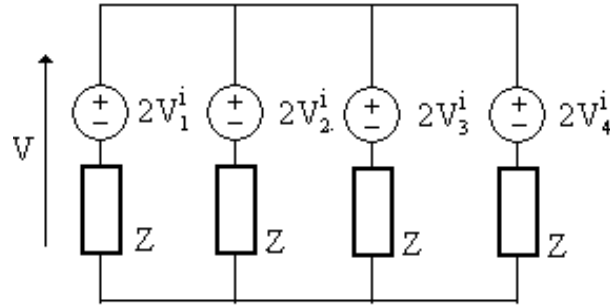


Figura 3.12: Equivalente de Thevenin para um nó paralelo com quatro linhas de transmissão conectadas a ele.

As equações obtidas a partir de este tipo de terminação são importantes para o estudo de malhas de aterramento, pois permitem uma adequada representação da conexão dos condutores da malha.

Fazendo a análise do circuito representado na Figura 3.12 (acima), obtém-se para um nó em um determinado instante de tempo:

$${}_kV = \frac{1}{2} {}_k(V_1^i + V_2^i + V_3^i + V_4^i) \quad (3.31)$$

ou

$${}_kV = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^4 {}_kV_h^i \quad (3.32)$$

onde ${}_kV$ é a tensão no nó e h representa linha conectada ao nó.

Considerando que diversos nós estão interligados formando uma malha, conforme o desenho da Figura 3.13, todas as linhas apresentando impedâncias características iguais e quatro tensões incidindo simultaneamente no nó central, as tensões chegariam ao nó central (ponto 0) e daí refletiriam e retornariam às linhas 1, 2, 3 e 4, conforme os coeficientes de

reflexão e de transmissão definidos pela impedância equivalente no nó central [34]. Estes coeficientes de reflexão e de transmissão definem o coeficiente de espalhamento do nó.

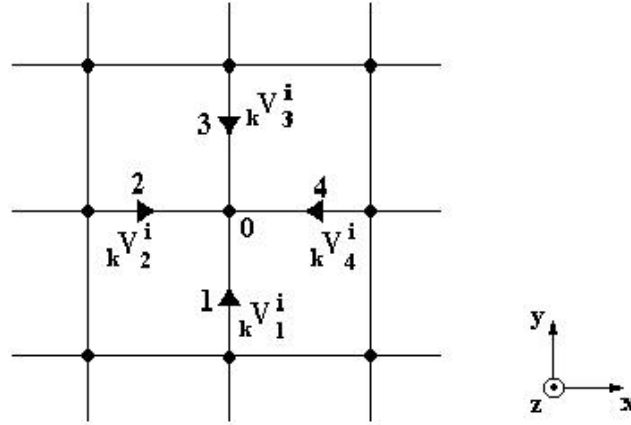


Figura 3.13: Tensão incidente em um nó paralelo.

A partir dessa condição de espalhamento, as tensões refletidas e transmitidas pelo ponto central devido a uma tensão incidente ${}_k V_1^i$, serão $-\frac{1}{2}{}_k V_1^r$, $+\frac{1}{2}{}_k V_2^r$, $+\frac{1}{2}{}_k V_3^r$ e $+\frac{1}{2}{}_k V_4^r$, repetindo-se o procedimento para as outras três tensões incidentes, pode-se concluir que a tensão total refletida para a linha 1 será dada pela superposição das diferentes tensões incidentes vindas das 4 linhas resultando na expressão (3.33).

$${}_k V_1^r = \frac{1}{2} {}_k \left(-V_1^i + V_2^i + V_3^i + V_4^i \right) \quad (3.33)$$

Escrevendo as relações das tensões refletidas e incidentes sobre o nó de forma matricial, temos:

$$\begin{bmatrix} V_1^r \\ V_2^r \\ V_3^r \\ V_4^r \end{bmatrix}_k = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^i \\ V_2^i \\ V_3^i \\ V_4^i \end{bmatrix}_k \quad (3.34)$$

A forma matricial (3.34) pode ser representada também na forma de equação:

$${}_k V_h^r = \frac{1}{2} \left(\sum_{h=1}^4 {}_k V_h^i \right) - {}_k V_h^i \quad (3.35)$$

ou

$${}_k V_h^r = {}_k V_{-k} V_h^i \quad (3.36)$$

Onde ${}_k V_h^r$ e ${}_k V_h^i$ são as tensões refletida e transmitida respectivamente para a linha h.

Para definir as tensões no momento seguinte (k+1), é necessário considerar que o tempo de propagação de uma onda, desde um nó (origem) até o nó seguinte, é Δt , ou seja, a onda incidente em um determinado nó é a onda refletida pelo nó adjacente no instante de tempo anterior (Δt é o tempo que a onda demora para percorrer Δx). Com estas considerações, é possível escrever a relação entre tensões em diferentes instantes de tempos, conforme é representado em (3.37).

$$\begin{aligned} {}_k V_1^r(x, y) &= {}_{k+1} V_3^i(x, y-1) \\ {}_k V_2^r(x, y) &= {}_{k+1} V_4^i(x-1, y) \\ {}_k V_3^r(x, y) &= {}_{k+1} V_1^i(x, y+1) \\ {}_k V_4^r(x, y) &= {}_{k+1} V_2^i(x+1, y) \end{aligned} \quad (3.37)$$

As expressões descritas em (3.37) demonstram que, se conhecidas as condições iniciais, as magnitudes de tensão e de corrente podem ser obtidas a qualquer instante de tempo $t = (k + 1)\Delta t$ através de um processo iterativo, bastando para isso que sejam determinados os valores para os instantes anteriores $t = k\Delta t$.

Uma forma genérica de representar a matriz da equação (3.34), quando as impedâncias das linhas não são iguais e para um número “m” de linhas é mostrada em (3.38) [4], [37].

$$\begin{matrix} \left[\begin{matrix} V_1^r \\ V_2^r \\ \vdots \\ V_m^r \end{matrix} \right]_k \end{matrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_p^1 - Z_1}{Z_p^1 + Z_1} & 1 - \frac{Z_2 - Z_p^2}{Z_p^2 + Z_2} & \dots & 1 - \frac{Z_m - Z_p^m}{Z_p^m + Z_m} \\ \vdots & \frac{Z_p^2 - Z_2}{Z_p^2 + Z_2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - \frac{Z_m - Z_p^m}{Z_p^m + Z_m} & \dots & \dots & \frac{Z_p^m - Z_m}{Z_p^m + Z_m} \end{bmatrix} \begin{matrix} \left[\begin{matrix} V_1^i \\ V_2^i \\ \vdots \\ V_m^i \end{matrix} \right]_k \end{matrix} \quad (3.38)$$

Onde Z_p^d é o paralelo das impedâncias pertencentes ao nó, com exceção da impedância da linha que origina a onda incidente, e “m” é o número máximo de linhas conectadas ao nó.

3.2 Determinação dos parâmetros dos cabos que compõe as malhas de aterramento

Uma malha de aterramento é formada pela interconexão de condutores dispostos na horizontal e na vertical (hastes), Figura 3.14. Estes cabos podem ser tratados como sendo linhas de transmissão e, desta forma a técnica TLM (Transmission line method), estudada em 3.1 pode ser aplicada; para isso é preciso determinar os parâmetros R, L, C e G de cada elemento infinitesimal destes cabos. Pelo fato de ser uma malha de aterramento, estes cabos estão imersos no solo, o qual apresenta parâmetros como: permissividade dielétrica ϵ_r , permeabilidade magnética μ_r e resistividade ρ . Além destes parâmetros são importantes

também os parâmetros do cabo, tais como: comprimento L , profundidade h e raio a , Figura (3.15).

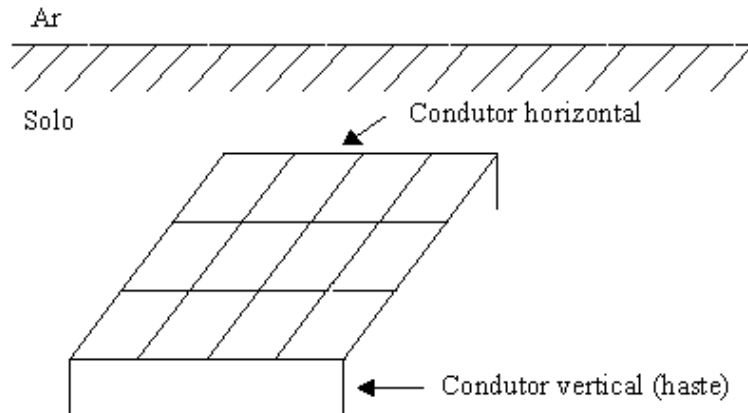


Figura 3.14: Malha de aterramento.

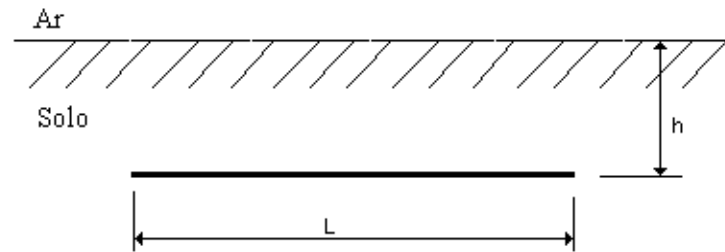


Figura 3.15: Condutor enterrado.

3.2.1 Resistência por unidade de comprimento (R)

Para um condutor com seção transversal circular, raio a e condutividade σ [S/m] a resistência por unidade de comprimento é dada por (3.39) [38]:

$$R = \frac{1}{\sigma \pi a^2} \quad [\Omega/\text{m}] \quad (3.39)$$

3.2.2 Eletrodos de aterramento horizontais

Os parâmetros L , C e G para um eletrodo de aterramento horizontal são determinados usando as equações de Sunde's [39], como se mostra a seguir.

Condutância

$$G = \frac{\pi}{\rho_{\text{solo}}} \left[\ln \frac{2L}{\sqrt{2ah}} - 1 \right]^{-1} \quad (3.40)$$

Capacitância

$$C = \pi \epsilon_{\text{solo}} \left[\ln \frac{2L}{\sqrt{2ah}} - 1 \right]^{-1} \quad (3.41)$$

Indutância

$$L = \frac{\mu_{\text{solo}}}{\pi} \left[\ln \frac{2L}{\sqrt{2ah}} - 1 \right] \quad (3.42)$$

Nas equações acima, L é o comprimento do condutor, h é a profundidade em que está enterrado, a é o raio do condutor, ρ_{solo} é a resistividade do solo, ϵ_{solo} é a permissividade do solo e μ_{solo} é a permeabilidade do solo.

3.2.3 Eletrodos de aterramento verticais (hastes)

Além dos eletrodos de aterramento horizontais, é necessária a determinação dos parâmetros L , C e G dos eletrodos verticais (hastes de aterramento).

Segundo Rüdénberg [40], a condutância de uma haste de aterramento pode ser determinada pela equação(3.43).

$$G = \frac{2\pi L}{\rho_{\text{solo}}} \left[\ln \frac{2L}{a} \right]^{-1} \quad (3.43)$$

Onde a e L são o raio e o comprimento da haste, respectivamente. A capacitância que surge em paralelo com a resistência é representada por (3.44) [4].

$$C = 2\pi\epsilon_{\text{solo}}L \left[\ln \frac{2L}{a} \right]^{-1} \quad (3.44)$$

A circulação da corrente pela haste gera um campo magnético em torno da mesma, sendo bem maior nas proximidades da haste, onde a densidade de corrente é maior. O efeito indutivo devido à corrente de fuga pode ser desprezado. A indutância própria da haste é dada pela expressão (3.45) [4].

$$L = \frac{\mu_{\text{solo}}L}{2\pi} \left[\ln \frac{2L}{a} \right] \quad (3.45)$$

3.3 Aspectos computacionais

Serão analisados os aspectos computacionais envolvidos na criação do software de simulação baseado na técnica TLM, usado para estudar sistemas de aterramento, em específico malhas de aterramento, objetivo principal deste trabalho.

Este software apresenta três etapas:

- Etapa de pré-processamento: onde se realiza a interface com o usuário para a geração de dados de entrada dependendo de cada caso estudado.
- Etapa de processamento: onde são aplicadas as equações do modelo utilizado.
- Etapa de pós-processamento: onde os resultados da etapa anterior são processados e visualizados.

A etapa que recebeu mais atenção foi a de processamento já que se trata da aplicação do método em questão. A etapa de pré-processamento foi simplificada de forma que o usuário precisa gerar os arquivos de entrada baseado na geometria e nas impedâncias das linhas. A etapa de pós-processamento contou com a aplicação do programa computacional MATLAB[®] para a simulação bidimensional e tridimensional.

A escolha da linguagem utilizada levou em conta vários critérios como a velocidade de processamento, disponibilidade e qualidade dos compiladores existentes no mercado, facilidade de programação e adaptação aos meios existentes no grupo de pesquisa.

Por todos estes critérios, a linguagem FORTRAN foi escolhida para desenvolver um programa computacional baseado no método TLM unidimensional com o objetivo de estudar tensões em malhas de aterramento submetidas à perturbações do tipo descargas atmosféricas.

3.3.1 Etapa de pré-processamento

Na etapa de pré-processamento, realiza-se a interface com o usuário para a geração dos arquivos de entrada de dados usados no programa principal, para isso foi elaborado um programa chamado de “malhador”. O mesmo cria qualquer malha de aterramento composta por quadriculas usando os seguintes dados:

- Número de nó por linha;
- Número de nó por coluna;
- Comprimento do condutor entre dois nós;
- Nó no qual será aplicada a corrente ou tensão perturbadora.

Além dos arquivos de entrada o programa principal também usa os seguintes dados:

- Parâmetros do condutor: capacitância (C), condutância (G), resistência (R);
- Forma de onda da corrente: amplitude, α e β (para ondas na forma de dupla exponencial);
- Passo de tempo (Δt).

3.3.2 Etapa de processamento

Esta etapa constitui a parte mais importante com relação à aplicação do método TLM. O programa desenvolvido para o estudo de malhas de aterramento possui o fluxograma apresentado na Figura 3.16.

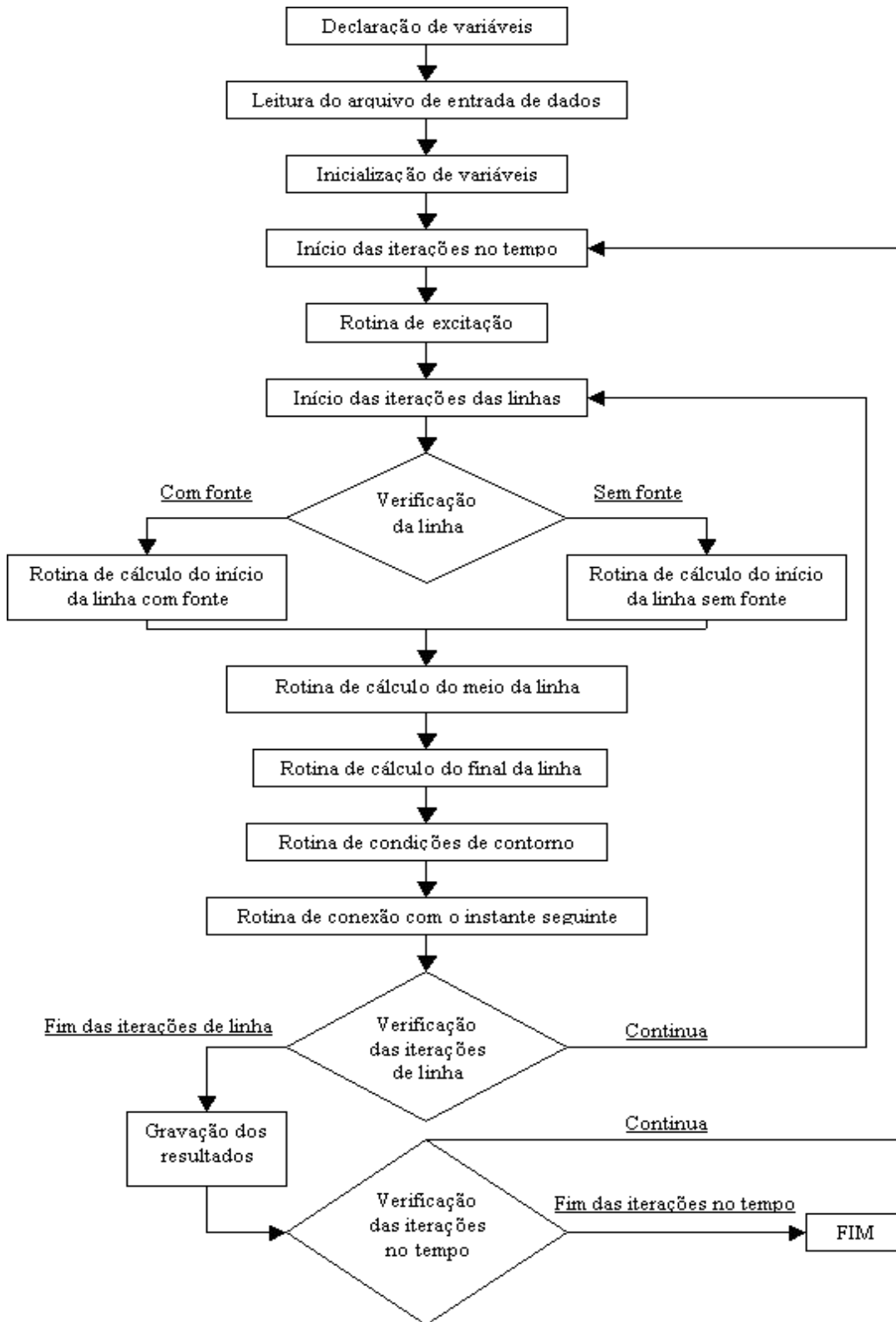


Figura 3.16: Fluxograma do programa computacional desenvolvido visando estudo de malhas de aterramento.

O fluxograma apresentado na Figura 3.16 tem a seguinte explicação:

Declaração de variáveis: esta primeira etapa refere-se à declaração das variáveis usadas no programa desenvolvido em linguagem Fortran; neste momento se define a precisão e dimensão dessas variáveis.

Leitura do arquivo de entrada de dados: este passo refere-se à leitura dos arquivos criados pelo programa “malhador” na etapa de pré-processamento.

Inicialização de variáveis: todas as variáveis assumem o valor de zero para garantir a inicialização correta de cada uma delas.

Início das iterações no tempo: definidas todas as informações iniciais, as iterações no domínio do tempo são iniciadas e só serão finalizadas quando for atingido o total de iterações.

Rotina de excitação: neste passo aplica-se um valor de corrente no começo de uma das linhas conectadas ao nó, o qual foi definido previamente como tendo a fonte conectada a ele, para este estudo simula-se uma fonte impulsiva do tipo dupla exponencial (descarga atmosférica).

Início das iterações da linha: inicia-se as iterações das linhas até que o número máximo de linhas que compõem a malha seja alcançado.

Verificação da linha: neste passo verifica-se como começa a linha, podem ocorrer dois casos:

- A linha começa com fonte;
- A linha começa sem fonte.

Rotina de cálculo do início da linha com fonte: aplicam-se as equações do começo da linha com fonte.

Rotina de cálculo do início da linha sem fonte: aplicam-se as equações do começo da linha sem fonte.

Rotina de cálculo do meio da linha: neste passo aplicam-se as equações do meio da linha.

Rotina de cálculo do fim da linha: aplicam-se as equações do fim da linha.

Rotina de condições de contorno: aplica-se a condição de contorno ou terminações definidas para cada início e fim de linha.

Rotina de conexão com o instante seguinte: neste passo aplicam-se as equações de conexão com o instante de tempo seguinte.

Verificação do número de iterações de linha: verifica-se o número de iterações de linhas para determinar o fim do processo; se ainda não houver sido atingido o número máximo, o processo deve retornar a início das iterações de linha. Na próxima iteração da linha, utiliza-se como tensões incidentes os valores calculados nas rotinas de conexão com o momento seguinte da iteração anterior.

Gravação dos resultados: para cada iteração os resultados de interesse são armazenados em arquivos com um formato de duas ou mais colunas para posterior tratamento e visualização. A primeira coluna corresponde aos valores de tempo calculados de acordo com o instante de tempo definido. A segunda ou demais colunas contém os valores das grandezas de interesse definido pelo programador, que pode ser valores de correntes e/ou tensões.

O formato dos arquivos pode ser exemplificado por:

Tempo (μs)	Tensão (kV)
1.0400000	2.6142582
1.1000000	2.4335183
1.1600000	2.2640867
1.2200000	2.1189080
1.2800000	1.9817132
1.3400000	1.8648793
1.4000000	1.7534161
1.4600000	1.6813527
:	:
:	:

Finalizado o programa, obtém-se um ou mais arquivos de resultados com os valores no domínio tempo das grandezas de interesse, que posteriormente serão tratados para visualização e interpretação.

Verificação do número de iterações de tempo: neste momento verifica-se o número de iterações no tempo para determinar o fim do processo; se ainda não houver sido atingido o número máximo, o processo deve retornar a início das iterações no tempo e repetir todo o processo novamente. Caso contrário FIM.

3.3.3 Etapa de pós-processamento

Esta etapa consiste na conversão dos arquivos de dados gerados pelo programa de processamento, em gráficos bidimensionais e/ou tridimensionais, que possibilitem a visualização das grandezas de interesse para um maior entendimento e interpretação. Para o processamento destes arquivos foi usado o programa computacional MATLAB[®].

3.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, apresentou-se o desenvolvimento das expressões do modelo TLM unidimensional, assim como, as diferentes terminações ou condições de contorno das linhas de transmissão em questão. Além disso, foi apresentado o equacionamento para determinar os parâmetros de um cabo enterrado, tanto na vertical quanto na horizontal, para a utilização dos mesmos como dados de entrada do programa computacional.

Por outro lado, foram apresentados os aspectos computacionais que envolveram a aplicação do método TLM unidimensional, tais como: a escolha da linguagem computacional utilizada, fluxograma dos programas de processamento, a escolha do programa para pós-processamento e visualização dos resultados.

Como resultado de algumas análises e conclusões, baseadas na experiência do pessoal envolvido neste trabalho, optou-se finalmente pela programação do método TLM unidimensional na linguagem FORTRAN e a utilização do MATLAB[®] para a visualização dos resultados em gráficos bidimensionais e/ou tridimensionais.

Capítulo 4: Resultados e Discussões

Neste capítulo, é feita a validação do modelo proposto a partir de dados teóricos e/ou experimentais publicados por outros autores. Também é realizado um estudo das tensões transitórias em função de diferentes parâmetros.

Por outro lado é analisada a distribuição da tensão transitória em uma malha de aterramento.

4.1 Validação do Método Proposto

O modelo proposto neste trabalho foi validado a partir de dados teóricos e/ou experimentais publicados por Leonid-Greev [20] e Ramamoorthy [13]. Os mesmos consideram em seus estudos diferentes configurações de sistemas de aterramento, tais como:

- Eletrodo de aterramento vertical;
- Eletrodo de aterramento horizontal;
- Malha de aterramento.

Condições experimentais utilizadas para validar o programa proposto neste trabalho.

Para validar o método proposto, foram feitas simulações, as quais foram comparadas com dados teóricos e/ou experimentais publicados por outros autores, com as seguintes condições:

- Condição 1: Comportamento das tensões transitórias em um eletrodo horizontal de cobre com 15 m de comprimento [20].
- Condição 2: Comportamento das tensões transitórias em um eletrodo vertical de aço com 6 m de comprimento [20].
- Condição 3: Comportamento das tensões transitórias em uma malha de aterramento com dimensões de 60 m x 60 m com quadrículas de 6x6 m [20]

- Condição 4: Comportamento das tensões transitórias em uma malha de aterramento com dimensões de 21 m x 28 m, com quadrículas de 7x7 m e eletrodos verticais com 2 m de comprimento conectados a todos os nós do perímetro [13]

4.1.1 Condição 1: Comportamento das tensões transitórias em um eletrodo horizontal de cobre com 15 m de comprimento [20]

Foi estudado o comportamento das tensões transitórias em um eletrodo horizontal de cobre com 15 m de comprimento, como o mostrado na Figura 4.1, usando o programa escrito em linguagem Fortran e utilizando o método numérico TLM. As características do eletrodo e as propriedades do solo utilizado nas simulações são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros do eletrodo com 15 m de comprimento.

Parâmetros	Símbolo	Valores	Unidade
Resistividade	ρ_{solo}	70	$\Omega\text{-m}$
Permissividade	ϵ_r	15	-
Permeabilidade	μ_r	1	-
Raio do condutor	r	0.0012	m
Profundidade do eletrodo	p	0.6	m
Material dos cabos da malha	-	cobre	-
Ponto de injeção corrente.	-	X = 0	-
Configuração	-	Eletrodo horizontal	-
Comprimento	L	15	m

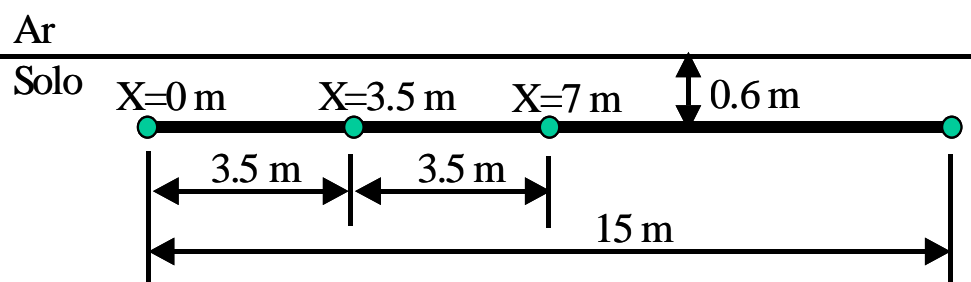


Figura 4.1: Eletrodo horizontal com 15 m de comprimento.

A forma de onda da corrente usada nas simulações é mostrada na Figura 4.2. Sua obtenção foi feita a partir da equação de uma dupla exponencial (4.1) com os seguintes parâmetros: $I_{\text{mod}} = 38 \text{ A}$, $\alpha = 0.08$ e $\beta = 5.6$. A corrente foi aplicada em um extremo do eletrodo horizontal ($X=0 \text{ m}$) e apresentou uma forma bastante semelhante à utilizada por [23x].

$$i(t) = I_{\text{mod}} \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \right) \quad 4.1$$

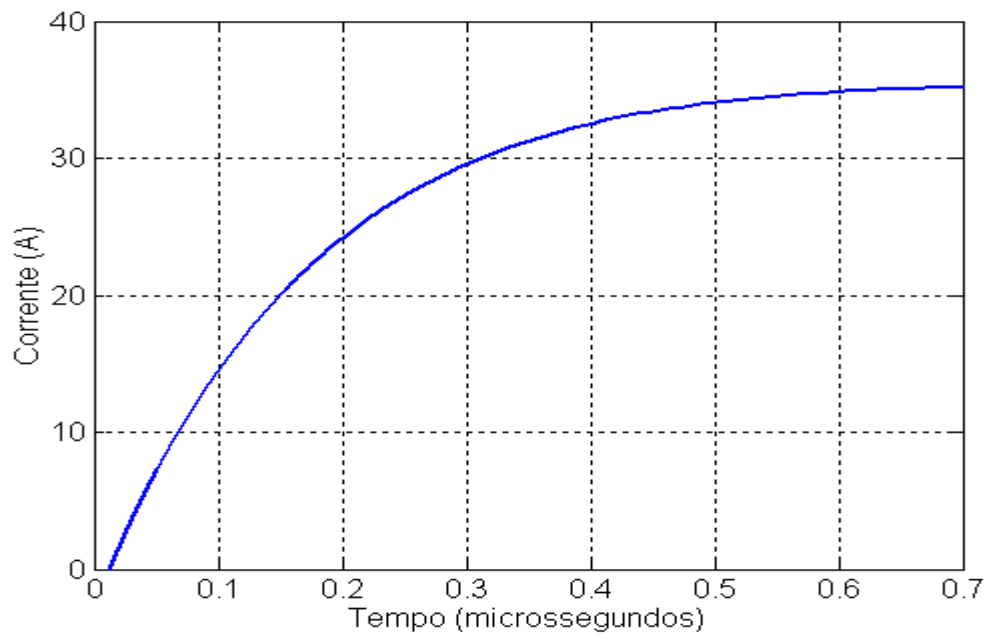


Figura 4.2: Frente de onda da corrente injetada no ponto $X=0 \text{ m}$ do eletrodo horizontal.

A tensão transitória no eletrodo foi medida em três pontos, $X=0 \text{ m}$, $X=3.5 \text{ m}$ e $X=7 \text{ m}$ (Figura 4.1). Na Figura 4.3 mostram-se os resultados das simulações.

Leonid-Grcev [20], também simulou um eletrodo de aterramento horizontal com 15 m de comprimento e com características iguais as do eletrodo simulado usando o programa computacional desenvolvido neste trabalho, além disso, comparou os resultados com medições experimentais feitas por Électricité de France (EDF).

Na Figura 4.4, mostram-se os resultados das simulações feitas em [20], os quais são usados na validação do modelo proposto para o estudo de sistemas de aterramento.

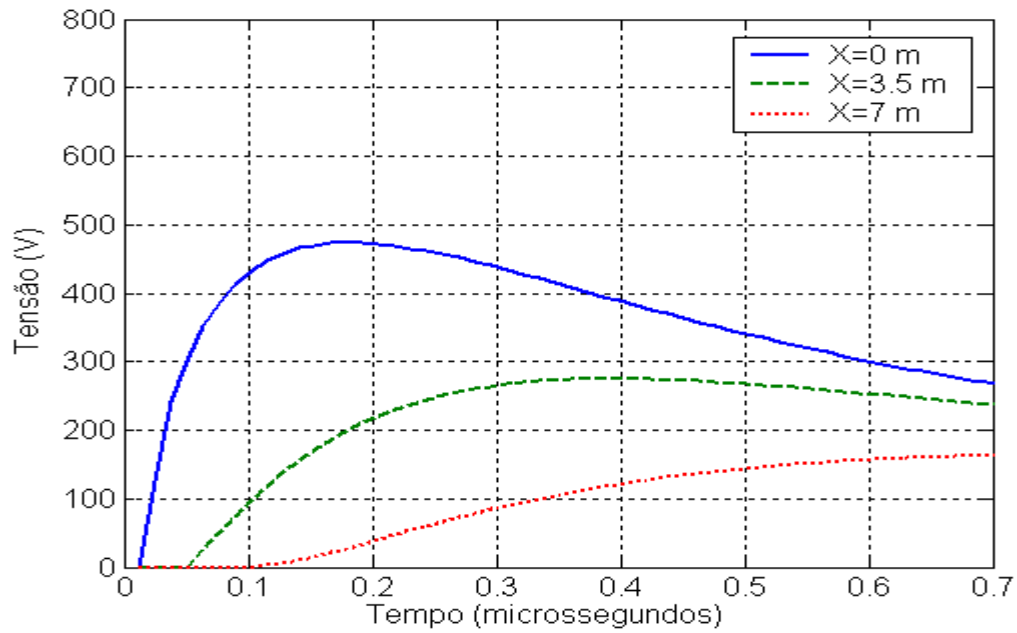


Figura 4.3: Tensão em diferentes pontos do eletrodo horizontal obtida nas simulações.

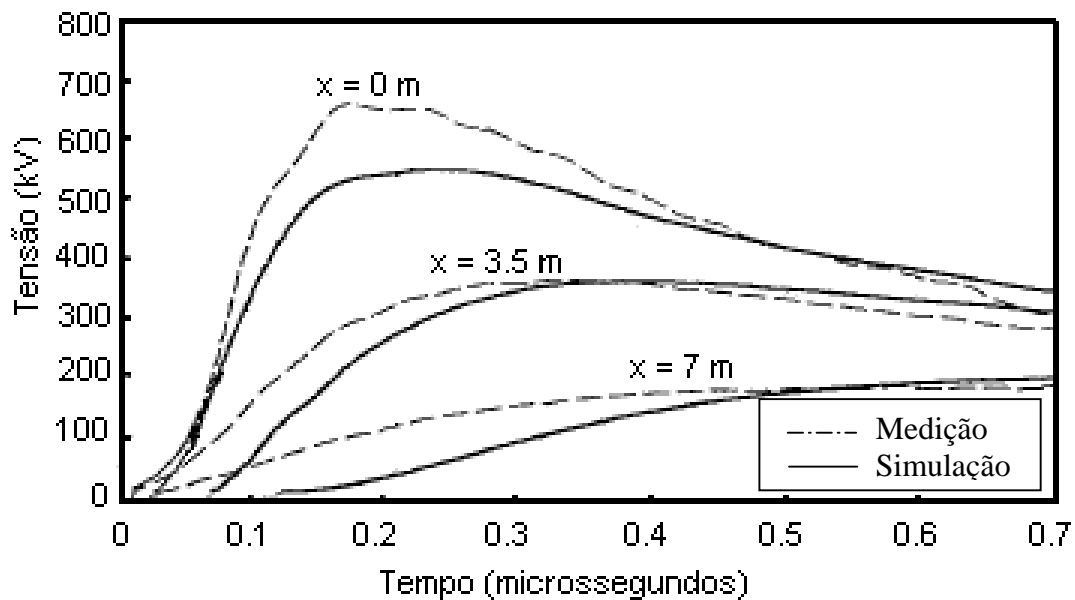


Figura 4.4: Medição da tensão transitória para o eletrodo de aterramento horizontal obtida por Leonid-Greev [20].

O valor máximo de tensão obtida no ponto $X=0$ do eletrodo a partir da simulação computacional é de 470 V, apresentando-se aproximadamente 17 % menor quando comparada com o valor obtido em [20]. Os instantes em que são alcançados os valores de pico de tensão coincidem com os da referência [20]. Pelo anteriormente exposto, pode-se dizer que existe um deslocamento da forma de onda das tensões. Isso pode estar relacionado com: no modelo apresentado consideram-se os parâmetros constantes com a frequência e não é levado em conta o fenômeno da ionização do solo. Embora existam essas diferenças entre os resultados, o modelo consegue representar a propagação da onda no eletrodo de aterramento.

4.1.2 Condição 2: Comportamento das tensões transitórias em um eletrodo vertical de aço com 6 m de comprimento [20]

Uma outra comparação foi feita com um eletrodo vertical com 6 m de comprimento (Figura 4.5), estudado também por Leonid-Greev [20]. Para isso, foi simulado o comportamento transitório da tensão no extremo superior do eletrodo, ponto $X = 0$ da Figura 4.5.

As características do eletrodo, assim como, as propriedades físicas do solo são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros do eletrodo com 6 m de comprimento.

Parâmetros	Símbolo	Valores	Unidade
Resistividade	ρ_{solo}	50	$\Omega\text{-m}$
Permissividade	ϵ_r	15	-
Permeabilidade	μ_r	1	-
Raio do condutor	r	0.0016	m
Material dos cabos da malha	-	aço	-
Ponto de injeção de corrente.	-	$X = 0$	-
Configuração	-	Eletrodo vertical	-
Comprimento	L	6	m

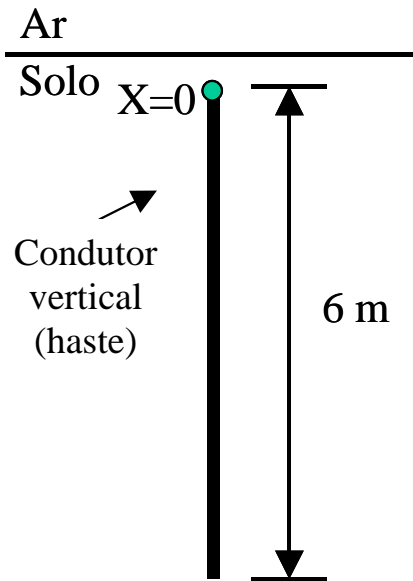


Figura 4.5: Eletrodo vertical com 6 m de comprimento.

A corrente injetada no eletrodo de aterramento durante as simulações foi obtida usando os seguintes parâmetros na equação (4.1): $I_{mod} = 35$ A, $\alpha = 0.07$ e $\beta = 5.6$. Na Figura 4.6, é mostrada a forma de onda da corrente simulada.

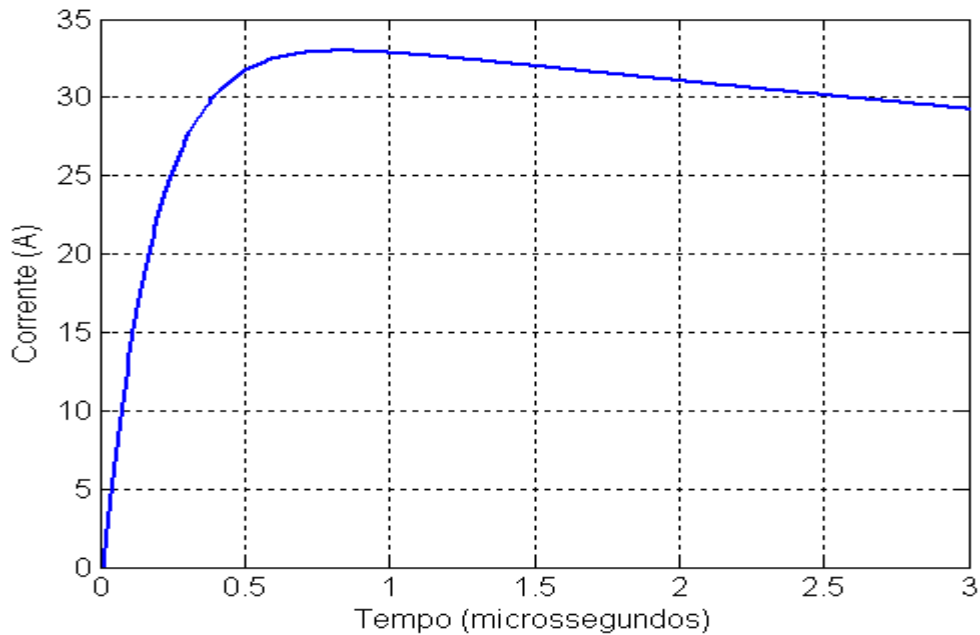


Figura 4.6: Corrente injetada no eletrodo de aterramento vertical usada nas simulações.

A Figura 4.7 mostra os resultado da tensão transitória obtida na simulação e, a Figura 4.8, a forma de onda da tensão transitória obtida por [20].

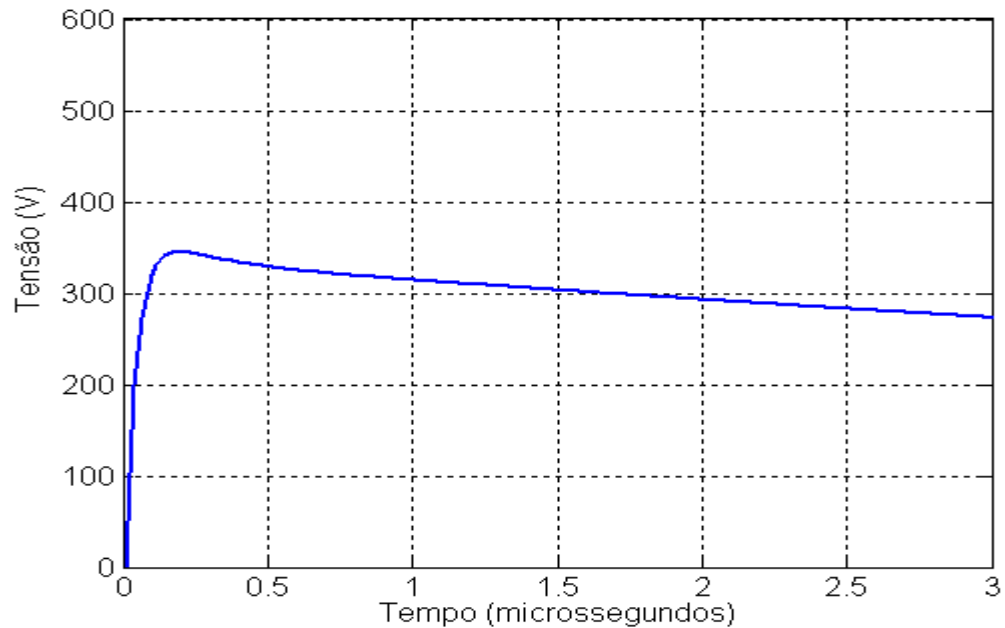


Figura 4.7: Tensão no eletrodo vertical obtida nas simulações.

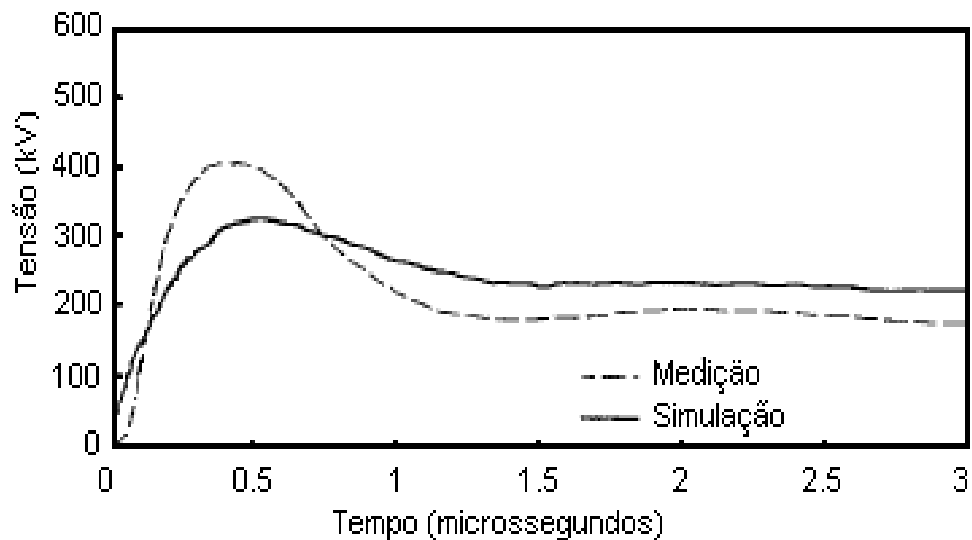


Figura 4.8: Medição da tensão transitória para o eletrodo vertical obtida por Leonid-Greev [20].

O valor de pico da tensão obtido na simulação computacional foi de 348 V, transcorridos três microssegundos o valor da tensão passa a ser 275 V. As diferenças nos resultados podem estar associadas ao fato do modelo apresentado considerar os parâmetros constantes com a frequência.

4.1.3 Condição 3: Comportamento das tensões transitórias em uma malha de aterramento com dimensões de 60 m x 60 m com quadrículas de 6x6 m [20]

Leonid-Grcev [20], além de estudar as tensões transitórias em eletrodos enterrados horizontal e verticalmente, simularam uma malha de aterramento como a mostrada na Figura 4.9. Nesta simulação, foi aplicada uma corrente na forma de uma dupla exponencial com $1/20 \mu\text{s}$ e 1 kA de amplitude.

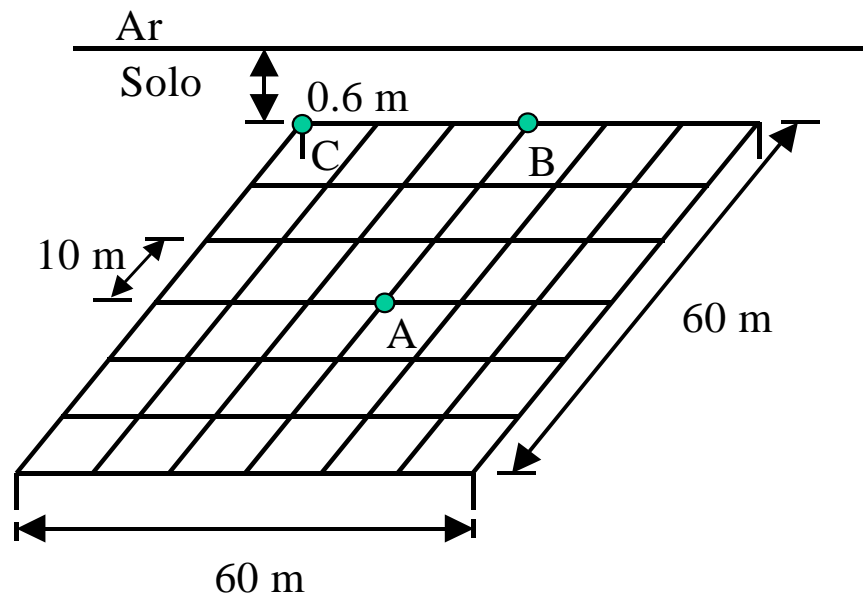


Figura 4.9: Malha de aterramento usada nas simulações.

As características do solo e dos condutores da malha são mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros da malha de aterramento.

Parâmetros	Símbolo	Valores	Unidade
Resistividade	ρ_{solo}	100	$\Omega\text{-m}$
Permissividade	ϵ_r	36	-
Permeabilidade	μ_r	1	-
Raio do condutor	r	0.001608	m
Profundidade da malha	p	0.6	m
Material dos cabos da malha	-	cobre	-
Ponto de injeção de corrente.	-	A	-
Configuração	-	Malha de aterramento	-

A corrente foi injetada em um ponto localizado no meio da malha de aterramento (ponto A) e as tensões transitórias foram medidas nos pontos A, B e C (Figura 4.9). Esses mesmos dados e a malha de aterramento foram usados para a simulação com o programa computacional desenvolvido neste trabalho. Os resultados obtidos nas simulações são mostrados na Figura 4.10. Na Figura 4.11, são mostrados os resultados obtidos por [20] usando a mesma malha de aterramento e as mesmas condições estudadas.

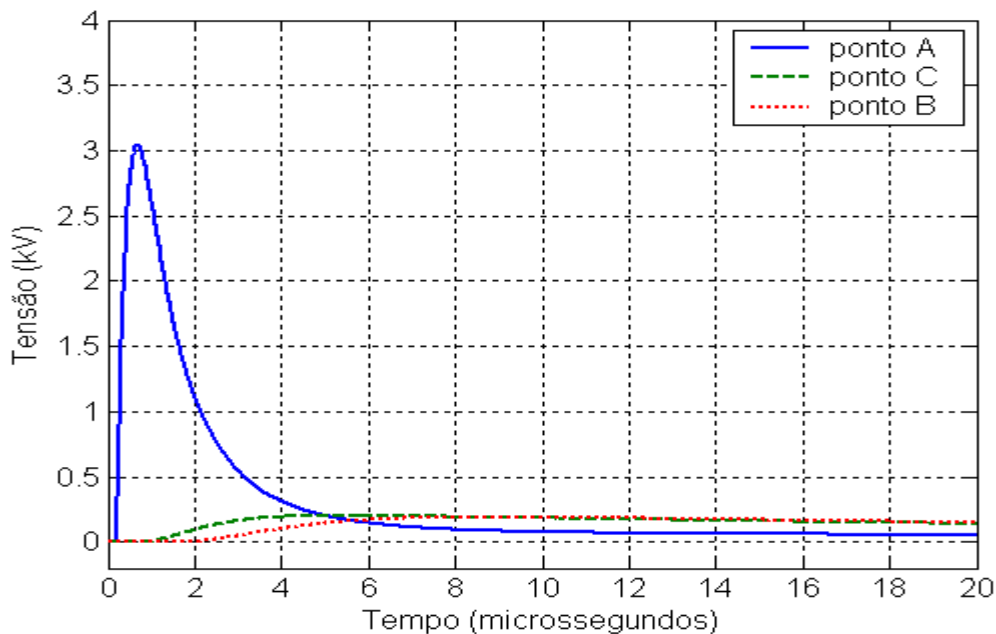


Figura 4.10: Tensões nos diferentes pontos da malha de aterramento obtida nas simulações.

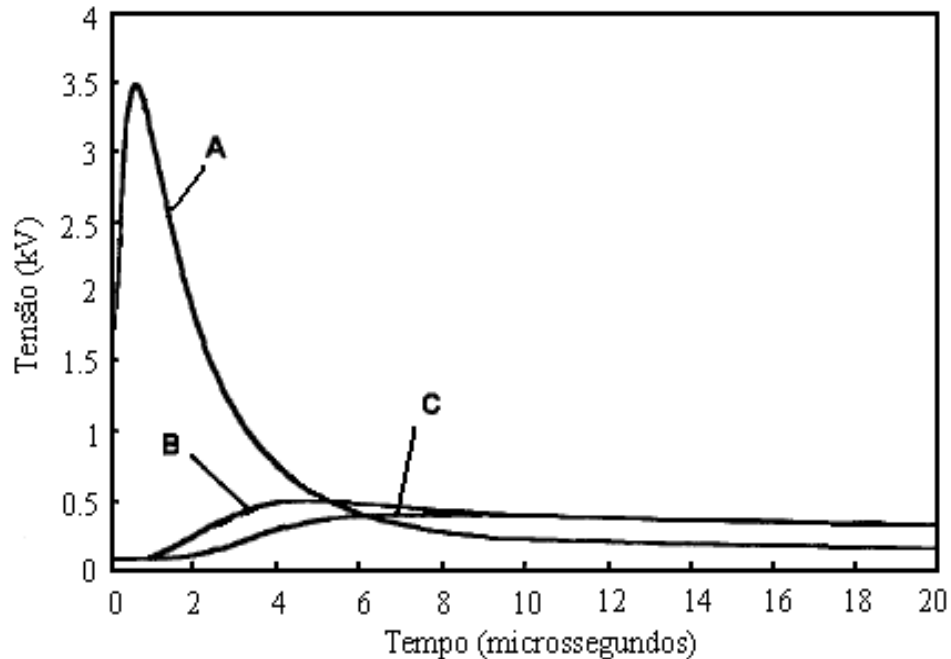


Figura 4.11: Tensão transitória na malha de aterramento, referência [20].

O máximo valor de tensão para o ponto de injeção de corrente (ponto A) na malha de aterramento estudada foi de 3,05 kV alcançados em 0,66 microsegundos, o que é 12 % menor que o valor obtido em [20]. As curvas de tensão nos pontos B e C também ficaram menores quando comparadas com [20] e sofreram novamente o mesmo deslocamento temporal. Pelo anteriormente exposto, pode-se dizer que existe um deslocamento da forma de onda das tensões com relação à [20]. Isso pode estar associado ao fato de o modelo apresentado considerar os parâmetros constantes com a frequência. Embora existam essas diferenças entre os resultados o modelo é capaz de representar a propagação da onda na malha de aterramento.

4.1.4 Condição 4: Comportamento das tensões transitórias em uma malha de aterramento com dimensões de 21 m x 28 m com quadrículas de 7x7 m e eletrodos verticais com 2 m de comprimento conectados a todos os nós do perímetro [13]

Os testes feitos por Ramamoorthy [13] foram realizados em uma malha de aterramento instalada no laboratório de alta tensão do CPRI. Foi usado um gerador de impulsos de 30 KJ e 2.4 MV para injetar uma corrente com forma de dupla exponencial, a malha de aterramento utilizada por Ramamoorthy [13] em seus testes tinha dimensões de 21 m x 28 m, eletrodos verticais com 2 m de comprimento conectados a todos os nós do perímetro e profundidade de 0.8 m, Figura 4.12.

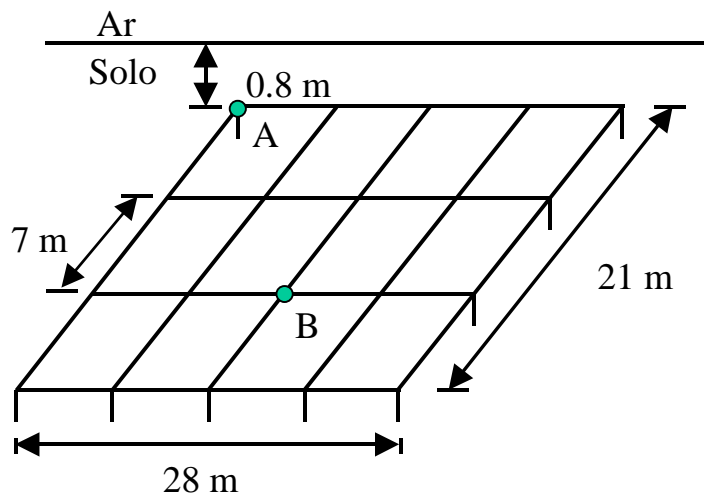


Figura 4.12. Malha de aterramento.

Foram adotados os seguintes parâmetros: resistividade do solo igual a 100 Ω -m, permissividade igual a 10 e permeabilidade igual a 1. O pulso de corrente foi aplicado na borda e no centro da malha (ponto A e B), respectivamente, a tensão transitória foi medida nesses mesmos pontos, Figura 4.12. As formas de onda das tensões obtidas para as condições acima descritas por Ramamoorthy [13] são apresentadas no anexo C.

Para validar o método proposto neste trabalho foram feitas simulações com o programa escrito em Fortran, usando a mesma configuração da malha e parâmetros usados por

Ramamoorthy [13]. A onda da corrente usada para as simulações tem a forma: $i(t) = 1.5(e^{-0.1135t} - e^{-0.231t})$ kA. Foi medida a tensão transitória nos pontos *A* e *B* da Figura 4.12 e foram comparados com os resultados experimentais e analíticos publicados em [13].

Na Tabela 4.4, mostram-se valores de pico das tensões nos pontos *A* e *B* da malha de aterramento simulada, assim como, os obtidos experimentalmente e analiticamente (usando a aproximação do circuito) por Ramamoorthy [13]. Uma simples inspeção dos resultados indica a proximidade entre os valores, fato que garante o funcionamento do modelo proposto para as condições verificadas. As diferenças existentes podem estar associadas ao fato do modelo apresentado considerar os parâmetros constantes com a frequência.

Tabela 4.4: Comparação das simulações com os resultados experimentais e analíticos de Ramamoorthy [13].

Ponto de injeção de corrente	Tensão (KV)		
	Ramamoorthy [13] (Experimentos)	Ramamoorthy [13] (Analíticos)	TLM
Ponto A	0.5180	0.5610	0.5692
Ponto B	0.3810	0.3829	0.3757

A forma de onda das tensões obtidas aplicando o modelo TLM podem ser observadas nas Figura 4.13 e Figura 4.14, nota-se a semelhança com os resultados obtidos em [13] (anexo C) o que permite afirmar que o modelo proposto funciona adequadamente sobre essas condições.

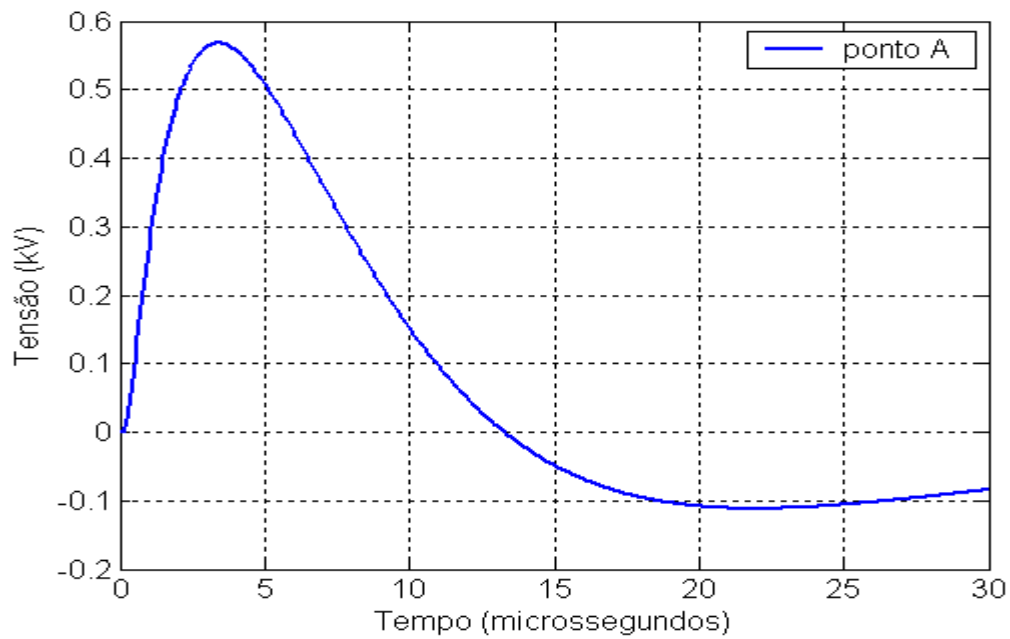


Figura. 4.13. Tensão no ponto A da malha usando o método TLM.

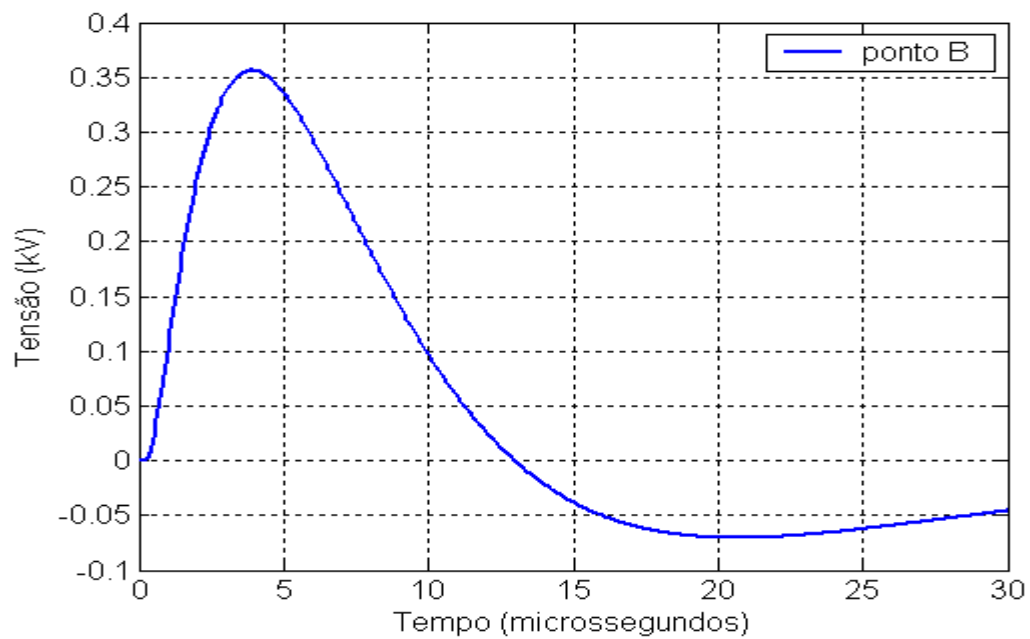


Figura. 4.14. Tensão no ponto B da malha usando o método TLM.

4.2 Influência de diferentes parâmetros no comportamento transitório de uma malha de aterramento

O comportamento das tensões transitórias em malhas de aterramento foi estudado em função dos parâmetros descritos abaixo:

- Caso 1: Resistividade do solo;
- Caso 2: Raio do condutor que compõe a malha de aterramento;
- Caso 3: Profundidade a que encontrasse a malha de aterramento;
- Caso 4: Ponto de injeção de corrente;
- Caso 5: Configuração geométrica da malha;
- Caso 6: Uso de eletrodos verticais na malha de aterramento.

Esses parâmetros constituem os dados de entrada do programa computacional usado nas simulações.

Aproximações feitas no estudo:

- Não é levado em conta o fenômeno de ionização do solo;
- Os parâmetros da malha são considerados como sendo independentes das variações da frequência;
- A corrente elétrica aplicada na malha em todos os casos simulados é matematicamente representada através de uma função dupla exponencial, segundo a expressão (4.1).

Onde:

$$I_{\text{mod}} = 1.0 \text{ kA}$$

$$\alpha = 0.027 \text{ 1}/\mu\text{s}$$

$$\beta = 5.6 \text{ 1}/\mu\text{s}.$$

Na Figura 4.15, apresentam-se as dimensões geométricas da malha de aterramento. Os cabos são de cobre com 0.014 m de diâmetro e com condutividade elétrica de 59.6×10^{-6} S/m.

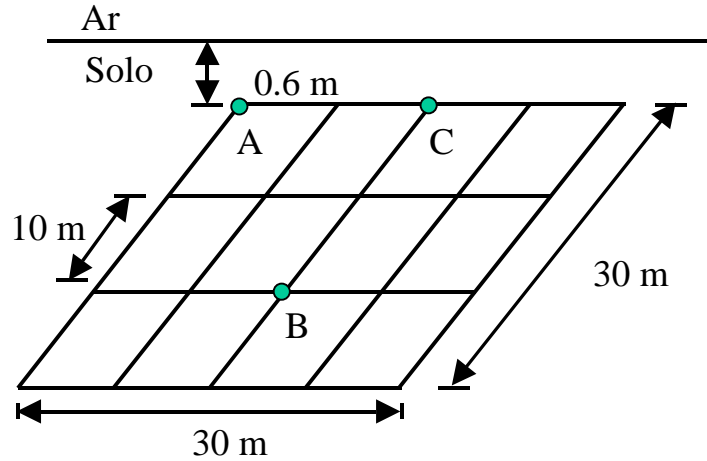


Figura 4.15: Dimensões da malha de aterramento usada nas simulações.

Na Tabela 4.5, são apresentados os valores dos parâmetros da malha que foram mantidos constantes durante as simulações das condições apresentadas na Tabela 4.6. Cada fator é estudado em três níveis diferentes.

Tabela 4.5: Valores dos parâmetros da malha que foram mantidos constantes durante as simulações.

Parâmetros	Símbolo	valores	Unidade
Resistividade	ρ_{solo}	100	$\Omega\text{-m}$
Permissividade	ϵ_r	36	-
Permeabilidade	μ_r	1	-
Raio do condutor	r	0.007	m
Profundidade da malha	p	0.6	m
Material dos cabos da malha	-	cobre	-
Ponto de injeção de corrente.	-	Centro (ponto B)	-
Malha com eletrodos verticais	-	não	-
Tamanho da malha	-	3x4	-

Tabela 4.6: Níveis considerados no estudo dos parâmetros da malha

Caso	Parâmetros que são variados em cada caso	Nível 1	Nível 2	Nível 3
1	ρ_{solo}	100	500	800
3	Raio do condutor	0.007	0.014	0.0202
4	Profundidade da malha	0.3	0.6	1
5	Ponto de injeção corrente.	Centro (ponto B)	Quina (ponto A)	Lado (ponto C)
6	Tamanho da malha	3x4	4x4	5x4
7	Malha com eletrodos verticais	sim	não	-

4.2.1 Caso 1: Influência da resistividade do solo

A influência da resistividade do solo foi determinada usando-se uma malha de aterramento com as características mostradas na Figura 4.15. As condições simuladas correspondem com as definidas nas Tabelas 4.5 e 4.6. Foi aplicada a corrente (4.1) no centro da malha (ponto B) com os parâmetros citados anteriormente. Os valores de tensão foram medidos no ponto B.

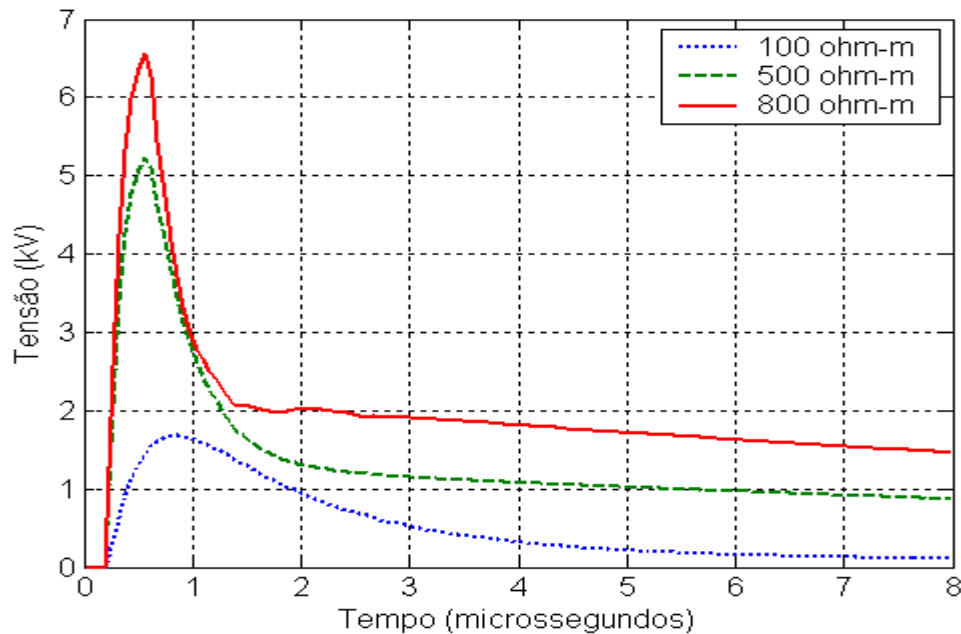


Figura 4.16: Comportamento da tensão na malha no ponto B em função da resistividade do solo.

Na Figura 4.16, mostra-se o comportamento da tensão transitória no ponto B em função da resistividade do solo. Pode-se observar que quando a resistividade corresponde a 800 ohm-m, a tensão experimenta seu maior valor dentre os níveis estudados. O comportamento anterior continua mesmo depois de transcorrido o transitório.

A resistividade do solo afeta a estabilização da tensão na superfície do solo. No solo com resistividade 800 Ω -m o valor da tensão estabilizada é 2 kV, que é atingida em 1.7 microssegundos, no solo com resistividade de 500 Ω -m, o valor da tensão estabilizada é 1.4 kV, que é atingida em 2.5 microssegundos, Já no solo com resistividade de 100 Ω /m, o valor da tensão estabilizada é 0.28 kV, que é atingida em 4.5 microssegundos.

Os resultados anteriores podem ser explicados como segue: no solo com alta resistividade a condutância dos condutores da malha de aterramento é muito menor que no solo com baixa resistividade, dificultando, assim, a dissipação da corrente transitória no solo e o decrescimento da tensão transitória na malha de aterramento.

4.2.2 Caso 2: Influência do raio dos condutores que compõem a malha de aterramento

Para estudar a influência dos raios dos condutores que compõem a malha de aterramento no comportamento da tensão transitória, foram simuladas três situações diferentes: $r = 0.007$ m, $r = 0.014$ m e $r = 0.020$ m. Os demais parâmetros do solo e as dimensões da malha de aterramento usados nas simulações foram mantidos constantes conforme a Tabela 4.5.

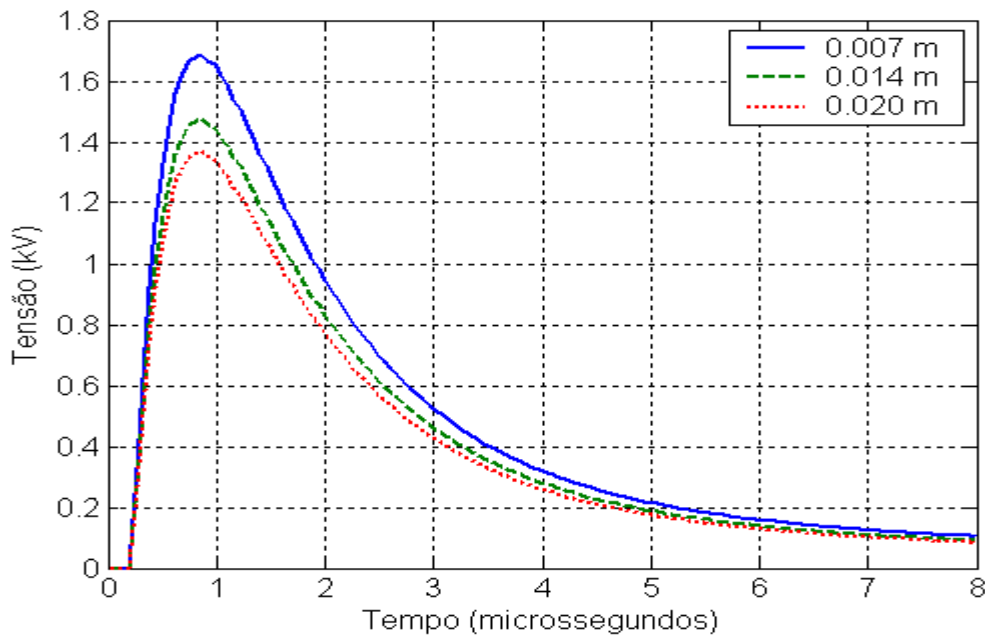


Figura 4.17: Comportamento da tensão no ponto B quando os raios dos condutores são alterados.

Na figura 4.18, é mostrado o comportamento da tensão no ponto B da malha para os diferentes raios adotados. Pode-se observar que quando o raio do condutor é aumentado a tensão transitória diminui.

O efeito observado pode se explicado pela alteração que algumas propriedades dos condutores experimentam, tais como: resistência, indutância, capacitância e condutância, devido à variação dos raios. Dos parâmetros anteriormente citados, a condutância apresenta a maior influência na tensão transitória.

O incremento do raio do condutor ajuda a diminuir a tensão transitória na malha de aterramento, situação vantajosa para o funcionamento otimizado deste sistema.

4.2.3 Caso 3: Influência da profundidade da malha de aterramento

A profundidade da malha é outro parâmetro que necessita ser estudado. Para isto foram simuladas três diferentes profundidades: $p = 0.3$ m, $p = 0.6$ m e $p = 1$ m. As condições sobre as quais as simulações foram feitas correspondem aquelas apresentadas nas Tabelas 4.5 e 4.6.

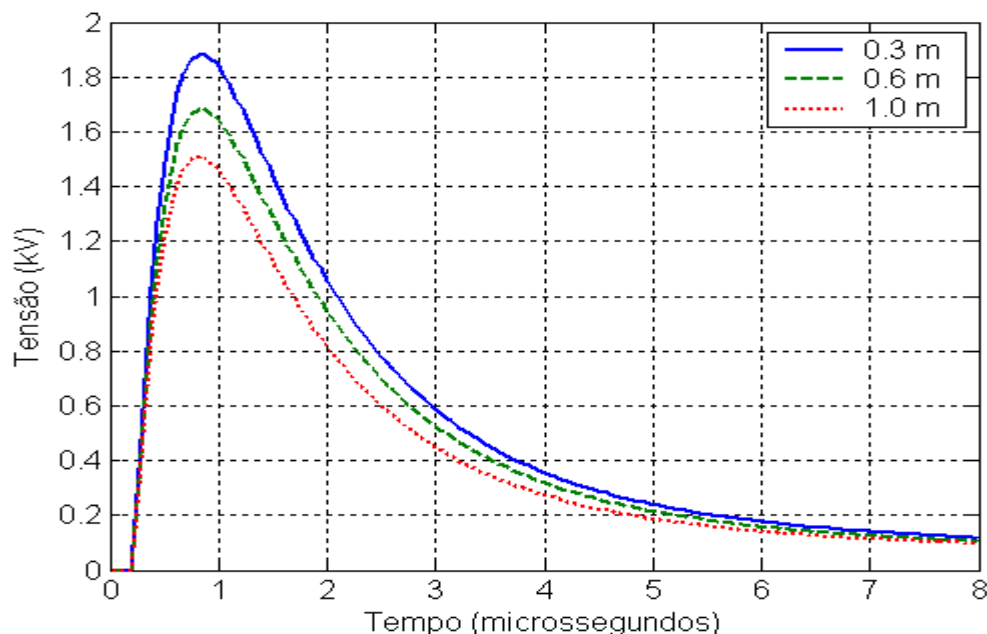


Figura 4.18: Comportamento da tensão no ponto B da malha para diferentes profundidades de aterramento.

A Figura 4.19 mostra o comportamento das tensões transitórias para diferentes profundidades de aterramento. Pode-se observar que malhas enterradas a maiores profundidades apresentam menor tensão transitória. O fato anterior pode ser explicado devido ao fato de as maiores profundidades possuírem solos melhores condutores, desta forma, a dissipação da corrente presente na malha é melhor, o que provoca uma diminuição da tensão transitória.

4.2.4 Caso 4: Influência do ponto de injeção de corrente na malha

A seguir é mostrado um estudo da influência do ponto de injeção de corrente sobre a tensão transitória. Os pontos nos quais se aplica a corrente são especificados na Figura 4.15, pontos A, B e C. Os parâmetros usados na simulação correspondem aos apresentados na Tabela 4.5. e as tensões foram medidas nos respectivos pontos de aplicação de corrente.

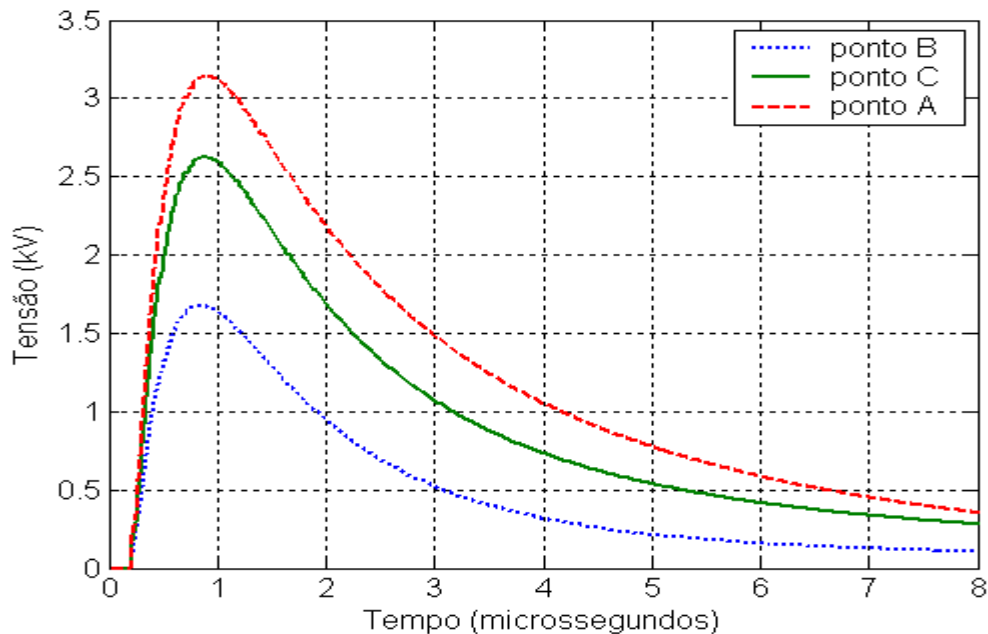


Figura 4.19: Comportamento da tensão para diferentes pontos de injeção de corrente.

A Figura 4.20 mostra os resultados das simulações para as condições estudadas. O valor da tensão transitória no centro (ponto B) é menor quando comparada com as medidas nos pontos A e C. A maior tensão transitória foi observada quando a corrente é aplicada na borda da malha de aterramento (ponto A). Um ponto intermediário (ponto C, lado da malha) experimenta valores de tensão entre aqueles medidos nos pontos A (quina) e B (centro).

4.2.5 Caso 5: Influência da configuração geométrica da malha

Foi estudado o comportamento da tensão transitória no ponto de aplicação de corrente para diferentes configurações de malha de aterramento, escolhendo por conveniência a borda da malha, conforme apresentado na Figura 4.21.

Os valores dos parâmetros usados nas simulações correspondem aos mostrados na Tabela 4.5.

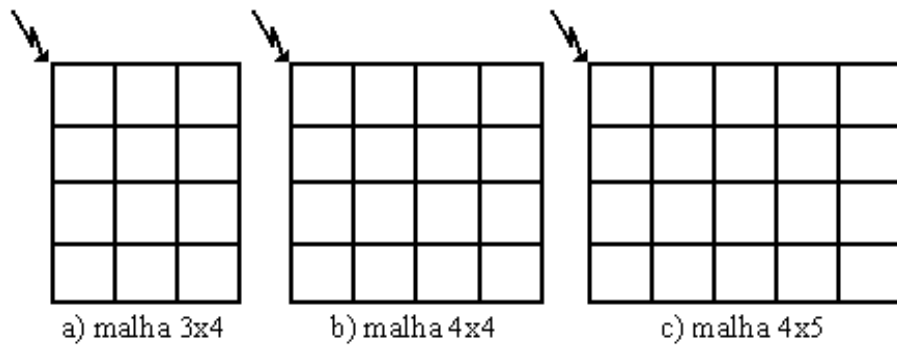


Figura 4.20: Malhas de diferentes configurações geométricas usadas nas simulações.

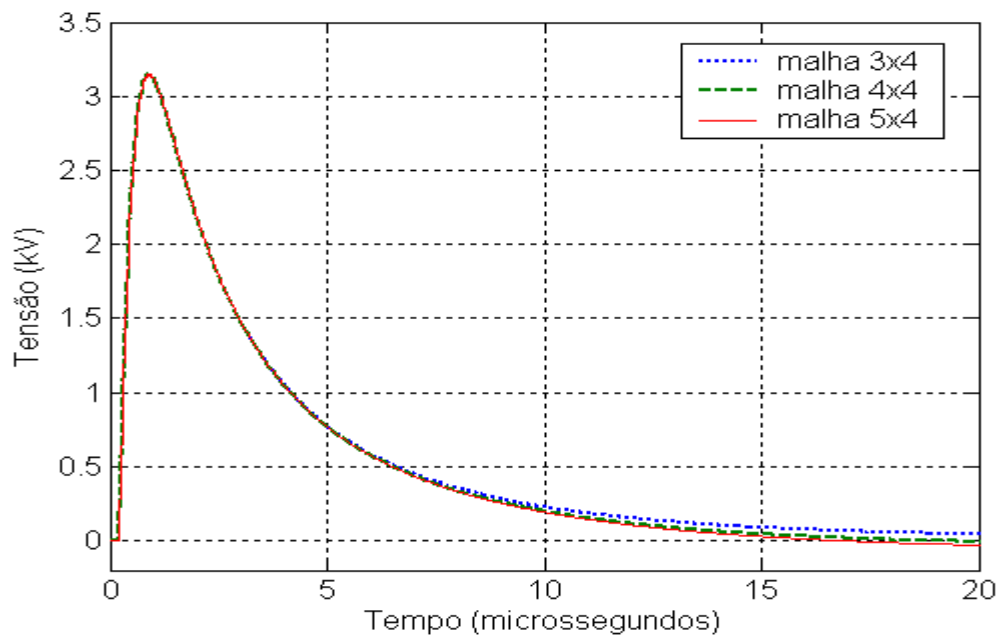


Figura 4.21: Comportamento da tensão para diferentes configurações da malha.

Na Figura 4.22, é descrito o comportamento da tensão transitória para cada configuração da malha de aterramento. Para as malhas estudadas, não foi encontrado efeito significativo sobre o máximo valor de tensão, porém as diferenças foram constatadas depois de transcorrido o transitório, onde se verificou que a tensão diminui à medida que se aumenta o tamanho da malha (Figura 4.23).

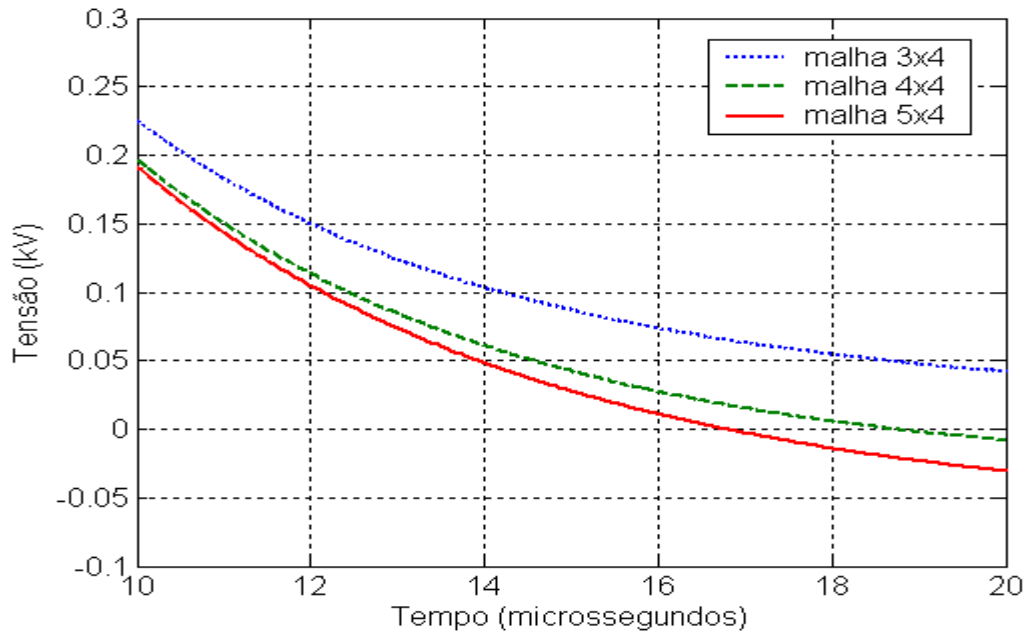


Figura 4.22: Comportamento da tensão para diferentes configurações da malha (ampliação).

4.2.6 Caso 6: Influência do uso de eletrodos verticais na malha de aterramento

A influência do uso de eletrodos verticais na malha de aterramento sobre a tensão transitória foi estudada tomando como base a configuração da malha mostrada na Figura 4.15.

Os eletrodos verticais, quando usados, foram posicionados ao longo do perímetro definido pela malha de aterramento. A corrente foi aplicada no ponto A, mesmo local em que foi medida a tensão transitória, e obedeceu os mesmos parâmetros usados anteriormente (4.1).

Na Figura 4.24, se observa o resultado obtido nas simulações. Para malhas com eletrodos verticais a tensão transitória é aproximadamente 32 % menor quando comparada com a malha sem eletrodos verticais.

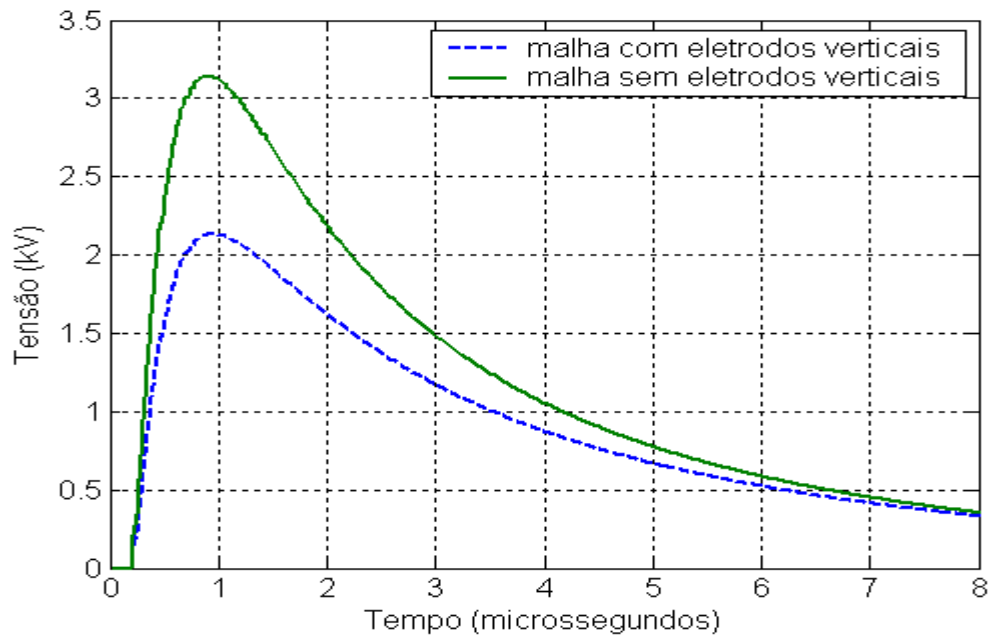


Figura 4.23: Comportamento da tensão no ponto de injeção de corrente usando uma malha com ou sem eletrodos verticais.

4.3 Propagação da onda de tensão na malha de aterramento

A distribuição da tensão transitória é importante em sistemas multi-aterrados. Para estudar esse fenômeno, é usada uma malha como a mostrada na Figura 4.25.

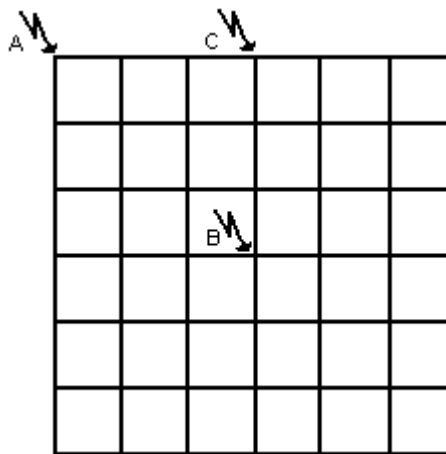


Figura 4.24: Malha de aterramento com 36 quadrículas.

A seguir são mostrados os parâmetros tanto do solo quanto dos condutores da malha, usados nas simulações com a corrente perturbadora sendo injetada no ponto B da malha.

Tabela 4.7: Parâmetros do solo e dos condutores da malha composta por 36 quadrículas.

Parâmetros	Símbolo	valores	Unidade
Resistividade	ρ_{solo}	100	$\Omega\text{-m}$
Permissividade	ϵ_r	36	-
Permeabilidade	μ_r	1	-
Raio do condutor	r	0.007	m
Profundidade da malha	p	0.6	m
Material dos cabos da malha	-	cobre	-
Tamanho da malha	-	6x6	-

Na Figura 4.26 são apresentados os valores da tensão transitória nos pontos *A*, *B* e *C* da malha de aterramento para cada instante de tempo. Pode-se constatar que a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* é de aproximadamente 100 V depois de transcorrido o transitório. Esse fenômeno pode provocar danos aos equipamentos conectados a esses pontos e/ou problemas de EMC (compatibilidade eletromagnética). Quando a resistividade do solo é maior, os efeitos negativos são mais pronunciados.

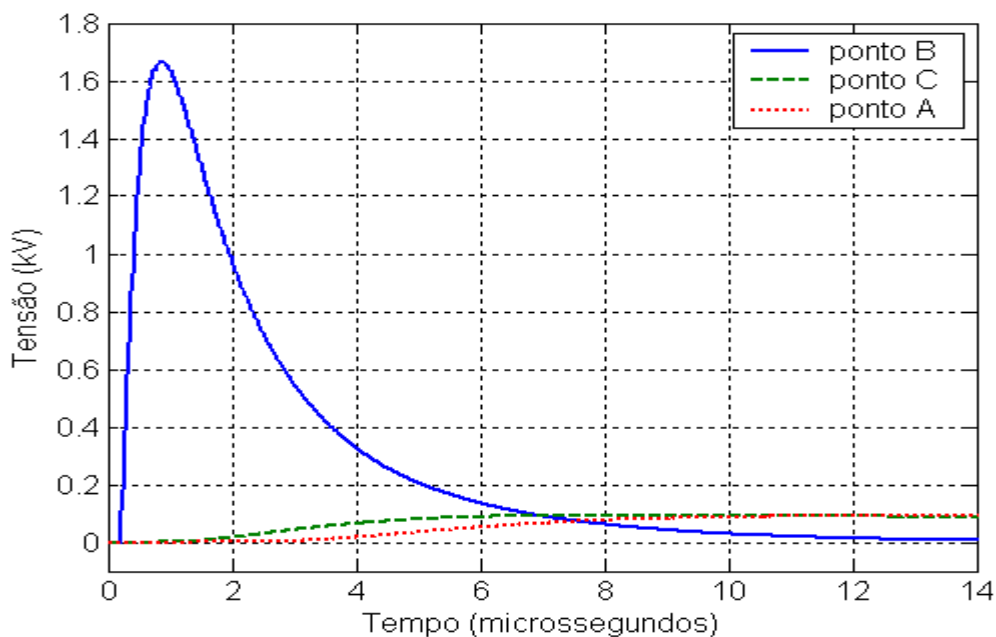


Figura 4.25: Tensão transitória em diferentes pontos da malha.

Na Figura 4.27, é apresentada uma seqüência de gráficos tridimensionais que descrevem o comportamento da tensão na superfície da malha para diferentes instantes de tempos. Uma representação mais quantitativa sobre a propagação da onda de tensão na malha pode ser obtida pela curvas de nível mostradas na Figura 4.28.

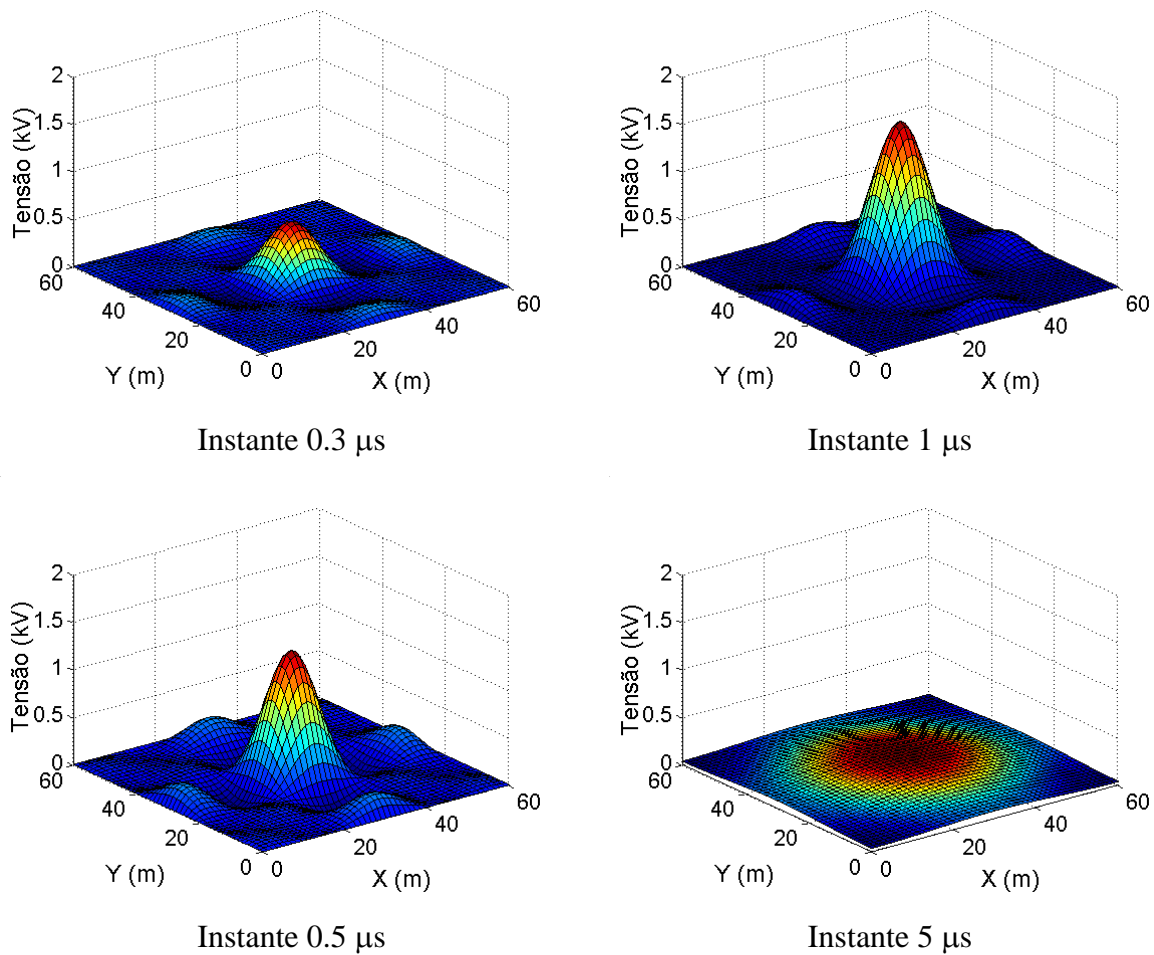


Figura 4.26: Distribuição espacial da tensão transitória na superfície da malha de aterramento quando a corrente é aplicada no ponto B (Curvas tridimensionais).

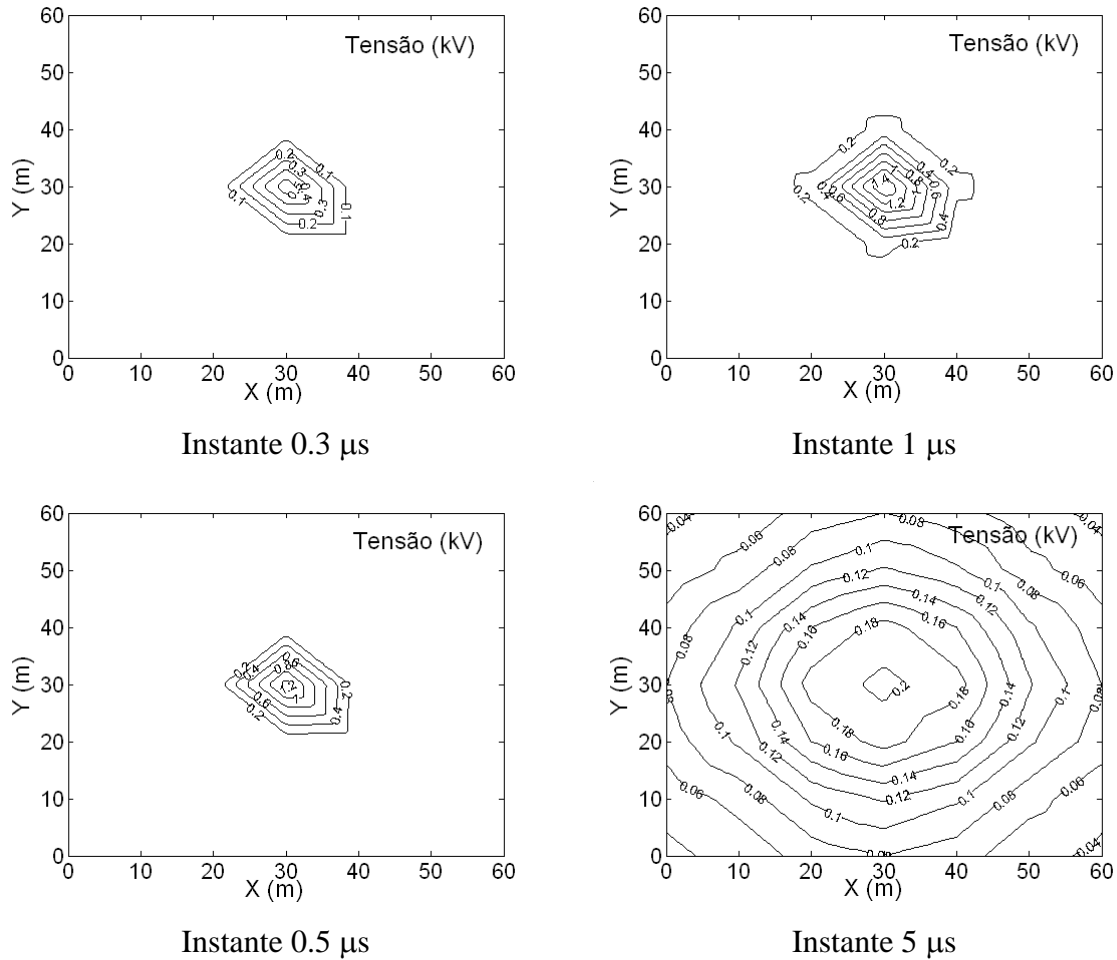


Figura 4.27: Distribuição espacial da tensão transitória na superfície da malha de aterramento quando a corrente é aplicada no ponto B (Curvas de nível).

4.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, apresentou-se a validação do método TLM usado na simulação de sistemas de aterramento. Foram comparadas simulações com resultados experimentais e analíticos publicados por outros autores. As diferenças constatadas encontram-se associadas às aproximações realizadas durante a formulação matemática, tais como: não consideração do fenômeno de ionização do solo; parâmetros da malha considerados independentes da variação da frequência; não consideração do efeito mútuo entre os condutores que compõem a malha de aterramento. Os resultados obtidos mostraram que o método proposto é adequado para o estudo de sistemas de aterramentos.

O estudo da influência dos diferentes parâmetros, tanto do solo quanto dos condutores, sobre o comportamento transitório das tensões presentes nas malhas de aterramento, evidencio:

- As menores tensões transitórias ocorrem para baixos valores de resistividade.
- A influência do raio dos condutores na tensão transitória deve ser levada em conta em um projeto de aterramento. Um aumento do raio provoca uma diminuição da tensão transitória. Também se deve levar em conta o ponto de vista econômico neste quesito.
- Um aumento da profundidade traz consigo uma diminuição da tensão transitória. A profundidade de uma malha de aterramento depende das características do solo.
- Quando o ponto de aplicação da corrente é o centro da malha ocorrem as menores tensões transitórias, devido a uma melhor dissipação da corrente da malha para o solo.
- A configuração da malha não tem influência significativa na máxima tensão transitória, porém, depois de transcorrido o transitório, as malhas maiores apresentam as menores tensões.
- Quando são usados eletrodos verticais na malha de aterramento a tensão transitória é consideravelmente menor. O fato anterior está relacionado com uma diminuição da impedância da malha.

A Propagação da onda de tensão na malha de aterramento é importante em sistemas multi-aterrados, este fenômeno pode causar danos a equipamentos conectados à malha e/ou problemas de EMC (compatibilidade eletromagnética). Em solos com maiores resistividades os efeitos negativos são mais pronunciados.

Capítulo 5: Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões gerais

Para o uso na engenharia, os modelos para análise de transitórios de sistemas de aterramento devem ser simples, devem ter tempo de processamento rápido e devem descrever todas as características importantes do comportamento transitório de um sistema de aterramento. Baseado no exposto acima pode-se dizer que o método da linha de transmissão é uma boa opção para o estudo de sistemas de aterramento.

Pelo fato do método TLM pertencer ao método das linhas de transmissão, ter um equacionamento simples, apresentar tempo de processamento e precisão nos resultados aceitáveis quando comparado com outros métodos, ele foi escolhido para o estudo de sistemas de aterramento neste trabalho.

O modelo TLM usado nas simulações de sistemas de aterramento é validado comparando-se diferentes condições estudadas com resultados experimentais e analíticos publicados por outros autores. As diferenças constatadas encontram-se associadas às aproximações realizadas durante a formulação matemática, tais como: desconsidera-se o fenômeno de ionização do solo e os parâmetros da malha são considerados independentes da variação da frequência. Os resultados obtidos mostraram que o método proposto para o estudo de sistemas de aterramentos é adequado.

Por outro lado, foi feito um estudo de diferentes parâmetros no comportamento transitório das tensões, tais como:

- Resistividade do solo;
- Raio do condutor que compõe a malha de aterramento;
- Profundidade da malha de aterramento;
- Ponto de injeção de corrente;
- Configuração da malha;
- Uso ou não de eletrodos verticais.

Embora o programa aparente estar fornecendo dados confiáveis e coerentes, é

necessário que ele receba uma série de ajustes ainda. Isto só será possível a partir do momento que dados reais estiverem sendo coletados de Cachoeira Paulista e sendo confrontados com os dados fornecidos pelo programa.

O método TLM mostrou-se ser bastante acessível em termos de facilidades de implementação computacional e, além disto, existem inúmeros trabalhos publicados nas mais diversas áreas da engenharia que usam o TLM com sucesso e que podem servir como motivação e inspiração para o seu uso em nosso experimento.

Talvez o grande problema, que eventualmente encontraremos quando compararmos os resultados reais com os resultados computacionais, será a grande complexidade geométrica (espacial) da estrutura instalada em Cachoeira Paulista. Nesta fase deveremos simplificar a estrutura de Cachoeira Paulista de tal forma que esta simplificação não influa nos resultados computacionais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Propostas para uma possível continuidade deste trabalho:

- Implementar o programa para que leve em conta o fenômeno da ionização do solo;
- Considerar os parâmetros da malha dependentes da frequência;
- Fazer testes experimentais em uma malha de aterramento real instalada no centro internacional de pesquisa com descargas atmosféricas no INPE de Cachoeira Paulista e comparar com os resultados das simulações computacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JOHNS, P. B; BEURLE R. L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. **Proc. IEE**, v.118, p.1203-1208, 1971.
- [2] HUYGENS, C. **Traite de la lumiere**. Paris: Leiden, 1690.
- [3] ARNOLD, James E. Lightning detection from space, **NASA/MSFC**, [S.l]: [s.n.], 1997.
- [4] ZAGO, F. **Desenvolvimento de um programa computacional visando o estudo das tensões induzidas por descargas atmosféricas**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação - Unicamp.
- [5] UMAN, Martin A. Natural Lightning. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.30, n.3, May-June, 1994.
- [6] SALDANHA, J. O. Aterramento de Torres de Telecomunicação. **Escola de Engenharia da UFMG**, out. 1993.
- [7] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5419:2000: Proteção de Edificações Contra Descargas Atmosféricas**. Rio de Janeiro, agosto de 2000.
- [8] JOÃO, M. **Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis**. São Paulo: Erica, 1997.(Universidade).
- [9] YANQING, G. et al. **Loss transmission-line model of grounding electrodes considering soil ionization of lightning impulse**. **Dept. of Electrical Engineering**. Beijing, China: Tsinghua University, 1984.
- [10] YU, S. et al. Time-domain analysis method of lightning transient characteristics of grounding electrode”. In: **ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ELECTROMAGNETICS, CEEM, 2003, Hangzhou, China**.
- [11] LIU, Y. **Transient response of grounding systems caused by lightning: modelling and Experiments**. 2004. Dissertation (Doctor of Philosophy).
- [12] MELIOPOULOS, A. P.; MOHARAM, M. G. Transient analysis of grounding systems. **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, v.PAS-102, n.2, p.36-41, July, 1983.
- [13] RAMAMOORTY, M. et al. Transient performance of grounding grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.4, n.4, p.2053-2059, Oct. 1989.
- [14] GERI, A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.14, n.3,

p.1008-1017, July 1999.

- [15] OTERO, A. F.; CIDRAS, J; ALAMO, J. L. Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.14, n.3, p.873-878, July 1999.
- [16] CIDRAS, J.; OTERO, A. F.; GARRIDO, C. Nodal frequency analysis of grounding systems considering the soil ionization affect. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.15, n.1, p.103-107, Jan. 2000.
- [17] GRCEV, L. D.; DAWALIBI, F. An electromagnetic model for transients in grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.5, n.4, p.1773-1781, Nov. 1990.
- [18] GRCEV, L. D. Computation of transient voltages near complex grounding systems caused by lightning current. In: PROCEEDING OF IEEE 1992 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMC, 1992, p.393-399.
- [19] GRCEV, L. D.; MENTER, F. E. Transient electromagnetic fields near large systems. **IEEE Trans. Magnetics**, v.32, n.3, p.1525-1528, May 1996.
- [20] GRCEV, L. D. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.11, n.2, p.815-823, Apr. 1996.
- [21] NEKHOUL, B. et al. A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.31, n.3, p.2150-2153, May 1995.
- [22] NEKHOUL, B. et al. Calculating the impedance of a grounding system. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.32, n.3, p.1509-1512, May 1996.
- [23] BRUNOTTE, X.; MEUNIER, G; BONIGIRAUD, J. P. Ship magnetizations modeling by finite element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.29, n.2, p.1970-1975, March 1993.
- [24] BRUNOTTE, X.; MEUNIER, G; IMHOFF, J. F. Finite element solution of undounded problems using transformation: a rigorous powerful and easy solution. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.25, n.2, p.1663-1666, March 1992.
- [25] DAWALIBI, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part I-single conductor. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.PWRD-1, n. 4, p.105-111, July 1986.
- [26] DAWALIBI, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part II-single conductor. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.PWRD-1, n.4, p.112-119, July 1986.

- [27] ADOLFATO, R.; BERNARDI, L; FELLIN, L. Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.151, n.3, p.1001-1009, July 2000.
- [28] VERMA, R; MUKHEDKAR, D. Impulse to impedance of buried ground wires. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.PAS-99, n.5, p.2003-2007, Sep.-Oct. 1980.
- [29] MAZZETTI, C.; VECA, G. M. Impulse behavior of grounding electrodes. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.PAS-102, n.9, p.3148-3156, 1986.
- [30] VELAZQUEZ, R; MUKHEDKAR, D. M. Analytical modelling of grounding electrodes transient behavior. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.PAS-103, n.6, p.1314-1322, 1984.
- [31] LORENTZOU, M. I.; HATZIARGYRIOU, N. D.; PAPADIAS, B. C. Time domain analysis of grounding electrodes impulse response. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.18, n.2, p.517-524, Apr. 2003.
- [32] MENTER, F. E.; GRCEV, L. D. EMPT-based model for grounding system analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.9, p.1838-1847, Oct. 1994.
- [33] MATTOS, M. A. F. Transitórios em malhas de terra. In: XVII SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Uberlândia, 2003.
- [34] CHRISTOPOULOS, C. **The transmission-line modeling method TLM**. New York: IEEE Press, 1995.
- [35] FERREIRA, G. **Modelagem numérica de problemas de compatibilidade eletromagnética utilizando TLM (Transmission-line modeling method)**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [36] FACCIONI, M. **Estudo da modelagem eletromagnética com o método das linhas de transmissão (TLM)**. 2001. Teses (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [37] CAIXETA, G. P. **Simulação computacional de descargas atmosféricas em estruturas de proteção visando análises de compatibilidade eletromagnética**. 2000. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp.
- [38] KRAUS, J. D. **Electromagnetics**. 2nd. ed. [S.l.]: McGraw-hill, 1988.
- [39] SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. New York: Dover, 1968.

- [40] RÜDENBERG, R. **Electrical shock waves in power systems**. New York: Harvard, 1968.
- [41] CHIEN-HSING, L.; SAKIS MELIOPOULOS, A. P. A comparison of IEC 479-1 and std 80 on grounding safety criteria. **Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)**, v.23, n.5, p.612-621, 1999.

Anexos

Anexo A

Tabela extraída da página 617 da referencia [41]

Table 2. Permissible Touch Voltages per IEEE Std 80, 1986 Edition, 50 kg Person, Probability of Ventricular Fibrillation 0.5%

Shock Duration	Soil Resistivity									
	10 ($\Omega \cdot m$)	50 ($\Omega \cdot m$)	100 ($\Omega \cdot m$)	200 ($\Omega \cdot m$)	500 ($\Omega \cdot m$)	1000 ($\Omega \cdot m$)	3000 ($\Omega \cdot m$)			
0.05 sec	526.9 V	559.2 V	599.7 V	680.6 V	923.4 V	1328.0 V	2946.6 V			
0.10 sec	372.5 V	395.4 V	424.0 V	481.3 V	652.9 V	939.1 V	2083.6 V			
0.15 sec	304.2 V	322.9 V	346.2 V	393.0 V	533.1 V	766.7 V	1701.2 V			
0.20 sec	263.4 V	279.6 V	299.8 V	340.3 V	461.7 V	664.0 V	1473.3 V			
0.25 sec	235.6 V	250.1 V	268.2 V	304.4 V	413.0 V	593.9 V	1317.8 V			
0.30 sec	215.1 V	228.3 V	244.8 V	277.9 V	377.0 V	542.2 V	1202.9 V			
0.35 sec	199.1 V	211.4 V	226.7 V	257.3 V	349.0 V	502.0 V	1113.7 V			
0.40 sec	186.3 V	197.7 V	212.0 V	240.6 V	326.5 V	469.5 V	1041.8 V			
0.45 sec	175.5 V	186.4 V	199.9 V	226.9 V	307.8 V	442.7 V	982.2 V			
0.50 sec	166.6 V	176.8 V	189.6 V	215.2 V	292.0 V	420.0 V	931.8 V			

Anexo B

Tabela extraída da página 618 da referencia [41]

Table 3. Permissible Step Voltages per IEEE Std 80, 1986 Edition, 50 kg Person, Probability of Ventricular Fibrillation 0.5%

Shock Duration	Soil Resistivity									
	10 ($\Omega \cdot m$)	50 ($\Omega \cdot m$)	100 ($\Omega \cdot m$)	200 ($\Omega \cdot m$)	500 ($\Omega \cdot m$)	1000 ($\Omega \cdot m$)	3000 ($\Omega \cdot m$)			
0.05 sec	551.1 V	680.6 V	842.5 V	1166.2 V	2137.3 V	3755.9 V	10230.1 V			
0.10 sec	389.7 V	481.3 V	595.7 V	824.6 V	1511.3 V	2655.8 V	7233.8 V			
0.15 sec	318.2 V	393.0 V	486.4 V	673.3 V	1234.0 V	2168.5 V	5906.4 V			
0.20 sec	275.6 V	340.3 V	421.2 V	583.1 V	1068.7 V	1877.9 V	5115.0 V			
0.25 sec	246.5 V	304.4 V	376.8 V	521.5 V	955.8 V	1679.7 V	4575.0 V			
0.30 sec	225.0 V	277.9 V	343.9 V	476.1 V	872.6 V	1533.3 V	4176.4 V			
0.35 sec	208.3 V	257.3 V	318.4 V	440.8 V	807.8 V	1419.6 V	3866.6 V			
0.40 sec	194.9 V	240.6 V	297.9 V	412.3 V	755.7 V	1327.9 V	3616.9 V			
0.45 sec	183.7 V	226.9 V	280.8 V	388.7 V	712.4 V	1252.0 V	3410.0 V			
0.50 sec	174.3 V	215.2 V	266.4 V	368.8 V	675.9 V	1187.7 V	3235.0 V			

Anexo C

Figura extraída da página 2056 da referencia [13]

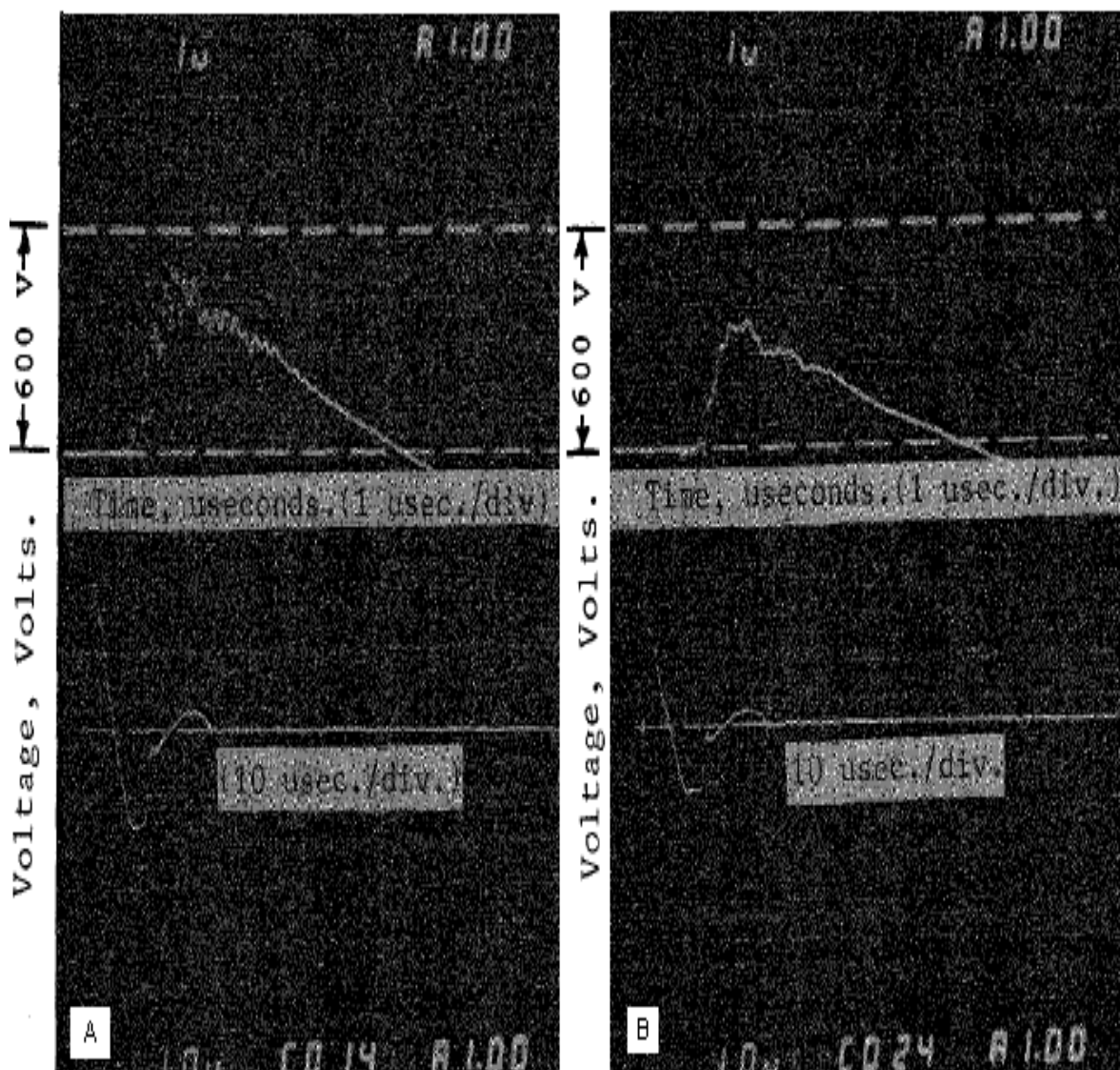


Fig:7. Oscillogram of voltage induced at current injection point-B.

Ponto A da Figura 4.12

Fig:8. Oscillogram of voltage induced at current injection point-C.

Ponto B da Figura 4.12